



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
Πολυτεχνική Σχολή
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

**ΧΩΡΟΧΡΟΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ, ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ
ΚΑΙ ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΞΗΡΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΛΕΚΑΝΗ
ΠΗΝΕΙΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**

Λάμπρος Βασιλειάδης

**Διδακτορική Διατριβή που υποβλήθηκε στο Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του
Πανεπιστημίου Θεσσαλίας**

Βόλος, Οκτώβριος 2010

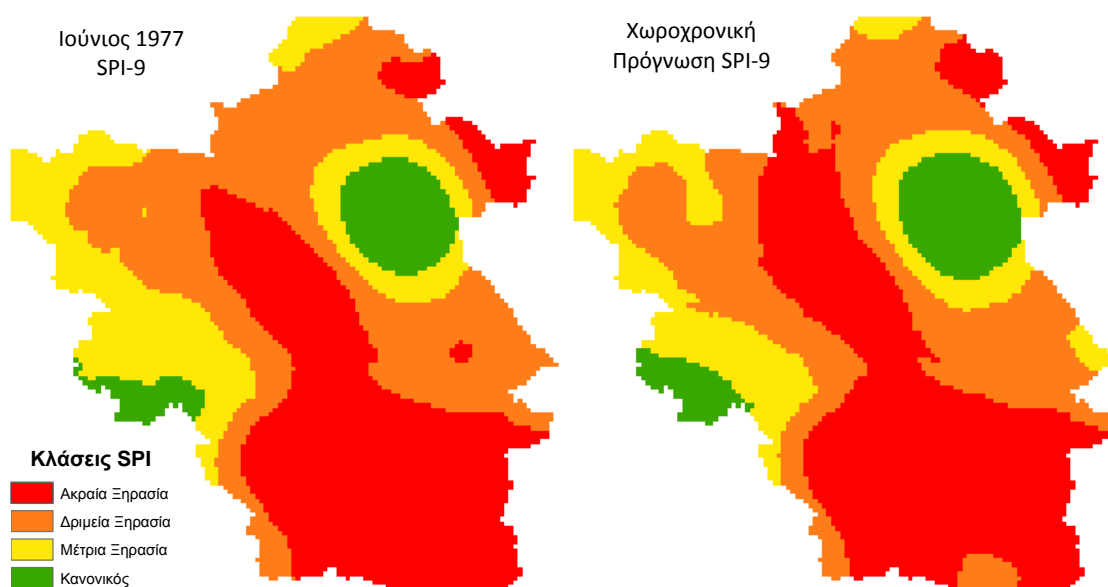


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

Πολυτεχνική Σχολή

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

**ΧΩΡΟΧΡΟΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ, ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ
ΚΑΙ ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΞΗΡΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΛΕΚΑΝΗ
ΠΗΝΕΙΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**



Λάμπρος Βασιλειάδης

Διδακτορική Διατριβή που υποβλήθηκε στο Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του
Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

Βόλος, Οκτώβριος 2010

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διατριβή αποτελεί επιστέγασμα μιας ερευνητικής προσπάθειας που αν και τυπικά κράτησε πέντε χρόνια ενσωματώνει εμπειρίες μιας δωδεκαετίας. Ως συμβασιούχος υπάλληλος στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας το καλοκαίρι του 1998, ήρθα σε πρώτη επαφή με τον άνθρωπο, προϊστάμενο μου τότε, Δρ. Αθανάσιο Λουκά που η γνωριμία μου μαζί του έπαιξε ένα τεράστιο ρόλο στη μετέπειτα πορεία μου στην έρευνα και στη ζωή. Αν και έχω χίλιους λόγους για να τον ευχαριστήσω όλα αυτά τα χρόνια της γνωριμίας μας, ας μου επιτρέψει να διαλέξω εκείνη την τόσο καθοριστική συζήτηση μας περί υδρολογίας με τα 'equations' όπου η ενασχόληση μου με το ερευνητικό πεδίο της υδρολογίας είχε ήδη δρομολογηθεί. Έτσι, η συνεργασία μου με τον κ. Α. Λουκά, από το 1998 έως το 2005, άνοιξε σε διάφορα πεδία της υδρολογίας μεταξύ των οποίων και η ξηρασία. Η έλλειψη ενός ολοκληρωμένου συστήματος πρόγνωσης και παρακολούθησης της ξηρασίας ήταν η αιτία που ασχολήθηκα με το θέμα αυτό, στοχεύοντας σε μια πιο ολοκληρωμένη θεώρηση. Η όλη προσπάθεια υπήρξε επίπονη και πάντα ανακάλυπτα ότι κάτι λείπει και μπορεί να βελτιωθεί. Κάθε σελίδα αυτής της διατριβής αντιπροσωπεύει, πλέον της ερευνητικής μου προσπάθειας για συνεισφορά στην επιστήμη με καινοτομία, σκέψεις και ιδέες, και μία ανάμνηση συνδεδεμένη με διαφορετικές εμπειρίες, φάσεις ζωής και τόπους διαβίωσης. Θέλω να πιστεύω ότι το τελικό αποτέλεσμα καλύπτει αυτό που είχα στο μυαλό μου ως συμβολή στην έρευνα.

Η διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε στο Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας από τον άνοιξη του 2005 έως το καλοκαίρι του 2010. Στο χρονικό αυτό διάστημα έλαβα πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση από αξιόλογους επιστήμονες, που επιβεβαίωσαν απρόσκοπτα με την υποστήριξή τους την ιδιότητα του «δασκάλου». Αυτούς τους αξιόλογους ανθρώπους θεωρώ χρέος μου να τους ευχαριστήσω ιδιαίτερα.

Επιβλέπων και καθοδηγητής των μεταπτυχιακών μου σπουδών ήταν ο κ. Αθανάσιος Λουκάς, Αναπληρωτής Καθηγητής του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Π.Θ., ο οποίος με συνόδευσε σε κάθε ερευνητική μου ανησυχία και συντέλεσε καθοριστικά στην ολοκλήρωση αυτής της διατριβής. Στη διάρκεια της συνεργασίας μας με καθοδήγησε σε ένα μονοπάτι ισορροπίας ανάμεσα στη δημιουργικότητα και τη μεθοδικότητα. Ο άνθρωπος αυτός με δίδαξε πραγματικά εντός και εκτός επιστημονικού πεδίου και τον θεωρώ ως υπόδειγμα δασκάλου και ανθρώπου προς μίμηση.

Αρωγός στην προσπάθειά μου υπήρξε επίσης ο κ. Νικήτας Μυλόπουλος, Αναπληρωτής Καθηγητής του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Π.Θ. και μέλος της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, άνθρωπος τον οποίο εκτιμώ ιδιαίτερα, καθώς μου μετέδιδε αδιαλείπτως τη γνώση και την εμπειρία του σε κάθε εξειδικευμένο θέμα και μου ασκούσε εποικοδομητική κριτική, αποτρέποντας με από λάθος κατευθύνσεις, όποτε αυτό χρειαζόταν. Πολύτιμη υπήρξε η συνεργασία μου με τον κ. Μαργαρίτη Βαφειάδη, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ και μέλος της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, ο οποίος με κατεύθυνε στο επιστημονικό πεδίο των χρονοσειρών και λειτούργησε συμβουλευτικά στην υλοποίηση της διατριβής. Ευχαριστώ επίσης τους κ. Γεώργιο Τσακίρη, Καθηγητή της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών Ε.Μ.Π., κ. Σταύρο Γιαννόπουλο, Καθηγητή του Τμήματος Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών Α.Π.Θ., κα. Μαρία Μιμίκου, Καθηγήτρια της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., και κα. Χαρά Μιχαλοπούλου, Επίκουρος Καθηγήτρια του Τμήματος Φυσικής Ε.Κ.Π.Α., οι οποίοι σε κάθε μας συζήτηση έστρεφαν το ενδιαφέρον μου προς διαφορετικά ερευνητικά πεδία και προήγαγαν την άψογη συνεργασία σε κάθε μας δραστηριότητα. Τέλος, από τον πανεπιστημιακό κύκλο δε θα μπορούσα να παραλείψω να

ευχαριστήσω τους φίλους και συνεργάτες μου Παντελή Σιδηρόπουλο, Μάριο Σπηλιωτόπουλο, Γιώργο Παπαϊωάννου και Χρυσόστομο Φαφούτη, συνοδοιπόρους στο μεγάλο αυτό ταξίδι.

Εκτός όμως από τους αξιόλογους αυτούς επιστήμονες, θα ήθελα να κάνω ιδιαίτερη μνεία σε κάποιους ξεχωριστούς και σημαντικούς για μένα ανθρώπους. Ευχαριστώ τους γονείς μου, Τάκη και Λόλα, οι οποίοι μου μεταλαμπάδευσαν τις αξίες τους ώστε μαζί με τη Βαγγελιώ να κάνω μια ευτυχισμένη οικογένεια, και τα παιδιά μου Δημήτρη και Μυρτώ που με κάνουν καλύτερο άνθρωπο και μου χαρίζουν ατελείωτες ώρες χαράς. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη σύντροφο μου Βαγγελιώ, που αποτελεί για μένα πηγή έμπνευσης και ζωής, που είναι η αιτία να θέλω να γίνομαι διαρκώς καλύτερος και που μοιράζεται μαζί μου κάθε ευτυχισμένη ή δύσκολη στιγμή σε όλη αυτή τη διαδρομή μου από τα φοιτητικά μας ακόμη χρόνια.

*Αφιερώνεται
Στη σύντροφο μου Βαγγελιώ*

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	i
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	v
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ	x
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	xv
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	xxi
ABSTRACT	xxiii
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1. Αντικείμενο της διατριβής	5
1.2. Διάρθρωση της διατριβής	6
1.3. Συμβολή της διατριβής και καινοτόμα σημεία	10
1.3.1. Ανάλυση των καινοτόμων στοιχείων	12
2. ΞΗΡΑΣΙΑ	17
2.1. Τύποι ξηρασίας	18
2.2. Χαρακτηριστικά της ξηρασίας	19
2.3. Δείκτες ξηρασίας	20
2.3.1. Μετεωρολογικοί δείκτες ξηρασίας	22
2.3.2. Γεωργικοί δείκτες ξηρασίας	26
2.3.3. Υδρολογικοί δείκτες ξηρασίας	28
2.3.4. Δείκτες ξηρασίας υδατικών συστημάτων	31
2.3.5. Σχολιασμός	33
2.4. Μεθοδολογία διακρίβωσης τύπων ξηρασίας	35
2.4.1. Μετεωρολογικός δείκτης ξηρασίας Standardized Precipitation Index, SPI	36
2.4.2. Υδρολογικοί δείκτες ξηρασίας	42
3. ΧΩΡΟΧΡΟΝΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΞΗΡΑΣΙΑΣ	49
3.1. Μέθοδοι χωρικής παρεμβολής	49
3.2. Μέθοδοι χωροχρονικής προσομοίωσης	52
3.3. Μέθοδοι χωροχρονικής προσομοίωσης και παρεμβολής δεικτών ξηρασίας	55
3.4. Γεωστατιστική	57
3.4.1. Γεωστατιστική προσέγγιση	58
3.4.2. Βαριόγραμμα – Ημιμεταβλητογράφημα	63
3.4.3. Βέλτιστη παρεμβολή Kriging	65
3.4.4. Βέλτιστη παρεμβολή Ordinary Kriging	69
3.4.5. Τύποι Ημιμεταβλητογραφήματος	71
3.5. Μεθοδολογία χωροχρονικής προσομοίωσης και παρεμβολής για το δείκτη ξηρασίας SPI	73
3.5.1. Μέθοδος Πολυγώνων Thiessen – Thiessen Polygons	74

3.5.2.	Μέθοδος Inverse Distance Weighting - IDW	75
3.5.3.	Μέθοδοι kriging	77
3.5.4.	Εφαρμογή χωρικών, γεωστατιστικών και συνδυαστικών μεθόδων	80
4.	ΧΩΡΟΧΡΟΝΙΚΗ ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΞΗΡΑΣΙΑΣ	85
4.1.	Εφαρμογές μηχανικής μάθησης στην πρόγνωση ξηρασίας	87
4.2.	Μέθοδοι μηχανικής μάθησης	90
4.2.1.	Ο αλγόριθμος των k πιο κοντινών γειτόνων (instance based algorithms)	91
4.2.2.	Παλινδρόμηση	92
4.2.3.	Λογιστική παλινδρόμηση	93
4.2.4.	Μοντέλα αυτοπαλινδρόμησης κινητού μέσου όρου ARMA/ARIMA	93
4.2.5.	Περιπτωσιακός λογισμός	94
4.2.6.	Δέντρα απόφασης	95
4.2.7.	Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα	95
4.2.8.	Γενετικοί Αλγόριθμοι	98
4.2.9.	Σύνοψη αλγόριθμων μηχανικής μάθησης	99
4.2.10.	Αλγόριθμοι αναφοράς	102
4.3.	Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα	102
4.3.1.	Αρχιτεκτονικές δικτύων	102
4.3.2.	Συναρτήσεις ενεργοποίησης	104
4.3.3.	Εκπαίδευση των τεχνητών νευρωνικών δικτύων	106
4.3.4.	Κανόνες εκπαίδευσης των τεχνητών νευρωνικών δικτύων	108
4.3.5.	Αλγόριθμος της οπίσθιας διάδοσης του σφάλματος	111
4.3.6.	Εκπαίδευση με επίβλεψη ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης	112
4.3.7.	Μέθοδοι Quasi-Newton	115
4.3.8.	Ρυθμός σύγκλισης των μεθόδων Quasi-Newton	120
4.4.	Μεθοδολογία χωροχρονικής προσομοίωσης και παρεμβολής για το δείκτη ξηρασίας SPI	125
4.4.1.	Gamma Test	126
4.4.2.	Επιλογή δεδομένων εισόδου	128
4.4.3.	Αρχιτεκτονική νευρωνικών δικτύων	131
4.4.4.	Προσέγγιση πολλαπλών χρονικών βημάτων πρόγνωσης	135
5.	ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΚΡΙΒΩΣΗ ΞΗΡΑΣΙΑΣ	141
5.1.	Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά	142
5.1.1.	Γεωμορφολογία	142
5.1.2.	Κλιματολογία	143
5.1.3.	Υδρογεωλογικά στοιχεία	145
5.1.4.	Αναπτυξιακή πορεία	146
5.2.	Υδατικοί πόροι	147
5.2.1.	Επιφανειακοί υδατικοί πόροι	147
5.2.2.	Υπόγειοι υδατικοί πόροι	149
5.2.3.	Ποιοτικά χαρακτηριστικά επιφανειακών και υπόγειων υδάτων	149
5.2.4.	Υδατικές ανάγκες	150
5.2.5.	Συνοπτική αναφορά των προβλημάτων	150
5.3.	Βάσεις Δεδομένων	151
5.3.1.	Σταθμοί μέτρησης βροχόπτωσης	151
5.3.2.	Σταθμοί μέτρησης θερμοκρασίας	152
5.3.3.	Επιφανειακές τιμές βροχόπτωσης και θερμοκρασίας	152

5.4.	Στατιστική Ανάλυση Χρονοσειρών	154
5.4.1.	Βροχόπτωση	156
5.4.2.	Θερμοκρασία	160
5.4.3.	Παροχές υδατορευμάτων	160
5.4.4.	Διατήρηση υδρόβιας ζωής - περιβάλλοντος	163
5.5.	Ανάλυση Υδατικού Ισοζυγίου	165
5.5.1.	Υφιστάμενο εκμεταλλεύσιμο υδατικό δυναμικό	165
5.5.2.	Υφιστάμενες απαιτήσεις σε νερό	168
5.5.3.	Υδατικό ισοζύγιο	168
5.5.4.	Συμπεράσματα	170
5.6.	Διακρίβωση ξηρασίας	170
5.6.1.	Αναγνώριση υδρολογικής ξηρασίας	171
5.6.2.	Αναγνώριση ξηρασίας υδατικών συστημάτων	176
5.6.3.	Συμπεράσματα	179
6.	ΧΩΡΟΧΡΟΝΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΞΗΡΑΣΙΑΣ	181
6.1.	Βροχομετρικοί Σταθμοί	181
6.2.	Υπολογισμός χρονοσειρών SPI	185
6.2.1.	Στοχαστικό μοντέλο βροχόπτωσης	185
6.2.2.	Έλεγχος προσαρμογής των παραμέτρων της Gamma κατανομής	191
6.3.	Αποτελέσματα χωρικών μεθόδων για χωροχρονική προσομοίωση και παρεμβολή του δείκτη ξηρασίας SPI	194
6.3.1.	Χρονική κλίμακα SPI-3μηνών	197
6.3.2.	Χρονική κλίμακα SPI-6μηνών	202
6.3.3.	Χρονική κλίμακα SPI-12μηνών	208
6.3.4.	Ψηφιακοί χάρτες ξηρασίας	213
6.3.5.	Συμπεράσματα εφαρμογής χωρικών μεθόδων	222
7.	ΧΡΟΝΙΚΗ ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΞΗΡΑΣΙΑΣ	225
7.1.	Εφαρμογή του Gamma Test για επιλογή δεδομένων εισόδου	225
7.1.1.	Αναγνώριση των χρόνων υστέρησης	226
7.1.2.	Εύρεση του πλήθους των δεδομένων	227
7.1.3.	Εύρεση του βέλτιστου συνδυασμού του μητρώου εισόδου	229
7.2.	Εφαρμογή Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων	232
7.2.1.	Γενίκευση μέσω της διαδικασίας εκπαίδευσης	232
7.2.2.	Γενίκευση μέσω δειγματοληψίας των δεδομένων εισόδου	234
7.2.3.	Εφαρμογή νευρωνικών δικτύων	236
7.3.	Χρονική πρόγνωση SPI-3μηνών	240
7.3.1.	Χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$, SPI-3 _{$t+1$}	240
7.3.2.	Χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+2$, SPI-3 _{$t+2$}	242
7.3.3.	Χρονικά βήματα πρόγνωσης μεγαλύτερα από 2 μήνες του SPI-3	245
7.4.	Χρονική πρόγνωση SPI-6μηνών	245
7.4.1.	Χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$, SPI-6 _{$t+1$}	245
7.4.2.	Χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+2$, SPI-6 _{$t+2$}	247
7.4.3.	Χρονικά βήματα πρόγνωσης μεγαλύτερα από 2 μήνες του SPI-6	249
7.5.	Χρονική πρόγνωση SPI-9μηνών	251

7.5.1.	Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+1, SPI-9 _{t+1}	251
7.5.2.	Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+2, SPI-9 _{t+2}	253
7.5.3.	Χρονικά βήματα πρόγνωσης μεγαλύτερα από 2 μήνες του SPI-9	255
7.6.	Χρονική πρόγνωση SPI-12μηνών	256
7.6.1.	Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+1, SPI-12 _{t+1}	257
7.6.2.	Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+2, SPI-12 _{t+2}	258
7.6.3.	Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+3, SPI-12 _{t+3}	261
7.6.4.	Χρονικά βήματα πρόγνωσης μεγαλύτερα από 3 μήνες του SPI-12	262
7.7.	Χρονική πρόγνωση SPI-24μηνών	263
7.7.1.	Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+1, SPI-24 _{t+1}	264
7.7.2.	Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+2, SPI-24 _{t+2}	266
7.7.3.	Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+3, SPI-24 _{t+3}	266
7.7.4.	Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+4, SPI-24 _{t+4}	269
7.7.5.	Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+5, SPI-24 _{t+5}	270
7.7.6.	Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+6, SPI-24 _{t+6}	270
7.8.	Σχολιασμός χρονικής πρόγνωσης SPI	274
8.	ΧΩΡΟΧΡΟΝΙΚΗ ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΞΗΡΑΣΙΑΣ	277
8.1.	Εφαρμογή αναδρομικών νευρωνικών δικτύων RNN	277
8.2.	Χωροχρονική πρόγνωση SPI-3μηνών	280
8.2.1.	Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+1, SPI-3 _{t+1}	280
8.2.2.	Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+2, SPI-3 _{t+2}	281
8.2.3.	Σχολιασμός χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-3	283
8.3.	Χωροχρονική πρόγνωση SPI-6μηνών	285
8.3.1.	Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+1, SPI-6 _{t+1}	285
8.3.2.	Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+2, SPI-6 _{t+2}	287
8.3.3.	Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+3, SPI-6 _{t+3}	289
8.3.4.	Σχολιασμός χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-6	289
8.4.	Χωροχρονική πρόγνωση SPI-9μηνών	292
8.4.1.	Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+1, SPI-9 _{t+1}	292
8.4.2.	Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+2, SPI-9 _{t+2}	294
8.4.3.	Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+3, SPI-9 _{t+3}	296
8.4.4.	Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+4, SPI-9 _{t+4}	296
8.4.5.	Σχολιασμός χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-9	298
8.5.	Χωροχρονική πρόγνωση SPI-12μηνών	300
8.5.1.	Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+1, SPI-12 _{t+1}	300
8.5.2.	Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+2, SPI-12 _{t+2}	303
8.5.3.	Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+3, SPI-12 _{t+3}	304
8.5.4.	Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+4, SPI-12 _{t+4}	304
8.5.5.	Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+5, SPI-12 _{t+5}	306
8.5.6.	Σχολιασμός χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-12	308
8.6.	Χωροχρονική πρόγνωση SPI-24μηνών	310
8.6.1.	Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+1, SPI-24 _{t+1}	310
8.6.2.	Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+2, SPI-24 _{t+2}	312
8.6.3.	Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+3, SPI-24 _{t+3}	313
8.6.4.	Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+4, SPI-24 _{t+4}	315

8.6.5.	Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+5, SPI-24 _{t+5}	315
8.6.6.	Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+6, SPI-24 _{t+6}	317
8.6.7.	Σχολιασμός χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-24	319
8.7.	Συμπεράσματα χωροχρονικής πρόγνωσης SPI	319
9.	ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΧΩΡΟΧΡΟΝΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ ΞΗΡΑΣΙΑΣ	323
9.1.	Υβριδικό χωροχρονικό σύστημα πρόγνωσης ξηρασίας	323
9.2.	Αξιολόγηση υβριδικού συστήματος πρόγνωσης	325
9.2.1.	Αξιολόγηση προγνώσεων SPI-3μηνών	326
9.2.2.	Αξιολόγηση προγνώσεων SPI-6μηνών	327
9.2.3.	Αξιολόγηση προγνώσεων SPI-9μηνών	332
9.2.4.	Αξιολόγηση προγνώσεων SPI-12μηνών	336
9.2.5.	Αξιολόγηση προγνώσεων SPI-24μηνών	339
9.3.	Εκτίμηση επιφανειακών τιμών SPI υδρολογικής λεκάνης Πηνειού ποταμού	345
9.3.1.	Εκτίμηση επιφανειακών τιμών SPI-3μηνών	346
9.3.2.	Εκτίμηση επιφανειακών τιμών SPI-6μηνών	348
9.3.3.	Εκτίμηση επιφανειακών τιμών SPI-9μηνών	350
9.3.4.	Εκτίμηση επιφανειακών τιμών SPI-12μηνών	353
9.3.5.	Εκτίμηση επιφανειακών τιμών SPI-24μηνών	354
9.4.	Συμπεράσματα συστήματος έγκαιρης προειδοποίησης ξηρασίας	358
10.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	361
10.1.	Γενικά συμπεράσματα διατριβής	361
10.2.	Ειδικά συμπεράσματα	363
10.3.	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	364
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	367
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	393

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1. Δείκτες ξηρασίας και τα χαρακτηριστικά τους από Iglesias et al., [2007a].	22
Πίνακας 2.2. Κατηγοριοποίηση του καιρού σύμφωνα με τον δείκτη ξηρασίας SPI.	37
Πίνακας 4.1. Σύνοψη αλγορίθμων της μηχανικής μάθησης.	100
Πίνακας 5.1. Σταθμοί μέτρησης βροχόπτωσης στη ευρύτερη περιοχή μελέτης.	151
Πίνακας 5.2. Σταθμοί μέτρησης βροχόπτωσης στη ευρύτερη περιοχή μελέτης.	153
Πίνακας 5.3. Στατιστικά χαρακτηριστικά της μέσης επιφανειακής υετόπτωσης (σε mm) της υδρολογικής λεκάνης Πηνειού ποταμού	156
Πίνακας 5.4. Στατιστικά χαρακτηριστικά της μέσης επιφανειακής θερμοκρασίας (σε °C) της Θεσσαλίας.	160
Πίνακας 5.5. Μέση ετήσια προσφορά νερού ανά πηγή υδροδότησης και υπολεκάνη (σε hm ³).	168
Πίνακας 5.6. Μέση ετήσια ζήτηση νερού ανά χρήση και λεκάνη (σε hm ³).	169
Πίνακας 5.7. Ετήσιο υδατικό ισοζύγιο του στατιστικά μέσου υδρολογικού έτους (σε hm ³)	169
Πίνακας 5.8. Χαρακτηριστικά λεκάνης απορροής Λάρισας.	171
Πίνακας 5.9. Στατιστικά αποτελέσματα υδρολογικής προσομοίωσης	172
Πίνακας 5.10. Συντελεστής συσχέτισης, R, της υδρολογικών δεικτών απορροής και εδαφικής υγρασίας με τον δείκτη ξηρασίας SPI για πολλαπλές χρονικές κλίμακες στη λεκάνη απορροής Λάρισα	173
Πίνακας 5.11. Συντελεστής συσχέτισης, R, της υδρολογικών δεικτών απορροής και εδαφικής υγρασίας με τον δείκτη ξηρασίας SPI για πολλαπλές χρονικές κλίμακες στη λεκάνη απορροής Λάρισα	173
Πίνακας 6.1. Σταθμοί βροχόπτωσης υδρολογικής λεκάνης Πηνειού	182
Πίνακας 6.2. Αποτελέσματα στατιστικών παραμέτρων και κριτηρίων των συνθετικών μηνιαίων χρονοσειρών βροχόπτωσης – Βροχομετρικός Σταθμός Λάρισας	190
Πίνακας 6.3. Στατιστικά κριτήρια εκτίμησης παρατηρούμενων χρονοσειρών SPI και χρονοσειρών SPI υπολογισμένων με τη χρήση της διάμεσου τιμής των παραμέτρων, α και β, της gamma κατανομής των στοχαστικά παραγόμενων χρονοσειρών βροχόπτωσης για την περίοδο Οκτ. 1960 – Σεπ. 2002.	193
Πίνακας 6.4. Ποιοτικά κριτήρια εκτίμησης χωρικών μεθόδων όπου διάφορες χωρικές μέθοδοι υπερτερούν των άλλων μεθόδων για τα εξεταζόμενα στατιστικά κριτήρια του SPI-3 στους σταθμούς ανάπτυξης με την τεχνική cross-validation: α)Αριθμός μηνών και β) ποσοστό μηνών της περιόδου Δεκ 1960 – Σεπ 2002.	199
Πίνακας 6.5. Ποιοτικά κριτήρια εκτίμησης χωρικών μεθόδων όπου διάφορες χωρικές μέθοδοι υπερτερούν των άλλων μεθόδων για τα εξεταζόμενα στατιστικά κριτήρια του SPI-3 στους σταθμούς πιστοποίησης: α)Αριθμός μηνών και β) ποσοστό μηνών της περιόδου Δεκ 1960 – Σεπ 2002.	201
Πίνακας 6.6. Βαθμός απόδοσης Eff χωρικών μεθόδων για τη χρονική προσομοίωση του SPI-3 των σταθμών πιστοποίησης της περιόδου Δεκ 1960 – Σεπ 2002.	202
Πίνακας 6.7. Στατιστικά αποτελέσματα χωρικών μεθόδων για τη χρονική προσομοίωση του SPI-3 των σταθμών πιστοποίησης της περιόδου Δεκ 1960 – Σεπ 2002.	202
Πίνακας 6.8. Ποιοτικά κριτήρια εκτίμησης χωρικών μεθόδων α)Αριθμός μηνών όπου διάφορες χωρικές μέθοδοι υπερτερούν των άλλων μεθόδων για τα εξεταζόμενα στατιστικά κριτήρια του SPI-6 στους σταθμούς ανάπτυξης με την τεχνική cross-validation και β) ποσοστό μηνών της περιόδου Δεκ 1960 – Σεπ 2002.	204
Πίνακας 6.9. Ποιοτικά κριτήρια εκτίμησης χωρικών μεθόδων α)Αριθμός μηνών και β) ποσοστό μηνών της περιόδου Δεκ 1960 – Σεπ 2002, όπου διάφορες χωρικές μέθοδοι υπερτερούν των άλλων μεθόδων για τα εξεταζόμενα στατιστικά κριτήρια του SPI-6 στους σταθμούς πιστοποίησης.	206

Πίνακας 6.10. Βαθμός απόδοσης Eff χωρικών μεθόδων για τη χρονική προσομοίωση των σταθμών πιστοποίησης της περιόδου Δεκ 1960 – Σεπ 2002. _____	207
Πίνακας 6.11. Στατιστικά αποτελέσματα χωρικών μεθόδων για τη χρονική προσομοίωση των σταθμών πιστοποίησης της περιόδου Δεκ 1960 – Σεπ 2002. _____	208
Πίνακας 6.12. Ποιοτικά κριτήρια εκτίμησης χωρικών μεθόδων α)Αριθμός μηνών όπου διάφορες χωρικές μέθοδοι υπερτερούν των άλλων μεθόδων για τα εξεταζόμενα στατιστικά κριτήρια για τους σταθμούς ανάπτυξης με την τεχνική cross-validation και β) ποσοστό μηνών της περιόδου Δεκ 1960 – Σεπ 2002. _____	209
Πίνακας 6.13. Ποιοτικά κριτήρια εκτίμησης χωρικών μεθόδων α)Αριθμός μηνών όπου διάφορες χωρικές μέθοδοι υπερτερούν των άλλων μεθόδων για τα εξεταζόμενα στατιστικά κριτήρια για τους σταθμούς πιστοποίησης και β) ποσοστό μηνών της περιόδου Σεπ 1961 – Σεπ 2002. _____	211
Πίνακας 6.14. Βαθμός απόδοσης Eff χωρικών μεθόδων για τη χρονική προσομοίωση του SPI-12 στους σταθμούς πιστοποίησης της περιόδου Σεπ 1961 – Σεπ 2002. _____	213
Πίνακας 6.15. Στατιστικά αποτελέσματα χωρικών μεθόδων για τη χρονική προσομοίωση του SPI-12 στους σταθμούς πιστοποίησης της περιόδου Σεπ 1961 – Σεπ 2002. _____	213
Πίνακας 6.16. Στατιστικά χαρακτηριστικά των 20 δριμύτερων μηνών με βάση τη μέση δριμύτητα ξηρασίας των σταθμούς ανάπτυξης της περιόδου Οκτ 1960 – Σεπ 2002. _____	214
Πίνακας 6.17. Στατιστικά χαρακτηριστικά των 20 χωρικά δριμύτερων μηνών με βάση τον αριθμό των σταθμών ανάπτυξης που πλήττονται από ξηρασία για την περίοδο Οκτ 1960 – Σεπ 2002. _____	216
Πίνακας 6.18. Στατιστικά αποτελέσματα ψηφιακών χαρτών ξηρασίας του SPI-6 για το μήνα Μάρτιος 1990. _____	219
Πίνακας 6.19. Ποσοστό έκτασης (%) υδρολογικής λεκάνης Πηνειού ποταμού που πλήττεται από ξηρασία για τους οκτώ χωρικούς χάρτες του SPI-6 του μήνα Μάρτιος 1990. _____	219
Πίνακας 6.20. Χαρακτηριστικά ιστορικών γεγονότων ξηρασίας για τους χωρικούς χάρτες της μεθόδου SKIm_R του δείκτη ξηρασίας SPI-9. _____	221
Πίνακας 7.1. Βέλτιστος αριθμός χρόνων υστέρησης που αναγνωρίστηκαν με την τεχνική της αυξανόμενης διάστασης μητρώου για χρονικό βήμα πρόβλεψης t+1 _____	227
Πίνακας 7.2. Τιμές των συντελεστών που απαιτούνται για την εφαρμογή των γενετικών αλγορίθμων	230
Πίνακας 7.3. Τελικά χαρακτηριστικά μητρώου εισόδου νευρωνικών δικτύων _____	231
Πίνακας 7.4. Βαθμός απόδοσης Eff τεχνικών γενίκευσης εκπαίδευσης και δειγματοληψίας του σετ ελέγχου της περιόδου ανάπτυξης για τους 48 σταθμούς ανάπτυξης στο χρονικό βήμα πρόγνωσης t+1 _____	236
Πίνακας 7.5. Ποιοτικός πίνακας αξιολόγησης πρόγνωσης συμβάντων ξηρασίας ($SPI \leq -1$). _____	237
Πίνακας 7.6. Στατιστικά αποτελέσματα πρόγνωσης $SPI-3_{t+1}$ για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης _____	242
Πίνακας 7.7. Ποιοτικός πίνακας αξιολόγησης πρόγνωσης συμβάντων ξηρασίας ($SPI \leq -1$). _____	242
Πίνακας 7.8. Στατιστικά αποτελέσματα ποιοτικής πρόγνωσης $SPI-3_{t+1}$ για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης _____	242
Πίνακας 7.9. Στατιστικά αποτελέσματα πρόγνωσης $SPI-6_{t+1}$ για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης _____	246
Πίνακας 7.10. Ποιοτικός πίνακας αξιολόγησης πρόγνωσης συμβάντων ξηρασίας για $SPI-6_{t+1}$ ($SPI \leq -1$). _____	246
Πίνακας 7.11. Στατιστικά αποτελέσματα ποιοτικής πρόγνωσης $SPI-6_{t+1}$ για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης _____	247
Πίνακας 7.12. Στατιστικά αποτελέσματα πρόγνωσης $SPI-9_{t+1}$ για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης _____	252
Πίνακας 7.13. Στοιχεία του ποιοτικού πίνακα αξιολόγησης πρόγνωσης συμβάντων ξηρασίας $SPI-9_{t+1}$. _____	252

Πίνακας 7.14. Στατιστικά αποτελέσματα ποιοτικής πρόγνωσης SPI-9 _{t+1} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης _____	252
Πίνακας 7.15. Στατιστικά αποτελέσματα πρόγνωσης SPI-12 _{t+1} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης _____	257
Πίνακας 7.16. Ποιοτικός πίνακας αξιολόγησης πρόγνωσης συμβάντων ξηρασίας για SPI-12 _{t+1} (SPI≤-1). _____	258
Πίνακας 7.17. Στατιστικά αποτελέσματα ποιοτικής πρόγνωσης SPI-12 _{t+1} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης _____	258
Πίνακας 7.18. Στατιστικά αποτελέσματα πρόγνωσης SPI-24 _{t+1} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης _____	264
Πίνακας 7.19. Ποιοτικός πίνακας αξιολόγησης πρόγνωσης συμβάντων ξηρασίας για SPI-24 _{t+1} (SPI≤-1). _____	265
Πίνακας 7.20. Στατιστικά αποτελέσματα ποιοτικής πρόγνωσης SPI-24 _{t+1} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης _____	266
Πίνακας 8.1. Στατιστικά αποτελέσματα χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-3 _{t+1} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης _____	281
Πίνακας 8.2. Στατιστικά αποτελέσματα ποιοτικής χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-3 _{t+1} συμβάντων ξηρασίας (SPI≤-1) για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης _____	281
Πίνακας 8.3. Στατιστικά αποτελέσματα χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-6 _{t+1} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης _____	286
Πίνακας 8.4. Στατιστικά αποτελέσματα ποιοτικής χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-6 _{t+1} συμβάντων ξηρασίας (SPI≤-1) για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης _____	286
Πίνακας 8.5. Στατιστικά αποτελέσματα χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-9 _{t+1} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης _____	293
Πίνακας 8.6. Στατιστικά αποτελέσματα ποιοτικής χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-9 _{t+1} συμβάντων ξηρασίας (SPI≤-1) για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης _____	293
Πίνακας 8.7. Στατιστικά αποτελέσματα χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-12 _{t+1} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης _____	301
Πίνακας 8.8. Στατιστικά αποτελέσματα ποιοτικής χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-12 _{t+1} συμβάντων ξηρασίας (SPI≤-1) για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης _____	301
Πίνακας 8.9. Στατιστικά αποτελέσματα χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-24 _{t+1} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης _____	310
Πίνακας 8.10. Στατιστικά αποτελέσματα ποιοτικής χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-24 _{t+1} συμβάντων ξηρασίας (SPI≤-1) για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης _____	312
Πίνακας 9.1. Στατιστικά κριτήρια εκτίμησης μεθόδων πρόγνωσης για χωρική παρεμβολή των σταθμών ανάπτυξης και πιστοποίησης της περιόδου Οκτ 1962 – Σεπ 2002. _____	326

Πίνακας 9.2. Στατιστικά κριτήρια εκτίμησης μεθόδων πρόγνωσης για χωρική παρεμβολή των επιλεγμένων γεγονότων ξηρασίας του SPI-3 στους σταθμούς ανάπτυξης.	327
Πίνακας 9.3. Στατιστικά χαρακτηριστικά των μηνών του SPI-3 επιλέχθηκαν για θεματική απεικόνιση των προγνώσεων της υβριδικής μεθόδου RNN στους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.	327
Πίνακας 9.4. Χαρακτηριστικά ψηφιακών χαρτών παρατηρημένων γεγονότων ξηρασίας και προγνώσεων με τη μέθοδο RNN του δείκτη ξηρασίας SPI-3.	329
Πίνακας 9.5. Στατιστικά κριτήρια εκτίμησης μεθόδων πρόγνωσης για χωρική παρεμβολή των προγνώσεων του SPI-6 στους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης της περιόδου Οκτ 1962 – Σεπ 2002.	330
Πίνακας 9.6. Στατιστικά κριτήρια εκτίμησης μεθόδων πρόγνωσης για χωρική παρεμβολή των επιλεγμένων γεγονότων ξηρασίας του SPI-6 στους σταθμούς ανάπτυξης.	330
Πίνακας 9.7. Στατιστικά χαρακτηριστικά των μηνών του SPI-6 επιλέχθηκαν για θεματική απεικόνιση των προγνώσεων της υβριδικής μεθόδου RNN στους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.	331
Πίνακας 9.8. Στατιστικά και χωρικά χαρακτηριστικά ψηφιακών χαρτών παρατηρημένων γεγονότων ξηρασίας και προγνώσεων με τη μέθοδο RNN του δείκτη ξηρασίας SPI-6.	331
Πίνακας 9.9. Στατιστικά κριτήρια εκτίμησης μεθόδων πρόγνωσης για χωρική παρεμβολή των προγνώσεων του SPI-9 στους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης της περιόδου Οκτ 1962 – Σεπ 2002.	333
Πίνακας 9.10. Στατιστικά κριτήρια εκτίμησης μεθόδων πρόγνωσης για χωρική παρεμβολή των επιλεγμένων γεγονότων ξηρασίας του SPI-9 στους σταθμούς ανάπτυξης.	334
Πίνακας 9.11. Στατιστικά χαρακτηριστικά των μηνών του SPI-9 επιλέχθηκαν για θεματική απεικόνιση των προγνώσεων της υβριδικής μεθόδου RNN στους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.	334
Πίνακας 9.12. Στατιστικά και χωρικά χαρακτηριστικά ψηφιακών χαρτών παρατηρημένων γεγονότων ξηρασίας και προγνώσεων με τη μέθοδο RNN του δείκτη ξηρασίας SPI-9.	336
Πίνακας 9.13. Στατιστικά κριτήρια εκτίμησης μεθόδων πρόγνωσης για χωρική παρεμβολή των προγνώσεων του SPI-12 στους σταθμούς της περιόδου Οκτ 1962 – Σεπ 2002.	337
Πίνακας 9.14. Στατιστικά κριτήρια εκτίμησης μεθόδων πρόγνωσης για χωρική παρεμβολή των επιλεγμένων γεγονότων ξηρασίας του SPI-12 στους σταθμούς ανάπτυξης.	338
Πίνακας 9.15. Στατιστικά χαρακτηριστικά των μηνών του SPI-12 επιλέχθηκαν για θεματική απεικόνιση των προγνώσεων της υβριδικής μεθόδου RNN στους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.	338
Πίνακας 9.16. Στατιστικά και χωρικά χαρακτηριστικά ψηφιακών χαρτών παρατηρημένων γεγονότων ξηρασίας και προγνώσεων με τη μέθοδο RNN του δείκτη ξηρασίας SPI-12.	339
Πίνακας 9.17. Στατιστικά κριτήρια εκτίμησης μεθόδων πρόγνωσης για χωρική παρεμβολή των προγνώσεων του SPI-24 στους σταθμούς ανάπτυξης της περιόδου Οκτ 1962 – Σεπ 2002.	341
Πίνακας 9.18. Στατιστικά κριτήρια εκτίμησης μεθόδων πρόγνωσης για χωρική παρεμβολή των επιλεγμένων γεγονότων ξηρασίας του SPI-24 στους σταθμούς ανάπτυξης.	342
Πίνακας 9.19. Στατιστικά χαρακτηριστικά των μηνών του SPI-24 επιλέχθηκαν για θεματική απεικόνιση των προγνώσεων της υβριδικής μεθόδου RNN στους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.	343
Πίνακας 9.20. Στατιστικά και χωρικά χαρακτηριστικά ψηφιακών χαρτών παρατηρημένων γεγονότων ξηρασίας και προγνώσεων με τη μέθοδο RNN του δείκτη ξηρασίας SPI-24.	345
Πίνακας 9.21. Συνολικοί μήνες ξηρασίας για διάφορες κλάσεις του SPI-3 στην υδρολογική λεκάνη Πηνειού ποταμού και μήνες ξηρασίας ως ποσοστό των συνολικών 470 μηνών.	347
Πίνακας 9.22. Στατιστικά ποσοτικά και ποιοτικά αποτελέσματα επιφανειακών τιμών πρόγνωσης SPI-3 _{t+1} υδρολογικής λεκάνης Πηνειού ποταμού	347
Πίνακας 9.23. Συνολικοί μήνες ξηρασίας για διάφορες κλάσεις του SPI-6 στην υδρολογική λεκάνη Πηνειού ποταμού και μήνες ξηρασίας ως ποσοστό των συνολικών 470 μηνών.	348
Πίνακας 9.24. Στατιστικά ποσοτικά και ποιοτικά αποτελέσματα επιφανειακών τιμών πρόγνωσης SPI-6 υδρολογικής λεκάνης Πηνειού ποταμού	349
Πίνακας 9.25. Συνολικοί μήνες ξηρασίας για διάφορες κλάσεις του SPI-9 στην υδρολογική λεκάνη Πηνειού ποταμού και μήνες ξηρασίας ως ποσοστό των συνολικών 470 μηνών.	351

Πίνακας 9.26. Στατιστικά ποσοτικά και ποιοτικά αποτελέσματα επιφανειακών τιμών πρόγνωσης SPI-9 υδρολογικής λεκάνης Πηνειού ποταμού. _____	351
Πίνακας 9.27. Συνολικοί μήνες ξηρασίας για διάφορες κλάσεις του SPI-12 στην υδρολογική λεκάνη Πηνειού ποταμού και μήνες ξηρασίας ως ποσοστό των συνολικών 470 μηνών. _____	354
Πίνακας 9.28. Στατιστικά ποσοτικά και ποιοτικά αποτελέσματα επιφανειακών τιμών πρόγνωσης SPI-12 υδρολογικής λεκάνης Πηνειού ποταμού. _____	356
Πίνακας 9.29. Συνολικοί μήνες ξηρασίας για διάφορες κλάσεις του SPI-24 στην υδρολογική λεκάνη Πηνειού ποταμού και μήνες ξηρασίας ως ποσοστό των συνολικών 461 μηνών. _____	357
Πίνακας 9.30. Στατιστικά ποσοτικά και ποιοτικά αποτελέσματα επιφανειακών τιμών πρόγνωσης SPI-24 υδρολογικής λεκάνης Πηνειού ποταμού. _____	359

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1. Τύποι ξηρασίας από Iglesias et al., [2007a].	19
Σχήμα 2.2. Η μέθοδος run και τα χαρακτηριστικά της μεθόδου.	29
Σχήμα 2.3. Συνάρτηση πυκνότητας – πιθανότητας της κατανομής Gamma για διάφορες τιμές της παραμέτρου α και $\beta = 1$.	39
Σχήμα 2.4. Μετασηματισμός ίσης πιθανότητας από Gamma κατανομή σε τυπική κανονική κατανομή	41
Σχήμα 3.1. Αρχιτεκτονική της μεθοδολογίας [Βασιλειάδης και Λουκάς, 2006]	54
Σχήμα 3.2. Το ζεύγος των σημείων (x_i, y_i) σε ένα διάγραμμα διασποράς.	62
Σχήμα 3.3. Τα πέντε συνηθέστερα μοντέλα ημιμεταβλητογραφήματος.	72
Σχήμα 3.4. Χαρακτηριστικά του ημιμεταβλητογραφήματος (πειραματικού ή μαθηματικού ομοιώματος).	73
Σχήμα 3.5. Η μέθοδος των πολυγώνων Thiessen	75
Σχήμα 3.6. Η επίδραση της δύναμης στη μέθοδο IDW (διάγραμμα βάρους – απόστασης)	77
Σχήμα 3.7. Διάγραμμα ροής της μεθόδου Simple Kriging with Varying Local Means, SKIm, σε συνδυασμό με παλινδρόμηση.	80
Σχήμα 4.1. Οι κατηγορίες της μηχανικής μάθησης.	91
Σχήμα 4.2. Ο βιολογικός και τεχνητός νευρώνας.	96
Σχήμα 4.3. Ο τεχνητός νευρώνας	96
Σχήμα 4.4. Παράδειγμα τοπολογίας perceptron.	97
Σχήμα 4.5. Παράδειγμα τοπολογίας MLP.	98
Σχήμα 4.6. Διάγραμμα ροής ενός απλού γενετικού αλγόριθμου.	99
Σχήμα 4.7. Αρχιτεκτονικοί τύποι νευρωνικών δικτύων α) εμπρόσθια τροφοδοτούμενο ή ακυκλικό δίκτυο με ένα μονοεπίπεδο από νευρώνες, β) ενός πολυεπίπεδου perceptron με δύο κρυφά επίπεδα, γ) αναδρομικό δίκτυο χωρίς βρόγχους αυτοανάδρασης και κρυφούς νευρώνες, και δ) αναδρομικό δίκτυο με κρυφούς νευρώνες τύπου Elman.	105
Σχήμα 4.8. Σιγμοειδής συνάρτηση.	106
Σχήμα 4.9. Οι διαδικασίες εκπαίδευσης των νευρωνικών δικτύων.	107
Σχήμα 4.10. Εκπαίδευση με επίβλεψη των νευρωνικών δικτύων.	108
Σχήμα 4.11. (α) Σωστή προσαρμογή δεδομένων (καλή γενίκευση) και (β) Υπερπροσαρμοσμένα δεδομένα (κακή γενίκευση).	110
Σχήμα 4.12. Ρυθμός σύγκλισης των μεθόδων (α) απότομης καθόδου, (β) απότομης καθόδου με ορμή, (γ) Συζυγών κλίσεων και δ) Quasi-Newton	116
Σχήμα 4.13. Το Gamma test.	127
Σχήμα 4.14. Ο γενετικός αλγόριθμος του ρυθμού καταλληλότητας της σταθεράς Gamma statistic, Γ.	131
Σχήμα 4.15. Ευθεία πρόγνωση πολλαπλών χρονικών βημάτων με ANNs πολλαπλών εξόδων (direct multi step forecasting).	136
Σχήμα 4.16. Ευθεία πρόγνωση ενός χρονικού βήματος με ANNs μίας εξόδου (independent direct step forecasting for multiple targets).	137
Σχήμα 4.17. Επαναληπτική μέθοδος πρόγνωσης του χρονικού βήματος t+2.	138
Σχήμα 4.18. Γενική δομή των χωροχρονικών αναδρομικών νευρωνικών δικτύων RNN τύπου Elman.	140
Σχήμα 5.1. Υδατικό διαμέρισμα Θεσσαλίας και λεκάνη απορροής του Πηνειού ποταμού.	142
Σχήμα 5.2. Ο δυτικός (μπλε) και ανατολικός (κόκκινο) υδροφορέας του Πηνειού ποταμού.	146
Σχήμα 5.3. Κύριες υπολεκάνες του Πηνειού ποταμού.	148
Σχήμα 5.4. Σταθμοί μέτρησης βροχόπτωσης	152

Σχήμα 5.5. Σταθμοί μέτρησης θερμοκρασίας.	153
Σχήμα 5.6. Γραμμική σχέση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας με το υψόμετρο των μετεωρολογικών σταθμών στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού.	155
Σχήμα 5.7. Χρονοσειρά μέσης επιφανειακής υετόπτωσης της Θεσσαλίας	156
Σχήμα 5.8. Ομάδες σταθμών υετόπτωσης της Θεσσαλίας.	157
Σχήμα 5.9. Διακύμανση της μέσης υετόπτωσης των σταθμών της Ομάδας 3.	158
Σχήμα 5.10. Υπολεκάνες Θεσσαλίας.	158
Σχήμα 5.11. Διακύμανση της μέσης επιφανειακής υετόπτωσης της λεκάνης του Γαύρου.	159
Σχήμα 5.12. Διακύμανση της μέσης επιφανειακής υετόπτωσης της λεκάνης του Μεσοχωρίου.	159
Σχήμα 5.13. Διακύμανση της μέσης επιφανειακής υετόπτωσης της λεκάνης του Τυρνάβου.	159
Σχήμα 5.14. Χρονοσειρά μέσης επιφανειακής θερμοκρασίας της Θεσσαλίας	160
Σχήμα 5.15. Υδρομετρικοί σταθμοί που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση χρονοσειρών	161
Σχήμα 5.16. Παρατηρημένες και προσομοιωμένες παροχές του σταθμού Αλή Εφέντη.	162
Σχήμα 5.17. Παρατηρημένες και προσομοιωμένες παροχές του σταθμού Λάρισα	163
Σχήμα 5.18. Παρατηρημένες και προσομοιωμένες παροχές του σταθμού Μεσοχώρι και γραμμή τάσης.	163
Σχήμα 5.19. Σύγκριση του οικολογικού κριτηρίου παροχής με τις παρατηρημένες και προσομοιωμένες παροχές σε πέντε (5) υδρομετρικούς σταθμούς του Πηνειού ποταμού	164
Σχήμα 5.20. Ψηφιακό μοντέλο εδάφους της λεκάνης απορροής στη θέση Λάρισα	171
Σχήμα 5.21. Χρονοσειρές μετεωρολογικών και υδρολογικών δεικτών.	174
Σχήμα 5.22. Μηνιαίες τιμές του συντελεστή συσχέτισης, R, μεταξύ των μετεωρολογικών δεικτών SPI και α) δείκτη ξηρασίας επιφανειακών απορροών Z_{WBI} και β) δείκτη ξηρασίας εδαφικής υγρασίας Z_{SMI} .	175
Σχήμα 5.23. Χρονοσειρές μετεωρολογικών και υδρολογικών δεικτών.	176
Σχήμα 5.24. Μηνιαίες τιμές του συντελεστή συσχέτισης, R, μεταξύ των μετεωρολογικών δεικτών SPI και του δείκτη ξηρασίας επιφανειακών παρατηρούμενων απορροών Z-απορροής.	176
Σχήμα 5.25. Ο ταμιευτήρας Πλαστήρας και η λεκάνη απορροής του (από Ευστρατιάδης και συνεργάτες, 2002).	177
Σχήμα 5.26. Αποτελέσματα συσχέτισης του SPI με τον Z_{WRDI} α) συντελεστής συσχέτισης για όλη τη χρονοσειρά, β) μηνιαίος συντελεστής συσχέτισης και γ) αναγνώριση γεγονότων ξηρασίας.	178
Σχήμα 6.1. Σταθμοί βροχόπτωσης υδρολογικής λεκάνης Πηνειού ποταμού	183
Σχήμα 6.2. Επιβλεπόμενη ταξινόμηση σταθμών βροχόπτωσης	183
Σχήμα 6.3. Υψομετρική κατανομή βροχομετρικών σταθμών	184
Σχήμα 6.4. Ψηφιακό μοντέλο εδάφους με μέγεθος φατνίου 1-km	184
Σχήμα 6.5. Χρονοσειρές τιμών SPI για αντιπροσωπευτικούς σταθμούς βροχόπτωσης για χρονικές κλίμακες 3-μηνών, 9-μηνών και 24-μηνών.	186
Σχήμα 6.6. Αθροιστική κατανομή βροχόπτωσης του σταθμού Λάρισας (ID_21) α) Ετήσια βροχόπτωση και β) μηνιαία βροχόπτωση	192
Σχήμα 6.7. Θηκογράμματα α) μέσης τιμής και β) τυπικής απόκλισης μηνιαίας συνθετικής βροχόπτωσης βροχομετρικού σταθμού Λάρισας (ID_21)	193
Σχήμα 6.8. Χρονοσειρές παρατηρούμενων τιμών SPI και υπολογισμένων τιμών SPI ιστορικής βροχόπτωσης με χρήση των διάμεσων τιμών των παραμέτρων των συνθετικών χρονοσειρών SPI για το σταθμό της Λάρισας (ID_21).	194
Σχήμα 6.9. Πολύγωνα Thiessen στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού	195
Σχήμα 6.10. Διάγραμμα ροής της εφαρμογής των χωρικών μεθόδων	196
Σχήμα 6.11. Στατιστικά χωρικά αποτελέσματα των μεθόδων χωρικής παρεμβολής για τους 48 σταθμούς ανάπτυξης με την τεχνική cross-validation σε μορφή θηκογραμμάτων για την περίοδο της χωρικής παρεμβολής του SPI-3 (Δεκ 1960-Σεπ 2002 = 502 μήνες).	198

Σχήμα 6.12. Στατιστικά αποτελέσματα των μεθόδων χωρικής παρεμβολής για τους 18 βροχομετρικούς σταθμούς ανεξάρτητης πιστοποίησης σε μορφή θηκογραμμάτων για την για την περίοδο της χωρικής παρεμβολής του SPI-3 (Δεκ 1960-Σεπ 2002 = 502 μήνες). _____	199
Σχήμα 6.13. Διαγράμματα διασποράς επιλεγμένων μεθόδων χωρικής παρεμβολής για μηνιαία χρονική προσομοίωση του SPI-3 της περιόδου Δεκ 1960-Σεπ 2002 στον βροχομετρικό σταθμό Αμάραντος με ID_50. _____	201
Σχήμα 6.14. Στατιστικά αποτελέσματα των μεθόδων χωρικής παρεμβολής για τους 48 σταθμούς ανάπτυξης με την τεχνική cross-validation σε μορφή θηκογραμμάτων για την περίοδο της χωρικής παρεμβολής του SPI-6 (Μαρ 1961-Σεπ 2002 = 499 μήνες). _____	203
Σχήμα 6.15. Στατιστικά χωρικά αποτελέσματα των μεθόδων χωρικής παρεμβολής για τους 18 βροχομετρικούς σταθμούς ανεξάρτητης πιστοποίησης σε μορφή θηκογραμμάτων για την περίοδο της χωρικής παρεμβολής του SPI-6 (Δεκ 1960-Σεπ 2002 = 502 μήνες). _____	205
Σχήμα 6.16. Διαγράμματα διασποράς επιλεγμένων μεθόδων χωρικής παρεμβολής για μηνιαία χρονική προσομοίωση της περιόδου Μαρ 1961 - Σεπ 2002 στον βροχομετρικό σταθμό Αμάραντος με ID_50. Με μαύρο χρώμα η Γραμμή 1:1 και με κόκκινο διακεκομμένο η Γραμμή παλινδρόμησης της μορφής $y=ax$. _____	207
Σχήμα 6.17. Στατιστικά αποτελέσματα των μεθόδων χωρικής παρεμβολής για τους 48 σταθμούς ανάπτυξης με την τεχνική cross-validation σε μορφή θηκογραμμάτων για την περίοδο της χωρικής παρεμβολής του SPI-12 (Σεπ 1961-Σεπ 2002 = 493 μήνες). _____	210
Σχήμα 6.18. Στατιστικά χωρικά αποτελέσματα των μεθόδων χωρικής παρεμβολής για τους 18 βροχομετρικούς σταθμούς ανεξάρτητης πιστοποίησης σε μορφή θηκογραμμάτων για την περίοδο της χωροχρονικής εφαρμογής (Σεπ 1961-Σεπ 2002 = 493 μήνες). _____	211
Σχήμα 6.19. Διαγράμματα διασποράς επιλεγμένων μεθόδων χωρικής παρεμβολής για μηνιαία χρονική προσομοίωση του SPI-12 της περιόδου Σεπ 1961 - Σεπ 2002 στον βροχομετρικό σταθμό Αμάραντος με ID_50. Με μαύρο χρώμα η Γραμμή 1:1 και με κόκκινο διακεκομμένο η Γραμμή παλινδρόμησης της μορφής $y=ax$. _____	212
Σχήμα 6.20. Σύγκριση ψηφιακών χαρτών του SPI-6 που δημιουργήθηκαν με τις οκτώ μεθόδους χωρικής παρεμβολής για το μήνα Μάρτιος 1990. _____	220
Σχήμα 6.21. Σύγκριση ψηφιακών χαρτών ανά κλάση SPI που δημιουργήθηκαν με τις οκτώ μεθόδους χωρικής παρεμβολής για τον δείκτη ξηρασίας SPI-6, Μάρτιος 1990. _____	221
Σχήμα 6.22. Η μέθοδος SKIm_R για θεματική απεικόνιση του δείκτη ξηρασίας SPI-9 για επιλεγμένα ιστορικά γεγονότα ξηρασίας με βάση α) την κατανομή του SPI και β) τις κλάσεις του SPI. _____	222
Σχήμα 7.1. Εύρεση των χρόνων υστέρησης με την τεχνική της αυξανόμενης διάστασης μητρώου. _____	227
Σχήμα 7.2. Το M-test του SPI-9 για τα χρονικά βήματα πρόγνωσης με όλα τα δεδομένα της χρονικής βελτιστοποίησης των σταθμών ανάπτυξης α) σε κανονική κλίμακα και β) σε λογαριθμική κλίμακα. _____	228
Σχήμα 7.3. Το M-test για τα χρονικά βήματα πρόγνωσης με όλα τα δεδομένα της χρονικής βελτιστοποίησης των σταθμών ανάπτυξης για α) SPI-3, β) SPI-6, γ) SPI-12 και δ) SPI-24. _____	229
Σχήμα 7.4. Ιστογράμματα του Gamma test από την εφαρμογή των γενετικών αλγόριθμων του SPI-9 _{t+1} για διαφορετικές βαρύτητες του ρυθμού καταλληλότητας: α) μεγαλύτερη βαρύτητα στην ακρίβεια πρόγνωσης και υπολογισμού του μοντέλου πρόγνωσης, και β) μεγαλύτερη βαρύτητα στο μητρώο εισόδου. _____	230
Σχήμα 7.5. Το M-test του σταθμού Αγιόφυλλος (ID_1) για τα χρονικά βήματα πρόγνωσης με όλα τα δεδομένα της χρονικής βελτιστοποίησης. _____	232
Σχήμα 7.6. Βαθμός απόδοσης Eff για το σετ ελέγχου των δύο τεχνικών γενίκευσης για ένα και δύο κρυμμένα επίπεδα και συνολικό αριθμό νευρώνων του SPI-9 _{t+1} . _____	233
Σχήμα 7.7. Βαθμός απόδοσης Eff για το σετ ελέγχου των δύο τεχνικών γενίκευσης για ένα και δύο κρυμμένα επίπεδα και συνολικό αριθμό νευρώνων για χρονικό βήμα πρόγνωσης t+1. _____	234
Σχήμα 7.8. Αναπαράσταση της γενικής μεθοδολογίας των μετα-μαθησιακών αλγορίθμων. _____	235

Σχήμα 7.9. Το προσδιοριστικό όριο πρόγνωσης ενός ακραίου μετεωρολογικού φαινομένου [Hewson, 2007].	239
Σχήμα 7.10. Διαγράμματα χρονοσειρών πρόγνωσης του SPI-3 _{t+1} για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και χωρικής πιστοποίησης.	241
Σχήμα 7.11. Διαγράμματα χρονοσειρών πρόγνωσης του SPI-3 _{t+2} για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.	243
Σχήμα 7.12. Συνολικά ποσοτικά στατιστικά κριτήρια πρόγνωσης του SPI-3 για όλα τα χρονικά βήματα πρόγνωσης.	244
Σχήμα 7.13. Δείκτης κρίσιμης επιτυχίας αναγνώρισης επεισοδίων ξηρασίας του SPI-3 για όλα τα χρονικά βήματα πρόγνωσης.	245
Σχήμα 7.14. Διαγράμματα χρονοσειρών πρόγνωσης του SPI-6 _{t+1} για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.	248
Σχήμα 7.15. Διαγράμματα χρονοσειρών πρόγνωσης του SPI-6 _{t+2} για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.	249
Σχήμα 7.16. Συνολικά ποσοτικά στατιστικά κριτήρια πρόγνωσης του SPI-3 για όλα τα χρονικά βήματα πρόγνωσης.	250
Σχήμα 7.17. Δείκτης κρίσιμης επιτυχίας αναγνώρισης επεισοδίων ξηρασίας του SPI-6 για όλα τα χρονικά βήματα πρόγνωσης.	251
Σχήμα 7.18. Διαγράμματα χρονοσειρών πρόγνωσης του SPI-9 _{t+1} για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.	253
Σχήμα 7.19. Διαγράμματα χρονοσειρών πρόγνωσης του SPI-9 _{t+2} για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.	254
Σχήμα 7.20. Δείκτης κρίσιμης επιτυχίας αναγνώρισης επεισοδίων ξηρασίας του SPI-9 για όλα τα χρονικά βήματα πρόγνωσης.	255
Σχήμα 7.21. Συνολικά ποσοτικά στατιστικά κριτήρια πρόγνωσης του SPI-9 για όλα τα χρονικά βήματα πρόγνωσης.	256
Σχήμα 7.22. Διαγράμματα χρονοσειρών πρόγνωσης του SPI-12 _{t+1} για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.	259
Σχήμα 7.23. Διαγράμματα χρονοσειρών πρόγνωσης του SPI-12 _{t+2} για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.	260
Σχήμα 7.24. Διαγράμματα χρονοσειρών πρόγνωσης του SPI-12 _{t+3} για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.	261
Σχήμα 7.25. Δείκτης κρίσιμης επιτυχίας αναγνώρισης επεισοδίων ξηρασίας του SPI-12 για όλα τα χρονικά βήματα πρόγνωσης.	262
Σχήμα 7.26. Συνολικά ποσοτικά στατιστικά κριτήρια πρόγνωσης του SPI-12 για όλα τα χρονικά βήματα πρόγνωσης.	263
Σχήμα 7.27. Διαγράμματα χρονοσειρών πρόγνωσης του SPI-24 _{t+1} για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.	265
Σχήμα 7.28. Διαγράμματα χρονοσειρών πρόγνωσης του SPI-24 _{t+2} για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.	267
Σχήμα 7.29. Διαγράμματα χρονοσειρών πρόγνωσης του SPI-24 _{t+3} για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.	268
Σχήμα 7.30. Διαγράμματα χρονοσειρών πρόγνωσης του SPI-24 _{t+4} για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.	269
Σχήμα 7.31. Διαγράμματα χρονοσειρών πρόγνωσης του SPI-24 _{t+5} για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.	271
Σχήμα 7.32. Διαγράμματα χρονοσειρών πρόγνωσης του SPI-24 _{t+5} για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.	272
Σχήμα 7.33. Συνολικά ποσοτικά στατιστικά κριτήρια πρόγνωσης του SPI-24 για όλα τα χρονικά βήματα πρόγνωσης.	273

Σχήμα 7.34. Δείκτης κρίσιμης επιτυχίας αναγνώρισης επεισοδίων ξηρασίας του SPI-24 για όλα τα χρονικά βήματα πρόγνωσης. _____	274
Σχήμα 8.1. Γενική δομή των αναδρομικών νευρωνικών δικτύων RNN τύπου Elman. _____	279
Σχήμα 8.2. Διαγράμματα χρονοσειρών χωροχρονικής πρόγνωσης του SPI-3 _{t+1} για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης. _____	282
Σχήμα 8.3. Διαγράμματα χρονοσειρών χωροχρονικής πρόγνωσης του SPI-3 _{t+2} για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης. _____	283
Σχήμα 8.4. Συνολικά ποσοτικά στατιστικά κριτήρια πρόγνωσης του SPI-3 για χρονικά βήματα πρόγνωσης από 1 έως 3 μήνες μπροστά. _____	284
Σχήμα 8.5. Δείκτης κρίσιμης επιτυχίας αναγνώρισης επεισοδίων ξηρασίας του SPI-3 για χρονικά βήματα πρόγνωσης από 1 έως 3 μήνες μπροστά. _____	285
Σχήμα 8.6. Διαγράμματα χρονοσειρών χωροχρονικής πρόγνωσης του SPI-6 _{t+1} για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης. _____	287
Σχήμα 8.7. Διαγράμματα χρονοσειρών πρόγνωσης του SPI-6 _{t+2} για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης. _____	288
Σχήμα 8.8. Διαγράμματα χρονοσειρών πρόγνωσης του SPI-6 _{t+3} για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης. _____	290
Σχήμα 8.9. Συνολικά ποσοτικά στατιστικά κριτήρια πρόγνωσης του SPI-6 για χρονικά βήματα πρόγνωσης από 1 έως 3 μήνες μπροστά. _____	291
Σχήμα 8.10. Δείκτης κρίσιμης επιτυχίας αναγνώρισης επεισοδίων ξηρασίας του SPI-6 για χρονικά βήματα πρόγνωσης από 1 έως 3 μήνες μπροστά. _____	292
Σχήμα 8.11. Διαγράμματα χρονοσειρών χωροχρονικής πρόγνωσης του SPI-9 _{t+1} για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης. _____	294
Σχήμα 8.12. Διαγράμματα χρονοσειρών χωροχρονικής πρόγνωσης του SPI-9 _{t+2} για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης. _____	295
Σχήμα 8.13. Διαγράμματα χρονοσειρών πρόγνωσης του SPI-9 _{t+3} για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης. _____	297
Σχήμα 8.14. Διαγράμματα χρονοσειρών πρόγνωσης του SPI-9 _{t+4} για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης. _____	298
Σχήμα 8.15. Συνολικά ποσοτικά στατιστικά κριτήρια πρόγνωσης του SPI-9 για χρονικά βήματα πρόγνωσης από 1 έως 4 μήνες μπροστά. _____	299
Σχήμα 8.16. Δείκτης κρίσιμης επιτυχίας αναγνώρισης επεισοδίων ξηρασίας του SPI-9 για χρονικά βήματα πρόγνωσης από 1 έως 4 μήνες μπροστά. _____	300
Σχήμα 8.17. Διαγράμματα χρονοσειρών χωροχρονικής πρόγνωσης του SPI-12 _{t+1} για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης. _____	302
Σχήμα 8.18. Διαγράμματα χρονοσειρών χωροχρονικής πρόγνωσης του SPI-12 _{t+2} για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης. _____	303
Σχήμα 8.19. Διαγράμματα χρονοσειρών πρόγνωσης του SPI-12 _{t+3} για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης. _____	305
Σχήμα 8.20. Διαγράμματα χρονοσειρών πρόγνωσης του SPI-12 _{t+4} για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης. _____	306
Σχήμα 8.21. Διαγράμματα χρονοσειρών χωροχρονικής πρόγνωσης του SPI-12 _{t+5} για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης. _____	307
Σχήμα 8.22. Δείκτης κρίσιμης επιτυχίας αναγνώρισης επεισοδίων ξηρασίας χωροχρονικής μεθόδου για χρονικά βήματα πρόγνωσης του SPI-12 από 1 έως 5 μήνες μπροστά. _____	308
Σχήμα 8.23. Συνολικά ποσοτικά στατιστικά κριτήρια πρόγνωσης χωροχρονικής μεθόδου για χρονικά βήματα πρόγνωσης του SPI-12 από 1 έως 5 μήνες μπροστά. _____	309
Σχήμα 8.24. Διαγράμματα χρονοσειρών χωροχρονικής πρόγνωσης του SPI-24 _{t+1} για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης. _____	311

Σχήμα 8.25. Διαγράμματα χρονοσειρών χωροχρονικής πρόγνωσης του SPI-24 _{t+2} για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης. _____	313
Σχήμα 8.26. Διαγράμματα χρονοσειρών χωροχρονικής πρόγνωσης του SPI-24 _{t+3} για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης. _____	314
Σχήμα 8.27. Διαγράμματα χρονοσειρών πρόγνωσης του SPI-24 _{t+4} για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης. _____	316
Σχήμα 8.28. Διαγράμματα χρονοσειρών χωροχρονικής πρόγνωσης του SPI-24 _{t+5} για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης. _____	317
Σχήμα 8.29. Διαγράμματα χρονοσειρών χωροχρονικής πρόγνωσης του SPI-24 _{t+6} για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης. _____	318
Σχήμα 8.30. Δείκτης κρίσιμης επιτυχίας αναγνώρισης επεισοδίων ξηρασίας χωροχρονικής μεθόδου για χρονικά βήματα πρόγνωσης του SPI-24 από 1 έως 5 μήνες μπροστά. _____	320
Σχήμα 8.31. Συνολικά ποσοτικά στατιστικά κριτήρια πρόγνωσης χωροχρονικής μεθόδου για χρονικά βήματα πρόγνωσης του SPI-24 από 1 έως 6 μήνες μπροστά. _____	321
Σχήμα 9.1. Διάγραμμα ροής της εφαρμογής του υβριδικού συστήματος πρόγνωσης SPI _____	325
Σχήμα 9.2. Σύγκριση παραγόμενων ψηφιακών χαρτών του SPI-3 που δημιουργήθηκαν με το σύστημα πρόγνωσης και παρακολούθησης της ξηρασίας. _____	328
Σχήμα 9.3. Σύγκριση παραγόμενων ψηφιακών χαρτών του SPI-6 που δημιουργήθηκαν με το σύστημα πρόγνωσης και παρακολούθησης της ξηρασίας. _____	332
Σχήμα 9.4. Σύγκριση παραγόμενων ψηφιακών χαρτών του SPI-9 που δημιουργήθηκαν με το σύστημα πρόγνωσης και παρακολούθησης της ξηρασίας. _____	335
Σχήμα 9.5. Σύγκριση παραγόμενων και προγνωστικών ψηφιακών χαρτών του SPI-12 που δημιουργήθηκαν με το σύστημα πρόγνωσης και παρακολούθησης της ξηρασίας για χρονικά βήματα πρόγνωσης t+1, t+3 και t+4. _____	340
Σχήμα 9.6. Σύγκριση παρατηρημένων και προγνωστικών ψηφιακών χαρτών του SPI-24 για χρονικά βήματα πρόγνωσης t+2, t+3, t+4, t+5 και t+6. _____	344
Σχήμα 9.7. Πρόγνωση επιφανειακών τιμών SPI-3 υδρολογικής λεκάνης Πηνειού ποταμού για χρονικό βήμα πρόγνωσης t+1 με τις μεθόδους RNN και RNN _{bias} . _____	346
Σχήμα 9.8. Διαγράμματα διασποράς επιφανειακών τιμών SPI-3 υδρολογικής λεκάνης Πηνειού ποταμού για χρονικό βήμα πρόγνωσης t+1 με τις μεθόδους RNN και RNN _{bias} . _____	347
Σχήμα 9.9. Πρόγνωση επιφανειακών τιμών SPI-6 υδρολογικής λεκάνης Πηνειού ποταμού με τις μεθόδους RNN και RNN _{bias} για α) χρονικό βήμα πρόγνωσης t+1 και β) χρονικό βήμα πρόγνωσης t+2. _____	349
Σχήμα 9.10. Διαγράμματα διασποράς επιφανειακών τιμών SPI-6 υδρολογικής λεκάνης Πηνειού ποταμού για χρονικά βήματα πρόγνωσης t+1 και t+2 με τις μεθόδους RNN και RNN _{bias} . _____	350
Σχήμα 9.11. Πρόγνωση επιφανειακών τιμών SPI-9 υδρολογικής λεκάνης Πηνειού ποταμού με τις μεθόδους RNN και RNN _{bias} για χρονικό βήμα πρόγνωσης α) t+1, β) t+2 και γ) t+3. _____	352
Σχήμα 9.12. Διαγράμματα διασποράς επιφανειακών τιμών SPI-9 υδρολογικής λεκάνης Πηνειού ποταμού για χρονικά βήματα πρόγνωσης t+1, t+2 και t+3 με τις μεθόδους RNN και RNN _{bias} . _____	353
Σχήμα 9.13. Πρόγνωση επιφανειακών τιμών SPI-12 υδρολογικής λεκάνης Πηνειού ποταμού με τις μεθόδους RNN και RNN _{bias} για χρονικό βήμα πρόγνωσης α) t+1, β) t+2, γ) t+3 και δ) t+4. _____	355
Σχήμα 9.14. Διαγράμματα διασποράς επιφανειακών τιμών SPI-12 υδρολογικής λεκάνης Πηνειού ποταμού για χρονικά βήματα πρόγνωσης t+1, t+2, t+3 και t+4 με τη μέθοδο RNN. _____	356
Σχήμα 9.15. Πρόγνωση επιφανειακών τιμών SPI-24 υδρολογικής λεκάνης Πηνειού ποταμού με τις μεθόδους RNN και RNN _{bias} για χρονικό βήμα πρόγνωσης α) t+2, β) t+4, και γ) t+6. _____	358
Σχήμα 9.16. Διαγράμματα διασποράς επιφανειακών τιμών SPI-24 υδρολογικής λεκάνης Πηνειού ποταμού για χρονικά βήματα πρόγνωσης t+1, t+2, t+3, t+4, t+5 και t+6 με τη μέθοδο RNN. _____	360

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διατριβή γίνεται μία μεθοδολογική συστημική προσέγγιση της χωροχρονικής πρόγνωσης και προσομοίωσης της ξηρασίας που βασίζεται στη χρήση τεχνικών της υπολογιστικής νοημοσύνης και στην εκμετάλλευση των γεωστατιστικών μεθόδων. Δημιουργείται ένα υβριδικό σύστημα παρακολούθησης και πρόγνωσης του μετεωρολογικού δείκτη ξηρασίας Standardized Precipitation Index (SPI) για επιχειρησιακές εφαρμογές. Προσδιορίζονται τα βασικά στοιχεία που οφείλει να ενσωματώνει η προτεινόμενη μεθοδολογία (ευκολία υπολογισμού, αναγνώριση του χωρικού και χρονικού σφάλματος προσομοίωσης, αναζήτηση της βέλτιστης σχεδιαστικής λύσης και μάθηση και για αξιόπιστες επιχειρησιακές προγνώσεις), τα οποία σχηματίζουν τους πυρήνες γύρω από τους οποίους εφαρμόζονται αλγόριθμοι που βασίζονται στην χρήση τεχνικών υπολογιστικής νοημοσύνης, τεχνητών νευρωνικών δικτύων, γενετικών αλγορίθμων, γεωστατιστικής και συνδυαστικών μεθόδων.

Στην παρούσα διατριβή επιχειρήθηκε μια ολοκληρωμένη προσέγγιση της χωροχρονικής πρόγνωσης και προσομοίωσης της ξηρασίας. Η όλη προσέγγιση έγινε από την οπτική γωνία της επιχειρησιακής εφαρμογής που προϋποθέτει εύλογο υπολογιστικό φόρτο και αξιόπιστες χωρικές και χρονικές προσομοιώσεις και προγνώσεις της ξηρασίας. Για τον λόγο αυτό, το σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης και παρακολούθησης της ξηρασίας βασίζεται στον μετεωρολογικό δείκτη ξηρασίας SPI που υπολογίζεται σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες και χρειάζεται μόνο μηνιαία δεδομένα βροχόπτωσης. Αυτή η ιδιαιτερότητα υπολογισμού του δείκτη SPI τον καθιστά πολύ ευέλικτο για επιχειρησιακές εφαρμογές προγραμμάτων ξηρασίας αφού μπορεί να διακρίνει τύπους ξηρασίας (μετεωρολογική, γεωργική, υδρολογική και ξηρασία υδατικών συστημάτων) αρκεί να προσδιοριστεί η χρονική κλίμακα υπολογισμού του SPI για τον αντίστοιχο τύπο ξηρασίας. Η εφαρμογή του SPI για αναγνώριση υδρολογικής ξηρασίας και ξηρασίας υδατικών συστημάτων αποδεικνύει ότι μπορούν οι μετεωρολογικοί δείκτες που υπολογίζονται σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες να αναγνωρίσουν και άλλους τύπους ξηρασίας εκτός της μετεωρολογικής ξηρασίας. Έτσι, στην παρούσα διατριβή, ο δείκτης SPI υπολογισμένος για χρονικές κλίμακες 3-μηνών, 6-μηνών, 9-μηνών, 12-μηνών και 24-μηνών επιλέχθηκε για την χωροχρονική ανάλυση, προσομοίωση και πρόγνωση ξηρασίας στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού.

Οκτώ (8) μέθοδοι χωρικής παρεμβολής εφαρμόστηκαν χωροχρονικά στο δείκτη ξηρασίας SPI για την αξιολόγηση του χωρικού και χρονικού σφάλματος της κάθε μεθόδου σε σχέση με τις άλλες χωρικές μεθοδολογίες. Η χωροχρονική εφαρμογή των χωρικών μεθόδων στο SPI έδωσε παραπλήσια αποτελέσματα για τους βροχομετρικούς σταθμούς ανάπτυξης και σταθμούς πιστοποίησης. Η μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής simple kriging με μεταβαλλόμενα τοπικά μέσα και με μοντέλο παλινδρόμησης SKIm_R προσομοιώνει καλύτερα την χωρική κατανομή του δείκτη ξηρασίας SPI από τις άλλες επτά χωρικές μεθόδους στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού. Η εφαρμογή των χωρικών μεθόδων για χωροχρονική προσομοίωση του δείκτη ξηρασίας SPI στους σταθμούς πιστοποίησης έδειξε ότι αν και όλες οι μέθοδοι παρουσιάζουν παραπλήσια ποσοτικά και ποιοτικά στατιστικά χαρακτηριστικά, παρατηρείται μία ελαφριά υπεροχή της μεθόδου SKIm_R. Ιστορικά γεγονότα ξηρασίας επιλέχθηκαν για την θεματική απεικόνιση των δεικτών ξηρασίας SPI για πολλαπλές χρονικές κλίμακες υπολογισμού του SPI στην υδρολογική λεκάνη. Οι παραγόμενοι ψηφιακοί χάρτες με μέγεθος φατνίου 1-km που υπολογίστηκαν με τις χωρικές μεθόδους παρουσιάζουν παραπλήσιες επιφανειακές τιμές (μέση τιμή των ψηφιακών χαρτών) αλλά διαφορετική χωρική κατανομή. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι οι χωρικές μεθοδολογίες μπορούν να εφαρμοστούν για χωροχρονική προσομοίωση του δείκτη ξηρασίας σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες, αλλά πρέπει να δοθεί προσοχή στην επιλογή της χωρικής

μεθόδου, αφού το χωρικό σφάλμα που παρατηρείται είναι μεγάλο και μεταβάλλεται με το χρονικό βήμα εφαρμογής.

Η χωροχρονική πρόγνωση του SPI επικεντρώνεται στα βραχυπρόθεσμα (1-2 μήνες μπροστά) και μεσοπρόθεσμα διαστήματα (3-6 μήνες μπροστά) πρόγνωσης, ώστε οι αντίστοιχες δραστηριότητες και δράσεις να μπορούν να υλοποιηθούν και να αντιμετωπιστούν οι επιπτώσεις που δημιουργεί η ξηρασία. Η εφαρμογή ενός υβριδικού χωροχρονικού συστήματος πρόγνωσης του SPI που συνδυάζει τις χρονικές προγνώσεις ενός γενικευμένου χρονικού μοντέλου πρόγνωσης (Recursive Artificial Neural Networks, RANN) με ένα χωρικό μοντέλο πρόγνωσης που στηρίζεται σε αναδρομικά νευρωνικά δίκτυα τύπου Elman (Recurrent Neural Networks, RNN) δείχνει ότι όσο αυξάνει η κλίμακα υπολογισμού του SPI τόσο αυξάνει και η ικανότητα του συστήματος στην πρόγνωση επεισοδίων ξηρασίας. Αυτό οφείλεται στο ότι το σήμα (χρονοσειρά) του SPI γίνεται πιο ομαλό και δεν παρουσιάζει απότομες αλλαγές κατάστασης (π.χ. μετάβαση από ξηρές σε υγρές καταστάσεις σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα). Επίσης, η συσχέτιση των χρόνων υστέρησης του SPI μεγαλώνει για το αντίστοιχο χρονικό βήμα πρόγνωσης όσο αυξάνει η κλίμακα υπολογισμού του SPI που διευκολύνει την πρόγνωση του SPI. Έτσι, η υβριδική χωροχρονική μέθοδος RNN μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αξιόπιστες και επιχειρησιακές προγνώσεις του SPI-3 μέχρι ένα μήνα μπροστά ($SPI-3_{t+1}$), του SPI-6 μέχρι δύο μήνες μπροστά ($SPI-6_{t+2}$), του SPI-9 μέχρι τρεις μήνες μπροστά ($SPI-9_{t+3}$), του SPI-12 μέχρι τέσσερις μήνες μπροστά ($SPI-12_{t+4}$), και του SPI-24 μέχρι έξι μήνες μπροστά ($SPI-24_{t+6}$).

Η αυτοματοποιημένη διαδικασία, που αναπτύχθηκε στην παρούσα διατριβή, επιτρέπει στον χρήστη να εκτιμήσει το χωρικό σφάλμα και να επιλέξει τη χωρική μεθοδολογία που δίνει τα καλύτερα στατιστικά κριτήρια. Το αυτοματοποιημένο σύστημα περιέχει απλές μη γεωστατιστικές μεθόδους (μέθοδοι αντίστροφης απόστασης IDW, και πολυγώνων Thiessen TP) γεωστατιστικές μεθόδους (μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής Ordinary kriging OK, Simple kriging SK) και συνδυαστικές μεθόδους που ενσωματώνουν δευτερογενείς πληροφορίες γεωγραφικού αναγλύφου και γεωγραφικών συντεταγμένων (Kriging with External Drift KED, Ordinary kriging με μοντέλο παλινδρόμησης RK, Simple kriging με μεταβαλλόμενα τοπικά μέσα και με μοντέλο παλινδρόμησης με υψόμετρο SKIm, Simple kriging με μεταβαλλόμενα τοπικά μέσα και μοντέλο παλινδρόμησης με υψόμετρο και χωρικές συντεταγμένες SKIm_R). Δίνεται, επίσης, η δυνατότητα υπολογισμού επιφανειακών (ή περιοχικών) τιμών του SPI ανά υδρολογική λεκάνη (ή υπολεκάνη) που παρέχεται από τον χρήστη. Επίσης, η δημιουργία των ψηφιακών (raster) χαρτών δίνει τη δυνατότητα για επιπλέον χωρική ανάλυση στα πιο συνηθισμένα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών και εξαγωγή χωρικών και στατιστικών χαρακτηριστικών, όπως η παρακολούθηση της χωρικής και χρονικής εξάπλωσης της ξηρασίας, ο υπολογισμός της δριμύτητας της ξηρασίας ανά κλάση του SPI καθώς και της κρίσιμης έκτασης που πλήττεται από ξηρασία. Το σύστημα μπορεί να εφαρμοστεί και ως σύστημα παρακολούθησης του SPI, αλλά και ως σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης με τη χρήση των προγνώσεων του υβριδικής χωροχρονικής μεθοδολογίας. Η εφαρμογή του συστήματος έγκαιρης προειδοποίησης της ξηρασίας στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού δίνει αξιόπιστες μεσοπρόθεσμες προγνώσεις των χαρακτηριστικών της ξηρασίας (δριμύτητα, διάρκεια και έκταση) για μεγαλύτερες κλίμακες υπολογισμού του SPI (SPI-9, SPI-12, SPI-24), ενώ για μικρότερες κλίμακες του SPI (SPI-3, SPI-6) αξιόπιστες προγνώσεις υπάρχουν μόνο για βραχυπρόθεσμα διαστήματα πρόγνωσης.

EXTENDED ABSTRACT

ABSTRACT

In this study an integrated methodological and systematic approach is developed for spatiotemporal forecasting and monitoring of drought. The methodology is based on the integration of artificial intelligence techniques with geostatistical interpolation methods. The distributed raster-based integrated drought monitoring and forecasting system is demonstrated for operational drought management using the meteorological drought index the Standardized Precipitation Index (SPI). The basic elements of the system are determined, and important issues and processes are analytically discussed, such as the representation of the spatial and temporal simulation error, extraction of optimal design solution in machine learning methods for reliable and accurate spatiotemporal drought forecasting. Each one of the aforementioned elements is considered as cores, where integrated algorithms are applied that combine various computational intelligence techniques such as artificial neural networks, genetic algorithms and geostatistical methods.

This thesis is focused on the operational use of the spatiotemporal monitoring and forecasting system. For this reason the SPI calculated at multiple time scales is employed for drought identification. The main advantage of the SPI is that can be calculated for multiple time-scales. This is very important because the timescale over which precipitation deficits accumulate functionally separates different types of drought and, therefore, allows to quantify the natural lags between precipitation and other water usable sources such as river discharge, soil moisture and reservoir storage. Computation of the SPI involves fitting a Gamma probability density function to a given frequency distribution of precipitation totals for a station, area or a watershed. The cumulative probability is subsequently transformed to the standard normal random variable Z with mean equal to zero and variance of one, which is the value of the SPI. The capability of the SPI in detecting different types of drought was demonstrated for hydrological and water resources drought identification. For the assessment of hydrological drought, the six-parameter monthly conceptual water balance UTHBAL model has been applied to reconstruct and produce simulated runoff data in Pinios river basin, Thessaly. Water resources drought was estimated using water storages from the Plastiras reservoir. Simulated discharge and water storage monthly timeseries were checked for normality. The skewness test of normality and the Filliben probability plot correlation test were both applied at the 10% significance level for each month and variable. The results show that for almost all months (except the summer months) are statistically significant at the 10% significance level. To remove skewness, the Box-Cox transformation was used since it is capable to deal with non-linear data over widely varying hydro-climatic regimes. The synthetic runoff and water storage data were normalized through Box-Cox transformation with the maximum likelihood approach and standardized to the mean to produce the water balance derived drought index and the water resources drought index, respectively. Standardised data of simulated river discharges and reservoir storage were compared with the SPI series at different time scales considering two approaches: continuous timeseries and monthly. For comparison the Pearson correlation coefficient was used. The results showed that different time scales of the SPI are useful to monitor droughts in the different usable water resources. Robust relationships were found analysing the role of the time scales of SPI on soil moisture, river discharges and reservoir storages. Hence, the SPI calculated at 3-month, 6-month, 9- month, 12- month and 24- month timescales were selected for spatiotemporal drought analysis, monitoring and forecasting in Pinios river basin of Thessaly, Greece.

Eight (8) spatial interpolation methods were spatiotemporally applied in the SPI for identification of the spatial and temporal interpolation error in Pinios river basin with an area of about 9500 km². A Geographic Information System tool, which incorporates simple interpolation methods (Thiessen

Polygons, Inverse Distance Weighted) geostatistical (Simple Kriging, Ordinary Kriging, Simple Kriging with Local Means), and combinational methods based on ordinary regression with auxiliary information (spatial coordinates and elevation) with geostatistical methods for the regression residuals, was developed to facilitate automatic spatial SPI estimation. The basic input data include a point shapefile that contains the geographic location of the raingauges, and SPI records for each raingauge in text format, and a Digital Elevation Model (DEM) to provide elevation information. The GIS program automatically reads in each month's SPI value for each raingauge, and the interpolation method selected by the user will be implemented to estimate the spatial distribution of SPI. The interpolated spatial SPI data are output in raster format, which can be used for further analysis. Finally, several statistics that evaluate the characteristics and accuracy of the estimated spatial precipitation are calculated. These methods were applied for spatiotemporal monthly SPI interpolation between October 1960 and September 2002 using 48 development precipitation stations and 18 independent validation precipitation stations, located at Pinios river basin in Thessaly region. The results show that different interpolation methods can obtain similar areal mean SPI values, but significantly different values of maximum SPI, minimum SPI, and coefficient of variation. The accuracy of the SPI estimated by different interpolation methods was evaluated using cross-validation statistics and independent validation statistics such as the correlation coefficient, Nash-Sutcliffe efficiency and mean absolute error. The evaluation results show that use of elevation and spatial coordinates as secondary variables improves the accuracy of spatial SPI estimation. It is also worth noting that no one interpolation method can consistently perform better than the other methods. However, using the cross-validation statistics the combinational method of a regression model with spatial coordinates and elevation with residual simple kriging with local varying means (SKlm_R) outperformed other methods for about 60% of the period of analysis, while the other methods provided more accurate SPI than SKlm_R for the remaining 40% for all timescales at the study area. Using the independent validation statistics the method SKlm_R is marginally better than the other methods. In order to provide accurate spatiotemporal SPI interpolation, it is suggested to implement multiple spatial interpolation methods and select the one with better evaluation statistics. Application of the interpolation methods for temporal modelling of the 18 independent validation stations shows that all methods give similar results. Identified historical drought events were used for drought mapping and comparison of the raster maps created with the interpolation methods. The maps have similar areal values but different areal distribution of drought is observed. The major conclusion is that the spatial interpolation methods could be applied for spatiotemporal drought mapping but caution should be given in the selection of the method, since the spatial and temporal error is varying with the application time step.

The spatiotemporal forecasting is focused on short (1-2 months ahead) and medium (3-6 months ahead) term prediction intervals. A hybrid spatiotemporal scheme for integrated spatial and temporal forecasting is developed. Temporal forecasting is achieved using feed-forward neural networks and the temporal forecasts are extended to the spatial dimension using a spatial recurrent neural network model of Elman type. The methodology is demonstrated for an operational meteorological drought index the Standardized Precipitation Index (SPI) calculated at 3-month, 6-month, 9-month, 12-month and 24-month timescales. 48 precipitation stations and 18 independent precipitation stations, located at Pinios river basin in Thessaly region, Greece, were used for the development and spatiotemporal validation of the hybrid spatiotemporal scheme. Several quantitative temporal and spatial statistical indices were considered for the performance evaluation of the models. Furthermore, qualitative statistical criteria based on contingency tables between observed and forecasted drought episodes were calculated.

The hybrid spatiotemporal forecasting scheme is developed with the integration of 1) a generalised neural network time series model to capture the temporal characteristics of each spatially separated location, 2) a spatial artificial neural network to discover the hidden spatial and temporal correlation among all locations using the temporal forecasts, and 3) the combination of spatial interpolation

techniques with the individual temporal and spatial forecasts for distributed integrated spatiotemporal forecasting of drought. The Gamma Test (GT) was used to select the input variables and the training data length, so that the trial and error workload to be greatly reduced. The GT enables to quickly evaluate and estimate the best mean squared error that can be achieved by a smooth model on any unseen data for a given selection of inputs, prior to model construction. Several nonlinear models have been developed efficiently, with the aid of the GT, for 1-month up to 6-month ahead forecasting for the examined timescales of SPI. The values of SPI in the previous months are used for generating a drought temporal forecasting model. In the construction of forecasting models, again, different models were generated for each of the SPI output for 3, 6, 9, 12 and 24 months. The data sets for all stations were divided into two subsets, training and validation data set. The training data set includes monthly SPI records between 1960 and 1992 years for the 48 development precipitation stations. In order to get more reliable evaluation and comparison, forecasting models are tested by evaluating a data set which was not used during the training process. Testing data set consists of SPI records observed between 1992 and 2002 years for the 48 development precipitation stations and SPI data for the years 1960-2002 for the 18 independent validation rainfall stations. Generalised feed forward artificial neural network models were employed for temporal forecasting of SPI. The input nodes are the identified previously lagged observations, while the output provides the forecast of a future value. Hidden nodes with appropriate nonlinear transfer functions are used to process the information received by the input nodes. In this study, two different approaches of generalised neural networks for forecasting several time steps ahead were employed: a) Recursive or iterative multistep neural networks (RANN): A recursive multistep approach is based on one output node, forecasting a single step ahead, and the network is applied recursively, using previous predictions as inputs for subsequent forecasts and b) Direct independent neural networks (DANN): This approach is based on single outputs, and each output node represents one time step to be forecasted. The topology of the generalised MLPs is exploited in conjunction with the BFGS backpropagation algorithm, a second-order nonlinear optimization technique, which is usually faster and more reliable than other backpropagation variants. Moreover, Bayesian regularization is applied in order to insure that the MLPs provide accurate forecasts for input values unknown to the network. Finally, the technique bagging with ensembles was followed to ensure generalization. The ensembles were generated using bootstrap resampling with replacement of the available training data set and used in the MLPs training. Results show that the generalised RANN approach is marginally better than the DANN method for multistep ahead forecasting. However, the lead time of forecasting for operational use depends on the SPI timescale.

In order to achieve spatiotemporal forecasting the temporal forecasts of the generalised RANN method are extended to the spatial dimension using dynamic neural networks. Among other dynamic neural networks, the Elman type of the dynamic recurrent neural network (RNN) was employed to discover the hidden and deeply entangled spatial relationships. A dynamic RNN has its own internal potential or internal state that is used to describe the dynamic characteristic of the network. Moreover, Elman neural network has a backward connection between the hidden and context layer. This feedback path allows it to learn temporal and spatial patterns of input data, which is essentially useful in geographic spatial-temporal relationship forecasting. RNNs of SPI temporal forecasts with the spatial coordinates of the rainfall stations were created for short and medium term SPI prediction intervals and trained using the adaptive BFGS algorithm, which uses a self-adaptive scaling factor for the Hessian matrix and is equipped with nonmonotone strategy. This algorithm is a modified version of BFGS, which combines the usage of adaptive nonmonotone learning with the self-scaling utility; where the former takes the benefits of Lipschitz constant taking into account the local shape of a given function, while the latter has been proved to have the ability of solving unconstrained nonconvex optimisation problems. Several quantitative and qualitative temporal and spatial statistical indices were considered for the performance evaluation of the RNNs. Application of the RNNs for spatiotemporal forecasting identified the operational lead time for drought forecasting and drought monitoring. Hence, the hybrid

spatiotemporal drought forecasting model could be operationally used for short term prediction intervals at shorter timescales of SPI (i.e. SPI-3, SPI-6) and for medium term prediction intervals at larger SPI timescales (i.e. SPI-9, SPI-12, SPI-24). A promising outcome of the results is that reliable and unbiased forecasts up to six months ahead were achieved for large SPI timescales (e.g. 24 months) which are used for water resources management at the study area. The above findings could be useful in developing a drought preparedness plan in the region.

Finally, the hybrid spatiotemporal forecasting models were incorporated in the automated spatial interpolation system for the creation of distributed forecasting drought maps. The automated spatial interpolation system could be used either as a drought monitoring system or as a drought forecasting system. The methods incorporated in the system are simple interpolation methods (Thiessen Polygons, Inverse Distance Weighted) geostatistical (Simple Kriging, Ordinary Kriging, Simple Kriging with Local Means), and combinational methods based on ordinary regression with auxiliary information (spatial coordinates and elevation) with geostatistical methods for the regression residuals. The system could be used for distributed raster-based drought monitoring and forecasting and for the estimation of the areal values of the study area. Application of the system for forecasting purposes show that reliable and accurate predictions of drought characteristics (severity, duration and area) are estimated for medium term prediction intervals at larger timescales of SPI and for short term prediction intervals at smaller SPI timescales in Pinios river basin, Thessaly, Greece. The GIS program developed in this study can serve as an effective and efficient tool to implement advanced geostatistics methods that incorporate auxiliary information to improve spatiotemporal estimation. The drought monitoring and forecasting decision system uses previous SPI values calculated at different timescales of the available rainfall stations as the forecast inference factors, and then analyzes the drought level based on the lead time of SPI for operational use via the proposed hybrid spatiotemporal drought forecast model. To identify more clearly the hazard, advanced spatial interpolation methods are incorporated in the forecasting system to produce raster drought forecast maps. Comparison of the forecasted drought maps with selected historical drought maps show that that reliable and accurate predictions of drought characteristics (severity, duration and area) are estimated for medium term prediction intervals at larger timescales of SPI and for short term prediction intervals at smaller SPI timescales in Pinios river basin, Thessaly, Greece. It is believed that implementation of the early warning drought system with real-time rainfall data will help to judge if this region is a potential drought prone area. If the danger indicator is reached, the water managers and relevant civil protection agencies shall be properly informed to take preventive measures and minimize the possible loss according to the drought severity level.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε πολλές μεσογειακές χώρες οι πολιτικές για το περιβάλλον, τους υδατικούς πόρους και την αντιμετώπιση ακραίων φαινομένων (π.χ. ξηρασίας) έχουν δομηθεί και οργανωθεί πρόχειρα με αποτέλεσμα να επιδεινώνεται η παρούσα κατάσταση των υδατικών πόρων. Η οδηγία πλαίσιο για τα νερά (WFD EC/60/2000) θέτει στην Ευρωπαϊκή Ένωση, το γενικό πλαίσιο για τη διαχείριση των υδάτων των Κρατών Μελών και απαιτεί "καλή οικολογική κατάσταση" στα ύδατά της μέχρι το 2015. Προωθεί, επίσης, την ολοκληρωμένη διαχείριση των υδατικών πόρων για να υποστηρίξει τη βιώσιμη χρήση ύδατος και να περιορίσει τα προβλήματα που συνδέονται με τις χρήσεις νερού, τη ρύπανση, τις πλημμύρες και τις ξηρασίες. Η ορθολογική χρήση των υδάτων απαιτείται και σε υγρές περιόδους με στόχο την αύξηση της αντοχής των υδατικών συστημάτων σε επερχόμενες συνθήκες ξηρασίας. Σημειώνεται ότι η ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων κατατάσσεται πρώτη μεταξύ επτά προτεραιοτήτων που οριοθετούνται από τη μεσογειακή στρατηγική για τη βιώσιμη ανάπτυξη, η οποία οριστικοποιήθηκε το 2005 και υιοθετήθηκε από 21 μεσογειακές χώρες και την Ευρωπαϊκή Ένωση στο πλαίσιο της Συνθήκης της Βαρκελώνης [UNEP-MAP, 2005].

Οι ξηρασίες είναι, σε παγκόσμιο επίπεδο, οι δαπανηρότερες φυσικές καταστροφές, που προκαλούν 6 - 8 δισεκατομμύρια δολάρια ζημίες ετησίως και επηρεάζουν περισσότερους ανθρώπους από οποιαδήποτε άλλη μορφή φυσικής καταστροφής [Wilhite, 2000]. Κατά την προηγούμενη τριακονταετία σημειώθηκε ουσιαστική αύξηση των ξηρασιών ως προς τον αριθμό και την ένταση στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Το κόστος για την ευρωπαϊκή οικονομία κατά την εν λόγω περίοδο ήταν τουλάχιστον 100 δισεκατ. €. Το 2003, έτος κατά το οποίο παρουσιάστηκε μία από τις πλέον εκτεταμένες ξηρασίες, επλήγησαν πάνω από 100 εκατ. άνθρωποι και σχεδόν το ένα τρίτο της έκτασης της Ευρωπαϊκής Ένωσης με συνολικό κόστος περίπου 8,7 δισεκατ. €. Στις χώρες της Μεσογείου παρατηρούνται πολύ συχνά φαινόμενα ξηρασίας με σοβαρές οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις. Οι ξηρασίες αυτές σχετίζονται επίσης με την τρωτότητα των συστημάτων υδροδότησης, των αγροτικών και των κοινωνικών συστημάτων, γενικότερα. Η τρωτότητα αυτή οφείλεται μερικώς σε καταστάσεις μόνιμης λειψυδρίας, υποβάθμισης της ποιότητας του νερού και των αυξανόμενων αναγκών σε νερό, οι οποίες προέρχονται από την πληθυσμιακή και τουριστική ανάπτυξη και από την εντατική καλλιέργεια καθώς και την ένταση και διάρκεια της ξηρασίας. Επομένως, απαιτείται μια στρατηγική για τη διαχείριση της ξηρασίας, η οποία θα βασίζεται στη βελτίωση της ετοιμότητας για καταστάσεις ξηρασίας και στην καταπολέμηση των συνεπειών της αυξανόμενης έντασης, συχνότητας και διάρκειας της ξηρασίας. Η τέταρτη έκθεση της IPCC επισημαίνει ότι η ένταση και η διάρκεια των ξηρασιών στον 21^ο αιώνα αυξάνονται στις χώρες της Μεσογείου αλλά με σημαντική αβεβαιότητα [IPCC, 2007; Weiss et al., 2007; Vasiliades et al., 2009].

Η ξηρασία είναι ένα τρισδιάστατο φαινόμενο που μπορεί να χαρακτηριστεί από τη σοβαρότητά της ή την ένταση, τη διάρκεια και τη γεωγραφική έκταση. Ο χαρακτηρισμός της ξηρασίας είναι περίπλοκος και υπάρχει ένα μεγάλο φάσμα μετεωρολογικών ή υδρολογικών δεικτών που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην αναγνώριση της ξηρασίας. Απαιτείται μια ακριβής επιλογή μεθόδων προσδιορισμού της ξηρασίας ή/και δεικτών ξηρασίας, ικανών να περιγράψουν με ένα συνθετικό και σαφή τρόπο την εξέλιξη των συνθηκών ξηρασίας στο χώρο και στο χρόνο. Ο καθένας από αυτούς έχει τη δική του αξία και συχνά υποστηρίζει ο ένας τον άλλο. Οι δείκτες για το χαρακτηρισμό της ξηρασίας πρέπει να είναι σύμφωνοι με τις ακόλουθες απαιτήσεις: (α) να μπορούν να υπολογιστούν από διαθέσιμα δεδομένα, (β) να έχουν a priori άμεση σχέση με τρωτά κοινωνικά, οικονομικά και περιβαλλοντικά συστήματα και (γ) να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για προβλέψεις και συστήματα έγκαιρης καταγραφής και προειδοποίησης [Iglesias et al., 2007a,b]. Οι McKee et al., [1993] έδειξαν ότι οι αξιοποιήσιμοι υδατικοί πόροι περιλαμβάνουν την εδαφική υγρασία, το υπόγειο νερό, το χιόνι, την

απορροή των ποταμών και την αποθήκευση ταμιευτήρων και δεξαμενών. Το χρονικό διάστημα από την υετόπτωση μέχρι τους διαθέσιμους αξιοποιήσιμους υδατικούς πόρους διαφέρει αρκετά. Κατά συνέπεια, η χρονική κλίμακα της συσσώρευσης της υετόπτωσης γίνεται εξαιρετικά σημαντική και διακρίνει τους διάφορους τύπους ξηρασίας. Η διαφορετική απόκριση των υδρολογικών συστημάτων στην υετόπτωση μπορεί να ποικίλει ως αποτέλεσμα της χρονικής κλίμακας. Αυτό καθορίζεται από τις διαφορετικές συχνότητες των υδρολογικών-κλιματολογικών μεταβλητών. Επομένως, οι δείκτες ξηρασίας πρέπει να συνδέονται σε μία συγκεκριμένη χρονική κλίμακα, ώστε να χρησιμοποιούνται επιχειρησιακά σε προγράμματα διαχείρισης υδατικών πόρων.

Επειδή οι υδρο-μετεωρολογικές παράμετροι μετρούνται σε σημειακούς σταθμούς και οι αποφάσεις πρέπει να ληφθούν στις περισσότερες περιπτώσεις σε επίπεδο λεκάνης, υπολεκάνης ή περιοχής, απαιτείται η χωρική παρεμβολή και ολοκλήρωση των σημειακών μετρήσεων. Μέχρι σήμερα η χωρική ανάλυση πραγματοποιείται με τη χρήση μαθηματικών μεθόδων παρεμβολής (π.χ. γεωστατιστικές και προσδιοριστικές μεθοδολογίες), αλλά και στατιστικών μεθόδων (π.χ. ανάλυση κύριων συνιστωσών, γραμμικές και μη-γραμμικές τεχνικές ομαδοποίησης, όπως Cluster analysis, Self Organizing Maps, κ.λπ.). Η χωρική έκταση της ξηρασίας εκτιμάται με βάση τις συγκρίσεις της επηρεαζόμενης περιοχής με ένα όριο το οποίο αναφέρεται ως «κρίσιμη περιοχή». Εν τούτοις μια ελπιδοφόρος μέθοδος, που βασίζεται στην απεικόνιση του ποσοστού της περιοχής που επηρεάζεται ως προς τη διαβάθμιση δριμύτητας της ξηρασίας, προσδιορίζει πιθανοθεωρητικά και αμερόληπτα την κρίσιμη περιοχή που πλήττεται από ξηρασία [π.χ. Loukas and Vasiliades, 2004; Tsakiris and Vangelis, 2004].

Ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα είναι η περίπτωση υδατικών συστημάτων, που τροφοδοτούνται με νερό από διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές, οι οποίες απέχουν σημαντικά μεταξύ τους. Στα συστήματα αυτά, η γεωγραφική έκταση της ξηρασίας είναι παράμετρος ιδιαίτερα σημαντική, αφού μπορεί να επηρεάσει μόνο ένα τμήμα των υδατικών πόρων. Η καταστροφικότητα εκφράζει την επίδραση της ξηρασίας ως φυσικό φαινόμενο στις ανθρώπινες δραστηριότητες και εξαρτάται από την ένταση, τη διάρκεια και την έκταση της ξηρασίας, τη χρονική κατανομή της βροχής, τη διαχείριση των υδατικών συστημάτων και την εξέλιξη της ζήτησης. Έτσι, η εκδήλωση των βροχών σε σχέση με τα στάδια ανάπτυξης των καλλιεργειών, ο αριθμός των επεισοδίων βροχής και η έντασή τους, η παρουσία ή όχι ταμιευτήρων και η δυνατότητα μείωσης των υδατικών αναγκών, συνδέονται με την αποτελεσματικότητα της βροχής να καλύψει τις ανθρώπινες ανάγκες και κατά συνέπεια με την καταστροφικότητα της ξηρασίας.

Η αποτίμηση των χαρακτηριστικών της ξηρασίας έχει ως αντικείμενο την εκτίμηση των πιθανολογικών όρων της έντασης και της διάρκειας αυτής που μπορεί να παρατηρηθεί σε μια δεδομένη περιοχή. Μια τέτοια αποτίμηση είναι ταυτόχρονα χρήσιμη για την ανάλυση των προηγούμενων ξηρασιών και για το «σχεδιασμό διαχείρισης της ξηρασίας» για μια προκαθορισμένη περίοδο επαναφοράς, ο οποίος βοηθά στην ανάλυση της επικινδυνότητας. Μέχρι στιγμής, η μέθοδος run (run method) [Yevjevich, 1967] και οι κανονικοποιημένοι δείκτες ξηρασίας θεωρούνται ως αντικειμενικές μέθοδοι προσδιορισμού των συμβάντων ξηρασίας και των στατιστικών χαρακτηριστικών τους [Wilhite and Buchanan-Smith, 2005]. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των μεθόδων αυτών είναι το ότι δίνεται η δυνατότητα να εξαχθούν αναλυτικά οι κατανομές πιθανότητας των χαρακτηριστικών της ξηρασίας, με βάση τις στοχαστικές ιδιότητες των υποκείμενων εξεταζόμενων χρονοσειρών.

Η συνεχής προσομοίωση, παρακολούθηση και η πρόγνωση της ξηρασίας είναι το απαραίτητο πρώτο βήμα για τη μετάβαση από την κρίση στη διαχείριση της ξηρασίας. Αυτό είναι εφικτό, μόνο από ένα ολοκληρωμένο επιχειρησιακό σύστημα πρόγνωσης, έγκαιρης προειδοποίησης και παρακολούθησης των χαρακτηριστικών (ένταση, δριμύτητα, διάρκεια και χωρική έκταση) και των τύπων της ξηρασίας (μετεωρολογική, γεωργική και υδρολογική ξηρασία επιφανειακών και υπόγειων υδάτων και ξηρασία υδατικών συστημάτων).

Η εκδήλωση της ξηρασίας εξαρτάται από την αλληλεπίδραση ενός φυσικού φαινομένου με τη διαχείριση των υδατικών πόρων ώστε να ικανοποιούνται οι ανάγκες σε νερό. Η διαχείριση αυτή

περιλαμβάνει τρία κύρια στάδια που σχετίζονται με το ισοζύγιο φυσικής προσφοράς και ζήτησης του νερού. Στο πρώτο στάδιο η φυσική προσφορά υπερβαίνει κατά πολύ τη ζήτηση (αφθονία νερού) και η διαχείριση περιορίζεται στη διανομή των υδατικών πόρων. Στο δεύτερο στάδιο η φυσική προσφορά είναι μικρότερη από τη ζήτηση (σπανιότητα νερού) και είναι απαραίτητη η αύξηση της προσφοράς νερού με τεχνικά έργα (π.χ. έργα ταμίευσης νερού). Στο τρίτο στάδιο η φυσική προσφορά παραμένει μικρότερη από τη ζήτηση (έλλειμμα νερού), παρά τα συμβατικά τεχνικά έργα. Σε αυτό το στάδιο αναπόφευκτα η προσπάθεια στρέφεται στη διαχείριση της ζήτησης και της διαθεσιμότητας των υδατικών πόρων, εφόσον η εναλλακτική λύση είναι η κατασκευή εξαιρετικά ακριβών ή εξεζητημένων τεχνικών έργων [Μαμάσης και Κουτσογιάννης, 2007].

Η ολοκληρωμένη και βιώσιμη διαχείριση του νερού χρειάζεται ικανοποιητικό σχεδιασμό που να λαμβάνει υπόψη περιβαλλοντικούς στόχους και να εξασφαλίζει ένα μακροχρόνιο πλαίσιο. Στην Ευρώπη, η Οδηγία 2000/60/ΕΚ για τη θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων παρέχει αυτό το πλαίσιο προκειμένου να βελτιωθεί η διαχείριση των υδατικών πόρων, ακόμη και σε συνθήκες ξηρασίας και έλλειψης νερού. Η σωστή εφαρμογή της Οδηγίας θα έπρεπε «να συμβάλλει στο μετριασμό των επιπτώσεων από ... ξηρασίες» (άρθρο 1, Οδηγία-πλαίσιο για το Νερό) και η έλλειψη νερού δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως επιχειρήμα/δικαιολογία για απομάκρυνση από τους στόχους της Οδηγίας. Η Οδηγία-πλαίσιο παρέχει ένα πλαίσιο για τη διαχείριση των υδάτων όπου συνυπολογίζονται αφενός όλες οι χρήσεις νερού (οικιακή, γεωργική, βιομηχανική και οικολογική) και αφετέρου η διαθεσιμότητα του νερού. Από την άλλη μεριά επιτρέπει στα κράτη-μέλη αρκετή ευελιξία ώστε να προσαρμόσουν τα μέτρα τους στα ειδικά τους προβλήματα. Στις χώρες εκτός ΕΕ η Οδηγία-πλαίσιο για το Νερό θα έπρεπε να θεωρείται ως πρότυπο για τη βελτίωση της διαχείρισης των υδάτων και την αντιμετώπιση της ανεπάρκειας νερού αλλά και της ξηρασίας.

Η Ελλάδα, ως κράτος μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης, έχει στη διάθεσή της σύγχρονα εργαλεία ώστε να σχεδιάσει και να εφαρμόσει μακροπρόθεσμα τις κατάλληλες πολιτικές. Η κοινοτική Οδηγία 2000/60/ΕΚ για τη θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων στοχεύει στην ολοκληρωμένη διαχείριση των επιφανειακών και των υπόγειων νερών, καθώς και στην προστασία, βελτίωση και αποκατάστασή τους, έτσι ώστε μέχρι το τέλος του 2015 όλα τα υδάτινα συστήματα να βρίσκονται σε καλή οικολογική κατάσταση. Ωστόσο, η ως τώρα πορεία της χώρας κάνει εξαιρετικά αμφίβολη την επίτευξη των στόχων της Οδηγίας-πλαίσιο για το Νερό. Σήμερα το ΥΠΕΚΑ ασκεί, με βάση την νέα ισχύουσα νομοθεσία, την αρμοδιότητα διαχείρισης των Υδατικών Πόρων, αλλά μια σειρά άλλων Οργανισμών (όπως η ΔΕΗ, το ΙΓΜΕ κλπ), Περιφερειακών και Νομαρχιακών φορέων, Οργανισμών Τοπικής Αυτοδιοίκησης και άλλων Υπουργείων εμπλέκονται με τον ένα ή τον άλλο τρόπο στα θέματα διαχείρισης των υδατικών πόρων της χώρας. Η ΔΕΗ με τους ταμειυτήρες των μεγάλων Υδροηλεκτρικών Έργων που διαθέτει, διαχειρίζεται εκ των πραγμάτων το μεγαλύτερο ποσοστό των υδατικών πόρων της χώρας. Δεκαέξι μεγάλα Υδροηλεκτρικά Έργα σε λειτουργία, παράγουν το 10% περίπου (4500 έως 5500 εκατομμύρια κιλοβατώρες) της συνολικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και διαθέτουν το 25% περίπου (3.000 MW) της εγκατεστημένης ισχύος του συστήματος. Οι ταμειυτήρες της ΔΕΗ έχουν ωφέλιμο όγκο για την αποθήκευση νερού 5.300 εκατομμυρίων κυβικών μέτρων, το 30% των οποίων περίπου (1.500 έως 2.000 εκατομμύρια κυβικά το χρόνο) διατίθενται για την ικανοποίηση αρδευτικών και άλλων αναγκών, πέραν της παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας.

Όσον αφορά στη διοικητική δομή της χώρας, ο σχεδιασμός της δεν προβλέπει κριτήρια που να απορρέουν από τις διαδικασίες διαχείρισης των υδατικών πόρων. Συγκεκριμένα, βασικό πρόβλημα της διοικητικής διάρθρωσης της χώρας σε σχέση με τη διαχείριση των υδατικών πόρων είναι η διαίρεση σε διοικητικές χωρικές μονάδες με κριτήρια που δεν παρουσιάζουν σχέση με τα αντίστοιχα υδρολογικά. Αυτό έχει αποτέλεσμα την αδυναμία αναγωγής των διαφόρων μεγεθών (πληθυσμιακών, οικονομικών, τομέων παραγωγής) σε υδατικές μονάδες χώρου, δεδομένου ότι τα περισσότερα από αυτά καταχωρούνται σε διοικητικές μονάδες (περιφέρειες και νομούς). Ο Ν. 3199/2003 επέτεινε το πρόβλημα, δεδομένου ότι καθόρισε τις διοικητικές περιφέρειες ως αρμόδιες για τη διαχείριση των

λεκανών απορροής και των υδατικών διαμερισμάτων. Συχνά όμως μια λεκάνη απορροής μπορεί να ανήκει σε περισσότερες της μιας περιφέρειες (π.χ. η λεκάνη του Αχελώου ανήκει σε τέσσερις περιφέρειες). Επίσης, σημαντικό πρόβλημα αποτελεί και η ύπαρξη μεγάλου αριθμού φορέων, των οποίων οι αρμοδιότητες οι σχετικές με τους υδατικούς πόρους αλληλοκαλύπτονται και πολλές φορές συγκρούονται στην πράξη. Είναι πιθανόν, μετά την πλήρη εφαρμογή της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ, τα προβλήματα αυτού του είδους να αμβλυνθούν.

Με δεδομένη την ανταγωνιστικότητα δράσης του πλήθους των εμπλεκόμενων φορέων, τις δυσκολίες συνεννόησης, τις δυσκολίες συντονισμού, και την έλλειψη συμπληρωματικότητας των δραστηριοτήτων τους, παρουσιάζονται σημαντικές δυσχέρειες στην ιεράρχηση αναγκών και ενεργειών και τον καθορισμό προτεραιοτήτων. Επίσης, δυσχεραίνεται η προσπάθεια για ορθολογική και συνολική αντιμετώπιση των υδατικών προβλημάτων. Παράλληλα με το διοικητικό, και το θεσμικό πλαίσιο το οποίο αναφέρεται στην έρευνα, αξιοποίηση, χρήση και προστασία των υδατικών πόρων αποτελείται από μια σειρά από νόμους, διατάγματα και διοικητικές αποφάσεις, ιδρυτικούς νόμους και οργανισμούς υπουργείων και φορέων, ορισμένα από τα οποία χρονολογούνται από το 1930 και που πολλές φορές επικαλύπτονται ή έρχονται σε αντίθεση μεταξύ τους. Στη δεκαετία του 1980, δύο νομοθετήματα, που λειτουργούσαν συμπληρωματικά και διακρίνονται για τη διατομεακή τους αντίληψη και την ολοκληρωμένη αντιμετώπιση των υδατικών πόρων, έδωσαν σημαντική ώθηση στα θέματα διαχείρισης. Συγκεκριμένα, ο Ν. 1650/1986 «για την προστασία του περιβάλλοντος» αντιμετώπισε το νερό ως στοιχείο του περιβάλλοντος και προέβλεπε μέτρα οργανωτικά και θεσμικά για την παρακολούθηση και τον έλεγχο της ποιότητας των υδατικών πόρων. Παράλληλα, ο Ν. 1739/1987 «για τη διαχείριση των υδατικών πόρων» εισήγαγε σύγχρονη αντίληψη για την αντιμετώπιση του νερού στην έρευνα, τη διοίκηση και την καθημερινή πρακτική, με τη θεσμοθέτηση διαδικασιών και οργάνων που επέτρεπαν την άσκηση της διαχείρισης σε εθνικό και κυρίως σε περιφερειακό επίπεδο, σε συνδυασμό με τον προγραμματισμό ανάπτυξης της χώρας, μέσα από διαδικασίες και όργανα, στα οποία λαμβάνονταν η γνώμη όλων των εμπλεκόμενων φορέων. Δυστυχώς, οι αδυναμίες του δημόσιου τομέα (όπως έλλειψη πόρων και υπηρεσιών στελεχωμένων με ανάλογο προσωπικό) δεν επέτρεψαν την πλήρη εφαρμογή του, με αποτέλεσμα την ουσιαστική του κατάρρευση (μετά την πλήρη εφαρμογή του 3199/2003).

Στις 22/12/2000 δημοσιεύτηκε στην Εφημερίδα των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων η Οδηγία 2000/60/ΕΚ «για τη θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων». Το πνεύμα της Οδηγίας είναι κυρίαρχα περιβαλλοντικό, έχει στόχο την κατά το δυνατόν ομογενοποίηση των κριτηρίων και της αντίληψης της διαχείρισης των υδατικών πόρων και βασική αρχή την συμμετοχή όλων των ενδιαφερόμενων, μέχρι και τον τελικό χρήστη-καταναλωτή, στη διαδικασία της διαχείρισης. Η υλοποίηση των στόχων από όλα τα κράτη-μέλη προβλέπεται να γίνει με κοινά βήματα σε προκαθορισμένο χρονοδιάγραμμα από το 2002 έως το 2015. Ακολουθεί ο Ν. 3199/2003 για «την προστασία και διαχείριση των υδάτων και την εναρμόνιση με την Οδηγία 2000/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και Συμβουλίου» και το σχετικό Προεδρικό Διάταγμα ΠΔ.51/8.3.2007 (Α' 54), το οποίο εναρμονίζει τα ουσιαστικά θέματα της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ.

Παρά τις μέχρι σήμερα προσπάθειες, δεν έχει γίνει από την πολιτεία ολοκληρωμένο πρόγραμμα για την έρευνα, αξιοποίηση, ανάπτυξη και προστασία των νερών, που να εντάσσεται οργανικά στα αντίστοιχα χρονικά προγράμματα ανάπτυξης τομέων ή και περιοχών της χώρας, όπως προβλέπονταν στο Ν. 1739/1987. Πρόγραμμα, δηλαδή, που να λαμβάνει υπόψη και να εναρμονίζει τις διάφορες τομεακές πολιτικές, να προβλέπει τη συμπληρωματικότητα των έργων των διαφόρων τομέων παραγωγής, να ιεραρχεί και να προσανατολίζει αναπτυξιακά την έρευνα, να υπολογίζει το κόστος λειτουργίας των έργων αξιοποίησης των υδατικών πόρων, κ.λπ. Δεν μπορεί όμως να παραβλεφθούν τα θετικά βήματα που έγιναν τα τελευταία χρόνια, όπως η ίδρυση των περιφερειακών διοικητικών μονάδων διαχείρισης υδατικών πόρων (Διευθύνσεις Υδάτων), έστω και με ελλιπή στελέχωση και χωρίς σοβαρά οικονομικά στηρίγματα, η προσπάθεια του δημόσιου τομέα για δημιουργία βάσεων

δεδομένων (ΥΔΡΟΣΚΟΠΙΟ, ΕΤΥΜΠ, ΕΔΠΠ), η προσπάθεια εφαρμογής της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ, η κατάρτιση από το Υπουργείο Ανάπτυξης, μετά από ανάθεση, διαχειριστικών μελετών σε ομάδες υδατικών διαμερισμάτων, οι συζητήσεις σε ανώτατο επίπεδο για τα σοβαρά προβλήματα του νερού και των απαιτούμενων λύσεων, και η οριστική κατάρτιση του Εθνικού Προγράμματος Διαχείρισης και Προστασίας των Υδατικών Πόρων [Κουτσογιάννης κ.α., 2008].

1.1. Αντικείμενο της διατριβής

Η παρούσα έρευνα αποσκοπεί στην ολοκληρωμένη χωροχρονική προσομοίωση και πρόγνωση της ξηρασίας με χρήση μετεωρολογικών δεικτών και στην εκτίμηση των χαρακτηριστικών της ξηρασίας (ένταση, δριμύτητα, διάρκεια και έκταση) στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού της Θεσσαλίας, που διαπιστωμένα παρουσιάζει φαινόμενα ξηρασίας [Loukas and Vasiliades, 2004; Loukas et al., 2008; Vasiliades and Loukas, 2009a; Vasiliades et al., 2010]. Σκοπός της έρευνας αυτής είναι η παρουσίαση μιας μεθοδολογίας που να μπορεί να εφαρμοστεί για το χαρακτηρισμό των τύπων ξηρασίας με χρήση μετεωρολογικών δεικτών ξηρασίας και συγκεκριμένα του δείκτη Standardized Precipitation Index, SPI, υπολογισμένου σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες και η δημιουργία ενός χωροχρονικού συστήματος προσομοίωσης και πρόγνωσης της ξηρασίας, που να μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιχειρησιακά σε προγράμματα διαχείρισης της ξηρασίας που μέχρι σήμερα δεν υφίστανται στην περιοχή μελέτης. Σημαντική βαρύτητα δίνεται στη χωροχρονική βραχυπρόθεσμη και μεσοπρόθεσμη πρόγνωση ώστε οι αντίστοιχες δραστηριότητες και δράσεις να μπορούν να υλοποιηθούν για την πρόληψη και τον περιορισμό των επιπτώσεων της ξηρασίας. Τέτοιες δραστηριότητες και δράσεις είναι απαραίτητες στην ανάπτυξη συγκεκριμένων προσαρμοσμένων σχεδιασμού διαχείρισης της ξηρασίας [Iglesias et al., 2007a,b]. Η συνεχής προσομοίωση, παρακολούθηση και η πρόγνωση της ξηρασίας είναι το απαραίτητο πρώτο βήμα για τη μετάβαση από την κρίση στη διαχείριση και στην αντιμετώπιση της ξηρασίας. Έτσι, μπορούν οι φορείς που ασκούν πολιτική σε θέματα διαχείρισης υδατικών πόρων να πάρουν μέτρα αντιμετώπισης της ξηρασίας. Οι δράσεις που σχετίζονται με θέματα γεωργικών και υδατικών συστημάτων θα μπορούν να βασίζονται στο προτεινόμενο χωροχρονικό σύστημα πρόγνωσης ξηρασίας για την αποτίμηση των επιπέδων επικινδυνότητας αυτής (προειδοποίησης, συναγερμού και εκτάκτου ανάγκης), τα οποία επιτρέπουν τη δημιουργία συνδέσμων μεταξύ της επιστήμης (ανάλυση επικινδυνότητας) και της πολιτικής (επιχειρησιακή συνιστώσα) [Iglesias et al., 2007a].

Τέλος, ο απώτερος στόχος της παρούσας διατριβής είναι η συνεισφορά ενός ολοκληρωμένου συστήματος παρακολούθησης και πρόγνωσης της ξηρασίας με την εφαρμογή μιας ομάδας δεικτών του SPI σε ένα σύστημα συνεχούς παρακολούθησης και καταγραφής των υδρο-μετεωρολογικών, υδρομετρικών μεταβλητών και της διαθεσιμότητας των υδατικών πόρων, που θα παρέχεται από εξειδικευμένα «κέντρα» συνεχούς παρακολούθησης και καταγραφής. Ο κύριος σκοπός των κέντρων αυτών είναι η υποστήριξη των φορέων αγροτικής και υδατικής πολιτικής για την έγκαιρη διακρίβωση της έναρξης της ξηρασίας. Η διατριβή υλοποίησε τους εξής κύριους ερευνητικούς στόχους:

- Την ολοκληρωμένη βιβλιογραφική επισκόπηση των τύπων ξηρασίας, των δεικτών ξηρασίας και τις τεχνικές διακρίβωσης τύπων ξηρασίας. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε σε μεθόδους χωροχρονικής προσομοίωσης και πρόγνωσης μετεωρολογικών δεικτών ξηρασίας καθώς και κλιματικών (βροχόπτωση, θερμοκρασία) και υδρολογικών (επιφανειακές απορροές) μεταβλητών.
- Τη διακρίβωση διαφόρων τύπων ξηρασίας με τη χρήση του μετεωρολογικού δείκτη ξηρασίας του SPI που υπολογίζεται σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες.

- Την ανάπτυξη ενός πρωτότυπου υβριδικού χωροχρονικού μοντέλου πρόγνωσης διαφόρων τύπων ξηρασίας με βάση τον δείκτη ξηρασίας SPI για βραχυπρόθεσμα (1-2 μήνες) και μεσοπρόθεσμα (3-6 μήνες) μηνιαία χρονικά διαστήματα πρόγνωσης.
- Την ανάπτυξη ενός υβριδικού καταμετρημένου ψηφιακού συστήματος (distributed raster-based monitoring and forecasting system) χωρικής και χρονικής πρόγνωσης και παρακολούθησης του δείκτη ξηρασίας SPI υπολογισμένου σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες που ενσωματώνει οκτώ (8) χωρικές μεθόδους παρεμβολής, αξιολογεί το χωρικό και χρονικό σφάλμα της εξεταζόμενης μεταβλητής και δημιουργεί ψηφιακούς χάρτες πρόγνωσης και παρακολούθησης της ξηρασίας.
- Την εφαρμογή των ανωτέρω στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού στη Θεσσαλία, που διαπιστωμένα παρουσιάζει φαινόμενα διαφόρων τύπων ξηρασίας (μετεωρολογική, γεωργική υδρολογική και ξηρασία υδατικών συστημάτων)

Σημειώνεται ότι η παρούσα διατριβή κάλυψε ένα ευρύτερο ερευνητικό πεδίο σε σχέση με αυτό που είχε αρχικά προταθεί. Ειδικότερα, το θέμα ενός καταμετρημένου χωροχρονικού ψηφιακού συστήματος έγκαιρης προειδοποίησης και παρακολούθησης της ξηρασίας αντιμετωπίστηκε με τη χρήση μίας πιο ολοκληρωμένης θεώρησης του θέματος αφού πραγματοποιούνται καινοτόμες τεχνικές πρόγνωσης και χωρικής προσομοίωσης. Η τεκμηρίωση του θεωρητικού πλαισίου της χωροχρονικής πρόγνωσης και προσομοίωσης έγινε με το ψηφιακό χωροχρονικό επιχειρησιακό σύστημα πρόγνωσης και παρακολούθησης του δείκτη ξηρασίας SPI στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού. Έτσι, το ερευνητικό αντικείμενο διευρύνθηκε, ώστε να περιλάβει μια ολοκληρωμένη επισκόπηση αλλά και κριτική ανάλυση της χωροχρονικής πρόγνωσης της ξηρασίας, συνδέοντάς την με την ανάγκη χειρισμού της από μια επιχειρησιακή οπτική. Η παράλληλη ανάπτυξη του συστήματος έγκαιρης προειδοποίησης της ξηρασίας σε ένα γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διατριβής, καθώς και η εκτενής διερεύνησή του σε μία από τις πλέον πολύπλοκες υδρολογικές λεκάνες του ελληνικού χώρου αποτελούν σημαντική συνιστώσα της όλης προσπάθειας. Το τελικό επιστέγασμα των προσπαθειών είναι η επιχειρησιακή αξιοποίηση του συστήματος πρόγνωσης και παρακολούθησης της ξηρασίας με βάση τον δείκτη SPI στην περιοχή μελέτης. Σημειώνεται ότι για την εφαρμογή του συστήματος έγκαιρης προειδοποίησης της ξηρασίας σε άλλη περιοχή μελέτης ή σε μεγαλύτερη κλίμακα, πρέπει να εξεταστούν από την αρχή τα επιμέρους μοντέλα αυτού ώστε να βελτιστοποιηθούν καλύτερα και να γενικευτεί η αξιοπιστία του.

1.2. Διάρθρωση της διατριβής

Στο πρώτο στάδιο της διδακτορικής διατριβής παρουσιάζονται οι δείκτες τύπων ξηρασίας και ελέγχεται ο μετεωρολογικός δείκτης SPI υπολογισμένος σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες για τη διακρίβωση, πρόγνωση και παρακολούθηση διαφόρων τύπων ξηρασίας. Αρχικά, αξιολογείται η σχέση σύνδεσης μετεωρολογικής και υδρολογικής ξηρασίας (απορροές και εδαφική υγρασία) στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού της Θεσσαλίας, η οποία είναι μια περιοχή με έντονο γεωγραφικό ανάγλυφο και μεγάλες πεδινές εκτάσεις με εκτεταμένη γεωργική δραστηριότητα. Ο κανονικοποιημένος δείκτης βροχόπτωσης SPI (Standardized Precipitation Index, McKee et al., 1993] υπολογισμένος σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες (1-month, 3-month, 6-month, 9-month, 12-month και 24-month) χρησιμοποιήθηκε ως δείκτης της μετεωρολογικής δριμύτητας ξηρασίας. Η υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού δεν έχει παροχομετρικά δεδομένα στην έξοδο της. Για το λόγο αυτό, οι μετρήσεις παροχής του υδρομετρικού σταθμού στη θέση Λάρισα, που καλύπτει ένα μεγάλο μέρος της υδρολογικής λεκάνης,

χρησιμοποιήθηκαν για τη διακρίβωση της υδρολογικής ξηρασίας. Επιπλέον, ο υδρομετρικός σταθμός της Λάρισας εμφανίζει ελλιπή παροχομετρικά δεδομένα, ένα μηνιαίο μοντέλο υδατικού ισοζυγίου UTHBAL [Loukas et al., 2007a] εφαρμόστηκε για την προσομοίωση, συμπλήρωση και επέκταση των χρονοσειρών μετρήσεων παροχής και τη δημιουργία χρονοσειρών εδαφικής υγρασίας της λεκάνης απορροής στη θέση Λάρισα για την περίοδο Οκτ. 1960 - Σεπ. 2002. Οι προσομοιωμένες χρονοσειρές απορροής και εδαφικής υγρασίας κανονικοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας τον μετασχηματισμό Box-Cox και προσαρμόστηκαν (μετασχηματίστηκαν) με βάση την κανονική κατανομή. Στη συνέχεια, υπολογίστηκε ο σταθμισμένος δείκτης υδρολογικής ξηρασίας για την απορροή και την εδαφική υγρασία στην ίδια κλίμακα με την κλίμακα του SPI. Οι τελικοί παραγόμενοι δείκτες χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της υδρολογικής και εδαφικής ξηρασίας και για τη σύγκριση με τους μετεωρολογικούς δείκτες ξηρασίας SPI. Η διακρίβωση τύπων ξηρασίας με χρήση του μετεωρολογικού δείκτη ξηρασίας SPI πραγματοποιήθηκε για ένα πολύπλοκο σύστημα διαχείρισης υδατικών πόρων. Επεξεργασμένα δεδομένα αποθήκευσης νερού του μοναδικού μεγάλου ταμιευτήρα της Θεσσαλίας Ν. Πλαστήρα (Ταυρωπός) χρησιμοποιήθηκαν για την αναγνώριση της ξηρασίας υδατικών συστημάτων και σύγκριση με τους μετεωρολογικούς δείκτες ξηρασίας SPI.

Στη συνέχεια (δεύτερο στάδιο) ο δείκτης SPI για χρονικές κλίμακες 3-μηνών, 6-μηνών, 9-μηνών, 12-μηνών και 24-μηνών επιλέχθηκε για τη χωροχρονική προσομοίωση διαφόρων τύπων ξηρασίας. Ο δείκτης SPI υπολογίστηκε σημειακά για 66 βροχομετρικούς σταθμούς της υδρολογικής λεκάνης του Πηνειού ποταμού. Σε κάθε σταθμό ένα μηνιαίο στοχαστικό μοντέλο βροχόπτωσης εφαρμόστηκε για την εκτίμηση της αβεβαιότητας των παραμέτρων της Gamma κατανομής της μηνιαίας βροχόπτωσης και την επιλογή της βέλτιστης τιμής των παραμέτρων. Στη συνέχεια, οκτώ μεθοδολογίες χωρικής παρεμβολής εφαρμόστηκαν χωροχρονικά για την εκτίμηση της ξηρασίας στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού για την περίοδο Οκτ. 1960 – Σεπ. 2002. Οι χωρικές μεθοδολογίες που εφαρμόστηκαν είναι:

- α. Η μέθοδος πολύγωνων Thiessen (Thiessen Polygons, TP)
- β. Η μέθοδος αντίστροφης απόστασης (Inverse Distance Weighted, IDW)
- γ. Οι μέθοδοι Γεωστατιστικής (kriging)
 - Μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής kriging (Ordinary Kriging, OK)
 - Μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής simple kriging (Simple Kriging, SK)
 - Μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής kriging με εξωτερική τάση (Kriging with External Drift, KED)
- δ. Οι υβριδικές ή συνδυαστικές μεθοδολογίες
 - Μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής ordinary kriging με μοντέλο παλινδρόμησης (του υψομέτρου και χωρικών συντεταγμένων) (Regression Kriging using Elevation and spatial coordinates as external variables, RK)
 - Μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής simple kriging με μεταβαλλόμενα τοπικά μέσα και με μοντέλο παλινδρόμησης (του υψομέτρου) (Simple Kriging with Varying Local Means with Elevation as external variable, SKIm)
 - Μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής simple kriging με μεταβαλλόμενα τοπικά μέσα και με μοντέλο παλινδρόμησης (του υψομέτρου και χωρικών συντεταγμένων) (Simple Kriging with Varying Local Means with Elevation and spatial coordinates as external variables, SKIm_R)

Σκοπός της χωροχρονικής προσομοίωσης είναι η αξιολόγηση του σφάλματος των χωρικών μεθόδων παρεμβολής στην απεικόνιση της ξηρασίας και η επιλογή της βέλτιστης μεθόδου. Η αξιολόγηση των μεθόδων βασίζεται στους παραγόμενους ψηφιακούς χωρικούς χάρτες μηνιαίων τιμών του SPI για χρονικές κλίμακες 3-μηνών, 6-μηνών, 9-μηνών, 12-μηνών και 24-μηνών ισοδιάστασης (μέγεθος φατνίου, pixel size) 1-km, αλλά και σε στατιστικά κριτήρια με χρήση της τεχνικής cross-validation των 48 σταθμών ανάπτυξης και ανεξάρτητης χωρικής πιστοποίησης των 18 βροχομετρικών σταθμών (independent validation). Για την θεματική απεικόνιση των χαρτών ξηρασίας επιλέχθηκαν ιστορικά γεγονότα ξηρασίας και χωρικά στατιστικά κριτήρια εκτιμήθηκαν για τα χαρακτηριστικά (δριμύτητα, διάρκεια και έκταση) της ξηρασίας.

Το τρίτο στάδιο ασχολείται με την χωροχρονική πρόγνωση της ξηρασίας. Για την χωροχρονική πρόγνωση του δείκτη ξηρασίας SPI για βραχυπρόθεσμες (1-2 μήνες μπροστά) και μεσοπρόθεσμες (3-6 μήνες μπροστά) προγνώσεις αναπτύχθηκε μία υβριδική χωροχρονική μεθοδολογία πολλαπλών χρονικών βημάτων πρόγνωσης με το συνδυασμό γενικευμένων χρονικών τεχνητών νευρωνικών δικτύων και χωρικών αναδρομικών νευρωνικών δικτύων. Η χωροχρονική ανάπτυξη της μεθόδου έγινε με τη χρήση μηνιαίων τιμών του δείκτη ξηρασίας SPI (SPI-3μηνών, SPI-6μηνών, SPI-9μηνών, SPI-12μηνών και SPI-24μηνών) χρησιμοποιώντας μηνιαία βροχομετρικά δεδομένα από 48 βροχομετρικούς σταθμούς ομοίμορφα κατανεμημένους στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού για την περίοδο Οκτ. 1960 - Σεπ. 1992. Η χρονική πιστοποίηση της μεθοδολογίας των σταθμών ανάπτυξης πραγματοποιήθηκε για την περίοδο Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002 που δεν χρησιμοποιήθηκε στην ανάπτυξη της μεθόδου. Επίσης, η μεθοδολογία ελέγχθηκε και για την ανεξάρτητη χωρική και χρονική πιστοποίηση σε 18 βροχομετρικούς σταθμούς που δεν χρησιμοποιήθηκαν στην εκπαίδευση της υβριδικής μεθόδου για όλη την περίοδο των δεδομένων (Οκτ. 1960 - Σεπ. 2002). Η αξιολόγηση της μεθόδου έγινε με στατιστικά κριτήρια με βάση τις παρατηρημένες τιμές των δεικτών ξηρασίας και με σύγκριση ενός αλγορίθμου αναφοράς του μοντέλου εμμονής (Persistence model). Επίσης, ποιοτικά κριτήρια πρόγνωσης επεισοδίων ξηρασίας υπολογίστηκαν για την αξιολόγηση της υβριδικής χωροχρονικής μεθόδου για βραχυπρόθεσμα (1-2 μήνες μπροστά) και μεσοπρόθεσμα διαστήματα (3-6 μήνες μπροστά) πρόγνωσης και την επιλογή των χρονικών βημάτων πρόγνωσης για αξιόπιστες και αμερόληπτες επιχειρησιακές δράσεις αντιμετώπισης της ξηρασίας.

Τέλος, η μεθοδολογία χωροχρονικής πρόγνωσης (στάδιο 4) συνδέθηκε με το αυτοματοποιημένο σύστημα χωρικής προσομοίωσης και παρεμβολής για τη δημιουργία ψηφιακών χαρτών διαστάσεως 1-km του δείκτη SPI για χρονικές κλίμακες 3-μηνών, 6-μηνών, 9-μηνών, 12-μηνών και 24-μηνών και τον υπολογισμό επιφανειακών τιμών SPI στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού. Και πάλι το υβριδικό σύστημα (χωροχρονική πρόγνωση και χωρική παρεμβολή) αξιολογήθηκε, τόσο για την εκτίμηση επιφανειακών τιμών του SPI, όσο και με σύγκριση των παραγόμενων παρατηρούμενων και προγνωστικών ψηφιακών χαρτών απεικόνισης της ξηρασίας. Επιλέχθηκαν ιστορικά γεγονότα ξηρασίας για τη θεματική απεικόνιση των προγνωστικών χαρτών και τη σύγκριση με τους χάρτες των παρατηρημένων τιμών του SPI που προέκυψαν από το δεύτερο στάδιο της εργασίας (χωροχρονική προσομοίωση). Για την αξιολόγηση του προτεινόμενου υβριδικού συστήματος έγκαιρης προειδοποίησης και παρακολούθησης της ξηρασίας υπολογίστηκαν στατιστικά χωρικά και χρονικά κριτήρια ελέγχου της πρόγνωσης για βραχυπρόθεσμες και μεσοπρόθεσμες περιόδους.

Αναλυτικά, στο 2^ο κεφάλαιο γίνεται μια συνοπτική βιβλιογραφική επισκόπηση των τύπων ξηρασίας, των δεικτών ξηρασίας και ιδίως του μετεωρολογικού δείκτη SPI, καθώς και των χαρακτηριστικών της ξηρασίας. Στη συνέχεια, περιγράφεται αναλυτικά η μεθοδολογία διακρίβωσης τύπων ξηρασίας με τη χρήση του μετεωρολογικού δείκτη SPI, που υπολογίστηκε σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες. Η διακρίβωση των τύπων ξηρασίας πραγματοποιήθηκε για την αναγνώριση της υδρολογικής ξηρασίας (ξηρασία εδαφικής υγρασίας και επιφανειακών απορροών) στην κύρια υπολεκάνη της υδρολογικής λεκάνης του Πηνειού ποταμού, όπου υπήρχαν διαθέσιμες υδρομετρήσεις στη θέση Λάρισα. Η

διακρίβωση της ξηρασίας υδατικών συστημάτων έγινε για τον Ταμιευτήρα του Ν. Πλαστήρα για τον οποίο υπήρχαν δεδομένα αποθήκευσης.

Στο 3^ο κεφάλαιο αναλύονται οι μέθοδοι χωρικής παρεμβολής για χωροχρονική προσομοίωση, οι εφαρμογές χωρικών μεθόδων για χωροχρονική προσομοίωση πρωτογενών μετεωρολογικών μεταβλητών με έμφαση στη βροχόπτωση και στους μετεωρολογικούς δείκτες ξηρασίας. Περιγράφεται η θεωρία της γεωστατιστικής δίνοντας έμφαση στις μεθόδους βέλτιστης παρεμβολής kriging και στις συνδυαστικές μεθόδους γεωστατιστικής και παλινδρόμησης με πρωτογενείς και δευτερογενείς μεταβλητές. Τέλος, γίνεται αναλυτική περιγραφή της μεθοδολογίας εφαρμογής οκτώ (8) χωρικών μεθόδων για χωροχρονική προσομοίωση των δεικτών ξηρασίας SPI-3μηνών, SPI-6μηνών, SPI-9μηνών, SPI-12μηνών και SPI-24μηνών στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού. Η εφαρμογή των χωρικών μεθόδων για χωροχρονική προσομοίωση του SPI έγινε στο αυτοματοποιημένο σύστημα που αναπτύχθηκε για την ολοκληρωμένη χρονική και χωρική παρακολούθηση διαφόρων τύπων ξηρασίας βασισμένων στο SPI.

Στο 4^ο κεφάλαιο περιγράφονται οι μέθοδοι της μηχανικής μάθησης που είναι κατάλληλες για χωροχρονική πρόγνωση υδρολογικών μεταβλητών. Παραδείγματα εφαρμογών μεθόδων μηχανικής μάθησης για χωρική και χρονική πρόγνωση αναφέρονται με έμφαση στην ξηρασία για βραχυπρόθεσμες (1-2 μήνες μπροστά) και μεσοπρόθεσμες επιχειρησιακές δράσεις αντιμετώπισης της ξηρασίας. Στην παρούσα διατριβή τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, μία μέθοδος της μηχανικής μάθησης, επιλέχθηκαν για χωροχρονική πρόγνωση του δείκτη ξηρασίας SPI για χρονικές κλίμακες 3μηνών, SPI-6μηνών, SPI-9μηνών, SPI-12μηνών και SPI-24μηνών. Περιγράφονται αναλυτικά η θεωρία και ο σχεδιασμός της αρχιτεκτονικής των τεχνητών νευρωνικών δικτύων και δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στους αλγόριθμους βελτιστοποίησης Quasi-Newton των τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Το βέλτιστο μητρώο εισόδου των χρόνων υστέρησης (lag times) του SPI υπολογίστηκε από το μη-γραμμικό εργαλείο ανάλυσης χρονοσειρών Gamma test με τη χρήση ευρετικών τεχνικών. Περιγράφονται δύο γενικευμένες χρονικές μεθοδολογίες τεχνητών νευρωνικών δικτύων ως προς την ικανότητα τους να προγνώσουν χωροχρονικά τους δείκτες ξηρασίας SPI για βραχυπρόθεσμες και μεσοπρόθεσμες κλίμακες. Η καλύτερη γενικευμένη χρονική μέθοδος επιλέχθηκε για την είσοδο της σε ένα χωρικό αναδρομικό νευρωνικό δίκτυο για χωροχρονική διόρθωση των χρονικών προγνώσεων και τη δημιουργία ενός υβριδικού συστήματος χωροχρονικής πρόγνωσης.

Στο 5^ο κεφάλαιο περιγράφονται αναλυτικά η περιοχή μελέτης και τα προβλήματα ξηρασίας που αντιμετωπίζει και η βάση δεδομένων στην περιοχή μελέτης. Επίσης, γίνεται διακρίβωση των διαφόρων τύπων ξηρασίας με χρήση του μετεωρολογικού δείκτη SPI υπολογισμένου σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες. Επιπλέον, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εκτίμησης της βέλτιστης χρονικής κλίμακας υπολογισμού του SPI για αναγνώριση της ξηρασίας εδαφικής υγρασίας, επιφανειακών απορροών και υδατικών συστημάτων. Από την ανάλυση αυτή επιλέγονται ενδεικτικές κλίμακες υπολογισμού του SPI για χωροχρονική προσομοίωση και πρόγνωση τύπων ξηρασίας.

Ο υπολογισμός του SPI για τις επιλεγμένες χρονικές κλίμακες και για τους βροχομετρικούς σταθμούς που βρίσκονται στην περιοχή μελέτης αναφέρεται στο 6^ο κεφάλαιο. Περιγράφεται, επίσης, η εφαρμογή και τα αποτελέσματα ενός μηνιαίου στοχαστικού μοντέλου βροχόπτωσης για την εκτίμηση της αβεβαιότητας των παραμέτρων της Gamma κατανομής της μηνιαίας βροχόπτωσης και την επιλογή της βέλτιστης τιμής των παραμέτρων στους βροχομετρικούς σταθμούς. Στο ίδιο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά το σύστημα χωροχρονικής παρακολούθησης χωρικών μεταβλητών που ενσωματώνει την αυτόματη εφαρμογή οκτώ μεθόδων χωρικής παρεμβολής, και εφαρμόζεται για επιλεγμένες χρονικές κλίμακες υπολογισμού του δείκτη ξηρασίας SPI. Τα αποτελέσματα της χωροχρονικής προσομοίωσης των οκτώ (8) χωρικών μεθόδων για επιλεγμένες χρονικές κλίμακες του SPI παρουσιάζονται αναλυτικά για τους 48 βροχομετρικούς σταθμούς ανάπτυξης και 18 σταθμούς χωρικής πιστοποίησης. Από τη σύγκριση των χωρικών μεθόδων εκτιμάται το χωρικό και χρονικό σφάλμα των χωρικών μεθόδων για χωροχρονική προσομοίωση και η βέλτιστη χωρική μεθοδολογία επιλέγεται για την χωροχρονική

προσομοίωση του SPI και την παραγωγή των παρατηρούμενων ψηφιακών χαρτών ξηρασίας με μέγεθος φατνίου 1-km.

Στο 7^ο κεφάλαιο γίνεται η σύγκριση των δύο γενικευμένων χρονικών μεθόδων πρόγνωσης με βάση τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα για πολλαπλά χρονικά βήματα (multiple lead-times) πρόγνωσης. Οι δύο γενικευμένες χρονικές μέθοδοι εφαρμόζονται χωροχρονικά για την επιλογή ενός βέλτιστου χρονικού μοντέλου πρόγνωσης ξηρασίας με βάση τον δείκτη ξηρασίας SPI για τους 48 βροχομετρικούς σταθμούς ανάπτυξης και 18 σταθμούς χωρικής πιστοποίησης. Παρουσιάζονται διάφορες ποσοτικές και ποιοτικές στατιστικές παράμετροι για την αξιολόγηση των χρονικών τεχνικών και την επιλογή ενός χρονικού μοντέλου πρόγνωσης ξηρασίας για αξιόπιστες και αμερόληπτες επιχειρησιακές βραχυπρόθεσμες (1-2 μήνες πρόγνωση μπροστά) και μεσοπρόθεσμες (3-6 μήνες μπροστά) κλίμακες.

Στο 8^ο κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση της υβριδικής χωροχρονικής μεθόδου πρόγνωσης που συνδυάζει τις χρονικές προγνώσεις του SPI με ένα χωρικό αναδρομικό νευρωνικό δίκτυο τύπου Elman για πολλαπλά χρονικά βήματα πρόγνωσης. Για την αξιολόγηση της υβριδικής μεθόδου και την επιλογή αξιόπιστων και αμερόληπτων βραχυπρόθεσμων και μεσοπρόθεσμων χρονικών διαστημάτων πρόγνωσης για επιχειρησιακές εφαρμογές αναφέρονται διάφορες ποσοτικές και ποιοτικές στατιστικές παράμετροι για τους 48 βροχομετρικούς σταθμούς ανάπτυξης και τους 18 σταθμούς χωρικής πιστοποίησης.

Στο 9^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται το σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης και παρακολούθησης της ξηρασίας με βάση το μετεωρολογικό δείκτη ξηρασίας SPI. Το σύστημα ενσωματώνει την αυτόματη εφαρμογή οκτώ μεθόδων χωρικής παρεμβολής, και τις χωροχρονικές προγνώσεις της υβριδικής χωροχρονικής τεχνικής για χρονικά βήματα πρόγνωσης, που είναι κατάλληλα για επιχειρησιακές εφαρμογές. Τα αποτελέσματα του συστήματος έγκαιρης προειδοποίησης της ξηρασίας παρουσιάζονται με τη μορφή ψηφιακών προγνωστικών χαρτών για επιλεγμένα ιστορικά γεγονότα ξηρασίας και συγκρίνονται με τους παρατηρημένους χωρικούς χάρτες, που προέκυψαν από την εφαρμογή της χωροχρονικής προσομοίωσης για μέγεθος φατνίου 1-km. Επίσης, στο ίδιο κεφάλαιο παρουσιάζεται η εκτίμηση των επιφανειακών τιμών του προγνώσεων του δείκτη ξηρασίας SPI για πολλαπλές χρονικές κλίμακες και η σύγκριση τους με τις παρατηρημένες επιφανειακές τιμές της υδρολογικής λεκάνης του Πηνειού ποταμού. Στατιστικά χωρικά και χρονικά κριτήρια ελέγχου της πρόγνωσης για βραχυπρόθεσμες και μεσοπρόθεσμες περιόδους παρουσιάζονται για την αξιολόγηση του προτεινόμενου υβριδικού συστήματος έγκαιρης προειδοποίησης και παρακολούθησης της ξηρασίας.

Τέλος, στο 10^ο κεφάλαιο συνοψίζονται οι μεθοδολογίες που αναπτύχθηκαν και σχολιάζονται τα αποτελέσματα των εφαρμογών, κωδικοποιούνται τα κύρια συμπεράσματα της διατριβής και προτείνονται κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα.

1.3. Συμβολή της διατριβής και καινοτόμα σημεία

Η έρευνα που έγινε αποσκοπεί στην ανάπτυξη ενός χωροχρονικού συστήματος προσομοίωσης και πρόγνωσης της ξηρασίας για επιχειρησιακές εφαρμογές. Το ερευνητικό αυτό αντικείμενο παρουσιάζει έντονο διεπιστημονικό ενδιαφέρον, καθώς πραγματεύεται ένα ερευνητικό πεδίο αιχμής, με σημαντικές προοπτικές. Προϋποθέτει γνώσεις από διαφορετικά επιστημονικά πεδία, ορισμένα από τα οποία είναι γενικά (μαθηματικά, επιχειρησιακή έρευνα, πληροφορική, στατιστική) ενώ άλλα είναι εξειδικευμένα, από τον χώρο των επιστημών του νερού και του περιβάλλοντος (υδρολογία, μετεωρολογία, υδροκλιματολογία, ανάλυση και διαχείριση συστημάτων υδατικών πόρων, συστήματα γεωγραφικής πληροφορίας και γεωπληροφορική). Ο συνδυασμός των παραπάνω έχει δημιουργήσει έναν σχετικά πρόσφατο τεχνολογικό κλάδο, που αναφέρεται ως υδροπληροφορική [See et al., 2007; Abrahart et al.,

2008]. Αν και τα συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης της ξηρασίας ανήκουν στο πεδίο της υδροπληροφορικής, η παρούσα διατριβή ανήκει και στο ευρύ γνωστικό πεδίο της υδρολογίας, αφού καλύπτει θέματα που σχετίζονται με την ανάλυση υδρολογικών και μετεωρολογικών παραμέτρων, την χωρική και χρονική προσομοίωση και πρόγνωση χρονοσειρών υδρολογικών μεταβλητών.

Δημιουργήθηκε ένα καταναμημένο ψηφιακό χωροχρονικό σύστημα προσομοίωσης και πρόγνωσης της ξηρασίας, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιχειρησιακά σε προγράμματα διαχείρισης της ξηρασίας που μέχρι σήμερα δεν υπάρχουν στην περιοχή μελέτης και γενικά στον ελλαδικό χώρο. Σημαντική βαρύτητα δόθηκε στη χωροχρονική βραχυπρόθεσμη και μεσοπρόθεσμη πρόγνωση ώστε οι αντίστοιχες δραστηριότητες και δράσεις να μπορούν να υλοποιηθούν προκειμένου να μπορούν να προληφθούν και να περιοριστούν οι επιπτώσεις από την ξηρασία. Τέτοιες δραστηριότητες και δράσεις είναι απαραίτητες στην ανάπτυξη συγκεκριμένων προσαρμοσμένων σχεδιασμού διαχείρισης της ξηρασίας [Iglesias et al., 2007a,b].

Το ψηφιακό σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης της ξηρασίας που δημιουργήθηκε, αν και βασίζεται στον μετεωρολογικό δείκτη ξηρασίας SPI υπολογισμένο σε ενδεικτικές χρονικές κλίμακες αντιπροσωπευτικών τύπων ξηρασίας, μπορεί πολύ εύκολα να ενσωματώσει συστήματα πρόγνωσης άλλων υδρολογικών παραμέτρων (π.χ. μετεωρολογικοί δείκτες, θερμοκρασία, βροχόπτωση, εξατμισοδιαπνοή) για την καταναμημένη ψηφιακή χωροχρονική πρόγνωση και απεικόνισή τους. Επίσης, μπορεί να εφαρμοστεί για την χωροχρονική προσομοίωση χωρικών μεταβλητών (π.χ. βροχόπτωση, θερμοκρασία, εξατμισοδιαπνοή, μετεωρολογικοί δείκτες ξηρασίας, υδραυλική αγωγιμότητα) και δημιουργία ψηφιακών χαρτών με στόχο την παρακολούθηση (monitoring) των χωρικών μεταβλητών. Τέλος, μπορεί να ενσωματώσει διάφορους δείκτες μετεωρολογικών και υδρολογικών μεταβλητών (π.χ. επιφανειακή απορροή και στάθμη υπόγειου νερού) σε ένα σύστημα συνεχούς παρακολούθησης και καταγραφής των υδρο-μετεωρολογικών, υδρομετρικών μεταβλητών και της διαθεσιμότητας των υδατικών πόρων.

Πολλά σημεία της διατριβής είναι, είτε εν μέρει είτε στο σύνολό τους πρωτότυπα, και αρκετά έχουν ήδη δημοσιευτεί, στη μορφή που παρουσιάζεται στη διατριβή ή σε προηγούμενα στάδια της έρευνας. Από αυτά αναφέρονται περιληπτικά τα παρακάτω και στη συνέχεια τα καινοτόμα στοιχεία παρουσιάζονται αναλυτικά και σχολιάζονται.

- Η διακρίβωση τύπων ξηρασίας με χρήση του μετεωρολογικού δείκτη ξηρασίας SPI υπολογισμένου σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες [Vasiliades and Loukas, 2006; Vasiliades et al., 2010].
- Η ενσωμάτωση οκτώ χωρικών μεθόδων παρεμβολής σε μια αυτοματοποιημένη διαδικασία υπολογισμού για χωροχρονική προσομοίωση του SPI, τη δημιουργία καταναμημένων ψηφιακών χαρτών ξηρασίας και την εκτίμηση επιφανειακών τιμών του SPI ανά υδρολογική λεκάνη.
- Η δημιουργία ενός γενικευμένου χρονικού μοντέλου πρόγνωσης για ταυτόχρονη πρόγνωση μελλοντικών τιμών SPI σε βροχομετρικούς σταθμούς (χωροχρονική πρόγνωση) για βραχυπρόθεσμα (1-2 μήνες) και μεσοπρόθεσμα (3-6 μήνες) διαστήματα πρόγνωσης [Vasiliades and Loukas, 2010a].
- Η δημιουργία ενός υβριδικού χωροχρονικού συστήματος πρόγνωσης για βραχυπρόθεσμα (1-2 μήνες) και μεσοπρόθεσμα (3-6 μήνες) διαστήματα πρόγνωσης που συνδυάζει τις προγνώσεις του SPI του γενικευμένου χρονικού μοντέλου πρόγνωσης με ένα χωρικό μοντέλο πρόγνωσης που στηρίζεται στα αναδρομικά νευρωνικά δίκτυα [Vasiliades and Loukas, 2010b].
- Η δημιουργία ενός καταναμημένου ψηφιακού (distributed raster-based) χωροχρονικού συστήματος παρακολούθησης και πρόγνωσης της ξηρασίας για επιχειρησιακή εφαρμογή με βάση τον δείκτη SPI και η επιχειρησιακή εφαρμογή του συστήματος έγκαιρης προειδοποίησης της ξηρασίας στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού Θεσσαλίας.

1.3.1. Ανάλυση των καινοτόμων στοιχείων

Επιχειρήθηκε μια ολοκληρωμένη, έστω και συνοπτική, επισκόπηση των μεθόδων ανάλυσης της ξηρασίας, και των μεθόδων χωρικής παρεμβολής και χρονικής πρόγνωσης (Κεφάλαια 2, 3 και 4). Η όλη προσέγγιση έγινε από την οπτική γωνία της επιχειρησιακής εφαρμογής, που προϋποθέτει σημαντικό υπολογιστικό φόρτο και αξιόπιστες χωρικές και χρονικές προσομοιώσεις και προγνώσεις των τύπων της ξηρασίας. Για τον λόγο αυτό, η διακρίβωση των τύπων ξηρασίας βασίστηκε στον μετεωρολογικό δείκτη ξηρασίας SPI που υπολογίζεται σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες και χρειάζεται μόνο μηνιαία δεδομένα βροχόπτωσης. Αυτή η ιδιαιτερότητα υπολογισμού του δείκτη SPI τον καθιστά πολύ ευέλικτο για επιχειρησιακές εφαρμογές προγραμμάτων ξηρασίας [Iglesias et al., 2007a,b], αφού μπορεί να διακρίνει τύπους ξηρασίας (μετεωρολογική, γεωργική, υδρολογική και ξηρασία υδατικών συστημάτων) αρκεί να προσδιοριστεί η χρονική κλίμακα υπολογισμού του SPI για τον αντίστοιχο τύπο ξηρασίας [Vasiliades et al., 2010]. Βέβαια, σημειώνεται ότι σήμερα υπάρχουν και άλλοι μετεωρολογικοί δείκτες που υπολογίζονται σε πολλαπλή χρονική κλίμακα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αναγνώριση διαφόρων τύπων ξηρασίας, όπως ο δείκτης Reconnaissance Drought Index, RDI [Tsakiris and Vangelis, 2005] και ο Standardized Precipitation Evaporation Drought Index, SPEI [Vicente-Serrano et al., 2010]. Οι δείκτες RDI, SPEI είναι όμως πιο πολύπλοκοι από τον SPI, γιατί στηρίζονται εκτός από τη βροχόπτωση και στον υπολογισμό της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής, ενώ έχουν παρόμοια συμπεριφορά με τον SPI [Tsakiris et al., 2007; Lorenzo-Lacruz et al., 2010]. Αυτό οφείλεται στο ότι η μηνιαία διακύμανση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής υπολογισμένη από δεδομένα θερμοκρασίας (π.χ. μέθοδος Thornthwaite) ή από πολλά κλιματικά δεδομένα (π.χ. του Penman-Monteith) είναι πολύ μικρή έως ασήμαντη σε σύγκριση με τη μηνιαία διακύμανση της βροχόπτωσης. Επίσης, το ίδιο συμβαίνει και στην υδρολογική προσομοίωση [Jakeman and Hornberger, 1993; Perrin et al., 2001] όπου οι χρονοσειρές της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής δεν βελτιώνουν την απόδοση των υδρολογικών μοντέλων βροχόπτωσης-απορροής και προτείνεται η χρήση μέσων μηνιαίων τιμών δυνητικής εξατμισοδιαπνοής [Andréassian et al., 2004; Oudin et al., 2005].

Η διακρίβωση της υδρολογικής ξηρασίας και η δημιουργία χρονοσειρών εδαφικής υγρασίας και προσομοιωμένων απορροών πραγματοποιήθηκε με το μηνιαίο αδρομερές φυσικής βάσεως μοντέλο υδατικού ισοζυγίου UTHBAL [Loukas et al., 2007a]. Οι παραγόμενοι δείκτες ξηρασίας εδαφικής υγρασίας και επιφανειακών απορροών δημιουργήθηκαν με το μοντέλο UTHBAL και η σύγκριση τους με μετεωρολογικούς δείκτες ξηρασίας περιέχουν αρκετά στοιχεία καινοτομίας και έχουν παρουσιαστεί εκτενώς σε ελληνικά, διεθνή συνέδρια και επιστημονικά περιοδικά [Βασιλειάδης, 2005; Vasiliades and Loukas, 2006; Vasiliades and Loukas, 2009a; Vasiliades et al., 2010]. Σημειώνεται ότι η μεθοδολογία διακρίβωσης υδρολογικής ξηρασίας με χρήση μετεωρολογικών δεικτών ξηρασίας μπορεί να εφαρμοστεί για οποιοδήποτε μηνιαίο ή ημερήσιο υδρολογικό μοντέλο αρκεί να υπάρχει ένας ικανοποιητικός αριθμός υδρομετρήσεων για τη βελτιστοποίηση (ή βαθμονόμηση) του μοντέλου. Στην παρούσα διατριβή η βελτιστοποίηση του μοντέλου UTHBAL έγινε με τη χρήση του αλγορίθμου ολικής βελτιστοποίησης (global optimization method) γενικευμένης ανηγμένης κλίσης με πολλαπλές εκκινήσεις (multi-start generalized reduced gradient algorithm) με ελαχιστοποίηση των αποκλίσεων μεταξύ παρατηρημένης και προσομοιωμένης απορροής. Ο αλγόριθμος αυτός συνδυάζει μεθόδους τυχαίας δειγματοληψίας και προσδιοριστικής αναζήτησης τοπικών ακρότατων. Τέλος, η μεθοδολογία διακρίβωσης της ξηρασίας με χρήση μετεωρολογικών δεικτών ξηρασίας που περιγράφεται στη διατριβή έχει επεκταθεί και για εφαρμογή σε λεκάνες απορροής χωρίς δεδομένα υδρομετρήσεων (απορροών) [Vasiliades et al., 2010]

Η παρούσα διατριβή δίνει επίσης μεγάλη έμφαση και στην εκτίμηση των παραμέτρων της Gamma κατανομής που απαιτούνται για τον υπολογισμό του SPI και παρουσιάζει επίσης στοιχεία καινοτομίας. Εφαρμόζεται για πρώτη φορά για τον υπολογισμό συνθετικών χρονοσειρών SPI και τη σύγκλιση των παραμέτρων της Gamma κατανομής στις βέλτιστες τιμές τους ένα στοχαστικό μοντέλο βροχόπτωσης με αβεβαιότητα παραμέτρων. Η όλη εφαρμογή είναι πρωτότυπη και τα αποτελέσματα της εφαρμογής των

στοχαστικών χρονοσειρών SPI μπορούν εύκολα να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της αβεβαιότητας της βροχόπτωσης, των παραμέτρων της Gamma κατανομής και την εκτίμηση της κλιματικής αλλαγής. Μία εφαρμογή στοχαστικών μοντέλων στη βροχόπτωση και στο δείκτη ξηρασίας SPI για την εκτίμηση της αβεβαιότητας λόγω κλιματικής αλλαγής αναλύονται διεξοδικά στις εργασίες των Vasiliades et al., [2009] και Tzabiras et al., [2010] που συνδυάζουν ένα μοντέλο παλινδρόμησης της βροχόπτωσης με πρωτογενείς μεταβλητές από μοντέλα γενικής κυκλοφορίας της ατμόσφαιρας (GCM) και ένα περιοδικό στοχαστικό μοντέλο επεξεργασίας των υπολοίπων παλινδρόμησης. Το στοχαστικό μοντέλο των Vasiliades et al., [2009] και Tzabiras et al., [2010] είναι διαφορετικό από αυτό που παρουσιάζεται σε αυτή τη διατριβή, αφού στις ανωτέρω μελέτες εφαρμόστηκε ένα περιοδικό αυτοπαλινδρόμο μοντέλο (periodic autoregressive model) ενώ στην παρούσα διατριβή εφαρμόζεται ένα μοντέλο επιμερισμού της ετήσιας βροχόπτωσης με αβεβαιότητα παραμέτρων με τη μέθοδο στοχαστικών (Monte Carlo) ανεξίτητων Markov (Markov Chain Monte Carlo, MCMC).

Η χωροχρονική εφαρμογή των οκτώ (8) χωρικών μεθόδων στο δείκτη ξηρασίας SPI είναι επίσης πρωτότυπη. Αν και υπάρχουν πολλά παραδείγματα χωροχρονικής προσομοίωσης με χρήση χωρικών μεθόδων παρεμβολής βροχόπτωσης πρώτα και μετά υπολογισμό μετεωρολογικών δεικτών ξηρασίας [π.χ. Loukas and Vasiliades, 2004; Tsakiris and Vangelis, 2004; Mishra and Desai, 2005a; Magyari-Sáska, 2007; Smakhtin and Hughes, 2007] ή πρώτα υπολογισμό των δεικτών ξηρασίας και μετά χωρική παρεμβολή δεικτών ξηρασίας [Henriques and Santos, 1999; Kim et al., 2002; Rossi and Cancelliere, 2003; Rouault and Richard, 2003; Sirdas and Sen, 2003; Vicente-Serrano et al., 2004; Sönmez et al., 2005] μόνο στη παρούσα διατριβή γίνεται αξιολόγηση οκτώ (8) χωρικών μεθόδων παρεμβολής για χωροχρονική προσομοίωση του SPI. Όλες οι προηγούμενες μελέτες επιλέγουν μία μέθοδο χωρικής παρεμβολής χωρίς πρώτα να έχει εκτιμηθεί το χωρικό και χρονικό σφάλμα της τεχνικής σε σχέση με άλλες χωρικές μεθοδολογίες. Μόνο οι Akhtari et al., [2008] έκαναν σύγκριση τεσσάρων (4) χωρικών μεθοδολογιών για τον δείκτη ξηρασίας SPI-1month και Effective Drought Index, EDI σε 43 μετεωρολογικούς σταθμούς στην επαρχία Τεχεράνης του Ιράν για ένα διαπιστωμένο γεγονός ξηρασίας της περιόδου 1998-2001. Η παρούσα διατριβή αξιολογεί τις οκτώ μεθόδους χωροχρονικά για 66 βροχομετρικούς σταθμούς για όλη την περίοδο της ανάλυσης (Οκτ-1960 έως Σεπ-2002) και για 5 χρονικές κλίμακες υπολογισμού του SPI (3-, 6-, 9-, 12-, και 24-μηνών). Επίσης χρησιμοποιεί δύο τεχνικές αξιολόγησης, την τεχνική διασταυρωμένης επιβεβαίωσης των προβλέψεων (cross-validation ή jack-knifing) για τους 48 σταθμούς ανάπτυξης των χωρικών μεθόδων και την ανεξάρτητη χωρική πιστοποίηση για τους υπόλοιπους 18 βροχομετρικούς σταθμούς που δεν χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση (independent spatial and temporal validation). Για την αξιολόγηση των μεθόδων χωρικής παρεμβολής υπολογίστηκαν διάφορα ποσοτικά και ποιοτικά στατιστικά κριτήρια.

Επίσης, ένα αυτοματοποιημένο σύστημα εφαρμογής χωρικών μεθόδων σε περιβάλλον Γ.Σ.Π. αναπτύχθηκε για την χωροχρονική εφαρμογή, τη δημιουργία ψηφιακών χαρτών ξηρασίας με μέγεθος φαντίου 1-km, και την εκτίμηση των επιφανειακών τιμών του SPI για όλη την υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού. Οι επιφανειακές τιμές του SPI προέκυψαν από τη μέση τιμή των παραγόμενων 9366 φαντίων των ψηφιακών χαρτών παρακολούθησης της ξηρασίας. Ένα σημαντικό συμπέρασμα που προέκυψε από την εφαρμογή των χωρικών μεθόδων στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού είναι ότι για την εκτίμηση των επιφανειακών τιμών SPI της λεκάνης πρέπει πρώτα να ακολουθείται ο υπολογισμός του SPI σημειακά και μετά να εκτιμούνται οι επιφανειακές τιμές της υδρολογικής λεκάνης ως μέση τιμή των παραγόμενων ψηφιακών χαρτών. Η διαδικασία υπολογισμού της επιφανειακής βροχόπτωσης πρώτα και μετά υπολογισμού του SPI ανά λεκάνη απορροής πρέπει να αποφεύγεται, αφού δημιουργεί περισσότερα γεγονότα ξηρασίας από τα παρατηρούμενα (είναι στη λογική σχεδίασης του SPI που προσαρμόζεται στην κανονική κατανομή) και αγνοεί την περιοχική εξάπλωση (areal extent) της ξηρασίας που είναι ένα βασικό χαρακτηριστικό της. Επίσης, η δημιουργία των ψηφιακών (raster) χαρτών σε μορφή *.asc δίνει τη δυνατότητα για επιπλέον χωρική ανάλυση στα πιο συνηθισμένα προγράμματα Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών, όπως είναι π.χ. το ArcGIS, και εξαγωγή χωρικών χαρακτηριστικών όπως η παρακολούθηση της χωρικής και χρονικής εξάπλωσης της ξηρασίας,

και ο υπολογισμός της δριμύτητας της ξηρασίας ανά κλάση του SPI καθώς και της κρίσιμης έκτασης που πλήττεται από ξηρασία. Το αυτοματοποιημένο σύστημα παρακολούθησης της ξηρασίας (drought monitoring system) που περιλαμβάνει απλές μη γεωστατιστικές μεθόδους (μέθοδοι αντίστροφης απόστασης IDW, και πολυγώνων Thiessen TP) γεωστατιστικές μεθόδους (μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής Ordinary kriging OK, Simple kriging SK) και συνδυαστικές ή/και μεθόδους που ενσωματώνουν δευτερογενείς πληροφορίες γεωγραφικού ανάγλυφου και γεωγραφικών συντεταγμένων (Kriging with External Drift KED, Ordinary kriging με μοντέλο παλινδρόμησης RK, Simple kriging με μεταβαλλόμενα τοπικά μέσα και μοντέλο παλινδρόμησης SKIm_R) και η εφαρμογή του στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού παρουσιάζεται για πρώτη φορά στην παρούσα διατριβή. Τέλος, το αυτοματοποιημένο σύστημα εφαρμογής των χωρικών μεθόδων μπορεί εύκολα να εφαρμοστεί και για άλλες χωρικές μεταβλητές (π.χ. θερμοκρασία, βροχόπτωση, ή άλλους μετεωρολογικούς δείκτες ξηρασίας) και σε οποιαδήποτε περιοχή μελέτης για παρακολούθηση ξηρασίας (ή άλλων μεταβλητών) εφόσον υπάρχει ικανοποιητικός αριθμός βροχομετρικών σταθμών για τον προσδιορισμό των θεωρητικών ημιμεταβλητογραφημάτων και ψηφιακό μοντέλο εδάφους της περιοχής μελέτης. Εφαρμογές μεθόδων χωρικής παρεμβολής και χωροχρονικής προσομοίωσης στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού που δεν περιλαμβάνονται στη διατριβή αλλά σχετίζονται με το θέμα έχουν δημοσιευθεί σε ελληνικά, διεθνή συνέδρια και διεθνή περιοδικά [Loukas and Vasiliades, 2004; Vasiliades and Loukas, 2005; Βασιλειάδης και Λουκάς, 2006; Ζαραγκότας κ.α., 2007; Vasiliades and Loukas, 2009b; Vasiliades and Loukas, 2009c; Tzabiras et al., 2010]

Σημαντική βαρύτητα δίνεται στη χωροχρονική βραχυπρόθεσμη και μεσοπρόθεσμη πρόγνωση, ώστε οι αντίστοιχες δραστηριότητες και δράσεις να μπορούν να υλοποιηθούν, για την πρόληψη και περιορισμό των επιπτώσεων που δημιουργεί το φαινόμενο της ξηρασίας. Για την υλοποίηση της χωροχρονικής πρόγνωσης, η παρούσα διατριβή επιλέγει ένα πρόσφατο υπολογιστικό μη-γραμμικό εργαλείο της μηχανικής μάθησης το Gamma test [Stefansson et al., 1997; Evans and Jones, 2002; Jones, 2004] που εφαρμόζεται πριν εφαρμοστεί οποιοδήποτε μοντέλο πρόγνωσης για την αναγνώριση του βέλτιστου μητρικού εισόδου των χρόνων υστέρησης του SPI και τον προσδιορισμό του αριθμού των δεδομένων εκπαίδευσης. Η εφαρμογή του Gamma Test εφαρμόζεται για πρώτη φορά για πρόγνωση του δείκτη ξηρασίας SPI. Η καινοτομία της διατριβής είναι ότι προσπαθεί να δημιουργήσει ένα γενικευμένο χρονικό μοντέλο για ταυτόχρονη χωροχρονική πρόγνωση του SPI στους βροχομετρικούς σταθμούς της υδρολογικής λεκάνης του Πηνειού ποταμού. Τα πολυεπίπεδα προς τα εμπρός τροφοδοτούμενα νευρωνικά δίκτυα (MLPs ANNs) επιλέχθηκαν για την ταυτόχρονη χρονική πρόγνωση βραχυπρόθεσμων και μεσοπρόθεσμων κλιμάκων πρόγνωσης (lead times), γιατί προγενέστερες μελέτες έδωσαν καλύτερα αποτελέσματα από άλλες τεχνικές πρόγνωσης για πρόγνωση των επιφανειακών τιμών του SPI στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού [Vasiliades and Loukas, 2007; Vasiliades and Loukas, 2008] αλλά και σε άλλες μελέτες πρόγνωσης μετεωρολογικών δεικτών ξηρασίας [Kim and Valdes 2003; Mishra and Desai, 2006; Mishra et al., 2007; Morid et al., 2007; Bacanlı et al., 2009; Cutore et al., 2009]. Ακολουθήθηκαν δύο προσεγγίσεις πολλαπλών χρονικών βημάτων πρόγνωσης. Η πρώτη καλείται ευθεία πρόγνωση (Direct Artificial Neural Networks, DANN) των εξεταζόμενων χρονικών βημάτων πρόγνωσης και η δεύτερη προσέγγιση καλείται επαναληπτική (iterative ή recursive) πρόγνωση (Iterative or Recursive Artificial Neural Networks, RANN). Η επαναληπτική πρόγνωση χρησιμοποιείται όπως τα Box-Jenkins μοντέλα στα οποία οι προγνώσεις εισέρχονται στο σύστημα ως δεδομένα εισόδου για τις προγνώσεις των επόμενων χρονικών βημάτων. Εφαρμόστηκαν τεχνικές γενίκευσης μέσω βελτιστοποίησης και τεχνικών δειγματοληψίας εφαρμόστηκαν για την εκπαίδευση των ANNs. Η εκπαίδευση έγινε με τον αλγόριθμο προσαρμόσιμη μη μονότονη κλιμακωτή μέθοδο BFGS (Adaptive Self-scaling Nonmonotone BFGS, ASCNMBFGS) των Peng and Magoulas [2007] και η αντικειμενική συνάρτηση βελτιστοποίησης ήταν η ελαχιστοποίηση του μέσου τετραγωνισμένου σφάλματος MSE. Υπολογίστηκαν για όλα τα χρονικά βήματα πρόγνωσης και κλίμακες υπολογισμού του SPI διάφορα ποσοτικά και ποιοτικά στατιστικά κριτήρια. Ο ποιοτικός δείκτης κρίσιμης επιτυχίας CSI (Critical Success Index ή Threat Score) [Schaefer 1990], που υπολογίζεται από τον πίνακα αξιολόγησης των

αποτελεσμάτων πρόγνωσης επεισοδίων ξηρασίας (contingency table) για τιμές $SPI \leq -1$, χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση των προγνώσεων και την επιλογή του χρονικού βήματος πρόγνωσης για επιχειρησιακές εφαρμογές [Vasiliades and Loukas, 2010a]. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 7 δείχνουν ότι η γενικευμένη χρονική μεθοδολογία έχει καλύτερα στατιστικά κριτήρια πρόγνωσης του SPI από προηγούμενες έρευνες στην περιοχή μελέτης [Vasiliades and Loukas, 2007; Vasiliades and Loukas, 2008] αλλά και σε άλλες μελέτες χρονικής πρόγνωσης του SPI [Mishra and Desai, 2006; Mishra et al., 2007; Morid et al., 2007; Bacanli et al., 2009].

Το υβριδικό χωροχρονικό σύστημα πρόγνωσης του SPI συνδυάζει τις χρονικές προγνώσεις του SPI του γενικευμένου χρονικού μοντέλου με ένα χωρικό μοντέλο που στηρίζεται σε αναδρομικά νευρωνικά δίκτυα (Recurrent Neural Networks, RNN) τύπου Elman [1990]. Οι αναδρομικές συνδέσεις καθιστούν τα δίκτυα αυτά ικανά να αναγνωρίζουν χωρικές ή και χρονικές συσχετίσεις μεταξύ των δεδομένων, χωρίς να χρειάζεται τα δεδομένα που αναφέρονται σε διαφορετικές χρονικές ή χωρικές θέσεις να εμφανιστούν στο δίκτυο ταυτόχρονα. Τα χωροχρονικά αναδρομικά νευρωνικά βελτιστοποιήθηκαν (με τον ίδιο αλγόριθμο) και πιστοποιήθηκαν για την ίδια περίοδο και τους ίδιους βροχομετρικούς σταθμούς της χρονικής πρόγνωσης. Υπολογίστηκαν για όλα τα χρονικά βήματα πρόγνωσης και κλίμακες υπολογισμού του SPI διάφορα ποσοτικά και ποιοτικά κριτήρια. Ο ποιοτικός δείκτης κρίσιμης επιτυχίας CSI χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση των προγνώσεων του SPI και την επιλογή του χρονικού βήματος πρόγνωσης για επιχειρησιακές εφαρμογές. Επίσης, και η χρονική και η χωροχρονική πρόγνωση συγκρίθηκαν με μία μέθοδο αναφοράς το μοντέλο εμμονής (Persistence model) [Vasiliades and Loukas, 2010b].

Το αυτοματοποιημένο σύστημα εφαρμογής χωρικών μεθόδων σε περιβάλλον Γ.Σ.Π. που αναπτύχθηκε για την χωροχρονική εφαρμογή, εφαρμόστηκε επίσης και στις χωροχρονικές σημειακές προγνώσεις του SPI με στόχο το ολοκληρωμένο σύστημα πρόγνωσης και παρακολούθησης της ξηρασίας. Η δημιουργία των προγνωστικών ψηφιακών χαρτών ξηρασίας με μέγεθος φατνίου 1-km και η σύγκριση τους με τους παρατηρημένους χάρτες ξηρασίας, καθώς και τα διάφορα χωρικά και χρονικά στατιστικά στοιχεία και κριτήρια που υπολογίστηκαν χρησιμοποιήθηκαν για την τελική αξιολόγηση του υβριδικού συστήματος έγκαιρης προειδοποίησης της ξηρασίας. Για την τελική αξιολόγηση του υβριδικού συστήματος χωροχρονικής πρόγνωσης για βραχυπρόθεσμα και μεσοπρόθεσμα χρονικά διαστήματα πρόγνωσης χρησιμοποιήθηκαν οι προγνωστικοί χάρτες του SPI προκειμένου να γίνει εκτίμηση των επιφανειακών τιμών (μέση τιμή των φατνίων των ψηφιακών χαρτών) των προγνώσεων του δείκτη αυτού για την υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού και συγκρίθηκαν με τις παρατηρημένες.

2. ΞΗΡΑΣΙΑ

Είναι γεγονός ότι η ξηρασία είναι ένα ακραίο περιβαλλοντικό φαινόμενο με διάφορες μορφές, ανάλογα με την παράμετρο με την οποία εκφράζεται και ανάλογα με το κλίμα της περιοχής που αναφέρεται [Wilhite and Glantz, 1985]. Το φαινόμενο της ξηρασίας άρχισε πρόσφατα να απασχολεί το ευρύ κοινό λόγω της λειψυδρίας που παρατηρείται τα τελευταία χρόνια στην χώρα μας αλλά σε μεγάλο βαθμό και στην υπόλοιπη Ευρώπη. Το φαινόμενο της ξηρασίας, σε αντίθεση με αλλά ακραία γεγονότα, όπως πλημμύρες, καταιγίδες κλπ, έχει συνήθως μεγάλη χρονική διάρκεια και σχετίζεται με περιόδους που η διάθεση των υδατικών πόρων βρίσκεται σε ανεπάρκεια [Dracup et al., 1980a; Redmond, 2002]. Ιδιαίτερα το φαινόμενο της ξηρασίας αναγκάζει συνήθως τις κυβερνήσεις να ανακοινώσουν μέτρα για τον περιορισμό της κατανάλωσης αλλά και να αναγγείλουν νέα έργα για την καλύτερη αξιοποίηση των υδατικών πόρων. Επειδή η ξηρασία είναι ένα φαινόμενο που εντάσσεται στη γενικότερη διακύμανση του κλίματος μιας περιοχής, πολλά από τα μέτρα που αναγγέλλονται κατά την διάρκεια της ξηρασίας ξεχνιούνται μόλις έρθουν οι πρώτες βροχές. Ως άμεση επίπτωση, μια παρατεταμένη ξηρασία έχει πολλές επιπτώσεις στα υδατικά αποθέματα, στο περιβάλλον και σε όλους τους τομείς της οικονομίας [Wilhite and Glantz, 1985].

Ουσιαστικά το κρίσιμο επίπεδο της μεταβλητής με την οποία εκφράζεται η ξηρασία διαφέρει από περιοχή σε περιοχή. Σύμφωνα με ένα γενικό ορισμό [Τσακίρης, 1995], *‘ξηρασία για ένα υδατικό σύστημα είναι το φαινόμενο κατά την διάρκεια εμφάνισης του οποίου το υδατικό σύστημα βρίσκεται κάτω από ένα κρίσιμο επίπεδο σε σχέση με την κανονική του λειτουργία’*. Με αυτόν τον γενικό ορισμό, θίγονται όχι μόνο θέματα της προσφοράς του νερού αλλά και εκείνα της ζήτησης και της αποθήκευσης. Η επιστημονική προσέγγιση του φαινομένου της ξηρασίας περιλαμβάνει διάφορες μεθοδολογίες ανάλυσης, που στηρίζονται σε διάφορες παραδοχές και ορισμούς. Σε κάθε περίπτωση, η προσομοίωση του φαινομένου στο σύνολο του είναι ένα δύσκολο εγχείρημα. Σε γενικές γραμμές, η μελέτη του φαινομένου περιλαμβάνει τόσο την ανάλυση συχνοτήτων ελάχιστων τιμών χαρακτηριστικών υδρολογικών μεταβλητών για μεγάλο χρονικό διάστημα (βροχόπτωση, απορροή κλπ.), όσο και τον προσδιορισμό χαρακτηριστικών δεικτών που αποτελούν μέτρο ποσοτικής εκτίμησης της ξηρασίας (υδατικό έλλειμμα, ελλειμματική επιφάνεια, ένταση κλπ.) Οι δείκτες αυτοί μπορεί να συσχετιστούν με διάφορα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης [Mimikou et al., 1993]. Ως περιοχή μελέτης του φαινομένου, νοείται είτε μια σχετικά εκτεταμένη περιοχή (π.χ. υδρολογική λεκάνη), είτε ένα σύνολο σημειακών πηγών που συνιστούν ένα σύστημα (π.χ. ένας ή περισσότεροι ταμειυτήρες αποθήκευσης νερού που εξυπηρετούν τις υδρευτικές ανάγκες μιας μεγαλόπολης), είτε τέλος ένα μόνο σημείο (π.χ. μετεωρολογικός σταθμός). Η παρούσα διατριβή εξετάζει την ξηρασία χωροχρονικά στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού Θεσσαλίας. Στις επόμενες παραγράφους, οι τύποι της ξηρασίας και τα χαρακτηριστικά τους αναλύονται. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στους μετεωρολογικούς δείκτες ξηρασίας SPI που υπολογίζονται σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες και χρησιμοποιούνται στην παρούσα διατριβή για την διακρίβωση των τύπων ξηρασίας. Η εφαρμογή του μετεωρολογικού δείκτη SPI υπολογισμένου σε πολλαπλές χρονικές γίνεται σε πρώτο στάδιο σε επίπεδο υδρολογικής λεκάνης για αναγνώριση της υδρολογικής ξηρασίας (εδαφικής υγρασίας και επιφανειακών απορροών) και ξηρασίας υδατικών συστημάτων. Στο δεύτερο στάδιο επιλεγμένες κλίμακες του SPI υπολογίζονται σημειακά για την μετέπειτα επέκτασή τους στο χώρο και στο χρόνο.

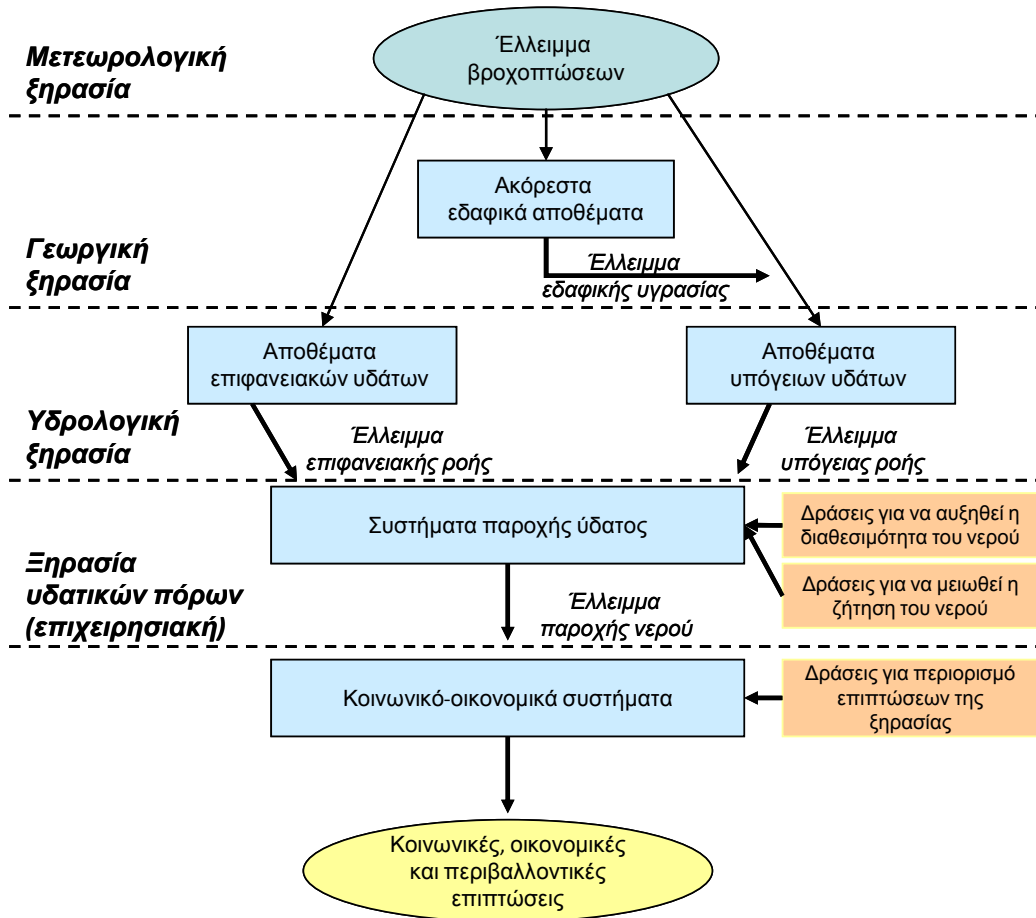
2.1. Τύποι ξηρασίας

Λαμβάνοντας υπόψη τις συνέπειες και τη διεισδυτικότητα της ξηρασίας, είναι σημαντικό να αξιολογηθεί η δριμύτητα ξηρασίας, πλην όμως ο ακριβής προσδιορισμός της έννοιας της ξηρασίας είναι μια δύσκολη γεωφυσική προσπάθεια. Οι δυσκολίες για τον καθορισμό της έννοιας «ξηρασία» είναι ένας ακόμα λόγος που δυσκολεύει την ορθολογική της διαχείριση [Wilhite et al., 2007]. Έτσι σήμερα υπάρχουν πολλοί ορισμοί για τη συγκεκριμένη έννοια. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, πως η ξηρασία ξεκινά πάντοτε από έλλειψη ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, ενώ η έλλειψη υγρασίας του εδάφους, η μείωση της απορροής των υδατορευμάτων, η πτώση της στάθμης των λιμνών και ταμειυτήρων, των υπόγειων νερών κλπ., έπονται του χρόνου μείωσης των κατακρημνισμάτων (Σχήμα 2.1). Είναι, επίσης, γνωστό πως τα κατακρημνίσματα μελετώνται από επιστήμονες διαφόρων ειδικοτήτων και η μείωσή τους επηρεάζει την ύδρευση, την άρδευση, τη βιομηχανία, την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, το περιβάλλον κ.λπ. Για τους λόγους αυτούς έχουν δοθεί διάφοροι ορισμοί της ξηρασίας που αναφέρονται στην έλλειψη νερού ανάλογα με τη χρήση του και ο κάθε ορισμός εξυπηρετεί το συγκεκριμένο σκοπό του επιστήμονα που μελετά την ξηρασία [WMO, 1975; Dracup et al., 1980a; Wilhite and Glantz, 1985; AMS, 1997; Wilhite, 2000; AMS, 2004]. Σύμφωνα με τα παραπάνω, οι πιο γνωστοί ορισμοί της ξηρασίας είναι [American Meteorological Society, 1997]:

- Μετεωρολογική ξηρασία: Είναι η μείωση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων μιας περιοχής σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο σημαντικά κάτω από το μέσο όρο της, ή κάτω από μία κρίσιμη τιμή που καθορίζει την έναρξη της ξηρασίας.
- Γεωργική (αγροτική) ξηρασία: Είναι η μείωση της υγρασίας του εδάφους σε τέτοιο βαθμό ώστε η γεωργική παραγωγή να μειώνεται σημαντικά ή η μείωση της υγρασίας του εδάφους περισσότερο από την εξατμισοδιαπνοή κατά την κρίσιμη περίοδο ανάπτυξης των φυτών.
- Υδρολογική ξηρασία: Είναι η έλλειψη όχι μόνο ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, αλλά επιφανειακής και υπόγειας απορροής.
- Ξηρασία Υδατικών Συστημάτων (Κοινωνικο-οικονομική ξηρασία): Είναι η αρνητική τιμή της διαφοράς κάθε μορφής προσφοράς και ζήτησης νερού.

Η μετεωρολογική ξηρασία ορίζεται με βάση την απόκλιση της βροχόπτωσης (συνολικό ύψος, αριθμός ημερών βροχής) από την αναμενόμενη, με βάση το κλίμα της περιοχής. Η γεωργική ξηρασία, που ορίζεται με βάση τις επιδράσεις που έχει η μετεωρολογική ξηρασία στη γεωργία, είναι πάντα αποτέλεσμα της ανεπάρκειας της εδαφικής υγρασίας να καλύψει τις ανάγκες διαπνοής των φυτών, ώστε να ξεκινήσει ή να συνεχιστεί η ανάπτυξή τους. Οι ανάγκες σε νερό των φυτών εξαρτώνται από τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες, τα βιολογικά χαρακτηριστικά κάθε είδους, το στάδιο ανάπτυξης που βρίσκονται και τις φυσικές και βιολογικές ιδιότητες του εδάφους. Η κύρια παράμετρος που εξετάζεται είναι η διαφορά μεταξύ βροχόπτωσης και δυνητικής εξατμισοδιαπνοής. Η υδρολογική ξηρασία σχετίζεται με τα αποτελέσματα της μειωμένης βροχόπτωσης στην επιφανειακή και υπόγεια απορροή του νερού και εκδηλώνεται με τη μείωση της εδαφικής υγρασίας, της παροχής των ποταμών και πηγών, της στάθμης λιμνών και ταμειυτήρων και των αποθεμάτων των υπόγειων νερών. Η κοινωνικοοικονομική ξηρασία ουσιαστικά εκφράζει την τρωτότητα (vulnerability) της κοινωνίας στην έλλειψη νερού. Συνδέει όλες τις προηγούμενες παραμέτρους με την προσφορά και ζήτηση αγαθών που σχετίζονται με τη χρήση νερού, όπως το πόσιμο νερό, τα γεωργικά προϊόντα και η υδροηλεκτρική ενέργεια. Η κοινωνικοοικονομική ξηρασία υδατικών συστημάτων λαμβάνει χώρα, όταν η ζήτηση γ' αυτά τα αγαθά ξεπερνά την προσφορά ως αποτέλεσμα της έλλειψης νερού, όμως η εμφάνισή της εξαρτάται σημαντικά και από τις κοινωνικές και οικονομικές διαδικασίες προσφοράς και ζήτησης των

παραπάνω αγαθών. Ακόμη, μπορεί να προκληθεί και μέσα από πολιτικές διαδικασίες, όπως οι διαμάχες μεταξύ κρατών και κοινωνικών ομάδων για τη χρήση του νερού ή η μετακίνηση μεγάλων πληθυσμών σε άνυδρες περιοχές [Iglesias et al., 2007a].



Σχήμα 2.1. Τύποι ξηρασίας [Iglesias et al., 2007a].

Στον ελληνικό χώρο η μετεωρολογική ξηρασία έχει μεγαλύτερη πιθανότητα να εμφανιστεί στις περιοχές όπου η μεταβλητότητα της βροχόπτωσης είναι μεγαλύτερη και συνήθως αυτές είναι οι περιοχές με τα μικρότερα ύψη βροχής (ανατολική Ελλάδα και ειδικότερα Αττική και νησιά κεντρικού Αιγαίου). Η γεωργική ξηρασία μπορεί να πλήξει καλλιεργούμενες περιοχές όπου η βροχόπτωση είναι μικρή ενώ οι απαιτήσεις σε αρδευτικό νερό μεγάλες (π.χ. Θεσσαλία, Κωπαΐδα, Αργολίδα). Η υδρολογική ξηρασία εμφανίζεται σε μικρές λεκάνες απορροής ή σε περιοχές που δεν τροφοδοτούνται από ταμειυτήρες ή υπόγειους υδροφορείς (π.χ. νησιά). Τέλος η κοινωνικοοικονομική ξηρασία μπορεί να εμφανιστεί σε περιοχές όπου μεταφέρεται νερό και εκδηλώνεται είτε με την αύξηση της τιμής του νερού και των εξαρτώμενων από αυτό προϊόντων είτε με διαμάχες μεταξύ κοινωνικών ομάδων σχετικά με τη μεταφορά και κατανομή του (π.χ. νησιά, Θεσσαλία)[Μαμάσης και Κουτσογιάννης, 2007].

2.2. Χαρακτηριστικά της ξηρασίας

Η ξηρασία είναι ένα τρισδιάστατο φαινόμενο που μπορεί να χαρακτηριστεί από τη δριμύτητά της ή την ένταση, τη διάρκεια και τη γεωγραφική έκταση [Μαμάσης και Κουτσογιάννης, 2007]. Η ένταση

(δριμύτητα) της ξηρασίας αναφέρεται, κυρίως, στην ελάττωση της βροχόπτωσης και στη σημαντικότητα των επιπτώσεων της ελάττωσης αυτής [Dracup et al., 1980b; Sen, 1980]. Γενικά, μπορεί να καθοριστεί με τον υπολογισμό κλιματολογικών δεικτών, οι οποίοι υπολογίζονται σε σχέση με τις κανονικές τιμές της βροχόπτωσης. Εκτενέστερη περιγραφή και ανάλυση των διαφόρων δεικτών ξηρασίας γίνεται στη συνέχεια του κεφαλαίου αυτού.

Το δεύτερο βασικό χαρακτηριστικό της ξηρασίας είναι η διάρκεια. Ένα επεισόδιο ξηρασίας, μπορεί να παρουσιάζει ένα μικρό χρονικό διάστημα υστέρησης της εμφάνισης του (1-3 μήνες) σε σχέση με την πρώτη μείωση ή την πλήρη απουσία της βροχόπτωσης, ενώ στη συνέχεια μπορεί να διατηρείται για μήνες ή και για χρόνια, παρά το γεγονός ότι στο διάστημα αυτό μπορεί να καταγραφούν βροχοπτώσεις, μικρής όμως σημαντικότητας. Ο Μαχαίρας [1992] ταξινομήσε την μετεωρολογική ξηρασία σε τρεις τύπους σύμφωνα με την διάρκεια εμφάνισης τους: στη μόνιμη ξηρασία η οποία οδηγεί στην ερημοποίηση, στη περιοδική ή εποχική ξηρασία και στην τυχαία ξηρασία.

Το τρίτο χαρακτηριστικό είναι η χωρική έκταση της ξηρασίας. Οι περιοχές, που επηρεάζονται από ακραία φαινόμενα ξηρασίας, αυξάνουν σταδιακά όσο η ξηρασία διατηρείται για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Μεγάλες χώρες, όπως οι Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, η Κίνα, η Βραζιλία, η Ινδία σπάνια επηρεάζονται ολόκληρες από κάποιο επεισόδιο ξηρασίας. Αντίθετα, δεν είναι σπάνιο να παρατηρηθεί ξηρασία σε ολόκληρο το πλάτος και μήκος των μικρών χωρών, όπως είναι η Ελλάδα. Γενικά, είναι σπάνιο στη διάρκεια ενός έτους να μην παρατηρηθεί έστω και ένα μικρό επεισόδιο μετεωρολογικής κυρίως ξηρασίας αφού η ξηρασία είναι συχνά αποτέλεσμα μεγάλης κλίμακας ανωμαλιών της ατμόσφαιρας οι οποίες εγκαθίστανται και εμμένουν για μεγάλες χρονικές περιόδους πάνω από διάφορες περιοχές. Η γνώση της χωρικής κατανομής της ξηρασίας ανά περιοχή έχει πολύ μεγάλη σημασία [Henriques and Santos, 1999; Shin and Salas, 2000]. Θα πρέπει να είναι γνωστή η πιθανότητα που έχει ένα επεισόδιο ξηρασίας να επηρεάσει μια περιοχή, καθώς επίσης, να είναι δυνατός ο καθορισμός των πιθανών επιπτώσεων που θα υπάρξουν [Loukas and Vasiliades, 2004].

Η ένταση συναρτάται με την απόκλιση της βροχόπτωσης και άλλων παραμέτρων που συνδέονται με την εξάτμιση (θερμοκρασία, άνεμος, υγρασία) από τις αναμενόμενες κλιματικές τιμές. Η ποσοτικοποίηση της έντασης μπορεί να γίνει στατιστικά [Mimikou et al., 1993], με την εκτίμηση της πιθανότητας εμφάνισης των συγκεκριμένων τιμών των μετεωρολογικών μεταβλητών [Yevjevich, 1967; Dracup et al., 1980b; Frick et al., 1990; Fernandez and Salas, 1999] ή με τη χρήση δεικτών που ενσωματώνουν τις κλιματικές παραμέτρους [Loukas et al., 2008]. Η χρονική διάρκεια είναι δύσκολο να προσδιοριστεί, αφού υπάρχει αβεβαιότητα για τη χρονική στιγμή αρχής και τέλους του φαινομένου. Η ξηρασία εξελίσσεται αργά και επιδρά αθροιστικά όσο η έλλειψη βροχόπτωσης εμμένει για μήνες ή χρόνια, ενώ οι επιδράσεις συνεχίζονται και μετά την έναρξη της βροχόπτωσης, αφού η επαναφόρτιση όλων των υδάτινων σωμάτων (ιδίως των υπόγειων) απαιτεί χρόνο. Η γεωγραφική έκταση κάθε ξηρασίας συναρτάται άμεσα με τα μετεωρολογικά και κλιματικά χαρακτηριστικά κάθε περιοχής [Mimikou et al., 1993], αλλά και τα υπάρχοντα έργα μεταφοράς νερού.

2.3. Δείκτες ξηρασίας

Σημαντικές προσπάθειες έχουν πραγματοποιηθεί στην ανάπτυξη μεθοδολογιών για την ποσοτικοποίηση των διαφορετικών πτυχών των ξηρασιών, όπως είναι οι χωρικές διαφορές στον κίνδυνο ξηρασίας [π.χ. Lana and Burgueno 1998; Henriques and Santos, 1999; Kim et al., 2002; Hisdal and Tallaksen, 2003; Vicente-Serrano and Begueria, 2003; Beersma and Buishand, 2004; Loukas and Vasiliades, 2004], την πρόβλεψη των ξηρασιών με τη βοήθεια της δεικτών ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας [Piechota and Dracup, 1996; Cordery and McCall, 2000; Lloyd-Hughes and Saunders, 2002; Hoerling and Kumar, 2003; Tadesse et al., 2004], και την ελαχιστοποίηση των επιδράσεων της ξηρασίας [WMO,

2000]. Εντούτοις, περισσότερες προσπάθειες έχουν γίνει στην ανάπτυξη δεικτών ξηρασίας, οι οποίοι επιτρέπουν τον προσδιορισμό, την αναγνώριση και το μέγεθος των ξηρασιών, της έντασης και του βαθμού επιφάνειάς τους (areal extent). Κατά τη διάρκεια του εικοστού αιώνα, ποικίλοι δείκτες ξηρασίας αναπτύχθηκαν, βασισμένοι σε διαφορετικές μεταβλητές και παραμέτρους [Tate and Gustard, 2000; Heim, 2002; Keyantash and Dracup, 2002; Smakhtin and Hughes, 2004]. Οι δείκτες ξηρασίας είναι πολύ σημαντικοί για την αναγνώριση και παρακολούθηση της ξηρασίας στο χρόνο και στο χώρο, και τα συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης ξηρασίας είναι βασισμένα πρώτιστα στις πληροφορίες που οι δείκτες ξηρασίας παρέχουν [Snoboda et al., 2002]. Ο χαρακτηρισμός της ξηρασίας είναι περίπλοκος και υπάρχει ένα μεγάλο φάσμα μετεωρολογικών ή υδρολογικών δεικτών που μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Απαιτεί μια ακριβή επιλογή μεθόδων προσδιορισμού της ξηρασίας ή/και δεικτών ξηρασίας, ικανών να περιγράψουν με ένα συνθετικό και σαφή τρόπο την εξέλιξη των συνθηκών ξηρασίας στο χώρο και το χρόνο. Ο καθένας από αυτούς έχει τη δική του αξία και συχνά υποστηρίζει ο ένας τον άλλο. Ένας συνδυασμός δεικτών είναι συνήθως η προτιμώμενη επιλογή [Iglesias et al., 2007a].

Οι δείκτες ξηρασίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την περιγραφή όλων των τύπων ξηρασίας (δηλαδή μετεωρολογική ξηρασία: απόκλιση από τις κανονικές μετεωρολογικές συνθήκες, υδρολογική ξηρασία: απόκλιση από τις κανονικές υδρολογικές συνθήκες, γεωργική ξηρασία: απόκλιση από τις κανονικές συνθήκες εδαφικής υγρασίας για την ανάπτυξη των καλλιεργειών και κοινωνικό-οικονομική ξηρασία: απόκλιση από το κανονικό επίπεδο διαθεσιμότητας ύδατος για την ανταπόκριση στις ανάγκες της κοινωνίας). Οι δείκτες για το χαρακτηρισμό της ξηρασίας πρέπει να είναι σύμφωνοι με τις ακόλουθες απαιτήσεις: (α) να μπορούν να υπολογιστούν από διαθέσιμα δεδομένα από πραγματικά συστήματα συλλογής δεδομένων (real time); (β) να έχουν a priori και άμεση σχέση με τρωτά κοινωνικά, οικονομικά και περιβαλλοντικά συστήματα; και (γ) να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για προβλέψεις και συστήματα έγκαιρης καταγραφής [Iglesias et al., 2007a].

Οι κυριότεροι δείκτες ξηρασίας αναφέρονται στη μετεωρολογική ξηρασία και βασίζονται σε χρονοσειρές βροχοπτώσεων, ενώ άλλοι προσανατολίζονται στην περιγραφή της υδρολογικής ή της γεωργικής ξηρασίας ή στα ελλείμματα ύδατος σε αστικά συστήματα υδροδότησης [Tate and Gustard, 2000; Heim, 2002; Keyantash and Dracup, 2002; Iglesias et al., 2007b]. Ο Πίνακας 2.1 παρουσιάζει μια σύνοψη κάποιων από τους βασικούς δείκτες που μπορούν να βρουν εφαρμογή για το χαρακτηρισμό της ξηρασίας και τη συνεχή παρακολούθηση και καταγραφή της [Iglesias et al., 2007a].

Οι διάφοροι δείκτες ξηρασίας χρησιμοποιούν, για τον υπολογισμό τους, δεδομένα των υψών βροχής, του πάχους του στρώματος (ή της συσσώρευσης) του χιονιού, των αποθεμάτων του νερού στο έδαφος, καθώς και άλλες παραμέτρους. Η τιμή του δείκτη ξηρασίας είναι ένας καθαρός αριθμός, που μπορεί να φανεί περισσότερο χρήσιμος σε σχέση με την ανάλυση της κάθε παραμέτρου χωριστά. Η ορθή χρήση και ερμηνεία των δεικτών μπορεί να δώσει τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του κάθε ξεχωριστού επεισοδίου ξηρασίας, ενώ η μελέτη των τιμών του δείκτη στη διάρκεια του χρόνου μπορεί να δώσει την πιθανότητα επανεμφάνισης των επεισοδίων ξηρασίας. Πρέπει να τονιστεί ωστόσο ότι η κακή χρήση των δεικτών, με τη μη σωστή εφαρμογή των περιορισμών του κάθε δείκτη, μπορεί να οδηγήσει σε παρερμηνεία των αποτελεσμάτων. Παρά το γεγονός ότι κανένας δείκτης δεν είναι ο βέλτιστος για όλες τις περιοχές και για όλες τις περιπτώσεις, ορισμένοι δείκτες παρουσιάζουν καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με άλλους, για συγκεκριμένες καταστάσεις. Για παράδειγμα, ο δείκτης Palmer (Palmer Drought Severity Index) δημιουργήθηκε και εφαρμόστηκε σε μία περιοχή με ομαλό ανάγλυφο στις ΗΠΑ, με σκοπό τον καθορισμό της εμφάνισης ξηρασίας. Σε περιοχές, όμως, όπου το ανάγλυφο είναι έντονο και υπάρχει σύνθετο τοπικό κλίμα, θεωρείται προτιμότερος ο συνδυασμός του δείκτη Palmer με άλλους δείκτες, όπως είναι ο δείκτης SWSI (Surface Water Supply Index) [Shafer and Dezman, 1982], οι οποίοι χρησιμοποιούν παραμέτρους που λαμβάνουν υπόψη τη διαφορετική τοπογραφία της κάθε περιοχής. Ο δείκτης ξηρασίας, που χρησιμοποιείται, ιδιαίτερα, τα τελευταία χρόνια είναι ο Standardized Precipitation Index (SPI). Ο δείκτης αυτός διαφέρει από τους υπολοίπους δείκτες, διότι μπορεί και

αναγνωρίζει τα διάφορα επεισόδια ξηρασίας έγκαιρα, ενώ μπορεί να υπολογιστεί για διαφορετικά χρονικά κατώφλια δίνοντας σε κάθε περίπτωση ανάλογα αποτελέσματα.

Πίνακας 2.1. Δείκτες ξηρασίας και τα χαρακτηριστικά τους από Iglesias et al., [2007a].

Δείκτες ξηρασίας	Δεδομένα	Κατηγορία χρήσης
Deciles	Βροχοπτώσεις	Μετεωρολογικός
Standardised Precipitation Index (SPI)	Βροχοπτώσεις	Μετεωρολογικός, χρησιμοποιείται για παρακολούθηση και πρόγνωση
Rainfall Anomaly Index (RAI)	Βροχοπτώσεις	Μετεωρολογικός, ευαίσθητος σε ακραία γεγονότα
Standardized Precipitation Evaporation Drought Index (SPEI)	Βροχοπτώσεις, δυνητική εξατμισοδιαπνοή	Μετεωρολογικός
Reconnaissance Drought Index (RDI)	Βροχοπτώσεις, δυνητική εξατμισοδιαπνοή	Μετεωρολογικός
Run Analysis (Χωρική ανάλυση χρονοσειρών)	Βροχοπτώσεις, παροχή υδατορευμάτων	Μετεωρολογικός και υδρολογικός, για χωροχρονική ανάλυση ιστορικών γεγονότων
Palmer Drought Severity Index (PDSI)	Βροχοπτώσεις, θερμοκρασία, συνθήκες εδαφικής υγρασίας	Μετεωρολογικός, αποτελεσματικός στη γεωργία, χρησιμοποιείται για ιστορικές αναλύσεις και εκτίμηση επικινδυνότητας
Palmer Hydrological Drought Severity Index (PHDI)	Βροχοπτώσεις, θερμοκρασία, συνθήκες εδαφικής υγρασίας	Υδρολογικός, αποτελεσματικός στην παρακολούθηση ξηρασίας
Palmer Moisture Anomaly Index (Z-Index)	Βροχοπτώσεις, θερμοκρασία, συνθήκες εδαφικής υγρασίας	Γεωργικός
Surface Water Supply Index (SWSI)	Χιονοπτώσεις, βροχοπτώσεις, παροχή υδατορευμάτων, υδατικά αποθέματα	Υδρολογικός, αποτελεσματικός όταν υπάρχει σημαντική ποσότητα χιονιού
Crop Moisture Index (CMI)	Βροχοπτώσεις, θερμοκρασία, συνθήκες εδαφικής υγρασίας	Γεωργικός
Soil Moisture Anomaly Index (SMAI)	Συνθήκες εδαφικής υγρασίας, δυνητική εξατμισοδιαπνοή, δυνητική απορροή	Υδρο-γεωργικός
Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	Δορυφορικές εικόνες	Φυσικών πόρων, γεωργικός

2.3.1. Μετεωρολογικοί δείκτες ξηρασίας

Οι πιο ευρέως εφαρμοσμένοι δείκτες ξηρασίας περιλαμβάνουν τον Standardised Precipitation Index, SPI [McKee et al., 1993], τον Palmer Drought Severity Index, PDSI [Palmer, 1965] και τα Deciles [Gibbs and Maher, 1967] λόγω της απλότητάς τους. Οι Iglesias et al., [2007a,b] κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι για τον σκοπό της συνεχούς παρακολούθησης ο πιο εύκολος στη χρήση δείκτης είναι ο SPI, ο οποίος βασίζεται σε μια μόνο μετεωρολογική παράμετρο που είναι η βροχόπτωση αλλά και ο RDI [Tsakiris and Vangelis, 2005; Tsakiris et al., 2007] που περιλαμβάνει επίσης την εξατμισοδιαπνοή. Οι κυριότεροι μετεωρολογικοί δείκτες ξηρασίας αναφέρονται περιληπτικά και είναι:

Το ποσοστό της μέσης τιμής βροχόπτωσης (percent of normal). Το ποσοστό της μέσης τιμής βροχόπτωσης σε μία περιοχή υπολογίζεται διαιρώντας την πραγματική τιμή ποσού της βροχόπτωσης

δια τη μέση τιμή αυτής και πολλαπλασιάζεται επί το 100. Ο δείκτης αυτός μπορεί να υπολογιστεί, είτε για ένα μήνα, είτε μία ένα σύνολο μηνών. Το ποσοστό, όμως, της μέσης τιμής βροχόπτωσης εύκολα παρερμηνεύεται, εφόσον δίνει διαφορετικές τιμές για διαφορετικές περιοχές και εποχές. Σύμφωνα με τον Hayes [1999] ένα από τα μειονεκτήματα της χρήσης του δείκτη είναι ότι η μέση τιμή δεν είναι ίση με τη διάμεσο του ποσού βροχόπτωσης, εφόσον η μηνιαία ή η εποχιακή βροχόπτωση δεν παρουσιάζει κανονική κατανομή. Επίσης, ο ίδιος ερευνητής υποστηρίζει ότι εξαιτίας της μεγάλης διακύμανσης των δεδομένων βροχόπτωσης από περιοχή σε περιοχή δεν είναι εφικτή η συσχέτιση των ποσοστών της μέσης τιμής συσχέτισης ανάμεσα σε διαφορετικές περιοχές.

Ασυνεχείς και αθροιστικές βροχοπτώσεις. Στην βροχόπτωση μετράται άμεσα το έλλειμμα βροχόπτωσης, που είναι η διαφορά ανάμεσα στην παρατηρούμενη και στην κανονική μέση βροχόπτωση. Πρόκειται για έναν αρχικό δείκτη ξηρασίας, όχι ιδιαίτερα κατατοπιστικό. Ως εναλλακτική λύση είναι η θεώρηση της αθροιστικής βροχόπτωσης (σε μηνιαία, εποχιακή ή ετήσια χρονική κλίμακα), η οποία απεικονίζει τη συνολική ποσότητα και διάρκεια του υδατικού πλεονάσματος ή ελλείμματος. Ωστόσο η σχετική βαρύτητα της αθροιστικής βροχόπτωσης εξαρτάται από το μέγεθος της απόκλισης σε σχέση με τις κανονικές συνθήκες. Η μέθοδος έχει δυο σημαντικά μειονεκτήματα: (α) Δεν παρέχει μια σαφή ένδειξη του χρόνου έναρξης της ξηρασίας. Ο χρόνος έναρξης της ξηρασίας ταυτίζεται υποκειμενικά ως το σημείο όπου η αθροιστική ανωμαλία αρχίζει μια σημαντική πτώση. (β) Η σπουδαιότητα της ανωμαλίας είτε είναι ασυνεχής είτε πρόκειται για αθροιστική, εξαρτάται από το μέγεθος της σχέσης με πρότυπες μετρήσεις τυπικών μη κανονικών καταστάσεων.

Z-score ή κανονικοποιημένη βροχόπτωση. Προκειμένου να ξεπεραστούν τα μειονεκτήματα του προηγούμενου δείκτη, η βροχόπτωση μπορεί να κανονικοποιηθεί βάση της τυπικής απόκλισης μεγάλης χρονοσειράς βροχόπτωσης για διακεκριμένη ή αθροιστική βροχόπτωση, με βάση την εξίσωση: Z-

$score_{i,j} = \frac{P_{ij} - \bar{P}_i}{\sigma_i}$, όπου P_{ij} η βροχόπτωση του j μήνα για την περίοδο i , \bar{P}_i η μέση βροχόπτωση της

περιόδου i , και σ_i η τυπική απόκλιση της περιόδου i . Ο δείκτης Z-score έχει συγκριθεί με τον SPI και τον δείκτη China Z-Index (CZI) στην Κίνα και βρέθηκε ότι αποκλίνει προς τις υγρές ή ξηρές συνθήκες σε σχέση με τον SPI [Wu et al., 2001]. Παρόλα αυτά, ο Z-score μπορεί να δώσει σαφή αποτελέσματα σε υγρά και ξηρά γεγονότα ιδιαίτερα, όταν ο δείκτης χρησιμοποιείται αθροιστικά και η αθροιστική βροχόπτωση προσομοιώνει την κανονική κατανομή [Loukas et al., 2003]. Επειδή η μέση τιμή δεν είναι αντιπροσωπευτική της κατανομής της βροχόπτωσης μπορεί αντί της μέσης τιμής να χρησιμοποιηθεί η διάμεσος τιμή για την αντικειμενικότερη εκτίμηση των κεντρικών τάσεων των παρατηρήσεων είτε στον Z-score είτε στο δείκτη ανωμαλιών βροχόπτωσης.

Palmer Drought Severity Index (PDSI). Ο Palmer [1965] δημιούργησε το δείκτη Palmer Drought Severity Index, PDSI, για να μετρήσει την υγρασία. Ο δείκτης PDSI υπολογίζεται με βάση τα δεδομένα βροχόπτωσης, θερμοκρασίας και το διαθέσιμο νερό του εδάφους (Available Water Content, AWC). Όλοι οι βασικοί όροι της εξίσωσης ισορροπίας του νερού, δηλαδή η εξατμισοδιαπνοή, η απορροή, η επαναφορά του εδάφους σε κανονικές συνθήκες υγρασίας (soil recharge) και η απώλεια υγρασίας από το επιφανειακό στρώμα εδάφους είναι δυνατόν να υπολογιστούν αν είναι γνωστά τα παραπάνω δεδομένα. Αντίθετα, η ανθρώπινη επίδραση (π.χ. άρδευση) πάνω στην ισορροπία του νερού δεν λαμβάνεται υπόψη. Η χρησιμοποίηση των κανονικοποιημένων τιμών του δείκτη επιτρέπει να γίνονται συγκρίσεις ανάμεσα σε διαφορετικές περιοχές και σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα [Hayes, 1999]. Ο PDSI είναι ένας μετεωρολογικός δείκτης ξηρασίας, που εκφράζει τη διάρκεια ενός ξηρού ή υγρού επεισοδίου. Ο Palmer δημιούργησε κάποια κριτήρια που καθορίζουν την αρχή και το τέλος κάθε επεισοδίου ξηρασίας ή κάθε υγρής περιόδου. Έτσι ο δείκτης PDSI μπορεί να εφαρμοστεί σε διάφορες παραλλαγές ως μετεωρολογικός δείκτης (moisture anomaly index και PDSI), αλλά και ως υδρολογικός δείκτης (PHDI). Σύμφωνα με τον Alley [1984], τρία είναι τα βασικά πλεονεκτήματα της εφαρμογής του δείκτη Palmer:

- α). Αποτελεί ένα είδος μέτρου της μη κανονικότητας του καιρού σε μία περιοχή,
- β). Παρουσιάζει τη χωροχρονική κατανομή των επεισοδίων ξηρασίας, και τέλος
- γ). Δίνει τη δυνατότητα να μελετηθούν σημερινές συνθήκες (ξηρές ή υγρές περίοδοι) με μία ιστορική προοπτική.

Η μέθοδος του Palmer που χρησιμοποιείται στο υπολογισμό του PDSI, PHDI, και Moisture Anomaly Z-Index, έχει ορισμένους περιορισμούς και μειονεκτήματα [Alley, 1984]. Οι περιορισμοί της μεθόδου μπορεί να ταξινομηθούν σε δυο κατηγορίες: Στα μειονεκτήματα του μοντέλου Υδατικού Ισοζυγίου και στα χαρακτηριστικά του PDSI. Η πρώτη κατηγορία των περιορισμών της μεθόδου του Palmer περιλαμβάνει:

- a) Ποσοτικό προσδιορισμό της έντασης ενός επεισοδίου ξηρασίας. Η σηματοδότηση της έναρξης και του τέλους μιας ξηρής ή υγρής ακολουθίας έχει γίνει αυθαίρετα και βασίζεται σε δεδομένα και αναλύσεις βροχόπτωσης από δύο συγκεκριμένες περιοχές των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής.
- b) Ο δείκτης Palmer εμφανίζει ευαισθησία στη τιμή του διαθέσιμου νερού (Available Water Content, AWC), ανάλογα με το τύπο του εδάφους. Έτσι η εφαρμογή αυτού σε περιοχές, όπου το διαθέσιμο εδαφικό νερό διαφέρει, μπορεί να έχει σημαντικές επιπτώσεις στα αποτελέσματα.
- c) Τα δύο στρώματα εδάφους, για τα οποία γίνεται ο υπολογισμός του ισοζυγίου του ύδατος μπορούν να μην είναι αντιπροσωπευτικά σε μια διαφορετική περιοχή μελέτης. Η αυθαίρετη ποσότητα των 25 mm της υδατοϊκανότητας του επιφανειακού στρώματος του εδάφους. Η υδατοϊκανότητα είναι μια μεταβαλλόμενη ποσότητα η οποία εξαρτάται από το κλίμα, την υφή του εδάφους καθώς και την φυτοκάλυψη της περιοχής.
- d) Ο δείκτης δεν λαμβάνει υπόψη περιπτώσεις χιονόπτωσης, χιονοκάλυψης και παγωμένου εδάφους. Ως υετός θεωρείται μόνο το ποσό της βροχόπτωσης που πέφτει, με αποτέλεσμα οι τιμές του PDSI να είναι ανακριβείς κατά τους χειμωνιάτικους και εαρινούς μήνες μιας περιοχής, όπου καταγράφονται συχνά χιονοπτώσεις.
- e) Επίσης, δεν υπολογίζεται η φυσική υστέρηση μεταξύ της βροχόπτωσης και της αντίστοιχης απορροής. Το γεγονός ότι θα πρέπει πρώτα να ικανοποιηθεί η ικανότητα κατακράτησης του εδάφους και των υπογείων στρωμάτων του εδάφους οδηγεί σε μία υποεκτίμηση της επιφανειακής απορροής. Οι Thornthwaite και Mather [1955] πρότειναν ότι το 50%-75% της απορροής θα πρέπει να υστερεί κάθε μήνα ώστε να αναπαραχθούν οι μηνιαίοι όγκοι ροής οι οποίοι παρατηρούνται στα υδατορεύματα. Το τμήμα της απορροής που καθυστερεί ποικίλει σημαντικά σε εξάρτηση με το βάθος της κοίτης και την υφή του εδάφους, την γεωμορφολογία και το μέγεθος της λεκάνης και τη φύση του υπεδάφιου συστήματος.
- f) Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή υπολογίζεται σύμφωνα με τη μέθοδο Thornthwaite. Η μέθοδος αυτή παρά το γεγονός της μεγάλης αποδοχής που παρουσιάζει στη βιβλιογραφία αποτελεί μία απλή προσέγγιση του φαινομένου. Σήμερα έχουν προταθεί άλλες μέθοδοι που δίνουν σαφώς καλύτερα αποτελέσματα. Ωστόσο με τα περιορισμένα διαθέσιμα δεδομένα που απαιτούνται από την μέθοδο του Palmer μόνο η απλή μέθοδος εκτίμησης της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής, όπως είναι η μέθοδος του Thornthwaite θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί.
- g) Ο χαρακτήρας της μεθόδου του Palmer, ως μοντέλο «τύπου κατωφλίου», υποθέτει ότι η απορροή δεν λαμβάνει χώρα έως ότου η υδατοϊκανότητα του υψηλότερου και του χαμηλότερου εδαφικού στρώματος πληρωθεί. Αυτή η υπόθεση τείνει να υποεκτιμήσει την επαναφόρτιση κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και των πρώτων φθινοπωρινών μηνών.

Οι περιορισμοί των χαρακτηριστικών του PDSI μπορούν να συνοψισθούν ως εξής:

- (i) Αυθαίρετο καθορισμό των κλάσεων του PDSI. Αυτές οι κλάσεις έχουν καθορισθεί από δεδομένα της κεντρικής Αϊόβα και του Κάνσας των ΗΠΑ.
- (ii) Ευαισθησία των τιμών του PDSI στον συντελεστή K_j. Η πλειοψηφία όμως των ξηρασιών διαφόρων μεγεθών παραμένει σχετικά ανεπηρέαστη από τις διακυμάνσεις του K_j.
- (iii) Ευαισθησία των συντελεστών των τιμών του PDSI στο κλίμα της περιόδου βαθμονόμησης.

Παρά τη χρήση πολλών υποθέσεων στον υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου, τους περιορισμούς, τα μειονεκτήματα και την εμπειρική φύση μερικών από τους κανονικοποιημένους συντελεστές [Alley, 1984; Vasiliades and Loukas, 2009a], ο δείκτης PDSI μπορεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο, τόσο σε ερευνητικές, όσο και σε λειτουργικές προσεγγίσεις ξηρασιών αν χρησιμοποιηθεί σωστά και με επίγνωση των περιορισμών αυτού [Karl et al., 1987; Rao and Voeller, 1997]. Η εφαρμογή του δείκτη Palmer έχει δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα για αναγνώριση της μετεωρολογικής ξηρασίας στον ελλαδικό χώρο [Loukas et al., 2002a; Loukas et al., 2003] και υδρολογικής ξηρασίας στη Θεσσαλία [Vasiliades and Loukas, 2009a].

Δείκτης Ξηρασίας Bhalme – Mooley (BMDI). Ο δείκτης BMDI [Bhalme and Mooley, 1980] παρέχει ένα καλό μέτρο της παρούσας κατάστασης ξηρασίας που είναι αποτέλεσμα βραχέων ξηρών χρονικών περιόδων, αντίθετα με τον PDSI ο οποίος έχει σχεδιαστεί για αποτίμηση του βαθμού δριμύτητας και συχνότητας παρατεταμένων περιόδων ξηρασίας. Είναι ένας εύκολος δείκτης, αφού στηρίζεται μόνο σε δεδομένα μηνιαία βροχόπτωσης, αλλά απαιτεί μεγάλο πλήθος δεδομένων από πολλούς βροχομετρικούς σταθμούς για περιοχικές συγκρίσεις. Εφαρμογές του BMDI στην Ελλάδα παρουσιάζονται για αναγνώριση και περιοχική ανάλυση μετεωρολογικής ξηρασίας σε διάφορες μελέτες [Σπηλιωτόπουλος και Μιχαλοπούλου, 2000; Loukas et al., 2002b; Σπηλιωτόπουλος κ.α., 2002; Spiliatoroulos et al., 2006].

Δείκτης ανωμαλιών βροχόπτωσης, Rainfall Anomaly Index, (RAI). Ο δείκτης ανωμαλιών βροχόπτωσης Rainfall Anomaly Index [Van Rooy, 1965], ενσωματώνει μια μέθοδο ταξινόμησης με την οποία προσδιορίζονται οι θετικές και αρνητικές μη ομαλές καταστάσεις της βροχόπτωσης. Η μορφή του

δείκτη είναι: $RAI = \pm 3 \frac{P - \bar{P}}{E - \bar{P}}$ όπου, P η μετρημένη βροχόπτωση, \bar{P} είναι η μέση βροχόπτωση, και

\bar{E} είναι η μέση τιμή των δέκα ακραίων τιμών βροχόπτωσης. Για θετικές τιμές βροχόπτωσης το πρόσημο είναι θετικό, ενώ για αρνητικές μη ομαλές καταστάσεις το πρόσημο είναι αρνητικό με το \bar{E} να παίρνει την μέση τιμή των δέκα χαμηλότερων μετρήσεων. Ο Oladipo [1985] βρήκε ότι οι διαφορές ανάμεσα στο δείκτη RAI και σε περισσότερους σύνθετους δείκτες, όπως οι Palmer και Bhalme-Mooley, είναι αμελητέες. Επίσης, οι Loukas et al., [2003] έδειξαν ότι όταν χρησιμοποιείται ο RAI αθροιστικά σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες έχει παρόμοια συμπεριφορά με τον δείκτη SPI.

Δείκτης Ξηρασίας Standardized Precipitation Index (SPI). Η κατανόηση ότι η απουσία της βροχόπτωσης έχει διαφορετικά αποτελέσματα στο υπόγειο νερό, στην ικανότητα κατακράτησης νερού, στην υγρασία του εδάφους, στην εμφάνιση του χιονιού και στα επιφανειακά ύδατα οδήγησαν τους McKee et al. [1993; 1995] να αναπτύξουν το Standardized Precipitation Index (SPI) σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες. Ο SPI υπολογίζεται από τη διαφορά της βροχόπτωσης από τη μέση τιμή για μία ορισμένη χρονική περίοδο διαιρώντας την με την τυπική απόκλιση. Επειδή, όμως, η βροχόπτωση δεν έχει κανονική κατανομή, γίνεται μία ρύθμιση η οποία επιτρέπει στον δείκτη SPI να έχει κανονική κατανομή. Επομένως, η μέση τιμή του SPI για μία χρονική περίοδο και για συγκεκριμένη περιοχή είναι 0 και η τυπική απόκλιση είναι 1. Αυτή η κανονικοποίηση του δείκτη SPI αποτελεί πλεονέκτημα, έτσι ώστε τα υγρότερα και ξηρότερα τμήματα να μπορούν να αναπαρασταθούν με τον ίδιο τρόπο. Οι McKee et al., [1993] χρησιμοποίησαν τα θεωρητικά όρια της κανονικής κατανομής για να καθορίσουν

τους δείκτες ξηρασίας που προκύπτουν από το SPI. Επίσης, καθόρισαν τα κριτήρια ενός επεισοδίου ξηρασίας σε οποιαδήποτε χρονική κλίμακα. Ένα επεισόδιο ξηρασίας που μπορεί να εμφανίζεται οποιαδήποτε στιγμή, αρχίζει όταν ο δείκτης SPI παίρνει αρνητική τιμή, συνεχίζει με αρνητικές τιμές και γίνεται έντονο, όταν ο δείκτης πάρει τιμή μικρότερη ή ίση με το -1.5 . Το επεισόδιο τελειώνει όταν ο δείκτης πάρει τιμή θετική. Έτσι κάθε επεισόδιο ξηρασίας έχει τη διάρκεια του, η οποία καθορίζεται από μία αρχή, ένα τέλος και μια ένταση για κάθε μήνα που το επεισόδιο συνεχίζεται. Το συσσωρευμένο απόθεμα της ξηρασίας μπορεί να μετρηθεί ως το άθροισμα των δεικτών SPI για όλους τους μήνες σε ένα επεισόδιο ξηρασίας [Hayes, 1999]. Ο δείκτης SPI έχει την ικανότητα να προσδιορίζει το έλλειμμα βροχόπτωσης για πολλαπλές χρονικές κλίμακες. Αυτές οι χρονικές κλίμακες αντανακλούν την επίδραση της ξηρασίας πάνω στην διαθεσιμότητα των υδατικών πόρων. Υδατορεύματα, υπόγεια νερά και δεξαμενές αποθήκευσης αντικατοπτρίζονται από ανωμαλίες της βροχόπτωσης σε μεγάλες χρονικές κλίμακες, ενώ η εδαφική υγρασία σε ανωμαλίες βροχόπτωσης, σε μικρές χρονικές κλίμακες. Λεπτομερέστερη περιγραφή του δείκτη SPI ακολουθεί σε επόμενη παράγραφο της παρούσας εργασίας.

Δείκτης Ξηρασίας Reconnaissance Drought Index , RDI. Ο Reconnaissance Drought Index, RDI βασίζεται στο λόγο δύο αθροιστικών ποσοτήτων της βροχόπτωσης και της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής [Tsakiris and Vangelis, 2005; Tsakiris et al., 2007]. Ακολουθεί τη λογική σχεδίασης του SPI για κανονικοποίηση των παραγόμενων τιμών με βάση μια θεωρητική κατανομή. Προέκυψε από την στάθμιση και κανονικοποίηση του Aridity Index (δείκτης ξηρότητας κλίματος) του FAO με χρήση της λογαριθμικής κατανομής και μπορεί να υπολογιστεί σε μηνιαίες, εποχικές (seasonal), ή ετήσιες υδρολογικές κλίμακες. Τα κύρια πλεονεκτήματα του RDI σε σχέση με τον SPI είναι ότι έχει φυσική έννοια καθώς υπολογίζει το συνολικό έλλειμμα από τις απαιτήσεις εξάτμισης της ατμόσφαιρας για κάθε χρονική περίοδο και συνδέεται άμεσα με τις κλιματικές συνθήκες. Τα μειονεκτήματα του δείκτη είναι ότι για την ακριβή εκτίμηση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής (π.χ. με τη μέθοδο Penman-Monteith) χρειάζεται πολλά κλιματικά δεδομένα (π.χ. μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία, ταχύτητα ανέμου, σχετική υγρασία κ.α.). Η εφαρμογή του δείκτη στον Ελλαδικό χώρο έχει δώσει ελπιδοφόρα αποτελέσματα για την μελέτη της ξηρασίας [Tsakiris and Vangelis, 2005; Tsakiris et al., 2007]. Επίσης, οι Iglesias et al., [2007a] προτείνουν τον δείκτη RDI μαζί με τη χρήση του SPI για επιχειρησιακές εφαρμογές αν τα δεδομένα το επιτρέπουν.

Δείκτης Ξηρασίας Standardized Precipitation Evaporation Drought Index, SPEI. Ο δείκτης SPEI [Vicente-Serrano et al., 2010a] είναι παρόμοιος με τον δείκτη RDI και βασίζεται σε ένα μηνιαίο κλιματικό υδατικό ισοζύγιο (βροχόπτωση μείον δυνητική εξατμισοδιαπνοή), το οποίο προσαρμόζεται με τη χρήση μιας τριπαραμετρικής θεωρητικής κατανομής της log-logistic distribution για να μπορεί να υπολογίσει και αρνητικές τιμές. Οι τιμές βροχόπτωσης και δυνητικής εξατμισοδιαπνοής μπορούν να υπολογιστούν αθροιστικά για διαφορετικές χρονικές κλίμακες ακολουθώντας την ίδια λογική υπολογισμού του SPI [Vicente-Serrano et al., 2010a]. Για να είναι εύκολος στον υπολογισμό του, οι Vicente-Serrano et al. [2010a] συνιστούν τη μέθοδο Thornthwaite για τον υπολογισμό της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής, αφού αυτή χρειάζεται μόνο μηνιαία δεδομένα μέσης θερμοκρασίας. Ο δείκτης SPEI έχει εφαρμοστεί με επιτυχία για τη διαχείριση της ξηρασίας στα υδρολογικά συστήματα της λεκάνης απορροής του ποταμού Tagus στην Ισπανία [Lorenzo-Lacruz et al., 2010], αλλά και για ανάλυση ξηρασιών σε παγκόσμιο επίπεδο [Beguería et al., 2010; Vicente-Serrano et al., 2010b]

2.3.2. Γεωργικοί δείκτες ξηρασίας

Η γεωργική ξηρασία αφορά ειδικά τα καλλιεργούμενα φυτά σε αντιδιαστολή με τη φυσική βλάστηση. Εξαιτίας της ανάγκης συνεχούς επάρκειας νερού στις καλλιέργειες, η γεωργική ξηρασία παρουσιάζεται πολύ γρήγορα και το ίδιο ξαφνικά τερματίζεται. Χαρακτηρίζεται από σημαντικές βραχυπρόθεσμες αλλαγές του όγκου της εδαφικής υγρασίας στην ζώνη των ριζών. Οι περισσότεροι από τους κοινούς χρησιμοποιούμενους δείκτες γεωργικής ξηρασίας είναι:

Δείκτης Υγρασίας Καλλιέργειας, Crop Moisture Index, CMI. Μια άλλη μορφή του δείκτη Palmer αποτελεί ο δείκτης Υγρασίας Καλλιέργειας [Palmer, 1968], και έχει ως στόχο να ανιχνεύσει την κατάσταση υγρασίας μιας καλλιέργειας από εβδομάδα σε εβδομάδα με μετεωρολογική προσέγγιση [Hayes, 1999]. Η μεθοδολογία υπολογισμού είναι σχεδόν η ίδια με αυτή του δείκτη PDSI. Ο δείκτης PDSI εντοπίζει μεγάλης διάρκειας υγρές και ξηρές ακολουθίες, ενώ αντίθετα ο δείκτης CMI σχεδιάστηκε για να εκτιμά μικρής διάρκειας καταστάσεις υγρασίας κυρίως για αγροτικές περιοχές. Ο δείκτης αυτός υπολογίζεται βάσει των μέσων θερμοκρασιών και του ποσού βροχόπτωσης για κάθε εβδομάδα καθώς επίσης και βάσει της τιμής του δείκτη CMI της προηγούμενης εβδομάδας. Ο δείκτης CMI αντιδρά άμεσα στις διάφορες αλλαγές των καιρικών συνθηκών και επειδή έχει διορθωθεί στο χώρο και στο χρόνο μπορεί να συγκρίνει συνθήκες υγρασίας διαφορετικών περιοχών. Επειδή ο δείκτης αυτός σχεδιάστηκε για να εντοπίζει μικρής διάρκειας καταστάσεις υγρασίας σε μια αναπτυσσόμενη σοδειά, ο δείκτης CMI δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο εντοπισμού μεγάλης διάρκειας ξηρασίας [Hayes, 1999]. Η άμεση αντίδραση του δείκτη CMI στις αλλαγές μικρής κλίμακας μπορεί να δώσει λανθασμένα συμπεράσματα σε συνθήκες μεγάλης κλίμακας. Για παράδειγμα, μία ευεργετική βροχόπτωση κατά τη διάρκεια μιας ξηρής ακολουθίας μπορεί να κάνει το δείκτη CMI να δώσει ικανοποιητική κατάσταση υγρασίας, ενώ στην πραγματικότητα η ξηρασία συνεχίζει να υφίσταται στην περιοχή. Ένας άλλος λόγος που ο δείκτης CMI δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό μεγάλης κλίμακας ξηρασίας είναι ότι αυτός ξεκινά και τελειώνει κάθε νέα καλλιεργητική περίοδο με την τιμή μηδέν. Αυτοί οι περιορισμοί εμποδίζουν το δείκτη CMI να χρησιμοποιηθεί στον εντοπισμό υδρομετρικών καταστάσεων εκτός από την περίοδο ανάπτυξης των φυτών, και ιδιαίτερα των ξηρών ακολουθιών που εκτείνονται για αρκετά χρόνια. Θα πρέπει, λοιπόν, οι χρήστες του δείκτη CMI να γνωρίζουν καλά πότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί και πως να ερμηνεύονται κάθε φορά τα αποτελέσματα του. Για παράδειγμα, ο δείκτης CMI δεν μπορεί να εφαρμοστεί κατά την διάρκεια της βλάστησης του σπόρου ή στην αρχή της περιόδου ανάπτυξης των φυτών.

Δείκτης ανωμαλιών υγρασίας του Palmer, Palmer Moisture Anomaly Z-Index. Ο δείκτης ανωμαλιών υγρασίας του Palmer (Z-Index) προηγήθηκε του δείκτη PDSI. Εκφράζει την μη κανονική κατάσταση υγρασίας του τρέχοντος μηνός, χωρίς την εξέταση προηγούμενων καταστάσεων υγρασίας, κάτι που χαρακτηρίζει τον PDSI. Ο δείκτης Z-Index μπορεί να παρακολουθήσει την γεωργική ξηρασία, καθώς ανταποκρίνεται γρήγορα στις αλλαγές των τιμών εδαφικής υγρασίας. Ο Karl [1986] θεωρεί ότι ο δείκτης Z-Index προτιμάται στην ποσοτικοποίηση της γεωργικής ξηρασίας από το περισσότερο χρησιμοποιούμενο δείκτη CMI. Ωστόσο, όπως όλοι οι δείκτες του Palmer, μειονεκτεί λόγω πολυπλοκότητας τύπων και υπολογισμών αν και είναι λιγότερο σύνθετος από τον δείκτη PDSI. Παρόλα όμως τα μειονεκτήματα σε μία πρόσφατη μελέτη είχε την καλύτερη απόκριση από τους δείκτες του Palmer (PDSI, Weighted PDSI, PHDI) για την αναγνώριση της εδαφικής υγρασίας σε πέντε (5) υδρολογικές υπολεκάνες του Πηνειού ποταμού και δύο υπολεκάνες του Αχελώου ποταμού στη Θεσσαλία [Vasiliades and Loukas, 2009a].

Δείκτης εδαφικής υγρασίας, Soil Moisture Anomaly Index, SMAI. Ο δείκτης ανωμαλιών εδαφικής υγρασίας, SMAI αναπτύχθηκε από τους Bergman et al., [1988] για το χαρακτηρισμό της ξηρασίας σε παγκόσμια κλίμακα. Η μέθοδος στηρίζεται στην εκτίμηση της ξηρασίας βάση της μεθόδου του Thornthwaite και λειτουργεί σε ένα διστρωματικό εδαφικό μοντέλο που χρησιμοποιείται στην ανίχνευση της κίνησης του νερού με τελικό αποτέλεσμα την εκτίμηση του τρέχοντος ποσοστού του κορεσμού του εδάφους. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν ότι οι τιμές του SMAI μεταβάλλονται με ρυθμό που επικεντρώνεται μεταξύ του ταχέως CMI και σχετικά αργού PDSI [Bergman et al., 1988].

Ακολουθίες ξηρών ημερών. Οι Hershfield et al., [1972] πρότειναν την συχνότητα επανάληψης της ακολουθίας των ξηρών ημερών ως ένα μέτρο της γεωργικής ξηρασίας. Εντούτοις η εκδήλωση και η δριμύτητα της ξηρασίας εξαρτώνται από τη χρονική περίοδο της ακολουθίας σε συνδυασμό με το περιεχόμενο εδαφικό νερό, την υδατοϊκανότητα του εδάφους και τον τρόπο άρδευσης της

καλλιέργειας. Ο Brutsaert [1972] επίσης εκλαμβάνει τις ακολουθίες ξηρών ημερών ως μέτρο της γεωργικής ξηρασίας, υπονοώντας ότι είναι ο σημαντικότερος παράγοντας από γεωργικής άποψης. Αυτό βασίζεται στην παρατήρηση ότι η γεωργική ξηρασία έρχεται ως αποτέλεσμα της εξάντλησης της εδαφικής υγρασίας στην ζώνη των ριζών, εμποδίζοντας την ανάπτυξη των φυτών. Ως ακολουθία ξηρών ημερών ορίζεται η ακολουθία των ημερών με βροχόπτωση μικρότερη από συγκεκριμένη τιμή κατωφλίου.

Μέθοδος Ανελίξεων του Markov. Ο Sen [1998] υποστήριξε ότι τα χαρακτηριστικά της ξηρασίας κάθε φαινομένου εξαρτώνται από τον υποκείμενο γενεσιουργό μηχανισμό και ότι μπορούν να μοντελοποιηθούν με την κατάλληλη στοχαστική διαδικασία, όπως μια ανέλιξη πρώτης ή και δεύτερης τάξης Markov. Οι σπουδαιότερες πληροφορίες που μπορούν να εξαχθούν από αυτή τη μέθοδο είναι ότι κάθε έλλειμμα συνδέεται με προηγούμενα περισσεύματα και ελλείμματα. Ο Bonacci [1993] ισχυρίστηκε ότι αυτή η μέθοδος θα πρέπει να χρησιμοποιείται για την αναγνώριση ακραίων γεγονότων ξηρασίας. Επίσης η μέθοδος Markov σχετίζεται στενά με την προηγούμενη μέθοδο της ακολουθίας ξηρών ημερών. Μία εφαρμογή στον ελλαδικό χώρο των ανελίξεων Markov παρουσιάζεται από τους Anagnostopoulou et al., [2003] για χωροχρονική ανάλυση ξηρών περιόδων (dry spells) ημερήσιας βροχόπτωσης.

Δείκτης κανονικοποιημένης διαφοράς βλάστησης, Normalized Difference Vegetation Index, NDVI. Η πρόσφατη πρόοδος στην τηλεπισκόπηση παρέχει προϊόντα που έχουν ένα μεγάλο δυναμικό ως δείκτες ξηρασίας. Ο NDVI προτιμάται για ολική φυτική παρακολούθηση, γιατί αντισταθμίζει μερικά τις αλλαγές των συνθηκών φωτισμού, την κλίση του εδάφους και τον προσανατολισμό θέσης. Οι τιμές του NDVI κυμαίνονται θεωρητικά από -1 έως +1. Τιμές άνω του μηδενός υποδηλώνουν την ύπαρξη πράσινης βλάστησης (χλωροφύλλης) ή γυμνού εδάφους (τιμές γύρω στο μηδέν), ενώ κάτω του μηδενός δηλώνουν την ύπαρξη νερού, χιονιού, πάγου και νεφών. Ο NDVI και οι παραλλαγές του χρησιμοποιούνται ευρέως για τη συνεχή παρακολούθηση και πρόβλεψη της παραγωγής καλλιεργειών παγκοσμίως και από τις εταιρείες αγροτικής ασφάλισης. Πρόσφατες εξελίξεις στους δείκτες γεωργικής ξηρασίας με τεχνικές τηλεπισκόπισης μπορούν να βρεθούν στις εργασίες των Quiring [2009] και White and Walcott [2009].

2.3.3. Υδρολογικοί δείκτες ξηρασίας

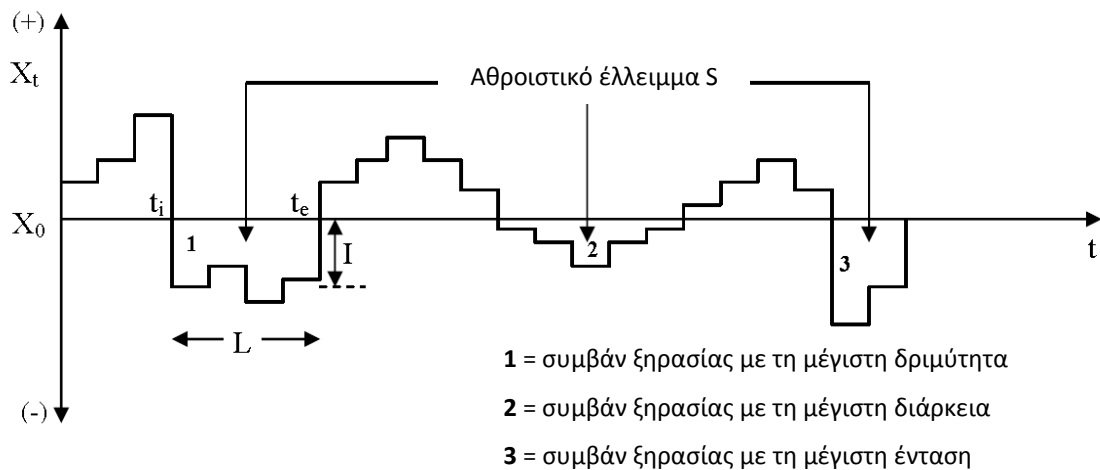
Η υδρολογική ξηρασία που επηρεάζει άμεσα τους υδατικούς πόρους και την αξιοποίηση τους δίνει έμφαση στην εμφάνιση χαμηλών παροχών στους επιφανειακούς υδροφορείς (ποταμοί, πηγές, κ.λπ.), ενώ για τους υπόγειους υδροφορείς χρησιμοποιούνται δείκτες που αναφέρονται στην στάθμη του υπόγειου νερού και την ποιότητα (που σχετίζεται με την υποβάθμιση του λόγω υπεράντλησης). Είναι γεγονός ότι οι επιφανειακοί υδατικοί πόροι είναι λιγότερο ανθεκτικοί στην περίπτωση της ξηρασίας, ενώ οι επιπτώσεις της ξηρασίας στους υπόγειους υδροφορείς έχουν μεγαλύτερο χρόνο απόκρισης. Συνηθίζεται, λοιπόν, ως υδρολογική ξηρασία σε μια περιοχή να χαρακτηρίζεται η κατάσταση που δημιουργείται κατά μια χρονική περίοδο, όπου οι τιμές των παροχών των ποταμών στην περιοχή, χαρακτηρίζονται από ακραίες χαμηλές τιμές. Στην παρούσα ενότητα γίνεται μια περιληπτική αναφορά στους δείκτες υδρολογικής ξηρασίας, οι οποίοι εκτιμούνται από παροχομετρικά δεδομένα επιφανειακών απορροών. Περισσότερες πληροφορίες μπορούν να βρεθούν στους Smakhtin [2001] και Tallaksen and van Lanen [2004].

Ολικό υδατικό έλλειμμα. Παραδοσιακά η υδρολογική ξηρασία προσδιορίζεται από το ολικό υδατικό έλλειμμα και είναι συνώνυμη με την δριμύτητα της ξηρασίας (severity). Η δριμύτητα είναι αποτέλεσμα της διάρκειας (duration), κατά την διάρκεια της οποίας η ροή είναι σταθερά κάτω από κάποιο κατώφλι ροής, και του μεγέθους του (magnitude), το οποίο είναι η μέση απόκλιση του απορροής από το κατώφλι ροής κατά την διάρκεια της περιόδου ξηρασίας. Το κατώφλι ροής θα μπορούσε να επιλεγεί ανάμεσα από έναν αριθμό διαφορετικών δρόμων και η επιλογή είναι συνάρτηση του τύπου του

υδατικού ελλείμματος το οποίο μελετάται. Είναι επίσης δυνατό να χρησιμοποιηθεί ποσοστό της μέσης ροής [Dracup et al., 1980], ή άλλοι δείκτες χαμηλής ροής (για παράδειγμα, μέση ετήσια ροή) ή εκατοστημόριο της καμπύλης διάρκειας της απορροής (συνήθως το 90οστό εκατοστημόριο ή Q90). Το κατώφλι μπορεί να είναι σταθερό ή να ποικίλει σε ετήσια, μηνιαία ή εποχική βάση [Demuth and Stahl, 2001]. Το ολικό υδατικό έλλειμμα μπορεί να εφαρμοστεί σε ποικίλες χρονικές κλίμακες για δεδομένα επιφανειακής απορροής, για ημερήσιες και ετήσιες χρονοσειρές.

Η μεθοδολογία αυτή ονομάζεται και μέθοδος run (run method) [Yevjevich, 1967], η οποία θεωρείται μια αντικειμενική μέθοδος προσδιορισμού των συμβάντων ξηρασίας και των στατιστικών χαρακτηριστικών τους [Wilhite and Buchanan-Smith, 2005]. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι το ότι δίνει τη δυνατότητα να εξαχθούν αναλυτικά οι κατανομές πιθανότητας των χαρακτηριστικών της ξηρασίας, με βάση τις στοχαστικές ιδιότητες των υποκείμενων εξεταζόμενων χρονοσειρών. Απαραίτητη προϋπόθεση για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων αυτής της μεθόδου είναι η στασιμότητα της εξεταζόμενης χρονοσειράς (π.χ. απορροές, βροχόπτωση). Χρησιμοποιώντας τις απορροές ως μεταβλητή ξηρασίας, ως ξηρή/υγρή περίοδος ορίζεται το τμήμα της χρονοσειράς της απορροής X_t στο οποίο όλες οι τιμές απορροής είναι μικρότερες/μεγαλύτερες από μια επιλεγμένη κρίσιμη τιμή X_0 . Με βάση αυτή τη μέθοδο, τα χαρακτηριστικά ενός συμβάντος ξηρασίας (δηλ. περιόδου χαμηλών απορροών), τα οποία παρουσιάζονται γραφικά στο Σχήμα 2.2, ορίζονται ως εξής [Yevjevich, 1967]:

- t_i = έναρξη ξηρασίας, η χρονική στιγμή κατά την οποία ξεκινά ένα συμβάν ξηρασίας
- t_e = λήξη ξηρασίας, η χρονική στιγμή κατά την οποία οι συνθήκες ξηρασίας παύουν να υφίστανται
- L = διάρκεια ξηρασίας, ο αριθμός των συνεχόμενων χρονικών βημάτων που μεσολαβούν μεταξύ της έναρξης και της λήξης του συμβάντος ξηρασίας
- S = δριμύτητα ξηρασίας, το αθροιστικό έλλειμμα κατά τη διάρκεια του συμβάντος
- I = ένταση ξηρασίας, το μέσο έλλειμμα κατά τη διάρκεια του συμβάντος, το οποίο υπολογίζεται ως ο λόγος της δριμύτητας προς τη διάρκεια



Σχήμα 2.2. Η μέθοδος run και τα χαρακτηριστικά της μεθόδου.

Αθροιστική απορροή. Μια σωρευτική παρέκκλιση απορροής από τις μέσες συνθήκες μπορεί να δείξει μακροπρόθεσμες τάσεις στη διαθεσιμότητα νερού. Όπως στην περίπτωση των σωρευτικών ανωμαλιών βροχόπτωσης, οι απότομες κλίσεις στις σωρευτικές ανωμαλίες απορροής, αναπαριστούν γεγονότα ξηρασίας.

Z-score απορροών. Προκειμένου να ξεπεραστούν τα μειονεκτήματα του προηγούμενου δείκτη μπορούν οι απορροές να κανονικοποιηθούν βάση της τυπικής απόκλισης μεγάλης χρονοσειράς απορροών για μεμονωμένες ή αθροιστικές απορροές. Επειδή η μέση τιμή δεν είναι αντιπροσωπευτική της κατανομής της απορροής μπορεί αντί της μέσης τιμής να χρησιμοποιηθεί η διάμεσος τιμή για την αντικειμενικότερη εκτίμηση των κεντρικών τάσεων των παρατηρήσεων στον Z-score. Διαφορετικά, μπορούν οι απορροές να υποστούν επεξεργασία, ώστε να προσομοιώνουν την κανονική κατανομή με τη χρήση κάποιου μετασχηματισμού (π.χ. Box-Cox) ή με τη χρήση θεωρητικών κατανομών (π.χ. Gamma, Pearson III).

Δείκτης υδρολογικής δριμύτητας ξηρασίας Palmer, PHDI. Ο υδρολογικός δείκτης δριμύτητας ξηρασίας του Palmer (Palmer Hydrological Drought Severity Index, PHDI) προηγήθηκε του δείκτη PDSI. Η βασική διαφορά ανάμεσα στους δυο δείκτες είναι ότι ο PHDI έχει πιο αυστηρό κριτήριο για την εξάλειψη μικρών ξηρών ή υγρών περιόδων, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα, ο δείκτης να επανέρχεται βαθμιαία και πιο αργά προς την κανονική κατάσταση. Ειδικότερα, ο PDSI θεωρεί ότι ένα γεγονός ξηρασίας τελειώνει, όταν οι συνθήκες υγρασίας αρχίζουν μια συνεχώς ανοδική πορεία, η οποία τελικά εξαλείφει το υδατικό έλλειμμα, ενώ ο PHDI θεωρεί ότι ένα γεγονός ξηρασίας λήγει όταν το υδατικό έλλειμμα εξαφανίζεται στην πράξη. Αυτή η καθυστέρηση είναι κατάλληλη για την εκτίμηση της υδρολογικής ξηρασίας, που είναι φαινόμενο που αναπτύσσεται πιο αργά σε σχέση με την μετεωρολογική ξηρασία.

Δείκτης επιφανειακού διαθέσιμου νερού, Surface Water Supply Index, SWSI. Ο δείκτης επιφανειακού διαθέσιμου νερού αναπτύχθηκε από τους Shafer and Dezman [1982] για να συμπληρώνει το δείκτη Palmer για τις υγρές συνθήκες (ποσότητα του χιονιού και την αντίστοιχη απορροή) και για περιοχές με έντονη τοπογραφία. Ο δείκτης SWPI αποτελεί ένα είδος μέτρου του επιφανειακού νερού και εξαρτάται από το νερό που απορρέει από τα βουνά, όπου το χιόνι παίζει σημαντικό ρόλο και συνυπολογίζει την χιονοκάλυψη και την υστέρηση της απορροής. Η μαθηματική διατύπωση του SWSI έχει ως ακολούθως:

$$SWSI = \frac{aP_{snow} + bP_{prec} + cP_{stream} + dP_{res} - 50}{12}$$

όπου a, b, c, d είναι οι συντελεστές βαρύτητας κάθε

υδρολογικής συνιστώσας με $a+b+c+d=1$, P_i είναι η πιθανότητα μη υπέρβασης (%) για την i συνιστώσα, και $snow, prec, stream, res$ είναι οι συνιστώσες χιονόπτωσης, βροχόπτωσης, παροχής, και αποθήκευσης, αντίστοιχα. Η διαδικασία αφαίρεσης 50 και διαίρεσης δια 12 είναι διαδικασία επικέντρωσης και συμπίεσης που σκοπό έχει να κάνει τις τιμές να έχουν μεγέθη παραπλήσια του PDSI και να οδηγήσει σε συγκρίσεις μεταξύ λεκανών απορροής [Garen, 1992]. Οι συντελεστές βαρύτητας εκτιμώνται από λεκάνη βαθμονομημένη με τον αλγόριθμο SWSI, ο οποίος λαμβάνει υπόψη του την τυπική συνεισφορά κάθε υδρολογικής συνιστώσας των υδατικών αποθεμάτων της λεκάνης. Ο SWSI είναι το κατάλληλο μέτρο υδρολογικής ξηρασίας ορεινών περιοχών, όπου η συνεισφορά του χιονιού είναι σημαντική στις ετήσιες επιφανειακές απορροές. Στη μελέτη του ο Hayes [1999] καταγράφει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του δείκτη SWSI. Ειδικότερα, ως πλεονεκτήματα του δείκτη αναφέρονται πρώτον ο εύκολος υπολογισμός του και δεύτερον ότι δίνει αντιπροσωπευτικές μετρήσεις της παροχής του επιφανειακού νερού σε όλο το εύρος της περιοχής μελέτης. Τα μειονεκτήματα στην εφαρμογή του δείκτη SWSI είναι τόσο η μη συνεχής ροή δεδομένων από κάποιους σταθμούς, όσο και η παρουσία ενός νέου σταθμού στη λεκάνη απορροής, που έχουν ως αποτέλεσμα τον καθορισμό νέων συντελεστών με βάση τις καινούργιες κατανομές των υπολογισμένων συνιστωσών. Επίσης, κάποιες αλλαγές στη διευθέτηση του νερού μέσα στη λεκάνη απορροής, όπως είναι οι εκτροπές ή καινούργιες υδατοδεξαμενές, απαιτούν την επαναδημιουργία του αλγορίθμου του δείκτη SWSI, έτσι ώστε να υπολογίζονται καινούργιες τιμές για κάθε συντελεστή. Τέλος, τα ακραία φαινόμενα μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα στον υπολογισμό του δείκτη SWSI. Αν ένα ακραίο επεισόδιο παρουσιάσει τιμές μικρότερες από αυτές της χρονοσειράς των δεδομένων τότε ο δείκτης πρέπει να υπολογιστεί εκ νέου συμπεριλαμβάνοντας τις νέες τιμές στην κατανομή συχνοτήτων στη λεκάνη.

Δείκτες ξηρασίας υδρολογικών μοντέλων. Οι σταθμισμένοι υδρολογικοί δείκτες ξηρασίας είναι πολύ λίγοι λόγω της μη διαθεσιμότητας μεγάλου μήκους υδρομετρήσεων. Όμως, οι υδρολογικοί δείκτες ξηρασίας που να βασίζονται σε δεδομένα απορροής είναι πολύ χρήσιμοι για τη διαχείριση της υδρολογικής ξηρασίας. Με την πρόοδο των υδρολογικών μοντέλων, οι Shukla and Wood [2008] πρότειναν τον Standardized Runoff Index (SRI) για την ανάλυση υπολογισμένων απορροών για διαφορετικές χρονικές κλίμακες ακολουθώντας τη λογική σχεδίασης του SPI. Οι υπολογισμένες απορροές εκτιμήθηκαν από το ημικαταναμημένο μοντέλο μακριάς κλίμακας Variable Infiltration Capacity (VIC) και χρησιμοποιήθηκαν στην εκτίμηση του SRI. Οι Keyantash and Dracup [2004] πρότειναν έναν ολοκληρωμένο δείκτη υδρολογικής ξηρασίας τον Aggregate Drought Index (ADI) που χρησιμοποιεί τις συνιστώσες του υδρολογικού κύκλου με την ανάλυση κυρίων συνιστωσών (PCA), αλλά ακόμα δεν χρησιμοποιείται επιχειρησιακά. Οι Narasimhan and Srinivasan [2005], με τη χρήση του υδρολογικού μοντέλου Soil and Water Assessment Tool (SWAT), δημιούργησαν δύο γεωργικούς δείκτες ξηρασίας, τον Soil Moisture Deficit Index (SMDI) και τον Evapotranspiration Deficit Index (ETDI), που βασίζονται σε προσομοιωμένα εβδομαδιαία ελλείμματα εδαφικής υγρασίας και πραγματικής εξατμισοδιαπνοής. Πρόσφατα, προτάθηκε μία μεθοδολογία για τον προσδιορισμό της δριμύτητας της υδρολογικής ξηρασίας, που χρησιμοποιεί τον δείκτη ξηρασίας Streamflow Drought Index (SDI) ανά υδρολογική λεκάνη και είναι παρόμοιος του Reconnaissance Drought Index, RDI [Nalbantis and Tsakiris, 2009]. Οι Vasiliades et al., [2010] πρότειναν έναν υδρολογικό δείκτη ξηρασίας σε επίπεδο υδρολογικής υπολεκάνης βασισμένο στις υπολογισμένες απορροές του μοντέλου UTHBAL για την υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού. Τέλος, ο δείκτης Groundwater Resource Index (GRI) προτάθηκε ως ένα αξιόπιστο εργαλείο παρακολούθησης και πρόβλεψης ξηρασίας για τους υπόγειους υδατικούς πόρους με βάση ένα συνδυασμένο επιφανειακό και υπόγειο μοντέλο ροής [Mendicino et al., 2008].

2.3.4. Δείκτες ξηρασίας υδατικών συστημάτων

Στα υδρολογικά συστήματα και συστήματα υδατικών πόρων, η ξηρασία χαρακτηρίζεται από ένα υψηλό επίπεδο περιπλοκότητας [Iglesias et al., 2007a]. Γενικά, χρησιμοποιείται ένα σύνολο δεικτών απόδοσης, που προσπαθούν να συλλάβουν διαφορετικές έννοιες όπως η αξιοπιστία, η προσαρμοστικότητα και η τρωτότητα. Πράγματι, η στοχαστική φύση των εισροών, η υψηλή διασύνδεση μεταξύ των διαφορετικών συνιστωσών του συστήματος, η παρουσία σε ορισμένες περιπτώσεις πολλών αντικρουόμενων απαιτήσεων, η αβεβαιότητα σε σχέση με τις πραγματικές επιπτώσεις των ακραίων γεγονότων, όπως οι ξηρασίες, καθιστούν την ανάλυση επικινδυνότητας ενός συστήματος υδροδότησης ένα πρόβλημα που αντιμετωπίζεται καλύτερα με ένα σύνολο διαφόρων δεικτών ή/και με την ανάλυση των πιθανοτήτων των ελλειμμάτων διαφορετικών ολοτήτων. Η ποσοτική αποτίμηση της επικινδυνότητας στα συστήματα υδροδότησης μπορεί να ακολουθεί δύο προσεγγίσεις ως συνέπεια των διάφορων ορισμών ποσοτικοποίησης των πιθανοτήτων: (1) η επικινδυνότητα ορίζεται ως η πιθανότητα εμφάνισης ενός μη επιθυμητού γεγονότος· (2) η επικινδυνότητα ορίζεται ως οι αναμενόμενες συνέπειες ή οι ζημιές λόγω ενός μη επιθυμητού γεγονότος.

Η επικινδυνότητα σε συστήματα υδροδότησης συνδέεται άμεσα με την έλλειψη ύδατος, η οποία διαφέρει από την ξηρασία γιατί σχετίζεται με έλλειψη διαθεσιμότητας του ύδατος, ώστε να ικανοποιηθεί η ζήτηση. Η έλλειψη προκύπτει από μια ανισορροπία μεταξύ της παροχής ύδατος και της ζήτησης, η οποία προέρχεται από ένα μετεωρολογικό φαινόμενο, αλλά επίσης επηρεάζεται από άλλους χρονικά μεταβλητούς παράγοντες που, όπως η ανάπτυξη της ζήτησης, η παροχή υποδομών και οι στρατηγικές διαχείρισης. Το αποτέλεσμα της ανισορροπίας είναι η έλλειψη ύδατος, που αφορά στους διαχειριστές υδάτων. Η αποτίμηση της επικινδυνότητας στα συστήματα παροχής ύδατος έγκειται στον προσδιορισμό της ζήτησης, που μπορεί να μην ικανοποιείται πλήρως με τους διαθέσιμους υδατικούς πόρους, και στην ποσοτικοποίηση των εκτιμώμενων συνεπειών της έλλειψης ύδατος.

Το αποδεκτό επίπεδο επικινδυνότητας προσαρμόζεται με βάση τους διαθέσιμους υδατικούς πόρους και τις υποδομές και εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά ζήτησης και την ελαστικότητά τους. Υπό αυτήν την έννοια, η ανάλυση επικινδυνότητας θα πρέπει να λάβει υπόψη τα ακόλουθα στοιχεία [Iglesias et al., 2007a]:

- Εμφάνιση πιθανότητα αποτυχίας (πιθανότητα μη ικανοποίησης της ζήτησης)
- Σοβαρότητα των αποτυχιών (μέγεθος του ελλείμματος)
- Διάρκεια αποτυχίας (χρονικό διάστημα εμφάνισης των ελλειμμάτων)
- Οικονομικές επιπτώσεις των αποτυχιών

Οι παράγοντες αυτοί προσδιορίζουν, επίσης, τους επιχειρησιακούς κανόνες για τη διαχείριση του συστήματος κατά τη διάρκεια ξηρασιών. Σε συντονισμένα συστήματα, η αξιοπιστία και η ικανότητα παροχής ύδατος συνδέονται με επιχειρησιακούς κανόνες και στρατηγικές διαχείρισης επικινδυνότητας. Σε επίπεδο λεκάνης απορροής υπάρχουν αλληλοεξαρτώμενες μονάδες διαχείρισης επικινδυνότητας, που υλοποιούν διαφορετικά σχέδια διαχείρισης επικινδυνότητας. Η αξιοπιστία προσδιορίζεται με βάση την τοποθεσία της μονάδας διαχείρισης της επικινδυνότητας (π.χ. ανάντη ή κατόντη του ρέματος). Οι ανάντη μονάδες πρέπει να λάβουν επίσης υπόψη την επικινδυνότητα στις μονάδες κατόντη.

Οι σχετικοί δείκτες που προσδιορίζουν τα προηγούμενα στοιχεία της διαχείρισης επικινδυνότητας είναι [Iglesias et al., 2007a]:

- Ζήτηση ύδατος/μέσες εισροές. Παρέχει πληροφορίες για το βαθμό ανάπτυξης των υδατικών πόρων του συστήματος. Μια αναλογία κοντά στο 1 σημαίνει συχνή αποτυχία του συστήματος, που εξαρτάται από ετήσια ή εποχιακή διακύμανση των υδρολογικών χρονοσειρών.
- Ζήτηση ύδατος/χωρητικότητα δεξαμενών. Παρέχει πληροφορίες για την ποσότητα που μπορεί να παρέχει το σύστημα.
- Χωρητικότητα δεξαμενών/μέσες εισροές. Παρέχει πληροφορίες για τη ικανότητα του συστήματος να ξεπεράσει τις ανωμαλίες εισροής (ξηρασίες).
- Ετήσια ζήτηση ύδατος/τρέχοντα αποθέματα δεξαμενών. Αντιπροσωπεύει το αναμενόμενο χρόνο αποτυχίας, σε έτη, αν αγνοηθούν οι μελλοντικές εισροές. Η μεταβλητή παρέχει πληροφορίες για τα όρια της λειτουργίας του συστήματος.

Η κατανομή των πόρων σε μια περίοδο ξηρασίας μεταξύ πολλαπλών αιτήσεων σε συστήματα παροχής ύδατος είναι μια ενδιαφέρουσα εργασία, που απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό. Οι επιχειρησιακοί κανόνες του συστήματος σχετίζονται μεταξύ άλλων με κριτήρια επιμερισμού των πόρων, προτεραιότητες μεταξύ των χρηστών, την κατανάλωση των συμπληρωματικών πόρων και τα στρατηγικά αποθέματα. Σε μεγάλα συστήματα, θα πρέπει να χρησιμοποιείται μαθηματική προσομοίωση και μοντέλα βελτιστοποίησης, ώστε να εξασφαλίζονται ποσοτικά αποτελέσματα, που θα εξηγούν όλες τις πολυπλοκότητες του συστήματος σε ένα αβέβαιο περιβάλλον. Τα μοντέλα αυτά οδηγούν στον προσδιορισμό της κρίσιμης ζήτησης, στην αποτίμηση της επίδρασης των μέτρων αύξησης της χωρητικότητας ή εξοικονόμησης ύδατος και στον προγραμματισμό των διαθέσιμων δράσεων με συγκεκριμένους περιορισμούς. Όλα τα μοντέλα παρέχουν ένα μέτρο αξιοπιστίας της ζήτησης, ποσοτικοποιημένο ως η πιθανότητα ότι μια δεδομένη ζήτηση μπορεί να υποφέρει από ελλείμματα ύδατος σε μια δεδομένη ξηρασία.

Εν τούτοις, η διαθεσιμότητα καλά βαθμονομημένων επιχειρησιακών μοντέλων είναι αμφίβολη σε κάποιες περιοχές, αφού απαιτείται μια μεγάλη επένδυση στην πληροφορία, στην αποτίμηση των

πόρων, στον χαρακτηρισμό της ζήτησης, στον προσδιορισμό των κριτηρίων βέλτιστης διαχείρισης, κ.λπ., τα οποία μπορεί να μην είναι άμεσα διαθέσιμα σε όλες τις περιοχές. Αν τα μοντέλα αυτά είναι διαθέσιμα, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση επικινδυνότητας, με τη χρήση δεικτών που προκύπτουν από τα αποτελέσματα των μοντέλων για την αποτίμηση της σχετικής επικινδυνότητας. Αν όχι, μπορεί να θεωρηθεί ότι το σύστημα δεν είναι πολύ περίπλοκο και η ανάλυση επικινδυνότητας μπορεί να γίνει με πιο απλούς δείκτες.

2.3.5. Σχολιασμός

Στη διεθνή βιβλιογραφία μπορεί να βρεθεί ένας μεγάλος αριθμός μελετών που αναφέρονται στο έλεγχο της αποτελεσματικότητας των διαφόρων δεικτών ξηρασίας. Ο Guttman [1998] χρησιμοποιώντας παραγοντική ανάλυση (factor analysis) για σύγκριση χρονοσειρών του δείκτη PDSI με χρονοσειρές του SPI έδειξε ότι τα φασματικά χαρακτηριστικά του SPI είναι χωρικά αμετάβλητα, ενώ αντίθετα του PDSI είναι χωρικά μεταβλητά και γι' αυτό το λόγο ο δείκτης SPI είναι καλύτερος δείκτης ξηρασίας για περιοχική σύγκριση των γεγονότων ξηρασίας. Στην ίδια μελέτη βρέθηκε ότι ο 12-μηνών SPI είναι σε συμφωνία με τον δείκτη PDSI [Guttman, 1998]. Όμοια αποτελέσματα έχουν βρεθεί από την αλληλοσύγκριση των SPI, Z-score, RAI, του PDSI και του Palmer moisture index(Z-Index) [Palmer, 1965] σε 28 μετεωρολογικούς σταθμούς στον ελλαδικό χώρο [Loukas et al., 2003]. Σε αυτή την μελέτη η διακύμανση του SPI βρέθηκε να είναι σε φάση με την διακύμανση του Z-score και του δείκτη RAI για όμοιες χρονικές κλίμακες και σε φάση με την διακύμανση του δείκτη PDSI για χρονικές κλίμακες μεγαλύτερες των 6-μηνών. Οι Gonzales and Valdes [2004] πρότειναν μια νέα μεθοδολογία υπολογισμού της μέσης συχνότητας επαναφοράς (Mean Frequency of Recurrence, MFR) της ξηρασίας και τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας τους τα συνέκριναν με τους δείκτες PDSI και SPI για τις περιοχές του Τέξας και το Γιβραλτάρ. Συμπέραναν, λοιπόν, ότι το κύριο πλεονέκτημα της MFR είναι ότι η προτεινόμενη διαδικασία επιτρέπει την σύγκριση γεγονότων ξηρασίας, τα οποία ακόμα και όταν αντιστοιχούν στην ίδια χρονική κλίμακα έχουν διαφορετική χρονική διάρκεια. Επιπλέον οι Gonzales and Valdes [2004] επιβεβαίωσαν τα αποτελέσματα του Guttman [1998], που προαναφέρθηκαν. Οι Hayes et al., [1999] χρησιμοποίησαν τον δείκτη SPI για την προσομοίωση της ξηρασίας του 1996 στα νότια και νοτιοδυτικά των Ηνωμένων Πολιτειών και απέδειξαν ότι ο SPI έχει την ικανότητα να ανιχνεύει την έναρξη και λήξη της ξηρασίας, καθώς επίσης να παρακολουθεί την εξέλιξη της. Από την σύγκριση του SPI με τον PDSI διαπιστώθηκε ότι ο SPI ανίχνευσε την έναρξη της ξηρασίας του 1996 τουλάχιστον ένα μήνα νωρίτερα από τον PDSI. Αποδείχθηκε, λοιπόν, ότι είναι λειτουργικός, απλός και χρονικά ευέλικτος δείκτης και θα μπορούσε να αποτελέσει την βάση έγκαιρης πρόγνωσης γεγονότων ξηρασίας.

Οι μετεωρολογικοί δείκτες ξηρασίας έχουν χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση και την αποτίμηση της εδαφικής υγρασίας και την πρόγνωση της αγροτικής παραγωγής. Σε μια μελέτη για την περιοχή της νότιας Καρολίνας, οι SPI και PDSI χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της εδαφικής υγρασίας [Sims et al., 2002]. Τα αποτελέσματα υποδηλώνουν ότι ο SPI είναι περισσότερο αντιπροσωπευτικός σε μικρές περιόδους βροχόπτωσης από ότι ο PDSI και άρα υποδεικνύει καλύτερα τη μεταβλητότητα της εδαφικής υγρασίας και της εδαφικής παρουσίας νερού. Η εδαφική υγρασία είναι ο κύριος δείκτης γεωργικής ξηρασίας, η οποία έχει άμεσες επιπτώσεις στην γεωργική παραγωγή. Οι Quiring και Parakryiakou [2003] αξιολόγησαν την αποτελεσματικότητα των SPI, PDSI, Palmer Z-Index και του δείκτη ξηρασίας NOAA για την αναγνώριση της γεωργικής ξηρασίας στους λειμώνες του Καναδά. Η ανάλυση έδειξε ότι ο Z-δείκτης και ο SPI απεικονίζουν καλύτερα την κατάσταση της υγρασίας του εδάφους και άρα οι δείκτες αυτοί προβλέπουν καλύτερα την γεωργική παραγωγή.

Εκτός της χωρικής και χρονικής εκτίμησης των ξηρασιών, άλλα προβλήματα για τον έλεγχο των ξηρασιών συσχετίζονται με τις διαφορετικές χρονικές κλίμακες. Οι McKee et al., [1993] έδειξαν ότι οι αξιοποιήσιμοι υδατικοί πόροι περιλαμβάνουν την εδαφική υγρασία, το υπόγειο νερό, το χιόνι, τις απορροές ποταμών, και τις αποθηκεύσεις ταμιευτήρων και δεξαμενών. Το χρονικό διάστημα από την

υετόπτωση μέχρι τους διαθέσιμους αξιοποιήσιμους υδατικούς πόρους διαφέρει αρκετά. Κατά συνέπεια, η χρονική κλίμακα της συσσώρευσης της υετόπτωσης γίνεται εξαιρετικά σημαντική και χωρίζει τις διαφορετικές μορφές ξηρασίας: υδρολογική, περιβαλλοντική, γεωργική, κοινωνικοπολιτική, κ.λπ. Η διαφορετική απόκριση των υδρολογικών/υδατικών συστημάτων στην υετόπτωση μπορεί να ποικίλει ως αποτέλεσμα της χρονικής κλίμακας [Changnon and Easterling, 1989; Pandey and Ramasastri, 2001; Elfatih et al., 1999]. Αυτό καθορίζεται από τις διαφορετικές συχνότητες των υδρολογικών-κλιματολογικών μεταβλητών [Skøien et al., 2003]. Άλλες μελέτες έχουν δείξει ότι η διάδοση των μετεωρολογικών ξηρασιών στα υπόγεια νερά μειώνει τον αριθμό ξηρασιών και προκαλεί μια μετατόπιση στη κατανομή της ξηρασίας [Peters et al., 2005].

Σε πρόσφατες μελέτες έχουν χρησιμοποιηθεί μετεωρολογικοί δείκτες ξηρασίας ως δείκτες υδρολογικής ξηρασίας και ξηρασίας υδατικών πόρων [Szalai et al., 2000; Βασιλειάδης, 2005; Szepe et al., 2005; Vicente-Serrano and Lopez-Moreno, 2005; López-Moreno et al., 2009; Nalbantis and Tsakiris, 2009; Vasiliades and Loukas, 2009a, Edossa et al., 2010; Fiorillo and Guadagno, 2010; Vasiliades et al., 2010]. Η χρήση των μετεωρολογικών δεικτών ξηρασίας SPI [Βασιλειάδης, 2005] και του PDSI [Vasiliades and Loukas, 2009a] ως δεικτών υδρολογικής ξηρασίας και ξηρασίας εδαφικής υγρασίας έχουν εξεταστεί για επτά υδρολογικές λεκάνες της Θεσσαλίας με έκταση από 133 to 6591 km². Η χρήση του SPI ως δείκτη υδρολογικών απορροών και αποθηκευτικών όγκων ταμειυτήρων εφαρμόστηκε επίσης και στην Ισπανία [Vicente-Serrano and Lopez-Moreno, 2005; López-Moreno et al., 2009]. Οι Szepe et al., [2005] χρησιμοποίησαν τον PDSI ως δείκτη εδαφικής υγρασίας για τρεις μετεωρολογικούς σταθμούς στη δυτική Ουγγαρία, ενώ οι Szalai et al., [2000] συνέκριναν τους δείκτες SPI και PDSI με απορροές ποταμών, πιεζομετρικές στάθμες και δεδομένα εδαφικής υγρασίας σε όλη την Ουγγαρία. Οι Nalbantis and Tsakiris, [2009] χρησιμοποίησαν τον SPI και τον Reconnaissance Drought Index (RDI) ως δείκτη ξηρασίας επιφανειακών απορροών. Τέλος, ο SPI έχει χρησιμοποιηθεί και για την αναγνώριση της ξηρασίας υπόγειων υδατικών πόρων [Mendicino et al., 2008]. Οι παραπάνω μελέτες δείχνουν ότι οι μετεωρολογικοί δείκτες ξηρασίας πρέπει να συνδέονται σε μία συγκεκριμένη χρονική κλίμακα, ώστε να χρησιμοποιούνται επιχειρησιακά σε προγράμματα διαχείρισης υδατικών πόρων. Ιδιαίτερα, οι μετεωρολογικοί δείκτες που υπολογίζονται σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες (π.χ. SPI, RDI, SPEI) έχουν τον πλεονέκτημα ότι μπορούν να αναγνωρίσουν πολλούς τύπους ξηρασίας αρκεί όμως να εξετάζεται ακριβώς η χρονική κλίμακα υπολογισμού για τον συγκεκριμένο τύπο ξηρασίας και το πεδίο εφαρμογής [Vasiliades et al., 2010].

Πρόσφατα, μερικές μελέτες ανέλυσαν τη σχέση ανάμεσα στους δείκτες ξηρασίας και κλίματος και την σύνδεση της ξηρασίας και της κλιματικής μεταβλητότητας σε μεγάλες περιοχές. Οι Piechota and Dracup [1996] διερεύνησαν την υδροκλιματική απόκριση στις ΗΠΑ στις ακραίες φάσεις των ελαχίστων ακρότατων. Βρέθηκε ισχυρή συσχέτιση ανάμεσα στο El Nino και σε ακραία ξηρά έτη στο βορειοδυτικό Ειρηνικό ωκεανό και στις νότιες Ηνωμένες Πολιτείες, όπου υγρές συνθήκες λαμβάνουν χώρα κατά την διάρκεια γεγονότων La Nina. Άλλη μελέτη [Chiew et al., 1998] έδειξε ότι η εμφάνιση ξηρασίας στην Αυστραλία συσχετίζεται στενά με γεγονότα El Nino. Επιπρόσθετα, σε πρόσφατες μελέτες στην Nebraska των ΗΠΑ [Tadesse et al., 2004], οι δείκτες ξηρασίας SPI και PDSI συνδέθηκαν με ωκεάνιους δείκτες χρησιμοποιώντας τεχνικές εξόρυξης δεδομένων στην παρακολούθηση της ξηρασίας. Οι [Hoerling and Kumar, 2003] ανέλυσαν την ξηρασία του 1998 – 2002 που επηρέασε τις ΗΠΑ, τη νότια Ευρώπη και τη νοτιοδυτική Ασία και βρήκαν ότι το παρατεταμένο και εκτεταμένο γεγονός ξηρασίας συνδεόταν με μια συνήθη ωκεάνεια επίδραση. Σε αυτή την περίοδο οι θερμοκρασίες του ψυχρού επιφανειακού θαλάσσιου στρώματος στον ανατολικό τροπικό Ειρηνικό ωκεανό και του αντίστοιχου θερμού στον δυτικό τροπικό Ειρηνικό και Ινδικό ήταν αξιοσημείωτα επίμονα, συνεισφέροντας στον συγχρονισμό και στη χωρική εξάπλωση ξηρασίας σε μέσα γεωγραφικά πλάτη. Η ανάλυση του SPI στο βόρειο ημισφαίριο [Bordi and Sutera, 2001] αποκάλυψε ότι οι ξηρές συνθήκες πάνω από την Ευρώπη, την Ανατολική Ασία, την κεντρική Αφρική και την περιοχή της Καραϊβικής αλληλοσυνδέονται και επηρεάζονται από την τροπική κλιματική μεταβλητότητα.

Ο δείκτης ξηρασίας SPI χρησιμοποιήθηκε σε πρόσφατη περιοχική ανάλυση ξηρασίας στην περιοχή της Μεσογείου με χρήση βροχομετρικών δεδομένων [Bordi et al., 2001; Lana et al., 2001], διακριτοποιημένων βροχομετρικών δεδομένων [Lloyd-Hughes και Saunders 2002; Loukas and Vasiliades, 2004; Tsakiris και Vangelis, 2004] και διακριτοποιημένων τιμών βροχόπτωσης που προέκυψαν από την NCEP/NCAR ανάλυση [Bordi and Sutera, 2001]. Οι παραπάνω μελέτες έδειξαν ότι η περιοχή της Μεσογείου επηρεάστηκε από αρκετές και λίγο ως πολύ παρατεταμένες περιόδους ξηρασίας τα τελευταία 50 χρόνια. Στο ανατολικό τμήμα της νήσου Κρήτης [Tsakiris and Vangelis, 2004], εφαρμόστηκε ο δείκτης SPI για την παρακολούθηση της ξηρασίας. Χρησιμοποιώντας μία προσέγγιση η οποία απαιτεί λιγοστά δεδομένα, η χρήση του δείκτη SPI με την βοήθεια απλών πληροφοριών εδάφους, έδειξε ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βάση ενός συστήματος παρακολούθησης της ξηρασίας σε περιοχές μεσαίων διαστάσεων δίνοντας άμεσες εκτιμήσεις της δριμύτητας της ξηρασίας της χωρικής κατανομής καθώς και της διάρκειας της. Στην περιοχή Marche της Ιταλίας [Bordi et al., 2001] ο δείκτης SPI υπολογίστηκε βάσει δεδομένων τιμών βροχόπτωσης των βροχομετρικών σταθμών της περιοχής μελέτης και βάσει των υπολογιζόμενων τιμών βροχόπτωσης σε συγκεκριμένα σημεία μετά την διακριτοποίηση της περιοχής σε φατνία. Ο δείκτης SPI και με τις δυο μεθόδους εκτίμησης επιφανειακής βροχόπτωσης συγκρίθηκε και έδειξε ότι υπάρχει ικανοποιητική συμφωνία στην ανάδειξη της ξηρασίας. Οι Loukas et al., [2002b] εκτίμησαν την ξηρασία στην Ελλάδα με την χρήση δυο μετεωρολογικών δεικτών: Του δείκτη Z-index του Palmer και του δείκτη των Bhalme & Mooley (BMDI). Τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν ότι και οι δύο δείκτες θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τη μελέτη των περιόδων και των εντάσεων της μετεωρολογικής ξηρασίας. Οι Loukas and Vasiliades [2004] υπολόγισαν τον SPI από τιμές επιφανειακής βροχόπτωσης που προέκυψαν με τεχνικές χωρικής παρεμβολής στη ψηφιακά κατανεμημένη περιοχή της Θεσσαλίας και έδειξαν ότι ο SPI μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον σχεδιασμό της διαχείρισης των υδατικών πόρων σε ημίξηρες περιοχές. Οι Livada and Assimakopoulos [2007] χρησιμοποίησαν τον δείκτη SPI για χωρική και χρονική ανάλυση μετεωρολογικής ξηρασίας και συνέκριναν το δείκτη SPI με τον δείκτη ξηρότητας του de Martonne [1926] διαπίστωσαν δε μια στατιστικά σημαντική συσχέτιση ανάμεσα στους δύο δείκτες. Επίσης, ο δείκτης ξηρασίας SPI έχει συγκριθεί με τον δείκτη RDI (Reconnaissance Drought Index) και βρέθηκε επίσης μία στατιστικά σημαντική συσχέτιση ανάμεσα στους δύο δείκτες και σχεδόν ίδια συμπεριφορά αναγνώρισης επεισοδίων ξηρασίας [Tsakiris and Vangelis, 2005; Tsakiris et al., 2007]. Σε μία πρόσφατη μελέτη εφαρμόστηκε ο δείκτης ξηρασίας των Byun and Wilhite [1999] με ημερήσια δεδομένα βροχόπτωσης από τον Ελλαδικό χώρο για αναγνώριση μετεωρολογικής ξηρασίας με ελπιδοφόρα αποτελέσματα [Kalamaras et al., 2010]. Τέλος, οι μετεωρολογικοί δείκτες ξηρασίας και ιδίως ο δείκτης ξηρασίας SPI έχουν εφαρμοστεί και σε πολλές μελέτες κλιματικής αλλαγής [Kothavala, 1999; Blenkinsop and Fowler, 2007; Loukas et al., 2007b; Mavromatis, 2007; Loukas et al., 2008; Dubrovsky et al., 2009; Vasiliades et al., 2009].

2.4. Μεθοδολογία διακρίβωσης τύπων ξηρασίας

Στο πρώτο στάδιο της διδακτορικής διατριβής έγινε ένας έλεγχος, αν οι μετεωρολογικοί δείκτες είναι αντιπροσωπευτικοί της υδρολογικής ξηρασίας και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη πρόγνωση και παρακολούθηση της υδρολογικής ξηρασίας. Έτσι αξιολογήθηκε η σχέση σύνδεσης μετεωρολογικής και υδρολογικής ξηρασίας (απορροές και εδαφική υγρασία) στην λεκάνη απορροής στη θέση Λάρισα, την κύρια υπολεκάνη του Πηνειού ποταμού στην περιοχή της Θεσσαλίας. Η Θεσσαλία είναι μια περιοχή με έντονο γεωγραφικό ανάγλυφο και μεγάλες πεδινές εκτάσεις με εκτεταμένη γεωργική δραστηριότητα. Ο κανονικοποιημένος ή τυποποιημένος δείκτης βροχόπτωσης SPI (Standardized Precipitation Index), [McKee et al., 1993] υπολογισμένος σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες χρησιμοποιήθηκε ως δείκτης της

μετεωρολογικής δριμύτητας ξηρασίας. Μηνιαία δεδομένα υετόπτωσης από βροχομετρικούς σταθμούς της Θεσσαλίας χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της επιφανειακής βροχόπτωσης και θερμοκρασίας με τη μέθοδο των πολυγώνων Thiessen διορθωμένη για το μέσο υψόμετρο της υπό εξέταση λεκάνης απορροής για την υδρολογική περίοδο 1960-2002. Έτσι με τη χρήση των επιφανειακών δεδομένων υπολογίστηκαν οι μετεωρολογικοί δείκτες. Επειδή η λεκάνη απορροής στη θέση Λάρισα έχει ελλιπή παροχομετρικά δεδομένα, το μηνιαίο μοντέλο υδατικού ισοζυγίου UTHBAL [Loukas et al., 2007a] εφαρμόστηκε για την προσομοίωση, συμπλήρωση και επέκταση των χρονοσειρών παροχομετρικών μετρήσεων και τη δημιουργία χρονοσειρών εδαφικής υγρασίας των λεκανών απορροής για την περίοδο 1960-2002. Οι προσομοιωμένες χρονοσειρές απορροής και εδαφικής υγρασίας κανονικοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας τον μετασχηματισμό Box-Cox και προσαρμόστηκαν (μετασχηματίστηκαν) με βάση την κανονική κατανομή. Στη συνέχεια, υπολογίστηκε ο σταθμισμένος δείκτης υδρολογικής ξηρασίας για την απορροή και την εδαφική υγρασία στην ίδια κλίμακα με την κλίμακα του SPI. Οι τελικοί παραγόμενοι δείκτες χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της υδρολογικής και εδαφικής ξηρασίας και για τη σύγκριση με τους μετεωρολογικούς δείκτες ξηρασίας. Αναλυτικά τα βήματα που ακολουθήθηκαν περιγράφονται παρακάτω.

Χρησιμοποιήθηκαν επεξεργασμένα μηνιαία δεδομένα υετόπτωσης από ένα μεγάλο δίκτυο βροχομετρικών σταθμών για την περίοδο Οκτώβριος 1960 μέχρι τον Σεπτέμβριο του 2002. Η μηνιαία επιφανειακή υετόπτωση κάθε υδρολογικής λεκάνης υπολογίστηκε με τη μέθοδο των πολυγώνων Thiessen χρησιμοποιώντας σταθμούς που βρίσκονται μέσα ή κοντά στη λεκάνη απορροής, τροποποιημένη για το μέσο υψόμετρο της λεκάνης με τη χρήση της βροχοβαθμίδας [Παπαμιχαήλ, 2001]. Η μέση μηνιαία επιφανειακή θερμοκρασία υπολογίστηκε με τη χρήση των μέσων μηνιαίων τιμών θερμοκρασίας από 27 μετεωρολογικούς σταθμούς με τη μέθοδο της θερμοβαθμίδας. Μία θερμοβαθμίδα υπολογίστηκε για όλες τις λεκάνες απορροής της περιοχής μελέτης. Η μηνιαία επιφανειακή δυνητική εξατμισοδιαπνοή έχει υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Thornthwaite [Τσακίρης, 1995]. Τέλος, τα μηνιαία στοιχεία απορροής από τον υδρομετρικό σταθμό της Λάρισας χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση του υδρολογικού μοντέλου. Τα διαθέσιμα υδρομετρικά δεδομένα παροχών ήταν ασυνεχή και με μεγάλα κενά μετρήσεων.

Η υδρολογική δριμύτητα ξηρασίας υπολογίστηκε από τα δεδομένα εξόδου του μηνιαίου εννοιολογικού μοντέλου ισοζυγίου. Οι υπολογισμένες χρονοσειρές της απορροής και της εδαφικής υγρασίας συγκρίθηκαν με τους μετεωρολογικούς δείκτες ξηρασίας σε τρεις αναλύσεις: συνεχώς (θεωρώντας όλους τους μήνες ως συνέχεια), μηνιαία και για επιλεγμένα ιστορικά γεγονότα ξηρασίας. Η σύγκριση έγινε με τη χρήση του συντελεστή συσχέτισης Pearson. Στις επόμενες παραγράφους ο μετεωρολογικός δείκτης SPI, το υδρολογικό μοντέλο και η διαδικασία παραγωγής υδρολογικών δεικτών παρουσιάζονται και αναλύονται.

2.4.1. Μετεωρολογικός δείκτης ξηρασίας Standardized Precipitation Index, SPI

Ο κανονικοποιημένος δείκτης βροχόπτωσης (Standardised Precipitation Index, SPI) αναπτύχθηκε από τον McKee et al., [1993] στο πανεπιστήμιο του Κολοράντο των ΗΠΑ. Η παρούσα διατριβή επιλέγει ως μετεωρολογικό δείκτη ξηρασίας τον κανονικοποιημένο δείκτη βροχόπτωσης Standardised Precipitation Index, SPI, γιατί υπολογίζεται μόνο από δεδομένα βροχόπτωσης έχει τεκμηριωμένο θεωρητικό υπόβαθρο και γιατί από τα παραπάνω είναι χαρακτηριστική η αύξηση της χρήσης του δείκτη SPI τα τελευταία χρόνια και ιδιαίτερα την τελευταία δεκαετία. Οι Iglesias et al., [2007a] προτείνουν τον δείκτη SPI ως βασικό δείκτη ξηρασίας για επιχειρησιακές εφαρμογές διαχείρισης της ξηρασίας. Επίσης, οι Keyantash and Dracup [2002] έδειξαν ότι ο SPI είναι ένα πολύτιμο εργαλείο για την εκτίμηση της δριμύτητας της ξηρασίας με βάση τη σύγκριση 14 διαδεδομένων δεικτών ξηρασίας με τη χρήση έξι σταθμισμένων κριτηρίων απόδοσης δεικτών ξηρασίας. Τέλος, ο δείκτης SPI χρησιμοποιείται επιχειρησιακά σε πολλά ερευνητικά κέντρα μεταξύ των οποίων τα National Drought Mitigation Center

(NDMC, drought.unl.edu), Western Regional Climate Center (WRCC, wrcc.dri.edu), και το National Agricultural Decision Support System (NADSS, nadss.unl.edu) και ο κώδικας υπολογισμού του SPI που δημιουργήθηκε από το Department of Computer Science and Engineering του University of Nebraska-Lincoln έχει διανεμηθεί σε περισσότερες από 60 χώρες [Wu et al., 2007].

Η φύση του SPI επιτρέπει τον προσδιορισμό της σπανιότητας εμφάνισης της ξηρασίας ή ενός γεγονότος βροχόπτωσης σε συγκεκριμένη χρονική κλίμακα για οποιοδήποτε μέρος του κόσμου στο οποίο υπάρχουν αρχεία κατακρημνισμάτων. Είναι ένας σχετικά απλός δείκτης, ο οποίος βασίζεται μόνο σε δεδομένα βροχόπτωσης και για τον υπολογισμό του χρειάζεται μόνο δυο παραμέτρους. Δεν εξαρτάται από την εδαφική ξηρασία, και μπορεί να εφαρμοστεί εξίσου καλά τόσο το χειμώνα όσο και το καλοκαίρι. Ο SPI επίσης, δεν εξαρτάται από την τοπογραφία της υπό μελέτης περιοχής. Η δυνατότητα να εφαρμόζεται σε ποικίλες χρονικές κλίμακες, του επιτρέπει την περιγραφή της ξηρασίας, για ένα σημαντικό εύρος μετεωρολογικών, γεωργικών και υδρολογικών φαινομένων. Ένα άλλο σπουδαίο πλεονέκτημα του δείκτη SPI, προέρχεται από την κανονικοποίησή του η οποία εγγυάται ότι η συχνότητα ακραίων γεγονότων ξηρασίας σε κάθε τοποθεσία και κάθε χρονική κλίμακα είναι σταθερή.

Ο υπολογισμός του δείκτη SPI βασίζεται σε δεδομένα βροχόπτωσης μιας μακράς χρονικής περιόδου μεγαλύτερης των 30 ετών [Wu et al., 2005]. Τα δεδομένα βροχόπτωσης, προσαρμόζονται πάνω σε μια θεωρητική κατανομή πιθανοτήτων, η οποία στην συνέχεια μετασχηματίζεται σε τυπική κανονική κατανομή, με μέσο όρο μηδέν και τυπική απόκλιση ίση με την μονάδα, έτσι ώστε οι τιμές του SPI να είναι στην πραγματικότητα η τυπική απόκλιση. Το μέγεθος της απόκλισης από το μηδέν απεικονίζει την πιθανότητα του συμβάντος. Εφόσον οι τιμές του SPI αντιστοιχούν στην τυπική κανονική κατανομή, αναμένεται ότι σε απόσταση $\pm 1\sigma$ (σ = τυπική απόκλιση) από το μέσο όρο θα περιλαμβάνεται το 68% περίπου των περιπτώσεων, στο διάστημα μεταξύ $\pm 2\sigma$ η καμπύλη περιλαμβάνει το 95,4% των περιπτώσεων και στο διάστημα $\pm 3\sigma$ το 99,7 των περιπτώσεων. Θετικές τιμές SPI υποδηλώνουν βροχόπτωση μεγαλύτερη της μέσης, ενώ αρνητικές τιμές υποδηλώνουν βροχόπτωση μικρότερη της μέσης. Ένα γεγονός ξηρασίας υφίσταται, όταν ο δείκτης SPI είναι συνεχώς αρνητικός και η δριμύτητα της ξηρασίας αυξάνει με τον δείκτη SPI να παίρνει τιμές μικρότερες του -1. Το γεγονός ξηρασίας λαμβάνει τέλος με το δείκτη SPI να γίνεται θετικός.

Ο δείκτης SPI έχει την ικανότητα να προσδιορίζει το έλλειμμα βροχόπτωσης για πολλαπλές χρονικές κλίμακες. Αυτές οι χρονικές κλίμακες αντανακλούν την επίδραση της ξηρασίας πάνω στην διαθεσιμότητα των υδατικών πόρων. Υδατορεύματα, υπόγεια νερά και δεξαμενές αποθήκευσης αντικατοπτρίζονται από ανωμαλίες της βροχόπτωσης σε μεγάλες χρονικές κλίμακες ενώ η εδαφική υγρασία σε ανωμαλίες βροχόπτωσης, σε μικρές χρονικές κλίμακες. Αν και πολλές κλίμακες ταξινόμησης του δείκτη SPI έχουν προταθεί κατά καιρούς, η περισσότερο χρησιμοποιούμενη είναι αυτή που φαίνεται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2.2).

Πίνακας 2.2. Κατηγοριοποίηση του καιρού σύμφωνα με τον δείκτη ξηρασίας SPI.

Τιμές SPI	Κατηγορίες καιρού	Πιθανότητα (%)
Μεγαλύτερο του 2	Εξαιρετικά υγρός	2.3
1,50 έως 1,99	Πολύ υγρός	4.4
1,00 έως 1,49	Μέτρια υγρός	9.2
-0,99 έως 0,99	Κανονικές συνθήκες υγρασίας	68.2
-1,00 έως -1,49	Μέτρια ξηρός	9.2
-1,50 έως -1,99	Δριμεία ξηρός	4.4
Μικρότερο του -2	Ακραία ξηρός	2.3

Ο προσδιορισμός της πιθανοθεωρητικής κατανομής είναι ένα κρίσιμο στάδιο στη διαδικασία υπολογισμού του SPI. Ο Guttman [1999] συνέκρινε τις υπολογισμένες τιμές του SPI με τη χρήση έξι

θεωρητικών κατανομών: τη δυο-παραμέτρων Gamma (GAM) κατανομή υπολογισμένη με τη μέθοδο των ροπών, τη δυο-παραμέτρων Gamma (GAM) κατανομή υπολογισμένη με τη μέθοδο της μέγιστης πιθανοφάνειας, των τριών-παραμέτρων Pearson type III (PE3) κατανομή, των τριών-παραμέτρων Generalized Extreme Value (GEV); των τεσσάρων-παραμέτρων Kappa (KAP), και των πέντε-παραμέτρων Wakeby (WAK) κατανομή. Το συμπέρασμα της σύγκρισης ήταν ότι η PE3 κατανομή είναι η καταλληλότερη κατανομή για τον υπολογισμό του SPI. Η μελέτη αυτή επιλέγει την δύο-παραμέτρων gamma κατανομή, γιατί προηγούμενες εφαρμογές του δείκτη SPI στην περιοχή μελέτης έδειξαν ότι η gamma κατανομή είναι κατάλληλη για την προσομοίωση της μηνιαίας βροχόπτωσης [Loukas and Vasiliades, 2004; Loukas et al., 2008; Vasiliades et al., 2009].

Σύμφωνα με τους Edwards and McKee [1997] οι μηνιαίες τιμές των βροχοπτώσεων ακολουθούν Gamma κατανομή. Η συχνότητα ή το κλάσμα της πιθανότητας δίνεται από τη σχέση:

$$g(x) = \begin{cases} \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} & x > 0 \\ 0 & \text{αλλού} \end{cases} \quad (2.1)$$

όπου: α είναι παράμετρος της μορφής της καμπύλης, $\alpha > 0$, β είναι παράμετρος της κλίμακας του σχήματος $\beta > 0$, x είναι το ποσό της βροχόπτωσης σε mm, $x > 0$ και $\Gamma(\alpha)$ η γάμμα συνάρτηση (gamma

function), $\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} y^{\alpha-1} e^{-y} dy$.

Η αθροιστική συνάρτηση κατανομής της $g(x)$ δεν υπολογίζεται σε κλειστή μορφή παρά μόνο, όταν το α είναι ακέραιος. Διαφορετικά, υπολογίζεται προσεγγιστικά με χρήση της μη πλήρους Gamma συνάρτησης ή με μικρότερη ακρίβεια από πίνακες της χ^2 κατανομής. Στο Σχήμα 2.3 απεικονίζεται η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής Gamma για διάφορες τιμές της παραμέτρου α και $\beta=1$. Το πλεονέκτημα της Gamma κατανομής, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.3, είναι ότι όταν $\alpha=1$, η κατανομή Gamma μεταπίπτει στην εκθετική. Για $\alpha > 1$, η συνάρτηση πυκνότητας – πιθανότητας της κατανομής εμφανίζει κωδωνοειδές σχήμα, ενώ για $\alpha < 1$, το σχήμα της γίνεται ανεστραμμένο J, με άπειρη τεταγμένη στη θέση $x=0$. Όταν η τιμή της παραμέτρου α είναι μεγαλύτερη από 5, τότε η κατανομή Gamma προσεγγίζει την κανονική κατανομή. Επομένως, στην κατανομή Gamma μπορούν να προσαρμοστούν δεδομένα με διαφορετικές κατανομές πιθανοτήτων. Π.χ. για $\alpha=2$ και $\beta=1$ η κατανομή είναι ασύμμετρη και το μεγαλύτερο μέρος της βρίσκεται αριστερά και φθίνει σταδιακά, όπως είναι και η κατανομή της συχνότητας της βροχόπτωσης. Στον υπολογισμό του δείκτη SPI περιλαμβάνεται το κλάσμα της πιθανότητας της κατανομής Gamma για το ύψος βροχής κάποιου βροχομετρικού σταθμού ή υπολεκάνης. Οι παράμετροι α και β του κλάσματος της πιθανότητας της κατανομής Gamma υπολογίζονται για κάθε σταθμό ξεχωριστά, για οποιοδήποτε χρονικό διάστημα χρειάζεται (1 μήνες, 9 μήνες, 24 μήνες κ.ο.κ.) και για κάθε μήνα του χρόνου. Η κατανομή Gamma, όπως και η κανονική κατανομή, είναι κλειστή ως προς την πρόσθεση, αλλά μόνο όταν υπάρχει στοχαστική ανεξαρτησία και κοινή παράμετρος κλίμακας των προσθετέων. Έτσι, το άθροισμα δύο ανεξάρτητων μεταβλητών, που ακολουθούν κατανομές Gamma με κοινή παράμετρο κλίμακας β , ακολουθεί επίσης κατανομή Gamma. Επίσης, πρέπει να αναφερθεί ότι η κατανομή χ^2 είναι ειδική περίπτωση της κατανομής Gamma. Σημειώνεται ότι, όπως συμβαίνει και με την κανονική κατανομή, το ολοκλήρωμα της συνάρτησης της κατανομής Gamma δεν υπολογίζεται αναλυτικά, πράγμα που δημιουργεί δυσκολίες στους υπολογισμούς. Η απλούστερη λύση στηρίζεται στην πινακοποίηση των τιμών της τυποποιημένης μεταβλητής $k=(x-\mu_x)/\sigma_x$, όπου μ_x και σ_x η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση της X , αντίστοιχα. Τέτοια πινακοποίηση υπάρχει σε βιβλία θεωρίας πιθανοτήτων [Bobee and Ashkar, 1991; Κουτσογιάννης, 1997]. Στη βιβλιογραφία δίνονται διάφορες αριθμητικές προσεγγίσεις της συνάρτησης κατανομής Gamma, με βάση τις οποίες μπορεί να αποφευχθεί η χρήση πινάκων [Press et al., 2007]. Η χρήση των

προσεγγίσεων αυτών είναι πλεονεκτικότερη, όταν οι υπολογισμοί γίνονται με ηλεκτρονικούς υπολογιστές.

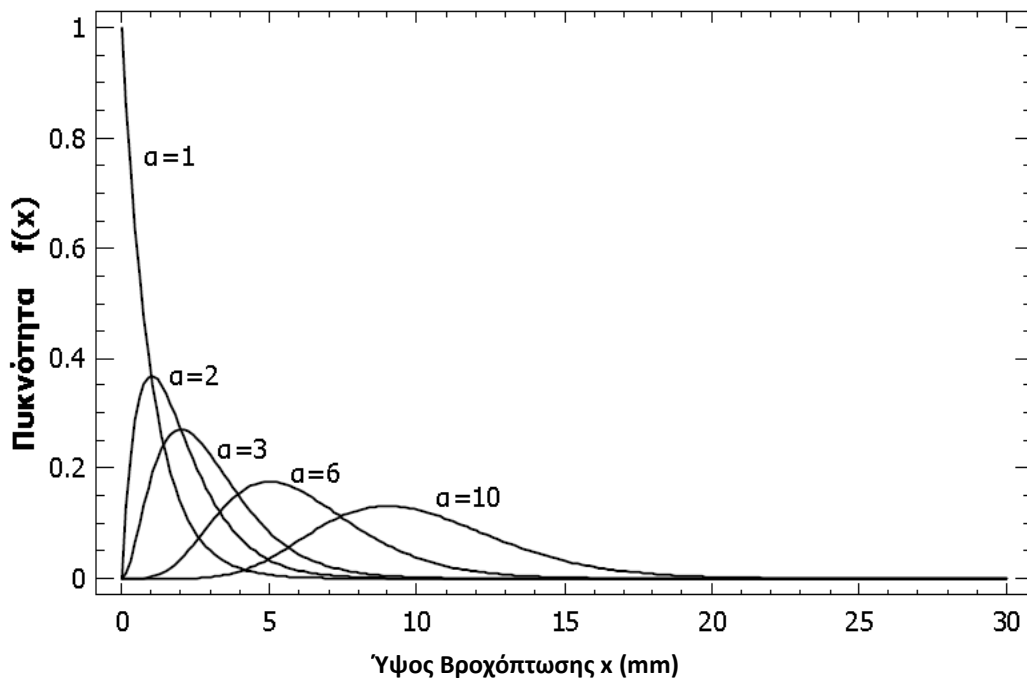
Στην παρούσα διατριβή η μέθοδος της μέγιστης πιθανοφάνειας επιλέχθηκε για την εκτίμηση των παραμέτρων της Gamma κατανομής. Σύμφωνα με τη μέθοδο της μέγιστης πιθανότητας (maximum likelihood) ο λογάριθμος της συνάρτησης της Gamma κατανομής για ένα δείγμα (x_1, x_2, \dots, x_N) μεγέθους N , δίνεται από τη σχέση [Bobee and Ashkar, 1991]:

$$\ln L = N * a * \ln |\beta| - N * \ln \Gamma(a) + (a - 1) * \sum_{i=1}^N \ln x_i - \beta * \sum_{i=1}^N x_i \quad (2.2)$$

Θέτοντας τις παραγώγους της L ως προς a και β ίσες με μηδέν και λύνοντας ως προς a και β παίρνουμε τις εκτιμήτριες των παραμέτρων της κατανομής. Για την περίπτωση όπου $\beta > 0$, η οποία είναι και η περισσότερο χρησιμοποιούμενη περίπτωση σε υδρολογικές μεταβλητές, όπως η βροχόπτωση, προκύπτουν οι σχέσεις:

$$\bar{x} = a / \beta \quad (2.3)$$

και



Σχήμα 2.3. Συνάρτηση πυκνότητας – πιθανότητας της κατανομής Gamma για διάφορες τιμές της παραμέτρου a και $\beta = 1$.

$$\ln(\beta) - \frac{\partial \ln \Gamma(a)}{\partial a} + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln x_i = 0 \quad (2.4)$$

Χρησιμοποιώντας τις προσεγγιστικές λύσεις του Thom [1958], οι παράμετροι αυτοί υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$a = \frac{1}{4 A} \left(1 + \sqrt{\frac{4 A}{3}} \right) \quad (2.5)$$

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\alpha} \quad (2.6)$$

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n} \quad (2.7)$$

και n είναι το πλήθος των παρατηρήσεων της βροχόπτωσης.

Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα των παραμέτρων χρησιμοποιούνται για να βρεθεί μια αθροιστική πιθανότητα ενός γνωστού επεισοδίου βροχής για ένα ορισμένο μήνα και για χρονικό διάστημα που επιθυμείται (1 μήνες, 9 μήνες, 24 μήνες κ.ο.κ) για τον καθορισμένο σταθμό. Με ολοκλήρωση της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας, αφού έχουν προηγουμένως εκτιμηθεί οι παράμετροι α και β για κάθε χρονοσειρά μηνιαίων τιμών βροχόπτωσης, υπολογίζεται η αθροιστική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας κάθε τιμής βροχόπτωσης και για όλες τις διάρκειες. Η αθροιστική πιθανότητα δίνεται από την σχέση:

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^x \chi^{\alpha-1} e^{-x/\beta} dx \quad (2.8)$$

Θέτοντας όπου $t=x/\beta$, η Εξίσωση 2.8 μετασχηματίζεται στην ημιτελή Gamma συνάρτηση:

$$G(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^x \chi^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad (2.9)$$

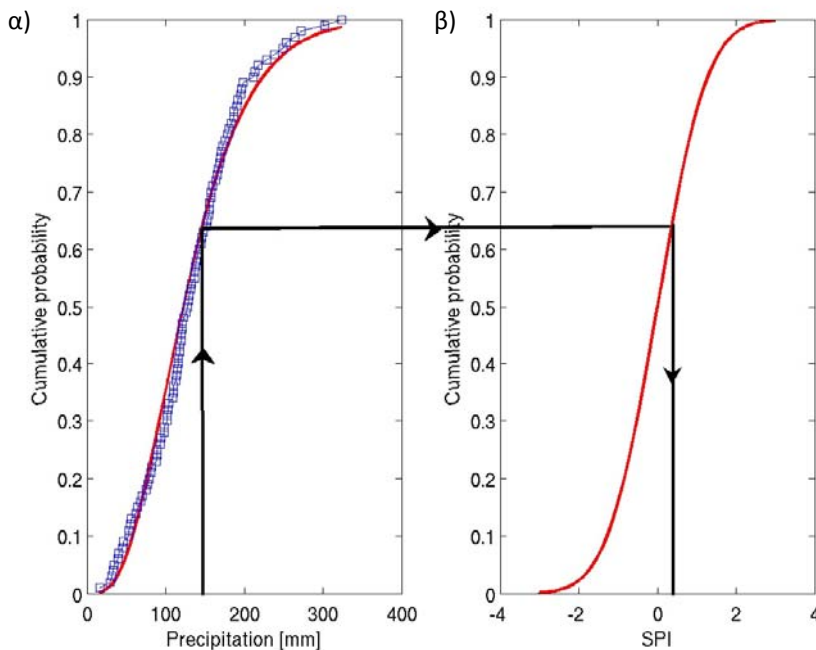
Επειδή η συνάρτηση Γάμμα δεν ορίζεται για $x=0$, ενώ οι τιμές της βροχής μπορούν να πάρουν τιμή μηδέν, η αθροιστική πιθανότητα παίρνει τη μορφή:

$$H(x) = q + (1-q)G(x) \quad (2.10)$$

όπου q είναι η πιθανότητα εμφάνισης μηδενικής βροχόπτωσης. Εάν m είναι το πλήθος των περιπτώσεων με μηδενική βροχόπτωση κατά τη διάρκεια της χρονοσειράς, τότε ο Thom [1958] έδειξε ότι το q μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση $q = m/n$. Ο Thom [1958] χρησιμοποίησε πίνακες της ελλειπούς συνάρτησης Γάμμα για να ορίσει την αθροιστική πιθανότητα $G(x)$, ενώ αντίθετα οι McKee et al., [1993] ανέπτυξαν αλγόριθμο για να καθορίσουν την αθροιστική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας.

Η αθροιστική πιθανότητα, $H(x)$, στη συνέχεια, μετασχηματίζεται σε μία κανονικοποιημένη μεταβλητή z , της οποίας η μέση τιμή είναι μηδέν, ενώ η διασπορά ισούται με τη μονάδα. Η τιμή αυτή είναι ο δείκτης SPI. Η μετατροπή αυτή αποτελεί μετατροπή ίσης πιθανότητας σύμφωνα με τους Panofsky and Brier [1958]. Οι δύο ερευνητές είχαν τη βασική ιδέα της μετατροπής μιας τιμής από κάποια κατανομή (π.χ. Gamma κατανομή) σε κατανομή με καθορισμένη μορφή (π.χ. κανονική). Η μετατροπή αυτή γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε η πιθανότητα να υπάρχει μία τιμή μικρότερη από ένα καθορισμένο όριο της πρώτης κατανομής να είναι ίση με την αντίστοιχη πιθανότητα της μετατρεπόμενης κατανομής. Η μέθοδος αυτή απεικονίζεται στο Σχήμα 2.4, όπου το ύψος της βροχόπτωσης για τρεις μήνες (Ιανουάριο μέχρι Μάρτιο) μετατρέπεται σε μία τιμή του SPI με μέση τιμή το μηδέν και διακύμανση ίση με ένα. Στο Σχήμα 2.4^α απεικονίζονται οι πραγματικές τιμές της βροχόπτωσης για τους τρεις μήνες (άξονας X) Ιανουάριο μέχρι και Μάρτιο, για το χρονικό διάστημα από 1911 έως 1995. Η διακεκομμένη γραμμή επίσης ορίζει την εμπειρική κατανομή της αθροιστικής πιθανότητας (άξονας Y) για την περίοδο μελέτης. Η εμπειρική αθροιστική πιθανότητα υπολογίζεται, όπως προτείνουν οι Panofsky and Brier [1958], όταν τα δεδομένα της βροχόπτωσης τοποθετούνται με αύξουσα σειρά μεγέθους. Η ομαλοποιημένη καμπύλη στο Σχήμα 2.4^α αντιστοιχεί στην κατανομή της αθροιστικής πιθανότητας της κατανομής Gamma που ακολουθούν τα δεδομένα της βροχόπτωσης. Η ομαλή καμπύλη στο Σχήμα 2.4^β ορίζει την κατανομή της αθροιστικής πιθανότητας της κανονικοποιημένης μεταβλητής z , χρησιμοποιώντας την ίδια κλίμακα με το αριστερό

διάγραμμα, ενώ στον άξονα X βρίσκονται οι κανονικοποιημένες τιμές της μεταβλητής z (ή οι τιμές του δείκτη SPI). Για παράδειγμα, για να βρεθεί η τιμή του δείκτη SPI, που αντιστοιχεί σε 2 ίντσες βροχόπτωσης, ακολουθείται η εξής διαδικασία: Από το αριστερό διάγραμμα βρίσκουμε την τιμή 2 ίντσες στον άξονα των X, φέρουμε παράλληλη ευθεία προς τον άξονα Y έως την καμπύλη. Από το σημείο αυτό φέρουμε παράλληλη ευθεία προς τον άξονα X και προεκτείνουμε έως την καμπύλη του Σχήματος 2.4^β. Τέλος, από το σημείο τομής της παράλληλης με την καμπύλη του Σχήματος 2.4^β φέρουμε κάθετη στον άξονα X με σκοπό να προσδιορίσουμε την τιμή του SPI. Στη περίπτωση αυτή, η τιμή του SPI είναι περίπου +0.3.



Σχήμα 2.4. Μετασχηματισμός ίσης πιθανότητας από Gamma κατανομή σε τυπική κανονική κατανομή

Επειδή, όμως, αυτός ο τρόπος μετατροπής είναι επίπονος εφόσον πρέπει να δημιουργηθούν τα αντίστοιχα διαγράμματα για όλους τους σταθμούς, για όλα τα χρονικά διαστήματα και για κάθε μήνα του έτους, η τιμή του z ή SPI είναι πιο εύκολο να υπολογιστεί, με τη βοήθεια των σχέσεων [McKee et al., 1993]:

$$z = SPI = - \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \quad \text{για } 0 < H(x) < 0.5 \quad (2.11)$$

$$z = SPI = + \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \quad \text{για } 0.5 < H(x) < 1.0 \quad (2.12)$$

όπου :

$$t = \sqrt{\ln \left(\frac{1}{(H(x))^2} \right)} \quad \text{για } 0 < H(x) < 0.5 \quad (2.13)$$

$$t = \sqrt{\ln \left(\frac{1}{(1 - H(x))^2} \right)} \quad \text{για } 0.5 < H(x) < 1.0 \quad (2.14)$$

και

$$\begin{aligned}c_0 &= 2.515517 & c_1 &= 0.802853 & c_2 &= 0.010328 \\d_1 &= 1.432788 & d_2 &= 0.189269 & d_3 &= 0.001308\end{aligned}$$

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι ο SPI (ή z) αντιστοιχεί σε μια τιμή τυπικής απόκλισης που είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από τη μέση τιμή. Αυτό δεν ισχύει απόλυτα σε μικρές χρονικές κλίμακες, εξαιτίας του γεγονότος ότι τα ύψη βροχοπτώσεων σε αυτή την περίπτωση παρουσιάζουν κάποια λοξότητα.

Είναι γνωστό ότι η χωρική και χρονική διάσταση ενός επεισοδίου ξηρασίας δημιουργεί προβλήματα στη δημιουργία ενός δείκτη ξηρασίας. Μία ανωμαλία στην εμφάνιση της βροχόπτωσης πρέπει να κανονικοποιηθεί σύμφωνα τόσο με το χρόνο εμφάνισής της όσο και με τον τόπο εμφάνισής της, για να μπορεί ο δείκτης να είναι αντιπροσωπευτικός της απεικόνισης του επεισοδίου ξηρασίας. Ο δείκτης SPI συνδυάζει και τα δύο. Ο SPI κανονικοποιείται χωρικά ως προς τον σταθμό, γιατί στον υπολογισμό του προσμετρείται, τόσο η κατανομή της συχνότητας εμφάνισης της βροχόπτωσης στο συγκεκριμένο τόπο όσο και η διακύμανση της βροχόπτωσης στην περιοχή. Επιπρόσθετα, ο SPI κανονικοποιείται χρονικά γιατί ο υπολογισμός του μπορεί να γίνει για οποιαδήποτε χρονική κλίμακα ανάλογα με το σκοπό της εκάστοτε ανάλυσης. Ειδικότερα, για μια περιοχή όπου είναι γνωστά τα μηνιαία ύψη βροχόπτωσης, ο SPI μπορεί να υπολογιστεί για κάθε μήνα σε σχέση με τους i προηγούμενους μήνες, όπου $i=1, 2, 3, \dots, 12, \dots, 24, \dots, 48, \dots$ μήνες, ανάλογα με το αντικείμενο της μελέτης. Για παράδειγμα, ο 3μηνών-SPI, για τον Ιανουάριο του 1960, χρησιμοποιεί για τον υπολογισμό του το άθροισμα των υψών βροχόπτωσης για τους μήνες: Νοέμβριο 1959 έως Ιανουάριο 1960. Αντίστοιχα, ο 12μηνών-SPI, για τον Ιανουάριο του 1960, χρησιμοποιεί για τον υπολογισμό του το άθροισμα των υψών βροχόπτωσης για τους μήνες: Φεβρουάριος 1959 έως Ιανουάριο 1960. Στην παρούσα εργασία για την αναγνώριση της υδρολογικής ξηρασίας ο δείκτης SPI υπολογίστηκε για συνεχόμενες χρονικές κλίμακες από 1 έως 24 μηνών, ενώ για την αναγνώριση της ξηρασίας υδατικών πόρων (Ταμειυτήρας Πλαστήρα) από 1 έως 36 μήνες για την περίοδο Οκτ. 1960 – Σεπ. 2002.

2.4.2. Υδρολογικοί δείκτες ξηρασίας

Όπως προαναφέρθηκε το φαινόμενο της ξηρασίας είναι αρκετά σύνθετο, τόσο στον υπολογισμό του, όσο και στην στατιστική του ανάλυση. Η μεθοδολογία της προηγούμενης παραγράφου δίνει μια εικόνα της μετεωρολογικής ξηρασίας μέσω των δεικτών μετεωρολογικής ξηρασίας SPI. Όμως, για να περιγραφεί το φαινόμενο της ξηρασίας με πληρότητα σε ένα σημείο και ειδικότερα σε μια περιοχή μελέτης, όπως μια λεκάνη, πέραν των μετεωρολογικών δεικτών πρέπει να χρησιμοποιηθεί και να εφαρμοστεί ένας επιπλέον δείκτης υδρολογικής ξηρασίας, ο οποίος πρέπει περιγράφει το φαινόμενο της ξηρασίας βάσει δεδομένων παροχής. Ο βαθμός συσχέτισης του νέου αυτού δείκτη υδρολογικής ξηρασίας με τους μετεωρολογικούς δείκτες μπορεί να δώσει μια καθαρή εικόνα του κατά πόσο τα γεγονότα ξηρασίας περιγράφονται ικανοποιητικά με την χρήση των δεικτών μετεωρολογικής ξηρασίας SPI.

Για την αξιολόγηση της υδρολογικής δριμύτητας ξηρασίας (απορροή και εδαφική υγρασία) χρησιμοποιήθηκε το μηνιαίο αδρομερές εννοιολογικό μοντέλο ισοζυγίου UTHBAL [Loukas et al., 2007a] επειδή τα διαθέσιμα υδρομετρικά δεδομένα της υπό-εξέταση λεκάνης απορροής είναι ελλιπή και δεν υπάρχουν δεδομένα εδαφικής υγρασίας αντιπροσωπευτικής της υδρολογικής λεκάνης. Το μοντέλο αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας αρχικά σε αδρομερή μορφή [Λουκάς και συνεργάτες, 2003; Loukas et al., 2007a], και εξελίχθηκε ώστε να προσομοιώσει το υδρολογικό ισοζύγιο ανά υψομετρικές ζώνες ή ομοιογενείς υδρολογικά περιοχές ή σε πλήρη κατανεμημένη μορφή [Λουκάς και συνεργάτες, 2006]. Το μοντέλο στην αδρομερή του μορφή έχει εφαρμοσθεί με επιτυχία σε λεκάνες απορροής της Κύπρου, της Κρήτης και της Θεσσαλίας [Λουκάς και συνεργάτες, 2003; Christodoulaki et al., 2003;

Loukas et al., 2007a] καθώς και στη διασυνοριακή λεκάνη απορροής του Νέστου ποταμού [Καμπράγκου, 2006]. Για το λόγο αυτό, η αδρομερής εφαρμογή επιλέχθηκε για την προσομοίωση των συνιστωσών του υδρολογικού κύκλου στην κύρια υπολεκάνη του Πηνειού ποταμού. Ο κύριος σκοπός της εφαρμογής του UTHBAL μοντέλου είναι να δημιουργήσει χρονοσειρές απορροής και εδαφικής υγρασίας για την περίοδο της ανάλυσης που είναι η υδρολογική περίοδος Οκτ. 1960 – Σεπ. 2002.

Το μοντέλο UTHBAL έχει δομηθεί έτσι ώστε να κάνει δυνατό τον υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου με ελάχιστα υδρομετεωρολογικά δεδομένα. Έτσι, τα απαιτούμενα δεδομένα εισόδου είναι χρονοσειρές μηνιαίας υετόπτωσης, μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας, και μηνιαίας δυνητικής εξατμισοδιαπνοής. Το μοντέλο διαχωρίζει την υετόπτωση σε βροχόπτωση και χιονόπτωση. Το ποσοστό των συνολικών μηνιαίων κατακρημνισμάτων που θεωρείται χιονόπτωση εκτιμάται από μια λογιστική (logistic) σχέση που έχει χρησιμοποιηθεί στην λεκάνη του Στρυμώνα και βασίζεται στη μέση μηνιαία θερμοκρασία του αέρα (Knight et al., 2001). Από τη διάκριση αυτή υπολογίζεται η μηνιαία χιονόπτωση. Η δυνητική μηνιαία τήξη του χιονιού υπολογίζεται με απλή γραμμική σχέση (degree-day method) με τη χρήση της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας. Από τους υπολογισμούς αυτούς υπολογίζεται το ισοδύναμο ύψος χιονιού που συσσωρεύεται στο έδαφος καθώς και αυτό που λιώνει και είναι διαθέσιμο προς απορροή. Η παράμετρος της μοναδιαίας τήξης χιονιού, C_m (mm/°C/μήνα), αποτελεί την πρώτη παράμετρο του μοντέλου. Η μηνιαία βροχόπτωση και το μηνιαίο ισοδύναμο ύψος χιονιού που λιώνει αποτελούν την μηνιαία ψευδο-υετόπτωση. Σύμφωνα με το μοντέλο πρώτη προτεραιότητα στο υδατικό ισοζύγιο πριν τη δημιουργία απορροής αποτελεί η ικανοποίηση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής. Η μηνιαία πραγματική εξατμισοδιαπνοή υπολογίζεται από τη σχέση που πρότειναν οι Vandewiele and Win [1998]. Το μοντέλο διακρίνει την συνολική απορροή σε τρεις συνιστώσες απορροής, δηλαδή, την επιφανειακή απορροή, την ενδιάμεση ή επιδερμική απορροή, και την βασική απορροή ή απορροή που προέρχεται από την εκροή του υδροφορέα. Η διάκριση της απορροής στις τρεις συνιστώσες της έγινε με τη βοήθεια ενός αλγόριθμου υπολογισμού της εδαφικής υγρασίας. Στον αλγόριθμο αυτό χρησιμοποιούνται τέσσερις παράμετροι. Η πρώτη παράμετρος καθορίζει την μέγιστη δυνατή υγρασία που μπορεί να κατακρατήσει το έδαφος και είναι η παράμετρος Curve Number (CN) της μεθόδου SCS [USDA SCS, 1972]. Η δεύτερη παράμετρος, K , καθορίζει το ποσό του νερού διήθησης που φορτίζει τον υδροφορέα. Η τρίτη παράμετρος, β , καθορίζει την ενδιάμεση απορροή ενώ η τέταρτη παράμετρος, γ , καθορίζει τη βασική απορροή ή εκφόρτιση του υδροφορέα.

Στο μοντέλο, ως δεδομένα εισόδου χρησιμοποιούνται χρονοσειρές μηνιαίας επιφανειακής βροχόπτωσης, μέσης μηνιαίας επιφανειακής θερμοκρασίας, και μηνιαίας επιφανειακής δυνητικής εξατμισοδιαπνοής. Το μοντέλο διαχωρίζει τα κατακρημνίσματα σε βροχόπτωση και χιονόπτωση. Το ποσοστό των συνολικών μηνιαίων κατακρημνισμάτων που θεωρείται χιονόπτωση εκτιμάται από μια σχέση που βασίζεται στη μέση μηνιαία θερμοκρασία του αέρα [Knight et al., 2001]:

$$\begin{aligned} \%S &= 0 && \text{για } T \geq 12.22^{\circ}\text{C} \\ \%S &= \frac{100}{1.35^T \cdot 1.61 + 1} && \text{για } -10^{\circ}\text{C} \leq T \leq 12.22^{\circ}\text{C} \\ \%S &= 100 && \text{για } T \leq -10^{\circ}\text{C} \end{aligned} \quad (2.15)$$

όπου T η μέση μηνιαία θερμοκρασία.

Έχοντας, λοιπόν, ως δεδομένα, από μετεωρολογικούς σταθμούς, τις μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες και τη μηνιαία υετόπτωση, υπολογίζεται η μηνιαία χιονόπτωση. Στη συνέχεια υπολογίζεται η δυνητική μηνιαία τήξη χιονιού. Η τήξη χιονιού επηρεάζεται από μια σειρά παραμέτρων, όπως, η θερμοκρασία περιβάλλοντος, η ηλιακή ακτινοβολία, η ατμοσφαιρική πίεση, η ταχύτητα του ανέμου και η φυτοκάλυψη. Οι παράμετροι αυτές είναι δύσκολο να υπολογιστούν, καθώς δεν υπάρχουν ανάλογα δεδομένα. Γνωρίζοντας την ημερήσια θερμοκρασία περιβάλλοντος, μπορεί να υπολογιστεί η τήξη χιονιού από τη σχέση (degree-day method) [WMO, 1986; Semadeni-Davies, 1997]:

$$SM = C_m \cdot T \cdot N \quad (2.16)$$

όπου C_m είναι παράμετρος με μονάδες mm/°C/ημέρα, T ημερήσια θερμοκρασία, N ο αριθμός των ημερών σε κάθε μήνα. Στη συγκεκριμένη μελέτη όπου τα θερμοκρασιακά δεδομένα ήταν μηνιαία, η παραπάνω σχέση μετατράπηκε ως εξής:

$$SM = C_m \cdot T_{\text{μηνιαία}}(J) \quad (2.17)$$

όπου πλέον η παράμετρος C_m έχει μονάδες mm/°C/μήνα και σύμφωνα με αυτήν δίνεται η δυνητική μηνιαία τήξη χιονιού. Η παράμετρος C_m αλλάζει ανάλογα με την εξεταζόμενη κάθε φορά λεκάνη αφού εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τη φυτοκάλυψη, τη μορφολογία και κλιματολογία της περιοχής (πεδινή, ορεινή). Έτσι, για κάθε λεκάνη η τιμή της παραμέτρου πρέπει να ρυθμιστεί κατά τη διαδικασία ρύθμισης των παραμέτρων (calibration) και αποτελεί μια επιπλέον παράμετρο των υδρολογικών μοντέλων.

Το ισοδύναμο ύψος χιονιού του συσσωρευμένου χιονιού, SWE_{sp} , εκτιμάται από:

$$SWE_{sp}(J) = SWE_{sp}(J-1) + S(J) - SM(J) \quad (2.18)$$

όπου, $S(J)$ είναι το χιόνι που κατακρημνίστηκε κατά τη διάρκεια του μήνα J και ισούται με:

$$S(J) = \%S \cdot P(J) \quad (2.19)$$

όπου, $P(J)$ είναι η συνολική υετόπτωση του μήνα J .

Το μοντέλο διακρίνει την συνολική απορροή σε τρεις συνιστώσες απορροής, δηλαδή, την επιφανειακή απορροή, την ενδιάμεση ή επιδερμική απορροή, και την βασική απορροή ή απορροή που προέρχεται από την εκροή του υδροφορέα. Σύμφωνα με το μοντέλο, πρώτη προτεραιότητα στο υδατικό ισοζύγιο πριν τη δημιουργία απορροής αποτελεί η ικανοποίηση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής. Η μηνιαία πραγματική εξατμισοδιαπνοή E_a του μήνα J εξαρτάται από τη διαθέσιμη εδαφική υγρασία του μήνα J , και την μέση επιφανειακή δυνητική εξατμισοδιαπνοή E_p του μήνα J . Η μηνιαία πραγματική εξατμισοδιαπνοή υπολογίζεται από τη σχέση που πρότειναν οι Vandewiele και Win [1998]:

$$E_a(J) = \min\{E_p(J) * (1 - \alpha^{S_{moist}(J)/E_p(J)}), S_{moist}(J)\} \quad (2.20)$$

όπου $S_{moist}(J)$ η διαθέσιμη εδαφική εργασία του μήνα J για πλήρωση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής, α ένας συντελεστής πραγματικής εξατμισοδιαπνοής ($0 \leq \alpha \leq 1$), και $E_p(J)$ η δυνητική εξατμισοδιαπνοή του μήνα J .

Η επιφανειακή απορροή, SR , του μήνα J υπολογίζεται ως:

$$SR(J) = (1 - K) * (AS_{moist}(J) - S_{max}) \quad \text{εάν } AS_{moist}(J) > S_{max} \quad (2.21)$$

ή

$$SR(J) = 0 \quad \text{εάν } AS_{moist}(J) \leq S_{max} \quad (2.22)$$

όπου, $AS_{moist}(J) = S_{moist}(J) - E_a(J)$, η υπολειπόμενη εδαφική υγρασία του μήνα J μετά την ικανοποίηση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής, $S_{max} = \frac{25400}{CN} - 254$, η μέγιστη εδαφική υγρασία, CN το Curve Number της Soil Conservation Method [USDA SCS, 1972] ($0 \leq CN \leq 100$), και K ο συντελεστής κατείδυσης ($0 \leq K \leq 1$).

Η διήθηση προς τον υπόγειο υδροφορέα, D , του μήνα J υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$D(J) = K * (AS_{moist}(J) - S_{max}) \quad \text{εάν } AS_{moist}(J) > S_{max} \quad (2.23)$$

ή

$$D(J) = 0 \text{ εάν } AS_{moist}(J) \leq S_{max} \quad (2.24)$$

Η διαθέσιμη εδαφική εργασία του μήνα J , N_{moist} , υπολογίζεται από τη σχέση:

$$N_{moist}(J) = AS_{moist}(J) - SR(J) - D(J) \quad (2.25)$$

Η ενδιάμεση απορροή από την εδαφική υγρασία, MR , του μήνα J υπολογίζεται ως:

$$MR(J) = \beta * [N_{moist}(J-1) + N_{moist}(J)] \quad (2.26)$$

όπου, β ο συντελεστής ενδιάμεσης απορροής ($0 \leq \beta \leq 1$).

Η υπολειπόμενη υγρασία στο τέλος του μήνα J , NS_{moist} , υπολογίζεται από τη σχέση:

$$NS_{moist}(J) = N_{moist}(J) - MR(J) \quad (2.27)$$

Η διαθέσιμη εδαφική εργασία για πλήρωση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής του επόμενου μήνα $J+1$ είναι:

$$S_{moist}(J+1) = P(J+1) + NS_{moist}(J) \quad (2.28)$$

Η βασική απορροή ή απορροή από την εκροή του υδροφορέα, Q_g , του μήνα J υπολογίζεται από τη διήθηση, D , του προηγούμενου μήνα $J-1$, από τη σχέση:

$$Q_g(J) = \gamma * D(J-1) \quad (2.29)$$

όπου, γ ο συντελεστής βασικής απορροής ή συντελεστής εκροής του υδροφορέα ($0 \leq \gamma \leq 1$).

Η επαναφόρτιση του υδροφορέα, R_g , είναι ίση με:

$$R_g = (1-\gamma) * D(J-1) \quad (2.30)$$

Τέλος, η συνολική απορροή, Q_c , υπολογίζεται ως άθροισμα των επιμέρους συνιστωσών της απορροής, δηλαδή της επιφανειακής απορροής, ενδιάμεσης απορροής και βασικής απορροής:

$$Q_c(J) = SR(J) + MR(J) + Q_g(J) \quad (2.31)$$

Το προτεινόμενο μοντέλο υδρολογικού ισοζυγίου είναι ένα μοντέλο έξι παραμέτρων. Είναι όμως δυνατόν δύο από τους παραμέτρους του μοντέλου, το CN και ο συντελεστής κατείδυσης, K , να εκτιμηθούν άμεσα από εδαφολογικούς και γεωλογικούς αναλογικούς ή ψηφιακούς χάρτες, και χάρτες χρήσεων γης, περιορίζοντας έτσι σημαντικά τον αριθμό των παραμέτρων που πρέπει να προσδιορισθούν με τη βοήθεια μεθόδων βελτιστοποίησης [Christodoulaki et al., 2003]. Οι τιμές των έξι παραμέτρων του μοντέλου, συνήθως ρυθμίζονται κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης. Στην παρούσα εργασία οι παράμετροι του μοντέλου C_m , α , K , CN , β , και γ έχουν ρυθμιστεί με τη διαδικασία βελτιστοποίησης.

Οι παράμετροι των εννοιολογικών υδρολογικών μοντέλων δεν είναι μετρήσιμα μεγέθη αλλά εκτιμώνται έμμεσα, μέσω μιας συστηματικής διαδικασίας αξιολόγησης εναλλακτικών συνδυασμών που καλείται βαθμονόμηση (calibration). Η βαθμονόμηση ενός μοντέλου γίνεται συγκρίνοντας τις προσομοιωμένες αποκρίσεις της λεκάνης με τις παρατηρημένες, και επιλέγοντας τον συνδυασμό εκείνο που επιτυγχάνει την καλύτερη προσαρμογή. Προφανώς, αυτό προϋποθέτει ένα επαρκές χρονικό διάστημα για το οποίο διατίθενται συστηματικές μετρήσεις (χρονοσειρές) απόκρισης της λεκάνης, έτσι ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των ιστορικών με τα προσομοιωμένα δεδομένα.

Η βαθμονόμηση των παραμέτρων του μοντέλου πραγματοποιήθηκε με τις παρατηρούμενες τιμές απορροής του υδρομετρικού σταθμού στη θέση Λάρισα. Οι παράμετροι του μοντέλου υδατικού ισοζυγίου βελτιστοποιήθηκαν (calibration) και η αποδοτικότητα των μοντέλων ελέγχθηκε (validation) με τη μέθοδο του χωριστού δείγματος (split sample test), η οποία είναι μια ανεξάρτητη και

αμερόληπτη (unbiased) μέθοδος ελέγχου των προσομοιώσεων. Οι παράμετροι των μοντέλων προσαρμόστηκαν στις βέλτιστες τιμές τους χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο γενικευμένης ανηγμένης κλίσης με πολλαπλές εκκινήσεις (multi-start generalized reduced gradient algorithm) με ελαχιστοποίηση των αποκλίσεων μεταξύ παρατηρημένης και προσομοιωμένης απορροής [Smith and Lasdon, 1992]. Ο αλγόριθμος γενικευμένης ανηγμένης κλίσης με πολλαπλές εκκινήσεις συνδυάζει μεθόδους τυχαίας δειγματοληψίας και προσδιοριστικής αναζήτησης τοπικών ακρότατων. Κάθε τυχαίο σημείο που γεννάται, λαμβάνεται ως σημείο εκκίνησης του τοπικού επιλυτή GRG2, και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μόλις εντοπιστεί το τοπικό ακρότατο της αντίστοιχης περιοχής έλξης. Το προφανές πλεονέκτημα της συγκριμένης προσέγγισης είναι ότι αν μέσω της τυχαίας δειγματοληψίας παραχθεί μια λύση που ανήκει στην περιοχή έλξης του ολικού ακροτάτου, τότε ο εντοπισμός του τελευταίου είναι μια τετριμμένη διαδικασία, που εγγυάται πολύ υψηλή ακρίβεια. Στην ιδανική περίπτωση, κάθε τυχαίο σημείο εκκίνησης που παράγεται πρέπει να αντιστοιχεί σε μία ακριβώς περιοχή έλξης, οπότε είναι δυνατό να εντοπιστούν όλα τα τοπικά ακρότατα της συνάρτησης. Μια βελτιωμένη εκδοχή της μεθόδου είναι η λεγόμενη ομαδοποίηση ή συστοίχιση (clustering), που προϋποθέτει μια προεπισκόπηση του πεδίου αναζήτησης με σκοπό τον εντοπισμό υποσχόμενων περιοχών έλξης. Στόχος είναι η επιλογή σημείων που ανήκουν σε διαφορετικές περιοχές έλξης ακροτάτων, ώστε να ελαχιστοποιηθεί ο υπολογιστικός φόρτος (αν δύο σημεία εκκίνησης ανήκουν στην ίδια περιοχή έλξης, τότε ο τοπικός επιλυτής καταλήγει εξ ορισμού στο ίδιο ακρότατο). Ο αλγόριθμος έχει εφαρμοστεί με επιτυχία σε διάφορα μη γραμμικά προβλήματα βελτιστοποίησης και αποτελεί μια καλή λύση ολικής βελτιστοποίησης [Pardalos et al., 2000; Nocedal and Wright, 2006].

Η αντικειμενική συνάρτηση που χρησιμοποιήθηκε για την βελτιστοποίηση είναι η model efficiency (*Eff*) η οποία έχει προταθεί από τους Nash και Sutcliffe [1970] και χρησιμοποιείται ευρέως στις υδρολογικές προσομοιώσεις, και δίνεται από τον τύπο:

$$Eff = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - Q_{sim_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (2.32)$$

όπου, Q_{obs_i} η παρατηρημένη απορροή του μήνα i , Q_{sim_i} η προσομοιωμένη απορροή του μήνα i , $\overline{Q_{obs}}$ ο μέσος όρος των τιμών της μηνιαίας παρατηρημένης απορροής. Εκτός της αντικειμενικής συνάρτησης διάφορες άλλες στατιστικές παράμετροι χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο της πιστότητας των προσομοιώσεων της απορροής, όπως ο συντελεστής προσδιορισμού (coefficient of determination, R^2), η σύγκριση μεταξύ της μέσης παρατηρημένης απορροής (mean observed runoff, $\overline{Q_{obs}}$) και της μέσης προσομοιωμένης απορροής (mean simulated runoff, $\overline{Q_{sim}}$), καθώς και η ποσοστιαία διαφορά μεταξύ των παρατηρημένων και προσομοιωμένων όγκων της απορροής (percentage volume difference, %DV), η οποία υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\%DV = \frac{V_{sim} - V_{obs}}{V_{obs}} \times 100 \quad (2.33)$$

όπου, V_{obs} ο παρατηρημένος όγκος απορροής για την περίοδο της προσομοίωσης, V_{sim} ο προσομοιωμένος όγκος της απορροής για την περίοδο της προσομοίωσης. Επίσης, έγινε οπτικός έλεγχος των παρατηρουμένων και προσομοιωμένων υδρογραφημάτων της απορροής καθώς και διαγράμματα διασποράς της απορροής για τις περιόδους βελτιστοποίησης των παραμέτρων των μοντέλων και πιστοποίησης.

Το βαθμονομημένο UTHBAL μοντέλο εφαρμόστηκε για την προσομοίωση, συμπλήρωση και επέκταση των χρονοσειρών παροχομετρικών μετρήσεων και τη δημιουργία χρονοσειρών εδαφικής υγρασίας των λεκανών απορροής για την περίοδο 1960-2002. Οι προσομοιωμένες χρονοσειρές απορροής και

εδαφικής υγρασίας κανονικοποιήθηκαν με τη χρήση του μετασχηματισμού Box-Cox [Box and Cox, 1964; Salas et al., 1980]:

$$Y_t = \begin{cases} \frac{x_t^\lambda - 1}{\lambda}, \lambda \neq 0 \\ \log x_t, \lambda = 0 \end{cases} \quad (2.34)$$

όπου Y_t οι μετασχηματισμένες υπολογισμένες χρονοσειρές απορροής και εδαφικής υγρασίας, x_t οι υπολογισμένες χρονοσειρές απορροής και εδαφικής υγρασίας (έξοδοι του UTHBAL) και λ μία σταθερά που παίρνει τιμές ώστε να προσαρμόζει τα δεδομένα εξόδου με βάση την κανονική κατανομή. Στη συνέχεια υπολογίστηκε ο σταθμισμένος δείκτης υδρολογικής ξηρασίας για την απορροή (Z_{WBI}) και την εδαφική υγρασία (Z_{SMI}) στην ίδια κλίμακα με την κλίμακα του SPI αφαιρώντας το μέσο και διαιρώντας με την τυπική απόκλιση:

$$Z_{WBI} = \frac{Y_t - \bar{Y}}{\sigma_Y} \quad (2.35)$$

όπου Z_{WBI} είναι οι τιμές του υδρολογικού δείκτη απορροών των μετασχηματισμένων χρονοσειρών, \bar{Y} και σ_Y η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση των μετασχηματισμένων χρονοσειρών, αντίστοιχα. Ο μετασχηματισμός Box-Cox απαιτεί τον υπολογισμό της βέλτιστης τιμής του λ που δίνει μία κατανομή όσο πιο κοντά στην κανονική κατανομή. Οι βέλτιστες τιμές της σταθεράς λ βρέθηκαν με την μέθοδο της μέγιστης πιθανοφάνειας [Press et al., 2007]. Ο μετασχηματισμός και η κανονικοποίηση έγινε σε μηνιαία βάση που σημαίνει ότι 12 τιμές του λ υπολογίστηκαν μία για κάθε μήνα για κάθε λεκάνη απορροής. Η ίδια διαδικασία εφαρμόστηκε και τον δείκτη εδαφικής υγρασίας Z_{SMI} . Οι δύο αυτοί δείκτες χρησιμοποιήθηκαν για την διακρίβωση της υδρολογικής ξηρασίας και της ξηρασίας εδαφικής υγρασίας. Η διαδικασία κανονικοποίησης έχει σαν αποτέλεσμα οι δείκτες υδρολογικής ξηρασίας και εδαφικής υγρασίας να ταξινομούνται στις ίδιες κλάσεις του SPI (Πίνακας 2.2). Τα χαρακτηριστικά της δριμύτητας και διάρκειας της ξηρασίας υπολογίζονται από τους παραγόμενους δείκτες ξηρασίας.

Οι τελικοί παραγόμενοι δείκτες χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της υδρολογικής και εδαφικής ξηρασίας και για τη σύγκριση με τους μετεωρολογικούς δείκτες ξηρασίας SPI. Ο συντελεστής συσχέτισης Pearson επιλέχτηκε για τη σύγκριση των δεικτών Z_{WBI} και Z_{SMI} με τον μετεωρολογικό δείκτη SPI υπολογισμένο σε χρονικές κλίμακες από 1-μηνώς έως 24-μηνών για την υπολεκάνη Λάρισα της λεκάνης απορροής του Πηνειού ποταμού. Ο συντελεστής συσχέτισης Pearson δίνεται από την σχέση:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2.36)$$

όπου, x_i οι μετεωρολογικοί δείκτες του SPI (από 1 έως 24 μήνες) και y_i οι υδρολογικοί δείκτες (Z_{WBI} και Z_{SMI}) και \bar{x} , \bar{y} οι αντίστοιχες μέσες τιμές τους.

Ο συντελεστής συσχέτισης Pearson εφαρμόστηκε για την ανάλυση ολόκληρων των παραγόμενων χρονοσειρών, για μηνιαία ανάλυση αλλά και για τα διαπιστωμένα γεγονότα ξηρασίας στην περιοχή μελέτης. Έτσι με την ανάλυση αυτή μπορούν να βρεθούν ποιες χρονικές κλίμακες του SPI αποκρίνονται καλύτερα στην αναγνώριση της υδρολογικής ξηρασίας απορροών και ξηρασίας εδαφικής υγρασίας και να χρησιμοποιηθούν επιχειρησιακά για τη διαχείριση της υδρολογικής ξηρασίας στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού.

Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και για τη διακρίβωση της μετεωρολογικής ξηρασίας και ξηρασίας υδατικών συστημάτων. Επεξεργασμένα δεδομένα καθαρών αποθηκείσεων του μοναδικού μεγάλου

ταμιευτήρα της Θεσσαλίας Ν. Πλαστήρα (Ταυρωπός) χρησιμοποιήθηκαν για την συσχέτιση της ξηρασίας υδατικών συστημάτων με τον μετεωρολογικό δείκτη του SPI υπολογισμένου σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες. Η ανάλυση αυτή στοχεύει να βρεθεί η χρονική κλίμακα υπολογισμού του SPI που αναγνωρίζει καλύτερα την ξηρασία υδατικών συστημάτων ώστε να χρησιμοποιηθεί επιχειρησιακά για την πρόγνωση, παρακολούθηση και διαχείριση της ξηρασίας υδατικών συστημάτων στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού.

3. ΧΩΡΟΧΡΟΝΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΞΗΡΑΣΙΑΣ

Ο δείκτης SPI υπολογισμένος για χρονικές κλίμακες 3-μηνών, 6- μηνών, 9- μηνών, 12- μηνών και 24-μηνών επιλέχτηκε για τη χωροχρονική προσομοίωση διαφόρων τύπων ξηρασίας. Με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία αλλά και το σκοπό της διατριβής για χωροχρονική προσομοίωση και πρόγνωση της ξηρασίας για βραχυπρόθεσμες και μεσοπρόθεσμες δράσεις η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε περιγράφεται αναλυτικά. Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται οι μέθοδοι χωροχρονικής προσομοίωσης που παρουσιάζονται στη διεθνή βιβλιογραφία. Στη συνέχεια, το θεωρητικό υπόβαθρο της γεωστατιστικής περιγράφεται αναλυτικά για την κατανόηση των γεωστατικών μεθόδων και τέλος, οκτώ (8) μεθοδολογίες χωρικής παρεμβολής επιλέγονται για την χωροχρονική προσομοίωση των δεικτών ξηρασίας SPI στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού για την περίοδο Οκτ. 1960 – Σεπ. 2002. Σκοπός της χωροχρονικής προσομοίωσης είναι η αξιολόγηση του σφάλματος των χωρικών μεθόδων παρεμβολής στην απεικόνιση της ξηρασίας και η επιλογή της βέλτιστης μεθόδου χωροχρονικής προσομοίωσης για επιχειρησιακούς σκοπούς. Αξίζει να σημειωθεί, ότι η χωροχρονική προσομοίωση και η σύγκριση οκτώ (8) μεθόδων χωρικής παρεμβολής εφαρμόζονται για πρώτη φορά στους δείκτες ξηρασίας του SPI.

3.1. Μέθοδοι χωρικής παρεμβολής

Οι μέθοδοι χωρικής παρεμβολής βασίζονται σε μαθηματικές συναρτήσεις και στατιστικές αναλύσεις μιας δειγματοληψίας σημείων και δημιουργούν μία συνεχή χωρική επιφάνεια όπου σε κάθε θέση της προσδιορίζεται η τιμή εξεταζόμενης μεταβλητής (π.χ. θερμοκρασία, βροχόπτωση, απορροή, δείκτες ξηρασίας). Τα όρια της επιφάνειας αποτελούν συνήθως το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της περιοχής μελέτης. Τα μοντέλα χωρικής παρεμβολής είναι μέθοδοι διαχείρισης δεδομένων που θεωρούνται ότι αναπαριστούν ένα πεδίο, που περιλαμβάνει τιμές ενός φαινομένου. Στις γεωγραφικές επιστήμες υπάρχει ένας διαχωρισμός μεταξύ δύο τύπων επιφανειακών μοντέλων, που διαφοροποιούνται ανάλογα με τα φαινόμενα που αναπαριστούν. Ο ένας έχει σκοπό τη μοντελοποίηση φυσικών επιφανειών όπως π.χ. του υψομετρικού ανάγλυφου και των χρήσεων γης. Ο δεύτερος έχει σκοπό τη μοντελοποίηση αφηρημένων επιφανειών που αναπαριστούν την κατανομή λιγότερο απτών, χωρικά μεταβαλλόμενων στατιστικών, όπως οι δείκτες ξηρασίας (π.χ. SPI, PDSI). Γενικά, η έννοια της μοντελοποίησης του χώρου αναφέρεται σε στατιστικά μοντέλα, που με την σειρά τους αφορούν φαινόμενα που υπόκεινται σε αβεβαιότητα ή αλλιώς ρυθμίζονται από τους νόμους των πιθανοτήτων και εκφράζονται μέσα από τις γνωστές έννοιες της τυχαίας μεταβλητής και της κατανομής πιθανοτήτων.

Γενικά οι μέθοδοι χωρικής παρεμβολής, μπορούν να διαφοροποιηθούν σε δύο κατηγορίες [Burrough and McDonnell, 1998; Li and Hear, 2008].

1. τις μεθόδους τοπικών εκτιμήσεων - *Local methods*
2. τις μεθόδους γενικευμένων προσεγγίσεων – *Global methods*

Η πρώτη κατηγορία ενδεικτικά περιλαμβάνει τις μεθόδους:

- Μέθοδος δικτύου τριγώνων – *Triangulated Irregular Network (TIN)*
- Πολύγωνα Thiessen – *Thiessen Polygons*
- Πολυωνυμικές Συναρτήσεις τύπου *Splines – Radial Basis Functions*
- Παρεμβολή με απόδοση βαρών σε σημειακά δεδομένα στον πλησιέστερο γείτονα – *Inverse Distance Weighting (IDW)*
- Πολυωνυμικές συναρτήσεις - *Local Polynomial Interpolation*
- Παλινδρόμηση με γεωγραφική βαρύτητα - *Geographically Weighted Regression (Moving window regression)*
- Γεωστατιστικές Μεθόδους (π.χ. μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής kriging – *Ordinary Kriging, OK*)

Η δεύτερη κατηγορία ενδεικτικά περιλαμβάνει τις μεθόδους:

- Πολυωνυμικές συναρτήσεις - *Global Polynomial Interpolation*
- Γραμμική Παλινδρόμηση - *Global Linear regression*
- Ανάλυση *Fourier*

Οι γενικευμένες μέθοδοι σε αντίθεση με τις τοπικές μεθόδους χρησιμοποιούν όλα τα υπάρχοντα στοιχεία από ολόκληρη την περιοχή μελέτης επιτυγχάνοντας εκτίμηση του φαινομένου για το σύνολο της περιοχής ενδιαφέροντος. Οι γενικές πολυωνυμικές συναρτήσεις και οι ακολουθίες *Fourier* ενδιαφέρουν μόνο για την αναπαράσταση των γενικών τάσεων και για την ανάλυση περιοδικότητας σε μία επιφάνεια. Η γραμμική παλινδρόμηση εφαρμόζεται κυρίως στην αναγωγή των σημειακών μετρήσεων της μεταβλητής (π.χ. θερμοκρασία, βροχόπτωση) σε επιφανειακές τιμές σε επίπεδο υδρολογικής λεκάνης. Με τις τοπικές μεθόδους εξετάζονται οι χωρικές διαφοροποιήσεις που δημιουργούνται κοντά στο υπό εκτίμηση σημείο – γειτνίαση, και γι' αυτό οι τοπικές μέθοδοι εφαρμόζονται συχνότερα από τις γενικευμένες.

Οι δύο αυτές κατηγορίες μεθόδων (*local and global methods*) χρησιμοποιούν μαθηματικές συναρτήσεις και λειτουργίες για να παραχθεί η χωρική επιφάνεια. Οι γεωστατιστικές μέθοδοι (*geostatistical methods*) χρησιμοποιούν και μαθηματικές και στατιστικές τεχνικές για οποιαδήποτε εκτίμηση απορρέει από τις σημειακές μετρήσεις. Το σημαντικό πλεονέκτημα των γεωστατιστικών μεθόδων σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους είναι ότι ποσοτικοποιούν και ελαχιστοποιούν το σφάλμα εκτίμησης σε άγνωστα σημεία εκτός του δείγματος των σημειακών μετρήσεων. Οι μεθοδολογίες χωρικής παρεμβολής που χρησιμοποιούν μόνο μετρήσεις της εξεταζόμενης μεταβλητής (*primary variable*) καλούνται μέθοδοι μίας μεταβλητής (*univariate methods*). Όταν χρησιμοποιείται και δευτερογενής πληροφορία άλλων μεταβλητών τότε ονομάζονται μέθοδοι πολλών μεταβλητών (*multivariate methods*). Σύγκριση μεθόδων χωρικής παρεμβολής μαζί με το θεωρητικό υπόβαθρο της κάθε μεθόδου παρουσιάζονται στο βιβλίο των *Burrough and McDonnell [1998]*. Επίσης, σε μία πρόσφατη συγκριτική μελέτη, 40 μέθοδοι χωρικής παρεμβολής συγκρίθηκαν για τη χωρική ολοκλήρωση των σημειακών μετρήσεων για περιβαλλοντικές εφαρμογές που προέκυψαν από τη μελέτη 51 συγκριτικών μελετών [*Li and Hear, 2008; and references therein*]. Η σύγκριση των μεθόδων βασίστηκε σε τρεις κατηγορίες: μη γεωστατιστικές μεθόδους (12 μέθοδοι), γεωστατιστικές μεθόδους (22 μέθοδοι) και συνδυαστικές μεθόδους (8 μέθοδοι). Πρόσφατες εξελίξεις στην εφαρμογή των γεωστατιστικών μεθόδων παρουσιάζονται στην εκτίμηση περιοχικής και επιφανειακής βροχόπτωσης [*Goonaerts, 2000*], στην εκτίμηση περιοχικών υδρολογικών παραμέτρων [*Merz and Blöschl, 2004*], σε υδρολογικές εφαρμογές

[Grayson and Bloeschl, 2000], σε υδρογεωλογικές εφαρμογές [Kitanidis, 1997], σε εδαφολογικές μελέτες [Goovaerts, 1999] και σε μετεωρολογικές - κλιματολογικές εφαρμογές [Dobesch et al., 2007].

Ποικίλες μελέτες έχουν δείξει ότι οι κλιματικές μεταβλητές (βροχόπτωση, θερμοκρασία κ.λ.π.) [Dobesch et al., 2007] και οι υδρολογικές μεταβλητές (π.χ. πραγματική εξατμισοδιαπνοή, εδαφική υγρασία, απορροή) παρουσιάζουν χωρική μεταβλητότητα [Grayson and Bloeschl, 2000] και ότι η χωρική μεταβλητότητα της βροχόπτωσης είναι η βασική αιτία για τις αλλαγές του υδρολογικών διαδικασιών [Merz and Bardossy, 1998; Grayson and Bloeschl, 2000; Arnaud et al., 2002; Mouser et al., 2005; Schuurmans and Bierkens, 2007].

Πρόσφατες μελέτες έδειξαν ότι η χωρική βροχόπτωση υπολογισμένη με διαφορετικές μεθόδους χωρικής παρεμβολής μπορεί να είναι σημαντικά διαφορετική. Η βροχόπτωση γενικά μεταβάλλεται με το υψόμετρο [Smith, 1979], και έτσι πολλοί ερευνητές έχουν ενσωματώσει το υψόμετρο στις γεωστατιστικές μεθόδους και στις χωρικές μεθόδους (IDW, splines) [Hevesi *et al.*, 1992; Phillips *et al.*, 1992; Hutchinson 1995; Martinez-Cob, 1996; Hutchinson 1998a, 1998b; Nalder and Wein, 1998; Pardo-Iguzquiza, 1998; Prudhomme and Duncan, 1999; Vicente-Serrano *et al.*, 2003; Araydin *et al.*, 2004; Miras-Avalos *et al.*, 2007; Li and Hear, 2008]. Άλλοι ερευνητές έχουν αναπτύξει σχέσεις μεταξύ της βροχόπτωσης και διάφορων τοπογραφικών χαρακτηριστικών όπως είναι το γεωγραφικό πλάτος, γεωγραφικό μήκος κλίση, γεωγραφικός προσανατολισμός (orientation), προσέγγιση στη θάλασσα (continentality), χρησιμοποιώντας παλινδρόμηση [Benichou and Lebreton, 1987; Basist *et al.*, 1994; Daly *et al.*, 1994; Goodale *et al.*, 1998; Ninyerola *et al.*, 2000; Wotling *et al.*, 2000; Weisse and Bois, 2001; Daly *et al.*, 2002; Drogue *et al.*, 2002; Fotheringham *et al.*, 2002; Marquinez *et al.*, 2003; Naoum and Tsanis, 2004; Alijani *et al.*, 2008]. Η ακρίβεια όμως των μεθόδων αυτών σε ορεινές περιοχές όπου οι μετρήσεις είναι χωρικά πιο αραιές, είναι περιορισμένη [Basist *et al.*, 1994; Daly *et al.*, 1994; Marquinez *et al.*, 2003; Alijani *et al.*, 2008]. Η ενσωμάτωση, όμως, στη μέθοδο της παλινδρόμησης την πληροφορία της χωρικής συσχέτισης της βροχόπτωσης μπορεί να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα [Goovaerts, 2000; Diodato, 2005; Guan *et al.*, 2005; Moral, 2010]. Ο Goovaerts [2000] σύγκρινε πολλές χωρικές μεθοδολογίες (Thiessen Polygons, Γραμμική Πανιδρόμηση, IDW, Ordinary Kriging (OK), Simple Kriging with varying local means (SKlm), Kriging with an External Drift (KED) and co-Kriging) για την ανάλυση και χωρική παρεμβολή της μηνιαίας και ετήσιας βροχόπτωσης για 36 βροχομετρικούς σταθμούς σε μία περιοχή 5,000 km² της Πορτογαλίας. Ο Lloyd [2005] στην Αγγλία χρησιμοποίησε τοπική κυλιόμενη παλινδρόμηση (Moving Window Regression), IDW, OK, SKlm, και KED για χωρική παρεμβολή μηνιαίων τιμών βροχόπτωσης για το έτος 1999. Οι Carrera-Hernandez and Gaskin [2007] χρησιμοποίησαν OK, KED, και Block Kriging with External Drift (BKED) για την ανάλυση χωρικών και χρονικών χαρακτηριστικών της ημερήσιας βροχόπτωσης και θερμοκρασίας σε μια υδρολογική λεκάνη του Μεξικού και η αξιολόγηση των μεθόδων χωρικής παρεμβολής έγινε με τη χρήση μηνιαίων τιμών βροχόπτωσης και θερμοκρασίας. Οι Zhang and Srinivasan [2009] σύγκριναν ποικίλες μεθοδολογίες χωρικής παρεμβολής (Thiessen Polygons, IDW, SK, OK, SKlm, KED, residual SKlm και residual OK για την υδρολογική λεκάνη Luohe της Κίνας (έκτασης 5239 km²), για τον υπολογισμό ημερήσιας βροχόπτωσης για δέκα χρόνια (1991-2000) από 41 βροχομετρικούς σταθμούς. Η αξιολόγηση των μεθόδων βασίστηκε στους παραγόμενους χωρικούς χάρτες ημερήσιας βροχόπτωσης αλλά και σε στατιστικά κριτήρια με χρήση της τεχνικής cross-validation των σταθμών βροχόπτωσης.

Στον Ελλαδικό χώρο οι Vasiliades and Loukas [2009b] σύγκριναν εννέα (9) μεθόδους χωρικής παρεμβολής για τη μέση μηνιαία βροχόπτωση και υπερετήσια βροχόπτωση στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού της Θεσσαλίας από 66 βροχομετρικούς σταθμούς της Θεσσαλίας. Η ανάλυση τους περιλάμβανε τις μεθόδους πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση με γεωγραφικές συντεταγμένες, υψόμετρο και αλληλεπιδράσεις των ανεξάρτητων μεταβλητών (MLR), τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ANNs) γενικευμένα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (Generalized ANNs,) Inverse Distance Weighting (IDW), Thin Plate Splines (Splines), γεωστατιστικές μεθόδους (Ordinary Kriging, OK και Universal Kriging, UK) και συνδυαστικές μεθοδολογίες που ενσωματώνουν δευτερογενείς πληροφορίες από γεωγραφικές

συντεταγμένες και υψόμετρο (Residual ordinary kriging, ResOK και Residual Inverse Distance Weighted, RIDW). Η αξιολόγηση των μεθόδων βασίστηκε στους παραγόμενους χωρικούς χάρτες μηνιαίας και υπερετήσιας βροχόπτωσης αλλά και σε στατιστικά κριτήρια με χρήση της τεχνικής cross-validation των σταθμών ανάπτυξης και ανεξάρτητης χωρικής πιστοποίησης των βροχομετρικών σταθμών (independent validation).

Οι παραπάνω μελέτες έδειξαν ότι οι χωρικοί χάρτες υπολογισμένοι με διαφορετικές μεθοδολογίες παρέχουν παρόμοια επιφανειακή βροχόπτωση αλλά διαφορετικές τιμές μέγιστης και ελάχιστης βροχόπτωσης και διαφορετικό συντελεστή μεταβλητότητας (coefficient of variation). Τα αποτελέσματα των παραπάνω μελετών έδειξαν ότι η ακρίβεια των μεθόδων χωρικής παρεμβολής σημειώνουν σημαντικές διαφορές και ότι οι προχωρημένες γεωστατιστικές τεχνικές έχουν καλύτερη χωρική απόδοση από τις απλές τεχνικές χωρικής παρεμβολής (π.χ., IDW και Thiessen Polygons) που χρησιμοποιούνται ευρέως σε υδρολογικές εφαρμογές και σε αδρομερή, ημικαταναμημένα και καταναμημένα υδρολογικά μοντέλα και συστήματα. Τα αποτελέσματα αυτά έδειξαν επίσης ότι η χωρική παρεμβολή της βροχόπτωσης βελτιώνεται με τη χρήση του υψόμετρου του γεωγραφικού ανάγλυφου ως δευτερογενής μεταβλητή ακόμα και όταν η μεταβλητή αυτή (υψόμετρο) παρουσιάζει μικρή συσχέτιση με τη βροχόπτωση [Diodato, 2005; Guan et al., 2005; Schuurmans and Bierkens, 2007; Li and Hear, 2008; Vasiliades and Loukas, 2009b; Zhang and Srinivasan, 2009; Moral, 2010].

3.2. Μέθοδοι χωροχρονικής προσομοίωσης

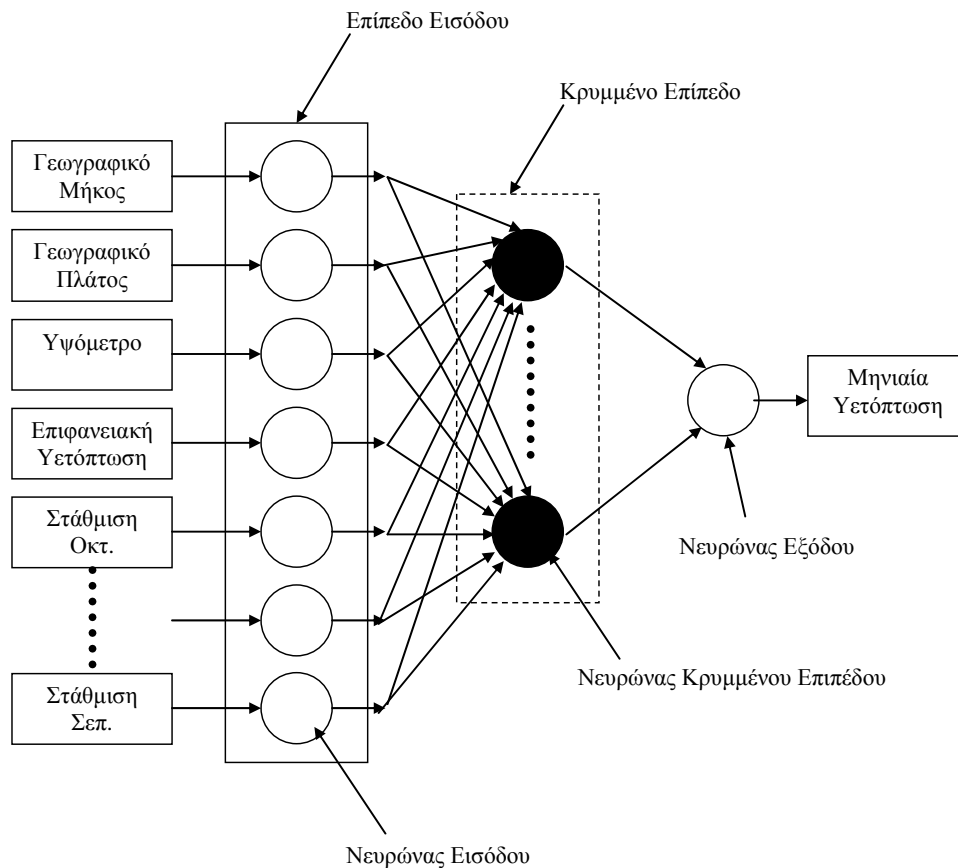
Η ύπαρξη χωροχρονικών δεδομένων (ή χωροχρονικές επιφάνειες) έχει σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό, στην εκτίμηση της επικινδυνότητας και στη λήψη αποφάσεων στην περιβαλλοντική διαχείριση. Για τη χωροχρονική προσομοίωση οι χωρικές μεθοδολογίες εφαρμόζονται χρονικά με αποτέλεσμα τη χωροχρονική παραγωγή επιφανειών και τη δημιουργία χωροχρονικών ψηφιακών βάσεων δεδομένων. Επειδή όμως το υπολογιστικό φορτίο που απαιτείται για τη δημιουργία ψηφιακών βάσεων δεδομένων (grid-based databases) είναι τεράστιο, λίγες είναι οι μελέτες που συγκρίνουν χωροχρονικά τις μεθόδους χωρικής παρεμβολής [Gyalistras, 2003; Zhang and Srinivasan, 2009]. Πρόσφατα, η χρήση των μεθόδων της μηχανικής μάθησης και ιδιαίτερα τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα άρχισαν να βρίσκουν εφαρμογή για την χωρική παρεμβολή των σημειακών δεδομένων [Kanevski and Maignan, 2004; Kanevski et al., 2009]. Αν και παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις γεωστατιστικές μεθοδολογίες η εφαρμογή των τεχνητών νευρωνικών δικτύων έχει μέχρι στιγμής εφαρμογή ως υποκατάστατο της γραμμικής παλινδρόμησης για την αναπαράσταση των γενικών τάσεων [Vasiliades and Loukas, 2009b]. Όταν όμως τα νευρωνικά δίκτυα συνδέονται με μία χωρική μεθοδολογία τότε παρουσιάζουν παρόμοια και λίγο καλύτερα αποτελέσματα από τις συνδυαστικές γεωστατιστικές μεθοδολογίες [Demjanov et al., 2001; Kanevski et al., 2004; Vasiliades and Loukas, 2009b].

Οι Βασιλειάδης και Λουκάς [2006] παρουσίασαν μία καινούργια μεθοδολογία για τη χωροχρονική παρεμβολή της μηνιαίας βροχόπτωσης στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού της Θεσσαλίας. Η μεθοδολογία βασίστηκε σε μία μέθοδο παρεμβολής που συνδυάζει την επίδραση του ανάγλυφου σε διαφορετικές χωρικές κλίμακες και επιτρέπει περιοχικές και εποχικές σχέσεις ανάγλυφου και κλίματος. Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα με δεδομένα εισόδου γεωγραφικές συντεταγμένες σταθμών ή/και φατνίων, υψόμετρα σταθμών ή/και δεδομένα από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους και επιφανειακή ή σημειακή μηνιαία υετόπτωση χρησιμοποιήθηκαν για την χωροχρονική παρεμβολή της βροχόπτωσης. Διάφορες παραλλαγές της μεθοδολογίας εφαρμόστηκαν ως προς την εκτίμηση της επιφανειακής υετόπτωσης καθώς και των δεδομένων εισόδου της σημειακής υετόπτωσης από έναν ή δύο αντιπροσωπευτικούς σταθμούς. Τα δεδομένα εισόδου ήταν τα ακόλουθα:

- (1) γεωγραφικό πλάτος σταθμών ή/και φατνίων,
- (2) γεωγραφικό μήκος σταθμών ή/και φατνίων,
- (3) υψόμετρο σταθμών ή/και φατνίων (από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους)
- (4) μηνιαία στάθμιση ως ονομαστική μεταβλητή που διακλαδίστηκε σε 12 μηνιαίες ψευδομεταβλητές που παίρνουν τιμές 0 και 1, και
- (5) μηνιαία βροχόπτωση υδρολογικής λεκάνης Πηνειού

Τα πρώτα τέσσερα δεδομένα εισόδου χρησιμοποιήθηκαν σε όλες τις παραλλαγές της μεθοδολογίας δίνοντας έτσι 15 μεταβλητές εισόδου. Όλες οι παραλλαγές των νευρωνικών δικτύων έγιναν στην εκτίμηση της μηνιαίας βροχόπτωσης. Αρχικά υπολογίστηκε η μηνιαία επιφανειακή βροχόπτωση της υδρολογικής λεκάνης με χρήση δύο μεθόδων: του απλού αριθμητικού μέσου (Μέθοδος 1^α) και των πολυγώνων Thiessen (Μέθοδος 1^β) για 48 σταθμούς ανάπτυξης (Σχήμα 3.1). Έτσι η πρώτη μέθοδος είχε συνολικά 16 μεταβλητές εισόδου. Η δεύτερη παραλλαγή (Μέθοδος 2) βασίστηκε στην επιλογή ενός αντιπροσωπευτικού βροχομετρικού σταθμού της υδρολογικής λεκάνης (π.χ. ενός σταθμού με καλή ποιότητα δεδομένων) ορίζοντας και πάλι 16 μεταβλητές εισόδου. Η τρίτη παραλλαγή (Μέθοδος 3) βασίστηκε στην επιλογή δύο αντιπροσωπευτικών βροχομετρικών σταθμών (17 μεταβλητές εισόδου) και η τέταρτη βασίστηκε στην παραγοντική ανάλυση των 48 βροχομετρικών σταθμών ανάπτυξης. Εφαρμογή της παραγοντικής ανάλυσης έδειξε τέσσερις περιοχές που εξηγούν το 80% της μεταβλητότητας της μηνιαίας υετόπτωσης. Δύο πιθανές μορφοποιήσεις εξετάστηκαν σε αυτήν την παραλλαγή. Η πρώτη μορφοποίηση περιλαμβάνει τις τιμές των τεσσάρων παραγόντων (factor scores) (Μέθοδος 4^α) και η δεύτερη χρησιμοποιεί ένα βροχομετρικό σταθμό με τη μεγαλύτερη συσχέτιση για κάθε περιοχή (Μέθοδος 4^β). Η τέταρτη παραλλαγή έδωσε συνολικά 19 μεταβλητές εισόδου. Μία γενική μορφή των ΤΝΔ δίνεται στο Σχήμα 3.1.

Για την εκπαίδευση των ΤΝΔ χρησιμοποιήθηκε το 65% του συνόλου δεδομένων του προβλήματος και αποτελούνται από δεδομένα για τους 48 σταθμούς ανάπτυξης για την υδρολογική περίοδο Οκτ. 1960 – Σεπ. 1997 και για την αξιολόγηση το υπόλοιπο 35%, που αποτελούνται από μηνιαία δεδομένα υετόπτωσης για τους 48 σταθμούς ανάπτυξης για την υδρολογική περίοδο Οκτ. 1997 – Σεπ. 2002 (χρονική πιστοποίηση) και για 18 σταθμούς πιστοποίησης της περιόδου Οκτ. 1960 – Σεπ. 2002 (χωροχρονική πιστοποίηση). Η αξιολόγηση της μεθοδολογίας έγινε με τη χρήση στατιστικών κριτηρίων. Τα αποτελέσματα των παραλλαγών της μεθοδολογίας έδειξαν ότι υποεκτιμάται η πραγματική μηνιαία υετόπτωση αλλά προσομοιώνεται ικανοποιητικά η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση της μέσης μηνιαίας υετόπτωσης. Στο σύνολο των δεδομένων πιστοποίησης οι διαφορές στα υπόλοιπα υετόπτωσης είναι ασήμαντες και μπορούν να αγνοηθούν. Αντίθετα, οι διαφορές στα υπόλοιπα μεταξύ των σταθμών είναι σημαντικές για τους περισσότερους σταθμούς και χρειάζονται επιπλέον επεξεργασία λαμβάνοντας υπόψη τις τοπικές κλιματολογικές συνθήκες. Πλεονέκτημα της μεθοδολογίας είναι ότι η μεθοδολογία είναι άμεσα εφαρμόσιμη μετά τη διαδικασία της βαθμονόμησης των ΤΝΔ και μπορεί να εφαρμοστεί σε επιχειρησιακές εφαρμογές γιατί το μοντέλο μπορεί να αυτοπροσαρμόζεται με την προσθήκη νέων δεδομένων υετόπτωσης (real time control). Όμως μεγάλη προσοχή πρέπει να δοθεί στη δημιουργία καταμετρημένης υετόπτωσης π.χ. σε ένα Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών γιατί τα νευρωνικά δίκτυα δεν μπορούν να υπολογίσουν τιμές μεγαλύτερες από το φάσμα των δεδομένων τους. Έτσι η εφαρμογή του μοντέλου για δημιουργία χωροχρονικής υετόπτωσης σε υψόμετρα μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα της βάσης δεδομένων πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή. Έτσι πρότειναν την περαιτέρω επεξεργασία των υπολοίπων με μία επιπλέον μεθοδολογία χωρικής παρεμβολής για καλύτερη εφαρμογή της μεθοδολογίας [Βασιλειάδης και Λουκάς, 2006].



Σχήμα 3.1. Αρχιτεκτονική της μεθοδολογίας [Βασιλειάδης και Λουκάς, 2006]

Οι γεωστατιστικές μέθοδοι, που σχετίζονται με τις μη στάσιμες ιδιότητες των περιβαλλοντικών δεδομένων και υπολογίζουν και τη χωρική αυτοσυσχέτιση, αρχικά εφαρμόστηκαν αποκλειστικά για χωρική πρόγνωση. Αργότερα, μία πιο γενικευμένη χωροχρονική γεωστατιστική προσέγγιση δημιουργήθηκε προσθέτοντας το χρόνο ως πρόσθετη διάσταση του χώρου [Kyriakidis and Journel, 1999]. Οι πιο προχωρημένες χωροχρονικές γεωστατιστικές προσεγγίσεις που λαμβάνουν υπόψη σχεσιακές εξαρτήσεις του σύνθετου χωροχρονικού συστήματος [Christakos, 1992; Kyriakidis and Journel 1999; Christakos 2000], άρχισαν να βρίσκουν εφαρμογή στις περιβαλλοντικές και υδρολογικές επιστήμες για χωροχρονική προσομοίωση [Vyas and Christakos 1997; Kyriakidis and Journel 2001a,b]. Η προσέγγιση της γεωστατιστικής με τη μέθοδο της μέγιστης εντροπίας κατά Bayes (Bayesian Maximum Entropy, BME) μπορεί να ενσωματώσει μεγαλύτερες τάξεις των στατιστικών ροπών από τις Kriging μεθόδους που προϋποθέτουν Gaussian κατανομές (και ολοκληρώνονται μέχρι τη δεύτερη τάξη των στατιστικών ροπών). Έτσι, η μέθοδος BME άρχισε να εφαρμόζεται σε μελέτες κλιματολογικές [Lee et al., 2008], υδρολογικές και διαχείρισης υδατικών πόρων [Serre et al., 2003a; Lee and Wentz, 2008; Lee et al., 2010], εκτίμησης επικινδυνότητας [Serre et al., 2003b; Choi et al., 2007].

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τη χωροχρονική προσομοίωση παρουσιάζει η μέθοδος βέλτιστης χωροχρονικής παρεμβολής kriging (spatiotemporal kriging method) [Kyriakidis and Journel, 1999]. Η μέθοδος δείχνει πως οι σημειακές μετρήσεις μπορούν να εφαρμοστούν στον χώρο και στο χρόνο. Η χωρική συσχέτιση της χρονοσειράς υπολογίζεται ώστε να εκτιμήσει την χωροχρονική συσχέτιση του μελετούμενου δικτύου (π.χ. βροχομετρικού). Χρονικά μοντέλα τάσης προσδιορίζονται παραμετρικά με ανάλυση χρονοσειρών σε διαφορετικούς σταθμούς. Τα χρονικά μοντέλα τάσης αποτελούνται από μερικές χρονικά εξαρτούμενες συναρτήσεις (partial time-dependent functions) που αποδίδουν την ετήσια ή εποχική περιοδική μεταβλητότητα. Τα μοντέλα παρουσιάζουν μονιμότητα (stationarity) στο

χρόνο με περιοδικές μεταβολές στο χώρο. Οι παράμετροι των μοντέλων τάσεων ομαδοποιούνται περιοχικά και οι αυτοσυσχετίσεις αξιολογούνται. Αφαιρώντας την τάση από τις πραγματικές τιμές, ένα χωροχρονικό μοντέλο χρονοσειράς υπολοίπων αναπτύσσεται για την προσομοίωση των τιμών των υπολοίπων. Μετά τον προσδιορισμό των μοντέλων συνδιασποράς σε όλους τους σταθμούς (σημειακές μετρήσεις), χωρικά μοντέλα αναπτύσσονται για την χωρική παρεμβολή των δεδομένων σε γειτονικούς σταθμούς. Έτσι χωροχρονικά μοτίβα μπορούν να παρατηρηθούν σε μία περιοχή. Η προσομοίωση των χρονοσειρών υπολοίπων περιορίζεται από την συνθετική αναπαραγωγή απεικονίσεων μίας μονοδιάστατης (one-dimensional) διαδικασίας από ένα χωροχρονικό μοντέλο συνδιακύμανσης για κάθε μία τοποθεσία [Kyriakidis and Journel, 1999]. Η μεθοδολογία βέλτιστης χωροχρονικής παρεμβολής kriging εφαρμόστηκε επίσης για την χωροχρονική εκτίμηση της μηνιαίας βροχόπτωσης στην υδρολογική λεκάνη Zayandeh-rud του Ιράν για την υδρολογική περίοδο 1968-2001 με ελπιδοφόρα αποτελέσματα [Karagouuz et al., 2007]. Η ακρίβεια της ανωτέρω μεθόδου είναι δύσκολο να αξιολογηθεί γιατί δεν υπάρχουν μέχρι στιγμής συγκριτικές μελέτες με άλλες χωρικές μεθοδολογίες, δεν έχει δοκιμαστεί σε πολλές περιοχές και επιπλέον έχει μεγάλο υπολογιστικό φορτίο που καθιστά τη μεθοδολογία δύσκολη για επιχειρησιακές εφαρμογές.

3.3. Μέθοδοι χωροχρονικής προσομοίωσης και παρεμβολής δεικτών ξηρασίας

Ένας άλλος παράγοντας που μπορεί να επηρεάσει την απόδοση των μεθόδων χωρικής παρεμβολής είναι η σειρά των βημάτων που ακολουθούνται για την εξεταζόμενη μεταβλητή. Σε περίπτωση που η εξεταζόμενη χωρική μεταβλητή (π.χ. δυνητική εξατμισοδιαπνοή, πραγματική εξατμισοδιαπνοή, δείκτες ξηρασίας που βασίζονται σε βροχόπτωση και θερμοκρασία) υπολογίζεται άμεσα από πρωτογενείς χωρικές μεταβλητές (π.χ. βροχόπτωση, θερμοκρασία, σχετική υγρασία, ημέρες ηλιοφάνειας, ανεμολογικά στοιχεία), τότε το τελικό σφάλμα της χωρικής παρεμβολής είναι το συσσωρευμένο σφάλμα των επιμέρους σφαλμάτων από σφάλματα δειγματοληψίας μετρήσεων (measurement error), διαδικασίας υπολογισμού της μεταβλητής (equation ή model error) και το σφάλμα της χωρικής μεθόδου παρεμβολής (interpolation error) [Ashraf et al., 1997]. Για τη χωρική παρεμβολή του δείκτη ξηρασίας SPI σε μια υδρολογική λεκάνη, δύο διαδικασίες μπορεί να εφαρμοστούν:

- Σημειακή εκτίμηση του SPI πρώτα και μετά χωρική παρεμβολή (calculate first - interpolate later, CI) ή
- Χωρική παρεμβολή της βροχόπτωσης πρώτα και μετά χωρική εκτίμηση του δείκτη SPI (interpolate first - calculate later, IC).

Το σφάλμα της τελικής χωρικής εκτίμησης του SPI, μπορεί να είναι διαφορετικό αν ο δείκτης ξηρασίας υπολογιστεί με σημειακές μετρήσεις μηνιαίας βροχόπτωσης και οι παραγόμενες τιμές κατανεμηθούν στη λεκάνη απορροής με μία χωρική μέθοδο, αντί για την χωρική παρεμβολή της μηνιαίας βροχόπτωσης στην υδρολογική λεκάνη και εκτίμηση του δείκτη ξηρασίας στο φαντίο (grid) της λεκάνης. Οι Bechini et al. [2000] σημείωσαν ότι για μη γραμμικά μοντέλα εξεταζόμενων μεταβλητών η διαδικασία παρεμβολή πρώτα - υπολογισμό μετά πρέπει να ακολουθείται με μεγάλη προσοχή λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας της χωρικής κατανομής των δεδομένων εισόδου. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και στα κατανεμημένα υδρολογικά μοντέλα για την προσομοίωση των συνιστωσών του υδρολογικού κύκλου και για ανάλυση ευαισθησίας και αβεβαιότητας δεδομένων εισόδου και εξόδου. Πρέπει όμως να σημειωθεί ότι οι συνιστώσες του υδρολογικού κύκλου δεν είναι άμεσα μετρήσιμες και έτσι ο μόνος τρόπος για τη χωρική απεικόνιση των υδρολογικών συνιστωσών είναι η διαδικασία

παρεμβολή πρώτα - υπολογισμό μετά. Σε μία πρόσφατη μελέτη, οι δύο διαδικασίες συγκρίθηκαν για τη χωρική παρεμβολή της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής σε ολόκληρο τον Ελλαδικό χώρο [Mardikis et al., 2005]. Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή υπολογίστηκε κατά FAO Penman–Monteith [Allen et al., 1998] με τιμές μέσης, ελάχιστης και μέγιστης θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, ταχύτητας ανέμου στα 2 m, και ηλιακής ακτινοβολίας. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης των δύο διαδικασιών έδειξε ότι η χωρική παρεμβολή της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής επηρεάζεται ελάχιστα από τη σειρά των βημάτων υπολογισμού της χωρικής παρεμβολής αφού τα αποτελέσματα είναι ίδια για όλους τους μήνες [Mardikis et al., 2005]. Στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξαν και οι Ashraf et al. [1997] για τη χωρική παρεμβολή της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής σε 17 μετεωρολογικούς σταθμούς της Nebraska, Kansas, και του Colorado των Η.Π.Α. Τα παραπάνω αποτελέσματα είναι αντίθετα με τις απόψεις των Phillips and Marks [1996] και Bechini et al. [2000] που αναφέρουν ότι το σφάλμα της διαδικασίας ‘πρώτα χωρική παρεμβολή και μετά υπολογισμό’ αναμένεται να είναι μεγαλύτερο λόγω της συσσώρευσης του σφάλματος της χωρικής κατανομής των πρωτογενών δεδομένων. Ένα πλεονέκτημα της διαδικασίας ‘υπολογισμός πρώτα και χωρική παρεμβολή μετά’ είναι ότι η παρεμβολή πραγματοποιείται μόνο μία φορά στις εξεταζόμενες μεταβλητές (π.χ. SPI).

Οι μέθοδοι χωρικής παρεμβολής έχουν εφαρμοστεί και στην χωρική και χρονική προσομοίωση των διαφόρων τύπων ξηρασίας με χρήση μετεωρολογικών δεικτών;. Οι διαδικασίες (βήματα) υπολογισμού εξαρτώνται από τον σκοπό της εφαρμογής. Όταν οι μετεωρολογικοί δείκτες ξηρασίας βασίζονται μόνο στη βροχόπτωση όπως είναι ο SPI, τα Deciles, Percent of Normal και οι δύο διαδικασίες ακολουθούνται. Όταν οι δείκτες ξηρασίας βασίζονται σε περισσότερα δεδομένα εισόδου (π.χ. θερμοκρασία, βροχόπτωση, δυνητική εξατμισοδιαπνοή) όπως είναι ο PDSI και ο SWSI η διαδικασία που ακολουθείται είναι ‘υπολογισμός πρώτα - χωρική παρεμβολή μετά’ κυρίως λόγω υπολογιστικής ευκολίας. Πολλά παραδείγματα χωροχρονικής προσομοίωσης ξηρασίας με χρήση χωρικών μεθόδων παρεμβολής βροχόπτωσης και υπολογισμό μετεωρολογικών δεικτών ξηρασίας βρίσκονται στη διεθνή βιβλιογραφία [π.χ. Loukas and Vasiliades, 2004; Tsakiris and Vangelis, 2004; Mishra and Desai, 2005; Magyari-Sáska, 2007; Smakhtin and Hughes, 2007]. Επίσης πολλές είναι οι εφαρμογές χωρικών παρεμβολών δεικτών ξηρασίας [Henriques and Santos, 1999; Kim et al., 2002; Rossi and Cancelliere, 2003; Rouault and Richard, 2003; Sirdas and Sen, 2003; Vicente-Serrano et al., 2004; Sönmez et al., 2005]. Αυτό που πρέπει να επισημανθεί είναι ότι συνήθως επιλέγεται μία μέθοδος χωρικής παρεμβολής χωρίς πρώτα να έχει εκτιμηθεί το σφάλμα της τεχνικής σε σχέση με άλλες χωρικές μεθοδολογίες. Μόνο οι Akhtari et al., [2008] σύγκριναν τέσσερις (4) χωρικές μεθοδολογίες για τον δείκτη ξηρασίας SPI-1month και Effective Drought Index, EDI σε 43 μετεωρολογικούς σταθμούς στην επαρχία Τεχεράνης του Ιράν για ένα διαπιστωμένο γεγονός ξηρασίας της περιόδου 1998-2001. Οι μεθοδολογίες που αξιολογήθηκαν ήταν Thiessen Polygons, IDW, Ordinary Kriging, και Thin plate smoothing splines. Η αξιολόγηση των μεθόδων βασίστηκε σε στατιστικά κριτήρια με χρήση της τεχνικής cross-validation των μετεωρολογικών σταθμών και στους παραγόμενους χάρτες κλάσεων ξηρασίας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μέθοδος OK είναι η πιο ακριβής χωρική μέθοδος ακολουθούμενη από την IDW. Η τελευταία μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιχειρησιακά στην περιοχή μελέτης λόγω της απλότητας και της εύκολης εφαρμογής της (περιλαμβάνεται σε πολλά λογισμικά πακέτα Γ.Σ.Π.) [Akhtari et al., 2008].

Κατά την διάρκεια των τελευταίων ετών, η χρονική και χωρική κατανομή των ξηρασιών και των βροχοπτώσεων έχει εξεταστεί από πολλούς ερευνητές με τη χρήση των στατιστικών μεθόδων Ανάλυση σε Κύριες Συνιστώσες (Principal Component Analysis, PCA), Παραγοντική Ανάλυση (Factors Score Analysis) και τεχνικές ομαδοποίησης δεδομένων (Cluster Analysis, Self Organizing Maps). Ο κύριος σκοπός των τεχνικών αυτών είναι η ελάττωση της διάστασης μιας ομάδας δεδομένων, η οποία μπορεί να περιέχει ένα μεγάλο πλήθος μεταβλητών. Έτσι οι τεχνικές χρησιμοποιούνται με σκοπό την ταξινόμηση των σταθμών σε ομογενείς ομάδες, καθώς επίσης και για την ελάττωση της διαστατικότητας και για τη διερεύνηση της σχέσης μεταξύ των παραμέτρων, ώστε να καθίσταται δυνατός ο εντοπισμός των διαφορετικών περιοχικών σχέσεων που παρατηρούνται στην περιοχή

μελέτης. Οι Corte-Real et al., [1998] εφάρμοσαν την Ανάλυση σε Κύριες Συνιστώσες (PCA) για την χωρική κατανομή της βροχόπτωσης στη Πορτογαλία συσχετίζοντας τις περιοχικές κλιματικές αλλαγές με τη μεγάλη μήκους κυκλοφορία στην ατμόσφαιρα. Την ίδια μέθοδο εφάρμοσαν οι Biau et al. [1999] για να συνδυάσουν τις βροχοπτώσεις της Ιβηρικής χερσονήσου με την κυκλοφορία της ατμόσφαιρας στην επιφάνεια του βόρειου Ατλαντικού Ωκεανού. Οι Brunetti et al. [2002] εντόπισαν εξαιρετικά ξηρές περιόδους και αναλογίες ξηρών ημερών με τη χρήση της PCA. Ο Singh [1999] εφάρμοσε την PCA για τον εντοπισμό υγρών και ξηρών ετών στην Ινδία, ενώ οι Richard et al. [2001] μελέτησαν, με την ίδια μεθοδολογία, την ξηρασία στην Νότια Αφρική. Οι Loukas et al. [2002a] εφάρμοσαν την παραγοντική ανάλυση στον δείκτη εδαφικής υγρασίας του Palmer (Z-index anomaly) για υδροκλιματική ανάλυση ξηρασίας, ενώ η PCA εφαρμόστηκε για την χωρική κατανομή του δείκτη ξηρασίας SPI στον Ελλαδικό χώρο [Αναγνωστοπούλου, 2003]. Τεχνικές συστοίχισης και ομαδοποίησης (Cluster και παραγοντική ανάλυση) για ανάλυση της μηνιαίας βροχόπτωσης και του δείκτη ξηρασίας SPI εφαρμόστηκαν και στην περιοχή της Θεσσαλίας [Tzabiras et al., 2010; Ζαραγκότας κ.α., 2007] αλλά και στον ελλαδικό χώρο για ανάλυση ξηρασίας [Kalamaras et al., 2010].

3.4. Γεωστατιστική

Κρίνεται σκόπιμο προτού γίνει η αναλυτική περιγραφή των μεθόδων χωρικής παρεμβολής να αναλυθούν οι θεμελιώδεις έννοιες της γεωστατιστικής. Η Γεωστατιστική είναι η επιστήμη που ασχολείται με τη μελέτη φαινομένων που μεταβάλλονται στο χώρο ή/και στο χρόνο. Για το σκοπό αυτό έχει αναπτυχθεί μια συλλογή από προσδιοριστικά και στατιστικά εργαλεία για την κατανόηση και μοντελοποίηση της χωρικής μεταβλητότητας. Πρόσφατα βιβλία με αναλυτική περιγραφή των γεωστατιστικών μεθόδων είναι διαθέσιμα στο εμπόριο [π.χ., Isaaks and Srivastava, 1989; Cressie, 1991; Goonaerts, 1997; Armstrong, 1998; Chiles and Delfiner, 1999; Wackernagel, 2003; Diggle and Ribeiro, 2007; Webster and Oliver, 2007]. Την τεχνογνωσία της δανείστηκε από τη βιομηχανία εξόρυξης μεταλλευμάτων και αναζήτησης πετρελαίου, ξεκινώντας με την πρωτοπόρα εργασία του Danie Krige στη δεκαετία του '50 και της μαθηματικής επισημοποίησης από τον George Matheron στις αρχές της δεκαετίας του 60. Σε αυτές τις βιομηχανίες βρήκε αποδοχή μέσω επιτυχών εφαρμογών σε περιπτώσεις όπου οι αποφάσεις είχαν μεγάλο οικονομικό κόστος και οι λειτουργικές εφαρμογές βασιζόνταν σε αποτελέσματα από αραιά χωρικά δεδομένα. Οι εφαρμογές των γεωστατιστικών μεθόδων έχουν από τότε επεκταθεί σε πολλά πεδία που έχουν σχέση με τις επιστήμες της γης.

Το πεδίο της γεωστατιστικής είναι γενικά αφιερωμένο στην ανάλυση και στην εξήγηση της αβεβαιότητας που προέρχεται από μικρό αριθμό δειγμάτων. Οι γεωστατιστικές προσεγγίσεις διαφέρουν από τις πιο κλασικές μεθόδους της στατιστικής ανάλυσης δεδομένων στο ότι δεν είναι εντελώς δεμένες με ένα μοντέλο πληθυσμιακής κατανομής που υποθέτει ότι τα δείγματα ακολουθούν κανονική κατανομή και είναι μη συσχετιζόμενα. Τα περισσότερα δεδομένα των επιστημών της γης, στην πραγματικότητα, δεν ικανοποιούν αυτές τις υποθέσεις καθώς τείνουν συχνά να έχουν μη κανονικές κατανομές και χωρικά συσχετιζόμενα δείγματα. Εφόσον οι κλασικές στατιστικές προσεγγίσεις αφορούν μόνο την εξέταση της στατιστικής κατανομής του δείγματος, οι γεωστατιστικές περιλαμβάνουν τις ερμηνείες τόσο της στατιστικής κατανομής, όσο και της χωρικής συσχέτισης ανάμεσα στα δείγματα. Εξαιτίας αυτών των διαφορών, τα γεωτεχνικά και περιβαλλοντικά προβλήματα είναι πιο αποτελεσματικά χρησιμοποιώντας τις γεωστατιστικές μεθόδους όταν η ανάλυση της χωρικής κατανομής των δεδομένων επηρεάζει τη λήψη αποφάσεων. Η αποτελεσματικότητα της γεωστατιστικής αυξάνει όταν στα προβλήματα εισέρχεται και ο όρος της επικινδυνότητας.

Η χρήση της σε γεωτεχνικά και περιβαλλοντικά προβλήματα έχει αποδείξει ότι η γεωστατιστική είναι ένα δυνατό εργαλείο, που επιτρέπει τον συντονισμό των εργασιών, από την απόκτηση των δεδομένων του πεδίου μέχρι την ανάλυση του σχεδιασμού. Το μεγαλύτερο επίτευγμα της γεωστατιστικής είναι το ότι μπορεί να προβλέψει τη χωρική κατανομή της υπό μελέτη μεταβλητής. Αυτή η πρόβλεψη συνήθως γίνεται με τη μορφή χαρτών που δείχνουν το μέγεθος και την κατανομή της μεταβλητής. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι της γεωστατιστικής πρόβλεψης : η εκτίμηση (estimation) και η προσομοίωση (simulation).

Στη διαδικασία της εκτίμησης παράγεται μια, μοναδική και στατιστικά αρτιότερη εκτίμηση της χωρικής κατανομής της μεταβλητής, βασιζόμενη στα δεδομένα πεδίου, αλλά και στο μοντέλο, το οποίο αναπαριστά με το βέλτιστο δυνατό τρόπο την χωρική συσχέτιση των δεδομένων. Αυτή η μοναδική εκτίμηση παράγεται από την ευρέως γνωστή γεωστατιστική τεχνική με την ονομασία Kriging. Στην προσομοίωση, παράγονται πολλές, ίσης πιθανότητας απεικονίσεις της χωρικής ύπαρξης της μεταβλητής, χρησιμοποιώντας το ίδιο μοντέλο της χωρικής συσχέτισης όπως αυτό προέκυψε από τη μέθοδο Kriging. Οι απεικονίσεις έχουν ρεαλιστική υπόσταση και διατηρούν τα στατιστικά χαρακτηριστικά των δεδομένων. Οι διαφορές ανάμεσα στις πολλαπλές απεικονίσεις παρέχουν ένα μέτρο της χωρικής αβεβαιότητας, που επιτρέπει σε κάποιον να λύσει προβλήματα επικινδυνότητας, κάτι το οποίο δεν επιτυγχάνεται με την εκτίμηση [Kitanides, 1997; Journel and Kyriakidis, 2004].

3.4.1. Γεωστατιστική προσέγγιση

Κατά τη γεωστατιστική προσέγγιση κάθε παράμετρος z του προβλήματος (π.χ. βροχοπτώση, θερμοκρασία, δείκτης ξηρασίας SPI) αντιμετωπίζεται ως τυχαία μεταβλητή (Random Value ή RV) Z , η κατανομή πιθανότητας της οποίας παριστά την αβεβαιότητα στη γνώση μας για τη z . Ο λόγος για τον οποίο η κάθε παράμετρος αντιμετωπίζεται ως τυχαία μεταβλητή είναι να δοθεί μια μαθηματική παράσταση της μεταβολής των ιδιοτήτων της στο χώρο. Μια τυχαία μεταβλητή (RV), Z , αντιπροσωπεύει ένα σύνολο πιθανών ενδεχομένων ή καταστάσεων που δηλώνονται με το σύμβολο z_i , $i=1, \dots, N$, όπου: N αριθμός του συνόλου των καταστάσεων. Κάθε κατάσταση z_i χαρακτηρίζεται από μια πιθανότητα πραγματοποίησης p_i , $i=1, \dots, N$.

Η τυχαία μεταβλητή Z , και πιο συγκεκριμένα η κατανομή της πιθανότητάς της είναι χωρικά εξαρτημένη. Συνεπώς και η παραπάνω δηλώνεται ως $Z(u)$ με το u να είναι το διάλυσμα των χωρικών συντεταγμένων. Η $Z(u)$ εξαρτάται επίσης από το πλήθος των δεδομένων με την έννοια ότι η κατανομή της πιθανότητάς της αλλάζει όσα περισσότερα δεδομένα εισάγονται για την παράμετρο $z(u)$. Αν ο συνολικός αριθμός των καταστάσεων που περιέχει ο πληθυσμός είναι πεπερασμένος, η τυχαία μεταβλητή είναι διακριτή. Χαρακτηριστικά παραδείγματα παραμέτρων που αντιμετωπίζονται ως τυχαίες διακριτές μεταβλητές αποτελούν οι γεωλογικές ιδιότητες ενός πεδίου, όπως ο τύπος του πετρώματος, και οι χρήσεις γης. Αν ο συνολικός αριθμός είναι άπειρος, η τυχαία μεταβλητή είναι συνεχής. Χαρακτηριστικά παραδείγματα παραμέτρων που αντιμετωπίζονται ως τυχαίες συνεχείς μεταβλητές αποτελούν η βροχοπτώση, η θερμοκρασία, η υδραυλική αγωγιμότητα, η μεταφορικότητα, το πορώδες, η συγκέντρωση ενός ρύπου κ.λπ. Εφόσον στην παρούσα διατριβή η παράμετρος αυτή είναι οι δείκτες ξηρασίας SPI, γίνεται κατανοητό πως η τυχαία μεταβλητή $Z(u)$ θα είναι στο εξής **συνεχής** κάτι που θα θεωρείται δεδομένο στις παρακάτω ενότητες.

Επομένως, και η αθροιστική συνάρτηση κατανομής (cumulative distribution function ή cdf) $F(u; z)$ της μεταβλητής $Z(u)$ θα αντιπροσωπεύει τη συνολική πιθανότητα η μεταβλητή να παίρνει όλες τις τιμές που είναι μικρότερες ή ίσες από την τιμή z :

$$F(u; z) = \text{Prob}\{Z(u) \leq z\} \quad (3.1)$$

Η **αθροιστική συνάρτηση κατανομής ή cdf** χαρακτηρίζει πλήρως την τυχαία μεταβλητή $Z(u)$ και μπορεί να δώσει διαστήματα πιθανότητας :

$$\text{Prob}\{Z \in [a,b]\} = F(b) - F(a) \quad (3.2)$$

Ανάλογα με τα διαστήματα πιθανότητας, η **πιθανότητα υπέρβασης** μιας οποιασδήποτε τιμής a ορίζεται ως εξής :

$$\text{Prob}\{Z > a\} = \text{Prob}\{\infty > Z > a\} = F(\infty) - F(a) = 1 - F(a) \quad (3.3)$$

Η πιθανότητα υπέρβασης τιμής είναι στατιστικό μέγεθος με πολλές και χρήσιμες εφαρμογές σε περιβαλλοντικά και υδρολογικά προβλήματα. Έτσι λοιπόν το p -ποσοστημόριο για μια κατανομή $F(z)$ είναι η τιμή z_p τέτοια ώστε $F(z_p) = p \in [0,1]$, δηλαδή η τιμή z_p που έχει πιθανότητα p να μην την ξεπερνά η τυχαία μεταβλητή $Z(u)$. Καθορίζοντας την αντίστροφη $F^{-1}(p)$ της cdf προκύπτει :

$$p\text{-ποσοστημόριο } z_p = F^{-1}(p), \text{ με } p \in [0,1] \quad (3.4)$$

και εκφράζοντας το σε ποσοστό επί της εκατό προκύπτει :

$$p\text{-εκατοστημόριο } z_p = F^{-1}(100p), \text{ με } p \in [0,100] \quad (3.5)$$

με τα πιο γνωστά να είναι ο διάμεσος $M = F^{-1}(0.5)$, και οι άνω και κάτω στάθμες: $z_{0.25} = F^{-1}(0.25)$, $z_{0.75} = F^{-1}(0.75)$.

Η **αναμενόμενη ή μέση τιμή** (mean) για μια συνεχής μεταβλητή $Z(u)$ είναι :

$$E\{Z\} = m = \int_{-\infty}^{+\infty} z dF(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} z f(z) dz \quad (3.6)$$

όπου $F(z)$ είναι η cdf της Z και $f(z)$ είναι η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (probability density function ή pdf) της Z , η οποία ισούται με την παράγωγο της $F(z)$: $f(z) = F'(z)$.

Η **διασπορά** (variance) της Z ορίζεται ως η αναμενόμενη τετραγωνική απόκλιση της Z από τη μέση τιμή m :

$$\text{Var}\{Z\} = \sigma^2 = E\{|Z-m|^2\} = \int_{-\infty}^{+\infty} (z-m)^2 dF(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} (z-m)^2 f(z) dz \quad (3.7)$$

Η **τυπική απόκλιση** (standard deviation) σ , είναι ίση με τη τετραγωνική ρίζα της διασποράς.

Σημαντικό ρόλο στη γεωστατιστική προσέγγιση της τυχαίας μεταβλητής Z παίζει η κατανομή της πιθανότητάς της. Οι βασικές κατανομές πιθανότητας είναι: η διωνυμική, η Poisson, η πολυωνυμική, η ομοιόμορφη, η Βήτα, η κανονική, η λογο-κανονική, η X^2 , η t (Student), η εκθετική, η Weibull. Εδώ θα αναπτυχθούν μόνο η κανονική και λογαριθμοκανονική κατανομή διότι αυτές χρησιμοποιούνται για τη γεωστατιστική προσέγγιση της μηνιαίας βροχόπτωσης. Η **κανονική** κατανομή είναι επίσης γνωστή και σαν κατανομή **Gauss**. Χαρακτηρίζεται πλήρως από τη μέση τιμή m και την τυπική απόκλιση σ . Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας ή pdf ισούται με :

$$g(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-m}{\sigma}\right)^2\right] \quad (3.8)$$

Στην περίπτωση όπου $m = 0$ και $\sigma^2 = 1$ καλείται **τυπική κανονική** κατανομή και η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας ή pdf ισούται με :

$$g_0(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{z^2}{2}\right] \quad (3.9)$$

Η αθροιστική κατανομή πιθανότητας δεν επιδέχεται κλειστή αναλυτική μορφή:

$$G(z) = \int_{-\infty}^z g(u)du = G_0\left(\frac{z-m}{\sigma}\right) \quad (3.10)$$

όπου $G_0(z)$ είναι η cdf της τυπικής κατανομής ίση με:

$$G_0(z) = \int_{-\infty}^z g_0(u)du \quad (3.11)$$

Η κανονική κατανομή είναι συμμετρική ως προς τη μέση τιμή m , έτσι : $m = M$ και $g(z+m) = g(z-m)$, οπότε $G(m-z) = 1-G(m+z)$ για όλα τα z . Επίσης $z_{1-p} = 2m-z_p$, για $p \in [0,0.5]$.

Η επιτυχία της κατανομής Gauss οφείλεται στο γεγονός ότι στην πράξη οι παρατηρούμενες μεταβολές αντιστοιχούν σε ομογενοποιημένες μεταβλητές που προκύπτουν από τον συνδυασμό διακυμάνσεων μικρότερης κλίμακας. Αυτές οι ομογενοποιημένες μεταβλητές αντιπροσωπεύουν αθροίσματα ή μέσους όρους στοιχειωδών τυχαίων μεταβλητών. Για παράδειγμα, η θερμοκρασία σε μια περιοχή της Ελλάδας (π.χ Βόλος) αντιπροσωπεύει τη μέση τιμή ως προς τις τοπικές διακυμάνσεις. Επομένως μπορούμε να αναζητήσουμε τα αίτια για την πανταχού παρουσία της κανονικής κατανομής στη συμπεριφορά της κανονικής κατανομής για ομογενοποιημένες μεταβλητές. Το μαθηματικό πλαίσιο που προσδιορίζει την κατανομή πιθανότητας για τις ομογενοποιημένες μεταβλητές είναι το Κεντρικό Οριακό Θεώρημα (Central Limit Theorem). Σύμφωνα με το **Κεντρικό Οριακό Θεώρημα** αν υπάρχουν n μεταβλητές Z_i οι οποίες είναι ανεξάρτητες και ισόνομες (δηλαδή έχουν την ίδια κατανομή) με μέση τιμή m και

πεπερασμένη τυπική απόκλιση σ , ορίζουν άθροισμα $Z_{tot} = \sum_{i=1}^n Z_i$ και μέσο όρο $\bar{Z} = \frac{1}{\sqrt{n}} \sum_{i=1}^n Z_i$. Οι Z_{tot} , \bar{Z}

είναι επίσης τυχαίες μεταβλητές που χαρακτηρίζονται αντίστοιχα από κατανομές πιθανότητας. Για μεγάλες τιμές του n , ισχύουν οι επόμενες ιδιότητες:

- Η κατανομή της Z_{tot} συγκλίνει στην κανονική κατανομή με μέση τιμή nm και τυπική απόκλιση $\sigma\sqrt{n}$.
- Η κατανομή της \bar{Z} συγκλίνει επίσης στην κανονική κατανομή με μέση τιμή m και τυπική απόκλιση σ/\sqrt{n} .

Η κανονική κατανομή είναι πολύ εύχρηστη γιατί χαρακτηρίζεται πλήρως από μόνο δύο παραμέτρους τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση. Επίσης είναι συμμετρική και επιτρέπει την επεξεργασία και αρνητικών τιμών. Στην πράξη όμως πολλές πειραματικές κατανομές είναι ασύμμετρες με μέση τιμή διαφορετική από το διάμεσο. Πολλές μεταλλαγές της κανονικής κατανομής χρησιμοποιήθηκαν για να αντιμετωπίσουν το παραπάνω πρόβλημα. Η πιο ευρεία διαδεδομένη είναι η λογαριθμική κατανομή. Η **λογαριθμική κατανομή** συνδέεται με την κανονική κατανομή ως εξής: Μια τυχαία μεταβλητή $Z > 0$ ακολουθεί την λογαριθμική κατανομή, όταν ο λογάριθμος της $Y = \log Z$ ακολουθεί την κανονική κατανομή και αντιστρόφως. Χαρακτηρίζεται πλήρως :

- είτε από τη μέση τιμή m και την τυπική απόκλιση σ^2 της κανονικής κατανομής και καλούνται αριθμητικές παράμετροι,
- είτε από τη μέση τιμή α και την τυπική απόκλιση β^2 του λογαριθμικού μετασχηματισμού $Y = \log Z$ ακολουθεί και καλούνται λογαριθμικές παράμετροι.

Η αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της λογαριθμοκανονικής κατανομής δίνεται από την εξίσωση:

$$\text{Prob}\{Z \leq z\} = G_Z(z) = G_0\left(\frac{\ln z - \alpha}{\beta}\right) \text{ για όλα τα } z > 0 \quad (3.12)$$

όπου $G_0(*)$ είναι η cdf της τυπικής κανονικής κατανομής.

Ενώ η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της λογαριθμικής κατανομής ισούται με:

$$g_Z(y) = G'_Z(y) = \frac{1}{\beta y} g_0\left(\frac{\ln y - \alpha}{\beta}\right) \quad (3.13)$$

όπου $g_0(*)$ είναι η pdf της τυπικής κανονικής κατανομής.

Οι μαθηματικές σχέσεις ανάμεσα στις μαθηματικές και στις λογαριθμικές παραμέτρους είναι :

$$\begin{cases} m = e^{\alpha + \beta^2/2} \\ \sigma^2 = m^2 [e^{\beta^2} - 1] \end{cases} \quad \begin{cases} \alpha = \ln m - \beta^2/2 \\ \beta^2 = \ln\left(1 + \frac{\sigma^2}{m^2}\right) \end{cases} \quad (3.14)$$

Εάν v_p είναι η το p - ποσοστημόριο για μια τυπική κανονική κατανομή δηλ, $v_p = G_0^{-1}(p)$, $p \in [0,1]$ τότε το p - ποσοστημόριο για την λογοκανονική είναι : $v_p = e^{\alpha + \beta v_p}$.

Μέχρι στιγμής λήφθηκε υπόψη μόνο μια τυχαία μεταβλητή κάθε φορά, είτε αυτή ήταν η $Z(u)$ ή το

άθροισμα $Z_{tot} = \sum_{i=1}^n Z_i$ των n τυχαίων μεταβλητών $Z(u)$. Όπως στις περισσότερες επιστήμες, έτσι και στη

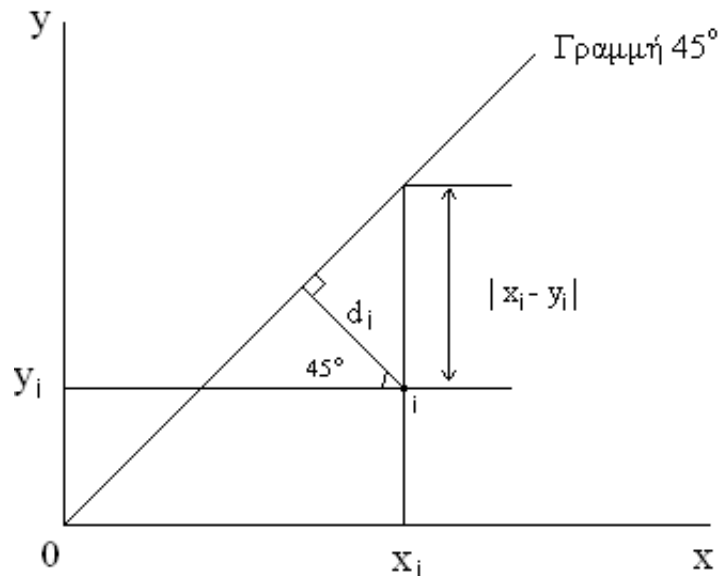
γεωστατιστική ο παράγοντας της εξάρτησης της μιας μεταβλητής X από μια άλλη Y παίζει σημαντικό ρόλο. Οι μεταβλητές αυτές πιθανόν να αντιστοιχούν στην ίδια ποσότητα (δείκτες ξηρασίας) σε δύο διαφορετικά σημεία του χώρου ή σε δύο διαφορετικές ποσότητες (γεωγραφικές συντεταγμένες, υψόμετρο, βροχόπτωση) που αναφέρονται στο ίδιο ή σε διαφορετικά σημεία στο χώρο. Στην παρούσα εργασία αναλύεται η πρώτη περίπτωση αναλυτικά και κατόπιν μελετάται η επίδραση των γεωγραφικών μεταβλητών (γεωγραφικές συντεταγμένες, υψόμετρο) στους εξεταζόμενους δείκτες ξηρασίας. Όταν η αθροιστική συνάρτηση κατανομής ή cdf αναφέρεται συγκεκριμένα για ένα σύνολο πληροφοριών (n), π.χ το σύνολο (n) να αποτελείται από γειτονικές τιμές $Z(u_a)$, $a=1, \dots, n$, τότε η τυχαία μεταβλητή Z είναι εξαρτημένη (conditional) στο σύνολο n και η αθροιστική συνάρτηση κατανομής (cdf) της καλείται **εξαρτημένη αθροιστική συνάρτηση κατανομής** ή **ccdf**:

$$F(u; z | (n)) = \text{Prob}\{Z(u) \leq z | (n)\} \quad (3.15)$$

Η Εξίσωση (3.1) μοντελοποιεί την αβεβαιότητα για την άγνωστη τιμή $z(u)$ χωρίς τη χρήση των δεδομένων (n), ενώ η Εξίσωση (3.15) μοντελοποιεί την αβεβαιότητα για την $z(u)$ λαμβάνοντας υπόψη το σύνολο των δεδομένων (n). Ο μεγάλος στόχος κάθε αλγόριθμου πρόβλεψης είναι να μετατρέψει αρχικά μοντέλα όπως της Εξίσωσης (3.1) σε μεταγενέστερα όπως της Εξίσωσης (3.15). Σημειώνεται ότι η cdf είναι μια συνάρτηση της θέσης u , της γεωμετρικής παράταξης των θέσεων των δεδομένων u_a , $a=1, \dots, n$ και των τιμών των δεδομένων. Έτσι λοιπόν ο στόχος της γεωστατιστικής προσέγγισης είναι να μελετήσει/μοντελοποιήσει το βαθμό συσχέτισης ή εξάρτησης των δύο ή περισσότερων μεταβλητών. Οι μεταβλητές αυτές είναι οι δείκτες ξηρασίας SPI σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες.

Τα εργαλεία που χρησιμοποιεί η γεωστατιστική για τον παραπάνω σκοπό είναι το βαριόγραμμα $2\gamma_{XY}$ ή ημιμεταβλητογράφημα (ημιμεταβλητόγραμμα) γ_{XY} , η συμμεταβλητότητα $\text{Con}\{X, Y\}$ και ο συντελεστής συσχέτισης ρ_{XY} . Ο απλούστερος τρόπος για την πρώτη εκτίμηση της εξάρτησης δύο μεταβλητών είναι το διάγραμμα διασποράς, δηλαδή η δισδιάστατη γραφική παράσταση που προκύπτει από τα ζεύγη σημείων (x_i, y_i) (Σχήμα 3.2). Το διάγραμμα διασποράς είναι ότι και το ιστόγραμμα, στην περίπτωση μιας μεταβλητής. Ο βαθμός εξάρτησης των δύο μεταβλητών X και Y χαρακτηρίζεται από τη διασπορά των

σημείων γύρω από τη γραμμή 45° . Όταν τα σημεία (x_i, y_i) εφαρμόσουν ακριβώς πάνω στη γραμμή τότε είναι πλήρως εξαρτημένες.



Σχήμα 3.2. Το ζεύγος των σημείων (x_i, y_i) σε ένα διάγραμμα διασποράς.

Η ροπή αδράνειας (moment of inertia) είναι η μέση τιμή του τετραγώνου της διαφοράς δύο μεταβλητών και ορίζεται ως εξής :

$$V_{XY} = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N [x_i - y_i]^2 \quad (3.16)$$

Η ροπή αδράνειας καλείται ημιμεταβλητογράφημα (semivariogram). Αν $X=Y$ το ημιμεταβλητογράφημα μηδενίζεται. Υψηλές τιμές του ημιμεταβλητογραφήματος δηλώνουν σημαντική απόκλιση μεταξύ των τιμών των μεταβλητών X και Y . Επομένως το ημιμεταβλητογράφημα είναι ένα μέτρο της διασποράς των δύο μεταβλητών. Το βαριόγραμμα $2\gamma_{XY}$ είναι απλά το διπλάσιο του ημιμεταβλητογραφήματος. Στη γεωστατιστική, πιο διαδεδομένο είναι το ημιμεταβλητογράφημα. Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι όπως και στην περίπτωση της μιας μεταβλητής, έτσι και σε αυτήν που αντιμετωπίζονται δύο ή παραπάνω μεταβλητές οι στατιστικές παράμετροι ορίζονται αναλόγως το ίδιο.

Έτσι η μέση τιμή ορίζεται :

$$E\{XY\} = \int \int_{-\infty}^{+\infty} xy d^2 F_{XY}(x, y) = \int \int_{-\infty}^{+\infty} xy f_{XY}(x, y) dx dy \quad (3.17)$$

στην πράξη υπολογίζεται από : $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i y_i$ και όπου η $f_{XY}(x, y) = \frac{d^2 F_{XY}(x, y)}{dx dy}$ είναι η κοινή pdf και

$d^2 F_{XY}(x, y) = f_{XY}(x, y)$ είναι η πιθανότητα εμφάνισης του κοινού αποτελέσματος $\{X = x \pm dx, Y = y \pm dy\}$.

Η μέση τιμή $E\{XY\}$ (Εξ. 3. 17) καλείται μη κεντρικός συντελεστής διασποράς των δύο τυχαίων μεταβλητών X και Y . Ο κεντρικός **συντελεστής συμμεταβλητότητας** (covariance) ισούται με :

$$Cov\{X, Y\} = \sigma_{XY} = E\{[X - m_X] \cdot [Y - m_Y]\} = E\{XY\} - m_X \cdot m_Y \quad (3.18)$$

στην πράξη υπολογίζεται ως εξής:

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - m_X) \cdot (y_i - m_Y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i y_i - m_X \cdot m_Y \quad \text{με } m_X = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad m_Y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i.$$

Η διασπορά μιας μεταβλητής, όπως αυτή ορίστηκε στην Εξίσωση 3.7, δεν είναι τίποτε άλλο από τον συντελεστή **αυτομεταβλητότητας** (autocovariance) της μεταβλητής αυτής με τον εαυτό της :

$$\sigma^2_X = \text{Var}\{X\} = \text{Cov}\{X, X\} = E\{[X - m_X]^2\} \geq 0 \quad (3.19)$$

Παρατηρείται ότι παρόλο που οι διασπορές σ^2_X και σ^2_Y είναι απαραίτητα θετικές, ο συντελεστής συμμεταβλητότητας παίρνει και αρνητικές τιμές στην περίπτωση που οι τιμές των δύο τυχαίων μεταβλητών δεν μεταβάλλονται με παρόμοιο τρόπο, δηλαδή όταν οι υψηλές τιμές της μιας τείνουν να προσεγγίσουν τις χαμηλές τιμές της άλλης και αντίστροφα.

Από την Εξίσωση 3.18 είναι προφανές πως η τιμή του συντελεστής συμμεταβλητότητας εξαρτάται από τις μονάδες των X και Y . Για να απαλλαγεί από αυτή τη δέσμευση, ορίστηκε ο συντελεστής συσχέτισης (coefficient of correlation) ρ_{XY} :

$$\rho_{XY} = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \cdot \sigma_Y} = \frac{\text{Cov}\{X, Y\}}{\sqrt{\text{Var}\{X\} \cdot \text{Var}\{Y\}}} \in [-1, +1] \quad (3.20)$$

Το βαριόγραμμα $2\gamma_{XY}$ μαζί με το ημιμεταβλητογράφημα γ_{XY} είναι μέσα μέτρησης της μεταβλητότητάς, ενώ ο συντελεστής συμμεταβλητότητας σ_{XY} και ο συντελεστής συσχέτισης ρ_{XY} είναι μέσα μέτρησης της ομοιότητας. Τόσο το βαριόγραμμα $2\gamma_{XY}$ όσο και ο συντελεστής συμμεταβλητότητας σ_{XY} εξαρτώνται από το γραμμικό μετασχηματισμό των μεταβλητών X, Y , είτε αυτός εκφράζεται ως άθροισμα π.χ $X+b$, είτε ως γινόμενο aX . Για το λόγο αυτό ζητείται μια πιο «εσωτερική» (intrinsic) έκφραση απαλλαγμένη από τις μονάδες. Αυτό πραγματοποιείται με την αλλαγή των μεταβλητών σε νέες : $X' = (X - m_X)/\sigma_X$ και $Y' = (Y - m_Y)/\sigma_Y$.

Οι στατιστικές τους παράμετροι είναι:

$$\begin{cases} m_{X'} = m_{Y'} = 0, \sigma^2_{X'} = \sigma^2_{Y'} = 1, \\ \sigma_{X'Y'} = E\left\{ \frac{X - m_X}{\sigma_X} \cdot \frac{Y - m_Y}{\sigma_Y} \right\} = \rho_{XY} \\ \gamma_{X'Y'} = 1 - \rho_{XY}, \in [0, 2] \end{cases} \quad (3.21)$$

3.4.2. Βαριόγραμμα – Ημιμεταβλητογράφημα

Εφόσον οι τυχαίες μεταβλητές X, Y αντιστοιχούν στις τιμές που παίρνει η εξεταζόμενη μεταβλητή (δείκτης ξηρασίας SPI) σε δύο διαφορετικές θέσεις μέσα στο πεδίο μελέτης A , τότε αν h είναι το διάστημα του χώρου που ενώνει τα δύο σημεία, αυτές μπορούν να δηλωθούν ως: $X = Z(u), Y = Z(x+h)$. Αυτή η περίπτωση είναι και η πιο σημαντική για τα προβλήματα παρεμβολής, στα οποία μια παράμετρος (SPI) $Z(u), u$ ανήκει στο πεδίο A , πρέπει να έχει μια συγκεκριμένη τιμή σε κάθε σημείο u , με τα δεδομένα να προέρχονται από ένα περιορισμένο αριθμό τιμών της.

Συγκεντρώνοντας όλα τα ζεύγη $n(h)$ των δεδομένων, υπάρχουν μέσα στο πεδίο μελέτης A , της ιδιότητας Z , τα οποία χαρακτηρίζονται από την ίδια διανυσματική απόσταση h μπορεί να υπολογιστεί τελικά το βαριόγραμμα του πεδίου A . Αυτό είναι λυτόν το τελικό βαριόγραμμα το οποίο λαμβάνει υπόψη της η γεωστατιστική επιστήμη για την περαιτέρω επεξεργασία του πεδίο μελέτης. Κι αυτό γιατί όπως αναφέρθηκε λαμβάνει υπόψη όλες τις τυχαίες μεταβλητές που χαρακτηρίζουν την εκάστοτε ιδιότητα.

Το βαριόγραμμα ουσιαστικά αποτελεί ταυτότητα για την ιδιότητα Z στο πεδίο A. Μέσω αυτού μπορεί ο μελετητής να εξάγει ένα πρώτο συμπέρασμα για την μεταβλητότητα της ιδιότητας και χωρίς αυτό δεν πραγματοποιείται η γεωστατιστική προσέγγιση. Ο ακριβής ορισμός που ακολουθεί το βαριόγραμμα είναι: Το βαριόγραμμα (variogram) αντικαθιστά την ευκλείδεια απόσταση h με μια θεμελιώδη απόσταση $2\gamma(h)$, η οποία είναι συγκεκριμένη στη συμπεριφορά και στο πεδίο μελέτης. Η απόσταση του βαριόγραμματος μετρά το μέσο βαθμό της ανομοιότητας ανάμεσα σε μια «χωρίς δειγματοληψία» τιμή $z(u)$ και σε μια κοντινή δεδομένη τιμή. Έτσι π.χ στην περίπτωση που λαμβάνονται υπόψη έστω μόνο δύο γνωστές τιμές $z(u+h)$ και $z(u+h')$ σε γνωστές θέσεις, η πιο «διαφορετική» τιμή θα δώσει και λιγότερο βάρος στην εκτίμηση της $z(u)$. Η εξίσωση που την περιγράφει είναι η παρακάτω [Isaaks and Srivastava, 1989; Cressie, 1991; Deutsch and Journel, 1998]:

$$\gamma_{Z(x),Z(x+h)} = 2\gamma'_A(h) = \frac{1}{n(h)} \sum_{a=1}^{n(h)} [z(x_a) - z(x_a + h)]^2 \quad (3.22)$$

Ο συμβολισμός $2\gamma'_A(h)$ δηλώνει το **πειραματικό (εμπειρικό) βαριόγραμμα** του πεδίου και είναι αυτό που τόσοσ λόγος έγινε παραπάνω χωρίς να δηλώνεται έτσι. Αυτός ο διαχωρισμός γίνεται διότι στην γεωστατιστική προσέγγιση, αφού κατασκευασθεί το παραπάνω πειραματικό (εμπειρικό) βαριόγραμμα, το επόμενο βήμα είναι να προσομοιωθεί με ένα έτοιμο/τυποποιημένο **μοντέλο βαριόγραμμα**, οι μορφές του οποίου θα αναλυθούν παρακάτω.

Όπως η τυχαία μεταβλητή $Z(x)$ και η κατανομή της χαρακτηρίζουν την αβεβαιότητα για τη τιμή της στη θέση x, έτσι και η τυχαία συνάρτηση $Z(x)$, $x \in A$, που καθορίζεται ως το σύνολο των εξαρτημένων RV, χαρακτηρίζει την κοινή (joint) χωρική αβεβαιότητα στο πεδίο A. Το βαριόγραμμα $2\gamma'_A(h)$ αυτής της τυχαίας συνάρτησης (Random Function ή RF) χαρακτηρίζει το βαθμό της χωρικής μεταβλητότητας ανάμεσα σε δύο RVs $Z(x)$ και $Z(x+h)$ που απέχουν διανυσματική απόσταση ίση με h.

Για να μοντελοποιηθεί όμως το πειραματικό βαριόγραμμα $2\gamma'_A(h)$ από το θεωρητικό/μοντέλο βαριόγραμμα $\gamma(h)$, πρέπει να γίνουν κάποιες υποθέσεις για την ιδιότητα Z. Κι αυτό γιατί το πειραματικό βαριόγραμμα $2\gamma'_A(h)$ εξαρτάται τόσο από την διανυσματική απόσταση h των σημείων, όσο και από τις θέσεις x_i αυτών, ενώ το μοντέλο βαριόγραμμα δεν πρέπει να εξαρτάται από θέσεις x_i των μεταβλητών, διότι θα χαρακτηρίζει πλέον όλο το πεδίο. Με άλλα λόγια το θεωρητικό βαριόγραμμα θα εξαρτάται μόνο από την διανυσματική απόσταση h των σημείων των RVs. Η υπόθεση αυτή καλείται **στασιμότητα ή μονιμότητα** (stationarity). Σύμφωνα με αυτήν:

1. Η μέση τιμή της ιδιότητας Z είναι σταθερή για όλο το πεδίο, δηλαδή είναι ανεξάρτητη της θέσης x. Άρα $E[Z(x+h)] = E[Z(x)] = m$ για όλα τα $x \in A$.
2. Η συνάρτηση συμμεταβλητότητας $C(h)$ της ιδιότητας Z δεν είναι πλέον συνάρτηση της θέσης x, αλλά μόνο της απόστασης h.

Επομένως:

$$\begin{aligned} 2\gamma(h) &= E\{[Z(x) - Z(x+h)]^2\} = [E\{Z^2(x)\} - m^2] + [E\{Z^2(x+h)\} - m^2] - 2[E\{Z(x)Z(x+h)\} - m^2] = \\ &= \text{Var}\{Z(x)\} + \text{Var}\{Z(x+h)\} - 2\text{Cov}\{Z(x)Z(x+h)\} = 2[C(0) - C(h)] \end{aligned}$$

Άρα :

$$\gamma(h) = -C(h) + C(0) \quad (3.23)$$

που σημαίνει πως το θεωρητικό ημμεταβλητογράφημα ισούται με το αρνητικό της συνάρτησης συμμεταβλητότητας συν μια σταθερά, που για μεγάλες τιμές του ημμεταβλητογραφήματος ισούται με τη διασπορά σ^2 . Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι η στασιμότητα είναι μία ιδιότητα της RF $Z(x)$ και όχι ιδιότητα της χωρικής κατανομής των z-τιμών στο πεδίο A. Η ιδέα λοιπόν της γεωστατιστικής προσέγγισης συνοψίζεται στα τέσσαρα παρακάτω βήματα:

- (i) Καθορισμός του πεδίου A, το οποίο όμως πρέπει να θεωρηθεί στάσιμο για την εξαγωγή όλων των απαραίτητων στατιστικών παραμέτρων.
- (ii) Εξέταση όλων των δεδομένων του πεδίου A για τον υπολογισμό του πειραματικού βαριογράμματος/ημιμεταβλητογραφήματος.
- (iii) Εξομάλυνση και ολοκλήρωση του πειραματικού βαριογράμματος / ημιμεταβλητογραφήματος από το μοντέλο βαριόγραμμα / ημιμεταβλητογράφημα.
- (iv) Εφαρμογή των μεθόδων παρεμβολής με τη χρήση του μοντέλου βαριογράμματος / ημιμεταβλητογραφήματος. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται ευρέως λόγω της μεγάλης αξιοπιστίας της είναι η Kriging.

3.4.3. Βέλτιστη παρεμβολή Kriging

Πολλές γεωλογικές και γεωτεχνικές έρευνες χαρακτηρίζονται από μεροληπτικά (biased) δεδομένα πεδίου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τα δεδομένα να είναι συσχετιζόμενα (correlated) και σε συστοιχία (clustered). Η γεωστατιστική αναγνωρίζει αυτές τις δυσκολίες και παρέχει εργαλεία ποικίλων μορφών χωρικής εκτίμησης (spatial simulation). Αυτά τα εργαλεία καλούνται **Kriging** στη μνήμη του D. G. Krige, ενός Νοατιοαφρικανού μηχανικού που ήταν πρωτοπόρος στη χρήση των σταθμισμένων μέσων όρων (weighted moving averages) για την αξιολόγηση των μεταλλευμάτων. Η μέθοδος Kriging υπερτερεί σε σχέση με τις άλλες μεθόδους παρεμβολής για αυτό και την προτιμούν οι περισσότεροι μελετητές. Κι αυτό γιατί είναι η μόνη μέθοδος που ενσωματώνει κατευθείαν το μοντέλο της χωρικής μεταβλητότητας των δεδομένων. Αυτό επιτρέπει στη δημιουργία χαρτών (απεικονίσεων) με διαφορετικά σενάρια παρεμβολής. Τα κριτήρια εκτίμησης του Kriging στηρίζονται σε καλά καθορισμένες στατιστικές συνθήκες, οι οποίες υπερτερούν των άλλων μεθόδων. Επιπλέον η αυτόματη αποδέσμευση (decluster) των δεδομένων που γίνεται από την Kriging, την καθιστά κατάλληλη για την επεξεργασία των γεωλογικών και γεωτεχνικών μετρήσεων. Επίσης η μέθοδος αυτή παρέχει και ένα μέτρο εκτίμησης της ακρίβειας των παρεμβαλλόμενων τιμών μέσω των διαφορών εκτίμησης, οι οποίες παρέχουν δύο στατιστικά εργαλεία: i) κάθε εκτίμηση συνοδεύεται με μια διακύμανση και ii) η διακύμανση αυτή δεν εξαρτάται από ξεχωριστές παρατηρήσεις.

Έστω $Z(x)$ είναι η παράμετρος που θα υποστεί την χωρική παρεμβολή (π.χ βροχόπτωση, θερμοκρασία, δείκτες ξηρασίας SPI), με το x να είναι το διάνυσμα των συντεταγμένων στο χώρο. Τοπικές τιμές της παραμέτρου είναι διαθέσιμες σε n διαφορετικές θέσεις στο πεδίο μελέτης A, και καλούνται $Z_i = Z(x_i)$, $i=1, \dots, n$. Το πρόβλημα της παρεμβολής είναι το πώς θα χρησιμοποιηθούν οι τιμές Z_i για την εκτίμηση μιας άλλης τιμής Z_0 στη θέση x_0 . Η βασική ιδέα της Kriging στηρίζεται στη γραμμική παλινδρόμηση σύμφωνα με την οποία γίνεται η εκτίμηση της Z_0 , η οποία καλείται Z_0^* . Αλλά η Kriging αποτελεί την πιο εξελιγμένη μορφή γιατί και ελαχιστοποιεί τη διαφορά $Z_0^* - Z_0$, αλλά και είναι αμερόληπτη (unbiased).

Θεωρήστε μια άγνωστη τιμή z_0 ως την τιμή εξόδου της τυχαίας μεταβλητής (RV) Z_0 . Οι n τιμές z_i , $i=1, \dots, n$ είναι οι αντίστοιχες τιμές εξόδου των n RVs Z_i , $i=1, \dots, n$. Οι $n+1$ RVs Z_0, Z_1, \dots, Z_n χαρακτηρίζονται από :

- τους μέσους τους:

$$E\{Z_i\} = m_i, \quad i=1, \dots, n \quad (3.24)$$

- τους συντελεστές συμμεταβλητότητας:

$$\text{Cov}\{Z_i, Z_j\} = E\{Z_i Z_j\} - m_i m_j = C_{ij} \quad \text{για όλα τα } i, j = 0, \dots, n. \quad (3.25)$$

Οι $n+1$ διακυμάνσεις δεν είναι άλλες από τους συντελεστές αυτομεταβλητότητας

$$\text{Var}\{Z_i\} = E\{Z_i^2\} - m_i^2 = C_{ii} \quad (3.26)$$

Ο συντελεστής συσχέτισης δύο οποιοδήποτε μεταβλητών Z_i, Z_j είναι:

$$\rho_{i,\xi} = \frac{C_{ij}}{\sqrt{C_{ii} \cdot C_{jj}}} \in [-1,1] \quad (3.27)$$

Τέλος, πρέπει να γίνει διαχωρισμός του πίνακα \underline{K} ($n \times n$) των συντελεστών διασποράς των δεδομένων

$$\underline{K} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \dots & C_{1n} \\ C_{21} & C_{22} & \dots & C_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{n1} & C_{n2} & \dots & C_{nn} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

από τον πίνακα \underline{k} ($n \times 1$) των συντελεστών διασποράς των άγνωστων

$$\underline{k} = \begin{bmatrix} C_{10} \\ C_{20} \\ \vdots \\ C_{n0} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Έτσι λοιπόν η άγνωστη τιμή z_0 εκτιμάται από το γραμμικό συνδυασμό των n δεδομένων και της παραμέτρου λ_0 :

$$z_0^* = \lambda_0 + \sum_{i=1}^n \lambda_i z_i \quad (3.30)$$

Αντίστοιχα, ο γραμμικός συνδυασμός των n τυχαίων μεταβλητών Z_i είναι και αυτός μια τυχαία μεταβλητή και καλείται εκτιμητής :

$$Z_0^* = \lambda_0 + \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_i \quad (3.31)$$

Οι άγνωστοι του προβλήματος είναι οι συντελεστές βαρύτητας λ_i , οι οποίοι εξαρτώνται τόσο από τη θέση x_0 , όσο και από τις θέσεις x_i . Το πραγματικό σφάλμα $z_0 - z_0^*$ είναι άγνωστο και δεν μπορεί να προσδιοριστεί. Όμως, κάποια στατιστικά χαρακτηριστικά του λάθους των τυχαίων μεταβλητών $Z_0 - Z_0^*$ μπορούν να υπολογιστούν. Η μέση τιμή του λάθους των τυχαίων μεταβλητών είναι:

$$E\{Z_0 - Z_0^*\} = E\{Z_0\} - E\{Z_0^*\} = E\{Z_0\} - \lambda_0 - \sum_{i=1}^n \lambda_i E\{Z_i\} = m_0 - \lambda_0 - \sum_{i=1}^n \lambda_i m_i$$

Για να είναι αμερόληπτη η μέθοδος αυτή πρέπει μέση τιμή του σφάλματος των τυχαίων μεταβλητών να είναι μηδέν, έτσι ο συντελεστής βαρύτητας λ_0 ισούται με :

$$\lambda_0 = m_0 - \sum_{i=1}^n \lambda_i m_i \quad (3.32)$$

Επιπλέον :

$$Z_0^* = m_0 + \sum_{i=1}^n \lambda_i [Z_i - m_i] \quad (3.33)$$

Ο αμερόληπτος εκτιμητής Z_0^* εμφανίζεται ως το αποτέλεσμα της γραμμικής εκτίμησης της διαφοράς $[Z_0 - m_0]$ από την διαφορά των τυχαίων μεταβλητών των δεδομένων $[Z_i - m_i]$:

$$[Z_0^* - m_0] = [Z_0 - m_0]^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i [Z_i - m_i] \quad (3.34)$$

Μένει λοιπόν ο υπολογισμός των n συντελεστών βαρύτητας λ_i , $i=1,\dots,n$. Αυτό θα γίνει μέσω της ελαχιστοποίησης του σφάλματος της διασποράς. Θεωρώντας το σφάλμα των $\{Z_0 - Z_0^*\}$ ως γραμμικό συνδυασμό Y των $(n+1)$ τυχαίων μεταβλητών, έχουμε :

$$Y = Z_0 - Z_0^* = [Z_0 - m_0] - [Z_0 - m_0]^* = \sum_{i=0}^n i_i [Z_i - m_i] \quad (3.35)$$

με: $i_0 = 1$ και $i_i = -\lambda_i$, $i=1,\dots,n$

Το σφάλμα της διασποράς εκφράζεται ως το διπλό άθροισμα των συντελεστών συνδυακόμενης C_{ij} :

$$\text{Var}Y = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n i_i i_j C_{ij} \quad (3.36)$$

Τα n βάρη $i_i = -\lambda_i$, $i=1,\dots,n$ είναι αυτά τα οποία θα ελαχιστοποιήσουν το σφάλμα της διασποράς $\text{Var}Y$. Αυτό γίνεται με το μηδενισμό των n μερικών διαφορών του σφάλματος $\text{Var}Y$ σε σχέση με την καθεμία από τις n παραμέτρους i_i , $i=1,\dots,n$:

$$\frac{1}{2} \frac{\partial \text{Var}Y}{\partial i_i} = \sum_{j=0}^n i_j C_{ij} = i_0 C_{i0} + \sum_{j=1}^n i_j C_{ij} = C_{i0} - \sum_{j=1}^n \lambda_j C_{ij} = 0, \text{ για όλα τα } i=1,\dots,n \quad (3.37)$$

Το τελικό σύστημα των εξισώσεων γραμμικής παλινδρόμησης ή καλύτερα στο σύστημα του **Απλού (Simple) Kriging** είναι:

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j C_{ij} = C_{i0}, \quad i=1,\dots,n \quad (3.38)$$

Το ελαχιστοποιημένο λάθος της διασποράς $\text{Var}Y$ καλείται «Simple Kriging» διασπορά και ισούται με :

$$\begin{aligned} \sigma_{SK}^2 = \text{Var}\{Z_0 - Z_0^*\} &= \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n i_i i_j C_{ij} = C_{00} - \underbrace{\sum_{j=1}^n \lambda_j C_{0j}}_{i=0} - \underbrace{\sum_{i=1}^n \lambda_i C_{i0}}_{i \neq 0, j=0} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j C_{ij} = \\ &= C_{00} - 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i C_{i0} + \sum_{i=1}^n \lambda_i \left[\sum_{j=1}^n \lambda_j C_{ij} = C_{i0} \right] \end{aligned}$$

Τελικά έχουμε:

$$\sigma_{SK}^2 = \text{Var}\{Z_0 - Z_0^*\} = C_{00} - \sum_{i=1}^n \lambda_i C_{i0} \geq 0 \quad (3.39)$$

Η Εξ. 38 γράφεται σε μορφή πινάκων ως εξής :

$$\underline{\mathbf{K}} * \underline{\boldsymbol{\lambda}} = \underline{\mathbf{K}} \quad \text{ή} \quad \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \dots & C_{1n} \\ C_{21} & C_{22} & \dots & C_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{n1} & C_{n2} & \dots & C_{nn} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{10} \\ C_{20} \\ \vdots \\ C_{n0} \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

Καθορίζοντας τον πίνακα $\underline{\mathbf{R}}_i^T$ ως τη διαφορά των τυχαίων μεταβλητών δηλαδή $\underline{\mathbf{R}}_i^T = [Z_1 - m_1, \dots, Z_n - m_n]$, τότε ο εκτιμητής της Εξίσωσης 3.34 γράφεται σε μορφή πινάκων :

$$[Z_0 - m_0]^* = \underline{\boldsymbol{\lambda}}^T \underline{\mathbf{R}}_i = \underline{\mathbf{K}}^T \underline{\mathbf{K}}^{-1} \underline{\mathbf{R}}_i \quad (3.41)$$

εφόσον $\underline{K} = \underline{K}^T$ (ο πίνακας \underline{K} είναι συμμετρικός) τότε και $\underline{K}^{-1} = (\underline{K}^{-1})^T$. Και το ελαχιστοποιημένο λάθος της διασποράς γράφεται :

$$\sigma_{SK}^2 = C_{00} - \underline{\lambda}^T \underline{k} = C_{00} - \underline{k}^T \underline{K}^{-1} \underline{k} \quad (3.42)$$

Συνθήκη ανεξαρτησίας: Έστω ότι οι n τυχαίες μεταβλητές $Z_i, i=1, \dots, n$, είναι ανεξάρτητες η μία από την άλλη, τότε θα πρέπει να καλούνται ανεξάρτητες μεταβλητές και η άγνωστη Z_0 να καλείται εξαρτημένη. Ο πίνακας \underline{K} των συντελεστών διασποράς των δεδομένων μετατρέπεται σε έναν διαγώνιο πίνακα:

$$\underline{K} = [C_{ij}] = \begin{bmatrix} C_{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & C_{22} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & C_{nn} \end{bmatrix}, \quad (3.43)$$

όπου, $C_{ij} = 0$, για $i \neq j$ και C_{ii} , για $i=j$

Το σύστημα της μεθόδου Simple Kriging της Εξίσωσης 3.38 γράφεται : $\lambda_i C_{ii} = C_{i0} \rightarrow \lambda_i = C_{i0}/C_{ii}$, όμως

$\rho_{i0} = C_{i0} / \sqrt{C_{ii} C_{00}} \Rightarrow \lambda_i = \rho_{i0} \frac{\sqrt{C_{00}}}{\sqrt{C_{ii}}}$ και ο Simple Kriging εκτιμητής της Εξ. 3.34 γίνεται:

$$[Z_0 - m_0]^* = \sum_{i=1}^n \rho_{i0} \frac{\sqrt{C_{00}}}{\sqrt{C_{ii}}} \cdot [Z_i - m_i] \quad \text{ή} \quad \left[\frac{Z_0 - m_0}{\sigma_0} \right]^* = \sum_{i=1}^n \rho_{i0} \cdot \left[\frac{Z_i - m_i}{\sigma_i} \right] \text{αφού } \sigma_i = \sqrt{C_{ii}}.$$

Έτσι στην περίπτωση ανεξαρτησίας των δεδομένων, τα Simple Kriging βάρη λ_i δεν είναι άλλα από τους συντελεστές συσχέτισης ρ_{oi} ανάμεσα σε κάθε δεδομένο και στην άγνωστη εξαρτημένη μεταβλητή Z_0 . Όσο μεγαλύτερη η συσχέτιση ρ_{oi} ενός δεδομένου με τη Z_0 , τόσο μεγαλύτερο το βάρος του. Σημειώνεται ότι:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n \rho_{i0} \neq 1 \\ \sigma_{SK}^2 = C_{00} \left[1 - \sum_{i=1}^n \lambda_i \frac{C_{i0}}{C_{00}} \right] = C_{00} \left[1 - \sum_{i=1}^n \rho_{i0}^2 \right] \end{array} \right.$$

Επιπλέον, αν τα n δεδομένα είναι ανεξάρτητα και από την άγνωστη μεταβλητή Z_0 , δηλαδή $\rho_{i0}=0$, τότε και ο SK εκτιμητής ισούται με τη μέση τιμή $Z_0^* = m_0$.

Στην περίπτωση όπου τα n δεδομένα Z_i αντιστοιχούν στην ίδια συμπεριφορά Z αλλά σε διαφορετικές θέσεις $x_i \neq x_0$, έχουμε :

$$Z^*(x_0) - m = \sum_{i=1}^n \lambda_i [Z(x_i) - m] \quad (3.44)$$

με m είναι η μέση τιμή των $(n+1)$ τυχαίων μεταβλητών $Z(x_0), Z(x_i), i=1, \dots, n$. Καθορίζοντας τη συνάρτηση διασποράς $C(h)$ ως τη συμμεταβλητότητα μεταξύ δύο οποιοδήποτε τυχαίων μεταβλητών $Z(x), Z(x+h)$, που απέχουν απόσταση διανύσματος h :

$$C(h) = \text{Cov}\{Z(x), Z(x+h)\} \quad (3.45)$$

Το Simple Kriging σύστημα γράφεται :

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j C(x_i - x_j) = C(x_i - x_0), \quad i=1, \dots, n \quad (3.46)$$

Όπως έγινε αντιληπτό από τα παραπάνω για την εφαρμογή της Simple Kriging θεωρείται δεδομένη η γνώση της μέσης τιμής m της παραμέτρου και η οποία μάλιστα σύμφωνα με τη συνθήκη της στασιμότητας είναι ίδια σε όλο το πεδίο μελέτης. Στην περίπτωση όμως που η μέση τιμή δεν είναι γνωστή τότε χρησιμοποιείται μια άλλη μέθοδος της Kriging, η μέθοδος Ordinary Kriging. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχουν πολλές μέθοδοι ή/και παραλλαγές Kriging ανάλογα με την περίπτωση του προβλήματος, όπως οι: Universal Kriging, Block Kriging, Detrended Kriging, Kriging with External Drift, Simple Kriging with varying Local Means, Cokriging, Nonlinear Kriging, Indicator Probability Kriging, Soft Kriging [Goonaerts, 1997]. Οι μέθοδοι /παραλλαγές Kriging βασίζονται κυρίως στη μέθοδο Simple Kriging και τη μέθοδο Ordinary Kriging που αναλύεται παρακάτω.

3.4.4. Βέλτιστη παρεμβολή Ordinary Kriging

Στην περίπτωση τώρα που η μέση τιμή m είναι άγνωστη ο γραμμικός εκτιμητής $Z^*(x_0)$ γράφεται όπως και πριν $Z^*(x_0) = \lambda_0 + \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i)$ και η μέση τιμή του λάθους είναι $E\{Z(x_0) - Z^*(x_0)\} = m - \lambda_0 - \sum_{i=1}^n \lambda_i m = -\lambda_0 + m \left(1 - \sum_{i=1}^n \lambda_i\right)$, η οποία πρέπει να είναι μηδέν. Αυτό πραγματοποιείται όταν $\lambda_0=0$ και $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$.

Έτσι, ο αμερόληπτος γραμμικός εκτιμητής $Z(x_0)$ γράφεται :

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i), \quad \text{με} \quad \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (3.47)$$

Το σφάλμα της διασποράς γράφεται :

$$\sigma_E^2 = \text{Var}\{Z(x_0) - Z^*(x_0)\} = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n i_i j_j C(x_i - x_j) \quad (3.48)$$

$$\text{με} \begin{cases} i_0 = 1 \\ i_i = -\lambda_i, i=1, \dots, n \\ C(x_i - x_j) = \text{Cov}[Z(x_i) - Z(x_j)] \end{cases}$$

Όμως πρέπει να ελαχιστοποιηθεί το λάθος της διασποράς για να διατηρώντας την αμεροληψία δηλαδή τη συνθήκη $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$. Αυτό ισοδυναμεί σε βελτιστοποίηση κάτω από γραμμικούς περιορισμούς. Σε αυτό το σημείο θα γίνει χρήση της μεθόδου Lagrange, με τη δημιουργία της συνάρτησης S των $(n+1)$ παραμέτρων : i) των συντελεστών βάρους λ_i , $i=1, \dots, n$, και ii) της παραμέτρου Lagrange 2μ και καθορίζεται ως εξής :

$$S(\lambda_i, i=1, \dots, n; \mu) = \sigma_E^2 + 2\mu \left[\sum_{i=1}^n \lambda_i - 1 \right] \quad (3.49)$$

Η ελαχιστοποίηση της S πραγματοποιείται με τον μηδενισμό των $(n+1)$ μερικών παραγώγων της:

$$-\frac{1}{2} \frac{\partial S}{\partial \lambda_i} = \sum_{j=0}^n i_j C(x_i - x_j) - \mu = 0, \quad i=1, \dots, n,$$

$$-\frac{1}{2} \frac{\partial S}{\partial \mu} = \sum_{i=1}^n \lambda_i - 1 = 0$$

Οι πρώτες n εξισώσεις ξαναγράφονται :

$$C(x_i - x_0) - \sum_{j=1}^n \lambda_j C(x_i - x_j) - \mu = 0 \quad \text{ή} \quad C(x_i - x_0) = \sum_{j=1}^n \lambda_j C(x_i - x_j) + \mu \quad (3.50)$$

Τελικά, οι $(n+1)$ άγνωστοι λ_i, μ , υπολογίζονται από το $(n+1)$ γραμμικό σύστημα, το οποίο καλείται «Ordinary Kriging» σύστημα και είναι:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j C(x_i - x_j) + \mu = C(x_i - x_0), i=1, \dots, n \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \end{cases} \quad (3.51)$$

το οποίο μπορεί να γραφτεί και σε όρους ημμεταβλητογραφήματος μιας και αυτό είναι που χρησιμοποιείται στη γεωστατική και πιο συγκεκριμένα στην παρούσα εργασία:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j \gamma(x_i - x_j) + \mu = \gamma(x_i - x_0), i=1, \dots, n \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \end{cases} \quad (3.52)$$

και σε μορφή πινάκων θα έχουμε:

$$\begin{bmatrix} 0 & \gamma_{12} & \gamma_{13} & \cdots & \gamma_{1n} & 1 \\ \gamma_{21} & 0 & \gamma_{23} & \cdots & \gamma_{2n} & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma_{n1} & \gamma_{n2} & \gamma_{n3} & \cdots & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{10} \\ \gamma_{20} \\ \vdots \\ \vdots \\ \gamma_{n0} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

Το ελαχιστοποιημένο λάθος της διασποράς το οποίο καλείται Ordinary Kriging διασπορά είναι:

$$\sigma_{OK}^2 = E\left\{ \left[Z(x_0) - Z^*(x_0) \right]^2 \right\} = C(0) - \sum_{i=1}^n \lambda_i C(x_i - x_j) - \mu \geq 0 \quad (3.54)$$

Συνθήκη ανεξαρτησίας: Εάν οι n τυχαίες μεταβλητές $Z(x_i)$ των δεδομένων είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους, ο πίνακας $[C(x_i - x_j)]$ των συντελεστών διασποράς των δεδομένων μετατρέπεται σε έναν διαγώνιο πίνακα, με στοιχεία της κυρίας διαγωνίου την τυπική διασπορά $C(0) = \text{Var}\{Z(x)\}$. Το OK σύστημα της Εξίσωσης 3.51 γίνεται:

$$\begin{cases} \lambda_i C(0) + \mu = C(x_i - x_0), i=1, \dots, n \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \end{cases} \quad (3.55)$$

ή

$$\begin{cases} \lambda_i = \frac{C(x_i - x_0)}{C(0)} - \frac{\mu}{C(0)} = \rho(x_i - x_0) - \frac{\mu}{C(0)} \\ -\mu = \frac{C(0)}{\mu} \left[1 - \sum_{i=1}^n \rho(x_i - x_0) \right] \end{cases}$$

οπότε :

$$\sigma_{OK}^2 = C(0) \cdot \left[1 - \sum_{i=1}^n \rho^2(x_i - x_0) \right] - \mu \left[1 - \sum_{i=1}^n \rho(x_i - x_0) \right] \geq 0$$

με $\rho(h) = C(h)/C(0) \in [-1,+1]$ να είναι διάγραμμα συσχέτισης (correlogram), το οποίο μετρά τη συσχέτιση μεταξύ δύο μεταβλητών $Z(x)$, $Z(x+h)$, που απέχουν απόσταση διανύσματος h .

Επιπλέον αν τα n δεδομένα είναι ανεξάρτητα και από την άγνωστη τυχαία μεταβλητή $Z(x_0)$ τότε $\rho(x_i - x_0) = 0$ και το OK σύστημα (Εξ. 3.51) γράφεται :

$$\begin{cases} \lambda_i = 1/n, \quad i=1, \dots, n, \\ -\mu = \frac{C(0)}{n} \end{cases} \quad (3.56)$$

Δηλαδή σε αυτήν την περίπτωση ο OK εκτιμητής γίνεται ίσος με τη μέση τιμή: $Z^*(x_i) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z(x_i)$ και

$$\sigma_{OK}^2 = C(0) + \frac{C(0)}{n} \geq 0.$$

Κλείνοντας εδώ την παρουσίαση της μεθόδου Kriging πρέπει να σημειωθεί ότι τα Simple Kriging και Ordinary Kriging συστήματα των Εξισώσεων 3.39 και Εξ. 3.51 αντίστοιχα καλούνται στη βιβλιογραφία και στα υπολογιστικά μοντέλα ως «Best Linear Unbiased Estimator» ή BLUE, ένα ακρωνύμιο στο οποίο αναφέρονται τα βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου Kriging έναντι των άλλων μεθόδων χωρικής παρεμβολής [Deutsch and Journel, 1998].

3.4.5. Τύποι Ημιμεταβλητογραφήματος

Το ημιμεταβλητογράφημα περιέχει όλες τις πληροφορίες για την χωρική διακύμανση της εξεταζόμενης μεταβλητής. Πιο συγκεκριμένα, παρέχει πληροφορίες γύρω από την *χωρική συσχέτιση* που πιθανόν να εμφανίζεται από την διακύμανση της $Z(x)$, δηλαδή τη συσχέτιση μεταξύ των τιμών μίας τυχαίας συνάρτησης και των μεταξύ τους αποστάσεων στο χώρο. Εφόσον μία τέτοια συσχέτιση υφίσταται, είναι δυνατή η εφαρμογή μαθηματικών ομοιωμάτων στο πειραματικό ημιμεταβλητογράφημα με μία συνάρτηση αυτο-συσχέτισης, με αποτέλεσμα ένα ομοίωμα που να προσεγγίζει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο την χωρική διακύμανση έτσι όπως αυτή αποτυπώνεται στο πειραματικό ημιμεταβλητογράφημα. Θεωρητικά το ημιβαριόγραμμα συνδέεται με μία συνάρτηση αυτοσυσχέτισης $\rho(h)$, με μία γενική σχέση της μορφής $\gamma(h) = s^2 [1 - \rho(h)]$ όπου, s^2 η διακύμανση του πληθυσμού των δειγμάτων. Γράφοντας την πιο πάνω σχέση ως: $\rho(h) = 1 - \gamma(h)/s^2$, φαίνεται ότι η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης εξαρτάται από την διακύμανση η οποία πρέπει να είναι πεπερασμένη ώστε να έχει ισχύ η παραπάνω εξίσωση. Η ημιδιακύμανση είναι απαλλαγμένη από τον περιορισμό αυτό και για τον λόγο αυτό προτιμάται [Webster and Oliver, 2007]. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω χάρη της θεώρησης της στασιμότητας το μοντέλο βαριόγραμμα ή ημιμεταβλητογράφημα εξαρτάται πλέον μόνο από το διάστημα h της απόστασης των σημείων και όχι πλέον από τη θέση τους. Έτσι όλοι οι τύποι των μοντέλων βαριογραμμάτων αποτελούν ουσιαστικά συναρτήσεις του h . Τα κυριότερα θεωρητικά μοντέλα προσομοίωσης των εμπειρικών ημιμεταβλητογραφήματων παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.3 και είναι:

1. Το σφαιρικό (spherical)

$$\gamma(h) = c \cdot Sph\left(\frac{h}{\alpha}\right) = \begin{cases} c \cdot \left[1.5 \cdot \frac{h}{\alpha} - 0.5 \cdot \left(\frac{h}{\alpha}\right)^3 \right] & , h \leq \alpha \\ c & , h \geq \alpha \end{cases} \quad (3.57)$$

2. Το εκθετικό (exponential)

$$\gamma(h) = c \cdot Exp\left(\frac{h}{\alpha}\right) = c \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{3h}{\alpha}\right) \right] \quad (3.58)$$

3. Το κανονικό (Gaussian)

$$\gamma(h) = c \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{(3h)^2}{\alpha^2}\right) \right] \quad (3.59)$$

4. Το δυναμικό (power) το οποίο δεν εξαρτάται από φάσμα α , αλλά από τον εκθέτη $0 < \omega < 2$

$$\gamma(h) = c \cdot h^\omega \quad (3.60)$$

5. Το hole effect

$$\gamma(h) = c \cdot \left[1 - \cos\left(\frac{h}{\alpha} \cdot \pi\right) \right] \quad (3.61)$$



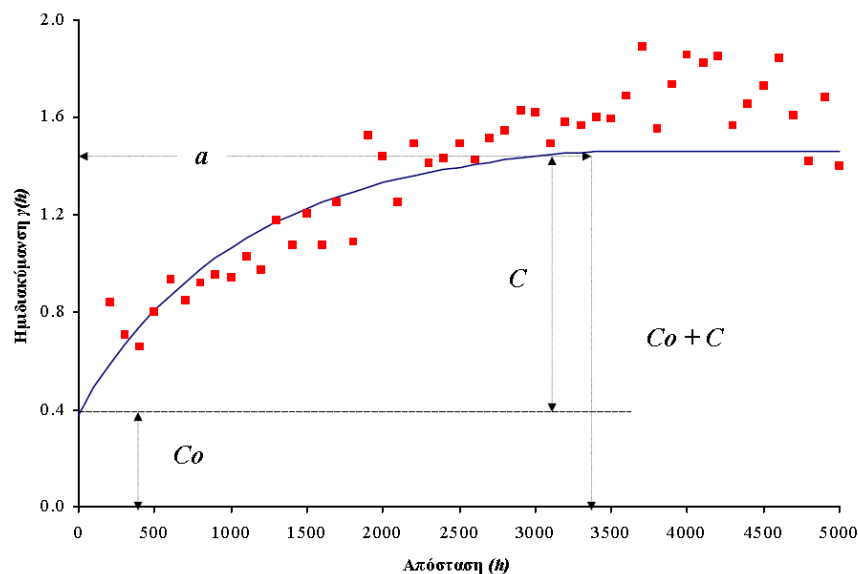
Σχήμα 3.3. Τα πέντε συνηθέστερα μοντέλα ημιμεταβλητογραφήματος.

Το πειραματικό ημιμεταβλητογράφημα παρέχει μία ποσοτική έκφραση της διακύμανσης της τυχαίας συνάρτησης που εκφράζεται από την εξεταζόμενη μεταβλητή (δείκτες ξηρασίας), όπως αυτή του Σχήματος 3.4. Οι πληροφορίες που αποκαλύπτονται από το ημιβαριόγραμμα είναι οι εξής: Η παράμετρος **nugget (Co)** είναι η χωρική διακύμανση που οφείλεται στο συστηματικό λάθος μέτρησης και δειγματοληψίας, ή σε άλλες ανεξήγητες πηγές. Η εκτίμηση του μη χωρικού θορύβου ή υπολοίπου («επίδραση βόλου») είναι ένας συνδυασμός των μικρής κλίμακας αποκλίσεων (η απόσταση των οποίων είναι μικρότερη από τη μικρότερη απόσταση μεταξύ των δειγμάτων) και των σφαλμάτων που γίνονται κατά τη συλλογή των δειγμάτων.

Η παράμετρος (**C**) ονομάζεται **structural variance** και αποτελεί την χωρική δομή της διακύμανσης που οφείλεται στην διαφοροποίηση της τυχαίας συνάρτησης Z στο χώρο, έτσι όπως καταγράφηκε από τις παρατηρήσεις. Το άθροισμα των (**Co+C**) ονομάζεται **κατώφλι (sill)**, και θεωρητικά ισούται με την διακύμανση του πληθυσμού των δειγμάτων σε μεγάλες αποστάσεις διαχωρισμού εάν απουσιάζουν τοπικές τάσεις. Αν το **nugget** είναι περίπου ίδιο με το **sill**, αυτό σημαίνει την απουσία χωρικής συσχέτισης και την τυχαία διακύμανση της Z , φαινόμενο γνωστό και ως **nugget effect** [Cressie, 1993]. Η

παράμετρος a , ονομάζεται **εύρος** ή **ακτίνα (range)**, της χωρικής συσχέτισης, και η σπουδαιότητα της έγκειται στο ότι σημεία που απέχουν μεταξύ τους απόσταση μεγαλύτερη από αυτήν, δεν παρουσιάζουν καμία χωρική συσχέτιση, κάτι που μπορεί να έχει μεγάλη σημασία στο σχεδιασμό δειγματοληπτικών μεθόδων [Webster and Oliver, 2007].

Από τα τρία αυτά χαρακτηριστικά, το range με το nugget effect παίζουν το σημαντικότερο ρόλο στη διεξαγωγή συμπερασμάτων για τη χωρική μεταβλητότητα του πεδίου. Φαινόμενα, των οποίων το βαριόγραμμα τους έχει μεγάλο εύρος και μικρή επίδραση βόλου nugget effect, χαρακτηρίζονται από καλή χωρική συνέχεια. Τέτοια είναι το υδροστατικό ύψος, το τοπογραφικό ύψος ενώ στα φαινόμενα με μικρή χωρική συνέχεια κατατάσσεται η υδραυλική αγωγιμότητα, η μεταφορικότητα και οι συγκεντρώσεις ουσιών. Τα τρία αυτά χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.4. Χαρακτηριστικά του ημιμεταβλητογραφήματος (πειραματικού ή μαθηματικού ομοιώματος).

3.5. Μεθοδολογία χωροχρονικής προσομοίωσης και παρεμβολής για το δείκτη ξηρασίας SPI

Για την χωροχρονική ανάλυση και προσομοίωση της ξηρασίας με βάση την προηγούμενη ανάλυση (Κεφάλαιο 2) στην παρούσα διατριβή ο δείκτης SPI για χρονικές κλίμακες 3-month, 6-month, 9-month, 12-month και 24-month επιλέχθηκε για τη χωροχρονική προσομοίωση διαφόρων τύπων ξηρασίας. Οκτώ (8) μεθοδολογίες χωρικής παρεμβολής εφαρμόστηκαν χωροχρονικά για την εκτίμηση της ξηρασίας στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού για την περίοδο Οκτ. 1960 – Σεπ. 2002. Οι εξεταζόμενες μέθοδοι περιλαμβάνουν απλές μη γεωστατιστικές μεθόδους, γεωστατιστικές μεθόδους και συνδυαστικές μεθόδους που ενσωματώνουν δευτερογενείς πληροφορίες. Η επιλογή βασίστηκε στη διεθνή βιβλιογραφία και στο σκοπό της παρούσας διατριβής που είναι η δημιουργία ενός κατανομμένου ψηφιακού (distributed, raster-based) συστήματος πρόγνωσης και προσομοίωσης ξηρασίας για επιχειρησιακές εφαρμογές. Σκοπός της χωροχρονικής προσομοίωσης είναι η αξιολόγηση του σφάλματος των χωρικών μεθόδων παρεμβολής στην απεικόνιση της ξηρασίας και η επιλογή της

βέλτιστης μεθόδου χωροχρονικής προσομοίωσης. Η αξιολόγηση των μεθόδων θα βασιστεί στους παραγόμενους ψηφιακούς χωρικούς χάρτες μηνιαίων τιμών του SPI για χρονικές κλίμακες 3-month, 6-month, 9-month, 12-month και 24-month ισοδιάστασης (μέγεθος φατνίου, pixel size) 1-km αλλά και σε στατιστικά κριτήρια με χρήση της τεχνικής cross-validation των 48 σταθμών ανάπτυξης και ανεξάρτητης χωρικής πιστοποίησης των 18 βροχομετρικών σταθμών (independent validation). Διαπιστωμένα γεγονότα ξηρασίας θα επιλεγθούν για την θεματική απεικόνιση των χαρτών ξηρασίας. Τέλος, η καλύτερη μέθοδος χωρικής παρεμβολής θα ενσωματωθεί στο σύστημα για τη χωροχρονική πρόγνωση των δεικτών ξηρασίας SPI και παρεμβολή των τιμών του SPI στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού της Θεσσαλίας σε μέγεθος φατνίου 1-km. Οι χωρικές μεθοδολογίες που εφαρμόστηκαν είναι:

1. Μέθοδος Πολύγωνων Thiessen (Thiessen Polygons, TP)
2. Μέθοδος αντίστροφης απόστασης (Inverse Distance Weighted, IDW)
3. Μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής kriging (Ordinary Kriging, OK)
4. Μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής simple kriging (Simple Kriging, SK)
5. Kriging with External Drift (KED)
6. Μέθοδος Regression Kriging using Elevation and spatial coordinates as external variables (RK)
7. Μέθοδος Simple Kriging with Varying Local Means with Elevation as external variable (SKIm_Z)
8. Μέθοδος Simple Kriging with Varying Local Means with Elevation and spatial coordinates as external variables (SKIm_XYZ)

Ο σκοπός των μεθόδων χωρικής παρεμβολής είναι να υπολογίσουν τις τιμές μιας τυχαίας μεταβλητής Z , σε ένα ή περισσότερα σημεία που δεν υπάρχουν δεδομένα (unsampled points) από ένα σετ δεδομένων $\{Z(x_1), Z(x_2), \dots, Z(x_n)\}$ σε γνωστά χωρικά σημεία (x_1, x_2, \dots, x_n) όπου N είναι ο αριθμός των δεδομένων του δείγματος (sample data). Οι βασικές εξισώσεις και το θεωρητικό υπόβαθρο των οκτώ μεθόδων παρεμβολής αναλύονται στη συνέχεια.

3.5.1. Μέθοδος Πολυγώνων Thiessen – Thiessen Polygons

Η μέθοδος των πολυγώνων Thiessen (ή Voronoi ή Dirichlet), είναι μια βαθμωτή μέθοδος χωρικής παρεμβολής [Thiessen, 1911]. Βασίζεται στις εξής παραδοχές [Burrough and McDonnell, 1998]:

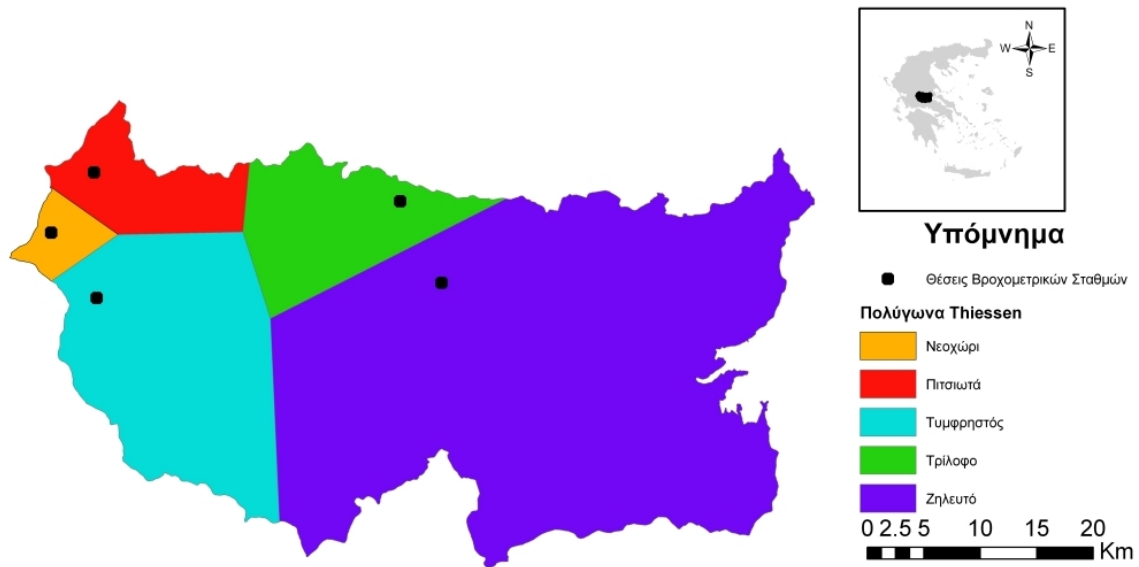
- Οι μεταβολές των ιδιοτήτων των χωρικών φαινομένων εμφανίζονται στα όρια χωρικών ενοτήτων, και
- Μέσα στα όρια των χωρικών ενοτήτων η ιδιότητα κατανέμεται με ομοιόμορφο και ισότροπο τρόπο.

Η μέθοδος χρησιμοποιεί τον γεωγραφικό χώρο (π.χ. υδρολογική λεκάνη) της περιοχής όπου σημειώνονται οι γεωγραφικές θέσεις των μετεωρολογικών σταθμών που λειτουργούν στην περιοχή. Ενώνονται με ευθύγραμμα τμήματα όλους οι γειτονικοί σταθμοί και σε κάθε τέτοια γραμμή σχεδιάζεται η μεσοκάθετή της. Οι μεσοκάθετες τέμνονται μεταξύ τους και σχηματίζουν τα πολύγωνα Thiessen, όπως ακριβώς φαίνονται στο Σχήμα 3.5. Πλευρές των πολυγώνων είναι οι μεσοκάθετοι των εκατέρωθεν σημείων των δεδομένων-παρατηρήσεων. Κάθε σημείο του γεωγραφικού χώρου έχει την

ιδιότητα του κοντινότερου σημείου των δεδομένων-παρατηρήσεων. Η Εξίσωση 3.62 περιγράφει τη μέθοδο των πολυγώνων Thiessen.

$$Z(u) = Z(x_i), h_{ui} < h_{uj} \text{ για όλα τα } i \neq j \quad (3.62)$$

όπου, where $Z(u)$ είναι η υπολογισμένη τιμή της παρεμβολής, $Z(x_i)$ η τιμή των γνωστών δεδομένων στη θέση x_i , h_{ui} η απόσταση μεταξύ της άγνωστης (unsampled) θέσης u και της γνωστής θέσης x_i , h_{uj} η απόσταση μεταξύ της άγνωστης θέσης u και της γνωστής θέσης x_j .



Σχήμα 3.5. Η μέθοδος των πολυγώνων Thiessen

Η μέθοδος πολυγώνων Thiessen είναι πολύ εύκολη στον υπολογισμό της και χρησιμοποιείται κυρίως για τον υπολογισμό της επιφανειακής βροχόπτωσης στην υδρολογική λεκάνη. Χρησιμοποιείται όμως και στην χωρική παρεμβολή σημειακών μετρήσεων αφού έχει ενσωματωθεί σε πολλά καταναμημένα υδρολογικά και περιβαλλοντικά μοντέλα για την χωρική κατανομή της βροχόπτωσης. Η καταλληλότητα της μεθόδου για χωρική παρεμβολή εξαρτάται από το μέγεθος και τη διάταξη των δεδομένων-παρατηρήσεων και έχει δεχτεί κριτική για τα προβληματικά πολύγωνα στα όρια της περιοχής και τη μεταφορά λανθασμένων δεδομένων-παρατηρήσεων σε ευρύτερες περιοχές. Για την παρούσα εργασία εφαρμόστηκε η μέθοδος των πολυγώνων Thiessen θεωρώντας ότι οι σημειακές μετρήσεις από τους μετεωρολογικούς σταθμούς είναι ικανές να περιγράψουν τη χωρική κατανομή των δεικτών ξηρασίας SPI γιατί η ξηρασία συνήθως πλήττει μεγάλες γεωγραφικές περιοχές.

3.5.2. Μέθοδος Inverse Distance Weighting - IDW

Η μέθοδος αυτή ονομάζεται και μέθοδος κινητού μέσου όρου των παρατηρήσεων με βάρη (*Spatial Moving Average*) και αποτελεί μία συνήθης προσέγγιση χωρικής παρεμβολής στην οποία αποδίδεται βάρος στα γειτονικά σημεία του δείγματος των μετρήσεων [Burrough and McDonnell, 1998]. Τα επιλεγμένα σημεία του δείγματος θα είναι τα πλησιέστερα n σημεία ή όλα τα σημεία μέσα σε μία δεδομένη ακτίνα. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του n τόσο μεγαλύτερο θα είναι το αποτέλεσμα εξομάλυνσης του μέσου όρου. Η εξομάλυνση μπορεί να εξισορροπηθεί με τη χρήση ενός μέσου όρου με βάρη, κατά την οποία το βάρος που αποδίδεται σε σημείο είναι αντιστρόφως ανάλογο της απόστασής του από το σημείο παρεμβολής. Η αντίστροφη αναλογία μπορεί να είναι γραμμική ή εκθετική (δύναμη του δύο) ώστε να παρέχει μία αντίστροφη τετραγωνική σχέση. Ουσιαστικά η μέθοδος *IDW* ακολουθεί το συμπέρασμα ότι κάθε εκτιμώμενο σημείο παρεμβολής έχει μία τοπική

επιρροή που μικραίνει με την αύξηση της απόστασης από τα μετρημένα σημεία του δείγματος. Η διαδικασία της εφαρμογής της μεθόδου απαιτεί τα εξής βήματα:

1. τον ορισμό της τοπικής περιοχής εκτίμησης – περιοχής πλησιέστερου γείτονα
2. την εύρεση του αριθμού των σημείων που οι τιμές τους θα πρέπει να ληφθούν υπόψη για την εκτίμηση
3. την επιλογή των σημείων αυτών από το σύνολο των σημείων της περιοχής μελέτης και
4. την επιλογή της μαθηματικής συνάρτησης που αντιπροσωπεύει τη διαφοροποίηση της τιμής του χαρακτηριστικού δηλαδή την διαδικασία εκτίμησης.

Η απάντηση στα δύο πρώτα βήματα γίνεται ταυτόχρονα αφού ο αριθμός των σημείων καθορίζει και την περιοχή εκτίμησης. Γενικά αν τα σημεία του δείγματος είναι πάρα πολλά σε ολόκληρη την περιοχή μελέτης η κατανομή της τιμής είναι σχετικά ομοιογενής, τότε δεν υπάρχει ανάγκη να επιλεγεί ένας μεγάλος αριθμός σημείων για την εκτίμηση. Αντίθετα αν η πυκνότητα των μετρημένων σημείων είναι μικρή τότε ο αριθμός των σημείων που πρέπει να επιλεγεί είναι μεγαλύτερος. Μία γενική μαθηματική έκφραση περιγραφής της μεθόδου *IDW* είναι:

$$z(u) = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_{ui}} \sum_{i=1}^n \lambda_{ui} z(x_i), \quad \lambda_{ui} = \frac{1}{h_{ui}^p} \quad (3.63)$$

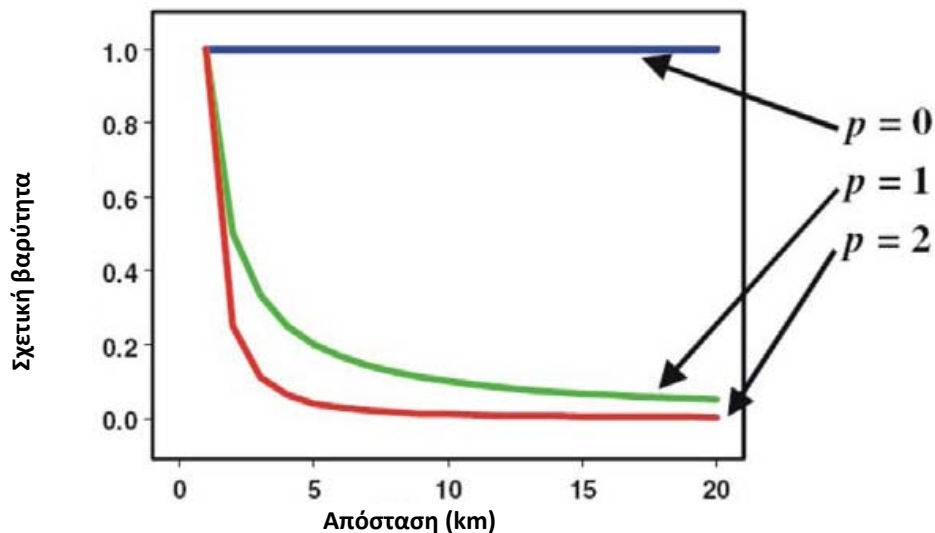
όπου: n είναι ο αριθμός των μετρημένων σημείων του δείγματος που χρησιμοποιούνται ως πλησιέστεροι γείτονες για την παρεμβολή της άγνωστης θέσης, λ_{ui} το βάρος που πρέπει να αποδοθεί σε κάθε σημείο του δείγματος στο σημείο x_i , p είναι ο εκθέτης (δύναμη) της απόστασης h_{ui} . Συνήθως η τιμή του εκθέτη είναι ίση με δύο (2) ώστε το βάρος να είναι αντιστρόφως ανάλογο προς την απόσταση από το σημείο του δείγματος. Τα $Z(u)$, h_{ui} , και $Z(x_i)$ όπως έχουν οριστεί από την μέθοδο πολυγώνων

Thiessen. Πρέπει να σημειωθεί ότι $\sum_{i=1}^n \lambda_{ui} = 1$. Όσο η απόσταση μεγαλώνει το βάρος μειώνεται με μία

παράμετρο p . Η παράμετρος αυτή παίρνει τιμές, ώστε η εκτιμηθείσα επιφάνεια να είναι όσο δυνατό πιο ομαλή. Με άλλα λόγια πόσο γρήγορα το βάρος μειώνεται εξαρτάται από την παράμετρο p . Εάν $p=0$ δεν υπάρχει μείωση με την απόσταση αφού κάθε βάρος είναι το ίδιο οπότε η πρόβλεψη είναι η μέση τιμή των μετρημένων σημείων. Εάν η παράμετρος p αυξάνεται τότε το βάρος για τα απομακρυσμένα σημεία μειώνεται γρήγορα όπως φαίνεται από το Σχήμα 3.6. Εάν η παράμετρος p είναι πάρα πολύ υψηλή μόνο οι άμεσοι λίγοι πλησιέστεροι γείτονες επηρεάζουν την εκτίμηση της μεταβλητής.

Γενικά η μέθοδος *IDW* θεωρείται μία εύκολη τεχνική με ένα σημαντικό μειονέκτημα ότι δεν εκτιμάει τιμές εκτός των ορίων του σημειακού δείγματος. Με άλλα λόγια οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές της παραγόμενης επιφάνειας που προκύπτει με την εφαρμογή της *IDW* είναι ίδιες με τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές του αρχικού σημειακού δείγματος της εκτιμώμενης μεταβλητής.

Σε αυτή τη μελέτη, n και p ορίστηκαν σε οκτώ (8) και δύο (2), αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές βασίστηκαν σε αρχικές δοκιμές της μεθόδου για την εκτίμηση του χωρικού σφάλματος των δεικτών ξηρασίας SPI. Επίσης, τους ίδιους συντελεστές χρησιμοποίησε και η μελέτη των Vasiliades and Loukas [2009b] για την παρεμβολή της μέσης μηνιαίας βροχόπτωσης στην υδρολογική λεκάνη του ποταμού Πηνειού.



Σχήμα 3.6. Η επίδραση της δύναμης στη μέθοδο IDW (διάγραμμα βάρους – απόστασης)

3.5.3. Μέθοδοι kriging

Οι μέθοδοι Kriging είναι μια ομάδα προχωρημένων γεωστατιστικών τεχνικών που παρέχουν τη βέλτιστη γραμμική αμερόληπτη εκτίμηση (best linear unbiased estimation - BLUE) που σχετίζεται με τον υπολογισμό των εκτιμητριών των αγνώστων ως γραμμικών συναρτήσεων των μετρήσεων. Οι εκτιμήτριες είναι αμερόληπτες, έχουν την ελάχιστη μεταβλητότητα, ενώ για τον υπολογισμό τους χρησιμοποιείται η μοντελοποίηση της χωρικής μεταβλητότητας. Στις μεθόδους Kriging η τυχαία μεταβλητή Z αποτελείται από την τάση (m) και τα χωρικά υπόλοιπα (e), ώστε $Z(x) = m(x) + e(x)$ [Goonaerts, 1997]. Τα βάρη των σημείων που περικλείουν τα υπολογιζόμενα σημεία βασίζονται στη χωρική εξάρτηση (π.χ. ημιμεταβλητογράφημα, ή βαριόγραμμα) του πεδίου. Για τη χωρική παρεμβολή των δεικτών ξηρασίας SPI δύο (2) γεωστατιστικές μέθοδοι μίας μεταβλητής (OK, SK) εξετάζονται και τέσσερις (4) συνδυαστικές μέθοδοι πολλών μεταβλητών (KED, RK, SKIm_Z, SKIm_XYZ) με ενσωμάτωση δευτερογενούς πληροφορίας από τις γεωγραφικές συντεταγμένες και το υψόμετρο αναλύονται. Από τις εξεταζόμενες γεωστατιστικές τεχνικές Kriging, η Simple Kriging (SK) και Ordinary Kriging (OK) περιγράφησαν αναλυτικά σε προηγούμενη παράγραφο και υπενθυμίζεται ότι η OK υποθέτει ότι η τάση είναι άγνωστη αλλά σταθερή σε όλο το πεδίο μελέτης, ενώ η SK υποθέτει ότι η τάση είναι γνωστή και σταθερή σε όλο το πεδίο μελέτης. Η OK υπολογίζει την άγνωστη τιμή των δεικτών ξηρασίας SPI σε

μία άγνωστη θέση u ως γραμμικούς συνδυασμούς των γύρω παρατηρημένων τιμών $Z(u) = \sum_{i=1}^n \lambda_{ui} Z(x_i)$,

ενώ αντίστοιχα η εκτίμηση με τη μέθοδο SK είναι $Z(u) - m(u) = \sum_{i=1}^n \lambda_{ui} [Z(x_i) - m(x_i)]$.

Kriging with External Drift (KED). Στις μεθόδους OK και SK, η χωρική τάση της τυχαίας μεταβλητής είναι σταθερή, ενώ σε πραγματικά προβλήματα κάποιες χωρικές διαδικασίες περιέχουν μεταβαλλόμενη τάση (trend ή “drift”) [Webster and Oliver, 2007]. Στη KED, η τάση $m(x)$ της τυχαίας μεταβλητής δεν είναι σταθερό και μπορεί να λάβει υπόψη και τη χωρική εξάρτηση της μεταβλητής και τη γραμμική σχέση της μεταβλητής με μία ή περισσότερες πρόσθετες μεταβλητές [Ahmed and de Marsily, 1987]. Η

βασική σχέση της τάσης $m(x)$ εκφράζεται ως $\sum_{k=0}^K \beta_k y_k(x)$, όπου $y_1(x), y_2(x), \dots, y_k(x)$ είναι γνωστές

εξωτερικές (external) μεταβλητές και οι β_k είναι άγνωστοι συντελεστές που πρέπει να υπολογιστούν [Webster and Oliver, 2007]. Η συνήθης εξίσωση για την εκτίμηση της KED είναι η ίδια με της OK αλλά το

σύστημα των εξισώσεων που χρησιμοποιούνται για την επίλυση των βέλτιστων τιμών της KED είναι διαφορετικό. Οι εξισώσεις εκφράζονται ως [Goonvaerts, 1997]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^n \lambda_{uj} \gamma_{\varepsilon}(h_{ij}) + u_0 + \sum_{k=1}^K u_k \gamma_k(x_i) = \gamma_{\varepsilon}(h_{ui}) \quad \text{για } i=1,2,\dots,n, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1, \\ \sum_{i=1}^n \lambda_{ui} \gamma_k(x_i) = \gamma_k(x_i) \quad \text{για } k=1,2,\dots,K, \end{array} \right. \quad (3.64)$$

όπου $\gamma_{\varepsilon}(h_{ij})$ είναι οι ημιδιακύμανσεις (semivariances) των υπολοίπων μεταξύ των δεδομένων τη θέση x_i and x_j ; u_k , $k = 0, 1, 2, \dots, K$, οι πολλαπλασιαστές Lagrange. Ο αριθμός των εξισώσεων που πρέπει να λυθεί εξαρτάται από τον αριθμό των πρόσθετων μεταβλητών που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της τάσης. Στη παρούσα διατριβή, οι γεωγραφικές συντεταγμένες και το υψόμετρο στο σημείο x χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της τάσης της πρωτογενούς εξεταζόμενης μεταβλητής (δείκτες ξηρασίας SPI). Έτσι, η τάση υπολογίζεται ως $m(x) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3EL$, όπου x_1 , x_2 είναι το γεωγραφικό μήκος και πλάτος, αντίστοιχα, και EL το υψόμετρο. Αξίζει να σημειωθεί ότι η συνάρτηση της ημιδιακύμανσης (ημιμεταβλητογράφημα) $\gamma_{\varepsilon}(h_{ij})$ υπολογίζεται από τα υπόλοιπα και όχι από τα παραγματικά παρατηρούμενα δεδομένα. Η διαδικασία υπολογισμού είναι δύσκολη γιατί δεν υπάρχουν παρατηρούμενες τιμές των υπολοίπων. Διαφορετικές τεχνικές έχουν προταθεί για τον υπολογισμό του ημιμεταβλητογραφήματος της KED. Ένας τρόπος υπολογισμού της χωρικής τάσης (drift) είναι η χρήση της ανάλυσης της επιφανειακής τάσης (trend surface analysis), η απομάκρυνση της από τα δεδομένα για υπολογισμό των υπολοίπων και μετά ο υπολογισμός και προσομοίωση του βαριογράμματος [Webster and Oliver, 2007]. Η γενικευμένη μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων χρησιμοποιείται για υπολογισμό της τάσης μέσα από μία επαναλαμβανόμενη διαδικασία. Οι υπολογισμοί (προσεγγίσεις) με τη διαδικασία των ελαχίστων τετραγώνων (ordinary least square, OLS) εκτιμούνται και το βαριόγραμμα υπολογίζεται στα υπόλοιπα. Στη συνέχεια το βαριόγραμμα χρησιμοποιείται στη γενικευμένη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων (generalized least squares method) για ξαναυπολογισμό της τάσης, και οι διαδικασίες επαναλαμβάνονται μέχρι οι υπολογισμοί να συγκλίνουν σε μια σταθερή τιμή και να σταθεροποιηθούν [Hengl et al., 2004].

Regression Kriging (RK). Η μέθοδος Kriging σε συνδυασμό με παλινδρόμηση (Regression Kriging), βασίζεται στο χωρικό ομοίωμα:

$$Z(x) = m(x) + e(x) \quad (3.65)$$

όπου $m(x) = \sum_{k=0}^K \beta_k \gamma_k(x)$. Η βασική σχέση της τάσης $m(x)$ εκφράζεται ως, όπου $\gamma_1(x)$, $\gamma_2(x)$, ..., $\gamma_K(x)$ είναι

γνωστές εξωτερικές (external) μεταβλητές και οι β_k είναι άγνωστοι συντελεστές που πρέπει να υπολογιστούν [Webster and Oliver, 2007]. Ο μέσος όρος της δεν είναι πλέον σταθερός όπως στην κανονική μέθοδο Kriging αλλά συνάρτηση των εξωτερικών μεταβλητών π.χ. των συντεταγμένων των χωρικών σημείων $s(x, y)$, ή χωρική τάση. Η έκφραση αυτή του μέσου όρου $m(x)$ μπορεί να είναι η ίδια για ολόκληρη την περιοχή όπου μεταβάλλεται συνάρτηση $Z(x)$. Στην περίπτωση αυτή, αναφέρεται σε χωρική τάση μεγάλης κλίμακας ή εμβέλειας (long range trend). Η εκτίμηση τότε των συντελεστών των μεταβλητών μπορεί να γίνει με πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση. Με γνωστή πλέον την μορφή του $m(x)$, η $e(x)$ εκφράζει την υπολειμματική διακύμανση για την οποία θεωρείται ότι η χωρική συσχέτιση είναι υπαρκτή, όπως και στην μέθοδο Ordinary Kriging, OK. Στη διεθνής βιβλιογραφία η μέθοδος Regression Kriging αναφέρεται επίσης ως detrended kriging ή residual kriging. Η διαφορά της με την

KED είναι ότι η RK πραγματοποιείται σε δύο στάδια υπολογισμού (πρώτα αφαίρεση της τάσης με παλινδρόμηση από δευτερογενείς μεταβλητές και μετά OK στα υπόλοιπα) ενώ η KED σε ένα στάδιο.

Γενικότερα, η έκφραση αυτή του μέσου όρου $m(x)$ μπορεί να είναι συνάρτηση όχι μόνο των συντεταγμένων των χωρικών σημείων $s(x, y)$ (περίπτωση της Universal Kriging), αλλά και οποιασδήποτε εξωγενούς μεταβλητής όπως αυτές που εκφράζουν την επίδραση των παραγόντων στην εξεταζόμενη μεταβλητή (μορφολογικά, υδρολογικά δεδομένα, γεωλογικά κ.α). Η διερεύνηση των συσχετίσεων μεταξύ των εξωγενών ή επικουρικών μεταβλητών γίνεται συνήθως με γραμμική παλινδρόμηση. Η υπόθεση που υιοθετείται στην περίπτωση αυτή είναι ότι η αιτιοκρατικής φύσεως διακύμανση $m(x)$ της υπό εξέταση μεταβλητής (δείκτες ξηρασίας SPI) λαμβάνεται από το μοντέλο παλινδρόμησης, ενώ η υπολειμματική διακύμανση $e(x)$ εμφανίζει χωρική συσχέτιση. Εφόσον η εξωγενής μεταβλητή είναι διαθέσιμη σε πολύ περισσότερα σημεία στο χώρο από την υπό εξέταση μεταβλητή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη του $m(x)$ από το μοντέλο παλινδρόμησης. Παράλληλα, η υπολειμματική διακύμανση $e(x)$ μπορεί να εκτιμηθεί από το σύστημα εξισώσεων της μεθόδου OK. Τελικά το άθροισμα των δύο εκτιμήσεων $Z(x) = m(x) + e(x)$ μας δίνει της εκτίμηση της υπό εξέταση μεταβλητής. Πολλοί μελετητές απέδειξαν την ανωτερότητα της μεθόδου Kriging σε συνδυασμό με παλινδρόμηση (RK) έναντι άλλων μεθόδων Kriging, και της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης [π.χ. Li and Hear, 2008]. Στην παρούσα μελέτη, οι γεωγραφικές συντεταγμένες και το υψόμετρο στο σημείο x χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της τάσης της πρωτογενούς εξεταζόμενης μεταβλητής (δείκτες ξηρασίας SPI). Έτσι, η τάση υπολογίζεται ως $m(x) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3EL$, όπου x_1, x_2 είναι το γεωγραφικό μήκος και πλάτος, αντίστοιχα, και EL το υψόμετρο. Οι συντελεστές b_0, b_1, b_2 , και b_3 του μοντέλου χωρικής τάσης μπορούν να υπολογιστούν με τη μέθοδο σταθμισμένη γραμμική παλινδρόμηση (weighted linear regression), όπου το μητρώο συνδιακύμανσης δίνεται από το μητρώο των βαρών [Cressie, 1993]. Αν δεν υπάρχει σημαντική χωρική περιοχική (spatial clustering) συσχέτιση στα δεδομένα οι συντελεστές της παλινδρόμησης υπολογισμένοι από την κανονική μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων (ordinary least squares) είναι παρόμοιοι με τη γενικευμένη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων βασισμένοι στο χωρικό μητρώο των υπολοίπων.

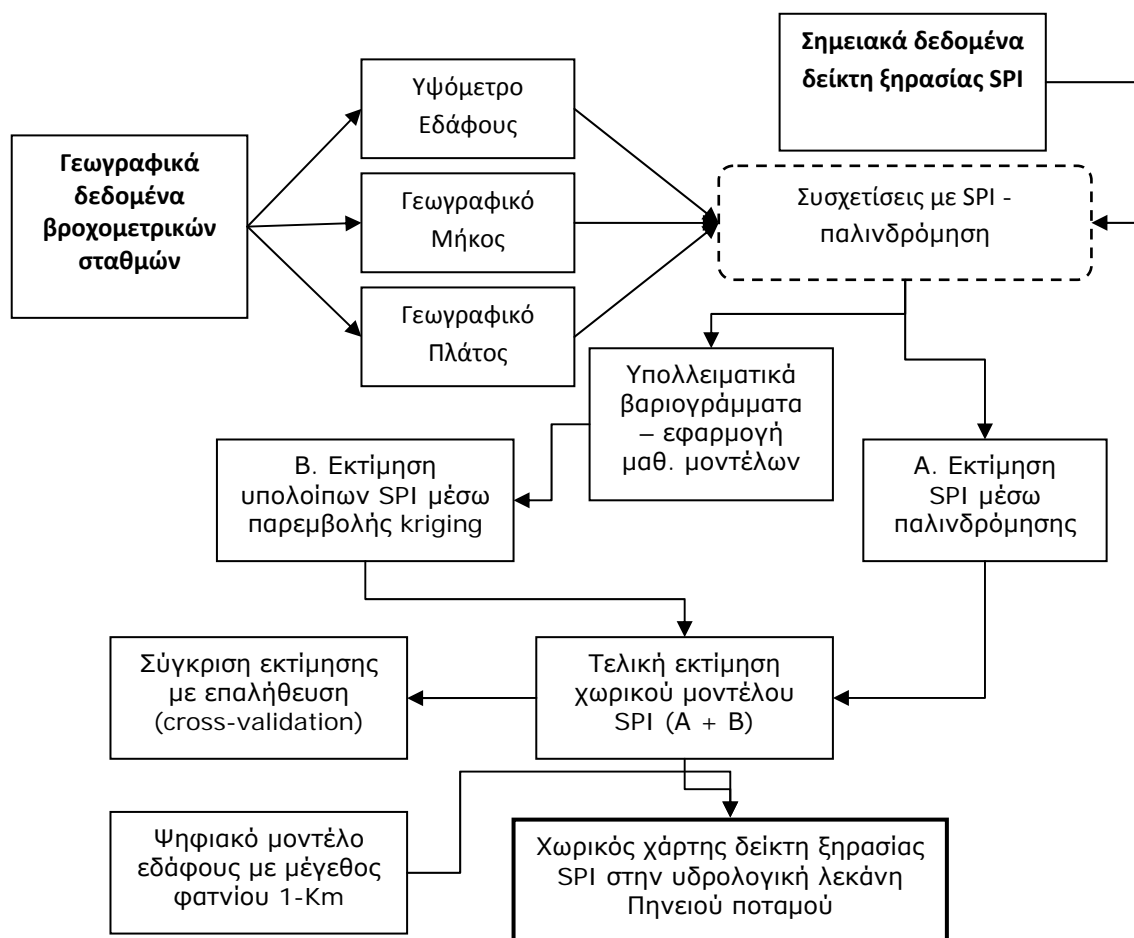
Simple Kriging with Varying Local Means (SKlm). Στη μέθοδο αυτή ο γνωστός στάσιμος μέσος της μεθόδου Simple Kriging, SK, αντικαθίσταται από γνωστούς μεταβαλλόμενους μέσους $[m(x)]$ που υπολογίζονται από τη δευτερογενή πληροφορία για τη βελτίωση της χωρικής πρόβλεψης της εξεταζόμενης μεταβλητής [Goovaerts, 1997]. Η μέθοδος έχει εφαρμοστεί για τη χωρική παρεμβολή της βροχόπτωσης [Goovaerts, 2000; Zhang and Srinivasan, 2009; Moral, 2010]. Τα βασικά στάδια υπολογισμού περιγράφονται στη συνέχεια: Πρώτα, η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων (OLS) εφαρμόζεται για την εκτίμηση των γνωστών μεταβαλλόμενων μέσων από δευτερογενής πληροφορία. Στη συνέχεια τα υπόλοιπα, που προκύπτουν από την αφαίρεση των μεταβαλλόμενων μέσων από τα πραγματικά δεδομένα, θεωρούνται ως τυχαίες μεταβλητές που πρέπει να εκτιμηθούν με τη χρήση της SK. Στο τελευταίο στάδιο, τα υπολογισμένα υπόλοιπα προσθέτονται πάλι με τους μεταβαλλόμενους μέσους ώστε να γίνουν οι εκτιμήσεις με τη μέθοδο SKlm. Οι εξισώσεις της SKlm είναι παρόμοιες με αυτές της SK. Οι εκτιμώμενες τιμές των δεικτών ξηρασίας SPI εκφράζονται ως

$$Z(u) = m(u) + \sum_{i=1}^n \lambda_{ui}^{\varepsilon} (\varepsilon_i) \quad (3.66)$$

όπου, $\lambda_{ui}^{\varepsilon}$ είναι το βάρος του υπολοίπου στο σημείο x_i , το οποίο υπολογίζεται με την επίλυση των παρακάτω εξισώσεων:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^n \lambda_{ij}^{\varepsilon} C_{\varepsilon}(h_{ji}) = C_{\varepsilon}(h_{ii}) \\ i = 1, \dots, n \end{array} \right. \quad (3.67)$$

όπου, $C_{\varepsilon}(h)$ είναι ο συντελεστής συμμεταβλητότητας των υπολοίπων ε . Περισσότερες πληροφορίες για τη μέθοδο SKlm δίνονται από τον Goovaerts [1997]. Σε αυτή τη μελέτη, ο υπολογισμός της χωρικής τάσης έγινε με δύο τρόπους. Ο πρώτος χρησιμοποιεί μόνο το υψόμετρο ως δευτερογενής μεταβλητή και συμβολίζεται ως SKlm και ο δεύτερος τις γεωγραφικές συντεταγμένες και το υψόμετρο και συμβολίζεται ως SKlm_R (βλ. KED, και RK). Η εφαρμοζόμενη μέθοδος Simple Kriging with Varying Local Means, SKlm, σε συνδυασμό με παλινδρόμηση παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.7. Το διάγραμμα ροής του σχήματος 3.7 είναι ακριβώς ίδιο και για την μέθοδο Kriging σε συνδυασμό με παλινδρόμηση (Regression Kriging), RK.



Σχήμα 3.7. Διάγραμμα ροής της μεθόδου Simple Kriging with Varying Local Means, SKlm, σε συνδυασμό με παλινδρόμηση.

3.5.4. Εφαρμογή χωρικών, γεωστατιστικών και συνδυαστικών μεθόδων

Η γεωστατιστική ανάλυση περιλαμβάνει δύο κύριες φάσεις:

- 1) την χωρική ανάλυση που περιλαμβάνει την επιλογή και προσαρμογή ενός μοντέλου που περιγράφει τη χωρική μεταβλητότητα των σημειακών μετρήσεων.

- 2) τη βέλτιστη γραμμική αμερόληπτη εκτίμηση (*best linear unbiased estimation – BLUE*) που σχετίζεται με τον υπολογισμό των εκτιμητριών των αγνώστων ως γραμμικών συναρτήσεων των μετρήσεων. Οι εκτιμήτριες είναι αμερόληπτες, έχουν την ελάχιστη μεταβλητότητα, ενώ για τον υπολογισμό τους χρησιμοποιείται η μοντελοποίηση της χωρικής μεταβλητότητας.

Οι τεχνικές της εφαρμογής των κατάλληλων θεωρητικών μαθηματικών ομοιωμάτων στα πειραματικά ημιμεταβλητογραφήματα είναι ποικίλες. Κατά γενική ομολογία, η προσπάθεια αυτή δεν αποτελεί μία μονόδρομη διαδικασία και αποτελεί σήμερα σημείο αντίφασης στο χώρο της γεωστατιστικής [Goovaerts, 1999]. Οι τεχνικές αυτές ποικίλουν από τις πλήρως αυτοματοποιημένες αριθμητικές μεθόδους, έως την υποκειμενική εφαρμογή συναρτήσεων στα πειραματικά ημιμεταβλητογραφήματα, με γραφικό τρόπο. Ακόμη, πολλοί ερευνητές υιοθετούν την άποψη ότι ένας συνδυασμός από αυτοματοποιημένες αριθμητικές μεθόδους και υποκειμενικές εκτιμήσεις των παραμέτρων (*range, sill*), αποτελεί την ρεαλιστικότερη προσέγγιση [Pannatier, 1996; Goovaerts, 1999; Webster and Oliver, 2007].

Πράγματι, μπορεί κάποιος να αισθάνεται την σιγουριά στην επιλογή ενός συγκεκριμένου μαθηματικού ομοιώματος, αν αυτή βασίζεται σε κριτήρια στατιστικής φύσεως όπως το άθροισμα των τετραγώνων των διαφορών πειραματικών – θεωρητικών τιμών. Παρόλα αυτά με την χρήση τέτοιων κριτηρίων υπάρχει ο κίνδυνος της υπεραπλούστευσης του προβλήματος της εφαρμογής ομοιωμάτων σε πειραματικά ημιμεταβλητογραφήματα, στο μαθηματικό επίπεδο της εφαρμογής συναρτήσεων σε πειραματικά δεδομένα, προσέγγιση κάθε άλλο παρά ρεαλιστική. Ο αντικειμενικός σκοπός της όλης προσπάθειας είναι η δημιουργία ενός ρεαλιστικού θεωρητικού ομοιώματος που να περιγράφει με την μεγαλύτερη δυνατή σαφήνεια την χωρική διακύμανση των δεικτών ξηρασίας SPI (3-month, 6-month, 9-month, 12-month και 24-month) που εξετάζονται. Παρόλη την μεγάλη ποικιλία μαθηματικών συναρτήσεων που χρησιμοποιούνται για θεωρητικά ομοιώματα, δεν υπάρχει μία *a priori* γνώση για τα ομοιώματα εκείνα που είναι ιδανικότερα για την χωρική περιγραφή των δεικτών ξηρασίας, και τις μεθόδους με τις οποίες αυτά εφαρμόζονται στα πειραματικά ημιμεταβλητογραφήματα. Στην πράξη, οι συναρτήσεις αυτές πρέπει να ικανοποιούν τουλάχιστο τρεις προϋποθέσεις: να τέμνονται από τον άξονα των τεταγμένων γ , να αυξάνουν μονοτονικά, και να τείνουν προς ένα μέγιστο (*sill*) [Zhang et al., 1995].

Στην παρούσα εργασία, λόγω του μεγάλου πλήθους θεωρητικών ημιμεταβλητογραφήματων που πρέπει να εφαρμοστούν για τη χωρική παρεμβολή των μηνιαίων τιμών του δείκτη ξηρασίας του SPI για όλη την περίοδο της ανάλυσης (Οκτ. 1960-Σεπ. 2002 = 504 θεωρητικά ημιμεταβλητογραφήματα) για πέντε (5) χρονικές κλίμακες του δείκτη (3-month, 6-month, 9-month, 12-month και 24-month) και για τις έξι (6) γεωστατικές και συνδυαστικές μεθόδους (Σύνολο = 15120 θεωρητικά ημιμεταβλητογραφήματα), η πλήρως αυτοματοποιημένη αριθμητική μέθοδος ακολουθήθηκε θεωρώντας ότι το σφαιρικό θεωρητικό ημιμεταβλητογράφημα προσομοιώνει ικανοποιητικά το πειραματικό ημιμεταβλητογράφημα. Η επιλογή του σφαιρικού ημιμεταβλητογραφήματος βασίστηκε στη βιβλιογραφία (συνίσταται για προσομοίωση μηνιαίων τιμών μετεωρολογικών παραμέτρων) και στις δοκιμές των γεωστατιστικών μεθόδων για χωρική παρεμβολή της μέσης μηνιαίας βροχόπτωσης στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού [Vasiliades and Loukas, 2009b]. Στη μελέτη αυτή, η μοντελοποίηση των πειραματικών ημιμεταβλητογραφήματων έγινε με συνδυασμό τεχνικών αυτοματοποιημένων αριθμητικών μεθόδων και υποκειμενικών εκτιμήσεων των παραμέτρων του ημιμεταβλητογραφήματος και έδειξε ότι τα σφαιρικά (spherical) και κανονικά (Gaussian) θεωρητικά ημιμεταβλητογράφηματα προσομοιώνουν καλύτερα τα πειραματικά ημιμεταβλητογράφηματα της μέσης μηνιαίας και υπερετήσιας βροχόπτωσης [Vasiliades and Loukas, 2009b].

Οι αριθμητικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή των παραπάνω θεωρητικών συναρτήσεων στα πειραματικά ημιμεταβλητογραφήματα είναι κυρίως οι μέθοδοι **εκτίμησης**

ελαχίστων τετραγώνων. Με τις μεθόδους αυτές καλούμαστε συνήθως να εκτιμήσουμε τις παραμέτρους $\vartheta = (C_0, C, \alpha)$, της θεωρητικής συνάρτησης $\gamma(h, \vartheta)$ που προσεγγίζει το πειραματικό ημιβαριόγραμμα, με την θεωρητική αυτή συνάρτηση να έχει τις μορφές που περιγράφηκαν παραπάνω [Cressie, 1993]. Η κανονική μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων (*ordinary least squares*) για την εκτίμηση των βέλτιστων παραμέτρων των ημιμεταβλητογραφήματων κατά την εφαρμογή των θεωρητικών

μοντέλων, στηρίζεται στην ελαχιστοποίηση του $\sum_{j=1}^k [\hat{\gamma}(h_j) - \gamma(h_j)]^2$ όπου $\hat{\gamma}(h_j)$ και $\gamma(h_j)$ οι θεωρητικές

(δηλαδή οι εκτιμούμενες από την θεωρητική συνάρτηση), και οι πραγματικές τιμές της ημιδιακύμανσης αντίστοιχα. Βασικό μειονέκτημα της μεθόδου για την εφαρμογή των θεωρητικών μοντέλων είναι η παραδοχή της κανονικής κατανομής (normal distribution) των διαφορών της παραπάνω εξίσωσης [Cressie, 1993]. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται συχνά η μέθοδος των σταθμισμένων ελαχίστων τετραγώνων (*weighted least squares*), σύμφωνα με την οποία η εκτίμηση των βέλτιστων παραμέτρων των ημιμεταβλητογραφήματων βασίζεται στην ελαχιστοποίηση του [Zhang et al., 1995]:

$\sum_{j=1}^k \frac{N(h_j)}{[\gamma(h_j)]^2} [\hat{\gamma}(h_j) - \gamma(h_j)]^2$ που σημαίνει ότι όσο μεγαλύτερος ο αριθμός των ζευγών $N(h_j)$ στο j σημείο,

τόσο μεγαλύτερο σταθμικό συντελεστή λαμβάνει η διαφορά των ημιδιακυμάνσεων στο σημείο αυτό [Cressie, 1993; Zhang et al., 1995; Xiaodong et al., 1996]. Η μέθοδος των σταθμισμένων ελαχίστων τετραγώνων χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διατριβή για τον υπολογισμό των σφαιρικών ημιμεταβλητογραφήματων για όλους τους δείκτες ξηρασίας για όλη την περίοδο της ανάλυσης (Οκτ. 1960 – Σεπ. 2002).

Η γεωστατιστική προσέγγιση στην εκτίμηση και χωρική πρόβλεψη των δεικτών ξηρασίας έτσι όπως έχει περιγραφεί ως τώρα, εμπεριέχει την πιθανότητα ή την αβεβαιότητα, με την έννοια ότι επιδιώκει την ελαχιστοποίηση της. Παρόλα αυτά διαφόρων ειδών σφάλματα υπεισέρχονται σε αυτήν την προσπάθεια, από το αρχικό στάδιο της μοντελοποίησης των πειραματικών ημιμεταβλητογραφήματων μέχρι την παρεμβολή και την εκτίμηση των παραμέτρων. Το σφάλμα της πρόβλεψης υπολογίζεται από τις κανονικές εξισώσεις Kriging που περιγράφηκαν αλλά δεν είναι αρκετό από μόνο του για την συνολική αξιολόγηση της γεωστατιστικής μεθόδου [Cressie, 1993]. Η ίδια η μεθοδολογία κατασκευής των πειραματικών ημιμεταβλητογραφήματων είναι ικανή να επηρεάσει την εμφάνιση των σφαλμάτων στο αρχικό αυτό στάδιο της ανάλυσης. Η λεπτομέρεια ή η *διακριτική ικανότητα* με την οποία τα ημιμεταβλητογραφήματα αυτά αποτυπώνουν την χωρική διακύμανση των υπό εξέταση μεταβλητών-εδαφικών ιδιοτήτων εξαρτάται άμεσα από το χωρικό βήμα h (*lag distance*). Μείωση του διαστήματος h , έχει ως συνέπεια την αύξηση των σημείων που εμφανίζονται στο ημιβαριόγραμμα, δηλαδή την αύξηση της χωρικής διακριτικής ικανότητας του. Παράλληλα όμως μειώνεται ο αριθμός των ζευγών $n(h)$ που απέχουν απόσταση h για κάθε σημείο του ημιβαριογράμματος, ελλοτώνοντας την ακρίβεια εκτίμησης της ημιδιακύμανσης για κάθε σημείο. Αυτό επιφέρει την αύξηση του σφάλματος με το οποίο το θεωρητικό ομοίωμα προσεγγίζει την χωρική διακύμανση, όπως αυτό υπολογίζεται από κάποιο στατιστικό κριτήριο όπως το μέσο τετραγωνισμένο σφάλμα (Mean Square Error, MSE), ή το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (Root Mean Square Error, RMSE). Οι τεχνικές με τις οποίες επιλέγεται το κατάλληλο πειραματικό ημιβαριόγραμμα και η βέλτιστη συνάρτηση προσέγγισης του είναι αρκετές. Η τεχνική *jack-knifing* ή διασταυρωμένη επιβεβαίωση των προβλέψεων (*cross-validation*) είναι ευρέως διαδεδομένη σήμερα στην εκτίμηση της καταλληλότητας των εφαρμοζόμενων θεωρητικών μοντέλων στα πειραματικά ημιβαριογράμματα. Η βασική ιδέα έγκειται στην απαλοιφή μίας τιμής από το σύνολο των χωρικών δεδομένων, και η χρησιμοποίηση των υπολοίπων με τις εξισώσεις της μεθόδου *Kriging*, για την πρόβλεψη της. Η επανάληψη της διαδικασίας για το σύνολο των τιμών παρέχει τη δυνατότητα της σύγκρισης των εκτιμώμενων $\hat{z}(x_i)$ με τις πραγματικές τιμές $z(x_i)$ για κάθε χωρική θέση i , και την εκτίμηση της ακρίβειας των προβλέψεων με τη χρήση στατιστικών κριτηρίων (π.χ. MSE, RMSE). Πρέπει να σημειωθεί τέλος ότι, αν και οι γεωστατιστικές μέθοδοι εκτιμούν και τη διακύμανση του σφάλματος

(error variance) της χωρικής πρόβλεψης η τιμή αυτή του σφάλματος δεν λήφθηκε υπόψη στην συγκεκριμένη διατριβή ως μέθοδος αξιολόγησης γιατί δεν αρκεί για να οριοθετήσει την αξιοπιστία των υπολογισμών με τις μεθόδους Kriging [Armstrong, 1998]. Η τεχνική cross-validation με τη χρήση στατιστικών κριτηρίων εφαρμόστηκε για όλες τις εξεταζόμενες χωρικές, γεωστατιστικές και συνδυαστικές μεθοδολογίες.

Τέλος, όπως προτείνεται και από την πλειονότητα των ερευνητών σαν τον τελικό έλεγχο της απόδοσης της μεθόδου πρόβλεψης, ένα μέρος των διαθέσιμων δεδομένων παραμένει εκτός της διαδικασίας ανάλυσης και πρόβλεψης σχηματίζοντας έτσι ένα σετ επαληθεύσεως των προβλέψεων που η μέθοδος μας δίνει για τις θέσεις αυτές. Η αποτελεσματικότητα της πρόβλεψης εκτιμάται από τις διαφορές μεταξύ των τιμών πρόβλεψης $z^*(x_i)$ και των τιμών επαλήθευσης $z(x_i)$, με την χρήση κατάλληλων δεικτών σφαλμάτων όπως και παραπάνω για όλες τις εξεταζόμενες χωρικές, γεωστατιστικές και συνδυαστικές μεθοδολογίες .

4. ΧΩΡΟΧΡΟΝΙΚΗ ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΞΗΡΑΣΙΑΣ

Τα περιβαλλοντικά προβλήματα θέτουν ιδιαίτερες προκλήσεις για την μηχανική μάθηση. Από τη φύση τους είναι προβλήματα συνεχή, πολυδιαστασιακά, δυναμικά και χαοτικά. Το γεγονός αυτό έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη μιας νέας κατεύθυνσης που λέγεται Περιβαλλοντική Πληροφορική (Environmental Informatics), η οποία εξετάζει τα περιβαλλοντικά προβλήματα που σχετίζονται με την εφαρμογή των τεχνικών της επιστήμης των υπολογιστών. Η επεξεργασία των δεδομένων μέτρησης και οι σχετικές μέθοδοι της στατιστικής ανάλυσης των δεδομένων, όπως επίσης ο χειρισμός της ασαφούς, ανολοκλήρωτης και ελλιπούς γνώσης στην κατηγορία αυτή προβλημάτων είναι βασική πρόκληση της Περιβαλλοντικής Πληροφορικής. Επιπλέον, πρόσθετοι στόχοι είναι η υποστήριξη της εύκολης πρόσβασης των χρηστών σε ετερογενείς κατανεμημένες περιβαλλοντικές βάσεις δεδομένων. Σαν προϋπόθεση των παραπάνω, η πληροφορία πριν την τελική της επεξεργασία θα πρέπει να έχει αντληθεί από διαφορετικές πρωταρχικές βάσεις δεδομένων και κατόπιν να οργανωθεί και να μετασχηματιστεί με κατάλληλο τρόπο σε μία ολοκληρωμένη μορφή. Αλλά και μετά την επεξεργασία τα περιβαλλοντικά δεδομένα και τα ευρήματα της επεξεργασίας θα πρέπει να παρουσιαστούν και να αξιολογηθούν με βάση κάποιες κοινές τυποποιήσεις ανά είδος προβλήματος.

Οι τεχνικές μηχανικής μάθησης είναι πολύ χρήσιμες στην Περιβαλλοντική Πληροφορική και Υδροπληροφορική (Hydroinformatics). Τα τελευταία χρόνια πληθαίνουν οι εφαρμογές της μηχανικής μάθησης για την αντιμετώπιση περιβαλλοντικών και υδρολογικών προβλημάτων. Τεχνικές όπως οι γενετικοί αλγόριθμοι, τα νευρωνικά δίκτυα, η ασαφής λογική, τα έμπειρα συστήματα, τα δέντρα απόφασης και άλλες μέθοδοι από τους τομείς της επεξεργασίας σημάτων και από την αναγνώριση προτύπων και την στατιστική αντιμετώπιζουν με επιτυχία τη δύσκολη φύση αυτών των προβλημάτων, όπως προκύπτει από την πληθώρα εργασιών κατά τα τελευταία χρόνια [Abrahart et al., 2008]. Στην παρούσα εργασία, εφαρμόζονται οι μέθοδοι της μηχανικής μάθησης για την χωρική και χρονική πρόγνωση των διαφόρων τύπων της ξηρασίας με τη χρήση του μετεωρολογικού δείκτη ξηρασίας SPI.

Οι δείκτες SPI υπολογισμένοι για χρονικές κλίμακες 3-μηνών, 6- μηνών, 9- μηνών, 12- μηνών και 24-μηνών επιλέχθηκαν για τη χωροχρονική πρόγνωση διαφόρων τύπων ξηρασίας. Με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία, αλλά και το σκοπό της διατριβής για χωροχρονική προσομοίωση και πρόγνωση της ξηρασίας για βραχυπρόθεσμες και μεσοπρόθεσμες δράσεις περιγράφεται αναλυτικά η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε. Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται οι μέθοδοι χωροχρονικής πρόγνωσης που παρουσιάζονται στη διεθνή βιβλιογραφία. Σημειώνεται ότι μέχρι σήμερα η χωρική και χωρική πρόγνωση (forecasting) της εξεταζόμενης μεταβλητής βασίζεται κυρίως σε μεθόδους της μηχανικής μάθησης (machine learning) και εξόρυξης ή εξαγωγής δεδομένων (data mining). Η χωροχρονική εξόρυξη δεδομένων (spatiotemporal data mining) είναι η αναζήτηση των αγνώστων και κρυμμένων γνώσεων, δομών, και χωροχρονικών σχέσεων που δεν είναι εύκολα κατανοητές σε χωροχρονικές βάσεις δεδομένων. Η ολοκληρωμένη (integrated) χωροχρονική πρόγνωση αποτελεί σήμερα ένα πεδίο τεράστιου ενδιαφέροντος λόγω των χωρικών και χρονικών χαρακτηριστικών που πρέπει να ενσωματωθούν στην ανάλυση. Η πρόκληση της χωροχρονικής πρόγνωσης είναι πως θα ενσωματωθούν ταυτόχρονα οι χωρικές και χρονικές προγνώσεις. Η ενσωμάτωση των χωροχρονικών χαρακτηριστικών σε μελέτες πολύπλοκων φαινομένων αποτελεί αντικείμενο έρευνας θεωρητικών, μεθοδολογικών και εφαρμοσμένων μελετών [MacEachren et al., 1999; Swetnam et al., 1999; Mennis and Peuquet 2000; Ward et al., 2000; Peuquet 2001, 2002, 2005; Bertolotto et al. 2007; Pebesma et al. 2007]. Η πρόγνωση (forecasting), μία τεχνική της μηχανικής μάθησης, χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη των άγνωστων μελλοντικών τιμών με βάση τις κρυμμένες σχέσεις των τωρινών και των προηγούμενων τιμών [Dunham, 2003]. Η χωροχρονική πρόγνωση αναπτύχθηκε από ξεχωριστές χρονικές η χωρικές

προγνώσεις με τη χρήση προχωρημένων τεχνικών. Έτσι, λοιπόν, κατά τα τελευταία χρόνια αναπτύχθηκαν πολλά χωροχρονικά μοντέλα πρόγνωσης [π.χ. Deutsch and Ramos, 1986; Pfeifer and Deutsch, 1990]. Για παράδειγμα, μέθοδοι ανάλυσης χρονοσειρών ή χωρικές τεχνικές, επεκτείνονται στη χωρική ή χρονική κλίμακα, αντίστοιχα, για χωροχρονική πρόγνωση ή συνδυάζονται γραμμικά ως χωροχρονική ολοκλήρωση [Li and Dunham, 2003]. Ο γραμμικός συνδυασμός όμως των χωρικών και χρονικών διαστάσεων είναι μια υπεραπλούστευση των χωροχρονικών σχέσεων που παρουσιάζονται σε σύνθετα γεωγραφικά φαινόμενα [Cheng and Wang, 2006].

Στην κατηγορία χρονική μέθοδος και επέκτασής της στο χώρο υπάρχουν πάρα πολλές μελέτες. Κλασικά παραδείγματα εφαρμογής χρονικών μοντέλων στο χώρο είναι μελέτες εκθετικής εξομάλυνσης (exponential smoothing), κυλιόμενων μέσων όρων (simple/weighted moving averages), αυτοπαλινδρομων κινητών μέσων όρων (ARIMA) προσαρμοζόμενων/σταθερών παραμέτρων, ανάλυση τάσεων και τεχνικές παλινδρόμησης (π.χ. νευρωνικά δίκτυα, μηχανές διανυσμάτων απόφασης, support vector machines) [Armstrong, 1984; Adya and Collopy, 1998; Zhang et al., 1998; De Gooijer and Hyndman, 2006; Gardner, 2006]. Ένα μεγάλο μέρος των μελετών αναφέρεται επίσης σε χρονικά μοντέλα εκτίμησης της αυτοσυσχέτισης στα υπόλοιπα των μεθόδων παλινδρόμησης [Wie, 1990; Kedem, 1993; Chatfield, 2004; Box et al., 2008]. Τα κύρια μοντέλα εφαρμογής είναι μοντέλα της γενικής κατηγορίας ολοκλήρωσης και αυτοπαλινδρόμησης κινητού μέσου όρου (ARIMA models), τα οποία υποθέτουν ότι τα υπόλοιπα παλινδρόμησης των ιστορικών δεδομένων συσχετίζονται, χρησιμοποιούνται μέσω μαθηματικών υπολογισμών για την πρόγνωση με τη χρήση παλινδρόμησης με ένα ανεξάρτητο όρο σφάλματος.

Η έρευνα στην ανάλυση χωρικής και χωρικής πρόγνωσης (και όχι μόνο χωρικά ή χρονικά) χρησιμοποιεί μία γενικευμένη τεχνική παλινδρόμησης που μεταβάλλεται με την χωρική απόσταση των σημειακών ιστορικών δεδομένων. Οι γεωστατιστικές μέθοδοι, που σχετίζονται με τις μη στάσιμες ιδιότητες των περιβαλλοντικών δεδομένων και υπολογίζουν και τη χωρική αυτοσυσχέτιση, αρχικά εφαρμόστηκαν αποκλειστικά για χωρική πρόγνωση (βλ. Κεφάλαιο 3). Αργότερα, μία πιο γενικευμένη χωροχρονική γεωστατιστική προσέγγιση δημιουργήθηκε προσθέτοντας το χρόνο ως πρόσθετη διάσταση του χώρου [Kyriakidis and Journel, 1999]. Οι πιο προχωρημένες γεωστατιστικές προσεγγίσεις που λαμβάνουν υπόψη σχεσιακές εξαρτήσεις του σύνθετου χωροχρονικού συστήματος [Christakos, 1992; Christakos 2000], άρχισαν να βρίσκουν εφαρμογή σε διάφορες χωροχρονικές εφαρμογές [Vyas and Christakos 1997; Kyriakidis and Journel 2001a,b; Boucher et al., 2006] και πρόσφατα στη χωροχρονική πρόγνωση [Lee et al., 2010]. Με βάση τα παραπάνω, στην παρούσα διατριβή η πρώτη κατηγορία (χρονική πρόγνωση και επέκταση στο χώρο) ακολουθήθηκε, γιατί έχει εφαρμοστεί σε πολλές μελέτες, έχει τη δυνατότητα σύγκρισης και επιλογής βέλτιστων χρονικών μοντέλων πρόγνωσης και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για βραχυπρόθεσμες και μεσοπρόθεσμες προγνώσεις. Επιπλέον, μπορεί άνετα να συνδυαστεί με μία μέθοδο χωρικής παρεμβολής για χωροχρονική πρόγνωση. Έτσι, η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε βασίζεται στην χωροχρονική εφαρμογή χρονικών μεθόδων της μηχανικής μάθησης. Επιλέχθηκαν χρονικά και χωρικά τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ANN) για την ταυτόχρονη σημειακή χωροχρονική πρόγνωση για βραχυπρόθεσμες και μεσοπρόθεσμες προγνώσεις των δεικτών ξηρασίας SPI από ένα (1) έως έξι (6) μήνες μπροστά. Τα μελετώμενα χρονικά διαστήματα της πρόγνωσης κρίνονται άκρως ικανοποιητικά για την πρόγνωση της ξηρασίας, ώστε οι αντίστοιχες δραστηριότητες και δράσεις να μπορούν να υλοποιηθούν, προκειμένου να προληφθούν και να περιοριστούν οι επιπτώσεις από την ξηρασία. Τέτοιες δραστηριότητες και δράσεις είναι απαραίτητες στην ανάπτυξη συγκεκριμένων προσπαθειών σχεδιασμού διαχείρισης της ξηρασίας [Iglesias et al., 2007a,b]. Η συνεχής προσομοίωση, παρακολούθηση, και η πρόγνωση της ξηρασίας είναι το απαραίτητο πρώτο βήμα για τη μετάβαση από την κρίση στη διαχείριση της επικινδυνότητας κατά την αντιμετώπιση της ξηρασίας. Έτσι, μπορούν οι φορείς που ασκούν πολιτική σε θέματα διαχείρισης υδατικών πόρων να πάρουν μέτρα αντιμετώπισης της ξηρασίας.

Στις επόμενες ενότητες της παρούσας εργασίας παρουσιάζεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση των χρονικών μεθόδων πρόγνωσης στην ξηρασία και στη συνέχεια περιγράφονται περιληπτικά οι μέθοδοι της μηχανικής μάθησης που είναι κατάλληλες για χρονική πρόγνωση. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα και στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης, που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή για την σημειακή χωροχρονική πρόγνωση. Τα πολυεπίπεδα προς τα εμπρός τροφοδοτούμενα νευρωνικά δίκτυα (feed-forward multilayer artificial neural networks, γνωστά και ως multilayer perceptrons, MLPs) εφαρμόστηκαν στις χρονοσειρές του SPI για πρόγνωση από ένα έως έξι επόμενα χρονικά βήματα (lead times) με σκοπό τη διαχείριση των ξηρασιών για βραχυπρόθεσμες (1-2 μήνες μπροστά) και μεσοπρόθεσμες (3-6 μήνες μπροστά) δράσεις. Για την πρόγνωση πολλαπλών χρονικών βημάτων εφαρμόστηκαν δύο μέθοδοι πρόγνωσης με νευρωνικά δίκτυα. Η ευθεία μέθοδος πρόγνωσης που στηρίζεται αποκλειστικά στις προηγούμενες τιμές του SPI και η επαναληπτική μέθοδος πρόγνωσης που ενσωματώνει τις προγνώσεις του προηγούμενου χρονικού βήματος πρόγνωσης. Οι δύο χρονικές τεχνικές (DANN και RANN) εφαρμόστηκαν χρονικά για όλους τους σταθμούς ανάπτυξης και χωρικής πιστοποίησης για την παραγωγή ενός γενικευμένου (generalized) χρονικού μοντέλου για χωροχρονική εφαρμογή. Η σύγκριση των δύο τεχνικών αναδεικνύει την κατάλληλη χρονική μέθοδο που πρέπει να ακολουθείται για πρόγνωση πολλαπλών χρονικών βημάτων του δείκτη SPI. Στη συνέχεια, οι χρονικές προγνώσεις της καλύτερης τεχνικής ενσωματώνονται σε ένα χωρικό αναδρομικό νευρωνικό δίκτυο (spatial recurrent neural network, RNN) τύπου Elman [Elman, 1990]. Η χωροχρονική εφαρμογή έγινε για τους 48 σταθμούς ανάπτυξης για την περίοδο Οκτ. 1960 – Σεπ. 1992. Στα υπόλοιπα 10 χρόνια (Οκτ. 1992 – Σεπ. 2002) πραγματοποιήθηκε η χρονική πιστοποίηση της μεθοδολογίας. Επίσης, η μεθοδολογία εφαρμόστηκε και για την ανεξάρτητη χωρική και χρονική πιστοποίηση των 18 βροχομετρικών σταθμών που δεν χρησιμοποιήθηκαν στην εκπαίδευση της μεθόδου. Η αξιολόγηση της μεθόδου έγινε με στατιστικά κριτήρια με βάση τις παρατηρημένες τιμές των δεικτών ξηρασίας και με βάση τον αλγόριθμο αναφοράς του μοντέλου εμμονής. Τέλος, η μεθοδολογία χωροχρονικής πρόγνωσης συνδέεται με την καλύτερη μεθοδολογία χωρικής παρεμβολής για τη δημιουργία ψηφιακών χαρτών διαστάσεως 1-km του δείκτη SPI για χρονικές κλίμακες 3-μηνών, 6-μηνών, 9-μηνών, 12-μηνών και 24-μηνών. Το υβριδικό σύστημα (χωροχρονική πρόγνωση και χωρική παρεμβολή) αξιολογείται, τόσο σημειακά για όλη την περίοδο της ανάλυσης, όσο και με τη σύγκριση των παραγόμενων χαρτών απεικόνισης των τύπων της ξηρασίας. Για τη θεματική απεικόνιση των παραγόμενων ψηφιακών χαρτών πρόγνωσης επιλέχθηκαν ιστορικά ακραία και δριμύ γεγονότα ξηρασίας. Η σύγκριση των προγνωστικών χαρτών έγινε με τους αντίστοιχους χάρτες των παρατηρημένων τιμών του SPI που προέκυψαν από τη μεθοδολογία χωροχρονικής προσομοίωσης. Για την αξιολόγηση της προτεινόμενης υβριδικής μεθοδολογίας (χωροχρονική πρόγνωση και χωρική παρεμβολή προγνώσεων) στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού εκτιμήθηκαν ποσοτικά και ποιοτικά στατιστικά κριτήρια ελέγχου της πρόγνωσης για βραχυπρόθεσμες και μεσοπρόθεσμες δράσεις.

4.1. Εφαρμογές μηχανικής μάθησης στην πρόγνωση ξηρασίας

Ένα επιχειρησιακό σύστημα προειδοποίησης της ξηρασίας πρέπει να βασίζεται στην αναγνώριση των τύπων ξηρασίας και να προβλέπει έγκαιρα τη διάρκεια και τη δριμύτητα των γεγονότων ξηρασίας, αλλά και την έκταση που πλήττεται από αυτά, ώστε να μπορούν οι διαχειριστικοί φορείς να προβούν στη χρήση μέτρων αν είναι απαραίτητο. Κατά τα τελευταία χρόνια παρουσιάστηκε σημαντικός αριθμός μελετών για την προσομοίωση των χαρακτηριστικών της ξηρασίας, όπως για την αναγνώριση και την πρόγνωση της δριμύτητας και της διάρκειας των τύπων ξηρασίας. Τα μοντέλα ανάλυσης χρονοσειρών (π.χ. ARMA models), τεχνικές αναγνώρισης προτύπων, μοντέλα φυσικής βάσης (π.χ. PDSI, SPI), ή η

θεωρία των πιθανοτήτων (π.χ. της εξαρτημένης πιθανότητας conditional probability), φαίνονται ότι προσφέρουν αξιόπιστες και σταθερές προγνώσεις για την αναγνώριση της ξηρασίας [Panu and Sharma, 2002]. Προϋπόθεση των μεθόδων πρόγνωσης για την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων της ξηρασίας είναι η ικανότητα τους να προβλέπουν έγκαιρα τα χαρακτηριστικά αυτής προτού αυτά εμφανιστούν. Η έγκαιρη πρόγνωση της ξηρασίας μέχρι και λίγους μήνες πριν την εμφάνιση της μπορεί να επιτύχει τη βέλτιστη λειτουργία των εγγειοβελτιωτικών και υδροτεχνικών έργων.

Ο Yevjevich [1967] ήταν από τους πρώτους που μελέτησε τα χαρακτηριστικά της ξηρασίας με τη χρήση της γεωμετρικής κατανομής και όρισε την ξηρασία των k ετών ως k συνεχόμενα έτη στα οποία παρουσιάζονταν υδατικά ελλείμματα. Οι Saldariaga and Yevjevich [1970] χρησιμοποίησαν τη θεωρία run theory για την πρόγνωση των συμβάντων ξηρασίας και ο Sen [1976, 1977] επέκτεινε τη μεθοδολογία run theory για την εκτίμηση των ετησίων παροχών και την πρόγνωση των υδατικών πόρων. Γενικά, η run theory αποτελεί συνήθως τη μεθοδολογία για την εκτίμηση των μετρήσεων παροχών [π.χ. Moye et al., 1998; Sen, 1998; Modarres, 2007]. Οι Rao and Padmanabhan [1984] χρησιμοποίησαν στοχαστικά μοντέλα για την πρόγνωση των ετήσιων και μηνιαίων τιμών του δείκτη PDSI. Σε μία άλλη μελέτη [Sen, 1990], παρουσιάστηκαν ακριβείς αναλυτικές κατανομές πιθανότητας της κρίσιμης διάρκειας της ξηρασίας με βάση στάσιμα μοντέλα 2^{ης} τάξης των ανεξίτητων Markov για ορισμένης διάρκειας δεδομένων, που χρησιμοποιήθηκαν στην πρόγνωση της διάρκειας ξηρασίας των υδρολογικών διεργασιών. Οι Kendel and Dracup [1992] πρότειναν μια μηχανή αναπαραγωγής συμβάντων ξηρασίας με τη χρήση του μοντέλου alternating renewal–reward model. Οι Loaiciga and Leirnik [1996] προσομοίωσαν την εμφάνιση των γεγονότων ξηρασίας με μία ανανεώσιμη τεχνική (renewal process). Για τον χαρακτηρισμό της στοχαστικής συμπεριφοράς της ξηρασίας, οι Lohani and Loganathan [1997], και οι Lohani et al., [1998] χρησιμοποίησαν τον PDSI σε ένα μοντέλο μη-ομογενών ανεξίτητων Markov για ένα σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης για την πρόγνωση και διαχείριση της ξηρασίας. Η πρόγνωση της ξηρασίας με βάση τις στοχαστικές ανεξίτητες Markov αποτελεί μία αξιόπιστη μεθοδολογία για προγνώσεις βραχείας διάρκειας [Steinemann, 2003; Cancelliere and Salas, 2004; Paulo et al. 2005; Moreira et al., 2006; Paulo and Pereira 2007, 2008], αλλά δεν μπορεί να αποδώσει ικανοποιητικά μεσοπρόθεσμες προγνώσεις [Cancelliere et al., 2007].

Άλλοι ερευνητές χρησιμοποίησαν μεθόδους μηχανικής μάθησης και θεωρίες ανάλυσης χρονοσειρών με τα μοντέλα Box-Jenkins για την πρόγνωση των χαρακτηριστικών της ξηρασίας. Η εφαρμογή των μοντέλων έγινε για παροχές ποταμών λεκανών απορροής [Panu et al., 1978; Salas and Obeysekera 1982; Crespo and Mora, 1993; Shin and Salas, 2000; Hanson et al. 2004; Yurekli et al. 2005; Modarres, 2007; Abebe and Foerch, 2008; Fernandez et al., 2009; Durdu, 2010] και για μετεωρολογικούς δείκτες ξηρασίας [Kim and Valdes 2003; Mishra and Desai, 2005; Morid et al., 2007; Vasiliades and Loukas, 2007; Bacanli et al., 2009]. Οι Chung and Salas [2000] υπολόγισαν τις πιθανότητες των συμβάντων ξηρασίας με τη χρήση διακριτών ARMA (Discrete ARMA, DARMA) μοντέλων χαμηλής τάξης. Οι Kim and Valdes [2003] με τη χρήση του PDSI ως δείκτη ξηρασίας υπολόγισαν περιοχική πρόγνωση ως 12 μήνες μπροστά με βάση δυαδικούς κυματιδικούς μετασχηματισμούς (dyadic wavelet transforms) και τεχνητά νευρωνικά δίκτυα στην υδρολογική λεκάνη του ποταμού Conchos στο Μεξικό. Σύμφωνα με αυτή τη μελέτη είναι δυνατή η πρόγνωση των τιμών του PDSI μέχρι έξι μήνες μπροστά. Μετά τους 6 μήνες η πρόγνωση με τη μεθοδολογία τους γίνεται ίδια με την πρόγνωση από τον επίμονο προβλέπτη [Kim and Valdes, 2003]. Οι Bordi et al. [2005] συνέκριναν δύο στοχαστικές μεθοδολογίες, δηλαδή ένα μοντέλο Box-Jenkins και μία καινούργια μεθοδολογία Gamma Highest Probability (GAHP), για πρόγνωση της τιμής της μελλοντικής βροχόπτωσης για το επόμενο χρονικό βήμα (lead time = 1). Η μέθοδος GAHP προβλέπει την βροχόπτωση του επόμενου χρονικού βήματος ως συνάρτηση της Γάμμα (Gamma) κατανομής που προσαρμόζεται στις παρατηρούμενες τιμές βροχόπτωσης, ενώ το αυτοπαλίνδρομο μοντέλο 1^{ης} τάξης εφαρμόστηκε για την εκτίμηση της αντίστοιχης μελλοντικής βροχόπτωσης. Η σύγκριση έδειξε ότι η μέθοδος GAHP είναι ελαφρώς καλύτερη για την εκτίμηση της επόμενης τιμής του μηνιαίου δείκτη SPI-1month κυρίως την άνοιξη και το καλοκαίρι σε 36 βροχομετρικούς σταθμούς στη Σικελία της Ιταλίας [Bordi et al., 2005]. Οι Cancelliere et al. [2007] πρότειναν δύο μεθοδολογίες για την

εποχική πρόγνωση του δείκτη SPI με την προϋπόθεση της ασυσχέτιστης και μηνιαίας κανονικής κατανομής βροχόπτωσης υπολογισμένης σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες. Στην πρώτη μεθοδολογία, το μητρώο αυτοσυσχέτισης των τιμών του SPI υπολογίστηκε αναλυτικά ως συνάρτηση των στατιστικών χαρακτηριστικών της μηνιαίας βροχόπτωσης για τον υπολογισμό των μελλοντικών πιθανοτήτων μετάβασης από μία κατάσταση ξηρασίας σε άλλη κατάσταση. Στη δεύτερη μεθοδολογία οι προγνώσεις του SPI σε ένα επιλεγμένο χρονικό ορίζοντα M ($M = 1, 3, 6, 12$ μήνες) υπολογίστηκαν αναλυτικά ως εξαρτώμενες μεταβλητές των προηγούμενων τιμών της μηνιαίας βροχόπτωσης. Οι δύο μεθοδολογίες εφαρμόστηκαν σε 43 βροχομετρικούς σταθμούς της Σικελίας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι προτεινόμενες τεχνικές μπορούν να εφαρμοστούν ικανοποιητικά σε επιχειρησιακά προγράμματα διαχείρισης της ξηρασίας για βραχείες και μεσοπρόθεσμες δράσεις [Cancelliere et al., 2007].

Οι Mishra and Desai [2005] εφάρμοσαν εποχικά μοντέλα ARIMA (seasonal autoregressive integrated moving average, SARIMA) για την επιφανειακή πρόγνωση του SPI υπολογισμένου σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες και για χρονικά διαστήματα από ένα (1) μήνα έως 6 μήνες μπροστά στην υδρολογική λεκάνη του ποταμού Kansabati στην Ινδία. Επίσης, στην ίδια λεκάνη η εφαρμογή των νευρωνικών δικτύων [Mishra and Desai, 2006] και ενός συνδυαστικού (υβριδικού) μοντέλου που αποτελείται από εποχικά μοντέλα ARIMA και νευρωνικά δίκτυα για τα υπόλοιπα των SARIMA [Mishra et al., 2007] έδειξαν ότι οι προγνώσεις βελτιώνονται για μεσοπρόθεσμα διαστήματα πρόγνωσης από 3 μήνες μπροστά. Επίσης, σε μία άλλη μελέτη παρόμοια αποτελέσματα παρουσιάστηκαν για την πρόγνωση της ξηρασίας με χρήση του δείκτη ξηρασίας SPI υπολογισμένου για χρονικές κλίμακες 3-month, 6-month, 9-month, 12-month και 24-month στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού [Vasiliades and Loukas, 2007]. Η μελέτη αυτή συγκρίνει γραμμικά προσδιοριστικά μοντέλα πολλαπλής παλινδρόμησης (MLR), γραμμικά στοχαστικά μοντέλα ανάλυσης χρονοσειρών (ARIMA και SARIMA μοντέλα), τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ANN) και υβριδικά συνδυαστικά μοντέλα (MLR+ANN, ARIMA+ANN) για προγνώσεις διαφόρων τύπων ξηρασίας όπως προσδιορίζονται από τους δείκτες ξηρασίας SPI. Τα μοντέλα συγκρίθηκαν για την επιφανειακή πρόγνωση των τιμών του SPI για χρονικά διαστήματα από ένα έως έξι μήνες μπροστά (lead times 1 – 6). Η ανάπτυξη των μοντέλων έγινε για την περίοδο Οκτ. 1960 - Σεπ. 1993 και πιστοποιήθηκαν για την περίοδο Οκτ. 1993 - Σεπ. 2002. Τα στατιστικά κριτήρια που υπολογίστηκαν με βάση τις παρατηρημένες τιμές έδειξαν ότι οι προγνώσεις χειροτερεύουν όσο το χρονικό βήμα πρόβλεψης αυξάνει. Για βραχυπρόθεσμες προγνώσεις (1-2 μήνες μπροστά) τα νευρωνικά δίκτυα και οι συνδυαστικές μεθοδολογίες προέκυψε ότι υπερτερούν των γραμμικών μεθοδολογιών. Για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα οι υβριδικές μεθοδολογίες έδωσαν λίγο καλύτερα αποτελέσματα και διαπιστώθηκε ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν μαζί με τα νευρωνικά δίκτυα σε συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης της ξηρασίας [Vasiliades and Loukas, 2007]. Οι Bacanlı et al. [2009] χρησιμοποίησαν μια ευρέως εφαρμοσμένη κατηγορία υβριδικών νευρο-ασαφών ελεγκτών, το μοντέλο ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) για την πρόγνωση των δεικτών ξηρασίας SPI σε 10 βροχομετρικούς σταθμούς της κεντρικής Ανατολίας στην Τουρκία για βραχυπρόθεσμες προγνώσεις του ενός μήνα μπροστά. Εξέτασαν 20 συνδυασμούς δεδομένων εισόδου από προηγούμενες τιμές βροχόπτωσης και τιμές του SPI έως έξι μήνες χρόνο υστέρησης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η προσθήκη της βροχόπτωσης στο μοντέλο ANFIS είναι μη σημαντική για την πρόγνωση του SPI [Bacanli et al., 2009]. Σε μία άλλη μελέτη, τα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιήθηκαν για την πρόγνωση των μετεωρολογικών δεικτών ξηρασίας SPI και EDI (Effective Drought Index) για μηνιαίες προγνώσεις έως 12 μήνες μπροστά για έξι μετεωρολογικούς σταθμούς της επαρχίας Τεχεράνης στο Ιράν [Morid et al., 2007]. Δεδομένα εισόδου των νευρωνικών δικτύων ήταν οι προηγούμενες τιμές βροχόπτωσης και του εξεταζόμενου δείκτη ξηρασίας και οι κλιματικοί δείκτες Southern Oscillation Index (SOI) και North Atlantic Oscillation (NAO) index. Η επιλογή των δεδομένων εισόδου βασίστηκε στην τεχνική δοκιμής και λάθους (trial and error procedure). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι κλιματικοί δείκτες βελτιώνουν λίγο την ικανότητα των νευρωνικών δικτύων για την πρόβλεψη των μετεωρολογικών δεικτών ιδιαίτερα για μεσοπρόθεσμες προγνώσεις. Τέλος, οι Cutore et al., [2009] χρησιμοποίησαν νευρωνικά δίκτυα για την πρόγνωση του επιφανειακού (περιοχικού) δείκτη ξηρασίας Palmer Hydrological Drought Index (PHDI)

στη Σικελία της Ιταλίας με βάση προηγούμενες τιμές του PHDI και κλιματικούς δείκτες North Atlantic Oscillation (NAO) index και European Blocking (EB). Η ενσωμάτωση των κλιματικών δεικτών βελτιώσε ελαφρώς την πρόγνωση του PHDI τους καλοκαιρινούς και χειμερινούς μήνες αλλά χειροτέρευσε την πρόβλεψη τους άλλους μήνες. Έτσι πρότειναν ότι η ενσωμάτωση των κλιματικών δεικτών πρέπει να γίνεται μόνο, όταν κρίνεται απαραίτητο και υπάρχει σημαντική συσχέτιση με την εξεταζόμενη μεταβλητή [Cutore et al., 2009].

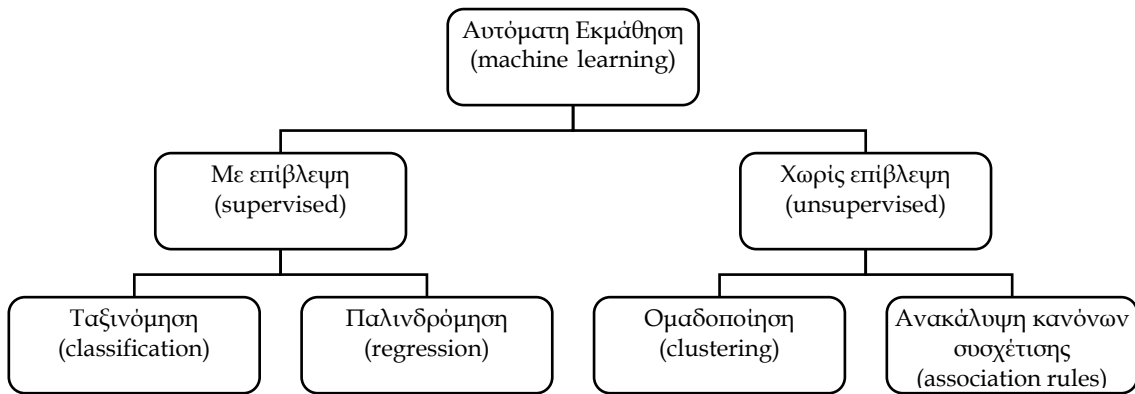
Όλες οι παραπάνω μελέτες πρόγνωσης ξηρασίας έδειξαν ότι οι μέθοδοι της μηχανικής μάθησης και ιδίως τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα αποτελούν πολύτιμα εργαλεία για βραχυπρόθεσμες και μεσοπρόθεσμες προγνώσεις ξηρασίας. Η χρήση των μεθόδων μηχανικής μάθησης για πρόγνωση μετεωρολογικών δεικτών ξηρασίας έδειξε ότι οι προγνώσεις χειροτερεύουν όσο αυξάνει το χρονικό βήμα πρόγνωσης. Επίσης, για τους δείκτες ξηρασίας SPI οι προγνώσεις είναι καλύτερες για μεγάλες χρονικές κλίμακες (π.χ. 24-month) από ότι για μικρές κλίμακες (π.χ. SPI-1month). Ο λόγος είναι ότι οι τιμές του SPI υπολογισμένες για μεγάλες χρονικές κλίμακες περιέχουν μεγάλα διαστήματα υγρών και ξηρών περιόδων με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν ένα σταθερό χρονικό σήμα. Αυτό σημαίνει ότι οι μέθοδοι της μηχανικής μάθησης μπορούν να αντλήσουν ικανοποιητική πληροφορία από τις προηγούμενες τιμές για την πρόγνωση των επομένων. Αντίθετα, στις μικρές χρονικές κλίμακες του SPI οι τιμές αλλάζουν κατάσταση ξηρασίας πολύ γρήγορα που δημιουργούν ένα τυχαίο μοντέλο και αυτό δημιουργεί αστάθεια στα χρονικά μοντέλα πρόγνωσης.

4.2. Μέθοδοι μηχανικής μάθησης

Η μηχανική μάθηση (machine learning) είναι ένα υποπεδίο της τεχνητής νοημοσύνης που ασχολείται με τη σχεδίαση αυτόματων διαδικασιών ικανών να μαθαίνουν από παραδείγματα [Mitchell, 1997]. Η εκμάθηση αυτή αφορά στην παραγωγή μιας λογικής περιγραφής των αναγκαίων και ικανών συνθηκών που αντιστοιχούν σε μια κλάση αντικειμένων, π.χ. σε έναν κανόνα δοθείσης μιας γλώσσας αναπαράστασης. Μία σημαντική φροντίδα είναι η εύρεση των αναγκαίων συμβιβασμών ανάμεσα στην πολυπλοκότητα των κανόνων και στην προσαρμογή των δεδομένων, έτσι ώστε να αποφευχθεί η υπερβολική προσαρμογή (overfitting) και να καταστεί δυνατή η ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Σε αυτή την ενότητα θα περιγραφούν και θα εξηγηθούν πολλοί από τους αλγόριθμους της μηχανικής μάθησης. Επίσης, για καθένα από αυτούς θα αναφερθεί από τη βιβλιογραφία εφαρμογή του στη λύση προβλημάτων από το πεδίο της περιβαλλοντικής πληροφορικής, ή αν δεν υπάρχουν σχετικά παραδείγματα, από συναφή προβλήματα με παρόμοια χαρακτηριστικά.

Η μηχανική μάθηση περιλαμβάνει μία ιεραρχία μεθοδολογιών, όπως απεικονίζονται στο Σχήμα 4.1. Το πρώτο επίπεδο χωρίζεται σε δύο κλάδους: την εκμάθηση με επίβλεψη και την εκμάθηση χωρίς επίβλεψη. Στην πρώτη περίπτωση σε κάθε παράδειγμα είναι γνωστή η τιμή ή η κατηγορία στην οποία ανήκει η παρατήρηση y , ενώ στη δεύτερη είναι άγνωστη και η μηχανική μάθηση επιχειρεί να την προσεγγίσει ομαδοποιώντας τα παραδείγματα. Η πρόβλεψη της μηνιαίας βροχόπτωσης με δεδομένες μετρήσεις μηνιαίων τιμών της βροχόπτωσης είναι για παράδειγμα ένα πρόβλημα με επίβλεψη, γιατί στα παραδείγματα του παρελθόντος υπάρχει η ακριβής τιμή της μετρούμενης βροχόπτωσης. Αντίθετα το πρόβλημα της εύρεσης της κατηγορίας ενός τύπου εδάφους (ή χρήσης γης) σε σχέση με τα γενικές κατηγορίες εδαφών (ή χρήσεων γης) με βάση τα χαρακτηριστικά του και τις ιδιότητες του είναι ένα συνηθισμένο παράδειγμα προβλήματος χωρίς επίβλεψη. Με μαθηματικούς όρους, έστω ένα δείγμα δεδομένων εκπαίδευσης L . Στα προβλήματα με επίβλεψη αυτό αποτελείται από n ζευγάρια παρατηρήσεων $(y_1, x_1), \dots, (y_n, x_n)$, όπου $x_i \in R^p$ και $y_i \in R$ ($i = 1, \dots, n$). Στα προβλήματα χωρίς επίβλεψη δεν υπάρχει η μεταβλητή y και το σύνολο L αποτελείται από n παρατηρήσεις x_1, \dots, x_n όπου $x_i \in R^p$. Η

μεταβλητή Y ονομάζεται εξαρτημένη μεταβλητή και οι μεταβλητές X_i ονομάζονται ανεξάρτητες, ή αλλιώς ιδιότητες του προβλήματος.



Σχήμα 4.1. Οι κατηγορίες της μηχανικής μάθησης.

Η εκμάθηση με επίβλεψη αφορά σε δύο περαιτέρω κατηγορίες προβλημάτων, την παλινδρόμηση και την ταξινόμηση. Στην πρώτη η μεταβλητή y είναι μία συνεχής μεταβλητή, ενώ στη δεύτερη μία διακριτή κατηγορική μεταβλητή. Το παράδειγμα της βροχόπτωσης είναι πρόβλημα παλινδρόμησης, όταν η βροχόπτωση μετράται σαν πραγματικός συνεχής αριθμός, ενώ είναι πρόβλημα κατάταξης αν μετράται σαν ζώνες βροχής (π.χ. ημέρα με βροχή/ημέρα χωρίς βροχή). Τέλος τα προβλήματα χωρίς επίβλεψη χωρίζονται σε ομαδοποίησης και ανακάλυψης κανόνων. Η μεθοδολογία της ομαδοποίησης επιχειρεί να ξεχωρίσει τα δεδομένα σε άτυπες ομάδες, με βάση τις αποστάσεις ανάμεσα στις ιδιότητες των παραδειγμάτων. Το παράδειγμα της κατάταξης ενός τύπου εδάφους σε ομάδα που αναφέρθηκε προηγουμένως ανήκει στην πρώτη κατηγορία. Η ανακάλυψη κανόνων από την άλλη διερευνά τα δεδομένα για να ανακαλύψει κανόνες που διέπουν τις ιδιότητες των παραδειγμάτων.

Η πλειοψηφία των προβλημάτων πρόβλεψης (πρόγνωσης) ανήκει στην κατηγορία των προβλημάτων εκμάθησης με επίβλεψη [Witten and Frank, 2000]. Εκεί κατατάσσονται τα προβλήματα πρόγνωσης των διάφορων τύπων ξηρασίας (μετεωρολογική, υδρολογική, γεωργική και διαχείρισης υδατικών πόρων) και γι' αυτό το λόγο στο υπόλοιπο της παρούσας διατριβής θα εξεταστούν αλγόριθμοι από την περιοχή της παλινδρόμησης. Πρώτα, όμως, ακολουθεί μία γενική αναφορά στις κυρίαρχες μεθόδους επίλυσης των προβλημάτων της πρόγνωσης της ξηρασίας, με τεχνικές που δεν ανήκουν στο πεδίο της μηχανικής μάθησης, για να παρουσιαστούν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της εφαρμογής τους, έτσι ώστε να διευκρινηθούν οι λόγοι που θα οδηγήσουν στην επίλυση των προβλημάτων με τεχνικές μηχανικής μάθησης.

4.2.1. Ο αλγόριθμος των k πιο κοντινών γειτόνων (instance based algorithms)

Η μέθοδος των k κοντινότερων γειτόνων ((k -Nearest Neighbors, KNN, algorithm) βρίσκεται ανάμεσα στις πιο δημοφιλείς μεθόδους ταξινόμησης και παλινδρόμησης. Αντιπροσωπεύει την παλαιότερη (μη-παραμετρική) γενιά μεθόδων που προτάθηκαν γι' αυτό το πρόβλημα και έχει ενδελεχώς εφαρμοστεί στο πεδίο της στατιστικής και ειδικά σε αυτό της αναγνώρισης προτύπων [Aha et al., 1991]. Τελευταία έχει ανανεωθεί το ενδιαφέρον γι' αυτή στην κοινότητα της μηχανικής εκμάθησης. Παρόλη τη βασική της απλότητα και το γεγονός ότι πολλές εναλλακτικές προηγμένες τεχνικές έχουν αναπτυχθεί μετά την πρώτη της εμφάνιση, η μέθοδος των κοντινότερων γειτόνων παραμένει ακόμα η πιο επιτυχημένη για πολλά προβλήματα ταξινόμησης. Αυτός ο αλγόριθμος ανήκει σε μια κατηγορία αλγορίθμων που βασίζονται στα στιγμιότυπα (instances) του ιστορικού συνόλου δεδομένων για να προσεγγίσουν τη λύση σε ένα νέο στιγμιότυπο. Ο αλγόριθμος αυτός αναθέτει σε ένα αντικείμενο άγνωστης κλάσης την πλειοψηφική κλάση που προκύπτει από k αντικείμενα εγνωσμένης κλάσης κοντύτερα σε αυτό. Η

έννοια της εγγύτητας συνήθως εκφράζεται από ένα κριτήριο απόστασης στον ευκλείδειο χώρο με άξονες τις μεταβλητές εισόδου των αντικειμένων (τις ιδιότητες). Στην πλειονότητα των περιπτώσεων εφαρμογής του αλγόριθμου σε σχετικά περιορισμένο όγκο δεδομένων η απλή ευκλείδεια απόσταση προτιμάται λόγω απλότητας υλοποίησης [Mitchell, 1997].

Όντας από τις παλαιότερες μεθόδους ταξινόμησης, ο αλγόριθμος των κοντινότερων γειτόνων έχει εφαρμοστεί σε μια πλειάδα περιβαλλοντικών εφαρμογών. Ενδεικτικά αναφέρεται η ταξινόμηση των νεφών με βάση ψηφιακές εικόνες από υψηλής ανάλυσης αισθητήρες ραδιομέτρων τοποθετημένων σε μετεωρολογικούς δορυφόρους πολικής τροχιάς [Aha and Bankert, 1997], όπου για τη βελτίωση της ταξινόμησης χρησιμοποιείται σχήμα κωδικοποίησης της εξόδου που διαφοροποιεί όσο το δυνατόν περισσότερο τις τάξεις της μεταβλητής εξόδου μεταξύ τους. Για το πρόβλημα της πρόβλεψης της μέσης ωριαίας θερμοκρασίας 24 ώρες πρωύτερα με βάση τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από ένα σημειακό σταθμό καταγραφής μετεωρολογικών μεγεθών, ένας αλγόριθμος ενός κοντινού γείτονα αποδείχτηκε περισσότερο αποτελεσματικός από ένα πολυδιαστασιακό μοντέλο αυτοπαλινδρόμησης, από ένα εμπροσθοτροφοδοτούμενο νευρωνικό δίκτυο τεσσάρων επιπέδων, από ένα επανατροφοδοτούμενο νευρωνικό δίκτυο και από ένα επίμονο προβλέπτη [Aussem et al., 1994]. Σε μία πρόσφατη μελέτη, ο αλγόριθμος των κοντινότερων γειτόνων συγκρίθηκε με νευρωνικά δίκτυα και με τον αλγόριθμο M5 των δέντρων απόφασης και έδειξε ότι για βραχυπρόθεσμες υδρολογικές προγνώσεις μπορεί να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα [Solomantine et al., 2008].

4.2.2. Παλινδρόμηση

Αν Y είναι η εξαρτημένη μεταβλητή εξόδου και υπάρχουν k ανεξάρτητες μεταβλητές εισόδου, το μοντέλο που αποδίδει τη σχέση τους έχει την εξής μορφή :

$$Y_i = g(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik}) + \varepsilon_i \quad (4.1)$$

όπου $(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik})$ ένα σύνολο προκαθορισμένων τιμών των ανεξάρτητων μεταβλητών, Y_i η αντίστοιχη τυχαία τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής που έχει μέση τιμή $E(Y) = g(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik})$, και ε_i είναι μία τυχαία μεταβλητή με μέση τιμή μηδέν, που δίνει το τυχαίο λάθος όταν γίνεται εκτίμηση ή πρόβλεψη της Y_i από τη μέση τιμή της, δηλαδή την τυχαία μεταβλητότητα της Y_i γύρω από τη μέση τιμή της λόγω της ύπαρξης μη ελεγχόμενων "τυχαίων" παραγόντων.

Ο σκοπός είναι το τυχαίο σφάλμα της πρόβλεψης $D = Y - g(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik})$ να είναι με κάποια στατιστική έννοια ελάχιστο. Συνήθως σαν τέτοιο χρησιμοποιείται η μέση τιμή του τετραγώνου του, $E(D^2)$, το καλούμενο μέσο τετραγωνισμένο σφάλμα (MSE). Αυτό αποδεικνύεται ότι ελαχιστοποιείται αν διαλέξουμε σαν $g(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik})$ τη μέση υπό συνθήκες τιμή του Y , $E(Y | X_1, X_2, \dots, X_k)$. Έτσι με δεδομένο σετ παρατηρήσεων $X_1 = x_{i1}, X_k = x_{ik}$, η βέλτιστη πρόβλεψη για την τ.μ. Y είναι:

$$g(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik}) = E(Y | X_1 = x_{i1}, X_2 = x_{i2}, \dots, X_k = x_{ik}) \quad (4.2)$$

Βέβαια αυτή η πρόβλεψη θα διαφέρει από την πραγματική τιμή της μέτρησης $Y = y_i$ κατά $y_i - g(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik})$. Επειδή όμως στην πράξη η εύρεση κατανομών υπό συνθήκες και των μέσων τιμών τους είναι δύσκολη, χρησιμοποιούμε συγκεκριμένες μορφές για τη συνάρτηση g , όπως της γραμμικής σχέσης $g(x_1, x_2, \dots, x_k) = \theta_0 + \theta_1 x_1 + \dots + \theta_k x_k$ και προσδιορίζουμε τους άγνωστους παράγοντες $\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_k$ έτσι ώστε να ελαχιστοποιούν το μέσο τετραγωνικό σφάλμα της πρόβλεψης $E(D^2)$. Εκτός της πολλαπλής γραμμικής συνάρτησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίσης πολυωνυμικές, εκθετικές και άλλων μορφών συναρτήσεις. Η συνάρτηση $g(x_1, x_2, \dots, x_k)$ λέγεται συνάρτηση παλινδρόμησης (regression function). Οι άγνωστοι συντελεστές $\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_k$ λέγονται παράμετροι της συνάρτησης παλινδρόμησης. Η επιλογή της κατάλληλης συνάρτησης προκύπτει παρατηρώντας τη γραφική απεικόνιση των ζευγών $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ των μετρήσεων στο δισδιάστατο επίπεδο. Τα χρήσιμα αυτά διαγράμματα λέγονται διαγράμματα διασποράς (scatter diagrams). Ποικίλες εφαρμογές παλινδρόμησης στην υδροπληροφορική και ειδικότερα στην πρόγνωση της μετεωρολογικής και υδρολογικής πληροφορίας

παρουσιάζονται στη διεθνή βιβλιογραφία [Armstrong, 1984; Adya and Collopy, 1998; De Gooijer and Hyndman, 2006; Gardner, 2006].

4.2.3. Λογιστική παλινδρόμηση

Μία άλλη κατηγορία παλινδρόμησης μη γραμμικής για τη λύση προβλημάτων δυαδικής εξαρτημένης μεταβλητής είναι η λογιστική παλινδρόμηση. Σε αντίθεση με τη γραμμική παλινδρόμηση που προσαρμόζει μία ευθεία γραμμή στα δεδομένα, η λογιστική παλινδρόμηση προσαρμόζει μία συνάρτηση S στα δεδομένα. Έστω $Y \in \{0, 1\}$ όπου $Y=0$ αντιστοιχεί στη μία κατάσταση της μεταβλητής (π.χ. ΟΧΙ/ΨΕΥΔΕΣ/ΞΗΡΑΣΙΑ) και $Y=1$ αντιστοιχεί σε μία άλλη κατάσταση (π.χ. ΝΑΙ/ΑΛΗΘΕΣ/ΟΧΙ ΞΗΡΑΣΙΑ αντίστοιχα). Έστω επίσης ότι p είναι η πιθανότητα να συμβεί $Y=1$, δηλ. $p = P(Y=1)$, τότε το μοντέλο της λογιστικής παλινδρόμησης επιχειρεί να λύσει την εξίσωση:

$$\ln[p/(1-p)] = \alpha + \theta X + \varepsilon, \quad \text{ή} \quad (4.3)$$

$$[p/(1-p)] = e^{\alpha} e^{\theta X} e^{\varepsilon} \quad (4.4)$$

Ο λόγος $p/(1-p)$ λέγεται λόγος των πιθανοτήτων της μεταβλητής Y , ενώ η κατανομή του νεπέριου λογάριθμου αυτής της ποσότητας κυμαίνεται στο διάστημα $[0, 1]$.

4.2.4. Μοντέλα αυτοπαλινδρόμησης κινητού μέσου όρου ARMA/ARIMA

Τα μοντέλα Box-Jenkins [Box et al., 2008] ή μοντέλα ολοκλήρωσης και αυτοπαλινδρόμησης κινητού μέσου όρου (Autoregressive Integrated Moving Average, ARIMA) είναι μία μεθοδολογία μοντελοποίησης χρονοσειρών με βάση το διαχωρισμό της χρονοσειράς σε ένα εποχικό παράγοντα αυτοπαλινδρόμησης και s ένα μη εποχικό παράγοντα κινητού μέσου, και στην πραγματικότητα για αύξηση των μοντέλων ARMA κατά έναν όρο, αυτόν της ολοκλήρωσης. Για τον υπολογισμό ενός γραμμικού μοντέλου αυτοπαλινδρόμησης πρώτης τάξης AR(1), αρκεί να κατασκευαστεί ένα επιπλέον μοντέλο των υπολοίπων της απλής γραμμικής παλινδρόμησης, δηλαδή από τα γραμμικά μοντέλα:

$$y_t = x_t' \varphi + u_t \quad (4.5)$$

$$u_t = \rho u_{t-1} + \varepsilon_t \quad (4.6)$$

προκύπτει ένα μη γραμμικό:

$$y_t = \rho y_{t-1} + (x_t - \rho x_{t-1})' \varphi + \varepsilon_t \quad (4.7)$$

Οι συντελεστές ρ και φ υπολογίζονται ταυτόχρονα με την εφαρμογή ενός αλγορίθμου ελαχίστων τετραγώνων. Για ένα μη γραμμικό μοντέλο AR(1), το μη γραμμικό μοντέλο μετασχηματίζεται:

$$y_t = g(x_t, \varphi) + u_t \quad (4.8)$$

$$u_t = \rho u_{t-1} + \varepsilon_t \quad (4.9)$$

στο εναλλακτικό επίσης μη γραμμικό:

$$y_t = \rho y_{t-1} + g(x_t, \varphi) - \rho g(x_{t-1}, \varphi) + \varepsilon_t \quad (4.10)$$

Μεγαλύτερης τάξης AR μοντέλα μπορούν να αναπτυχθούν με ανάλογο τρόπο. Αν εκφράσουμε τον τελεστή υστέρησης (backshift operator) B ως: $By_t = y_{t-1}$, $B^2 y_t = BB y_t = B y_{t-1} = y_{t-2}$, $B_k y_t = y_{t-k}$, τότε τα AR(p) μοντέλα τάξης p μπορούν να εκφραστούν ως:

$$y_t = \varphi_p(B) y_t + \varepsilon_t \quad (4.11)$$

Η κατασκευή ενός μοντέλου κινητού μέσου όρου MA(1) προκύπτει από την εξίσωση

$$y_t = \vartheta_0 - \vartheta_1 \varepsilon_{t-1}' + \varepsilon_t \quad (4.12)$$

οπότε το μοντέλο MA(1) και κατ' επέκταση κάθε μοντέλο MA(q) μπορεί να εκφραστεί με χρήση του τελεστή B :

$$y_t = \vartheta_0 + \vartheta_q(B)\varepsilon_t \quad (4.13)$$

Γενικά τα μοντέλα ARIMA αναζητούν λύσεις στην ακόλουθη διαφορική εξίσωση:

$$\phi_\rho(B)\phi_P(B)^L x_t = \delta + \vartheta_q(B)\theta_Q(B)^L \varepsilon_t \quad (4.14)$$

Ο μη εποχικός παράγοντας αυτοπαλινδρόμησης $\phi_\rho(B)$ τάξης ρ μοντελοποιεί τις αποκρίσεις της ανάδρασης χαμηλής τάξης. Ο εποχικός παράγοντας αυτοπαλινδρόμησης $\phi_P(B)^L$ τάξης P μοντελοποιεί τις αποκρίσεις της ανάδρασης που συμβαίνει περιοδικά σε εποχικά χρονικά διαστήματα. Για παράδειγμα, σε μία χρονοσειρά από μέσες μηνιαίες τιμές, ο παράγοντας αυτός θα χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση του αποτελέσματος της παλινδρόμησης που συμβαίνει κάθε Οκτώβριο. Ο μη εποχικός παράγοντας κινητού μέσου όρου $\vartheta_q(B)$ τάξης q μοντελοποιεί τις αποκρίσεις χαμηλής τάξης του ζυγισμένου μέσου όρου. Ο εποχικός παράγοντας κινητού μέσου όρου $\theta_Q(B)^L$ τάξης Q μοντελοποιεί τις εποχικές αποκρίσεις του ζυγισμένου μέσου όρου. Οι όροι x_t , ε_t , και δ είναι η χρονοσειρά, μία ακολουθία τυχαίων κρουστικών και μία σταθερά, αντίστοιχα. Για τον καθορισμό των παραμέτρων του μοντέλου ARIMA προηγείται μία φάση αναγνώρισης με τον υπολογισμό των συντελεστών αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης και τη μελέτη των καταλοίπων σφαλμάτων, ώστε σταδιακά να αποκαλυφθούν οι σωστές τάξεις των παραμέτρων ρ , P , ϑ , θ , L [Salas et al., 1980; Hipel and McLeod, 1994; Makridakis et al., 1998; Box et al., 2008]. Ποικίλες εφαρμογές της οικογένειας ARIMA στην υδροπληροφορική και ειδικότερα, στην πρόγνωση της μετεωρολογικής και υδρολογικής πληροφορίας παρουσιάζονται στη διεθνή βιβλιογραφία [Armstrong, 1984; Adya and Collorpy, 1998; De Gooijer and Hyndman, 2006; Gardner, 2006].

4.2.5. Περιπτωσιακός λογισμός

Ο περιπτωσιακός ή αναλογικός λογισμός (Case-Based Reasoning - CBR) είναι μια σχετικά καινούργια τεχνική που χρησιμοποιείται συνήθως σε προβλήματα για τα οποία υπάρχει αξιόπιστη ιστορική πληροφορία, η οποία μπορεί να δομηθεί σε διακριτές περιπτώσεις επιλυμένων παρελθόντων προβλημάτων. Ο περιπτωσιακός λογισμός λύνει νέα προβλήματα προσαρμόζοντας λύσεις που χρησιμοποιήθηκαν για να λύσουν παλιά προβλήματα. Η βασική ιδέα στην οποία βασίζεται η τεχνική αυτή είναι η επαναληπτική ανάσυρση περιπτώσεων που μοιάζουν με αυτήν του προβλήματος μέσα από μια βάση περιπτώσεων του παρελθόντος. Ενίοτε γίνεται προσαρμογή των παλιών λύσεων για να ικανοποιηθούν οι νέες ανάγκες, είτε απλώς χρησιμοποιούνται οι παλιές περιπτώσεις για να εκτιμηθούν οι καινούργιες λύσεις. Αναλυτικές πληροφορίες για την CBR μεθοδολογία μπορούν να βρεθούν στα βιβλία των Kolodner [1993] και Leake [1996].

Συχνά, οι τεχνικές που βασίζονται σε CBR μεθόδους, συνδυάζονται με Bayesian δίκτυα, καταλήγουν σε ένα υβριδικό μοντέλο πρόβλεψης. Τα Bayesian δίκτυα αναφέρονται στη γραφική μοντελοποίηση των πιθανοτικών σχέσεων ενός συνόλου μεταβλητών. Η μοντελοποίηση αποσκοπεί στον εντοπισμό ποιοτικών και ποσοτικών σχέσεων ανάμεσα στα αντικείμενα (μεταβλητές), τα οποία ενδιαφέρουν τον χρήστη. Τόσο η δόμηση του δικτύου, όσο και οι πιθανοτικές τιμές των μεταβλητών προκύπτουν από τις καταγεγραμμένες περιπτώσεις CBR. Η αξιολόγηση της μεθοδολογίας CBR είναι ιδιαίτερα δύσκολη, αφού εξαρτάται από την ειδική υλοποίηση κατά περίπτωση. Εξαρτάται για παράδειγμα από τα χαρακτηριστικά και την οργάνωση της βάσης γνώσης και της βάσης περιπτώσεων (δηλαδή των χαρακτηριστικών ομάδων που ορίζουν τις διακριτές περιπτώσεις), καθώς και από τη γνώση που κωδικοποιείται και χρησιμοποιείται για την ανεύρεση κοντινών περιπτώσεων, αναπροσαρμογή λύσεων και αποθήκευση νέων περιπτώσεων στο ιστορικό αρχείο. Γενικά, οι CBR τεχνικές ενδείκνυνται εκεί που υπάρχει πλούσια ιστορική πληροφορία καλής ποιότητας, μπορεί να γίνει κατηγοριοποίηση του φαινομένου με βάση τα ιστορικά στοιχεία και την εμπειρία των ειδικών και υπάρχει δυνατότητα για τη

διαχείριση, προσαρμογή και αποθήκευση νέων περιπτώσεων. Οι συνθήκες αυτές ικανοποιούνται στο πρόβλημα πρόβλεψης αέριας ρύπανσης. Για το λόγο αυτό, έχουν ήδη καταγραφεί προσπάθειες ανάπτυξης πρωτοτύπων συστημάτων πρόβλεψης αέριας ρύπανσης [Lekkas et al., 1994; Kalapanidas and Anouris, 2001] με μεθόδους CBR. Τα πρωτότυπα αυτά συνήθως κατατάσσουν ημέρες αέριας ρύπανσης με βάση δείκτες που αφορούν τις μετεωρολογικές συνθήκες και εκπομπές, συσχετισμένες με τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις αέριας ρύπανσης. Ο αλγόριθμος πρόβλεψης στηρίζεται στον υπολογισμό των δεικτών κάθε νέας ημέρας και η κατ' αναλογία πρόβλεψη συγκεντρώσεων με βάση προηγούμενες ημέρες με τα πιο κοντινά χαρακτηριστικά.

4.2.6. Δέντρα απόφασης

Τα δέντρα απόφασης (Decision Trees) είναι προϊόντα της επαγωγικής διαδικασίας εκμάθησης. Ένα δέντρο απόφασης επάγεται από ένα σύνολο εκμάθησης, που αποτελείται από αντικείμενα. Κάθε αντικείμενο περιγράφεται πλήρως από ένα σύνολο ιδιοτήτων και από μια ετικέτα κλάσης (class label). Οι ιδιότητες μπορούν να είναι διάταξης ή κατηγορίας. Για παράδειγμα, οι ακέραιες τιμές είναι διάταξης, ενώ οι δυαδικές είναι κατηγορίας. Ο στόχος ενός αλγόριθμου μηχανικής μάθησης αναφορικά με την κατασκευή ενός μοντέλου από ένα σύνολο δεδομένων, είναι η εύρεση ή η μεγαλύτερη δυνατή προσέγγιση της πραγματικής αντιστοίχισης ανάμεσα στο σύνολο των ιδιοτήτων και στην ετικέτα κλάσης. Ένα σύνολο εκπαίδευσης ελεύθερο θορύβου είναι αυτό στο οποίο όλα τα αντικείμενα προκύπτουν με τη χρήση της αντιστοίχισης αυτής [Witten and Frank, 2000].

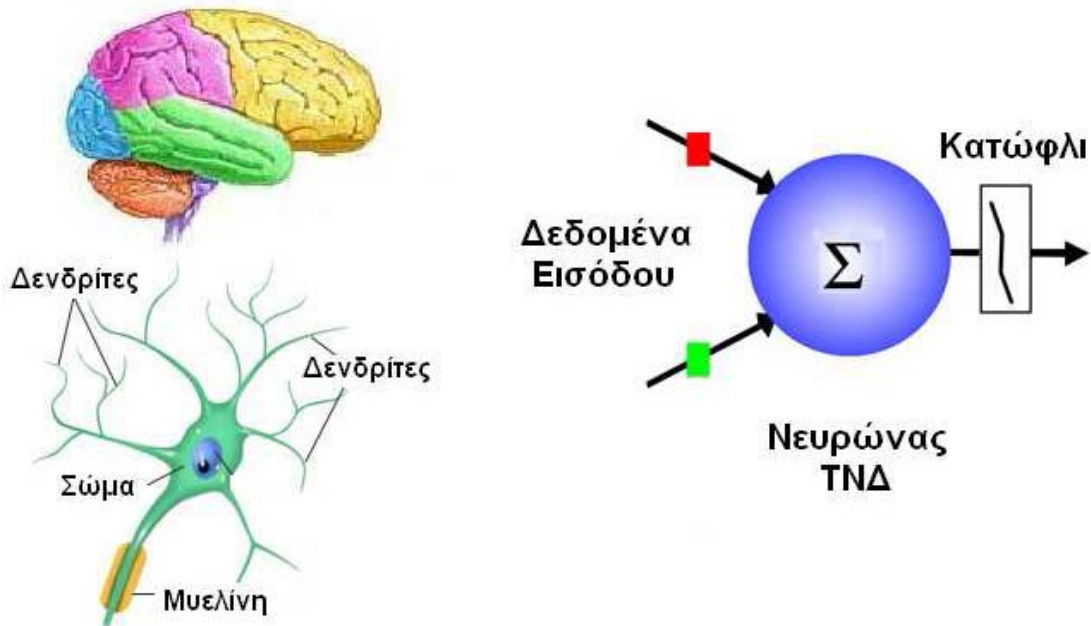
Ένα δέντρο απόφασης περιέχει έναν ή περισσότερους εσωτερικούς κόμβους και έναν ή περισσότερους κόμβους-φύλλα. Όλοι οι εσωτερικοί κόμβοι έχουν δύο ή περισσότερους κόμβους-παιδιά. Όλοι οι μη τερματικοί κόμβοι περιέχουν τεμαχισμούς στους οποίους ελέγχεται η τιμή μιας μαθηματικής ή μιας λογικής έκφρασης των ιδιοτήτων. Οι κορυφές από έναν εσωτερικό κόμβο t στους κόμβους-παιδιά του είναι σημασμένες με τα ξεχωριστά αποτελέσματα της δοκιμασίας στον κόμβο t . Κάθε κόμβος-φύλλο έχει μια ετικέτα κλάσης προσαρτημένη. Ο αριθμός των κλάσεων είναι πεπερασμένος. Ένας κόμβος-φύλλο M ονομάζεται καθαρός, όταν όλα τα δείγματα του συνόλου εκμάθησης κάτω από τον κόμβο αυτό ανήκουν στην ίδια κλάση. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον από τους αλγόριθμους των δέντρων αποφάσεων παρουσιάζει σε προβλήματα παλινδρόμησης ο αλγόριθμος M5. Ο αλγόριθμος M5 [Quinlan, 1992; Wang and Witten, 1997] αλγόριθμος είναι ένα υβρίδιο διασταύρωσης δέντρου απόφασης και γραμμικής παλινδρόμησης. Δουλεύει αρχικά σαν δέντρο απόφασης τμηματοποιώντας το διανυσματικό χώρο που ορίζουν οι ιδιότητες σε φύλλα, σε καθένα από τα οποία εκπαιδεύεται ένα ξεχωριστό μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης, με το υποσύνολο των παραδειγμάτων του συνόλου εκπαίδευσης που αντιστοιχούν σε εκείνο το φύλλο. Ο αλγόριθμος M5 έχει εφαρμοστεί με επιτυχία για την πρόγνωση των πλημμυρών [Solomatine and Xue, 2004; Solomatine and Siek, 2006].

4.2.7. Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα

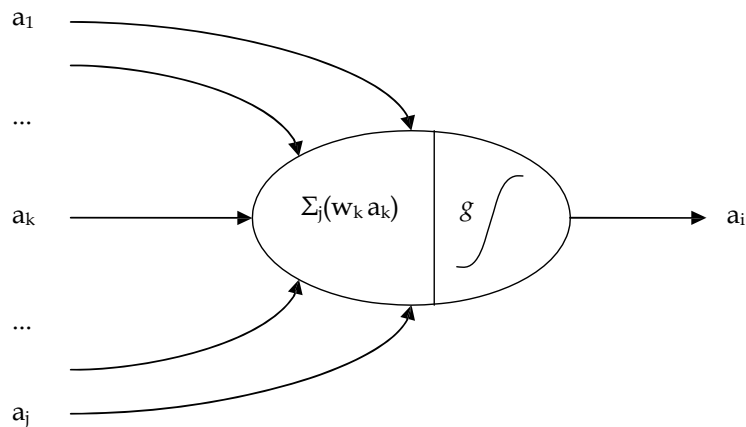
Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (Artificial Neural Networks, ANN) είναι ένας κλάδος της τεχνητής νοημοσύνης που προήλθαν από την επιστημονική προσπάθεια να προσομοιωθεί η λειτουργία των νευρώνων του εγκεφάλου (Σχήμα 4.2) [Haykin, 1999]. Αποτελούνται αυτά από ένα δίκτυο από κόμβους που λέγονται νευρώνες και διασυνδέσεις μεταξύ νευρώνων, που ονομάζονται συνάψεις (Σχήμα 4.3). Ένα βιολογικό νευρωνικό δίκτυο είναι μία μη γραμμική υψηλής παραλληλοποίησης μηχανή που χαρακτηρίζεται από αξιοπιστία και ανοχή στα λάθη. Ένας τεχνητός νευρώνας α_i του Σχήματος 4.3, επιτελεί τα ακόλουθα:

- Δέχεται ένα αριθμό από j εισόδους α_k (είτε από πραγματικά δεδομένα εισόδου, είτε από εξόδους από άλλους νευρώνες του νευρωνικού δικτύου). Κάθε είσοδος έρχεται διαμέσου μιας σύναψης και έχει ένα μέτρο ισχύος (ένα βάρος).

- Αθροίζει τα γινόμενα βάρους και τιμής εισόδου για κάθε είσοδο
- Παράγει μία έξοδο a_i , περνώντας το άθροισμα διαμέσου μιας συνάρτησης ενεργοποίησης g (βηματική συνάρτηση με μία τιμή κατώφλιου, στην πιο απλή εκδοχή της).



Σχήμα 4.2. Ο βιολογικός και τεχνητός νευρώνας.



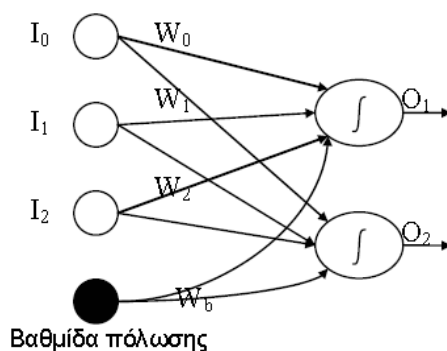
Σχήμα 4.3. Ο τεχνητός νευρώνας

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ΤΝΔ) είναι ένα είδος πολύ-επεξεργαστικού υπολογιστικού συστήματος, με τα εξής χαρακτηριστικά:

- Απλά υπολογιστικά στοιχεία
- Μεγάλο βαθμό διασύνδεσης μεταξύ τους
- Απλά βαθμωτά μηνύματα
- Προσαρμοστική διασύνδεση μεταξύ των στοιχείων

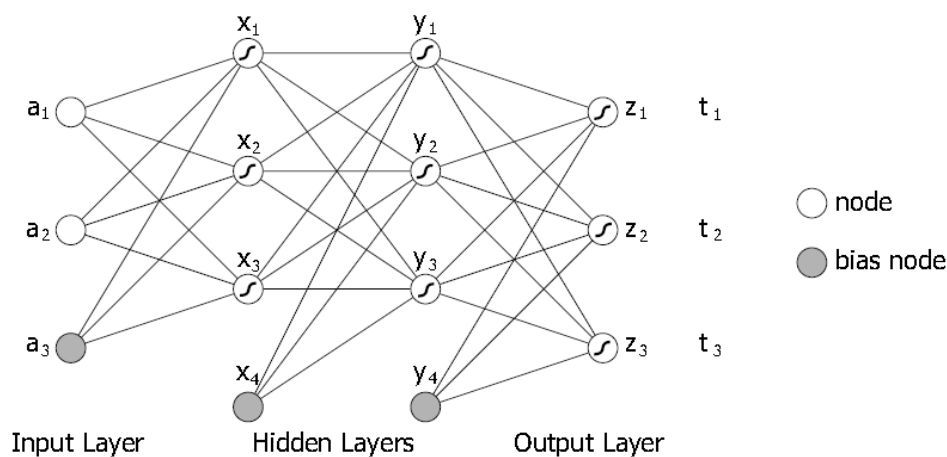
Διακρίνονται αρκετές τοπολογίες νευρωνικών δικτύων, καθεμία από τις οποίες έχει τα δικά της χαρακτηριστικά.

Τοπολογία perceptron. Η περίπτωση του perceptron υπήρξε μία από τις πιο ενθουσιώδεις εξελίξεις κατά τις πρώιμες ημέρες της αναγνώρισης προτύπων. Αποτελείται από ένα δίκτυο στοιχειωδών επεξεργαστών που μπορούν να μάθουν να αναγνωρίζουν και να ταξινομούν πρότυπα αυτόνομα. Οι επεξεργαστές αυτοί είναι απλά στοιχεία στοιχισμένα σε ένα επίπεδο. Το κλασικό perceptron ενός επιπέδου, όταν του δοθούν δύο κλάσεις προτύπων, προσπαθεί να βρει ένα γραμμικό όριο διαχωρισμού ανάμεσα στις δύο κλάσεις. Αν τα δύο σύνολα προτύπων είναι όντως γραμμικά διαχωρίσιμα, τότε ο αλγόριθμος του perceptron εγγυάται να βρει το n -διάστατο όριο διαχωρισμού ανάμεσα στις δύο κλάσεις σε ένα πεπερασμένο αριθμό βημάτων. Εντούτοις, αν ο χώρος των προτύπων δεν είναι γραμμικά διαχωρίσιμος, τότε το perceptron θα αποτύχει. Ένας νευρώνας αρκεί για το βασικό κομμάτι ενός απλού perceptron. Επίσης μία από τις εισόδους πρέπει να είναι πάντα ενεργοποιημένη (βαθμίδα μεροληψίας ή πόλωσης - bias unit), ώστε να υπάρχει μία ελάχιστη διέγερση για την ενεργοποίηση της εξόδου. Ένα παράδειγμα perceptron με 3 εισόδους και δύο νευρώνες απεικονίζεται στο Σχήμα 4.4:



Σχήμα 4.4. Παράδειγμα τοπολογίας perceptron.

Τοπολογία Multi-layer perceptron. Ένα perceptron ενός επιπέδου είναι προφανώς ακατάλληλο για καταστάσεις με πολλές κλάσεις και μη γραμμικά όρια διαχωρισμού. Το γεγονός αυτό υπήρξε και το κίνητρο για την ανακάλυψη των δικτύων πολλών επιπέδων από perceptrons. Τα επίπεδα νευρώνων σε αυτά τα δίκτυα είναι πλήρως συνδεδεμένα, αλλά απουσιάζουν οι συνδέσεις μεταξύ των νευρώνων του ίδιου επιπέδου. Τα δίκτυα MLP χρησιμοποιούν επιθεωρημένη εκπαίδευση, υλοποιημένη σε δύο φάσεις. Στην προωθούμενη φάση, υπολογίζεται η έξοδος της ζώνης εξόδου του δικτύου. Στην backward φάση τα βάρη ρυθμίζονται, ώστε να μειώσουν το λάθος ανάμεσα στις παρατηρούμενες και στις επιθυμητές εξόδους. Στο Σχήμα 4.5 απεικονίζεται μία τοπολογία MLP με 2 εισόδους, δύο κρυφά επίπεδα με τρεις νευρώνες και τρεις εξόδους. Ένα MLP θεωρείται ότι διαθέτει ικανότητα γενίκευσης, δηλαδή μπορεί να παράξει σωστή (ή σχεδόν σωστή) έξοδο δεχόμενο είσοδο που δεν χρησιμοποιήθηκε στη φάση της εκπαίδευσης. Το δίκτυο μπορεί να ειδωθεί σαν μια μη γραμμική αντιστοιχία εισόδων-εξόδων, και η εκπαιδευτική διαδικασία σαν μια συνάρτηση προσαρμογής σε ένα ορισμένο σύνολο δεδομένων. Ένα MLP παρουσιάζεται αποδοτικό στην παρεμβολή, καθώς οι συνεχείς συναρτήσεις ενεργοποίησης παράγουν συνεχείς συναρτήσεις εξόδου. Επίσης, επειδή η διαδικασία εκμάθησης έχει να κάνει με ψάξιμο σε ένα σύνθετο χώρο, είναι συχνά χρονοβόρα. Τα MLP έχουν εφαρμοστεί σε πολλές περιπτώσεις, από απλή ταξινόμηση, προσέγγιση συναρτήσεων, πρόγνωση και προσομοίωση σε μελέτες υδροτεχνικών έργων. Λόγω της διάδοσής τους στην επιστημονική κοινότητα, πολλές είναι και οι εφαρμογές σε προβλήματα της υδροπληροφορικής για προσομοίωση και πρόγνωση υδρολογικών και μετεωρολογικών παραμέτρων [Coulibaly et al., 1999; ASCE Task Committee on Application of Artificial Neural Networks in Hydrology, 2000a,b; Maier and Dandy, 2000; Dawson and Wilby, 2001].

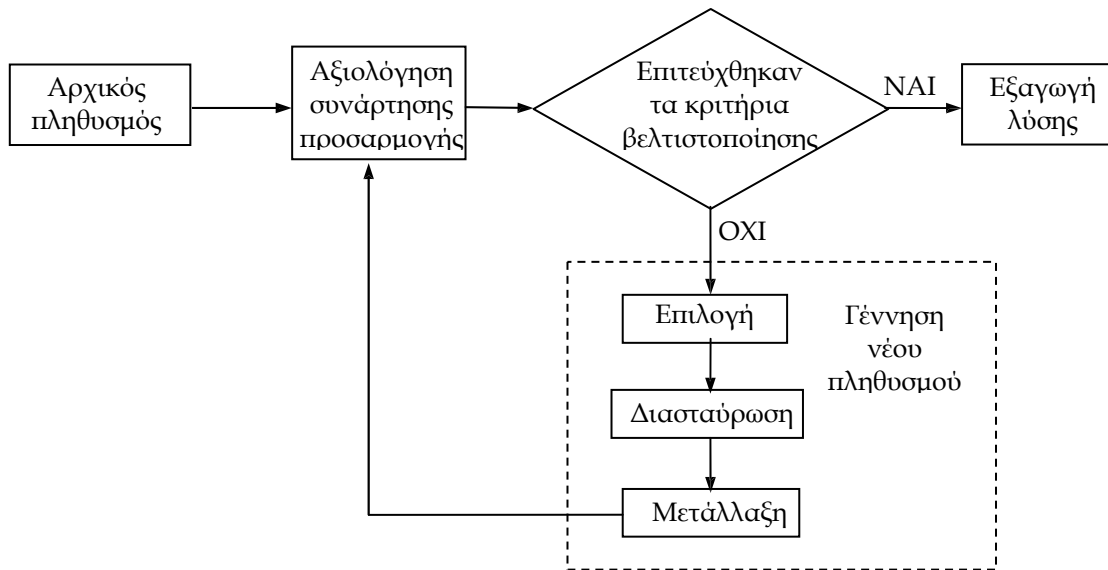


Σχήμα 4.5. Παράδειγμα τοπολογίας MLP.

4.2.8. Γενετικοί Αλγόριθμοι

Οι γενετικοί αλγόριθμοι (ΓΑ) (Genetic Algorithms, GA) είναι διαδικασίες αναζήτησης βασισμένες στη φυσική επιλογή και στην επιστήμη της γενετικής. Δεν είναι αυτή τη στιγμή δυνατόν να οριστεί ακριβώς ποια από αυτές τις διαδικασίες είναι καλύτερη και για ποιο πρόβλημα ή για ποια κλάση προβλημάτων [Porto et al., 1995]. Παρόλα αυτά είναι δυνατό να αναγνωριστούν αλγόριθμοι που σταθερά παράγουν βελτιωμένα αποτελέσματα για μια ευρεία γκάμα προβλημάτων. Ο γενετικός αλγόριθμος είναι ένας τέτοιος αλγόριθμος, έχοντας να επιδείξει επιτυχίες με εκατοντάδες διαφορετικούς τύπους προβλημάτων [Holland, 1992]. Υπάρχει μεγάλη ποικιλία σε αυτούς τους αλγορίθμους. Η πιο απλή έκδοση περιλαμβάνει πεπερασμένο πληθυσμό από δυαδικές ψηφιοσειρές καθορισμένου μήκους, και λέγεται απλός γενετικός αλγόριθμος. Υπάρχει βέβαια ένας αριθμός από προχωρημένους τύπους γενετικού αλγορίθμου για την αντιμετώπιση διαφορετικών τύπων προβλημάτων, όπου γίνεται χρήση τεχνητής εμβρυολογίας (απλοί γενότυποι αντιστοιχούν σε περισσότερο σύνθετους φενότυπους), πολυαντικειμενικής βελτιστοποίησης και επικαλυπτόμενων πληθυσμών.

Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι γενικά, μέρος των οποίων αποτελούν οι γενετικοί αλγόριθμοι, λειτουργούν πάνω σε ένα πληθυσμό από πιθανές λύσεις εφαρμόζοντας την αρχή της επιβίωσης του βέλτιστου με στόχο να παράγουν βαθμιαία όλο και καλύτερες προσεγγίσεις της βέλτιστης λύσης. Σε κάθε γενιά, όπως καλείται ο βασικός βρόχος του αλγορίθμου, ένα νέο σύνολο προσεγγίσεων δημιουργείται από τη διαδικασία επιλογής μελών του πληθυσμού σύμφωνα με το επίπεδο προσαρμογής τους στο πεδίο του προβλήματος και αναπαραγωγής τους χρησιμοποιώντας τελεστές αναπαραγωγής δανεισμένους από τη φυσική επιστήμη της γενετικής. Αυτή η διαδικασία οδηγεί στην εξέλιξη των πληθυσμών από μέλη που ταιριάζουν καλύτερα στο περιβάλλον τους σε σχέση με τα στοιχεία από τα οποία δημιουργήθηκαν, ακριβώς όπως συμβαίνει στη φυσική προσαρμογή των ειδών. Οι γενετικοί αλγόριθμοι μοντελοποιούν τις φυσικές διεργασίες, όπως την επιλογή, τη διασταύρωση, τη μετάλλαξη, τη μετανάστευση, την τοπικότητα και τη γειννίαση. Στο Σχήμα 4.6 απεικονίζονται οι διεργασίες αυτές, όπως αναπαριστώνται μέσα στη ροή ενός τυπικού απλού γενετικού αλγορίθμου. Σημειώνεται ότι οι εξελικτικοί αλγόριθμοι γενικά λειτουργούν με πληθυσμούς από μέλη που αναπαριστούν το καθένα μία πιθανή λύση, παρά με μοναδικές λύσεις. Με αυτό τον τρόπο η αναζήτηση εκτελείται κατά ένα παράλληλο τρόπο.



Σχήμα 4.6. Διάγραμμα ροής ενός απλού γενετικού αλγόριθμου.

Με την έναρξη του αλγορίθμου, ένας αριθμός από μέλη (του πληθυσμού) αρχικοποιούνται τυχαία. Η αντικειμενική συνάρτηση κατόπιν υπολογίζεται για κάθε μέλος. Η πρώτη (αρχική) γενιά έχει παραχθεί. Αν το κριτήριο βελτιστοποίησης δεν έχει επιτευχθεί από την πρώτη γενιά (πράγμα σχεδόν βέβαιο να συμβεί), μία καινούργια γενιά αρχίζει να παράγεται: μέλη του πληθυσμού επιλέγονται σύμφωνα με τη προσαρμογή τους για να παράγουν απογόνους. Οι γονείς διασταυρώνονται για να παράγουν τους απογόνους. Όλοι οι απόγονοι θα μεταλλαχθούν με μία συγκεκριμένη πιθανότητα και στη συνέχεια υπολογίζεται η προσαρμογή όλων των απογόνων, οι οποίοι εισέρχονται στον πληθυσμό αντικαθιστώντας τους γονείς, παράγοντας έτσι την επόμενη γενιά. Ο κύκλος αυτός επαναλαμβάνεται μέχρι να επιτευχθεί το κριτήριο της βελτιστοποίησης.

Περισσότερες πληροφορίες για τους γενετικούς και εξελικτικούς αλγόριθμους μπορούν να βρεθούν στην πρόσφατη εργασία της ASCE Task Committee on Evolutionary Computation in Environmental and Water Resources Engineering [Nicklow et al., 2010]. Στην εργασία αυτή γίνεται μία συνολική αναφορά στην έρευνα που έχει γίνει μέχρι σήμερα με τη χρήση γενετικών αλγόριθμων στο πεδίο της περιβαλλοντικής πληροφορικής και παρουσιάζονται πολλές εφαρμογές γενετικών αλγόριθμων στη διαχείριση υδατικών συστημάτων, δικτύων ύδρευσης και αποχέτευσης, στην υδρολογική προσομοίωση και πρόγνωση και στην εκτίμηση της αβεβαιότητας των υδατικών συστημάτων [Nicklow et al., 2010].

4.2.9. Σύνοψη αλγόριθμων μηχανικής μάθησης

Συγκεντρωτικά για όλους τους παραπάνω αλγόριθμους της μηχανικής μάθησης, ο Πίνακας 4.1 παρουσιάζει τις διαφορετικές μορφές μεταβλητές εξόδου που δύνανται να μοντελοποιήσουν, καθώς και το είδος (ταξινόμησης-Τ, παλινδρόμησης-Π, ταξινόμησης και παλινδρόμησης-ΤΠ) του μοντέλου που κατασκευάζουν.

Μία σημαντική υπόθεση για την επιτυχία μίας εφαρμογής μηχανικής μάθησης είναι η σωστή εκμετάλλευση των παρεχόμενων δεδομένων. Όλοι οι αλγόριθμοι της μηχανικής μάθησης απαιτούν από αυτά να είναι ενοποιημένα σε ένα αρχείο εισόδου ακολουθώντας συγκεκριμένη τυποποίηση. Το ζητούμενο είναι τα παραδείγματα να αντιπροσωπεύονται από τις γραμμές του αρχείου και οι ιδιότητες από τις στήλες. Πολλές δυσκολίες προκύπτουν προς την κατεύθυνση της ενοποίησης των δεδομένων. Αυτά μπορούν να υπάρχουν σε διάφορες μορφές και σε διαφορετικά αποθηκευτικά μέσα. Μπορεί να

είναι κατανοημένες ή συγκεντρωμένες, σε αρχεία κειμένου, σε βάσεις δεδομένων, σε λογιστικά φύλλα, ταξινομημένες ή αταξινόμητες, χρονικά διατεταγμένες ή χωρικά διεσπαρμένες.

Πίνακας 4.1. Σύνοψη αλγορίθμων της μηχανικής μάθησης.

Αλγόριθμος	Τύπος εξαρτημένης μεταβλητής				
	Είδος	Κατηγορίας	Διάταξης	Διαστήματος	Αναλογίας
ZeroR	Τ/Π	✓	✓	✓	✓
Μοντέλο Εμμοής	Τ/Π	✓	✓	✓	✓
Κ-Κοντινότεροι Γείτονες	Τ/Π	✓	✓	✓	✓
Γραμμική παλινδρόμηση	Π			✓	✓
Λογιστική παλινδρόμηση	Π				✓
ARIMA/ARMA	Π				✓
Περιπτωσιακός Λογισμός	Τ/Π	✓	✓	✓	✓
Decision Stump	Τ/Π	✓	✓		
M5	Π			✓	✓
MLP NN	Τ/Π	✓	✓	✓	✓
GA	Τ/Π	✓	✓	✓	✓

Ο έλεγχος της ποιότητας της προσαρμογής των δεδομένων στους παραγόμενους κανόνες γίνεται με τον υπολογισμό και την εκτίμηση του σφάλματος. Υπάρχουν πολλά μέτρα εκτίμησης του σφάλματος στη βιβλιογραφία [Legates and McCabe, 1999; Dawson et al., 2007], εδώ όμως θα αναφερθούν τα βασικά από αυτά που έχουν και την πιο ευρεία βάση χρήσης στην υδρολογική πρόγνωση και προσομοίωση.

- **Σφάλμα πρόβλεψης (error)**

Το σφάλμα πρόβλεψης e_i για το παράδειγμα i είναι η απλή διαφορά ανάμεσα στην πραγματική μετρήσιμη τιμή της μεταβλητής y και στην προσαρμοσμένη από αλγόριθμο τιμή προσέγγισης f :

$$e_i = y_i - f_i \quad (4.15)$$

Το αντίστοιχο εκατοστιαίο σφάλμα πρόβλεψης είναι ο λόγος του σφάλματος προς την πραγματική τιμή:

$$pe_i = \frac{e_i}{y_i} \quad (4.16)$$

- **Μέσο Απόλυτο Σφάλμα (Mean Absolute Error, MAE)**

Το μέσο απόλυτο σφάλμα για ένα σύνολο δεδομένων L είναι η μέση τιμή για την απόλυτη τιμή του σφάλματος πρόβλεψης σε όλα τα παραδείγματα του συνόλου L :

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |f_i - y_i| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_i| \quad (4.17)$$

όπου n το πλήθος των παραδειγμάτων στο σύνολο L .

- **Μέσο Απόλυτο Εκατοστιαίο Σφάλμα (Mean Absolute Percentage Error, MAPE)**

Το μέσο απόλυτο εκατοστιαίο σφάλμα για ένα σύνολο δεδομένων L είναι η μέση τιμή για την απόλυτη τιμή του σφάλματος πρόβλεψης σε όλα τα παραδείγματα του συνόλου L :

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{f_i - y_i}{y_i} \right| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |pe_i| \quad (4.18)$$

όπου n το πλήθος των παραδειγμάτων στο σύνολο L .

- **Μέσο Τετραγωνισμένο Σφάλμα (Mean Squared Error, MSE)**

Το μέσο τετραγωνισμένο σφάλμα είναι η μέση τιμή του τετραγώνου του σφάλματος πρόβλεψης σε όλα τα παραδείγματα του συνόλου L :

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_i^2| \quad (4.19)$$

- **Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα (Root Mean Squared Error, RMSE)**

Το μέσο τετραγωνισμένο σφάλμα είναι τετραγωνική ρίζα της μέσης τιμής του τετραγώνου του σφάλματος πρόβλεψης σε όλα τα παραδείγματα του συνόλου L :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n |e_i^2|}{n}} \quad (4.20)$$

όπου n το πλήθος των παραδειγμάτων στο σύνολο L .

- **Βαθμός Απόδοσης (Model Efficiency, Eff)**

$$Eff = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - f_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4.21)$$

- **Δείκτης Συμφωνίας (Index of Agreement, IA)**

$$IA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - f_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|f_i - \bar{y}| + |f_i - y_i|)^2} \quad (4.22)$$

- **Δείκτης Εμμονής (Persistence Index, PI)**

$$PI = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - f_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{i-1})^2} \quad (4.23)$$

όπου, y_i and y_{i-1} είναι οι παρατηρημένες τιμές στον μήνα i και $i-1$, αντίστοιχα, f_i η υπολογισμένη τιμή στο μήνα i , and \bar{y} η μέση τιμή των παρατηρούμενων τιμών της περιόδου προσομοίωσης ($i = 1$ έως n τιμές δεδομένων). Οι Eff και PI κυμαίνονται από $-\infty$ έως ένα (1), ενώ ο IA από 0.0 (μη αποδεκτό μοντέλο) έως 1.0 (τέλειο μοντέλο). Τα τελευταία τρία στατιστικά κριτήρια (Εξισώσεις 4.21-4.23) είναι

αδιάστατοι συντελεστές που κρίνουν την συνολική απόδοση της μεθόδου της μηχανικής μάθησης και αποτελούν βελτιώσεις του συντελεστή προσδιορισμού, R^2 , για την αξιολόγηση των προσομοιώσεων και των προγνώσεων αφού είναι ευαίσθητα στις αλλαγές των παρατηρούμενων και προσομοιωμένων μέσω των τιμών και διακυμάνσεων [Legates and McCabe, 1999; Dawson et al., 2007].

4.2.10. Αλγόριθμοι αναφοράς

Οι αλγόριθμοι αναφοράς είναι απλοί στη μεθοδολογία και γρήγοροι στην εκτέλεση. Δεν μπορούν να προσαρμόσουν σωστές λύσεις σε δύσκολα προβλήματα, χρησιμοποιούνται όμως σαν δείκτες αναφοράς για τις λύσεις που προτείνουν οι άλλοι αλγόριθμοι. Στις περιπτώσεις που η απόδοση ενός αλγόριθμου A_i είναι μικρότερη από εκείνη ενός αλγόριθμου αναφοράς, τότε ο αλγόριθμος A_i απορρίπτεται σαν υποψήφιος για τη λύση του δεδομένου προβλήματος.

- **Μέση τιμή (ZeroR).** Ο αλγόριθμος αυτός του μηδενικού κανόνα προτείνει πάντα μία τιμή για την εξαρτημένη μεταβλητή y . Αυτή είναι ίση με την μέση τιμή της μεταβλητής στο σύνολο δεδομένων L όταν πρόκειται για συνεχή αριθμητική τιμή, ίση με την τιμή που εμφανίζεται με μεγαλύτερη συχνότητα, όταν πρόκειται για κατηγορική μεταβλητή. Ονομάζεται και πλειοψηφικός ταξινομητής (majority classifier).
- **Μοντέλο εμμονής (Persistence model).** Ο αλγόριθμος του μοντέλου εμμονής (ή επίμονου προβλέπτη) είναι ένας αλγόριθμος αναφοράς για τις περιπτώσεις των χρονοσειρών, εκεί δηλαδή όπου οι περιπτώσεις στα σύνολα εκπαίδευσης και αξιολόγησης βρίσκονται σε χρονική αλληλουχία. Η εκτιμώμενη τιμή που προτείνεται από τον αλγόριθμο αυτό για την εξαρτημένη μεταβλητή y_n είναι η εξαρτημένη μεταβλητή του αμέσως προηγούμενου στη χρονοσειρά παραδείγματος, y_{n-1} . Το μοντέλο εμμονής αποδίδει στις περιπτώσεις όπου η εξαρτημένη μεταβλητή δείχνει αδράνεια στο χρόνο.

4.3. Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα έχουν χρησιμοποιηθεί πάρα πολύ στις τελευταίες δεκαετίες σε προβλήματα πρόγνωσης σε πολλά επιστημονικά πεδία [Adya and Collory, 1998; Zhang et al., 1998; Zhang and Qi, 2005; De Gooijer and Hyndman, 2006]. Τα πλεονεκτήματα των ANNs σε σχέση με τις μεθόδους παλινδρόμησης είναι ότι δεν χρειάζονται εκ των προτέρων γνώση της διαδικασίας, γιατί έχουν ιδιότητες μαύρου κουτιού (black-box properties), είναι μη γραμμικά εξαιτίας του ότι οι νευρώνες ενεργοποιούν ένα μη γραμμικό φίλτρο που ονομάζεται συνάρτηση ενεργοποίησης και έχουν μεγάλες ικανότητες γενίκευσης που τα κάνουν ελκυστικά σε πλειάδα προβλημάτων όπως της υδρολογικής πρόγνωσης και προσομοίωσης [Coulibaly et al., 1999; ASCE, 2000a,b; Govindaraju and Rao, 2000; Maier and Dandy, 2000; Dawson and Wilby, 2001; Abrahart et al., 2004; Abrahart et al., 2008].

4.3.1. Αρχιτεκτονικές δικτύων

Ο τρόπος με τον οποίο οι νευρώνες ενός νευρωνικού δικτύου είναι δομημένοι είναι στενά συνδεδεμένος με τον αλγόριθμο εκπαίδευσης που χρησιμοποιείται για την εκπαίδευση του δικτύου. Γενικά, υπάρχουν τρεις βασικές διαφορετικές τάξεις αρχιτεκτονικών δικτύου:

- Μονοεπίπεδα προς τα Εμπρός Τροφοδοτούμενα Νευρωνικά Δίκτυα.

- Πολυεπίπεδα προς τα Εμπρός Τροφοδοτούμενα Νευρωνικά Δίκτυα.
- Αναδρομικά Δίκτυα.

Σε ένα νευρωνικό δίκτυο με επίπεδα, οι νευρώνες οργανώνονται με τη μορφή επιπέδων. Στην απλούστερη μορφή ενός δικτύου με επίπεδα, υπάρχει ένα επίπεδο εισόδου από κόμβους πηγής που προβάλλεται πάνω σε ένα επίπεδο εξόδου από νευρώνες (υπολογιστικοί κόμβοι), αλλά όχι το αντίστροφο. Με άλλα λόγια, αυτό το δίκτυο είναι τροφοδοτούμενο προς τα εμπρός ή ακυκλικού τύπου και απεικονίζεται στο Σχήμα 4.7^α για την περίπτωση των τεσσάρων κόμβων και στο επίπεδο εισόδου και στο επίπεδο εξόδου. Ένα τέτοιο δίκτυο καλείται *μονοεπίπεδο δίκτυο*, με τον χαρακτηρισμό 'μονοεπίπεδο' να αναφέρεται στο επίπεδο εξόδου των υπολογιστικών κόμβων (νευρώνες). Δεν υπολογίζεται το επίπεδο εισόδου των κόμβων πηγής, γιατί δεν εκτελείται κανένας υπολογισμός εκεί.

Η δεύτερη τάξη ενός τροφοδοτούμενου προς τα εμπρός νευρωνικού δικτύου διακρίνει τον εαυτό της από την παρουσία ενός ή περισσότερων κρυφών επιπέδων, των οποίων οι υπολογιστικοί κόμβοι καλούνται αντιστοίχως *κρυφοί νευρώνες* ή *κρυφές μονάδες*. Η λειτουργία των κρυφών νευρώνων είναι να μεσολαβεί μεταξύ της εισόδου και της εξόδου του δικτύου με κάποιο χρήσιμο τρόπο. Προσθέτοντας ένα ή περισσότερα κρυφά επίπεδα, το δίκτυο καθίσταται ικανό να εξάγει στατιστικά υψηλότερης τάξης. Με μια μάλλον ασαφή έννοια το δίκτυο αποκτά μια *ολική όψη* παρά την τοπική του συνδετικότητα λόγω του επιπλέον συνόλου από συναπτικές συνδέσεις και την επιπλέον διάσταση των νευρωνικών αλληλεπιδράσεων. Η ικανότητα των κρυφών νευρώνων να εξάγουν στατιστικά υψηλότερης τάξης είναι ιδιαιτέρως πολύτιμη, όταν το μέγεθος του επιπέδου εισόδου είναι μεγάλο.

Οι κόμβοι πηγής στο επίπεδο εισόδου του δικτύου παρέχουν τα αντίστοιχα στοιχεία του προτύπου ενεργοποίησης (διάνυσμα εισόδου), τα οποία αποτελούν τα σήματα εισόδου που εφαρμόζονται στους νευρώνες (υπολογιστικοί κόμβοι) στο δεύτερο επίπεδο (δηλαδή στο πρώτο κρυφό επίπεδο). Τα σήματα εξόδου του δευτέρου επιπέδου χρησιμοποιούνται ως είσοδοι για το τρίτο επίπεδο, και αυτό επαναλαμβάνεται για το υπόλοιπο δίκτυο. Τυπικώς, οι νευρώνες σε κάθε επίπεδο του δικτύου έχουν ως εισόδους τους τα σήματα εξόδου του προηγούμενου επιπέδου μόνο. Το σύνολο των σημάτων εξόδου των νευρώνων στο επίπεδο εξόδου (τελικό) του δικτύου αποτελεί την συνολική απόκριση του δικτύου για το παρεχόμενο πρότυπο ενεργοποίησης από τους κόμβους πηγής στο επίπεδο εισόδου. Ο αρχιτεκτονικός τύπος του Σχήματος 4.7^β παρουσιάζει τη διάταξη του πολυεπίπεδου προς τα εμπρός τροφοδοτούμενου νευρωνικού δικτύου για δύο κρυφά επίπεδα. Για συντομία το δίκτυο (Σχήμα 4.7^β) αναφέρεται ως ένα 4-4-4-2 δίκτυο, γιατί έχει τέσσερις κόμβους πηγής (εισόδου), τέσσερις κρυφούς νευρώνες σε κάθε κρυφό επίπεδο και δύο νευρώνες εξόδου. Ως ένα άλλο παράδειγμα, ένα τροφοδοτούμενο προς τα εμπρός δίκτυο με m κόμβους πηγής, h_1 νευρώνες στο πρώτο κρυφό επίπεδο, h_2 νευρώνες στο δεύτερο κρυφό επίπεδο και q νευρώνες στο επίπεδο εξόδου αναφέρεται ως ένα m - h_1 - h_2 - q δίκτυο.

Ένα *αναδρομικό νευρωνικό δίκτυο* διακρίνει τον εαυτό του από ένα τροφοδοτούμενο προς τα εμπρός νευρωνικό δίκτυο κατά το ότι έχει τουλάχιστον ένα βρόγχο *ανάδρασης*. Για παράδειγμα, ένα αναδρομικό δίκτυο μπορεί να αποτελείται από ένα μονό επίπεδο από νευρώνες με κάθε νευρώνα να τροφοδοτεί το σήμα εξόδου του πίσω στις εισόδους όλων των άλλων νευρώνων, όπως παρουσιάζεται στον αρχιτεκτονικό γράφο του Σχήματος 4.7^γ. Στη δομή που απεικονίζεται σε αυτό το σχήμα δεν υπάρχουν βρόγχοι αυτο-ανάδρασης στο δίκτυο. Η αυτο-ανάδραση αναφέρεται στην περίπτωση όπου η έξοδος ενός νευρώνα τροφοδοτείται πίσω στην δική του είσοδο. Το αναδρομικό δίκτυο που απεικονίζεται στο Σχήμα 4.7^γ δεν έχει, επίσης, κρυφούς νευρώνες. Στο Σχήμα 4.7^δ απεικονίζεται μία άλλη κλάση αναδρομικών δικτύων με κρυφούς νευρώνες. Οι συνδέσεις ανάδρασης που απεικονίζονται στο Σχήμα 4.7^δ προέρχονται από τους κρυφούς νευρώνες καθώς επίσης και από τους νευρώνες εξόδου. Η παρουσία των βρόγχων ανάδρασης, είτε στην αναδρομική δομή του Σχήματος 4.7^γ είτε του Σχήματος 4.7^δ, έχει ένα βαθύ αντίκτυπο στην ικανότητα εκπαίδευσης του δικτύου και στην απόδοσή του.

Επιπλέον, οι βρόγχοι ανάδρασης περιπλέκουν τη χρησιμοποίηση συγκεκριμένων κλάδων που αποτελούνται από *στοιχεία μονάδας καθυστέρησης* (δηλώνονται με z^{-1}), που έχουν ως αποτέλεσμα μια μη γραμμική δυναμική συμπεριφορά, υποθέτοντας ότι το νευρωνικό δίκτυο περιέχει μη γραμμικές μονάδες.

4.3.2. Συναρτήσεις ενεργοποίησης

Η συνάρτηση ενεργοποίησης, που δηλώνεται από την $\varphi(u)$, ορίζει την έξοδο ενός νευρώνα σε σχέση με το επηρεασμένο τοπικό πεδίο. Τρεις βασικοί τύποι συναρτήσεων ενεργοποίησης αναγνωρίζονται [Hagan et al., 1996; Haykin, 1999] και παρουσιάζονται παρακάτω.

- **Συνάρτηση Κατωφλιού**

Η συνάρτηση κατωφλιού ενεργοποίησης είναι:

$$\varphi(u) = \begin{cases} 1 & \text{αν } u > 0 \\ 0 & \text{αν } u \leq 0 \end{cases} \quad (4.24)$$

Στην βιβλιογραφία η μορφή αυτή μιας συνάρτησης κατωφλιού κοινώς αναφέρεται ως μια συνάρτηση Heaviside. Αντιστοίχως, η έξοδος ενός νευρώνα k που κατέχει μια τέτοια συνάρτηση κατωφλιού, εκφράζεται ως:

$$y_k = \begin{cases} 1 & \text{αν } u_k > 0 \\ 0 & \text{αν } u_k \leq 0 \end{cases} \quad (4.25)$$

όπου u_k είναι το επηρεασμένο τοπικό πεδίο του νευρώνα, δηλαδή:

$$u_k = \sum_{j=1}^m w_{kj} x_j + b_j \quad (4.26)$$

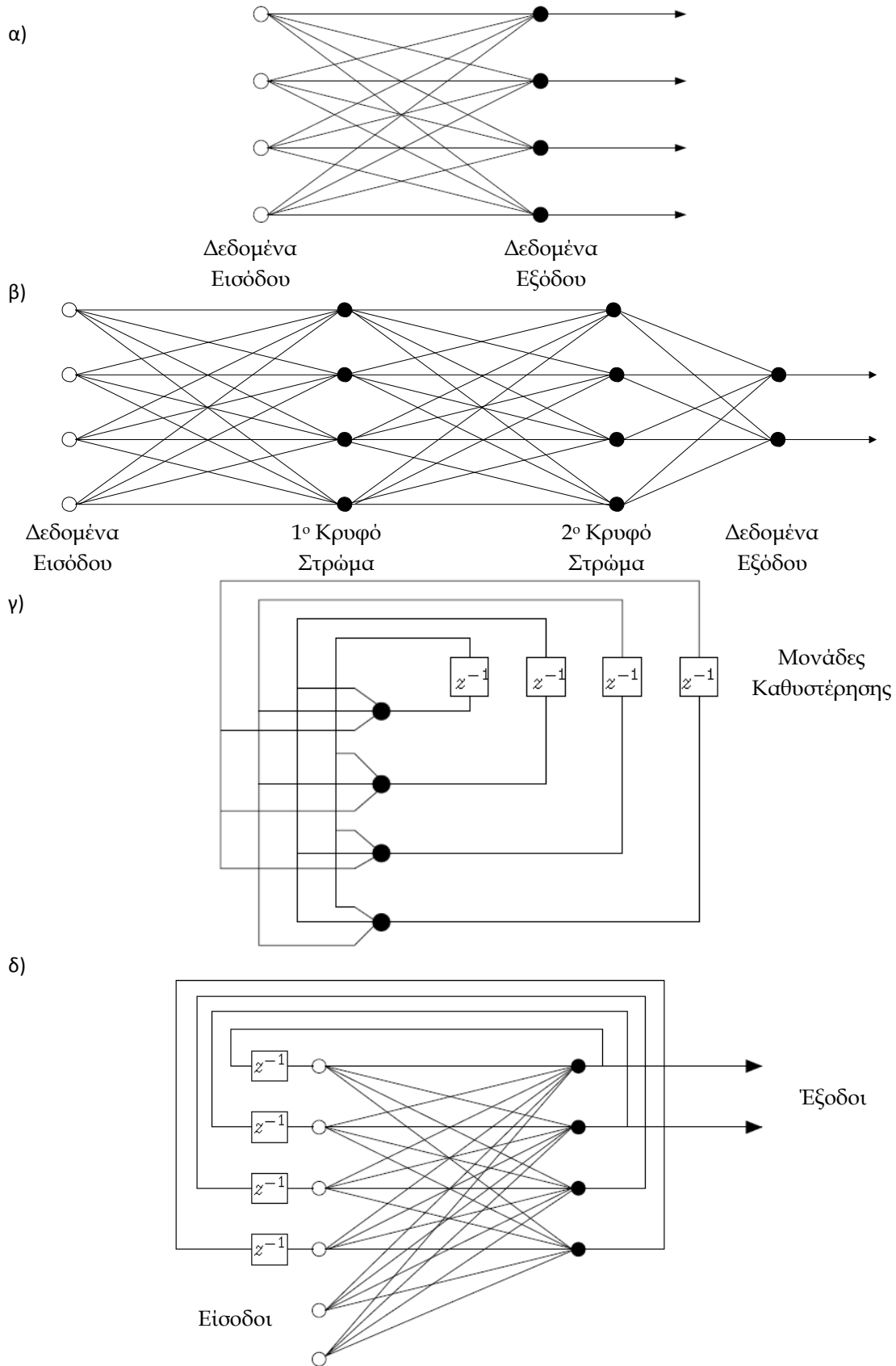
- **Κατά τμήματα Γραμμική Συνάρτηση**

Η κατά τμήματα γραμμική συνάρτηση ενεργοποίησης περιγράφεται από:

$$\varphi(u) = \begin{cases} 1 & \text{αν } u \geq +\frac{1}{2} \\ u & \text{αν } -\frac{1}{2} > u > +\frac{1}{2} \\ 0 & \text{αν } u \leq -\frac{1}{2} \end{cases} \quad (4.27)$$

όπου ο παράγοντας ενίσχυσης μέσα στην γραμμική περιοχή της δράσης υποτίθεται ότι είναι μοναδιαίος. Αυτός ο τύπος συνάρτησης ενεργοποίησης μπορεί να θεωρηθεί ως μια προσέγγιση ενός μη γραμμικού ενισχυτή. Οι ακόλουθες δύο περιπτώσεις μπορούν να θεωρηθούν ως ειδικές μορφές της κατά τμήματα γραμμικής συνάρτησης:

- Ένας γραμμικός συσχετιστής παρουσιάζεται αν η γραμμική περιοχή δράσης διατηρείται χωρίς να οδεύει σε κορεσμό.
- Η κατά τμήματα γραμμική συνάρτηση ελαττώνεται σε μια συνάρτηση κατωφλιού, αν ο παράγοντας ενίσχυσης της γραμμικής περιοχής γίνεται απείρως μεγάλος.



Σχήμα 4.7. Αρχιτεκτονικοί τύποι νευρωνικών δικτύων α) εμπρόσθια τροφοδοτούμενο ή ακυκλικό δίκτυο με ένα μονοεπίπεδο από νευρώνες, β) ενός πολυεπίπεδου perceptron με δύο κρυφά επίπεδα, γ) αναδρομικό δίκτυο χωρίς βρόγχους αυτοανάδρασης και κρυφούς νευρώνες, και δ) αναδρομικό δίκτυο με κρυφούς νευρώνες τύπου Elman.

- **Σιγμοειδής Συνάρτηση**

Η σιγμοειδής συνάρτηση, της οποίας το γράφημα έχει σχήμα S, είναι ο πιο κοινός τύπος συνάρτησης ενεργοποίησης που χρησιμοποιείται στην κατασκευή τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Ορίζεται ως μία αυστηρά αύξουσα συνάρτηση, η οποία επιδεικνύει μια «χαριτωμένη» ισορροπία μεταξύ της μη γραμμικής και γραμμικής συμπεριφοράς. Ένα παράδειγμα της σιγμοειδής συνάρτησης είναι η λογιστική συνάρτηση, που ορίζεται από:

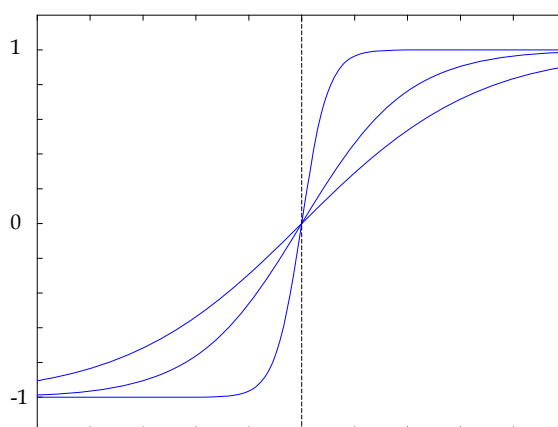
$$\varphi(v) = \frac{1}{1 + \exp(-av)} \quad (4.28)$$

όπου a είναι η παράμετρος κλίσης της σιγμοειδούς συνάρτησης. Διαφοροποιώντας την παράμετρο a , επιτυγχάνονται σιγμοειδείς συναρτήσεις με διαφορετικές κλίσεις, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.8. Στην πραγματικότητα, η κλίση στην αρχή των συντεταγμένων είναι ίση με $a/4$. Στο όριο, καθώς η παράμετρος κλίσης τείνει στο άπειρο, η σιγμοειδής συνάρτηση γίνεται απλώς μια συνάρτηση κατωφλιού. Ενώ μια συνάρτηση κατωφλιού λαμβάνει την τιμή 0 ή 1, μια σιγμοειδής συνάρτηση λαμβάνει ένα συνεχές πεδίο τιμών από 0 έως 1. Σημειώνεται, επίσης, ότι η σιγμοειδής συνάρτηση είναι διαφορίσιμη, ενώ η συνάρτηση κατωφλιού δεν είναι.

Οι συναρτήσεις ενεργοποίησης που ορίστηκαν παραπάνω κυμαίνονται από το 0 ως το 1. Είναι επιθυμητό, μερικές φορές, να έχουμε το πεδίο της συνάρτησης ενεργοποίησης από το -1 στο +1, που στην περίπτωση αυτή, η συνάρτηση ενεργοποίησης λαμβάνει ένα αντισυμμετρικό τύπο σε σχέση με την αρχή των συντεταγμένων. Δηλαδή, η συνάρτηση ενεργοποίησης είναι μια περιττή συνάρτηση του επηρεασμένου τοπικού πεδίου. Για τον αντίστοιχο τύπο μιας σιγμοειδούς συνάρτησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί η *συνάρτηση υπερβολικής εφαπτομένης* (hyperbolic tangent function), που ορίζεται από

$$\varphi(u) = \alpha \tanh(\beta u) \quad (4.29)$$

όπου α και β είναι οι παράμετροι της σιγμοειδούς συνάρτησης. Οι συναρτήσεις σιγμοειδούς τύπου από το -1 στο +1 παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα σε προβλήματα παλινδρόμησης από τις υπόλοιπες συναρτήσεις ενεργοποίησης [Bishop, 1996; Haykin, 1999].

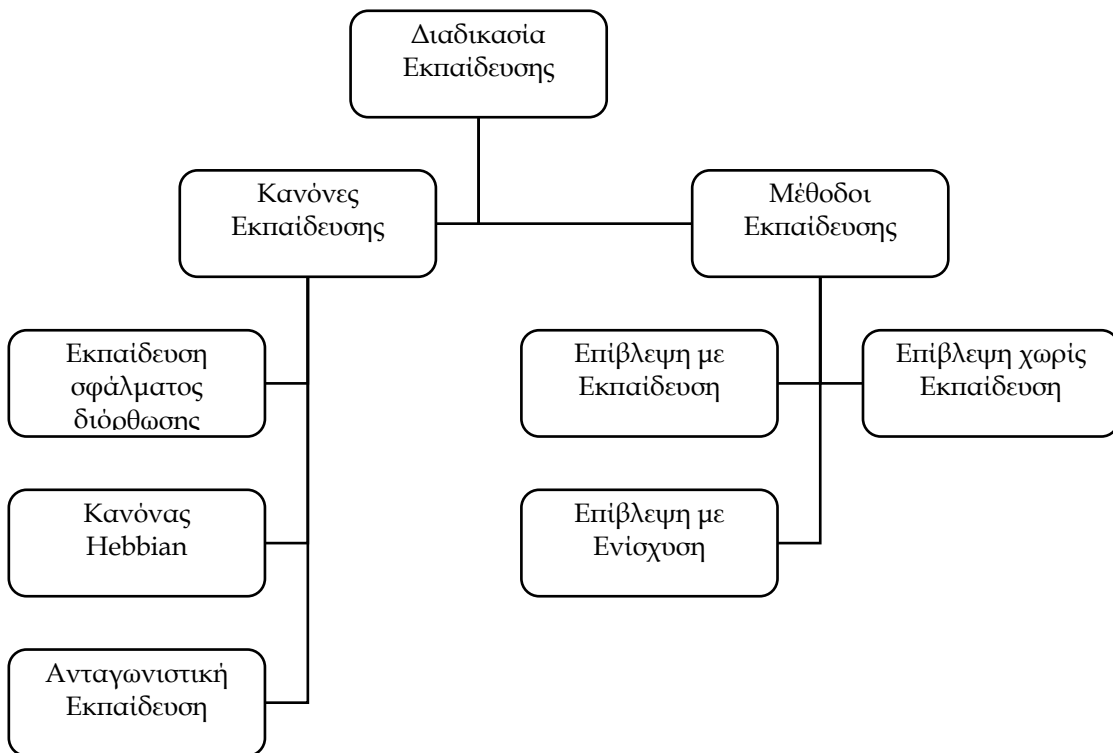


Σχήμα 4.8. Σιγμοειδής συνάρτηση.

4.3.3. Εκπαίδευση των τεχνητών νευρωνικών δικτύων

Η ιδιότητα, η οποία είναι πρωτεύουσας σημασίας για ένα νευρωνικό δίκτυο είναι η ικανότητα του δικτύου να μαθαίνει από το περιβάλλον του και να βελτιώνει την απόδοσή του μέσω της εκπαίδευσης. Η βελτίωση στην απόδοση λαμβάνει χώρα πάνω στον χρόνο σε συμφωνία με κάποιο προκαθορισμένο μέτρο. Ένα νευρωνικό δίκτυο μαθαίνει για το περιβάλλον του μέσω μιας αλληλεπιδραστικής

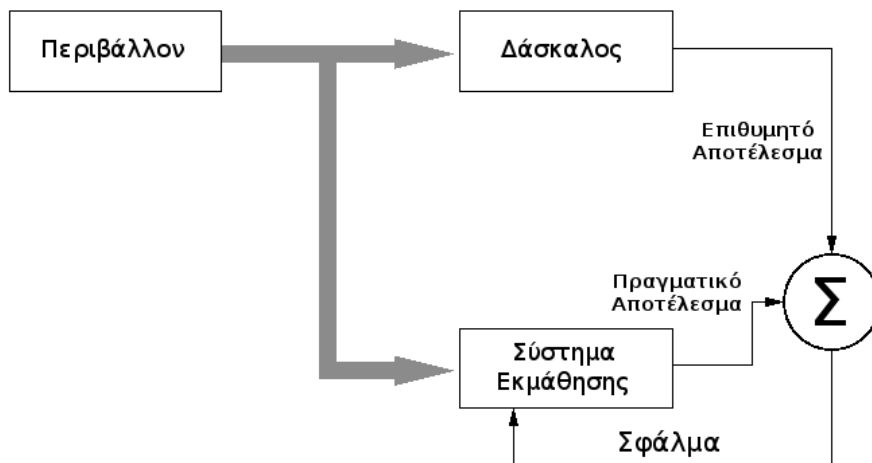
διαδικασίας από ρυθμίσεις που εφαρμόζονται στα επίπεδα των συναπτικών τους βαρών και των μεροληψιών. Ιδανικά, το δίκτυο γίνεται πιο γνωστικό για το περιβάλλον του μετά από κάθε επανάληψη της διαδικασίας εκπαίδευσης. Υπάρχουν πάρα πολλές δραστηριότητες που συνδέονται με την έννοια της εκπαίδευσης που δικαιολογεί τον ορισμό της με ένα ακριβή τρόπο. Η εκπαίδευση (training) ορίζεται στο περιβάλλον των νευρωνικών δικτύων [Mendel και McClaren, 1970] ως μια διαδικασία από την οποία οι ελεύθερες παράμετροι ενός νευρωνικού δικτύου προσαρμόζονται μέσω μιας διαδικασίας διέγερσης από το περιβάλλον στο οποίο είναι εμπεδωμένο το δίκτυο. Ο τύπος της εκπαίδευσης καθορίζεται από τον τρόπο με τον οποίο λαμβάνει χώρα η αλλαγή των παραμέτρων. Ένα προκαθορισμένο σύνολο από καλά ορισμένους κανόνες για την επίλυση ενός προβλήματος εκπαίδευσης καλείται *αλγόριθμος εκπαίδευσης*. Οι γενικές κατηγορίες αλγορίθμων απεικονίζονται στο Σχήμα 4.9. Βασικά, οι αλγόριθμοι εκπαίδευσης διαφέρουν μεταξύ τους στον τρόπο με τον οποίο διατυπώνεται η ρύθμιση ενός συναπτικού βάρους ενός νευρώνα. Ένας άλλος παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη είναι ο τρόπος με τον οποίο ένα νευρωνικό δίκτυο (μηχανή εκπαίδευσης), φτιαγμένο από ένα σύνολο από διασυνδεδεμένους νευρώνες, σχετίζεται με το περιβάλλον του.



Σχήμα 4.9. Οι διαδικασίες εκπαίδευσης των νευρωνικών δικτύων.

Στην μάθηση με επίβλεψη είναι απαραίτητη η παρουσία ενός εξωτερικού, ως προς το δίκτυο, παράγοντα που μπορεί να ονομαστεί «δάσκαλος». Στο Σχήμα 4.10 απεικονίζεται ο τρόπος που επιδρά ο δάσκαλος στο δίκτυο και το περιβάλλον κατά την διαδικασία μάθησης. Ο δάσκαλος έχει την απαραίτητη γνώση για το περιβάλλον, που πρακτικά είναι ένα σύνολο από παραδείγματα εισόδου και την αντίστοιχη επιθυμητή έξοδο. Το ΤΝΔ δεν έχει καμία γνώση για το περιβάλλον. Αν υποθέσουμε ότι παρουσιάζεται στον δάσκαλο και το δίκτυο ένα πρότυπο από το περιβάλλον, τότε λόγω της προηγούμενης γνώσης του δασκάλου για το περιβάλλον, θα είναι σε θέση να παρέχει στο δίκτυο την επιθυμητή απάντηση-έξοδο. Στη συνέχεια οι παράμετροι του δικτύου προσαρμόζονται ανάλογα με το πρότυπο που χρησιμοποιείται για την εκπαίδευση και το σφάλμα του δικτύου (δηλαδή την διαφορά μεταξύ της επιθυμητής εξόδου και της εξόδου που στην πράξη δίνει το δίκτυο). Η προσαρμογή αυτών

των παραμέτρων, γίνεται επαναληπτικά, βήμα προς βήμα με στόχο το δίκτυο να μπορεί να προσομοιώσει τον δάσκαλο. Αν αυτό γίνει εφικτό, τότε μπορεί να επιτραπεί στο δίκτυο να αλληλεπιδράσει με το περιβάλλον χωρίς την παρουσία του δασκάλου. Μια μορφή μάθησης με επίβλεψη είναι και η μάθηση με διόρθωση σφάλματος. Η μάθηση με επίβλεψη είναι ένα σύστημα κλειστού βρόγχου στο οποίο δεν περιλαμβάνεται το περιβάλλον μέσα στο οποίο λειτουργεί το δίκτυο. Σαν μέτρο απόδοσης για το σύστημα θεωρείται ένα είδος μέσου τετραγωνικού σφάλματος (π.χ. την μέση τιμή του αθροίσματος των τετραγωνικών σφαλμάτων) που ορίζεται σαν συνάρτηση των ελεύθερων παραμέτρων του συστήματος. Αυτή η συνάρτηση μπορεί να παρασταθεί σαν μια πολυδιάστατη *επιφάνεια σφάλματος* που σαν συντεταγμένες έχει τις ελεύθερες παραμέτρους του συστήματος. Κάθε λειτουργία του συστήματος υπό την επίβλεψη του δασκάλου αναπαριστάται σαν ένα σημείο στην επιφάνεια σφάλματος. Για τη βελτίωση της απόδοσης του συστήματος στη διάρκεια του χρόνου θα πρέπει το σημείο αυτό να έχει καθοδική πορεία προς κάποιο ελάχιστο, τοπικό ή ολικό, της επιφάνειας σφάλματος. Ένα σύστημα που μαθαίνει με επίβλεψη, έχει την δυνατότητα να μετακινεί το σημείο αυτό προς ένα ελάχιστο με την χρήση κάποιας πληροφορίας που έχει για την *κλίση* (gradient) της επιφάνειας σφάλματος που αντιστοιχεί στην συμπεριφορά του συστήματος την συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Η κλίση της επιφάνειας σφάλματος σε οποιοδήποτε σημείο είναι ένα διάνυσμα που έχει κατεύθυνση προς την πιο *απτόμη κάθοδο* (Steepest descent). Στην πράξη, όταν πρόκειται για μάθηση με επίβλεψη από παραδείγματα το σύστημα χρησιμοποιεί μια στιγμιαία προσέγγιση του διανύσματος κλίσης.



Σχήμα 4.10. Εκπαίδευση με επίβλεψη των νευρωνικών δικτύων.

4.3.4. Κανόνες εκπαίδευσης των τεχνητών νευρωνικών δικτύων

Υπάρχουν πολλοί κανόνες – οδηγίες που πρέπει να ακολουθούνται στην εκπαίδευση των τεχνητών νευρωνικών δικτύων [ASCE Task Committee on Application of Artificial Neural Networks in Hydrology, 2000a,b; Maier and Dandy, 2000; Dawson and Wilby, 2001; Maier and Dandy, 2001]. Οι βασικές οδηγίες σχετίζονται με την βέλτιστη αρχιτεκτονική και βελτιστοποίηση του δικτύου, με την προεπεξεργασία δεδομένων εισόδου, με την εύρεση των κατάλληλων δεδομένων εισόδου, με την ικανότητα της γενίκευσης των τεχνητών νευρωνικών δικτύων και αποφυγή υπερπροσαρμογής, με την επιλογή του δείγματος εκπαίδευσης [Maier and Dandy, 2000]. Συνήθως, οι βέλτιστοι κανόνες επιλέγονται με τη μέθοδο δοκιμής λάθους (trial and error procedure), με προχωρημένες στατιστικές τεχνικές και με τη χρήση ευφυών συστημάτων (expert knowledge systems). Η υποκειμενική όμως γνώση και αντίληψη του ερευνητή έχει μεγάλο ρόλο στο τελικό αποτέλεσμα [Coulibaly et al., 1999; Maier and Dandy, 2000; Dawson and Wilby, 2001].

Ένα πολυεπίπεδο νευρωνικό δίκτυο εκπαιδευμένο με τον αλγόριθμο οπίσθιας διάδοσης του σφάλματος μπορεί, γενικά, να μάθει γρηγορότερα (όσον αφορά τον αριθμό των επαναλήψεων της εκπαίδευσης που απαιτούνται όταν η σιγμοειδής συνάρτηση ενεργοποίησης που βρίσκεται μέσα στο μοντέλο του νευρώνα είναι αντισυμμετρική παρά όταν είναι συμμετρική. Μια συνάρτηση ενεργοποίησης $\varphi(u)$ είναι αντισυμμετρική (περιττή συνάρτηση ως προς την μεταβλητή της) όταν $\varphi(-u) = -\varphi(u)$. Ένα δημοφιλές παράδειγμα αντισυμμετρικής συνάρτησης ενεργοποίησης είναι η σιγμοειδής μη γραμμικότητα με τη μορφή της υπερβολικής εφαπτομένης, που ορίζεται από $\varphi(u) = \alpha \tanh(\beta u)$, όπου, α και β είναι σταθερές. Κατάλληλες τιμές για τις σταθερές είναι $\alpha = 1.7159$ και $\beta = 2/3$. Η οριζόμενη συνάρτηση υπερβολικής εφαπτομένης έχει τις ακόλουθες χρήσιμες ιδιότητες:

- $\varphi(1) = 1$ και $\varphi(-1) = -1$.
- Στην αρχή των αξόνων η κλίση της συνάρτησης ενεργοποίησης είναι κοντά στη μονάδα, όπως φαίνεται από $\varphi'(0) = \alpha\beta = 1.7159 \cdot 2/3 = -1.1424$.
- Η δεύτερη παράγωγος της $\varphi(u)$ επιτυγχάνει τη μέγιστη τιμή της στο $u = 1$.

Μια καλή επιλογή για τις αρχικές τιμές των συναπτικών βαρών και των κατωφλιών του δικτύου μπορεί να είναι τεράστια βοήθεια για τον σχεδιασμό ενός επιτυχημένου δικτύου. Όταν στα συναπτικά βάρη δίνονται μεγάλες αρχικές τιμές, είναι πολύ πιθανό ότι οι νευρώνες του δικτύου να οδηγηθούν σε κορεσμό. Αν συμβεί αυτό, οι τοπικές κλίσεις στον αλγόριθμο οπίσθιας διάδοσης του σφάλματος λαμβάνουν μικρές τιμές, οι οποίες με την σειρά τους θα κάνουν την διαδικασία εκπαίδευσης να επιβραδυνθεί. Ωστόσο, αν στα συναπτικά βάρη δοθούν μικρές αρχικές τιμές, ο αλγόριθμος οπίσθιας διάδοσης του σφάλματος μπορεί να λειτουργεί σε πολύ επίπεδες περιοχές γύρω από την αρχή των συντεταγμένων της επιφάνειας σφάλματος. Αυτό είναι ιδιαίτερα πιθανό στην περίπτωση των αντισυμμετρικών συναρτήσεων ενεργοποίησης, όπως η συνάρτηση της υπερβολικής εφαπτομένης. Δυστυχώς, η αρχή των συντεταγμένων είναι ένα *σελλοειδές* ή *σαγματικό σημείο* (saddle point), το οποίο αναφέρεται σε ένα στάσιμο σημείο όπου η καμπυλότητα της επιφάνειας σφάλματος εγκάρσια της σέλλας είναι αρνητική και κατά μήκος της σέλλας είναι θετική. Γι' αυτούς τους λόγους πρέπει να αποφεύγεται η χρήση μεγάλων και μικρών τιμών για την αρχικοποίηση των συναπτικών βαρών.

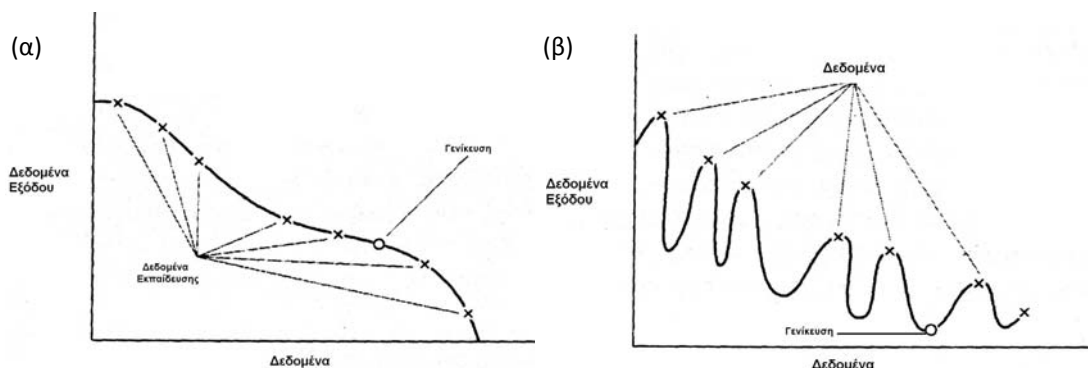
Κάθε μεταβλητή εισόδου πρέπει να υποστεί προεπεξεργασία, έτσι ώστε η μέση τιμή της για ολόκληρο το σύνολο εκπαίδευσης να είναι κοντά στο μηδέν, ή διαφορετικά να είναι μικρή συγκρινόμενη με την τυπική απόκλιση. Για να εκτιμηθεί η πρακτική αξία αυτού του κανόνα, έστω η ακραία περίπτωση όπου οι μεταβλητές εισόδου είναι θετικές. Σε αυτήν την περίπτωση, τα συναπτικά βάρη ενός νευρώνα στο πρώτο κρυφό επίπεδο μπορούν μόνο να αυξηθούν μαζί ή να ελαττωθούν μαζί. Επομένως, αν το διάνυσμα των βαρών αυτού του νευρώνα πρόκειται να αλλάξει κατεύθυνση, μπορεί να το κάνει παλινδρομώντας μέσα στην επιφάνεια σφάλματος, το οποίο είναι τυπικά αργό και γι' αυτό το λόγο πρέπει να αποφεύγεται. Για να επιταχυνθεί η διαδικασία εκπαίδευσης των τεχνητών νευρωνικών δικτύων (με βάση τον αλγόριθμο οπίσθιας διάδοσης του σφάλματος ή άλλο αλγόριθμο βελτιστοποίησης), η κανονικοποίηση των εισόδων πρέπει, επίσης, να περιλαμβάνει δύο άλλα μέτρα [Haykin, 1999]:

- Οι μεταβλητές εισόδου που περιέχονται στο σύνολο εκπαίδευσης πρέπει να είναι *μη συσχετιζόμενες*. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί π.χ. χρησιμοποιώντας την ανάλυση κύριων συνιστωσών (principal components analysis).
- Οι αποσυσχετισμένες μεταβλητές εισόδου πρέπει να διαβαθμιστούν έτσι ώστε οι *συνδιακυμάνσεις* να είναι περίπου ίσες, εξασφαλίζοντας ως εκ τούτου ότι τα διαφορετικά συναπτικά βάρη στο δίκτυο μαθαίνουν περίπου με την ίδια ταχύτητα.

Στην εκπαίδευση των τεχνητών νευρωνικών δικτύων, τυπικά, επιλέγεται ένα δείγμα εκπαίδευσης και με βάση κάποιον αλγόριθμο βελτιστοποίησης οπίσθιας διάδοσης του σφάλματος υπολογίζονται τα συναπτικά βάρη ενός πολυεπίπεδου νευρωνικού δικτύου φορτώνοντας όσο το δυνατόν περισσότερα παραδείγματα εκπαίδευσης στο δίκτυο. Η προσδοκία είναι ότι το νευρωνικό δίκτυο που σχεδιάστηκε έτσι θα γενικεύεται. Ένα δίκτυο λέγεται ότι γενικεύει καλά όταν η απεικόνιση εισόδου-εξόδου που υπολογίζεται από το δίκτυο είναι σωστή (ή πολύ κοντά) για δεδομένα δοκιμής που δεν χρησιμοποιήθηκαν ποτέ στη δημιουργία ή στην εκπαίδευση του δικτύου. Ο όρος *γενίκευση* (*generalization*) είναι δανεικός από την ψυχολογία. Στη συγκεκριμένη περίπτωση υποτίθεται ότι τα δεδομένα δοκιμής επιλέγονται από τον ίδιο πληθυσμό που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία των δεδομένων εκπαίδευσης.

Η διαδικασία της εκπαίδευσης ενός νευρωνικού δικτύου μπορεί να θεωρηθεί ως ένα *πρόβλημα προσαρμογής καμπύλης*. Το ίδιο το δίκτυο μπορεί να θεωρηθεί απλά ως μια μη γραμμική απεικόνιση εισόδου-εξόδου. Έτσι, η γενίκευση θεωρείται όχι ως μια μυστική ιδιότητα των νευρωνικών δικτύων, αλλά απλά ως το αποτέλεσμα μιας καλής μη γραμμικής παρεμβολής των δεδομένων εισόδου [Fausett, 1994; Bishop, 1995]. Το δίκτυο εκτελεί χρήσιμη παρεμβολή αρχικώς, γιατί τα πολυεπίπεδα νευρωνικά δίκτυα με συνεχείς συναρτήσεις ενεργοποίησης οδηγούν σε συναρτήσεις εξόδου, που επίσης είναι συνεχείς.

Στο Σχήμα 4.11 διευκρινίζεται πώς μπορεί να επέλθει η γενίκευση σε ένα υποθετικό δίκτυο. Η μη γραμμική απεικόνιση εισόδου-εξόδου που αναπαριστάται από την καμπύλη που απεικονίζεται σε αυτήν την εικόνα υπολογίζεται από το δίκτυο ως ένα αποτέλεσμα της εκπαίδευσης των σημείων που προσδιορίζονται ως *δεδομένα εκπαίδευσης*. Το σημείο που σημειώθηκε στην καμπύλη ως *γενίκευση*, συμπερασματικά μπορεί να θεωρηθεί ως το αποτέλεσμα της παρεμβολής που εκτελέστηκε από το δίκτυο. Ένα νευρωνικό δίκτυο που σχεδιάστηκε για να γενικεύει καλά θα παράγει μια σωστή απεικόνιση εισόδου-εξόδου, ακόμη και όταν η είσοδος είναι ελαφρώς διαφορετική από τα παραδείγματα που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση του δικτύου, όπως διευκρινίζεται στο Σχήμα 4.11^α. Όταν, ωστόσο, ένα νευρωνικό δίκτυο μαθαίνει πάρα πολλά παραδείγματα εισόδου-εξόδου, το δίκτυο μπορεί να καταλήξει να απομνημονεύει τα δεδομένα εκπαίδευσης. Μπορεί να το κάνει αυτό βρίσκοντας μια ιδιότητα (λόγω του θορύβου για παράδειγμα) που είναι παρούσα στα δεδομένα εκπαίδευσης, αλλά όχι στην πραγματικότητα στην υποκείμενη συνάρτηση που πρόκειται να αναπαραχθεί (Σχήμα 4.11^β). Ένα τέτοιο φαινόμενο αναφέρεται ως *υπερπροσαρμογή* ή *υπερεκπαίδευση*. Όταν το δίκτυο υπερεκπαίδευτεί, χάνει την ικανότητά του να γενικεύει μεταξύ παρόμοιων προτύπων εισόδου-εξόδου.



Σχήμα 4.11. (α) Σωστή προσαρμογή δεδομένων (καλή γενίκευση) και (β) Υπερπροσαρμοσμένα δεδομένα (κακή γενίκευση).

Η γενίκευση επηρεάζεται από τρεις παράγοντες :

- 1) Το μέγεθος του συνόλου εκπαίδευσης και κατά πόσο είναι αντιπροσωπευτικό για το περιβάλλον ενδιαφέροντος.
- 2) Την αρχιτεκτονική του νευρωνικού δικτύου.
- 3) Τη φυσική πολυπλοκότητα του υπό χειρισμό προβλήματος.

4.3.5. Αλγόριθμος της οπίσθιας διάδοσης του σφάλματος

Ένα πολυεπίπεδο νευρωνικό δίκτυο έχει τρία διακριτικά χαρακτηριστικά δηλαδή:

- 1) Το μοντέλο κάθε νευρώνα, που περιλαμβάνει μια *μη γραμμική συνάρτηση ενεργοποίησης*. Το σημαντικό σημείο που τονίζεται εδώ είναι ότι η μη γραμμικότητα είναι ομαλή (παντού διαφορίσιμη), αντίθετα με την συνάρτηση αυστηρών ορίων (hard limit) που χρησιμοποιήθηκε στο perceptron από τον Rosenblatt [1958]. Μια κοινά χρησιμοποιήσιμη μορφή της μη γραμμικότητας, που ικανοποιεί αυτή την απαίτηση, είναι η σιγμοειδής μη γραμμικότητα. Η παρουσία των γραμμικότητων είναι σημαντική, γιατί διαφορετικά η σχέση εισόδου-εξόδου του δικτύου μπορεί να ελαττωθεί σε αυτήν του μονοεπίπεδου perceptron. Επιπλέον, η χρησιμοποίηση της λογιστικής συνάρτησης είναι βιολογικά εμπνευσμένα, αφού προσπαθεί να ερμηνεύσει την φάση αδράνειας των πραγματικών νευρώνων.
- 2) Το δίκτυο, που περιέχει ένα ή περισσότερα επίπεδα από κρυφούς νευρώνες, οι οποίοι δεν είναι μέρος της εισόδου ή της εξόδου του δικτύου. Αυτοί οι κρυφοί νευρώνες καθιστούν δυνατό το δίκτυο να μάθει περίπλοκες εργασίες αποσπώντας προοδευτικά πιο σημαντικές ιδιότητες από τα πρότυπα εισόδου (διανύσματα).
- 3) Το δίκτυο, που επιδεικνύει ένα υψηλό βαθμό συνδεσιμότητας, καθοριζόμενο από τις συνάψεις του δικτύου. Μια αλλαγή στην συνδεσιμότητα του δικτύου απαιτεί μια αλλαγή στον πληθυσμό των συναπτικών συνδέσεων ή των βαρών τους.

Μέσω του συνδυασμού αυτών των χαρακτηριστικών μαζί με την ικανότητα γενίκευσης από εμπειρία μέσω της εκπαίδευσης, τα πολυεπίπεδα νευρωνικά δίκτυα παράγουν την υπολογιστική τους δύναμη. Ωστόσο, αυτά τα χαρακτηριστικά είναι, επίσης, υπεύθυνα για τις ατέλειες στην παρούσα κατάσταση γνώσης για την συμπεριφορά του δικτύου. Καταρχάς, η παρουσία μιας κατανεμημένης μορφής μη γραμμικότητας και η υψηλή συνεκτικότητα του δικτύου καθιστά δύσκολη την εγγύηση της θεωρητικής ανάλυσης ενός πολυεπίπεδου νευρωνικού δικτύου. Δεύτερον, η χρήση κρυφών νευρώνων κάνουν την διαδικασία εκπαίδευσης δυσκολότερη στην νοερή απεικόνιση. Με μια αναμφίβολη έννοια, η διαδικασία εκπαίδευσης πρέπει να αποφασίσει ποιά χαρακτηριστικά των προτύπων εισόδου πρέπει να αναπαρασταθούν από τους κρυφούς νευρώνες. Γι' αυτό το λόγο, η διαδικασία εκπαίδευσης γίνεται ακόμα πιο δύσκολη, γιατί η αναζήτηση πρέπει να διεξαχθεί σε ένα μεγαλύτερο χώρο πιθανών λειτουργιών και να γίνει μια επιλογή μεταξύ εναλλακτικών αναπαραστάσεων του πρότυπου εισόδου. Η χρήση του όρου *οπίσθια διάδοση του σφάλματος* φαίνεται να έχει αναπτυχθεί μετά το 1986, όταν η χρήση του διαδόθηκε ευρέως μετά την έκδοση του δημιουργικού βιβλίου των Rumelhart and McClelland με τίτλο «Parallel Distributed Processing». Η ανάπτυξη του αλγορίθμου οπίσθιας διάδοσης του σφάλματος αποτελεί ένα ορόσημο στα νευρωνικά δίκτυα κατά το ότι παρέχει μια υπολογιστικά αποτελεσματική μέθοδο για την εκπαίδευση πολυεπίπεδων νευρωνικών δικτύων. Παρόλο που σήμερα κανείς δεν μπορεί να ισχυριστεί ότι ο αλγόριθμος αυτός παρέχει μια βέλτιστη λύση για όλα τα επιλύσιμα προβλήματα, δημιούργησε νέους ορίζοντες στην εκπαίδευση των πολυεπίπεδων νευρωνικών δικτύων.

Η εκπαίδευση της οπίσθιας διάδοσης του σφάλματος (back propagation error) [Rumelhart and McClelland, 1986] αποτελείται από δύο περάσματα μέσω των διαφορετικών επιπέδων του δικτύου, ενός *εμπρόσθιου περάσματος* και ενός *οπίσθιου περάσματος*:

- Στο εμπρόσθιο πέρασμα ένα πρότυπο δράσης (διάνυσμα εισόδου) εφαρμόζεται στους αισθητήριους κόμβους του δικτύου και το αποτέλεσμα του διαδίδεται μέσω του δικτύου επίπεδο με επίπεδο. Τελικά, δημιουργείται ένα σύνολο από εξόδους ως η πραγματική απόκριση του δικτύου. Κατά τη διάρκεια του εμπρόσθιου περάσματος τα συναπτικά βάρη των δικτύων παραμένουν όλα σταθερά.
- Κατά τη διάρκεια του οπίσθιου περάσματος η πραγματική απόκριση του δικτύου αφαιρείται από μια επιθυμητή απόκριση (στόχο) για να παράγει ένα σήμα σφάλματος. Στη συνέχεια, αυτό το σήμα σφάλματος διαδίδεται οπισθίως μέσω του δικτύου έναντι της διεύθυνσης των συναπτικών συνδέσεων. Γι' αυτό το λόγο ονομάστηκε οπίσθια διάδοση του σφάλματος. Τα συναπτικά βάρη ρυθμίζονται, σύμφωνα με ένα κανόνα σφάλματος-διόρθωσης για να κάνουν την πραγματική απόκριση του δικτύου να μετακινηθεί κοντύτερα στην επιθυμητή απόκριση με μια στατιστική έννοια.

Η διαδικασία εκπαίδευσης που εκτελείται με τον αλγόριθμο αυτό καλείται εκπαίδευση οπίσθιας διάδοσης του σφάλματος [Rumelhart and McClelland, 1986; Rumelhart et al., 1986a,b] και παρουσιάζεται περιληπτικά στον διάγραμμα ροής του παρακάτω αλγορίθμου (Αλγόριθμος 4.1). Περισσότερες πληροφορίες μπορούν να βρεθούν στις αρχικές αναφορές [Rumelhart and McClelland, 1986; Rumelhart et al., 1986a,b] αλλά και σε πλειάδα αναφορών στη διεθνή βιβλιογραφία.

Αλγόριθμος 4.1. Ο αλγόριθμος Backpropagation

-
- 1: Αρχικοποίηση w^0 , $\rho \in (0, 1)$, $\sigma \in (0, 1)$, $k = 0$, k^{max} , ϵ .
 - 2: Αν $(\|\nabla E(w^k)\| = 0)$ ή $(E(w^k) \leq \epsilon)$ ή $(k > k^{max})$ τότε σταμάτα.
 - 3: Υπολογισμός της κατεύθυνσης αναζήτησης

$$d_k = -\nabla E(w)$$

- 4: Για $\rho, \sigma \in (0, 1)$ βρες την παράμετρο $l_k \in \mathbb{Z}^+$ τέτοια ώστε ο ρυθμός μάθησης $\eta_k = \bar{\eta}_k \cdot \rho^{l_k}$ να ικανοποιεί

$$E(w^k + \eta_k d_k) - E(w^k) \leq \sigma \eta_k \nabla E(w^k)^T d_k$$

- 5: Ενημέρωση των βαρών

$$w^{k+1} = w^k + \eta_k d_k$$

- 6: Θέσε $k = k + 1$ και πήγαινε στο 2.
-

4.3.6. Εκπαίδευση με επίβλεψη ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης

Η εκπαίδευση με επίβλεψη ενός πολυεπίπεδου νευρωνικού δικτύου έχει σημειώσει τεράστια πρόοδο από την εποχή που χρησιμοποιούνταν ο αλγόριθμος της οπίσθιας διάδοσης σφάλματος [Golden, 1996; McLoone and Irwin, 1999]. Οι εξελίξεις στους αλγόριθμους εκπαίδευσης ενσωματώνουν ευρετικές (heuristic) τεχνικές στον αλγόριθμο οπίσθιας διάδοσης, όπως η Quickprop [Fahlman, 1988], τεχνικές αλγορίθμων ολικής βελτιστοποίησης (global optimising random search methods) όπως η προσομοιωμένη απόψηση (simulated annealing) [Kirkpatrick et al., 1983], οι γενετικοί [Goldberg, 1989; Schwefel, 1995; Michalewicz, 1996] και εξελικτικοί αλγόριθμοι (evolutionary algorithms) [Duan et al., 1992; Reeves, 1993] καθώς και τεχνικές παράλληλης εφαρμογής [Broyden et al., 1973; McLoone and Irwin, 1997].

Οι μεγαλύτερες, όμως, εξελίξεις στην εκπαίδευση των ΤΝΔ από τις ισχυρές τεχνικές δεύτερης τάξης βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς [Gill et al., 1981; McKeown et al., 1991; Fletcher, 2000]. Αυτή η

κατηγορία μεθόδων κλίσης είναι αυτές που χρησιμοποιούν, εκτός από την κλίση, και τις μερικές παραγώγους δεύτερης τάξης της συνάρτησης. Οι μέθοδοι αυτές αναφέρονται στη βιβλιογραφία ως τεχνικές *Newton* και *Quasi-Newton*, με τις πρώτες να υποθέτουν τον αναλυτικό και τις τελευταίες τον προσεγγιστικό υπολογισμό του εσσιανού μητρώου. Σε αυτό το πεδίο οι σημαντικότερες έρευνες περιέχουν τον αλγόριθμο περιορισμένης μνήμης (memory-less ή limited memory, LM) BFGS [Battiti and Masulli, 1990; Battiti, 1992], τον κλιμακωτό αλγόριθμο συζυγών κλίσεων (Scaled Conjugate Gradient algorithm, SCG) [Møller, 1990], τον αλγόριθμο συζυγών κλίσεων με επανεκκινήσεις Powell (Conjugate Gradient algorithm with Powell Restarts, CGPR) [Van Der Smagt, 1994], τον BFGS αλγόριθμο πλήρης μνήμης (Full Memory BFGS training algorithm, FM) [McLoone and Irwin, 1995] και τον αλγόριθμο Levenberg-Marquardt [Webb et al., 1988]. Οι παραπάνω αλγόριθμοι ταξινομούνται με βάση τα μητρώα πινάκων ή μητρώα διανυσμάτων (matrix based or vector based) ανάλογα με το αν οι απαιτήσεις της μνήμης είναι $O(N_w^2)$ ή $O(N_w)$ όπου N_w ο αριθμός των συναπτικών βαρών του δικτύου. Οι πιο διαδεδομένες προσεγγίσεις των μητρώων πινάκων είναι ο αλγόριθμος πλήρης μνήμης FM BFGS και ο αλγόριθμος Levenberg-Marquardt, οι οποίοι είναι δύο τάξεις πιο γρήγοροι στην εκπαίδευση των ΤΝΔ σε σχέση με τον αλγόριθμο οπίσθιας διάδοσης του σφάλματος [Golden, 1996; McLoone and Irwin, 1999]. Ενώ ο αλγόριθμος Levenberg-Marquardt συγκλίνει πάρα πολύ γρήγορα για προβλήματα χαμηλής τάξης, η μεγαλύτερη υπολογιστική πολυπλοκότητα του τον καθιστά κατώτερο από τον αλγόριθμο FM BFGS για τα περισσότερα προβλήματα εκπαίδευσης ΤΝΔ [Webb et al., 1988; Golden, 1996]. Από τους vector-based αλγόριθμους οι πιο συνηθισμένοι είναι ο αλγόριθμος συζυγών κλίσεων και οι περιορισμένης μνήμης BFGS αλγόριθμοι. Οι αλγόριθμοι αυτοί έχουν περιορισμένες απαιτήσεις σε μνήμη αλλά δεν είναι τόσο ισχυροί όσο οι αλγόριθμοι με βάση τα μητρώα πινάκων και είναι μόλις μίας τάξης πιο γρήγοροι από τον αλγόριθμο οπίσθιας διάδοσης σφάλματος.

Η διαθέσιμη υπολογιστική μνήμη επιβάλλει την επιλογή των αλγόριθμων εκπαίδευσης των ΤΝΔ με μέχρι στιγμής μόνο με δύο επιλογές: Αν υπάρχει αρκετή υπολογιστική μνήμη διαθέσιμη, τότε η FM BFGS είναι η μόνη επιλογή. Διαφορετικά, η χρήση των αλγόριθμων συζυγών κλίσεων και περιορισμένης μνήμης LM BFGS είναι επιβεβλημένη [McLoone and Irwin, 1999]. Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχει ένας τεράστιος αριθμός εφαρμογών όπου Quasi-Newton (QN) μέθοδοι έχουν χρησιμοποιηθεί για την εκπαίδευση των ΤΝΔ [Grippo et al., 1986; Alpsan et al., 1995; Setiono and Hui, 1995; Denton and Hung, 1996; Ishikawa et al., 1996; Lightbody and Irwin, 1996; Sperduti and Starita, 1997; Chen et al., 1999; McLoone and Irwin, 1999; Sorensen et al., 1999; Likas and Stafylopatis, 2000; Plagianakos et al., 2002; Phua and Ming, 2003; Abraham, 2004; Karaca et al., 2006; Li and Liu, 2006; Nawi et al., 2006; Yin and Du, 2007; Peng and Magoulas, 2007]. Οι παραπάνω μελέτες απέδειξαν την ικανότητα εκπαίδευσης και γενίκευσης των τεχνητών νευρωνικών δικτύων με μεθόδους Quasi-Newton για ποικίλες εφαρμογές προβλημάτων παλινδρόμησης και ταξινόμησης. Επίσης, σε μία πρόσφατη συγκριτική μελέτη οι μέθοδοι Quasi-Newton παρουσίασαν την μεγαλύτερη πιθανότητα επιτυχημένης εκπαίδευσης ΤΝΔ σε ποικίλα προβλήματα σε σύγκριση με μεθόδους συζυγών κλίσεων, και μεθόδους οπίσθιας διάδοσης του σφάλματος [Livieris and Pintelas, 2008]. Επίσης, στην ίδια μελέτη η χρήση του παράγοντα κλιμάκωσης που πρότεινε ο Al-Baali [1998a,b] βελτιώνει σημαντικά την απόδοση της μη μονότονης μεθόδου της κλιμακωτής BFGS (Adaptive self-scaling non-monotone BFGS) των Peng and Magoulas [2007].

Στην παρούσα διατριβή, η εκπαίδευση με επίβλεψη ενός πολυεπίπεδου νευρωνικού δικτύου αντιμετωπίζεται ως ένα πρόβλημα αριθμητικής βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς. Η επιφάνεια σφάλματος ενός πολυεπίπεδου νευρωνικού δικτύου με εκπαίδευση με επίβλεψη είναι μια μη γραμμική συνάρτηση του διανύσματος των συναπτικών βαρών w . Έστω ότι $E_{AV}(w)$ δηλώνει τη συνάρτηση κόστους, στρογγυλεμένη κατά μέσο όρο στο δείγμα εκπαίδευσης. Χρησιμοποιώντας τις σειρές Taylor μπορεί να γίνει επέκταση της $E_{AV}(w)$ γύρω από το τρέχον σημείο της επιφάνειας σφάλματος $w(n)$ για παράδειγμα, όπως περιγράφεται από την εξαρτώμενη από το n εξίσωση:

$$E_{AV}(w(n) + \Delta w(n)) = E_{AV}(w(n)) + g^T(n) \Delta w(n) + \frac{1}{2} \Delta w^T(n) H(n) \Delta w(n) + o(w(n)^3) \quad (4.30)$$

όπου $g(n)$ είναι το τοπικό διάνυσμα κλίσης που ορίζεται από:

$$g(n) = \left. \frac{\partial E_{AV}(n)}{\partial w} \right|_{w=w(n)} \quad (4.31)$$

και $H(n)$ είναι ο τοπικός Εσσιανός πίνακας που ορίζεται από:

$$H(n) = \left. \frac{\partial^2 E_{AV}(n)}{\partial w^2} \right|_{w=w(n)} \quad (4.32)$$

Η χρήση μιας ομαδικής στρογγυλεμένης κατά μέσο όρο συνάρτησης κόστους $E_{AV}(w)$ συνεπάγεται ένα μαζικό τρόπο εκπαίδευσης. Στη μέθοδο της πιο απότομης καθόδου, παραδειγματισμένη από τον αλγόριθμο οπίσθιας διάδοσης του σφάλματος, η ρύθμιση $\Delta w(n)$ που εφαρμόζεται στο διάνυσμα των συναπτικών βαρών $w(n)$ ορίζεται από:

$$\Delta w(n) = -\eta g(n) \quad (4.33)$$

όπου η είναι η παράμετρος του ρυθμού εκπαίδευσης. Πρακτικώς, η μέθοδος της πιο απότομης καθόδου λειτουργεί βάση μιας γραμμικής προσέγγισης της συνάρτησης κόστους στην τοπική γειτονιά του σημείου λειτουργίας $w(n)$. Κάνοντας αυτό, βασίζεται στο διάνυσμα κλίσης $g(n)$ ως τη μόνη πηγή τοπικής πληροφορίας για την επιφάνεια σφάλματος. Αυτός ο περιορισμός έχει ένα ευεργετικό αποτέλεσμα: απλότητα στην υλοποίηση. Δυστυχώς, έχει επίσης ένα επιζήμιο αποτέλεσμα: έναν αργό ρυθμό σύγκλισης, ιδιαίτερα στην περίπτωση προβλημάτων μεγάλης τάξεως δηλαδή, προβλήματα με εκατοντάδες ή χιλιάδες ρυθμιζόμενες παραμέτρους. Ο συνυπολογισμός του όρου ορμής στην εξίσωση ανανέωσης για το διάνυσμα των συναπτικών βαρών είναι μια ακατέργαστη προσπάθεια χρησιμοποίησης πληροφορίας δεύτερης τάξης για την επιφάνεια σφάλματος, η οποία είναι αρκετά βοηθητική. Ωστόσο, η χρήση της κάνει τη διαδικασία εκπαίδευσης πιο εκλεπτυσμένη στη διαχείριση, προσθέτοντας ένα ακόμα στοιχείο στην λίστα των παραμέτρων που πρέπει να ρυθμιστούν από τον σχεδιαστή. Για να παραχθεί μια σημαντική βελτίωση στην απόδοση σύγκλισης ενός πολυεπίπεδου νευρωνικού δικτύου (συγκρινόμενο με την εκπαίδευση οπίσθιας διάδοσης του σφάλματος), πρέπει να χρησιμοποιηθεί υψηλότερης τάξης πληροφορία στην διαδικασία εκπαίδευσης. Αυτό γίνεται εμπλέκοντας μια τετραγωνική προσέγγιση της επιφάνειας σφάλματος γύρω από το τρέχον σημείο $w(n)$. Στη συνέχεια, βρίσκεται από την Εξ. 4.30 ότι η βέλτιστη τιμή της ρύθμισης $\Delta w(n)$ που εφαρμόζεται στο διάνυσμα των συναπτικών βαρών $w(n)$ δίνεται από:

$$\Delta w^*(n) = H^{-1}(n)g(n) \quad (4.34)$$

όπου $H^{-1}(n)$ είναι ο αντίστροφος του Εσσιανού πίνακα $H(n)$, υποθέτοντας ότι υπάρχει. Η Εξ. (4.34) είναι η ουσία της μεθόδου *Newton*. Αν η συνάρτηση κόστους $E_{AV}(w)$ είναι τετραγωνική, η μέθοδος του *Newton* συγκλίνει στη βέλτιστη λύση σε μια επανάληψη. Ωστόσο, η πρακτική εφαρμογή της μεθόδου *Newton* στην εκπαίδευση με επίβλεψη ενός πολυεπίπεδου νευρωνικού δικτύου μειονεκτεί για τους ακόλουθους λόγους:

- 1) Απαιτεί υπολογισμό του αντίστροφου του Εσσιανού πίνακα $H^{-1}(n)$, το οποίο μπορεί να είναι υπολογιστικά αδύνατο λόγω της μνήμης που απαιτείται στο δίκτυο.
- 2) Για να είναι υπολογίσιμος ο $H^{-1}(n)$, ο $H(n)$ θα πρέπει να είναι μη ιδιάζων. Στην περίπτωση όπου ο $H(n)$ είναι θετικά ορισμένος, η επιφάνεια σφάλματος γύρω από το τρέχον σημείο $w(n)$ είναι περιγράψιμη από μια κυρτή λεκάνη. Δυστυχώς, δεν υπάρχει καμία εγγύηση ότι ο Εσσιανός πίνακας της επιφάνειας σφάλματος του πολυεπίπεδου νευρωνικού δικτύου θα ταιριάζει πάντα σε αυτήν την περιγραφή. Επιπλέον, υπάρχει το ενδεχόμενο πρόβλημα να είναι ο Εσσιανός πίνακας ανεπαρκούς βαθμού (να μην είναι όλες οι στήλες του H γραμμικώς ανεξάρτητες), το οποίο είναι αποτέλεσμα της εγγενούς κακής κατάστασης των προβλημάτων εκπαίδευσης νευρωνικών δικτύων [Saarinen et al., 1992]. Αυτό μόνο καθιστά την υπολογιστική εργασία ακόμα πιο δύσκολη.

- 3) Όταν η συνάρτηση κόστους $E_{AV}(w)$ δεν είναι τετραγωνική, τότε δεν υπάρχει καμία εγγύηση για την σύγκλιση της μεθόδου Newton, γεγονός που την κάνει ακατάλληλη για την εκπαίδευση πολυεπίπεδου νευρωνικού δικτύου.

Για να ξεπεραστούν οι παραπάνω δυσκολίες, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια *Quasi-Newton μέθοδος*, η οποία απαιτεί μόνο ένα υπολογισμό του διανύσματος κλίσεως g . Αυτή η τροποποίηση της μεθόδου Newton διατηρεί ένα θετικά ορισμένο υπολογισμό του αντίστροφου πίνακα H^{-1} , απευθείας, χωρίς την αντιστροφή πίνακα. Χρησιμοποιώντας έναν τέτοιο υπολογισμό, εξασφαλίζεται ότι μια Quasi-Newton μέθοδος θα προχωρά κατηφορικά στην επιφάνεια σφάλματος. Ωστόσο, ακόμη υπάρχει μια υπολογιστική πολυπλοκότητα που είναι $O(W^2)$, όπου W είναι το μέγεθος του διανύσματος των βαρών w . Οι Quasi-Newton μέθοδοι είναι, γι' αυτό το λόγο, υπολογιστικά μη πρακτικές, εκτός από την εκπαίδευση πολύ μικρής τάξεως νευρωνικών δικτύων.

Άλλη μια τάξη μεθόδων βελτιστοποίησης δευτέρας τάξεως περιλαμβάνει την *μέθοδο συζυγών κλίσεων*, η οποία μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι κάτι ενδιάμεσο μεταξύ της μεθόδου της πιο απότομης καθόδου και της μεθόδου Newton. Η χρήση της μεθόδου των συζυγών κλίσεων προέκυψε από την επιθυμία να επιταχυνθεί ο αλγόριθμος σύγκλισης με την μέθοδο της πιο απότομης καθόδου, αποφεύγοντας εν τω μεταξύ τις υπολογιστικές απαιτήσεις που σχετίζονται με τον υπολογισμό, την αποθήκευση και την αντιστροφή του Εσσιανού πίνακα στη μέθοδο Newton. Μεταξύ των μεθόδων βελτιστοποίησης δευτέρας τάξεως, είναι ευρέως αναγνωρισμένο ότι η μέθοδος συζυγών κλίσεων είναι ίσως η μόνη που μπορεί να εφαρμοστεί σε προβλήματα μεγάλης τάξεως, δηλαδή, προβλήματα με εκατοντάδες ή χιλιάδες ρυθμιζόμενες παραμέτρους [Fletcher, 2000]. Γι' αυτό το λόγο, ταιριάζουν καλά για την εκπαίδευση πολυεπίπεδων νευρωνικών δικτύων, με τυπικές εφαρμογές συμπεριλαμβανομένου της προσέγγισης συναρτήσεων, του ελέγχου και της ανάλυσης χρονοσειρών (παλινδρόμηση).

Η στρατηγική της *γραμμικής αναζήτησης* επιλέγει μια κατεύθυνση αναζήτησης d_k και ψάχνει κατά μήκος αυτής της κατεύθυνσης για τον υπολογισμό του νέου σημείου x_{k+1} με βάση το δεδομένο σημείο x_k χρησιμοποιώντας την επαναληπτική σχέση $x_{k+1} = x_k + \alpha_k d_k$. Οι περισσότερες μέθοδοι γραμμικής αναζήτησης απαιτούν, η κατεύθυνση d_k να είναι μια καθοδική κατεύθυνση, επειδή η ιδιότητα $d_k^T \nabla f_k < 0$ εγγυάται ότι η συνάρτηση f ελαττώνει την τιμή της προς αυτήν την κατεύθυνση. Η κατεύθυνση d_k ονομάζεται καθοδική κατεύθυνση αν

$$d_k = -B_k^{-1} \nabla f_k \quad (4.35)$$

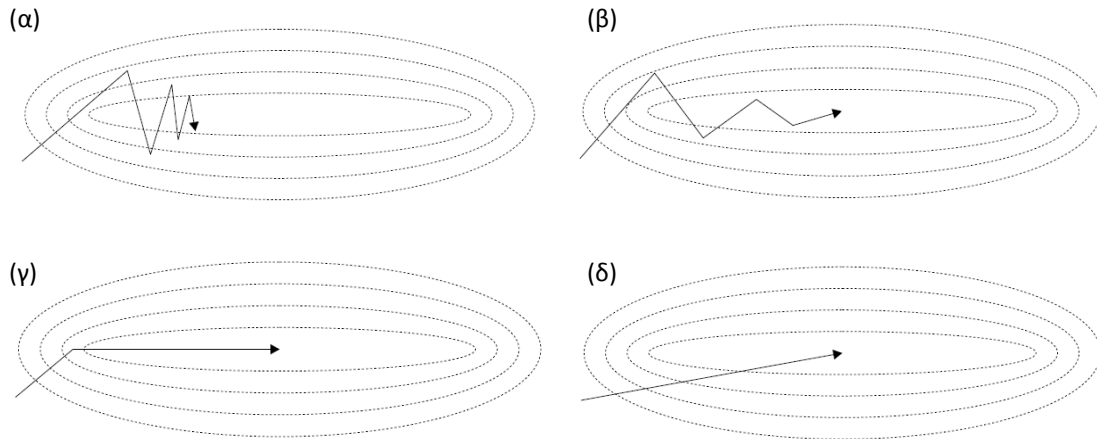
όπου ο B_k είναι ένας συμμετρικός, μη-ιδιάζων πίνακας και ∇f_k ο Ιακωβιανός πίνακας στην k επανάληψη.

Στην μέθοδο της απότομης καθόδου ο πίνακας B_k είναι ο μοναδιαίος πίνακας I , ενώ στις Quasi-Newton μεθόδους, ο πίνακας B_k είναι μια προσέγγιση του Εσσιανού πίνακα, ο οποίος ενημερώνεται σε κάθε επανάληψη από όρους ενός τύπου χαμηλής τάξης. Όταν η κατεύθυνση d_k ορίζεται από την Εξίσωση (4.35) και ο B_k είναι θετικά ορισμένος πίνακας, τότε η κατεύθυνση d_k είναι μια καθοδική κατεύθυνση. Οι διαφορετικές κατευθύνσεις που ακολουθούνται στις μεθόδους γραμμικής αναζήτησης έχουν σαν αποτέλεσμα τις μεθόδους της απότομης καθόδου, Quasi-Newton και των συζυγών κλίσεων. Ενδεικτικά, το παρακάτω σχήμα παρουσιάζει τους ρυθμούς σύγκλισης των μεθόδων απότομης καθόδου, Quasi-Newton και των συζυγών κλίσεων (Σχήμα 4.12).

4.3.7. Μέθοδοι Quasi-Newton

Οι *μέθοδοι Quasi-Newton* [Dennis and More, 1977; Golden, 1996; Nocedal and Wright, 2006] είναι καλοί εναλλακτικοί τρόποι για την επιλογή κατεύθυνσης μιας και δεν απαιτούν τον υπολογισμό του

Εσσιανού πίνακα και επιτυγχάνουν υπεργραμμική σύγκλιση [Powell, 1976; Byrd et al., 1992; Dennis and Schnabel, 1996; Nocedal and Wright, 2006]. Ειδικότερα, στην κατεύθυνση Newton στη θέση του Εσσιανού πίνακα $\nabla^2 f_k$, χρησιμοποιείται μια προσέγγιση του B_k , η οποία ενημερώνεται σε κάθε επανάληψη. Οι ενημερώσεις αυτές κάνουν χρήση του γεγονότος ότι οι αλλαγές στην πρώτη παράγωγο προμηθεύουν πληροφορίες για τη δεύτερη παράγωγο.



Σχήμα 4.12. Ρυθμός σύγκλισης των μεθόδων (α) απότομης καθόδου, (β) απότομης καθόδου με ορμή, (γ) Συζυγών κλίσεων και δ) Quasi-Newton

Θεώρημα Taylor.

Έστω μια συνάρτηση $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ συνεχώς διαφορίσιμη και $d \in \mathbb{R}^n$. Τότε:

$$f(x+d) = f(x) + \nabla f(x)^T d \tag{4.36}$$

για κάποιο $t \in (0, 1)$. Επίσης, αν η f είναι δύο φορές συνεχώς διαφορίσιμη τότε:

$$\nabla f(x+d) = \nabla f(x) + \int_0^1 \nabla^2 f(x+td) dt \tag{4.37}$$

και

$$f(x+d) = f(x) + \nabla f(x)^T d + \frac{1}{2} d^T \nabla^2 f(x) d \tag{4.38}$$

για κάποιο $t \in (0, 1)$.

Χρησιμοποιώντας την Εξ. 4.36 από το Θεώρημα του Taylor και προσθέτοντας και αφαιρώντας τον όρο $\nabla^2 f(x)d$ έχουμε την ακόλουθη σχέση:

$$\nabla f(x+d) = \nabla f(x) + \nabla^2 f(x)d + \int_0^1 [\nabla^2 f(x+td) - \nabla^2 f(x)] dt \tag{4.39}$$

Επειδή η $\nabla f(\cdot)$ είναι συνεχής, το μέγεθος του όρου του ολοκληρώματος είναι $o(\|d\|)$. Θέτοντας $x = x_k$ και $d = x_{k+1} - x_k$ έχουμε:

$$\nabla f_{k+1} = \nabla f_k + \nabla^2 f_{k+1}(x_{k+1} - x_k) + o(\|x_{k+1} - x_k\|) \tag{4.40}$$

Όταν τα x_k και x_{k+1} βρίσκονται σε μια περιοχή κοντά στο x^* , μέσα στην οποία ο πίνακας $\nabla^2 f$ είναι θετικά ορισμένος, ο όρος $\nabla^2 f_{k+1}(x_{k+1}-x_k)$ είναι ο κυρίαρχος όρος του αναπτύγματος, τότε μπορεί να ειπωθεί ότι:

$$\nabla^2 f_{k+1}(x_{k+1} - x_k) \approx \nabla f_{k+1} - \nabla f_k \quad (4.41)$$

Επιλέγεται η νέα προσέγγιση του Εσσιανού πίνακα B_{k+1} , έτσι ώστε να ικανοποιεί την ακόλουθη συνθήκη, γνωστή και ως η εξίσωση της χορδής (secant equation):

$$B_{k+1} s_k = y_k \quad (4.42)$$

όπου $s_k = x_{k+1} - x_k$ και $y_k = \nabla f_{k+1} - \nabla f_k$. Ειδικότερα, επιβάλλονται κάποιες πρόσθετες ιδιότητες στον πίνακα B_{k+1} , όπως η συμμετρικότητα και έναν περιορισμό ότι η διαφορά ανάμεσα στους πίνακες B_0 και B_{k+1} να είναι χαμηλής τάξης.

Δύο από τους πιο γνωστούς τύπους για την ενημέρωση της προσέγγισης του Εσσιανού πίνακα B_k [Dennis and Schnabel, 1996] είναι η *symmetric-rank-one* (SR1), που ορίζεται από τον ορισμό 1:

Ορισμός 1. Προσέγγιση του Εσσιανού SR1.

$$B_{k+1} = B_k + \frac{(y_k - B_k s_k)(y_k - B_k s_k)^T}{(y_k - B_k s_k)^T s_k} \quad (4.43)$$

και η *BFGS*, η οποία πήρε το όνομα της από τους εφευρέτες της, Broyden, Fletcher, Goldfarb και Shanno (ορισμός 2) [Shanno, 1978]:

Ορισμός 2. Προσέγγιση του Εσσιανού BFGS.

$$B_{k+1} = B_k - \frac{B_k s_k s_k^T B_k}{s_k^T B_k s_k} + \frac{y_k y_k^T}{y_k^T s_k} \quad (4.44)$$

Τέλος, μια εναλλακτική προσέγγιση του Εσσιανού προτάθηκε από τους Davidon, Fletcher και Powell και πήρε το όνομα της από τους εφευρέτες της, είναι η DFP [Davidon, 1959; Fletcher and Powell, 1963]. Οι Davidon, Fletcher και Powell ήταν οι πρώτοι, οι οποίοι προσπάθησαν να βρουν μια μέθοδο με υπεργραμμική σύγκλιση, υπολογίζοντας τον Εσσιανό πίνακα προσεγγιστικά, αποφεύγοντας την χρήση πληροφορίας δεύτερης τάξης. Παρόλο που η μέθοδος DFP είναι η αρχαιότερη μέθοδος Quasi-Newton δεν εξασφαλίζει ολική σύγκλιση σε κυρτές συναρτήσεις με ακριβή γραμμική αναζήτηση και δεν έχει την ίδια αποτελεσματικότητα με τη BFGS [Powell, 1971; Powell, 1972].

Ορισμός 3. Προσέγγιση του Εσσιανού DFP.

$$B_{k+1} = B_k - \frac{B_k s_k s_k^T B_k}{s_k^T B_k s_k} + \frac{y_k y_k^T}{y_k^T s_k} + u_k u_k^T, \text{ με } u_k = \left[\frac{y_k}{y_k^T s_k} - \frac{B_k s_k}{s_k^T B_k s_k} \right] \quad (4.45)$$

Επισημαίνεται ότι η διαφορά ανάμεσα στους πίνακες B_{k+1} και B_k είναι ένας πίνακας τάξης-1 στην περίπτωση της (4.42) και ένας πίνακας τάξης-2 στην περίπτωση (4.43). Και οι δύο ενημερώσεις ικανοποιούν την εξίσωση της χορδής, όπως επίσης και οι δύο πίνακες είναι συμμετρικοί. Επίσης, οι ενημερώσεις με τον τύπο της BFGS προμηθεύουν με θετικά ορισμένους πίνακες, αν ο αρχικός πίνακας B_0 είναι θετικά ορισμένος και ισχύει $s_k^T y_k > 0$ για κάθε $k = 1, 2, \dots$ [Nocedal and Wright, 2006]. Όλες οι

παραπάνω προσεγγίσεις του Εσσιανού (SR1, BFGS και DFP) μπορούν να απεικονιστούν από μια γενικότερη σχέση την οικογένεια Broyden:

Ορισμός 4. Οικογένεια Broyden Προσέγγισης του Εσσιανού Πίνακα.

$$B_{k+1} = \left[B_k - \frac{B_k s_k s_k^T B_k}{s_k^T B_k s_k} + \phi_k u_k u_k^T \right] + \frac{y_k y_k^T}{y_k^T s_k}, \text{ με } u_k = \left(s_k^T B_k s_k \right)^{1/2} \left[\frac{y_k}{s_k^T y_k} - \frac{B_k s_k}{s_k^T B_k s_k} \right] \quad (4.46)$$

όπου

- για $\phi_k = 0$ ισούται με τον τύπο της DFP,
- για $\phi_k = 1$ ισούται με τον τύπο της BFGS,
- για $\phi_k = \frac{s_k^T y_k}{(s_k - H_k y_k)^T y_k}$ ισούται με τον τύπο της SR1

Επίσης η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφτεί ως γραμμικό συνδυασμό των BFGS και DFP, δηλαδή $B_{k+1} = (1 - \phi_k) B_{k+1}^{BFGS} + \phi_k B_{k+1}^{DFP}$ $B_{k+1} = (1 - \phi_k) B_k$. Εφόσον οι τύποι των BFGS και DFP δημιουργούν θετικά ορισμένους πίνακες όταν $s_k^T y_k > 0$, τότε το ίδιο ισχύει και για την οικογένεια Broyden για $0 \leq \phi_k \leq 1$. Η κατεύθυνση των μεθόδων Quasi-Newton δίνεται από την αντικατάσταση του πίνακα B_k στην Εξ. (4.35), με μια προσέγγιση του Εσσιανού πίνακα εκ' των Εξ. (4.43), (4.44), και (4.45). Μερικές πρακτικές υλοποιήσεις των μεθόδων Quasi-Newton αποφεύγουν την παραγοντοποίηση του B_k σε κάθε επανάληψη, ενημερώνοντας μόνο τον B_k^{-1} . Για παράδειγμα, ο ισοδύναμος τύπος των Σχέσεων (4.35) και (4.44) εφαρμόζεται στον $H_k = B_k^{-1}$, άρα

$$H_{k+1} = \left(I - \frac{s_k y_k^T}{y_k^T s_k} \right) H_k \left(I - \frac{y_k s_k^T}{y_k^T s_k} \right) + \frac{s_k s_k^T}{y_k^T s_k} \quad (4.47)$$

Ο υπολογισμός του d_k μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας τον τύπο $d_k = -H_k \nabla f_k$. Αυτό μπορεί να υλοποιηθεί ως πολλαπλασιασμός πίνακα με διάνυσμα, το οποίο είναι απλούστερο από την διαδικασία παραγοντοποίησης/οπίσθιας-παραγοντοποίησης που χρειάζεται η Εξίσωση (4.35).

Κλιμακωτές Μέθοδοι Quasi-Newton

Παρόλα τα πλεονεκτήματα των μεθόδων Quasi-Newton που παρουσιάστηκαν προηγουμένως, οι προσεγγίσεις του Εσσιανού πίνακα B_k τάξης-2, δηλαδή η BFGS και η DFP τείνουν να μετατοπίζουν τις ιδιοτιμές του πίνακα B_k προς τα αριστερά [Wilkinson, 1965]. Γι' αυτό το λόγο θα πρέπει να υπάρχει μια ισορροπία μεταξύ των μετατοπίσεων των ιδιοτιμών, γιατί διαφορετικά ο πίνακας B_k μπορεί να γίνει ιδιάζων ή να έχει εξαιρετικά μεγάλο αριθμό κατάστασης με πιθανότερο αποτέλεσμα την απόκλιση της μεθόδου. Το κίνητρο για τη μελέτη και την αντιμετώπιση του προβλήματος απορρέει από τις τετραγωνικές συναρτήσεις. Έστω η τετραγωνική συνάρτηση f της μορφής:

$$f(x) = \frac{1}{2} x^T Q x - b^T x \quad (4.48)$$

όπου Q είναι ένας συμμετρικός και θετικά ορισμένος πίνακας. Η κλίση δίνεται από τη $\nabla f = Qx - b$ και ο ελαχιστοποιητής x^* είναι η μοναδική λύση του γραμμικού συστήματος $Qx - b = 0$. Όταν μια μέθοδος

Quasi-Newton εφαρμόζεται σε μια κυρτή τετραγωνική αντικειμενική συνάρτηση (Εξ. 4.48) και x^* είναι το ελάχιστο της f , τότε [Sun and Yuan, 2006]:

$$f(x_{k+1}) - f(x^*) \leq \left(\frac{\lambda_n - \lambda_1}{\lambda_n + \lambda_1} \right)^2 [f(x_k) - f(x^*)] \quad (4.49)$$

όπου: $0 < \lambda_1 \leq \dots \leq \lambda_n$ είναι οι ιδιοτιμές του πίνακα $B_k^{-1} Q$. Από την Εξ. (4.49) αποδεικνύεται ότι αν ο αριθμός κατάστασης $\kappa(T_k)$ είναι μεγάλος τότε η σύγκλιση θα είναι αργή, όπου $T_k = B_k^{-1} Q$. Για να

επιταχυνθεί η ταχύτητα σύγκλισης σε κάθε επανάληψη θα πρέπει η ποσότητα $\left(\frac{\lambda_n - \lambda_1}{\lambda_n + \lambda_1} \right)^2$ ή

$\left(\frac{\kappa(T_k) - 1}{\kappa(T_k) + 1} \right)^2$ να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη (υπενθυμίζεται ότι $\kappa(T_k) = \lambda_1/\lambda_n$). Για την αντιμετώπιση

αυτού του προβλήματος προτάθηκε η κλιμάκωση της προσέγγισης του Εσσιανού πίνακα B_k σε κάθε επανάληψη για την αποφυγή της μεγάλης απόστασης μεταξύ των ιδιοτιμών του [Oren, 1972; Oren and Luenberger, 1974]. Έτσι η οικογένεια Broyden παίρνει τη μορφή:

Ορισμός 5. Κλιμακωτή Οικογένεια Broyden Προσέγγισης του Εσσιανού Πίνακα.

$$B_{k+1} = \tau_k \left[B_k - \frac{B_k s_k s_k^T B_k}{s_k^T B_k s_k} + \phi_k u_k u_k^T \right] + \frac{y_k y_k^T}{y_k^T s_k}, \text{ με } u_k = \left(s_k^T B_k s_k \right)^{1/2} \left[\frac{y_k}{s_k^T y_k} - \frac{B_k s_k}{s_k^T B_k s_k} \right] \quad (4.50)$$

όπου, τ_k είναι ο παράγοντας κλιμάκωσης (scaling factor). Αν τεθεί $\tau_k = 1$ τότε η παραπάνω οικογένεια παίρνει τη μορφή της κλασικής οικογένειας Broyden. Οι Oren and Luenberger [1974] μελέτησαν τη στρατηγική των κλιμακωτών μεθόδων Quasi-Newton (self-scaling Quasi-Newton) και πρότειναν ως

παράγοντα κλιμάκωσης τη σχέση: $\tau_k = \frac{y_k^T s_k}{s_k^T B_k s_k}$ για να βελτιώσουν την κατάσταση της προσέγγισης του

Εσσιανού πίνακα B_k . Για την περίπτωση των κυρτών συναρτήσεων οι Nocedal and Yuan [1993] απόδειξαν την ολική σύγκλιση της κλιμακωτής μεθόδου BFGS (self-scaled BFGS, SS-BFGS) χρησιμοποιώντας μη ακριβή γραμμική αναζήτηση. Επίσης παρουσίασαν αριθμητικά αποτελέσματα, τα οποία έδειξαν ότι η κλασική BFGS είναι αποτελεσματικότερη από την καλύτερη κλιμακωτή μέθοδο Quasi-Newton (SS-BFGS) όταν εφαρμόζεται σε μια απλή τετραγωνική συνάρτηση. Επίσης έδειξαν ότι η μέθοδος SS-BFGS χρησιμοποιώντας τις συνθήκες του Wolfe παράγει καλές κατευθύνσεις αναζήτησης και η υπεργραμμική σύγκλιση εξασφαλίζεται αν το μήκος βήματος επιλεγεί κατάλληλα. Δυστυχώς όμως για το υπολογισμό του μήκους βήματος απαιτούνται πρόσθετοι συναρτησιακοί υπολογισμοί, οι οποίοι έκαναν τη μέθοδο μη πρακτική.

Σε μία πρόσφατη μελέτη ο Al-Baali [1998a] με βάση την εργασία των Byrd et al., [1992], πρότεινε τον καθορισμό περιορισμών στους παράγοντες τ_k και ϕ_k έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η ολική και υπεργραμμική σύγκλιση των κλιμακωτών Quasi-Newton μεθόδων χρησιμοποιώντας μη ακριβή γραμμική αναζήτηση. Αυτή η μελέτη οδήγησε στον παρακάτω περιορισμό του παράγοντα κλιμάκωσης $\tau_k \leq 1$, ο οποίος παρακινείται από το γεγονός ότι οι ιδιοτιμές της προσέγγισης του Εσσιανού πίνακα B_k μπορούν να μειωθούν αν $\tau_k < 1$ (ακόμα και για $\phi_k = 0$) και γι' αυτό το λόγο ο πίνακας B_{k+1} θα έχει μικρές ιδιοτιμές αν ο πίνακας B_k έχει μεγάλες. Έτσι πρότεινε τη χρήση της Εξ. 4.51 για τον παράγοντα κλιμάκωσης ο οποίος διατηρεί την ολική και υπεργραμμική σύγκλιση για κυρτές συναρτήσεις χρησιμοποιώντας μη γραμμική αναζήτηση.

$$\tau_k = \min \left\{ 1, \frac{y_k^T s_k}{s_k^T B_k s_k} \right\} \quad (4.51)$$

4.3.8. Ρυθμός σύγκλισης των μεθόδων Quasi-Newton

Έστω ότι η κατεύθυνση αναζήτησης, είναι μια κατεύθυνση Quasi-Newton (Εξ. 4.35) και ο πίνακας B_k είναι συμμετρικός και θετικά ορισμένος σε κάθε επανάληψη. Επίσης, υποτίθεται ότι το μήκος βήματος α_k θα υπολογιστεί χρησιμοποιώντας μη ακριβή γραμμική αναζήτηση που θα ικανοποιεί τις συνθήκες του Wolfe ή τις ισχυρές συνθήκες του Wolfe, με μια προϋπόθεση: Η μέθοδος γραμμικής αναζήτησης θα δοκιμάζει πάντα το βήμα $\hat{\alpha} = 1$ πρώτα, και θα δέχεται αυτή την τιμή αν ικανοποιεί τις συνθήκες του Wolfe. Αυτή η λεπτομέρεια στην υλοποίησή της γίνεται κρίσιμη για την επίτευξη ενός γρήγορου βαθμού σύγκλισης.

Από την εργασία των Dennis and More [1977], προκύπτει ότι αν η κατεύθυνση αναζήτησης μιας Quasi-Newton μεθόδου προσεγγίζει την κατεύθυνση Newton αρκετά καλά, τότε το μοναδιαίο μήκος βήματος θα ικανοποιεί τις συνθήκες του Wolfe καθώς η μέθοδος συγκλίνει στη λύση. Επίσης, ορίζει τι πρέπει να ικανοποιεί η κατεύθυνση αναζήτησης για να δώσει μια επανάληψη υπεργραμμικής σύγκλισης. Για να ξεκαθαριστεί η γενικότητα αυτού του αποτελέσματος, εκφράζεται πρώτα με όρους μιας γενικής καθολικής επανάληψης, και στη συνέχεια, εξετάζονται οι συνέπειές του για τις μεθόδους Quasi-Newton.

Θεώρημα 1.

Έστω ότι η συνάρτηση $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ είναι δύο φορές παραγωγίσιμη. Θεωρούμε την επανάληψη $x_{k+1} = x_k + \alpha_k d_k$, όπου d_k είναι μια καθοδική κατεύθυνση και το α_k ικανοποιεί τις συνθήκες του Wolfe με $\sigma_1 \leq 1/2$. Αν η ακολουθία $\{x_k\}_{k=0}^{\infty}$ συγκλίνει σε ένα σημείο x^* τέτοιο ώστε, να ισχύει ότι $\nabla f(x^*) = 0$ και ο πίνακας $\nabla^2 f(x^*)$ είναι ένας θετικά ορισμένος και αν η κατεύθυνση αναζήτησης ικανοποιεί

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{\|\nabla f_k + \nabla^2 f_k d_k\|}{\|d_k\|} = 0 \quad (4.52)$$

τότε

- το μήκος βήματος $\alpha_k = 1$ είναι αποδεκτό για όλα τα $k \geq k_0$ και
- αν $\alpha_k = 1$ για όλα τα $k > k_0$, η ακολουθία $\{x_k\}_{k=0}^{\infty}$ συγκλίνει στο x^* υπεργραμμικά.

Είναι εύκολο να δειχθεί ότι αν $\sigma_1 > 1/2$, τότε η γραμμική αναζήτηση θα απέκλειε τον ελαχιστοποιητή μιας τετραγωνικής συνάρτησης και το μοναδιαίο μήκος βήματος μπορεί να μην ήταν αποδεκτό. Αν η κατεύθυνση d_k είναι μια Quasi-Newton κατεύθυνση αναζήτησης της μορφής (Εξ. 4.35) τότε η (4.52) είναι ισοδύναμη με

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{\|B_k + \nabla^2 f_k d_k\|}{\|d_k\|} = 0 \quad (4.53)$$

Έτσι επιτυγχάνεται το σημαντικό αποτέλεσμα ότι ένας υπεργραμμικός ρυθμός σύγκλισης μπορεί να επιτευχθεί ακόμη και αν η ακολουθία των πινάκων B_k δεν συγκλίνει στο $\nabla^2 f(x^*)$. Φτάνει μόνο οι B_k να γίνονται όλο και περισσότερο ακριβείς προσεγγίσεις του $\nabla^2 f(x^*)$ κατά μήκος της κατεύθυνσης

αναζήτησης d_k . Μια σημαντική σημείωση είναι ότι η συνθήκη (4.53) είναι ικανή και αναγκαία για την υπεργραμμική σύγκλιση των Quasi-Newton μεθόδων [Powell, 1976].

Θεώρημα 2.

Έστω ότι η συνάρτηση $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ είναι τρεις φορές παραγωγίσιμη. Θεωρούμε την επανάληψη $x_{k+1} = x_k + \alpha_k d_k$, όπου d_k είναι μια κατεύθυνση Quasi-Newton (Εξ. 4.35) και το μήκος βήματος α_k ικανοποιεί τις συνθήκες του Wolfe με $\sigma_1 \leq 1/2$. Επίσης, έστω ότι η ακολουθία $\{x_k\}_{k=0}^{\infty}$ συγκλίνει σε ένα σημείο x^* τέτοιο ώστε, να ισχύει ότι $\nabla f(x^*) = 0$ και ο πίνακας $\nabla^2 f(x^*)$ είναι ένας θετικά ορισμένος. Τότε η ακολουθία $\{x_k\}_{k=0}^{\infty}$ συγκλίνει υπεργραμμικά αν και μόνο αν ισχύει η συνθήκη της Εξ. 4.53. [Nocedal and Wright, 2006]

Ρυθμός Σύγκλισης της Μεθόδου BFGS

Η ολική σύγκλιση της μεθόδου BFGS με ακριβή γραμμική αναζήτηση εφαρμόζεται σε κυρτές συναρτήσεις και η αρχική προσέγγιση του Εσσιανού, B_0 είναι ένας συμμετρικός και θετικά ορισμένος πίνακας. Παρόλο που η μέθοδος BFGS είναι ευρέως γνωστή και την ταχύτητα και την αποτελεσματικότητά της δεν μπορεί να παρέχει ολική σύγκλιση για μη κυρτές συναρτήσεις χρησιμοποιώντας μονότονη στρατηγική αναζήτησης. Δηλαδή δεν μπορεί να αποδειχθεί ότι οι επαναλήψεις της μεθόδου BFGS συγκλίνουν σε ένα κρίσιμο σημείο από κάθε αρχικό σημείο και χρησιμοποιώντας οποιαδήποτε αρχική προσέγγιση του Εσσιανού.

Θεώρημα 3.

Έστω B_0 είναι ένα συμμετρικός και θετικά ορισμένος πίνακας και x_0 ένα αρχικό σημείο και ισχύει ότι:

1. Έστω ότι η αντικειμενική συνάρτηση f είναι δύο φορές συνεχώς διαφορίσιμη.
2. Το σύνολο $\Omega = \{x | f(x) \leq f(x^*)\}$ είναι κυρτό και υπάρχουν θετικές σταθερές m και M τέτοιες ώστε

$$m\|z\|^2 \leq z^T \nabla^2 f(x) z \leq M\|z\|^2 \quad \forall z \in \mathbb{R}^n \text{ και } x \in \Omega \quad (4.54)$$

Τότε η ακολουθία $\{x_k\}_{k=0}^{\infty}$, η οποία παράγεται από τη μέθοδο BFGS συγκλίνει στον ελαχιστοποιητή x^* της f . [Nocedal and Wright, 2006]

Το Θεώρημα 3 μπορεί να γενικευτεί για κάθε μέλος της οικογένειας Broyden εκτός από την DFP [Nocedal, 1992; Nocedal and Wright, 2006]. Για την απόδειξη και την ανάλυση του ακόλουθου θεωρήματος (Θεώρημα 4) γίνεται χρήση του χαρακτηρισμού των Dennis and More [1977] (Εξ. 4.53) για την υπεργραμμική σύγκλιση, ο οποίος εφαρμόζεται για μη γραμμικές (όχι απαραίτητα κυρτές) αντικειμενικές συναρτήσεις.

Θεώρημα 4.

Έστω ότι η αντικειμενική συνάρτηση f είναι δύο φορές συνεχώς διαφορίσιμη και οι επαναλήψεις, οι οποίες παράγονται από τη μέθοδο BFGS συγκλίνουν στον ελαχιστοποιητή x^* στον οποίο ο Εσσιανός πίνακας $\nabla^2 f$ είναι Lipschitz συνεχής, δηλαδή υπάρχει μια σταθερά $L > 0$ τέτοια ώστε για όλα τα x κοντά στο x^* , ισχύει

$$\|\nabla^2 f(x) - \nabla^2 f(x^*)\| \leq L \|x - x^*\|$$

Τότε η σύγκλιση στον ελαχιστοποιητή x^* είναι υπεργραμμική [Nocedal and Wright, 2006].

Ρυθμός Σύγκλισης της Μεθόδου SS-BFGS

Η κλιμακωτή μέθοδος BFGS (SS-BFGS) συγκλίνει ολικά για κυρτές συναρτήσεις χρησιμοποιώντας μη ακριβή γραμμική αναζήτηση. Για την απόδειξη του Θεωρήματος 5 χρειάζονται οι ακόλουθες υποθέσεις με ακριβή γραμμική αναζήτηση εφαρμόζεται σε κυρτές συναρτήσεις και η αρχική προσέγγιση του Εσσιανού, B_0 είναι ένας συμμετρικός και θετικά ορισμένος πίνακας [Oren and Luenberger, 1974]. Παρόλο που η μέθοδος BFGS είναι ευρέως γνωστή και την ταχύτητα και την αποτελεσματικότητά της δεν μπορεί να παρέχει ολική σύγκλιση για μη κυρτές συναρτήσεις χρησιμοποιώντας μονότονη στρατηγική αναζήτησης. Δηλαδή δεν μπορεί να αποδειχθεί ότι οι επαναλήψεις της μεθόδου BFGS συγκλίνουν σε ένα κρίσιμο σημείο από κάθε αρχικό σημείο και χρησιμοποιώντας οποιαδήποτε αρχική προσέγγιση του Εσσιανού.

Υπόθεση 1.

- 1) Το σύνολο $\Omega = \{x \mid f(x) \leq f(x^0)\}$ είναι συμπαγές.
- 2) Η αντικειμενική συνάρτηση f είναι κυρτή, κάτω φραγμένη και δύο φορές παραγωγίσιμη στο Ω .
- 3) Η νόρμα του Εσσιανού πίνακα $\nabla^2 f(x)$ είναι φραγμένη, $\forall x \in \Omega$.

Θεώρημα 5 [Yin and Du, 2007].

Έστω η αντικειμενική συνάρτηση f και ισχύει η Υπόθεση 1. Τότε για κάθε αρχική προσέγγιση του Εσσιανού πίνακα B_0 , όπου ο πίνακας B_0 είναι θετικά ορισμένος και ικανοποιούνται οι συνθήκες του Wolfe τότε η μέθοδος SS-BFGS, χρησιμοποιώντας τη σχέση $\tau_k = \frac{y_k^T s_k}{s_k^T B_k s_k}$ ως παράγοντα κλιμάκωσης, συγκλίνει ολικά

$$\liminf_{k \rightarrow \infty} \|\nabla f_k\| = 0 \quad (4.55)$$

Παρόλο όμως που η μέθοδος SS-BFGS συγκλίνει ολικά, η υπεργραμμική σύγκλιση εξασφαλίζεται αν και μόνο αν το μήκος βήματος ικανοποιεί την παρακάτω συνθήκη:

$$\frac{\alpha_k s_k^T y_k}{s_k^T B_k s_k} \rightarrow 1 \quad (4.56)$$

Προφανώς αν χρησιμοποιείται ακριβή γραμμική αναζήτηση τότε η συνθήκη (4.56) ικανοποιείται, η οποία όμως είναι μη πρακτική και συνήθως χρησιμοποιούμε άλλες στρατηγικές για την επιλογή του μήκους βήματος [Nocedal and Wright, 2006]. Ο Al-Baali [1993, 1998a,b] τροποποίησε την μέθοδο των Oren και Luenberger [1974] και απέδειξε την ολική και υπεργραμμική σύγκλιση της μεθόδου SS-BFGS χρησιμοποιώντας ένα πρόσθετο περιορισμό για τον παράγοντα κλιμάκωσης $\tau_k \leq 1$ (Θεώρημα 6).

Θεώρημα 6. [Al-Baali, 1998a]

Έστω ότι η αντικειμενική συνάρτηση f είναι δύο φορές συνεχώς διαφορίσιμη και το σύνολο $\Omega = \{x \mid f(x) \leq f(x^*)\}$ είναι κυρτό και υπάρχουν θετικές σταθερές m και M τέτοιες ώστε

$$m\|z\|^2 \leq z^T \nabla^2 f(x) z \leq M\|z\|^2 \quad \forall z \in \mathbb{R}^n \text{ και } x \in \Omega \quad (4.57)$$

Τότε για κάθε αρχική προσέγγιση του Εσσιανού πίνακα B_0 , όπου ο πίνακας B_0 είναι θετικά ορισμένος, ικανοποιούνται οι συνθήκες του Wolfe και ο Εσσιανός πίνακας $\nabla^2 f$ είναι Lipschitz συνεχής στο x^* , δηλαδή υπάρχει μια σταθερά $L > 0$ τέτοια ώστε για όλα τα x κοντά στο x^* , ισχύει $\|\nabla^2 f(x) - \nabla^2 f(x^*)\| \leq L\|x - x^*\|$. Τότε η σύγκλιση, η μέθοδος SS-BFGS χρησιμοποιώντας τον παράγοντα κλιμάκωσης της Εξ. 4.51 συγκλίνει στον ελαχιστοποιητή x^* q-υπεργραμμικά.

Όμως και τα δύο αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν υπέθεσαν ότι η αντικειμενική συνάρτηση f είναι κυρτή. Πρόσφατα οι Yin και Du [2007] εξασφάλισαν την ολική σύγκλιση της μεθόδου SS-BFGS για γενικές συναρτήσεις, χρησιμοποιώντας μη μονότονη στρατηγική γραμμικής αναζήτησης. Για την παρουσίαση του παρακάτω θεωρήματος χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες υποθέσεις:

Υπόθεση 2.

- 1) Το σύνολο $\Omega = \{x \mid f(x) \leq f(x^0)\}$ είναι συμπαγές.
- 2) Υπάρχει μια γειτονιά $N(\Omega)$ του Ω , όπου η κλίση της αντικειμενικής συνάρτησης f είναι $\nabla f(x)$ είναι Lipschitz συνεχής, δηλαδή υπάρχει μια σταθερά $L > 0$ τέτοια ώστε: $\|\nabla f(x) - \nabla f(\tilde{x})\| \leq L\|x - \tilde{x}\| \quad \forall x, \tilde{x} \in N(\Omega)$

Θεώρημα 7. [Yin and Du, 2007]

Έστω ότι η ισχύει η Υπόθεση 2 και η μέθοδος SS-BFGS χρησιμοποιώντας τον παράγοντα κλιμάκωσης $\tau_k = \frac{y_k^T s_k}{s_k^T B_k s_k}$ παράγει την ακολουθία $\{x^k\}_{k=0}^{\infty}$ χρησιμοποιώντας τις μη μονότονες συνθήκες του Wolfe. Αν υπάρχει σταθερά $k_0 \geq 1$ τέτοια ώστε $\|y_k\| \leq (1 - \beta)\|\nabla f(x^k)\|$ για κάθε $k \leq k_0$ τότε:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \|g_k\| = 0$$

Παρόμοια, θεωρώντας ως παράγοντα κλιμάκωσης την Εξ. 4.51 $\tau_k = \min\left\{1, \frac{y_k^T s_k}{s_k^T B_k s_k}\right\}$ και χρησιμοποιώντας τη θεωρία των Nocedal και Yuan [1993] μπορεί να αποδειχτεί ότι το Θεώρημα 7 ισχύει και για τον παράγοντα κλιμάκωσης της Εξ. 4.51.

Τα διαγράμματα ροής που ακολουθούν παρουσιάζουν τις μεθόδους Quasi-Newton που αναλύθηκαν παραπάνω με τις μεθόδους BFGS (αλγόριθμος 4.2), κλιμακωτή μέθοδος BFGS (SS-BFGS) για γενικές συναρτήσεις χρησιμοποιώντας μη μονότονη στρατηγική γραμμικής αναζήτησης (αλγόριθμος 4.3) και κλιμακωτή μέθοδος BFGS (SS-BFGS) για γενικές συναρτήσεις χρησιμοποιώντας μη μονότονη στρατηγική γραμμικής αναζήτησης χρησιμοποιώντας τον πρόσθετο περιορισμό του AI-Baali [1998a,b] για τον παράγοντα κλιμάκωσης (αλγόριθμος 4.4).

Αλγόριθμος 4.2. Ο αλγόριθμος BFGS

- 1: Αρχικοποίηση w^0 , $\sigma_1 \in (0, 1)$, $\sigma_2 \in (0, 1)$, $k = 0$, k^{max} , ϵ .
- 2: Αν $(\|\nabla E(w^k)\| = 0)$ ή $(E(w^k) \leq \epsilon)$ ή $(k > k^{max})$ τότε σταμάτα.
- 3: Υπολογισμός της προσέγγισης του Εσσιανού

$$B_{k+1} = B_k - \frac{B_k s_k s_k^T B_k}{s_k^T B_k s_k} + \frac{y_k y_k^T}{y_k^T s_k}$$

- 4: Υπολογισμός της κατεύθυνσης αναζήτησης

$$d_k = -B_k^{-1} \nabla E(w)$$

- 5: Για $0 < \sigma_1 < \sigma_2 < 1$ υπολόγισε το ρυθμό μάθησης η_k έτσι ώστε να ικανοποιεί

$$\begin{aligned} E(w^k + \eta_k d_k) - E(w^k) &\leq \sigma_1 \eta_k \nabla E(w^k)^T d_k \\ \nabla E(w^k + \eta_k d_k)^T d_k &\geq \sigma_2 \nabla E(w^k)^T d_k \end{aligned}$$

- 6: Ενημέρωση των βαρών

$$w^{k+1} = w^k + \eta_k d_k$$

- 7: Θέσε $k = k + 1$ και πήγαινε στο 2.

Αλγόριθμος 4.3. Ο αλγόριθμος Adaptive Self-Scaling NonMonotone BFGS

- 1: Αρχικοποίηση w^0 , $\sigma_1 \in (0, 1)$, $\sigma_2 \in (0, 1)$, $M = 3$, $k = 0$, k^{max} , ϵ .
- 2: Αν $(\|\nabla E(w^k)\| = 0)$ ή $(E(w^k) \leq \epsilon)$ ή $(k > k^{max})$ τότε σταμάτα.
- 3: Υπολογισμός της προσέγγισης του Εσσιανού

$$B_{k+1} = \tau_k \left[B_k - \frac{B_k s_k s_k^T B_k}{s_k^T B_k s_k} \right] + \frac{y_k y_k^T}{y_k^T s_k}, \quad \text{με } \tau_k = \frac{y_k^T s_k}{s_k^T B_k s_k}$$

- 4: Υπολογισμός της κατεύθυνσης αναζήτησης

$$d_k = -B_k^{-1} g_k$$

- 5: Υπολογισμός του μη μονότονου οριζοντα εκπαίδευσης

$$M^k = \begin{cases} M_{k-1} + 1, & \text{αν } \Lambda^k < \Lambda^{k-1} < \Lambda^{k-2}, \\ M_{k-1} - 1, & \text{αν } \Lambda^k > \Lambda^{k-1} > \Lambda^{k-2}, \\ M_{k-1}, & \text{διαφορετικά} \end{cases}, \quad \text{με } \Lambda^k = \frac{\|\nabla E(w^k) - \nabla E(w^{k-1})\|}{\|w^k - w^{k-1}\|}$$

- 6: Για $0 < \sigma_1 < \sigma_2 < 1$ υπολόγισε το ρυθμό μάθησης η_k έτσι ώστε να ικανοποιεί

$$\begin{aligned} E(w^k + \eta_k d_k) - \max_{0 \leq j \leq M} E(w^{k-j}) &\leq \sigma_1 \eta_k \nabla E(w^k)^T d_k \\ \nabla E(w^k + \eta_k d_k)^T d_k &\geq \sigma_2 \nabla E(w^k)^T d_k \end{aligned}$$

- 7: Ενημέρωση των βαρών

$$w^{k+1} = w^k + \eta_k d_k$$

- 8: Θέσε $k = k + 1$ και πήγαινε στο 2.

Αλγόριθμος 4.4. Ο αλγόριθμος Adaptive Self-Scaling NonMonotone BFGS*

- 1: Αρχικοποίηση w^0 , $\sigma_1 \in (0, 1)$, $\sigma_2 \in (0, 1)$, $M = 3$, $k = 0$, k^{max} , ε .
- 2: Αν $(\|\nabla E(w^k)\| = 0)$ ή $(E(w^k) \leq \varepsilon)$ ή $(k > k^{max})$ τότε σταμάτα.
- 3: Υπολογισμός της προσέγγισης του Εσσανού

$$B_{k+1} = \tau_k \left[B_k - \frac{B_k s_k s_k^T B_k}{s_k^T B_k s_k} \right] + \frac{y_k y_k^T}{y_k^T s_k}, \quad \text{με } \tau_k = \min \left\{ 1, \frac{y_k^T s_k}{s_k^T B_k s_k} \right\}$$

- 4: Υπολογισμός της κατεύθυνσης αναζήτησης

$$d_k = -B_k^{-1} g_k$$

- 5: Υπολογισμός του μη μονότονου οριζοντα εκπαίδευσης

$$M^k = \begin{cases} M_{k-1} + 1, & \text{αν } \Lambda^k < \Lambda^{k-1} < \Lambda^{k-2}, \\ M_{k-1} - 1, & \text{αν } \Lambda^k > \Lambda^{k-1} > \Lambda^{k-2}, \\ M_{k-1}, & \text{διαφορετικά} \end{cases}, \quad \text{με } \Lambda^k = \frac{\|\nabla E(w^k) - \nabla E(w^{k-1})\|}{\|w^k - w^{k-1}\|}$$

- 6: Για $0 < \sigma_1 < \sigma_2 < 1$ υπολόγισε το ρυθμό μάθησης η_k έτσι ώστε να ικανοποιεί

$$\begin{aligned} E(w^k + \eta_k d_k) - \max_{0 \leq j \leq M} E(w^{k-j}) &\leq \sigma_1 \eta_k \nabla E(w^k)^T d_k \\ \nabla E(w^k + \eta_k d_k)^T d_k &\geq \sigma_2 \nabla E(w^k)^T d_k \end{aligned}$$

- 7: Ενημέρωση των βαρών

$$w^{k+1} = w^k + \eta_k d_k$$

- 8: Θέσε $k = k + 1$ και πήγαινε στο 2.

4.4. Μεθοδολογία χωροχρονικής προσομοίωσης και παρεμβολής για το δείκτη ξηρασίας SPI

Οι προηγούμενες ενότητες έδειξαν ότι η πρόγνωση της ξηρασίας γίνεται με στοχαστικά ή με νευρωνικά μοντέλα. Έτσι, τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα επιλέχθηκαν για την ταυτόχρονη χωρική και χρονική πρόγνωση του δείκτη SPI υπολογισμένου σε χρονικές κλίμακες των 3-, 6-, 9-, 12-, και 24 μηνών ως αντιπροσωπευτικοί δείκτες των τύπων ξηρασίας. Με βάση τον μεγάλο αριθμό των βροχομετρικών σταθμών στην περιοχή μελέτης αναπτύχθηκε μία μεθοδολογία που βασίζεται στη χρονική πρόγνωση και εφαρμόστηκε χωροχρονικά. Σημειώνεται ότι μέχρι στιγμής δεν υπάρχει εφαρμογή ταυτόχρονης χωροχρονικής πρόγνωσης των νευρωνικών δικτύων λόγω του ότι συνήθως βελτιστοποιούνται σημειακά προκειμένου να παραχθεί το βέλτιστο μοντέλο πρόγνωσης. Αν όμως αναπτυχθεί μία γενικευμένη μεθοδολογία που να εφαρμόζεται χωροχρονικά πιστεύεται ότι θα έχει παρόμοια αποτελέσματα με τη σημειακή πρόγνωση. Σημαντική προϋπόθεση είναι να μπορούν τα νευρωνικά δίκτυα να γενικεύσουν καλά χωρικά τις χρονικές προγνώσεις και η αρχιτεκτονική τους να σχεδιαστεί ώστε να περιορίσουν την υποκειμενική αντίληψη που εισέρχεται στα στάδια σχεδιασμού των ANNs. Αξίζει να αναφερθεί ότι όλες οι μελέτες για την πρόγνωση της ξηρασίας που αναφέρθηκαν στην ενότητα 4.2. και χρησιμοποιούν τεχνητά νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούν τον αλγόριθμο οπίσθιας διάδοσης του σφάλματος για την εκπαίδευση των ANNs που υποφέρουν συχνά από τον εγκλωβισμό τους σε τοπικά και όχι ολικά βέλτιστα σημεία. Επίσης, οι παράμετροι του αλγορίθμου οπίσθιας διάδοσης του σφάλματος δεν βελτιστοποιούνται αριθμητικά, αλλά συνήθως η μέθοδος δοκιμής και λάθους επιλέγεται με ότι αυτό συνεπάγεται ή επιλέγονται σταθερές τιμές με βάση τη βιβλιογραφία. Επίσης, στις εργασίες της ενότητας 4.2. η επιλογή των δεδομένων εισόδου και η αρχιτεκτονική των ANNs βασίστηκε στην πρότερη γνώση (ή σε γραμμικές συσχετίσεις) δηλαδή υιοθετήθηκαν υποκειμενικά κριτήρια για την χρονική πρόγνωση. Όμως μία πρόσφατη μελέτη, που εξέτασε τους τρόπους επιλογής των δεδομένων εισόδου σε νευρωνικά δίκτυα για υδρολογικές εφαρμογές, υπέδειξε

την ανάγκη μιας γενικής ανεξάρτητης μη γραμμικής μεθοδολογίας για την επιλογή των δεδομένων εισόδου [Bowden et al., 2005]. Οι κυριότερες μέθοδοι επιλογής των δεδομένων εισόδου στα νευρωνικά δίκτυα είναι [Bowden et al., 2005]:

- 1) Εκ των προτέρων γνώση, που όμως χρειάζεται τεράστια γνώση του υπό εξέταση συστήματος
- 2) Γραμμική συσχέτιση μεταβλητών (π.χ. ανάλυση συσχετισμένων μεταβλητών, ανάλυση κύριων συνιστωσών, πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση) που μόνο η γραμμική εξάρτηση αναγνωρίζεται μεταξύ της υπό εξέτασης μεταβλητής
- 3) Ευρετικές (heuristic) προσεγγίσεις ή τεχνικές που δεν εξασφαλίζουν βέλτιστη επιλογή δεδομένων εισόδου και είναι υπολογιστικά πολύπλοκες και χρονοβόρες.
- 4) Εξαγωγή πληροφορίας μέσω των τεχνητών νευρωνικών δικτύων με ανάλυση ευαισθησίας των δεδομένων εισόδου στην οποία χρειάζεται τεράστια γνώση για τη διαπίστωση της σημαντικότητας ή μη της μεταβλητής δεδομένων εισόδου και είναι πολύ χρονοβόρες.
- 5) Συνδυασμός των ανωτέρω μεθόδων.

Ιδιαίτερα, σε προβλήματα πρόγνωσης, όπου ο αριθμός των χρόνων υστέρησης (lag times) είναι πολύ σημαντικός, πρέπει να βρεθεί ένας τρόπος υπολογισμού των δεδομένων εισόδου που να μη στηρίζεται σε υποκειμενικές υποθέσεις, γραμμικές συσχετίσεις και αναλύσεις ευαισθησίας. Επίσης, ο τρόπος αυτός δεν πρέπει να σχετίζεται με τη μέθοδο της μηχανικής μάθησης που επιλέγεται ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί με αξιοπιστία σε συγκριτικές μελέτες των μεθόδων της μηχανικής μάθησης (π.χ. ANNs, Support Vector Machines, Non linear regression, ANFIS). Μία άλλη σημαντική παράμετρος που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη είναι ο αριθμός των δεδομένων που χρειάζονται για την εκπαίδευση των ANNs (ή άλλη μέθοδος). Όπως έχει αναφερθεί μικρός αριθμός δεδομένων μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία του μοντέλου, ενώ μεγάλος αριθμός δεδομένων μπορεί να οδηγήσει σε υπερ-προσαρμογή (overfitting).

Τα παραπάνω οδήγησαν στη χρήση του Gamma Test, το οποίο είναι ένα μη-παραμετρικό εργαλείο που δίνει απάντηση στα παραπάνω προβλήματα προτού αρχίσει η εφαρμογή μιας μεθόδου της μηχανικής μάθησης (π.χ. νευρωνικά δίκτυα). Το Gamma test αναφέρθηκε πρώτα από τους Stefansson et al., [1997], και αποδείχτηκε από τους Evans and Jones [2002] και έκτοτε εφαρμόστηκε σε πολλές μελέτες [Chuzhanova et al., 1998; Tsui and Jones, 1999; Goodridge et al., 2001; Tsui et al., 2002; Jones, 2004; Jones et al., 2007; Evans and Jones, 2008]. Πρόσφατα άρχισε να βρίσκει εφαρμογή και σε υδρολογικές μελέτες [Kashefipour et al., 2005; Remesan et al., 2008,2009; Ahmadi et al., 2009; Moghaddamnia et al., 2009; Vasiliades and Loukas, 2010a,b]. Σε μία πρόσφατη μελέτη για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας, το Gamma test συγκρίθηκε με άλλες μεθοδολογίες για την εκτίμηση των δεδομένων εισόδου [Ahmadi et al., 2009]. Οι μεθοδολογίες σύγκρισης ήταν οι θεωρία της εντροπίας (entropy theory) και οι τεχνικές AIC/BIC με βάση τα μη γραμμικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας. Τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής έδειξαν ότι το Gamma test εκτιμά καλύτερα το βέλτιστο συνδυασμό των δεδομένων εισόδου για την εκτίμηση της ηλιακής ακτινοβολίας στην υδρολογική λεκάνη Brue της Αγγλίας [Ahmadi et al., 2009].

4.4.1. Gamma Test

Το μη-παραμετρικό Gamma Test (GT) υπολογίζει τη διασπορά του θορύβου στα δεδομένα εξόδου, και είναι μία εκτίμηση του μέσου τετραγωνισμένου σφάλματος που μπορεί να υπολογίσει ένα ομαλό (smooth) μοντέλο. Υποθέτει ότι η μη προσδιοριστικότητα σε ένα μοντέλο από δεδομένα εισόδου στα δεδομένα εξόδου οφείλεται στην παρουσία στατιστικού θορύβου των δεδομένων εξόδου:

$$y = f(\mathbf{x}) + \varepsilon \quad (4.58)$$

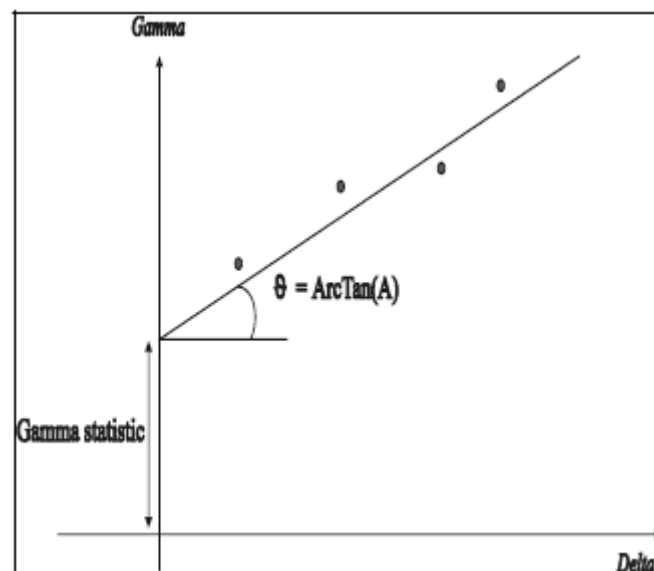
όπου $\mathbf{x} : \{x_1, x_2, \dots, x_M\}$, f μία ομαλή συνάρτηση με ορισμένες πρώτες και δεύτερες παραγώγους και ε μία στοχαστική μεταβλητή θορύβου με μέση τιμή μηδέν και ορισμένη διασπορά. Ουσιαστικά το Gamma test σχεδιάστηκε για να δίνει μία εκτίμηση από τα δεδομένα της διασποράς του θορύβου $\text{Var}(\varepsilon)$. Το σφάλμα ε της παραπάνω εξίσωσης μπορεί να οφείλεται στον πραγματικό θόρυβο των δεδομένων ή στο σφάλμα προσδιορισμού της σχέσης f μεταξύ δεδομένων εισόδου και εξόδου. Ακόμα και όταν η συνάρτηση f είναι άγνωστη το GT μπορεί να υπολογίσει τη $\text{Var}(\varepsilon)$ κατευθείαν από τα δεδομένα. Η εκτίμηση αυτή ονομάζεται Gamma Statistic, Γ , και υπολογίζεται από τα δεδομένα σε $O(M \log M)$. Δύο συναρτήσεις (gamma and delta functions) υπολογίζονται με k πλησιέστερους γείτονες (nearest neighbours) ως:

$$\delta_M(k) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M |x_{N[i,k]} - x_i|^2 \quad (4.59)$$

όπου $|\cdot|$ η ευκλείδεια απόσταση, και

$$\gamma_M(k) = \frac{1}{2M} \sum_{i=1}^M (y_{N[i,k]} - y_i)^2 \quad (4.60)$$

όπου $y_{N[i,k]}$ είναι η τιμή εξόδου από $x_{N[i,k]}$. Τελικά η γραμμή παλινδρόμησης $\gamma_M(k) = \Gamma + A\delta_M(k)$ των σημείων $(\delta_M(k), \gamma_M(k))$ ($1 \leq k \leq p$) υπολογίζεται και η κάθετη σταθερά Γ είναι η εκτίμηση της $\text{Var}(\varepsilon)$. Η κλίση της ευθείας παρέχει πληροφορίες για την άγνωστη συνάρτηση $y = f(\mathbf{x})$. Μεγαλύτερη κλίση δείχνει μεγαλύτερη πολυπλοκότητα [Evans and Jones, 2002]. Ουσιαστικά, Γ είναι το όριο γ όταν $\delta \rightarrow 0$, το οποίο στη θεωρία είναι η $\text{Var}(\varepsilon)$. Η γραμμή παλινδρόμησης του Gamma Test με τα χαρακτηριστικά της απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 4.13. Το Gamma test.

Ο υπολογισμός του Gamma Test εξαρτάται από τη δομή των δεδομένων και τον αλγόριθμο αναζήτησης που χρησιμοποιείται για να βρεθούν οι πλησιέστεροι γείτονες. Χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο k-d tree [Friedman et al., 1979] ο υπολογιστικός χρόνος είναι $O(M \log M)$, όπου M είναι ο αριθμός των

δεδομένων και η υπονοούμενη σταθερά εξαρτάται από τη διάσταση του μητρώου των δεδομένων εισόδου.

Στις μεθόδους της μηχανικής μάθησης, χρησιμοποιείται η διαδικασία της γρήγορης διακοπής (early stopping) ή άλλη διαδικασία γενίκευσης στην εκπαίδευση ώστε να υπάρχει καλή γενίκευση. Γενικά, η διαδικασία αυτή απαιτεί δύο ή τρία σετ δεδομένων: ένα σετ εκπαίδευσης, ένα σετ γενίκευσης ώστε να πιστοποιηθεί το εκπαιδευμένο μοντέλο (όχι απαραίτητο) και ένα σετ ανεξάρτητης πιστοποίησης όταν το μοντέλο έχει βελτιστοποιηθεί. Με βάση το Gamma Test και το παραγόμενο Gamma Statistic, Γ , μπορεί πλέον να εκτιμηθεί το κατώτατο όριο σφάλματος ή θορύβου από ένα βέλτιστο μοντέλο προσομοίωσης. Η προσέγγιση αυτή έχει πολλά πλεονεκτήματα, όπως π.χ.:

1. Το σφάλμα μπορεί να προσδιοριστεί κατευθείαν από τα δεδομένα εκπαίδευσης.
2. Καλύτερη απόδοση των μοντέλων προσομοίωσης, η οποία είναι γνωστή προτού αρχίσει η διαδικασία προσομοίωσης.
3. Η εκτίμηση του σφάλματος είναι τιμή κριτηρίου για την διακοπή της εκπαίδευσης
4. Η συνεισφορά των δεδομένων εισόδου μπορεί εύκολα να εκτιμηθεί.
5. Το πλήθος των διαθέσιμων δεδομένων μπορεί να εκτιμηθεί ώστε να διαπιστωθεί ο ακριβής αριθμός των δεδομένων που χρειάζονται για ένα βέλτιστο μοντέλο προσομοίωσης.
6. Η πολυπλοκότητα του μοντέλου μπορεί να υπολογιστεί.
7. Η ανάγκη για ένα σετ πιστοποίησης μπορεί να ελαχιστοποιηθεί ή να παραληφθεί.
8. Επιπρόσθετα, οι υπάρχουσες τεχνικές γενίκευσης μπορεί να βελτιωθούν με τη χρήση του Gamma test για αποφυγή υπερπροσαρμογής

Η θεωρία υπολογισμού του Gamma Test βεβαιώνει ότι καθώς $M \rightarrow \infty$ ο αλγόριθμος υπολογισμού θα συγκλίνει στο αληθινό σφάλμα θορύβου με πιθανότητα ένα (1). Όμως αυτό δεν δίνει τον αριθμό M που απαιτείται για τον ακριβή υπολογισμό της διακύμανσης του σφάλματος. Αυτό που απαιτείται είναι πόσο γρήγορα η εκτίμηση του σφάλματος θα σταθεροποιηθεί κοντά στην πραγματική τιμή της διακύμανσης του σφάλματος. Ένας απλός τρόπος για να επιτευχθεί η σύγκλιση της εκτίμησης είναι ο υπολογισμός του Gamma statistic, Γ , για αυξανόμενα M και από το παραγόμενο γράφημα να προσδιοριστεί το σημείο όπου είναι ασυμπτωτικά σταθερό. Αυτή η διαδικασία είναι το M -test. Η χρήση του M -test πριν τη διαδικασία πρόγνωσης ή προσομοίωσης μπορεί να προσδιορίσει εάν υπάρχουν αρκετά δεδομένα ώστε να έχουμε μία αξιόπιστη πρόγνωση. Συμπερασματικά, το Gamma test αποτελεί από μόνο του το κριτήριο διακοπής της εκπαίδευσης ενός μη παραμετρικού μοντέλου όπως είναι τα νευρωνικά δίκτυα. Αυτό βασίζεται στην ιδέα ότι ένα κριτήριο είναι κριτήριο απόδοσης ενός καλού μοντέλου όταν πιστοποιείται με ανεξάρτητα δεδομένα (unseen data) και αναμένεται ότι δίνει ένα μέσο τετραγωνισμένο σφάλμα (MSE) παρόμοιο με την πραγματική ή υπολογισμένη διακύμανση του σφάλματος ε που σχετίζεται με τα δεδομένα.

4.4.2. Επιλογή δεδομένων εισόδου

Το Gamma test μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επιλογή των δεδομένων εισόδου σε προβλήματα προσομοίωσης και πρόβλεψης. Σε περίπτωση πρόβλεψης χρονοσειρών (π.χ. δείκτες ξηρασίας SPI) η επιλογή των δεδομένων εισόδου (feature selection) είναι η τεχνική αναγνώρισης των κατάλληλων χρόνων υστέρησης (lags) σε ένα μοντέλο πρόγνωσης. Στην παρούσα διατριβή το Gamma test εφαρμόστηκε αρχικά για την εκτίμηση της διάστασης του μητρώου δεδομένων εισόδου ώστε να βρεθούν οι χρόνοι υστέρησης της υπό εξέταση χρονοσειράς (π.χ. SPI 9-month). Αφού βρεθούν οι πρότερες τιμές που είναι απαραίτητες για την πρόγνωση του χρονικού βήματος, ευρετικές τεχνικές με

βάση το Gamma test εφαρμόστηκαν, ώστε να υπολογιστεί το κατάλληλο σετ του μητρώου των δεδομένων εισόδου. Η διαδικασία περιγράφεται παρακάτω.

Οι αλγόριθμοι επιλογής χαρακτηριστικών (feature selection algorithms) έχουν δύο τμήματα: μία συνάρτηση κριτηρίου απόδοσης και μία στρατηγική αναζήτησης. Η συνάρτηση κριτηρίου προσδιορίζει την απόδοση ενός σετ χαρακτηριστικών και η στρατηγική αναζήτησης αποφασίζει πιο σετ χαρακτηριστικών θα επιλεγεί μετά. Σε επιστημονική ορολογία τα χαρακτηριστικά αναφέρονται στις ανεξάρτητες μεταβλητές και τα δεδομένα εξόδου σε εξαρτημένες μεταβλητές. Η αναζήτηση στο χώρο των χαρακτηριστικών πρέπει να εξασφαλίζει ότι όλοι (ή οι περισσότεροι) συνδυασμοί των δεδομένων εισόδου πρέπει να εξεταστούν σε εύλογο χρονικό διάστημα. Γενικά για d αριθμό δεδομένων εισόδου οι πιθανοί συνδυασμοί είναι $2^d - 1$. Για παράδειγμα για 10 δεδομένα εισόδου 1023 Gamma test πρέπει να γίνουν πειράματα, ενώ για 20 δεδομένα εισόδου απαιτούνται 1048575 συνδυασμοί δεδομένων. Τα χαρακτηριστικά αναπαρίστανται υπό μορφή *δυναδικής συμβολοσειράς* (binary string), οπότε κάθε χαρακτηριστικό είναι μια δυαδική μεταβλητή που λαμβάνει τιμή 0 ή 1. Η δυαδική απεικόνιση εξασφαλίζει τεράστια ευελιξία, καθώς επιτρέπει τον χειρισμό τόσο πραγματικών όσο και ακέραιων μεταβλητών, καθώς και μεταβλητών που δεν περιγράφονται αριθμητικά, όπως λογικές εκφράσεις. Όλα τα χαρακτηριστικά περιγράφονται με τη χρήση της μάσκας (mask). Για ένα δοσμένο σετ δεδομένων εισόδου (x_1, x_2, x_3, x_4) η επιλογή του x_4 χρησιμοποιεί τη μάσκα 0001, ενώ η επιλογή όλων έχει τη μάσκα 1111. Έτσι περιγράφονται ποια δεδομένα εισόδου χρησιμοποιούνται (1) και πια δεν χρησιμοποιούνται (0).

Για τον προσδιορισμό των χρονικών βημάτων υστέρησης (lags) των χρονοσειρών SPI ακολουθήθηκε μια παραλλαγή της μεθόδου της συσχέτισης χρονοσειρών για μη γραμμικές χρονοσειρές. Ο αλγόριθμος false nearest neighbours algorithm [Kennel et al., 1992] χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση της κατάλληλης διάστασης των χρονοσειρών του SPI με βάση το Gamma test. Με βάση τον αλγόριθμο αυτό χρησιμοποιείται η χρονοσειρά για $\text{lag}=-1$, SPI_{t-1} για την εκτίμηση της χρονοσειράς SPI_t (χρονικό βήμα πρόγνωσης =1). Εάν η προσθήκη της αμέσως προηγούμενης χρονοσειράς SPI_{t-2} βελτιώσει το Gamma test, η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι τη χρήση του SPI_{t-36} που είναι ο μέγιστος αριθμός lags που εξετάστηκαν. Σε περίπτωση που η προσθήκη του αμέσως προηγούμενου lag δεν βελτιώσει το Gamma test, τότε η διαδικασία σταματά και ορίζεται η διάσταση των δεδομένων εισόδου αφού όμως ελεγχθούν και τα δύο επόμενα lags. Σε περίπτωση που η προσθήκη των lags μειώνει συνεχώς την τιμή του Gamma statistic, Γ , τότε το παραγόμενο γράφημα ελέγχεται και επιλέγεται ο βέλτιστος αριθμός των lags. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για όλα τα χρονικά βήματα πρόγνωσης (από 1 έως 6 μήνες μπροστά) και για όλες τις χρονικές κλίμακες του SPI. Σημειώνεται ότι προγενέστερες τιμές βροχόπτωσης δεν λήφθηκαν υπόψη ως πιθανά δεδομένα εισόδου αφού προγενέστερες μελέτες έδειξαν ότι η προσθήκη των τιμών βροχόπτωσης δε βελτιώνει την πρόγνωση του SPI [Vasiliades and Loukas, 2008; Bacanli et al., 2009].

Αμέσως μετά, μόλις επιλέχτηκε ο βέλτιστος αριθμός των χρόνων υστέρησης, ακολουθήθηκαν ευρετικές τεχνικές για τη βέλτιστη επιλογή των πιθανών συνδυασμών. Σε περίπτωση που το μητρώο εισόδου είναι αρκετά μικρό (1-5 lags), τότε υπολογίζονται όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί. Αν ο αριθμός των lags είναι μεγαλύτερος (>6) τότε οι γενετικοί αλγόριθμοι επιλέγονται για την εύρεση των πιθανών συνδυασμών. Οι *γενετικοί αλγόριθμοι* (genetic algorithms) αποτελούν τον τυπικότερο εκπρόσωπο των εξελικτικών αλγορίθμων.

Κάθε μέλος του πληθυσμού, δηλαδή κάθε σημείο $x \in P \subset X$ καλείται *άτομο* (individual). Η θέση του σημείου στον χώρο αναζήτησης συνιστά τα γενετικά χαρακτηριστικά του αντίστοιχου ατόμου, που καλούνται *χρωμοσώματα* (chromosomes). Τα χρωμοσώματα, που είναι το γενετικό ανάλογο των συντεταγμένων σε προβλήματα πραγματικών μεταβλητών, αποτελούνται από σύμβολα (αριθμητικά ή μη), τα οποία καλούνται *γονίδια* (genes), και τοποθετούμενα στην σειρά σχηματίζουν τον *γονότυπο* (genotype) του ατόμου. Οι πραγματικές τιμές των μεταβλητών (π.χ. οι συντεταγμένες), υποδηλώνουν τα εξωτερικά χαρακτηριστικά του ατόμου, και καλούνται *φαινότυπος* (phenotype). Η διαδικασία

κατασκευής του γονότυπου ενός ατόμου συναρτήσει των συντεταγμένων των αντίστοιχου σημείου καλείται *κωδικοποίηση* (encoding), ενώ η αντίστροφη διαδικασία, δηλαδή ο υπολογισμός των συντεταγμένων με βάση τον γονότυπο καλείται *αποκωδικοποίηση* (decoding). Η εξέλιξη του πληθυσμού πραγματοποιείται σε στάδια, που σε αντιστοιχία με την φύση, καλούνται γενιές (generations). Ο αρχικός πληθυσμός παράγεται μέσω τυχαίας δειγματοληψίας, ενώ οι επόμενες γενιές παράγονται με εφαρμογή των λεγόμενων *γενετικών τελεστών* (genetic operators), που είναι η *επιλογή* (selection), η *διασταύρωση* (crossover) και η *μετάλλαξη* (mutation). Κάθε μέλος της νέας γενιάς, δηλαδή κάθε νέα λύση που εντάσσεται στον πληθυσμό, ονομάζεται *απόγονος* (offspring), ενώ τα άτομα με βάση τα οποία έχει παραχθεί η λύση αυτή ονομάζονται *γονείς* (parents).

Για κάθε νέα γενιά, μέσω του λεγόμενου τελεστή *επιλογής* (selection), καθορίζονται οι ευκαιρίες αναπαραγωγής κάθε ατόμου, αντιστοιχώντας σε κάθε μέλος του πληθυσμού μια συγκεκριμένη πιθανότητα επιβίωσης. Δημιουργείται η λεγόμενη *δεξαμενή ζευγαρώματος* (mating pool), στην οποία αντιγράφονται (δηλαδή επιβιώνουν) τα πλέον ικανά άτομα περισσότερες από μία φορές, ενώ και τα λιγότερο ικανά άτομα αντιγράφονται λιγότερες ή καμία φορά. Μέτρο της ικανότητας επιβίωσης είναι ο *βαθμός καταλληλότητας* (fitness rate) φ_i , που αντιπροσωπεύει τα εξωτερικά χαρακτηριστικά του ατόμου i , και ταυτίζεται, πρακτικά, με τη στοχική συνάρτηση του προβλήματος. Η διαδικασία, που μπορεί να είναι στοχαστική έως και πλήρως προσδιοριστική, αποσκοπεί στην βελτίωση των μέσων χαρακτηριστικών του πληθυσμού, παρέχοντας σε άτομα-λύσεις υψηλότερης ποιότητας μεγαλύτερη πιθανότητα επιβίωσης στην επόμενη γενιά.

Από τη δεξαμενή ζευγαρώματος επιλέγονται τυχαία ζεύγη ατόμων-γονέων που, μέσω του τελεστή *διασταύρωσης* (crossover), ανταλλάσσουν την γενετική τους πληροφορία, με σκοπό την παραγωγή στατιστικά ισχυρότερων απογόνων, με δεδομένο ότι οι ισχυρότερες γονιδιακές δομές αντιγράφονται στις επόμενες γενιές. Για την απομίμηση του στοχαστικού χαρακτήρα της αντίστοιχης φυσικής διεργασίας, ορίζεται μια πιθανότητα (συχνότητα) διασταύρωσης, της τάξης του 50-90%. Συνεπώς, το υπόλοιπο μέρος του πληθυσμού δεν συμμετέχει στην διαδικασία αναπαραγωγής, και αντιγράφεται ως έχει στην επόμενη γενιά. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται ο τελεστής *μετάλλαξης* (mutation), που επιφέρει τυχαίες τροποποιήσεις σε πολύ μικρό ποσοστό των γενετικών χαρακτηριστικών της νέας γενιάς, αποσκοπώντας στην αύξηση της ποικιλίας του πληθυσμού και την διαφυγή από τοπικά ακρότατα. Η συχνότητα μετάλλαξης είναι της τάξης του 0.1-1%, ώστε να μην επιβραδύνεται η πορεία σύγκλισης. Μέσω των παραπάνω μηχανισμών, επιτυγχάνεται ανανέωση του πληθυσμού, που έχει ως αποτέλεσμα τη διερεύνηση νέων περιοχών του εφικτού χώρου. Ο βαθμός καταλληλότητας ενός σετ χαρακτηριστικών ή μάσκας μπορεί να προσδιοριστεί από τρεις βασικούς συντελεστές του Gamma test:

- α. Τη σταθερά (*intercept*) - the Gamma statistic, Γ .
- β. Την κλίση (*gradient*) – ο υπολογισμός της πολυπλοκότητας του μοντέλου.
- γ. Τον αριθμό (*length*) των δεδομένων εισόδου.

Η σχετική βαρύτητα των συντελεστών αυτών μπορεί να προσαρμοστεί σε λύσεις για ένα συγκεκριμένο πρόβλημα. Για παράδειγμα, αν ζητούνται λύσεις που χρησιμοποιούν μικρό αριθμό δεδομένων εισόδου τότε ο αριθμός καταλληλότητας πρέπει να έχει μεγαλύτερη βαρύτητα από την σταθερά και την κλίση. Έτσι, ο συνολικός υπολογισμός του βαθμού καταλληλότητας, φ_i , που περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\varphi_i = 1 - [W_{\text{intercept}} \times \varphi_{\text{intercept}} + W_{\text{gradient}} \times \varphi_{\text{gradient}} + W_{\text{length}} \times \varphi_{\text{length}}] \quad (4.61)$$

μπορεί να ρυθμιστεί με τις επιμέρους βαρύτητες $W_{\text{intercept}}$, W_{gradient} και W_{length} που θα οριστούν για τον σκοπό του προβλήματος. Η βέλτιστη συνολική καταλληλότητα θα συμβεί όταν η Εξίσωση 4.61 θα γίνει μέγιστη. Οι ακόλουθοι περιορισμοί εφαρμόζονται στους επιμέρους συντελεστές:

$$\left. \begin{matrix} \varphi_{\text{intercept}} \\ \varphi_{\text{gradient}} \\ \varphi_{\text{length}} \end{matrix} \right\} \geq 0, 0 \leq \left\{ \begin{matrix} W_{\text{intercept}} \\ W_{\text{gradient}} \\ W_{\text{length}} \end{matrix} \right\} \leq 1, [W_{\text{intercept}} + W_{\text{gradient}} + W_{\text{length}}] > 0 \quad (4.62)$$

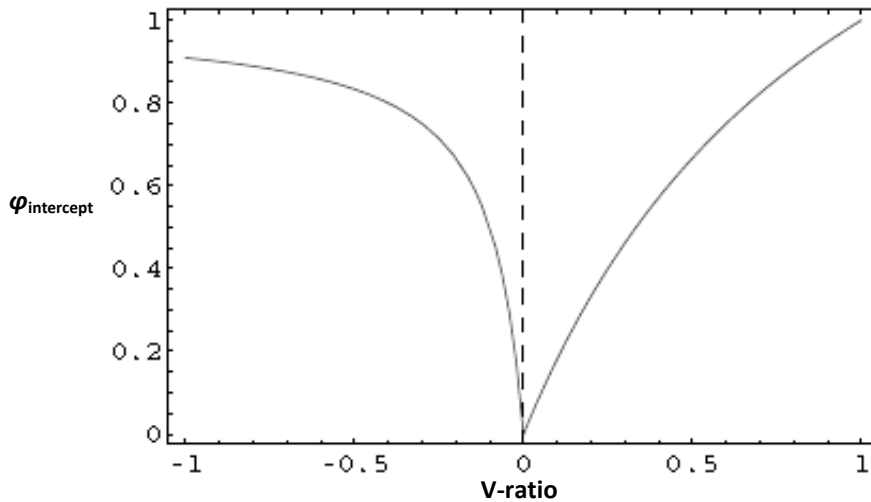
Τα επιμέρους στοιχεία της Εξίσωσης 4.58 υπολογίζονται ως εξής:

$$\varphi_{\text{intercept}} = \begin{cases} 1 - \frac{1}{1 - 10 \times vRatio} & : vRatio < 0 \\ 2 - 2 \frac{1}{1 + vRatio} & : vRatio \geq 0 \end{cases} \quad (4.63)$$

$$\varphi_{\text{gradient}} = 1 - \frac{1}{1 + \left| \frac{\text{gradient}}{\text{outputRange}} \right|} \quad (4.64)$$

$$\varphi_{\text{length}} = \frac{\text{ones}(\text{mask})}{\text{length}(\text{mask})} \quad (4.65)$$

όπου: $\text{ones}(\text{mask})$ είναι το άθροισμα των τιμών 1 στην μάσκα (π.χ. ο αριθμός των δεδομένων εισόδου), $\text{length}(\text{mask})$ ο συνολικός αριθμός δεδομένων εισόδου της μάσκας και $V\text{-ratio}$ είναι μια αδιάστατη εκτίμηση του θορύβου και υπολογίζεται ως $\text{Gamma Statistic}/\text{Var}(y)$. Όταν $V\text{-ratio} = 1$ τότε το θεωρητικό μοντέλο δεν είναι ομαλό, ενώ όταν η $V\text{-ratio}$ είναι ίση με μηδέν σημαίνει ότι τα δεδομένα μπορούν να παραχθούν από ένα ομαλό μοντέλο [Jones, 2004]. Το όφελος από το $V\text{-ratio}$ στατιστικό είναι ότι είναι αδιάστατο και μπορεί να χρησιμοποιεί για την αξιολόγηση των πιθανών συνδυασμών σε περίπτωση που το Gamma Statistic δεν είναι αρκετό ή σε μελέτες που τα δεδομένα εισόδου είναι σε διαφορετική κλίμακα από τα δεδομένα εξόδου. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η γραφική μορφή της Εξίσωσης 4.63.



Σχήμα 4.14. Ο γενετικός αλγόριθμος του ρυθμού καταλληλότητας της σταθεράς Gamma statistic, Γ .

4.4.3. Αρχιτεκτονική νευρωνικών δικτύων

Η εφαρμογή των νευρωνικών δικτύων για την χωροχρονική πρόγνωση των δεικτών ξηρασίας SPI έγινε μετά την εφαρμογή του Gamma Test και τον προσδιορισμό των δεδομένων εισόδου. Για την εκπαίδευση των ΤΝΔ χρησιμοποιήθηκε το 55% του συνόλου δεδομένων του προβλήματος, που αποτελούνται από υπολογισμένα δεδομένα SPI για τους 48 σταθμούς ανάπτυξης για την υδρολογική περίοδο Οκτ. 1960 – Σεπ. 1992 και για την αξιολόγηση το υπόλοιπο 45%, που αποτελούνται από μηνιαία δεδομένα SPI για τους 48 σταθμούς ανάπτυξης για την υδρολογική περίοδο Οκτ. 1992 – Σεπ.

2002 (χρονική πιστοποίηση) και για 18 σταθμούς πιστοποίησης της περιόδου Οκτ. 1960 – Σεπ. 2002 (χωροχρονική πιστοποίηση). Για τη διατήρηση της χρονικής συνέχειας, τα δεδομένα που απαρτίζουν τα δύο υποσύνολα δεν μοιράστηκαν τυχαία, αλλά αποτελούν δεδομένα με χρονική συνέχεια. Το M-test από το Gamma Test χρησιμοποιήθηκε για την επάρκεια των δεδομένων εκπαίδευσης.

Η προσέγγιση των συναρτήσεων για τον υπολογισμό των προγνώσεων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση πολυεπίπεδων προς τα εμπρός τροφοδοτούμενων Νευρωνικών Δικτύων, ANNs, τα οποία εκπαιδεύτηκαν με την προσαρμόσιμη μη μονότονη κλιμακωτή μέθοδο BFGS (Adaptive Self-scaling Nonmonotone BFGS, ASCNMBFGS) των Quasi-Newton μεθόδων [Peng and Magoulas, 2007]. Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται για την επιτηρούμενη εκπαίδευση πολυεπίπεδων ΤΝΔ και αποτελεί μία γρήγορη και αξιόπιστη μέθοδο για την εκπαίδευση ενός ΤΝΔ με πολλά επίπεδα επεξεργασίας. Η γρήγορη σύγκλιση και η ικανότητα της μεθόδου BFGS να βρίσκει τοπικά ακρότατα που προσεγγίζουν βέλτιστες λύσεις προτιμήθηκε λόγω του μεγάλου πλήθους δεδομένων της χωροχρονικής πρόγνωσης και των πολλαπλών βημάτων πρόγνωσης. Η κεντρική ιδέα είναι αρκετά απλή: το δίκτυο ξεκινά τη διαδικασία μάθησης από τυχαίες τιμές των βαρών του. Εάν δώσει λάθος απάντηση (που είναι και το πιο πιθανό) τότε τα βάρη διορθώνονται, έτσι ώστε το λάθος να γίνει μικρότερο. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται πολλές φορές έτσι ώστε σταδιακά το λάθος να ελαττώνεται μέχρι να γίνει πολύ μικρό και ανεκτό. Αν και η κατάλληλη αρχικοποίηση των βαρών αποτελεί ανοιχτό πρόβλημα μέχρι σήμερα, συνήθως τα βάρη αρχικοποιούνται με μικρούς πραγματικούς αριθμούς. Η πιο ευρέως διαδεδομένη μέθοδος αρχικοποίησης των βαρών είναι η μέθοδος που προτάθηκε από τους Nguyen and Widrow [1990] και ακολουθήθηκε σε αυτή τη μελέτη. Η τεχνική αυτή αποτρέπει τον πρόωρο κορεσμό στους κρυφούς νευρώνες υπολογίζοντας το διάστημα στο οποίο επιλέγονται τα βάρη που συνδέουν την είσοδο με το κρυφό στρώμα. Πρώτα η τεχνική αυτή υπολογίζει την παράμετρο ρ :

$$\rho = 0.7M \frac{1}{N} \quad (4.66)$$

όπου N είναι ο αριθμός των νευρώνων εισόδου και M είναι ο αριθμός των κρυφών νευρώνων. Στη συνέχεια επιλέγονται τα βάρη $w = (w_{11}, \dots, w_{nm}, \dots, w_{NM})$ τυχαία από την ομοιόμορφη κατανομή μέσα στο διάστημα $(-1, 1)$. Τέλος, τα βάρη των συνδέσεων μεταξύ των νευρώνων εισόδου και των κρυφών νευρώνων, υπολογίζονται από τον ακόλουθο τύπο:

$$w_{nm} = \frac{\rho w_{nm}}{\|w\|} \quad (4.67)$$

Ως συνάρτηση ενεργοποίησης, η οποία χρειάζεται για την εφαρμογή της μη-γραμμικότητας στο δίκτυο, χρησιμοποιήθηκε η υπερβολική εφαπτομένη (hyperbolic tangent function) συνάρτηση τόσο στα ενδιάμεσα επίπεδα επεξεργασίας όσο και στην έξοδο του ΤΝΔ:

$$\varphi(v) = \tanh(v) = \frac{2}{1 + e^{-2v}} - 1 \quad (4.68)$$

όπου, v τα συνολικά συναπτικά βάρη του νευρώνα ενεργοποίησης που υπολογίζεται από τα δεδομένα εισόδου και το μητρώο των συναπτικών βαρών ως:

$$v = \sum_{i=1}^I w_i x_i + b_i \quad (4.69)$$

με $i = 1, \dots, I$ νευρώνες εισόδου που δέχονται ένα μητρώο δεδομένων εισόδου $x = (x_1, x_2, \dots, x_I)$, ένα σεν συναπτικών βαρών $w = (w_1, w_2, \dots, w_I)$ και ένα σεν μεροληψίας (biases) $b = (b_1, b_2, \dots, b_I)$. Αυτή η συνάρτηση προσεγγίζει το 1, για μεγάλες και θετικές τιμές του v , και το -1 για μεγάλες και αρνητικές τιμές του v , και είναι κατάλληλη για προβλήματα παλινδρόμησης και πρόβλεψης. Μάλιστα σε μία πρόσφατη μελέτη σύγκρισης σιγμοειδών συναρτήσεων ενεργοποίησης αποδείχτηκε η πιο αξιόπιστη επιλογή για την πρόγνωση των πλημμυρών με νευρωνικά δίκτυα [Yonaba et al., 2010]. Στόχος της

εκπαίδευσης είναι να ελαχιστοποιηθεί η συνάρτηση του λάθους μέσω της διόρθωσης των βαρών w . Για την εκπαίδευση των ANNs χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση του μέσου τετραγωνισμένου σφάλματος

$$\text{(Mean Square Error): } MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (SPI_{obs} - SPI_{cal})^2, \text{ όπου } SPI_{obs} \text{ οι παρατηρημένες τιμές του δείκτη}$$

ξηρασίας SPI, SPI_{cal} οι υπολογισμένες τιμές πρόγνωσης του SPI από τα νευρωνικά δίκτυα, και n ο συνολικός αριθμός του δείγματος εκπαίδευσης.

Η τοπολογία, γεωμετρία και αρχιτεκτονική των ΤΝΔ, που καθορίζει τον αριθμό βαρών σύνδεσης και πώς αυτοί τακτοποιούνται, εξαρτάται από τον αριθμό κρυμμένων επιπέδων και τον αριθμό κρυμμένων νευρώνων σε αυτά τα επίπεδα. Έχει αποδειχτεί ότι τα ANNs με ένα κρυμμένο επίπεδο μπορεί να προσεγγίσει οποιαδήποτε συνάρτηση με επαρκή αριθμό βαθμών ελευθερίας [Cybenko, 1989; Hornik et al., 1989; Funahashi, 1989]. Άλλοι όμως ερευνητές προτείνουν ότι η χρήση δύο κρυμμένων επιπέδων μπορεί να οδηγήσει σε πιο σταθερά και αξιόπιστα (parsimonious) μοντέλα [Flood and Cartam, 1994; Ripley, 1994; Zhang, 1994; Tamura and Tateishi, 1997]. Δύο κρυμμένα επίπεδα όμως είναι αρκετά για τη λύση πολλών προβλημάτων και ιδιαίτερα της πρόγνωσης [Zhang et al., 1998]. Η βέλτιστη επιλογή των κρυμμένων νευρώνων γίνεται ή με βάση τη μέθοδο δοκιμής ή λάθους ή με ευρετικές τεχνικές. Οι ευρετικές τεχνικές βασίζονται στην προσθήκη (constructive algorithms) ή αφαίρεση (pruning algorithms) νευρώνων για τη βελτίωση της απόδοσης των ANNs [Maier and Dandy, 2001]. Για τη βέλτιστη δομή της αρχιτεκτονικής των ΤΝΔ, διερευνήθηκαν ένα και δύο κρυμμένα επίπεδα (Three Layer και Four Layer ANNs), και ο αριθμός των κρυμμένων νευρώνων βελτιστοποιήθηκε με τη μέθοδο δοκιμής και λάθους (trial and error procedure). Ο γενικός κανόνας που ακολουθήθηκε είναι:

$$N^H \begin{cases} \leq 2N^I + 1 \\ \leq \frac{N^{TR}}{(N^I + 1)} \end{cases} \quad (4.70)$$

όπου, N^H ο αριθμός των κρυμμένων νευρώνων, N^I ο αριθμός των εισερχόμενων νευρώνων (= αριθμός δεδομένων εισόδου, lags) και N^{TR} ο αριθμός των δειγμάτων εκπαίδευσης. Συμπερασματικά, ο μέγιστος αριθμός των κρυμμένων νευρώνων είναι η μικρότερη τιμή που υπολογίζεται από τις δύο σχέσεις της εξίσωσης 4.70. Για τον ελάχιστο αριθμό κρυμμένων νευρώνων χρησιμοποιήθηκε η σχέση ($N^I/2 \geq 2$). Δεδομένου ότι, τα δεδομένα εισόδου και εξόδου έχουν ίδιες μονάδες μέτρησης τα δεδομένα δεν μετασχηματίστηκαν σε κάποιο εύρος τιμών. Επιπλέον οι τιμές του SPI είναι μετασχηματισμένες τιμές βροχόπτωσης με βάση την κανονική κατανομή και έχουν ήδη υποστούν μία επεξεργασία με βάση τη θεωρία υπολογισμού του SPI.

Η αρχιτεκτονική και η γεωμετρία των ΤΝΔ ελέγχθηκαν ώστε να μην υπερ-εκπαιδευτούν (over-training) και να εξασφαλίζουν γενίκευση (generalization). Στην παρούσα εργασία, η γενίκευση έγινε και με τη χρήση της τεχνικής Bayesian regularization [MacKay, 1992]. Σύμφωνα με αυτή την τεχνική η αντικειμενική συνάρτηση της βελτιστοποίησης των νευρωνικών δικτύων είναι το σταθμισμένο άθροισμα του μέσου τετραγωνισμένου σφάλματος μεταξύ παρατηρημένων και υπολογισμένων τιμών και του αθροίσματος των τετραγώνων των συναπτικών βαρών των τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Η χρήση αυτής της τεχνικής στάθμισης της αντικειμενικής συνάρτησης προσπαθεί να εξασφαλίσει ότι τα ANNs θα παρέχουν ικανοποιητικές προβλέψεις για τα δεδομένα εισόδου που δεν χρησιμοποιούνται στην εκπαίδευση τους. Το δεύτερο μέρος της σταθμισμένης αντικειμενικής συνάρτησης επιβάλλει ένα ακόμα περιορισμό που δίνει μικρότερα συναπτικά βάρη, τα οποία παράγουν ένα πιο ομαλό μοντέλο. Ακόμα ένα πλεονέκτημα της τεχνικής Bayesian regularization είναι ότι η γενίκευση του δικτύου μπορεί να επέλθει με μόλις δύο σετ δεδομένων, ένα σετ εκπαίδευσης και ένα σετ ανεξάρτητης πιστοποίησης, αντί για τρία σετ που απαιτούνται για την τεχνική της γρήγορης διακοπής (early stopping procedure). Επίσης, αυτό γίνεται και για δεύτερη ασφάλεια αφού με βάση το Gamma test δεν χρειάζονται τρία σετ

δειγμάτων δεδομένων και η βελτιστοποίηση γίνεται με βάση το μέσο τετραγωνισμένο σφάλμα που εκτιμάται από το Gamma test. Σε περίπτωση, που τα νευρωνικά δίκτυα δεν μπορούν να πιάνουν την τιμή του μέσου τετραγωνισμένου σφάλματος μετά από 1000 κύκλους (epochs) η βελτιστοποίηση τερματίζεται.

Η δεύτερη προσέγγιση που ακολουθήθηκε είναι η τεχνική bagging [Breiman, 1996], που σχετίζεται με τη δημιουργία δεδομένων εκπαίδευσης πολλών νευρωνικών δικτύων (ensemble networks). Με στατιστικούς όρους, έστω το πρόβλημα της εκτίμησης μιας μη γραμμικής συνάρτησης που έχει πρόσθετο θόρυβο λόγω των λιγοστών δεδομένων. Υπάρχουν πολλές πηγές αβεβαιότητας στις προγνώσεις των νευρωνικών δικτύων. Η πρώτη και μη αποφευκτική είναι ακόμα και ένα «τέλειο» δίκτυο που προσομοίωσε ακριβώς τη συνάρτηση θα παράγει σφάλματα λόγω του υπαρκτού θορύβου. Όμως, υπάρχει ακόμα σφάλμα λόγω του ότι το νευρωνικό δίκτυο πρέπει να εκτιμηθεί από ένα ορισμένο σετ δεδομένων. Το υπόλοιπο σφάλμα μπορεί να χωριστεί σε δύο στοιχεία, την μεροληψία του μοντέλου (model bias) και τη διασπορά. Η μεροληψία είναι το μέσο σφάλμα μιας συγκεκριμένης διαδικασίας εκπαίδευσης μοντέλου που θα δημιουργηθεί σε διαφορετικά δεδομένα (από την άγνωστη κατανομή της συνάρτησης). Η διασπορά (διακύμανση) είναι η ευαισθησία της διαδικασίας προσομοίωσης σε ένα επιλεγμένο σετ δεδομένων. Η μεροληψία και η διασπορά μπορούν όμως να συνδυαστούν. Από τη μία πλευρά μπορεί να επιλεχτεί μία συνάρτηση που δεν εξαρτάται από τα δεδομένα η οποία θα έχει μηδενική διασπορά αλλά μεγάλη μεροληψία, αφού δεν έχουν ληφθεί υπόψη οι γνωστές διαστάσεις του προβλήματος. Στην άλλη πλευρά, μπορεί να επιλεγεί μία πολύπλοκη συνάρτηση που να προσομοιώνει επακριβώς όλα τα δεδομένα ενός συγκεκριμένου σετ, δηλαδή μηδενικό μεροληψία με μεγάλη όμως διασπορά, αφού η πολύπλοκη συνάρτηση αλλάζει δραστικά μορφή για την απόκριση ενός δοσμένου σετ δεδομένων. Οι λύσεις με μεγάλη μεροληψία και χαμηλή διακύμανση οδηγούν σε χαμηλής πολυπλοκότητας μοντέλα (π.χ. γραμμικά μοντέλα), ενώ οι λύσεις με χαμηλή μεροληψία και υψηλή διακύμανση είναι αρκετά πολύπλοκες. Στα νευρωνικά δίκτυα τα μοντέλα χαμηλής πολυπλοκότητας είναι μοντέλα με μικρό αριθμό κρυμμένων νευρώνων. Εάν χρησιμοποιηθεί μία τεχνική δειγματοληψίας δημιουργούνται διαφορετικά σετ δειγμάτων δεδομένων (ensembles). Τα νευρωνικά δίκτυα βελτιστοποιούνται ξανά με τα νέα σετ δεδομένων και έτσι σχηματίζονται πολλές προβλέψεις νευρωνικών δικτύων (ensemble ANNs models). Ο μέσος όρος των ensemble ANNs προγνώσεων μειώνει τη διακύμανση χωρίς όμως να αυξάνει την μεροληψία. Επίσης, η τεχνική αυτή επιτρέπει στην αρχή τη δημιουργία υψηλής πολυπλοκότητας μοντέλων (μικρή μεροληψία) με την προϋπόθεση ότι η διαδικασία bagging μπορεί να μειώσει την παραγόμενη διασπορά. Αυτό όμως έχει αποτέλεσμα την αύξηση του υπολογιστικού φορτίου και του χρόνου εκπαίδευσης. Για την δημιουργία των ensembles δεδομένων χρησιμοποιήθηκε η τεχνική bootstrap resampling with replacement, στην οποία ένα καινούργιο σετ δεδομένων σχηματίζεται από τυχαία επιλογή δειγμάτων με ίση πιθανότητα από την κατανομή της ιστορικής χρονοσειράς του SPI. Έτσι μία περίπτωση μπορεί να επιλεγεί περισσότερες από μία φορές. Τα ensembles μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν και για τη δημιουργία μοντέλων με χαμηλή μεροληψία και χαμηλή διακύμανση, αν χρησιμοποιηθούν διαφορετικές δομές και τοπολογίες νευρωνικών δικτύων. Τα πολλά ANNs διαφορετικής αρχιτεκτονικής θα παρουσιάσουν συστηματικά σφάλματα σε διαφορετικά σημεία του χώρου επίλυσης. Η χρήση της μέσης τιμής των προγνώσεων των διαφορετικών ANNs μπορεί να μειώσει κάποια μεροληψία.

Στην παρούσα διατριβή, ο συνδυασμός της Bayesian regularization με την τεχνική bagging εφαρμόστηκε για την γενίκευση των ANNs. Πολλά σετ δεδομένων (ensembles) δημιουργήθηκαν από την αρχική χρονοσειρά με την τεχνική bootstrap resampling with replacement. Καθένα από τα παραγόμενα σετ εκπαίδευσης, χρησιμοποιήθηκε στην εκπαίδευση των τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Έτσι μία ομάδα (pool) μοντέλων δημιουργούνται και ένας βέλτιστος ολικός προγνώστης μπορεί να παραχθεί με τη μέση τιμή των υπολογισμένων τιμών για ένα δοσμένο μητρώο δεδομένων εισόδου. Έχει αποδειχτεί ότι αυτή η τεχνική μειώνει τη διακύμανση του σφαλμάτων αφού η ομαδοποίηση ομαλοποιεί τις διακυμάνσεις από τις εκτιμήσεις όλων των μοντέλων [Breiman, 1996; 2001]. Η τεχνική bootstrap [Efron, 1979] είναι μία υπολογιστική τεχνική δειγματοληψίας για τη μείωση της

αβεβαιότητας [Efron and Tibshirani, 1993]. Επιπρόσθετα, είναι μία απλή τεχνική που δεν απαιτεί πολύπλοκους υπολογισμούς των παραγώγων και αντιστροφές του Εσσιανού πίνακα που χρειάζονται στις γραμμικές μεθόδους ή λύσεις Monte Carlo των ολοκληρωμάτων της Bayesian προσέγγισης. Η τεχνική bootstrap resampling with replacement έχει εφαρμοστεί επιτυχώς στην υδρολογική προσομοίωση και πρόγνωση για την εκτίμηση των μέσων των παραγόμενων δειγμάτων (ensembles), των διαστημάτων εμπιστοσύνης και την αβεβαιότητα των παραμέτρων των τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Τα αποτελέσματα έχουν δείξει ότι τεχνική bootstrap βοηθάει στην οριακά καλύτερη απόδοση των ANNs με πολύ καλές ιδιότητες γενίκευσης [Abrahart, 2003; Jeong and Kim, 2005; Jia and Culver, 2006; Han et al., 2007; Srivastav et al., 2007; Tiwari and Chatterjee, 2010]. Επίσης, η τεχνική bagging στα νευρωνικά δίκτυα βοηθάει στην επιλογή των δεδομένων εισόδων και των κρυμμένων νευρώνων λόγω των ιδιοτήτων της γενίκευσης που παρουσιάζει [Jeong and Kim, 2005]. Τέλος, μία πρόσφατη μελέτη σύγκρισης μεθόδων γενίκευσης πρότεινε ότι ο συνδυασμός της Bayesian regularization με την τεχνική bagging αποτελεί το βέλτιστο συνδυασμό απόδοσης, σταθερότητας και γενίκευσης των νευρωνικών δικτύων για υδρολογικές προγνώσεις [Anctil and Lauzon, 2004].

4.4.4. Προσέγγιση πολλαπλών χρονικών βημάτων πρόγνωσης

Τα πολυεπίπεδα προς τα εμπρός τροφοδοτούμενα νευρωνικά δίκτυα (feed-forward multilayer artificial neural networks, γνωστά και ως multilayer perceptrons, MLPs) εφαρμόστηκαν στις χρονοσειρές του SPI για πρόγνωση από ένα έως έξι επόμενα χρονικά βήματα (lead times) με σκοπό τη διαχείριση των ξηρασιών για βραχυπρόθεσμες και μεσοπρόθεσμες δράσεις. Τα MLPs είναι ο πιο δημοφιλής τύπος των ANNs που χρησιμοποιούνται για υδρολογικές προγνώσεις [ASCE, 2000a,b; Govindaraju and Rao, 2000; Maier and Dandy, 2000; Dawson and Wilby, 2001; Abrahart et al., 2004; Abrahart et al., 2008]. Για την πρόγνωση των τιμών του SPI, οι εισόδοι του MLP είναι οι προηγούμενοι χρόνοι υστέρησης της χρονοσειράς και οι έξοδοι είναι η προβλεπόμενη τιμή. Για ένα δεδομένου εξόδου τα MLP ουσιαστικά προσομοιώνουν την σχέση εισόδου – εξόδου:

$$SPI_{t+1} = f(SPI_t, SPI_{t-1}, \dots, SPI_{t-n}) \quad (4.71)$$

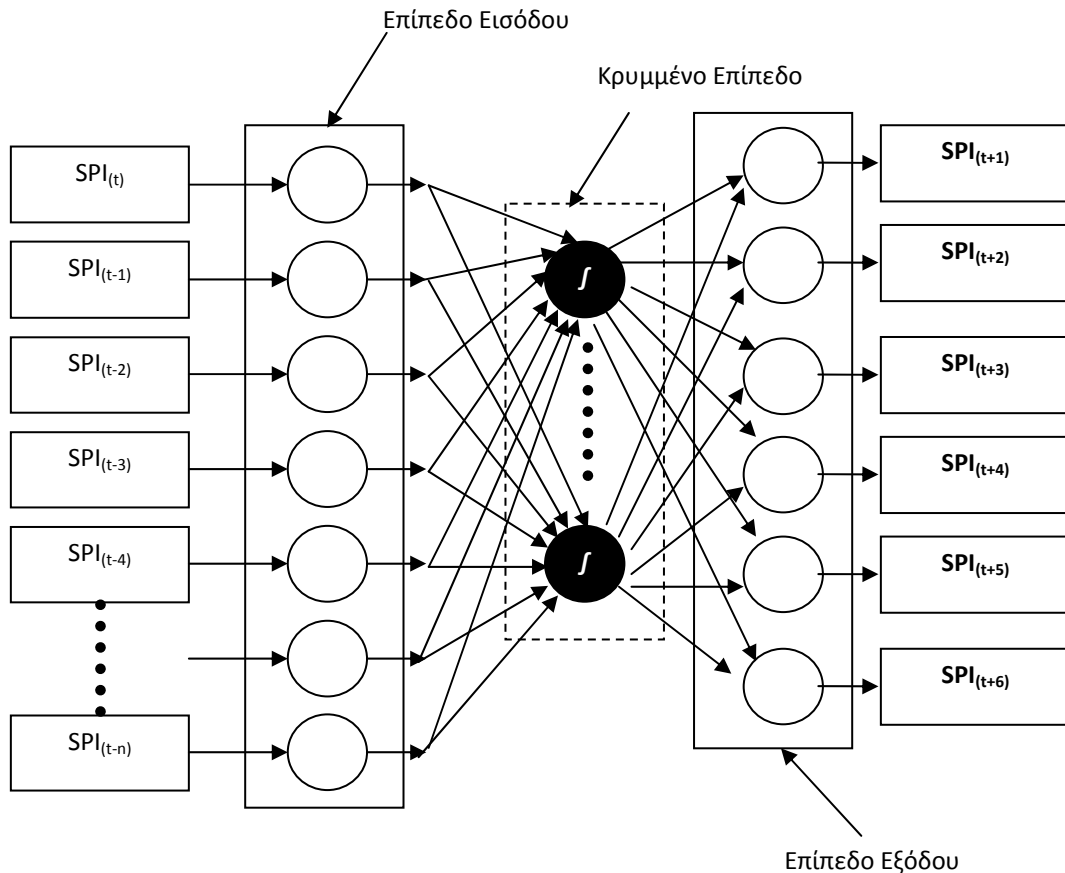
όπου SPI_t είναι η τιμή του SPI στον χρόνο $t+1$, n η διάσταση του μητρώου των δεδομένων εισόδου ή ο αριθμός των προηγούμενων χρονικών τιμών που χρησιμοποιούνται για την πρόγνωση της μελλοντικής τιμής και f η μία μη γραμμική συνάρτηση που προσδιορίζεται από την αρχιτεκτονική των MLP και των δεδομένων. Ουσιαστικά, η Εξίσωση 4.71 μπορεί να θεωρηθεί ως ένας γενικός τύπος μη γραμμικού αυτοπαλίνδρομου μοντέλου ή ομοιώματος.

Η πρόγνωση πολλαπλών χρονικών βημάτων γίνεται με δύο προσεγγίσεις. Η πρώτη προσέγγιση καλείται ευθεία πρόγνωση (Direct Artificial Neural Networks, DANN) των εξεταζόμενων χρονικών βημάτων πρόγνωσης και χρησιμοποιεί τους αναγνωρισμένους χρόνους υστέρησης της χρονοσειράς του SPI για την πρόβλεψη των μελετώμενων χρονικών βημάτων. Για παράδειγμα στην Εξίσωση 4.71 μόνο το βήμα πρόγνωσης αλλάζει και γίνεται SPI_{t+p} όπου p είναι ένας αριθμός που προστίθεται ώστε να δώσει το επιθυμητό βήμα πρόγνωσης (π.χ. για πρόγνωση έξι μηνών το p ισούται με έξι (5) = SPI_{t+6}). Για την ευθεία πρόγνωση πολλαπλών χρονικών βημάτων δύο τεχνικές εφαρμόζονται στα νευρωνικά δίκτυα. Η πρώτη βασίζεται σε νευρωνικά δίκτυα πολλαπλών εξόδων όπου οι έξοδοι είναι τα χρονικά βήματα πρόγνωσης (direct multi-step forecasting). Με μαθηματικούς όρους η ευθεία πρόγνωση είναι:

$$\begin{aligned} SPI_{t+1}^{\hat{}} &= f_1(SPI_t, SPI_{t-1}, \dots, SPI_{t-n}), \\ SPI_{t+2}^{\hat{}} &= f_2(SPI_t, SPI_{t-1}, \dots, SPI_{t-n}), \\ SPI_{t+3}^{\hat{}} &= f_3(SPI_t, SPI_{t-1}, \dots, SPI_{t-n}), \\ SPI_{t+4}^{\hat{}} &= f_4(SPI_t, SPI_{t-1}, \dots, SPI_{t-n}), \\ SPI_{t+5}^{\hat{}} &= f_5(SPI_t, SPI_{t-1}, \dots, SPI_{t-n}) \end{aligned} \quad (4.72)$$

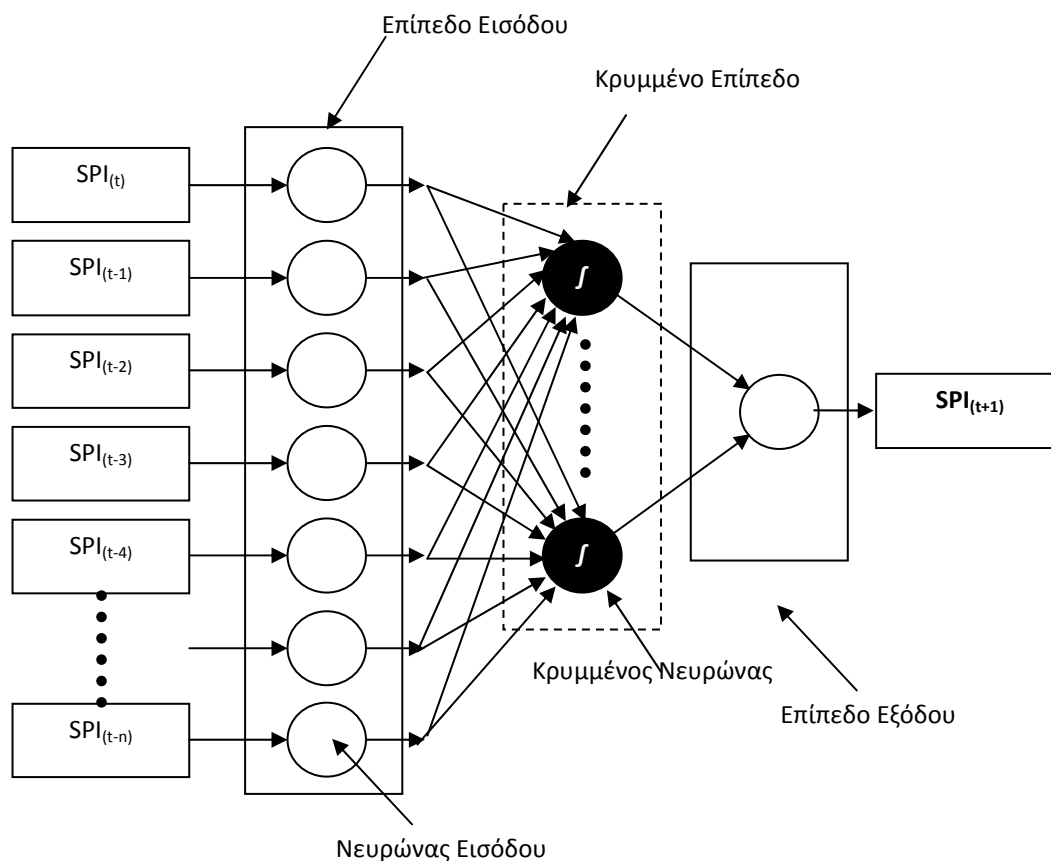
$$SPI_{t+6}^{\hat{}} = f_6(SPI_t, SPI_{t-1}, \dots, SPI_{t-n})$$

όπου f_1 έως f_6 είναι συναρτήσεις που προσδιορίζονται από ένα νευρωνικό δίκτυο πολλαπλών εξόδων, $SPI_{t+1}^{\hat{}} \dots SPI_{t+6}^{\hat{}}$ οι υπολογισμένες τιμές πρόγνωσης για τα έξι χρονικά βήματα πρόγνωσης, και $(SPI_t, SPI_{t-1}, \dots, SPI_{t-n})$ οι χρονοσειρές υστέρησης των τιμών του SPI. Για υπενθύμιση ο απαραίτητος αριθμός των lags, n , προσδιορίστηκαν στην παρούσα εργασία με τη χρήση του μη παραμετρικού Gamma test. Μία τέτοια αρχιτεκτονική MLPs παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα για πρόγνωση έξι χρονικών βημάτων του δείκτη ξηρασίας SPI (Σχήμα 4.15). Η τεχνική αυτή προϋποθέτει ότι ένα ANN με συγκεκριμένη αρχιτεκτονική μπορεί να εφαρμοστεί για όλα τα χρονικά βήματα πρόγνωσης.



Σχήμα 4.15. Ευθεία πρόγνωση πολλαπλών χρονικών βημάτων με ANNs πολλαπλών εξόδων (direct multi step forecasting).

Η δεύτερη τεχνική εφαρμόζεται για νευρωνικά δίκτυα μίας εξόδου όπου η έξοδος είναι το χρονικό βήμα πρόγνωσης, που εξετάζεται. Η τεχνική αυτή επιτρέπει στα νευρωνικά δίκτυα να έχουν διαφορετική αρχιτεκτονική που να εξαρτάται από το βήμα πρόγνωσης και τα δεδομένα. Είναι όμως υπολογιστικά πιο δύσκολη αφού πρέπει να βελτιστοποιηθούν τόσα μοντέλα όσα και τα βήματα πρόβλεψης. Μία τέτοια γενική αρχιτεκτονική ANNs απεικονίζεται στο Σχήμα 4.16 για την πρόβλεψη του επόμενου χρονικού βήματος του δείκτη SPI, SPI_{t+1} και είναι ίδια για όλα τα χρονικά βήματα πρόγνωσης του SPI, SPI_{t+2} , SPI_{t+3} , SPI_{t+4} , SPI_{t+5} , SPI_{t+6} . Στη διεθνή βιβλιογραφία η μέθοδος αυτή αναφέρεται ως ανεξάρτητη μέθοδος πρόγνωσης πολλαπλών χρονικών βημάτων (independent multi step forecasting) [Kline, 2004].

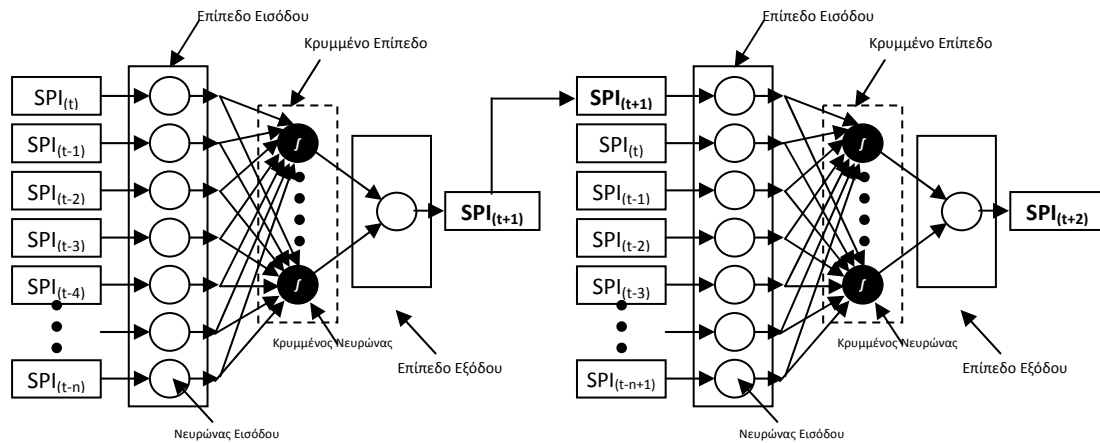


Σχήμα 4.16. Ευθεία πρόγνωση ενός χρονικού βήματος με ANNs μίας εξόδου (independent direct step forecasting for multiple targets).

Η δεύτερη προσέγγιση για την πρόγνωση πολλαπλών χρονικών βημάτων με νευρωνικά δίκτυα καλείται επαναληπτική (iterative ή recursive) πρόγνωση (Iterative or Recursive Artificial Neural Networks, RANN). Η επαναληπτική πρόγνωση χρησιμοποιείται όπως τα Box-Jenkins μοντέλα στην οποία οι προγνώσεις των μοντέλων εισέρχονται στο σύστημα ως δεδομένα εισόδου για τις προγνώσεις των επόμενων χρονικών βημάτων. Έχοντας εκπαιδεύσει το νευρωνικό δίκτυο για πρόγνωση $t+1$, και ζητώντας την πρόγνωση για $t+p$, η διαδικασία γίνεται ως εξής. Η πρόβλεψη $t+1$ ενσωματώνεται στα δεδομένα εισόδου και τροφοδοτεί το νευρώνα εισόδου με την τιμή της χρονοσειράς στο χρονικό βήμα $t+1$ για να δημιουργηθεί η πρόγνωση στο επόμενο χρονικό βήμα $t+2$. Στη συνέχεια η είσοδος του δικτύου τροφοδοτείται και με την πρόγνωση του χρονικού βήματος $t+2$, οπότε προκύπτει η πρόγνωση για το χρονικό βήμα $t+3$. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται συνεχώς, μέχρι να παραχθεί η επιθυμητή πρόγνωση για το χρονικό βήμα $t+p$. Με μαθηματικούς όρους, η πρόγνωση του δείκτη ξηρασίας SPI έως έξι μήνες μπροστά είναι:

$$\begin{aligned}
 SPI_{t+1}^{\hat{}} &= f_1(SPI_t, SPI_{t-1}, \dots, SPI_{t-n}), \\
 SPI_{t+2}^{\hat{}} &= f_2(SPI_{t+1}^{\hat{}}, SPI_t, \dots, SPI_{t-n+1}), \\
 SPI_{t+3}^{\hat{}} &= f_3(SPI_{t+2}^{\hat{}}, SPI_{t+1}^{\hat{}}, SPI_t, \dots, SPI_{t-n+2}), \\
 SPI_{t+4}^{\hat{}} &= f_4(SPI_{t+3}^{\hat{}}, SPI_{t+2}^{\hat{}}, SPI_{t+1}^{\hat{}}, SPI_t, \dots, SPI_{t-n+3}), \\
 SPI_{t+5}^{\hat{}} &= f_5(SPI_{t+4}^{\hat{}}, SPI_{t+3}^{\hat{}}, SPI_{t+2}^{\hat{}}, SPI_{t+1}^{\hat{}}, SPI_t, SPI_{t-n+4}), \\
 SPI_{t+6}^{\hat{}} &= f_6(SPI_{t+5}^{\hat{}}, SPI_{t+4}^{\hat{}}, SPI_{t+3}^{\hat{}}, SPI_{t+2}^{\hat{}}, SPI_{t+1}^{\hat{}}, SPI_t, SPI_{t-n+5})
 \end{aligned} \tag{4.73}$$

όπου f_1 έως f_6 είναι συναρτήσεις που προσδιορίζονται από τα νευρωνικά δίκτυα. Μία γενική αρχιτεκτονική νευρωνικών δικτύων για την επαναληπτική μέθοδο πρόγνωσης παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 4.17. Επαναληπτική μέθοδος πρόγνωσης του χρονικού βήματος $t+2$.

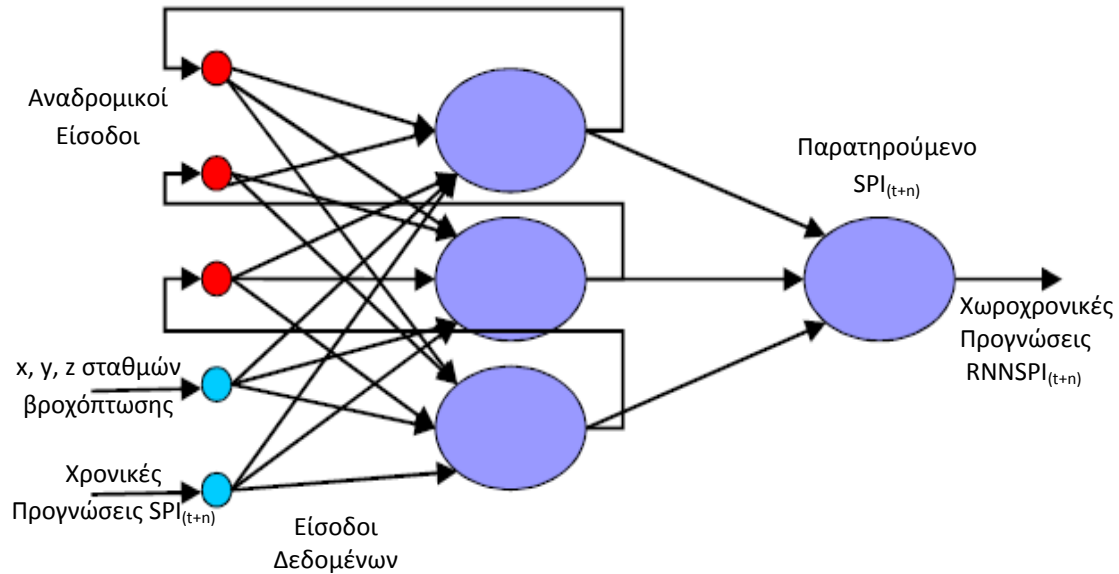
Η εφαρμογή των δύο τεχνικών πρόγνωσης πολλαπλών βημάτων με νευρωνικά δίκτυα αποτελεί μέχρι σήμερα ένα σημαντικό πεδίο έρευνας [Zhang et al., 1998; Hamzacebi et al., 2009]. Κάποιες μελέτες έδειξαν ότι η επαναληπτική μέθοδος δίνει καλύτερα αποτελέσματα [Weigend et al., 1992; Hill et al., 1994] ενώ άλλες μελέτες έδειξαν ότι η ευθεία πρόγνωση πολλαπλών βημάτων πρέπει να προτιμάται από την επαναληπτική μέθοδο [Zhang, 1994; Hamzacebi et al., 2009]. Άλλες μελέτες έδειξαν ότι η επαναληπτική μέθοδος είναι ελαφρώς καλύτερη για βραχυπρόθεσμες προγνώσεις, αλλά για μεσοπρόθεσμες προγνώσεις η ευθεία μέθοδος πρέπει να προτιμάται για μετεωρολογικούς δείκτες ξηρασίας [Mishra et al., 2007; Vasiliades and Loukas, 2007]. Οι Lachtermacher and Fuller [1995] επισημαίνουν ότι η ευθεία μέθοδος χρειάζεται περισσότερα δεδομένα από την επαναληπτική μέθοδο για την αποφυγή της υπερπροσαρμογής των ANNs. Ο Kline [2004], σε μία συγκριτική μελέτη τεχνικών πρόβλεψης πολλαπλών χρονικών βημάτων με νευρωνικά δίκτυα έδειξε ότι η ανεξάρτητη ευθεία πρόγνωση πολλαπλών χρονικών βημάτων είναι καλύτερη από την ευθεία πρόγνωση πολλαπλών εξόδων των νευρωνικών δικτύων αλλά ο αριθμός των δειγμάτων εκπαίδευσης και ο χρονικός ορίζοντας μπορεί να επηρεάσει την υπεροχή της ανεξάρτητης ευθείας πρόγνωσης.

Οι παραπάνω μελέτες δείχνουν ότι δεν είναι σαφές ποια μέθοδος δίνει καλύτερα αποτελέσματα για την πρόγνωση πολλαπλών χρονικών βημάτων. Γενικά, πιστεύεται ότι η ευθεία πρόγνωση πρέπει να δίνει καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την επαναληπτική, γιατί στηρίζεται αποκλειστικά στις προηγούμενες τιμές δεδομένων και όχι σε προβλέψεις [Zhang et al., 1998]. Επίσης, είναι πιο εύκολες για επιχειρησιακούς σκοπούς ιδιαίτερα σε περίπτωση που στο χρονικό μοντέλο εμφανίζονται και εξωγενείς δευτερογενείς μεταβλητές. Εάν για παράδειγμα στο χρονικό μοντέλο ξηρασίας ενσωματωθούν και προηγούμενες τιμές βροχόπτωσης ή άλλης μεταβλητής (π.χ. κλιματικοί δείκτες Southern Oscillation Index (SOI) και North Atlantic Oscillation (NAO) index) η ευθεία τεχνική πρόγνωσης πολλαπλών βημάτων μπορεί να εφαρμοστεί πολύ εύκολα, ενώ η επαναληπτική τεχνική προϋποθέτει και ένα άλλο μοντέλο πρόγνωσης των τιμών της βροχόπτωσης για τις προγνώσεις του δείκτη ξηρασίας χρονικό διαστημάτων μεγαλύτερο από ένα χρονικό βήμα. Εάν το χρονικό μοντέλο στηρίζεται αποκλειστικά σε προηγούμενες τιμές της εξεταζόμενης μεταβλητής όπως στην παρούσα εργασία (τιμές SPI) τότε και οι δύο μεθοδολογίες πρέπει να εφαρμοστούν ώστε να διαπιστωθεί ποια μεθοδολογία είναι κατάλληλη για τα μελετώμενα χρονικά βήματα πρόγνωσης. Για τη διαπίστωση των παραπάνω η

παρούσα εργασία εφαρμόζει και τις δύο τεχνικές στην πρόγνωση της ξηρασίας. Η αξιολόγηση των δύο τεχνικών βασίστηκε στα στατιστικά κριτήρια RMSE, R, MAE, Eff, και MAPE που είναι τα συνηθέστερα στατιστικά κριτήρια για προβλήματα πρόγνωσης. Επίσης η σύγκριση θα γίνει και με βάση τον αλγόριθμο αναφοράς του μοντέλου εμμονής αλλά και διάφορα ποιοτικά κριτήρια πρόγνωσης επεισοδίων ξηρασίας.

Οι δύο χρονικές τεχνικές (DANN και RANN) εφαρμόστηκαν χρονικά για όλους τους σταθμούς ανάπτυξης και χωρικής πιστοποίησης για την παραγωγή ενός γενικευμένου (generalized) χρονικού μοντέλου για χωροχρονική εφαρμογή. Η σύγκριση των δύο τεχνικών θα αναδείξει την κατάλληλη χρονική μέθοδο που πρέπει να ακολουθείται για πρόγνωση πολλαπλών χρονικών βημάτων του δείκτη SPI. Στη συνέχεια, οι χρονικές προγνώσεις της καλύτερης τεχνικής ενσωματώνονται σε ένα χωρικό αναδρομικό νευρωνικό δίκτυο (spatial recurrent neural network, RNN) τύπου Elman [Elman, 1990]. Τα τεχνητά αναδρομικά (ή ανατροφοδοτούμενα) νευρωνικά δίκτυα [Bishop, 2006] αποτελούν την εξέλιξη των τεχνητών νευρωνικών δικτύων τα οποία, με την σειρά τους, επιχειρούν να προσομοιώσουν την λειτουργία των φυσικών νευρωνικών δικτύων. Χρησιμοποιείται ένα δίκτυο τριών επιπέδων στο οποίο έχει προστεθεί ένα σύνολο από μονάδες περιεχομένου (context units) στο επίπεδο εισόδου. Υπάρχουν συνδέσεις από το μεσαίο (κρυφό) επίπεδο σε αυτές τις μονάδες περιεχομένου οι οποίες έχουν σταθερό βάρος ίσο με 1. Σε κάθε βήμα, η είσοδος προωθείται προς το επόμενο επίπεδο (feed-forward) κι έπειτα εφαρμόζεται ένας κανόνας εκμάθησης. Οι σταθερές συνδέσεις προς τα πίσω καταλήγουν στις μονάδες περιεχομένου κρατώντας ένα αντίγραφο των προηγούμενων τιμών από τις κρυφές μονάδες. Έτσι, το δίκτυο μπορεί να διατηρήσει μία κατάσταση, έτσι ώστε να έχει την ικανότητα να φέρνει εις πέρας εργασίες όπως πρόβλεψη ακολουθίας που είναι πέρα από τις δυνατότητες ενός απλού πολυεπίπεδου νευρωνικού δικτύου. Οι αναδρομικές συνδέσεις καθιστούν τα δίκτυα αυτά ικανά να αναγνωρίζουν χωρικές ή και χωρικές συσχετίσεις μεταξύ των δεδομένων, χωρίς να χρειάζεται τα δεδομένα που αναφέρονται σε διαφορετικές χρονικές ή χωρικές θέσεις να εμφανιστούν στο δίκτυο ταυτόχρονα. Η ύπαρξη αναδρομικών συνδέσεων δημιουργεί την ανάγκη συγχρονισμού στο δίκτυο, όσον αφορά τη μετάδοση των σημάτων. Έτσι εισάγονται καθυστερήσεις (delays) στις αναδρομικές συνδέσεις. Δεδομένα εισόδου στο RNN τύπου Elman είναι οι γεωγραφικές συντεταγμένες και το υψόμετρο των σταθμών και οι προβλέψεις της καλύτερης χρονικής μεθόδου (DANN ή/και RANN). Οι παρατηρούμενες τιμές του SPI για όλα τα χρονικά βήματα πρόγνωσης χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση του RNN. Μία γενική δομή του χωροχρονικού μοντέλου RNN Elman παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.18. Και πάλι η ίδια χρονική περίοδος εκπαίδευσης των 48 σταθμών ανάπτυξης (Οκτ. 1962 – Σεπ 1992) χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση του δικτύου Elman. Η χρονική πιστοποίηση των σταθμών ανάπτυξης έγινε για την περίοδο Οκτ. 1992 – Σεπ 2002 και η χωροχρονική πιστοποίηση των 18 ανεξάρτητων σταθμών για όλη την περίοδο Οκτ. 1962 – Σεπ 2002. Όλα τα δεδομένα εισόδου μετασηματίστηκαν γραμμικά στο εύρος -1 (ελάχιστη τιμή) έως 1 (μέγιστη τιμή) για την ομοιόμορφη κατανομή των πεδίων τιμών τους. Στο επίπεδο εξόδου (δεύτερο επίπεδο νευρώνων) γραμμικές συναρτήσεις ενεργοποίησης χρησιμοποιήθηκαν. Η εκπαίδευση των αναδρομικών νευρωνικών δικτύων πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια του πακέτου Matlab Neural Network Toolbox και η βελτιστοποίηση έγινε με τη μέθοδο προσαρμόσιμη μη μονότονη κλιμακωτή μέθοδο BFGS (Adaptive Self-scaling Nonmonotone BFGS, ASCNMBFGS) των Peng and Magoulas [2007]. Η ASCNMBFGS έχει αποδειχτεί ότι είναι μία αξιόπιστη μέθοδος εκπαίδευσης αναδρομικών νευρωνικών δικτύων [Peng and Magoulas, 2007; 2009]. Υπενθυμίζεται ότι ένα μοντέλο πρόγνωσης για να είναι επιχειρησιακό πρέπει να δίνει καλύτερα αποτελέσματα από μία μέθοδο αναφοράς και να μπορεί να προσομοιώνει ικανοποιητικά την δριμύτητα και διάρκεια των επεισοδίων ξηρασίας αλλά και την περιοχική εξάπλωση του φαινομένου. Ως μέθοδος αναφοράς χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του εμμονής (Persistence Model). Διάφορα ποσοτικά και ποιοτικά στατιστικά κριτήρια υπολογίστηκαν για τον έλεγχο του χωροχρονικού αναδρομικού δικτύου RNN. Τα ποιοτικά κριτήρια πρόγνωσης υπολογίστηκαν από τον ποιοτικό πίνακα αξιολόγησης συμβάντων ξηρασίας (contingency table) που δημιουργήθηκε για τιμές $SPI \leq -1$. Ο έλεγχος

της χωροχρονικής μεθόδου RNN έγινε και για τις τρεις περιόδους ανάπτυξης, χρονικής πιστοποίησης και χωροχρονικής πιστοποίησης των σταθμών ανάπτυξης και χωρικής πιστοποίησης.



Σχήμα 4.18. Γενική δομή των χωροχρονικών αναδρομικών νευρωνικών δικτύων RNN τύπου Elman.

Τέλος, οι προγνώσεις της χωροχρονικής μεθοδολογίας θα συνδυαστούν με την καλύτερη μέθοδο χωρικής παρεμβολής για τη δημιουργία ψηφιακών χαρτών πρόγνωσης για μέγεθος φατίου 1-km με στόχο ένα καταναμημένο (distributed) επιχειρησιακό σύστημα πρόγνωσης του SPI στον χώρο και στον χρόνο. Οι παραγόμενοι χάρτες ξηρασίας θα συγκριθούν με τους παρατηρημένους χάρτες ξηρασίας για την αξιολόγηση της υβριδικής χωροχρονικής μεθοδολογίας στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού της Θεσσαλίας. Το σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης της ξηρασίας πραγματοποιείται για τα χρονικά βήματα πρόγνωσης του SPI υπολογισμένου σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν επιχειρησιακά και για την εκτίμηση των επιφανειακών τιμών του SPI στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού. Στα επόμενα κεφάλαια παρουσιάζεται αναλυτικά το υβριδικό χωροχρονικό σύστημα πρόγνωσης διαφόρων τύπων ξηρασίας στην υδρολογική λεκάνη για βραχυπρόθεσμες και μεσοπρόθεσμες δράσεις και το επιχειρησιακό σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης και παρακολούθησης της ξηρασίας.

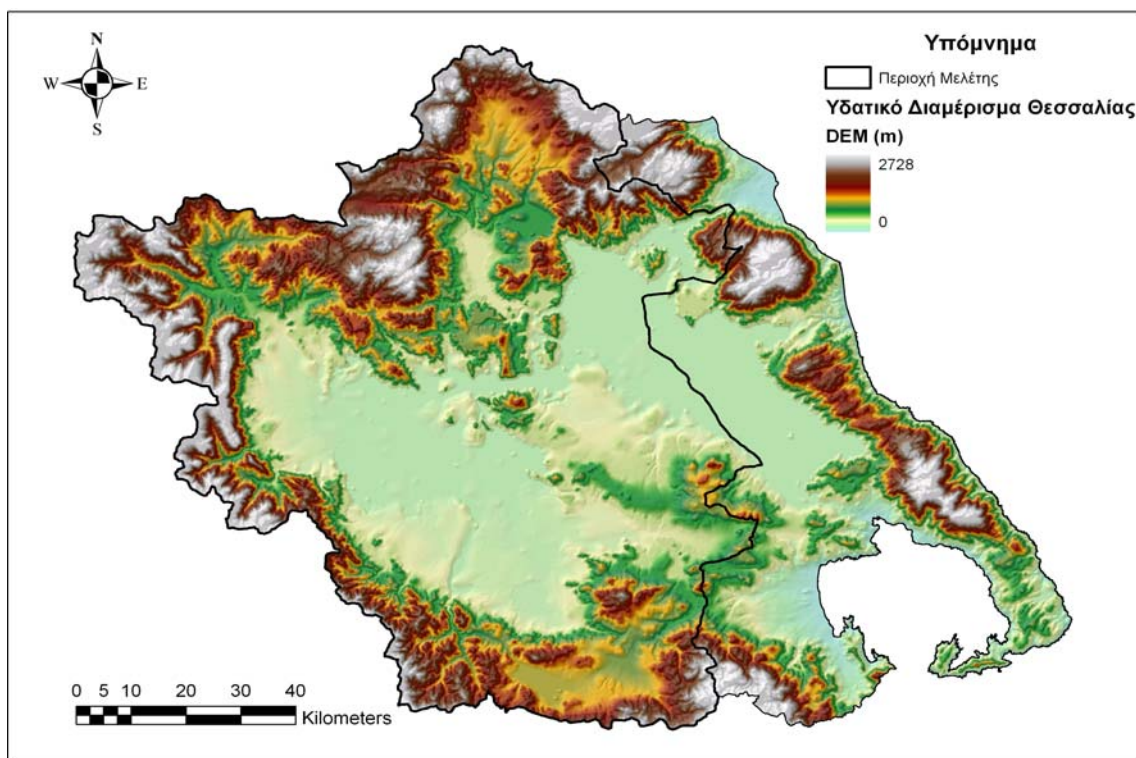
5. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΚΡΙΒΩΣΗ ΞΗΡΑΣΙΑΣ

Η λεκάνη απορροής του Πηνειού ποταμού που είναι η περιοχή μελέτης της παρούσας διδακτορικής διατριβής, βρίσκεται στο γεωγραφικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας και είναι η κύρια υδρολογική λεκάνη του ομώνυμου υδατικού διαμερίσματος. Η Θεσσαλία βρίσκεται στο βορειοανατολικό τμήμα της Κεντρικής Ελλάδας. Ανατολικά βρέχεται σε σχεδόν ευθύγραμμη ακτογραμμή από το Αιγαίο Πέλαγος. Από την κεντρική και δυτική Μακεδονία χωρίζεται από τους ορεινούς όγκους του Κάτω Ολύμπου (μέγιστο υψόμετρο 1588 m), του Άνω ή Υψηλού Ολύμπου (μ.υψ. 2917 m), του Τιτάρου (μ.υψ. 1839 m), των Καμβουνίων (μ.υψ. 1615 m), των Αντιχασίων (μ.υψ. 1416 m) και Χασίων (μ.υψ. 1564 m). Δυτικότερα από την Ήπειρο η Θεσσαλία χωρίζεται από την οροσειρά της Νότιας Πίνδου (μέγιστο υψόμετρο 2.204 m). Το νότιο όριο Θεσσαλίας και Στερεάς Ελλάδας διαμορφώνεται, από την δύση προς την ανατολή, αρχικά από μικρό τμήμα του Αχελώου.

Η περιοχή αυτή παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον διότι αποτελεί την μεγαλύτερη πεδινή έκταση της χώρας. Παρατηρούνται υδατικές καταναλώσεις για άρδευση και ύδρευση για αστική και βιομηχανική χρήση, κτηνοτροφία και τουρισμό. Αποτελεί μια περιοχή όπου το μεγαλύτερο μέρος του πληθυσμού ασχολείται με τον πρωτογενή τομέα, κυρίως τη γεωργία. Οι κύριες καλλιέργειες είναι το βαμβάκι, σιτάρι, καλαμπόκι, ενώ μηλοειδή, πυρηνόκαρπα, σταφύλια, ελιές και οπωροκηπευτικά καλλιεργούνται σε μικρό ποσοστό του συνόλου της καλλιεργούμενης έκτασης. Ο ποταμός Πηνειός (217 km μήκος) και οι παραπόταμοι του διασχίζουν όλοι την Θεσσαλία και την λεκάνη απορροής της, της οποίας η έκταση είναι περίπου 9500 km² (Σχήμα 5.1)

Το νερό του ποταμού Πηνειού και των παραποτάμων του χρησιμοποιείται κυρίως για την άρδευση των καλλιεργειών και για την παραγωγή ενέργειας του υδροηλεκτρικού σταθμού του Σμοκόβου. Οι μεγάλες απαιτήσεις των καλλιεργειών, που είναι σε μεγάλο ποσοστό υδρόφιλες, η ανεπαρκής εκμετάλλευση του επιφανειακού νερού και η συνεχόμενη αύξηση της ζήτησής του οδήγησε σε υπερεκμετάλλευση του υπόγειου υδατικού δυναμικού, με συνέπεια την σαφή μείωση του και την επακόλουθη υπερεκμετάλλευση σε όλο και μεγαλύτερο βαθμό των υπόγειων υδατικών αποθεμάτων. Η υπερεκμετάλλευση του υπόγειου νερού, ιδιαίτερα κατά την περίοδο άνυδρων ετών, είχε ως αποτέλεσμα την σαφή μείωση του υπόγειου υδατικού αποθέματος. Για τον λόγο αυτό οι παραγόμενες αρδευτικές ανάγκες παίζουν ένα πολύ σημαντικό ρόλο στα τεκταινόμενα της περιοχής τόσο από οικονομικής άποψης όσο και από κοινωνικοπολιτικής. Κατά συνέπεια η μελέτη της χωρικής και χρονικής κατανομής της ξηρασίας στην μείζονα λεκάνη απορροής της Θεσσαλίας, αποτελεί ένα εξαιρετικά ενδιαφέρον και κρίσιμο αντικείμενο προκειμένου να εξαχθούν όσο το δυνατόν χρήσιμα και ασφαλή συμπεράσματα σχετικά με την μελλοντική συμπεριφορά του φαινομένου.

Η παρουσίαση της υδρολογικής λεκάνης του Πηνειού ποταμού αρχίζει με τα γεωμορφολογικά και κλιματολογικά της χαρακτηριστικά και ακολουθεί με την παρουσίαση των βάσεων δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την διατριβή. Ακολουθεί η ανάλυση χρονοσειρών της βάσης δεδομένων και πολύ περιληπτικά παρουσιάζεται το υδατικό ισοζύγιο της υδρολογικής λεκάνης. Τέλος, η διακρίβωση της ξηρασίας στην περιοχή γίνεται με τη χρήση του μετεωρολογικού δείκτη SPI υπολογισμένου σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες για διακρίβωση ξηρασίας εδαφικής υγρασίας, επιφανειακών απορροών και συστημάτων διαχείρισης υδατικών πόρων. Για κάθε τύπο ξηρασίας, αντιπροσωπευτικοί δείκτες ξηρασίας υπολογίστηκαν και συσχετίστηκαν με τους μετεωρολογικούς δείκτες ξηρασίας του SPI. Τα παραπάνω περιγράφονται αναλυτικά στις επόμενες παραγράφους.



Σχήμα 5.1. Υδατικό διαμέρισμα Θεσσαλίας και λεκάνη απορροής του Πηνειού ποταμού.

5.1. Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά

5.1.1. Γεωμορφολογία

Η γενικότερη μορφολογία και το ανάγλυφο της περιοχής μπορεί να περιγραφεί ως εξής: Η πεδινή περιοχή της Θεσσαλίας η οποία είναι η πιο εύφορη και ανεπτυγμένη, έχει άφθονους φυσικούς πόρους και μεγάλες δυνατότητες γεωργικής ανάπτυξης. Το μέσο υψόμετρο του υδατικού διαμερίσματος είναι 285 m και χωρίζεται από τα χαμηλά Χαλκοδόνια όρη σε δύο μεγάλα τμήματα ίσης περίπου έκτασης, την δυτική και ανατολική πεδιάδα, ενώ περιφερειακά των πεδινών αυτών εκτάσεων βρίσκονται, μεγάλοι ορεινοί όγκοι. Το ανατολικό τμήμα της Θεσσαλικής πεδιάδας έχει τα εξής γεωγραφικά όρια: βόρεια τον Κάτω Όλυμπο και την Όσσα, ανατολικά το Μαυροβούνι και το βόρειο Πήλιο, νότια και νοτιοδυτικά τα Χαλκοδόνια και βορειοδυτικά το Ζάρκο. Η νοτιοανατολική περιοχή περιλαμβάνει μια κλειστή λεκάνη, της αποξηραθείσας λίμνης Κάρλας (Βοιβηϊς), της οποίας όμως το χαμηλότερο τμήμα προς το Βόλο προβλέπεται να επανέλθει στην φυσική του κατάσταση. Στη βόρειο-ανατολική Θεσσαλία εντάσσονται και οι ορεινές, αλλά με αξιόλογη έκταση, καλλιεργούμενες εκτάσεις της Ελασσόνας και του Δαμασιού. Στην περιοχή αυτή διέρχεται ο Τιταρήσιος, ο οποίος έχει σημαντική παροχή που όμως κατά τους καλοκαιρινούς μήνες μπορεί να περιοριστεί εξαιρετικά έως και να μηδενισθεί. Εκτός αυτού, μεγάλο μέρος των υδάτων του Τιταρήσιου τροφοδοτούν τον υπόγειο υδροφόρα. Στις υπόλοιπες περιοχές της Ανατολικής Θεσσαλίας έως και το δυτικό όριο των Χαλκοδονίων ορέων, είναι έντονη η πτώση του υπογείου υδροφόρα. Όλες σχεδόν οι καλλιεργούμενες εκτάσεις αρδεύονται από γεωτρήσεις, στην πλειοψηφία τους ιδιωτικές. Οι μόνες εκτάσεις που αρδεύονται από επιφανειακά νερά βρίσκονται στην περιφέρεια της πεδιάδας κοντά στις ορεινές εκτάσεις και δεν απέχουν παρά μερικές εκατοντάδες μέτρα από την κοίτη του πλησιέστερου ποταμού. Ακόμα, απολήψεις πραγματοποιούνται στις περιοχές απ' όπου περνάει ο ποταμός Πηνειός, οι οποίες διαθέτουν οργανωμένα δίκτυα από τους ΤΟΕΒ της περιοχής. Στην Ανατολική Θεσσαλία, εκτός του

Τιταρήσιου και του Πηνειού, δεν υπάρχουν άλλοι ιδιαίτερα αξιόλογοι ποταμοί. Τέλος πρέπει να αναφερθεί ότι η Ανατολική Θεσσαλία έχει το μεγαλύτερο αστικό κέντρο του γεωγραφικού διαμερίσματος, τη Λάρισα, καθώς και πολλούς άλλους αξιόλογους οικισμούς.

Το δυτικό τμήμα της Θεσσαλικής πεδιάδας ορίζεται γεωγραφικά ως εξής: ανατολικά από τα Χαλκοδόνια όρη, βορειοανατολικά από το Ζάρκο, βόρεια από τα Χάσια και τα Αντιχάσια όρη, δυτικά από το Κερκέτιον όρος (Κόζιακας) και νότια από το Ναθράκιο, τους πρόποδες του όρους Τυμφρηστός και την αποξηρανήσα λίμνη Ξυνιά. Η δυτική Θεσσαλία διαθέτει αρκετούς παραποτάμους του Πηνειού οι οποίοι ακόμα και τους καλοκαιρινούς μήνες έχουν έστω και μικρή παροχή. Στην δυτική Θεσσαλία, νοτιοδυτικά της Καρδίτσας υπάρχει εν λειτουργία ταμιευτήρας, το φράγμα Ταυρωπού, το οποίο υδρολογικά ανήκει στη λεκάνη απορροής του Αχελώου. Η δυτική Θεσσαλία έχει δύο μεγάλα αστικά κέντρα (Τρίκαλα, Καρδίτσα), μερικά μικρότερα αλλά αξιόλογα όπως η Καλαμπάκα, οι Σοφάδες, τα Φάρσαλα και ο Παλαμάς καθώς και πλήθος άλλων μικρών χωριών. Εκτός των δύο μεγάλων πόλεων, ο υπόλοιπος πληθυσμός ασχολείται έμμεσα ή άμεσα με την γεωργία. Όλες σχεδόν οι εκτάσεις αρδεύονται, ενώ κατά τόπους παρατηρούνται οργανωμένα δίκτυα άρδευσης. Προς τα βόρεια της περιοχής, οι καλλιέργειες σταματάνε στο όριο της πεδιάδας με τους πρόποδες των βουνών. Αντιθέτως, στα νότια παρατηρούνται καλλιέργειες ακόμα και στους πρόποδες των βουνών. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι το γεγονός ότι στην κεντρική - ανατολική πλευρά της δυτικής πεδιάδας (από Φυλλήιο μέχρι Χαλκοδόνιο), οι καλλιέργειες φθάνουν σε υψόμετρο, έως και 500 μέτρα, λόγω των εξαιρετικά ομαλών κλίσεων των βουνών. Οι κυριότεροι ποταμοί που διατρέχουν την δυτική πλευρά είναι οι εξής: Ενιπέας, Φαρσαλίτης, Σοφαδίτικος, Καλέτζης, Πλιούρης, Πάμισος, Ληθαίος και Ντολερίτης. Επίσης, στις πηγές του Σοφαδίτικου υπάρχει το φράγμα, του Σμοκόβου, το οποίο πρόσφατα άρχισε την λειτουργία του.

5.1.2. Κλιματολογία

Τα μετεωρολογικά στοιχεία που προσδιορίζουν το κλίμα ενός τόπου είναι η ποσότητα και η κατανομή των βροχοπτώσεων, η διακύμανση της θερμοκρασίας, η ηλιοφάνεια, η υγρασία, η εξάτμιση καθώς και οι άνεμοι. Το υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας διαιρείται, με βάση τον τύπο κλίματος σε τρεις κύριες περιοχές:

- ✓ Την ανατολική παράκτια και ορεινή, με μεσογειακό κλίμα.
- ✓ Την κεντρική πεδινή, με ηπειρωτικό κλίμα
- ✓ Την δυτική ορεινή, με ορεινό κλίμα.

Σε γενικές γραμμές το κλίμα στην πεδιάδα της Θεσσαλίας χαρακτηρίζεται ως εύκρατο με ηπειρωτικές περιόδους και διαφορετικές θερμομετρικές διακυμάνσεις ως προς το εύρος κατά την διάρκεια του έτους. Παρατηρείται ξηρό και θερμό καλοκαίρι και ήπιος και υγρός χειμώνας. Τον Οκτώβριο ξεκινούν συνθήκες ύφεσης οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα αυξημένη υγρασία, βροχόπτωση και παρουσία ομίχλης και διαρκούν μέχρι τον Απρίλιο. Κατά την διάρκεια του καλοκαιριού παρατηρείται απουσία βαροβαθμίδας η οποία έχει ως συνέπεια την εμφάνιση επιπλέον ξηρασίας λόγω της ομοιόμορφης κατανομής της πίεσης η οποία ευθύνεται για τις αυξημένες θερμοκρασίες που απαντώνται στην περιοχή κατά την διάρκεια του καλοκαιριού.

Θερμοκρασία. Η μέση ετήσια θερμοκρασία κυμαίνεται από 16 °C ως 17 °C. Το ετήσιο θερμομετρικό εύρος ξεπερνά τους 22 °C. Οι πιο θερμοί μήνες είναι ο Ιούλιος και ο Αύγουστος και οι πιο ψυχροί ο Ιανουάριος, ο Φεβρουάριος και ο Δεκέμβριος. Οι παγετοί είναι συχνοί και εμφανίζονται κατά την περίοδο Νοεμβρίου - Απριλίου. Οι ημέρες παγετού κυμαίνονται από 35.5 στη Λάρισα και 33.8 στα Τρίκαλα σε μέση ετήσια βάση.

Βροχοπτώσεις. Η βροχή αποτελεί μια από τις σπουδαιότερες μετεωρολογικές παραμέτρους. Η μελέτη της παρουσιάζει όχι μόνο θεωρητικό αλλά και πρακτικό ενδιαφέρον και αυτό που ενδιαφέρει περισσότερο είναι η ποσότητα νερού που πέφτει σε μια επιφάνεια. Σε κάθε περιοχή οι μηνιαίες βροχοπτώσεις παρουσιάζουν την ιδιότητα να μεταβάλλονται σταθερά προς ορισμένες κατευθύνσεις. Αυτό οφείλεται σε διάφορους μετεωρολογικούς παράγοντες όπως: απόσταση από την θάλασσα, επικράτηση ανέμων, κίνηση των υφέσεων και είναι ιδιαίτερα έντονο κατά τους υγρούς μήνες, όταν το ύψος των βροχοπτώσεων είναι μεγάλο. Το ύψος των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων στο διαμέρισμα είναι σχετικά μεγάλο στα δυτικά, στη συνέχεια μειώνεται στο πεδινό τμήμα και αυξάνεται πάλι στο ορεινό ανατολικό τμήμα. Η μέση ετήσια βροχόπτωση σε ολόκληρη την περιοχή της Θεσσαλίας είναι περίπου 700 mm και κατανέμεται ανομοιόμορφα τόσο χωρικά όσο και χρονικά. Η μέση ετήσια βροχόπτωση ποικίλει από περίπου 400 mm στο κεντρικό τμήμα, έως και περισσότερο από 1850 mm στις δυτικές ορεινές περιοχές. Ενδεικτικές τιμές της ετήσιας βροχόπτωσης είναι 468 mm στο σταθμό Λάρισας, 550 mm στο σταθμό Τυρνάβου και 1142 mm στον πιο ορεινό σταθμό του Μουζακίου. Οι πιο βροχεροί μήνες είναι από τον Οκτώβριο ως τον Ιανουάριο, ενώ οι πιο ξηροί ο Ιούλιος και ο Αύγουστος.

Χιονοπτώσεις. Οι ορεινές περιοχές δέχονται σημαντικές ποσότητες χιονιού κατά την διάρκεια του χειμώνα οι οποίες και αποτελούν σημαντικά υδατικά αποθέματα. Οι χιονοπτώσεις είναι συνηθισμένες, ιδιαίτερα στα ορεινά του διαμερίσματος και γίνονται πιο έντονες από τα νότια προς τα βόρεια και από τα ανατολικά προς τα δυτικά. Οι περισσότερες χιονοπτώσεις παρατηρούνται κατά τους μήνες Ιανουάριο και Φεβρουάριο. Στα δυτικά και ορεινά τμήματα του διαμερίσματος αρχίζουν τον Σεπτέμβριο και φτάνουν μέχρι και τις αρχές Ιουλίου. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ο μέσος ετήσιος αριθμός ημερών χιονιού στη Λάρισα είναι 4.0 και στα Τρίκαλα 6.2. Οι χαλαροπτώσεις είναι επίσης συχνές, κυρίως κατά τους μήνες Μάιο και Ιούνιο στα βόρεια του διαμερίσματος και κατά τους μήνες Φεβρουάριο ως Απρίλιο στο νότιο και ανατολικό τμήμα.

Νέφωση – Ηλιοφάνεια. Η νέφωση είναι το ποσοστό της έκτασης του ουρανού που καλύπτεται με νέφη, παρουσιάζει τόσο ημερήσια όσο και ετήσια μεταβλητότητα. Η ημερήσια μεταβολή είναι πολύπλοκη, διαφέρει από τόπο σε τόπο και βρίσκεται σε στενή σχέση με την ηλιοφάνεια. Η μέση ετήσια νέφωση κυμαίνεται από 4 ως 5 βαθμίδες, με τις υψηλότερες τιμές να εμφανίζονται στα δυτικά και τις χαμηλότερες στα ανατολικά.

Υγρασία. Η μέση ετήσια σχετική υγρασία κυμαίνεται από 67% μέχρι 72% και παρουσιάζει μεταβολές τόσο στη διάρκεια του 24ώρου όσο και του έτους.

Ξηρές περίοδοι. Στο νότιο τμήμα του διαμερίσματος εμφανίζεται ξηρή περίοδος 4 ως και 5 μηνών στα ανατολικά, η οποία όμως μειώνεται βαθμιαία σε 2 ως 4 μήνες στα κεντρικά - δυτικά πεδινά και 1 ως 2 μήνες στα δυτικά ορεινά.

Άνεμοι. Η κατανομή της ατμοσφαιρικής πίεσης σε συνδυασμό με το ανάγλυφο και με την κατανομή ξηράς - θάλασσας, αποτελούν βασικό αίτιο της δημιουργίας των ανέμων. Οι άνεμοι μπορεί να οφείλονται σε γενικότερα αίτια κατανομής της πίεσης στο βόρειο ημισφαίριο ή συνδέονται συχνά με <<τύπους καιρού>> του Ελληνικού χώρου. Η συχνότητα της διεύθυνσης των ανέμων σύμφωνα με σταθμούς παρουσιάζει την μεγαλύτερη τιμή στη βόρεια συνιστώσα και ακολουθεί η νότια. Η συχνότητα εμφάνισης των ανέμων εξαρτάται τόσο από την εποχή όσο και τον μήνα ώστε οι άνεμοι να διακρίνονται σε ανατολικούς οι οποίοι επικρατούν την περίοδο άνοιξης – καλοκαιριού, ανατολικοί – βορειοανατολικοί κατά την διάρκεια του φθινοπώρου και τέλος βορειοανατολικοί οι οποίοι πνέουν κατά την διάρκεια του χειμώνα. Ετησίως η συχνότητα των ανέμων χαρακτηρίζεται έντονη κατά τους χειμερινούς μήνες (Δεκέμβριος) και ελαχιστοποιείται μέσα καλοκαιριού (Ιούλιος). Οι ταχύτητες των παραπάνω ανέμων είναι της τάξης των 1-3 Bf με μέγιστη ταχύτητα τα 8 Bf. Η επικρατούσα φορά των ανέμων στο διαμέρισμα ποικίλει, με ανατολικούς στη Λάρισα και δυτικούς στα Τρίκαλα.

5.1.3. Υδρογεωλογικά στοιχεία

Η μορφολογία και η γεωλογική δομή του Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας χωρίζουν την περιοχή σε δύο τύπους: τις ιζηματογενείς λεκάνες από νεογενή και τεταρτογενή υλικά και τους ορεινούς όγκους οι οποίοι τις περικλείουν και που δομούνται από ανθρακικά πετρώματα, οφιόλιθους, σχιστογενείς και φλύσχη. Οι δύο αυτές αυτοτελείς λεκάνες είναι η Ανατολική και η Δυτική πεδιάδα και αποτελούν τους δύο μεγάλους υπόγειους υδροφορείς του ποταμού Πηνειού. Αποτελούν το σημαντικότερο υδατικό σύστημα υπογείων νερών της Θεσσαλίας κι ένα από τα σημαντικότερα της χώρας μας. Η υδραυλική επικοινωνία μεταξύ τους γίνεται κατά κύριο λόγο μέσω της επιφανειακής απορροής του Πηνειού και δευτερευόντως μέσω των καρστικών συστημάτων.

Το υπέδαφός τους αποτελείται κατά κύριο λόγο από αλλουβιακά υλικά. Αυτά κυμαίνονται από χαλίκια μεγάλης διαμέτρου έως πηλώδη ιλύ. Επίσης εμφανίζονται καρστικός ασβεστόλιθος και μάρμαρο, στα όρια των δυο λεκανών με τους ορεινούς όγκους και σε τοπικό επίπεδο κυρίως στην δυτική πεδιάδα. Οι δυο πεδιάδες χωρίζονται από τη λοφώδη περιοχή της Ταουσάνης με υψόμετρο 100 – 200 m. Οι λόφοι αποτελούνται από στρώματα λιμναίων ασβεστόλιθων, μαργών, αργίλων, ψαμμιτών, κροκαλοπαγών και λιγότερο άμμων που έχουν μικρή διαπερατότητα και δυσχεραίνουν την υδραυλική επικοινωνία των δύο πεδιάδων.

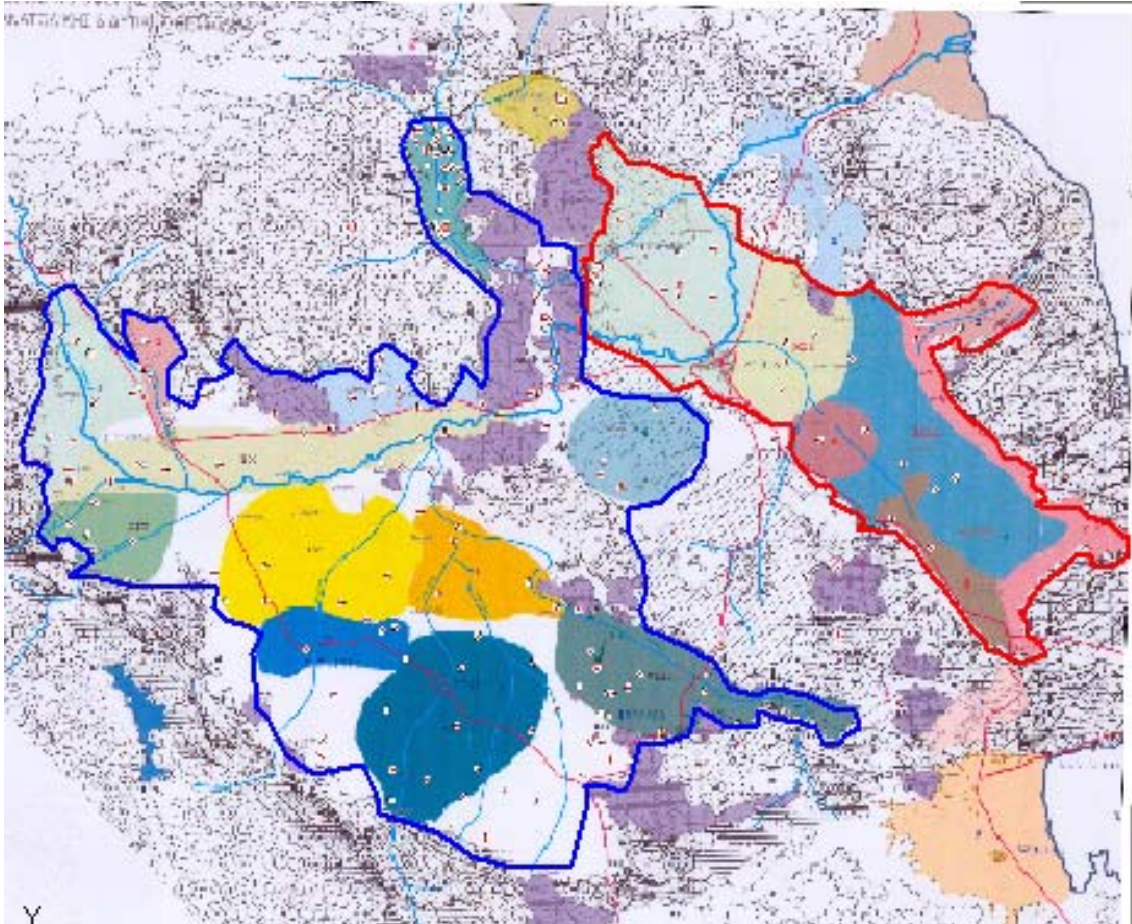
Η πεδιάδα της Θεσσαλίας, και στα δύο της τμήματα, δυτικό και ανατολικό, αποτελεί ένα μεγάλο τεκτονικό βύθισμα που βρίσκεται μεταξύ δύο μεγάλων γεωτεκτονικών μονάδων του Ελληνικού χώρου, της Πίνδου στα Δυτικά – Νοτιοδυτικά και των Πελαγονικών ορεινών όγκων (Όλυπος, Όσσα, Μαυροβούνι, Πήλιο) προς τα βόρεια και ανατολικά. Η στρωματογραφία και η τεκτονική υποδιαίρεση της περιοχής από τα Βορειοανατολικά στα Νοτιοδυτικά έχει ως εξής:

- Η Πελαγονική σειρά αποτελείται από παλιά μεταμορφωμένα πετρώματα (σχιστόλιθος, γνεύσιος, μάρμαρο) που περιβάλλουν κυρίως την Ανατολική Θεσσαλία και το Βορειοανατολικό τμήμα της Δυτικής.
- Η μεσοελληνική ζώνη με τριτογενής αποθέσεις εμφανίζεται μεταξύ της Καλαμπάκας και των Τρικάλων και σποραδικά ανάμεσα στο Νοτιοδυτικό Όριο της Δυτικής Θεσσαλίας.
- Η Υπό – Πελαγονική ζώνη εμφανίζεται μεταξύ των Πελαγονικών Όρων και της Πίνδου με πρασινόλιθο και ασβεστόλιθο στην περιοχή των Φαρσάλων και του Δομοκού.
- Η ζώνη γύρω από την περιοχή της Πίνδου (ζώνη Κόζιακα) περιέχει σχιστόλιθους, ασβεστόλιθους και φλύσχη οριοθετώντας το Δυτικό άκρο της Θεσσαλίας.
- Η ζώνη της Πίνδου αποτελείται από εκτεταμένα πετρώματα φλύσχη.

Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό της Θεσσαλίας, το οποίο καθορίζει την υδρογεωλογία της, είναι ότι αποτελείται από δυο διαφορετικές μορφολογικές ενότητες: Αυτήν που αναπτύσσεται στον άξονα Τρικάλων – Καρδίτσας και αυτή του άξονα Λάρισας – Κάρλας, που δεν είναι άλλες από τους δυο μεγάλους υδροφορείς του Πηνειού και της Θεσσαλίας που αναφέρθηκαν παραπάνω [Μαρίνος και συνεργάτες, 1995]. Τρεις είναι οι κύριοι τύποι υδροφόρων οριζόντων που αναπτύσσονται στις δυο υδρογεωλογικές λεκάνες.

- Οι φρεάτιοι υδροφόροι ορίζοντες (με ελεύθερη πιεζομετρική επιφάνεια).
- Οι υπό πίεση υδροφόροι ορίζοντες.
- Οι καρστικοί υδροφόροι ορίζοντες.

Οι δύο πρώτοι υδροφόροι ορίζοντες αναπτύσσονται με δυναμικότητα που ποικίλει, στους προσχωματικούς τεταρτογενείς σχηματισμούς της πεδιάδας και στις πλειοκαινικές αποθέσεις που εμφανίζονται στην επιφάνεια στα λοφώδη αντερείσματα της Ταουσάνης. Σύμφωνα με τον προηγούμενο διαχωρισμό, η συνολική υδροφορία της Θεσσαλίας μπορεί να επιμερισθεί σε 2 μεγάλες ζώνες, που μπορούν να προσομοιωθούν με 2 μεγάλους, και ενιαίους υδροφορείς: τον δυτικό και τον ανατολικό (Σχήμα 5.2).



Σχήμα 5.2. Ο δυτικός (μπλε) και ανατολικός (κόκκινο) υδροφορέας του Πηνειού ποταμού.

5.1.4. Αναπτυξιακή πορεία

Στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας, όπως έχει ήδη προαναφερθεί, υπάρχει η μεγαλύτερη πεδινή έκταση της χώρας, που όμως παρουσιάζει ανεπάρκεια στους υδατικούς της πόρους. Σε αυτό βρίσκεται το ιστορικό βιομηχανικό κέντρο του Βόλου, με ειδικευση στη μεταλλουργική βιομηχανία και η βιομηχανική περιοχή Βόλου, από τις μεγαλύτερες και παλαιότερες στη χώρα. Οι περιοχές αυτές αποτελούν ένα σημαντικό αστικό δίπολο που προσφέρει ανωτέρου βαθμού υπηρεσίες και διεθνούς επιπέδου τεχνική υποδομή (οδικός και σιδηροδρομικός άξονας, λιμάνι). Εκτός των παραπάνω, η περιοχή διαθέτει σημαντικά ιστορικά μνημεία όλων των εποχών, σημαντικά τοπία και αξιόλογες ακτές.

Από πλευράς ρύπανσης και αλλοιώσεων των στοιχείων της φυσικής και πολιτιστικής κληρονομιάς, το μεγαλύτερο πρόβλημα είναι η ρύπανση του Πηνειού και του Παγασητικού Κόλπου, ενώ αισθητικά οι οικολογικές αλλοιώσεις στα τουριστικώς ανεπτυγμένα σημεία της περιοχής δεν καταστεί ακόμη κρίσιμες. Κρίσιμο ήταν πάντα και γίνεται όλο και πιο επιτακτικό το πρόβλημα έλλειψης νερού στο υδατικό διαμέρισμα.

Πέρα από τα δύο μεγάλα αστικά κέντρα της Λάρισας και του Βόλου, που αποτελούν μία σημαντική αγορά 300.000 κατοίκων σημαντικής εισοδηματικής στάθμης, η Θεσσαλία διαθέτει και μικρότερα δυναμικά αστικά Κέντρα όπως τα Τρίκαλα, η Καρδίτσα, ο Τύρναβος καθώς και 32 ημιαστικά, άμεσα συνδεδεμένα με τις εξελίξεις στον αγροτικό χώρο. Η κατανομή της απασχόλησης και του ΑΕΠ στον πρωτογενή, δευτερογενή και τριτογενή τομέα είναι 32.4%, 7.6%, 50.0% και 33.5%, 26.1%, 40.3% αντίστοιχα. Λόγω της κεντρικής του θέσης, το διαμέρισμα συνδέεται άμεσα εκτός από την κεντρική και τη δυτική Μακεδονία και με την Ήπειρο και μέσω αυτών με τις όμορες Βαλκανικές χώρες. Οι συνδέσεις αυτές με την συνεχή βελτίωση στην υποδομή των μεταφορών, θα αυξήσουν την αναπτυξιακή εικόνα του διαμερίσματος.

Το συσσωρευμένο δυναμικό στο διαμέρισμα και οι σημαντικές δυνατότητες για παραπέρα αξιοποίηση και εκσυγχρονισμό, συγκεντρώνουν σχετικά υψηλό ποσοστό επενδύσεων παγίων κεφαλαίων, δημοσίων αλλά και ιδιωτικών, παρά το γεγονός ότι η Θεσσαλία δεν βρίσκεται στη ζώνη των ισχυρών αναπτυξιακών κινήτρων. Η Θεσσαλία, παρά τις σημαντικές δυνατότητές της, δεν έχει αναπτυχθεί στο επιθυμητό και εφικτό επίπεδο μέσα στον ελληνικό χώρο και μεταξύ των ευρωπαϊκών περιφερειών. Το κατά κεφαλήν ΑΕΠ είναι χαμηλότερο από το μέσο της χώρας και οπωσδήποτε από τα χαμηλότερα της ευρωπαϊκής ένωσης ενώ συν τοις άλλοις οι δείκτες ευημερίας δεν είναι πολύ υψηλοί. Ο τουρισμός, με εξαίρεση την περιοχή του Πηλίου, δεν είναι ανεπτυγμένος και η γεωργική και κτηνοτροφική παραγωγή δεν έχουν πλήρως προσαρμοστεί στις σύγχρονες δυνατότητες. Η σχετικά περιορισμένη διάθεση των κατοίκων για ανάληψη δυναμικών πρωτοβουλιών προς την κατεύθυνση της προώθησης αλλαγών και η μονίμως δευτερεύουσα θέση ή θέση δορυφόρου σε σχέση με την πρωτεύουσα προς το νότο και τη Θεσσαλονίκη προς βορρά ίσως, εξηγούν την υστέρηση αυτή.

Οι προοπτικές είναι ευνοϊκές για την ανάπτυξη του πρωτογενούς τομέα, αλλά και των λοιπών τομέων, λόγω της ύπαρξης πόρων και της προβλεπόμενης αντιμετώπισης σχετικών αναγκών (νερό, βελτίωση προσπελασιμότητας ακτών και ορεινών περιοχών), του ικανοποιητικής στάθμης διαθέσιμου, ανθρώπινου δυναμικού, καθώς και των αστικών εξυπηρετήσεων. Η ύπαρξη πανεπιστημίου και ερευνητικής - τεχνολογικής υποδομής, θα συντελέσει στην παραπάνω ευνοϊκά διαμορφούμενη προοπτική. Οι άξονες ανάπτυξης για την περιοχή είναι η προώθηση της εντατικής, αρδευόμενης γεωργίας (στροφή προς την καλλιέργεια προϊόντων για την οποία προβλέπεται αυξημένη ζήτηση, αξιοποίηση των προϊόντων με την επιτόπου μεταποίηση και εφαρμογή σύγχρονων μεθόδων έρευνας αγοράς) και του τουρισμού. Στρατηγικοί στόχοι είναι η βελτίωση του οδικού δικτύου, η προστασία του περιβάλλοντος και η βελτίωση του ανθρώπινου δυναμικού [ΥΒΕΤ, 1996].

5.2. Υδατικοί πόροι

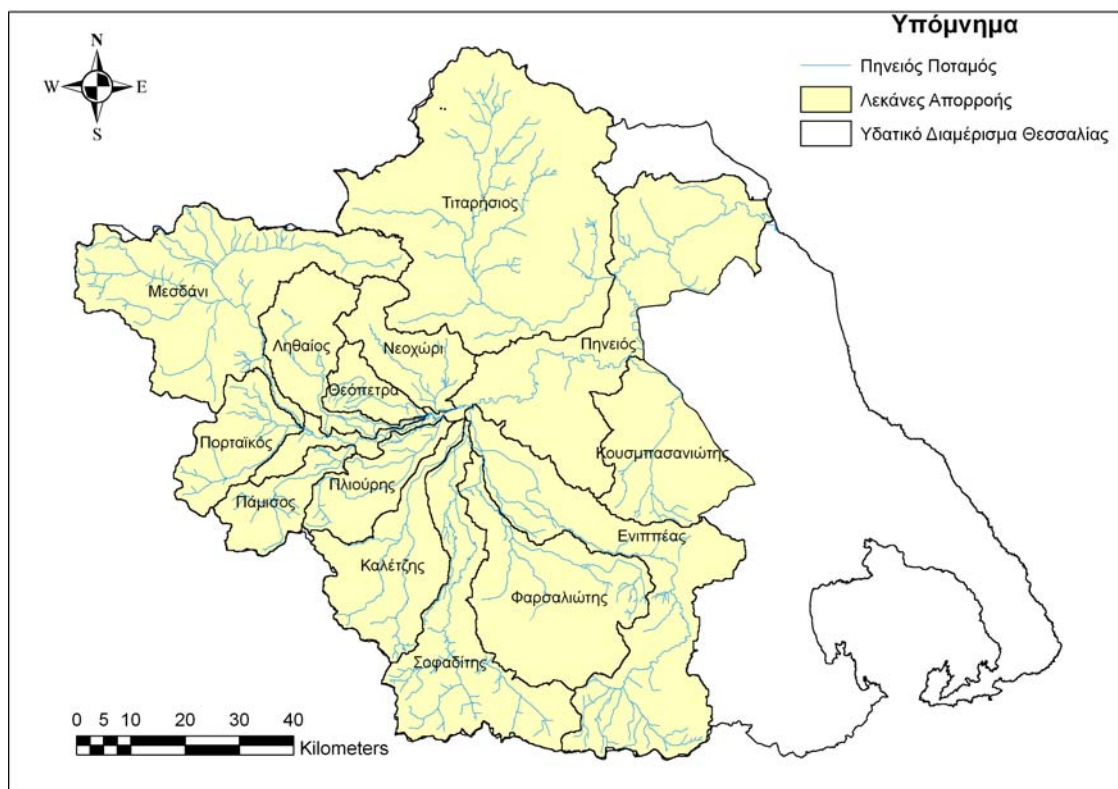
Οι υδατικοί πόροι του Υδατικού Διαμερίσματος της Θεσσαλίας αποτελούνται από επιφανειακά καθώς και από υπόγεια νερά. Δεδομένου ότι υπάρχουν λιγοστά σημαντικά έργα ταμίευσης (με εξαίρεση τον ταμιευτήρα Πλαστήρα, τον ταμιευτήρα Σμοκόβου και τον υποκατασκευή ταμιευτήρα της Κάρλας), το επιφανειακό δυναμικό αναφέρεται στην παροχή των υδατορευμάτων, η οποία παρουσιάζει έντονη χωρική και χρονική διακύμανση. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό είναι ότι τα επιφανειακά νερά οριοθετούνται από το ποτάμιο υδροσύστημα και τις αντίστοιχες υδρολογικές λεκάνες, ενώ τα υπόγεια από τα αντίστοιχα υδρογεωλογικά όρια, τα οποία όμως δεν ταυτίζονται με αυτά των επιφανειακών.

5.2.1. Επιφανειακοί υδατικοί πόροι

Τα επιφανειακά νερά, απαντώνται σε δύο μορφές: η μία είναι τα ποτάμια ύδατα δηλαδή του Πηνειού και των κυρίων παραποτάμων του και η δεύτερη των ταμιευτήρων του Πλαστήρα και του Σμοκόβου, ωφέλιμη χωρητικότητας 300 hm³ και 130 hm³, αντίστοιχα. Το τελευταίο διάστημα μικρές λιμνοδεξαμενές κατασκευάζονται σε διάφορα σημεία, σε κοντινή κυρίως απόσταση από τον ποταμό

Πηνειό, προκειμένου να καλύψουν πρόσκαιρες ανάγκες των καλλιεργειών σε νερό και να συμβάλουν στο περιορισμό των απωλειών του στις την θάλασσα.

Η κύρια υδρολογική λεκάνη στις περιοχές είναι αυτή του Πηνειού, με έκταση περίπου 9500 km². Οι κυριότεροι παραπόταμοι του Πηνειού είναι μέσου υδατικού δυναμικού, με παροχές εξαιρετικά μειωμένες κατά την καλοκαιρινή περίοδο. Στα νότια, παρατηρούνται αρκετοί παραπόταμοι με κυριότερους στις Ενιπέα, Φαρσαλιώτη, Σοφαδίτικο και Καλέντζη. Οι ποταμοί αυτοί, συμβάλλουν στον Πηνειό κοντά στην περιοχή του χωριού Κεραμίδι και αποτελούν πολύ σημαντικό κλάδο του Πηνειού. Οι πηγές των ποταμών αυτών βρίσκονται στις νότιες ορεινές περιοχές στις οποίες υπάρχει μόνο ο ταμιευτήρας του Σμοκόβου στις πηγές του Σοφαδίτικου. Το φράγμα Ταυρωπού, είναι το άλλο εν λειτουργία φράγμα στη δυτική περιοχή, αλλά η λεκάνη απορροής του υπάγεται στο υδατικό σύστημα του Αχελώου, παρ' ότι τα διοικητικά όρια του νομού Καρδίτσας το εμπεριέχουν. Κατά συνέπεια, τα εκτρεπόμενα νερά της λίμνης αυτής μπορούν να θεωρηθούν ως πρόσθετη ποσότητα. Εκτός αυτού, στη νότια περιοχή, υπάρχει η αποξηραθείσα λίμνη Ξυνιάδα, η οποία μέσω του ποταμού Κουμαρόρρεμα στραγγίζει τα ύδατά της στον Σοφαδίτικο ποταμό. Ακόμα, έχει προταθεί η κατασκευή φράγματος στη θέση Παλαιοδερλί του Ενιπέα. Δυτικά, οι κυριότεροι ποταμοί είναι ο Πάμισος, ο Παλιούρης και ο Ληθαίος, οι οποίοι συμβάλλουν σε διάφορα σημεία με τον Πηνειό. Οι ταμιευτήρες που έχουν προταθεί για την περιοχή βρίσκονται στις θέσεις Πύλη του Πορταϊκού, Μουζάκι του Παμίσου, Κρύα Βρύση του Πηνειού (βορειοδυτικά) και Θεόπετρα του Ληθαίου. Στην βόρεια και κεντρική περιοχή υπάρχει ο ποταμός Νεοχωρίτης, στον οποίο στις έχει προταθεί η κατασκευή φράγματος. Στην Ανατολική περιοχή, στις βορρά, αναπτύσσεται ο Τιταρήσιος που συμβάλλει με τον Πηνειό στην περιοχή Ροδιά. Ο Τιταρήσιος αποτελεί έναν πολύ σημαντικό υδατικό πόρο για την περιοχή και μάλιστα έχουν προταθεί δύο ταμιευτήρες κοντά στις πηγές του ποταμού, στις θέσεις Καλούδα και Παλαιομονάστηρο. Το Σχήμα 5.3 παρουσιάζει τις κυριότερες υπολεκάνες της λεκάνης απορροής του Πηνειού ποταμού με βάση τους κύριους κλάδους του υδατορρεύματος.



Σχήμα 5.3. Κύριες υπολεκάνες του Πηνειού ποταμού.

5.2.2. Υπόγειοι υδατικοί πόροι

Στο Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας αναπτύσσονται σημαντικοί προσχωματικοί υδροφορείς, αλλά και μεγάλες καρστικές υδρογεωλογικές ενότητες. Όσον αφορά στην πρώτη κατηγορία υδροφορέων, η πεδιάδα της Θεσσαλίας διαχωρίζεται σε δύο κύριες υδρογεωλογικές λεκάνες, της δυτικής και ανατολικής Θεσσαλίας (Σχήμα 5.2). Οι δύο λεκάνες διαχωρίζονται με λοφώδη περιοχή νεογενών αποθέσεων (Ταουσάνη), που θεωρείται ξεχωριστή υδρογεωλογική ενότητα. Από τις υδρογεωλογικές ενότητες της Θεσσαλίας, οι ποσότητες που μπορούν να αντληθούν έχουν υπολογιστεί σε 450 εκατομμύρια κυβικά ετησίως. Από αυτά, τα 390 εκατομμύρια κυβικά θεωρούνται ότι ανήκουν στο πρακτικά εκμεταλλεύσιμο υπόγειο δυναμικό. Η μείωση αυτή οφείλεται στον συνυπολογισμό και άλλων παραγόντων όπως συνεκτίμηση του κόστους άντλησης, προστασίας υπογείων υδροφορέων από υφαλμύρυνση, προστασία περιοχών προοριζόμενων για υδρεύσεις και αντικατάσταση υπογείων υδάτων από επιφανειακά [Μαρίνος και συνεργάτες, 1995].

5.2.3. Ποιοτικά χαρακτηριστικά επιφανειακών και υπόγειων υδάτων

Σε ότι αφορά στα ποιοτικά χαρακτηριστικά των επιφανειακών νερών της Θεσσαλίας, δεδομένα υπάρχουν μόνο για την περίοδο 1989 - 92 για τον Πηνειό (θέση υδατόπυργου Λάρισας) και τη λίμνη Πλαστήρα. Τα νερά του ποταμού Πηνειού είναι γενικώς κατάλληλα για τις χρήσεις για τις οποίες λαμβάνονται. Ωστόσο, κατά τις θερινές περιόδους του 1990, παρατηρήθηκαν τιμές νιτρικού αζώτου πάνω από τα επιτρεπόμενα για πόσιμο νερό όρια. Αυτό οφείλεται από την απορροή από τις εκτεταμένες καλλιεργούμενες εκτάσεις της λεκάνης του ποταμού. Τόσο ο Πηνειός όσο και οι παραπόταμοί του αποτελούν τον αποδέκτη των αστικών λυμάτων αξιόλογων οικιστικών περιοχών. Παρά το γεγονός αυτό, τα ποιοτικά χαρακτηριστικά που σχετίζονται με τη ρύπανση από λύματα (αμμωνιακό άζωτο, κολοβακτηρίδια) είναι ικανοποιητικά. Αυτό, κατά πάσα πιθανότητα, οφείλεται στην επιτυχημένη λειτουργία των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων των κυριότερων αστικών κέντρων της περιοχής (Λάρισα, Τρίκαλα, Καρδίτσα). Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των νερών της λίμνης Πλαστήρα είναι πολύ ικανοποιητικά ως προς τις συγκεντρώσεις αζώτου. Εμφανίζονται σχετικά αυξημένες συγκεντρώσεις φωσφόρου, βάσει των οποίων η λίμνη κατατάσσεται στην κατηγορία των μέσω - ευτροφικών λιμνών. Περισσότερα στοιχεία για την ποιοτική αποτίμηση των επιφανειακών υδατικών πόρων μπορούν να βρεθούν σε μία πρόσφατη μελέτη [Loukas, 2010].

Όσον αφορά στην ποιότητα των υπόγειων νερών, από στοιχεία του ΙΓΜΕ συνάγεται ότι η ολική σκληρότητα και τα ολικά διαλυτά στερεά στη δυτική Θεσσαλία κυμαίνονται μεταξύ 50-450 ppm (ως CaCO_3) και 150-500 ppm αντίστοιχα. Οι συγκεντρώσεις χλωριόντων και θεικών δεν ξεπερνούν τα 55 και 15 ppm αντίστοιχα. Έχουν γίνει μετρήσεις ποιότητας σε 19 θέσεις για μικρή χρονική περίοδο (6-12/9/1993) και αναλύσεις NO_3 , NO_2 και NH_4 . Οι θέσεις δειγματοληψίας καλύπτουν υδροφορείς που αναπτύσσονται σε προσχώσεις, καθώς σε αυτούς συγκεντρώνεται τα μεγαλύτερο ποσοστό των γεωργικών και κτηνοτροφικών δραστηριοτήτων, όπως επίσης οι περισσότερες βιομηχανικές μονάδες. Όλα τα σημεία ελέγχου βρίσκονται σε περιοχές όπου υφίσταται έντονη γεωργική δραστηριότητα. Από τα 19 σημεία ελέγχου, τα 7 εμφάνιζαν ιδιαίτερα αυξημένες συγκεντρώσεις αζωτούχων ενώσεων, που είναι ανώτερες από τα μέγιστα επιτρεπόμενα όρια για ύδρευση. Αυξημένες συγκεντρώσεις NO_3 , παρουσιάστηκαν σε μία μόνο θέση, ενώ στις υπόλοιπες θέσεις δειγματοληψίας μετρήθηκαν υψηλές τιμές NO_2 , ή και αμμωνίας, γεγονός που αποτελεί ένδειξη αρχικού σταδίου ρύπανσης. Οι αυξημένες συγκεντρώσεις που παρατηρήθηκαν σε δύο θέσεις (περιοχή Μεγάλων Καλυβιών Τρικάλων και Δένδρων στη λεκάνη Τιταρήσιου) αποδίδονται κυρίως στις εντατικές καλλιέργειες και στα επιβαρημένα από κτηνοτροφικά και βιομηχανικά απόβλητα επιφανειακά νερά. Στις περιοχές Ματαράγκας και Αχιλλείου παρατηρήθηκε αυξημένη συγκέντρωση αμμωνίας, που αποδίδεται στην παρουσία πλήθους κτηνοτροφικών μονάδων. Στην περιοχή Πετροπόρου μετρήθηκε ιδιαίτερα υψηλή συγκέντρωση νιτρικών (5,52 ppm), που αποδίδεται στην παρουσία του σκουπιδότοπου των Τρικάλων. Στην πεδινή

περιοχή Πλατύκαμπου Λαρίσης διαπιστώθηκε αυξημένη συγκέντρωση νιτρικών και αμμωνίας, γεγονός που αποδίδεται σε κτηνοτροφικές μονάδες και στην παρουσία της ΒΙΠΕ Λαρίσης. Το μόνο σημείο που παρουσιάζει ιδιαίτερα υψηλή συγκέντρωση νιτρικών είναι στο Αργυροπούλειο Λαρίσης, όπου υπάρχουν εντατικές καλλιέργειες καπνού, αμπελιών και κηπευτικών, αλλά και κτηνοτροφικές μονάδες. Οι συγκεντρώσεις στα υπόλοιπα σημεία είναι χαμηλές. Οι μικρές συγκεντρώσεις αζωτούχων ενώσεων που παρατηρούνται, παρά την παρουσία εντατικών καλλιεργειών και πλήθους σημειακών ρυπαντών, αποδίδονται στους μεγάλης δυναμικότητας υδροφορείς. Στην προστασία των υπόγειων υδάτων συντελεί επίσης η παρουσία αργιλικών πετρωμάτων στις προσχώσεις, που απορροφούν τμήμα του ρυπαντικού φορτίου [ΥΒΕΤ, 1996].

5.2.4. Υδατικές ανάγκες

Στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας οι κυριότερες υδατικές ανάγκες αναφέρονται στη γεωργία, η οποία συμμετέχει στην κατανάλωση σε ποσοστό 96%, την κτηνοτροφία και την ύδρευση. Σε ετήσια βάση οι υδατικές ανάγκες της Θεσσαλίας εκτιμώνται σε 1836 hm³, ποσότητα που αναλύεται σε 1600 hm³ για άρδευση, 136 hm³ για ύδρευση και 100 hm³ για περιβαλλοντική διατήρηση [ΕΥΔΕ Αχελώου και ΕΝΥΕΟ, 1995]. Σύμφωνα με τα στοιχεία της ΕΣΥΕ [1995], η συνολική αρδευόμενη έκταση εκτιμάται σε 2.360.917 στρέμματα ενώ για το έτος 1991 σε 1.935.291 στρέμματα. Εκτός αυτών των εκτιμήσεων το ΥΠΕΧΩΔΕ και το ΥΠΓΕ έχουν δώσει 1.894.000 και 1.640.275 στρέμματα αντίστοιχα. Οι αρδευτικές ανάγκες έχουν υπολογιστεί σε 1.463,2 hm³ κατ' έτος με βάση το σύνολο των δυνάμενων να αρδευτούν εκτάσεων [ΥΒΕΤ, 1996]. Η κτηνοτροφία αποτελεί τον μικρότερο καταναλωτή νερών, αλλά σημαντικά μεγαλύτερο από άλλες μικρότερες χρήσεις και με συγκρίσιμο μέγεθος ως προς τις απαιτήσεις της ύδρευσης. Οι υδατικές απαιτήσεις της κτηνοτροφίας ακολουθούν την ίδια ετήσια κατανομή με αυτή της ύδρευσης. Η εκτίμηση της ετήσιας ποσότητας νερού για υδρευτικές ανάγκες γίνεται με βάση στοιχεία της ΕΣΥΕ [1995] για το μόνιμο πληθυσμό των νομών του υδατικού διαμερίσματος και τις αντίστοιχες διανυκτερεύσεις τουριστών (3.250.000 κατά την εκτίμηση του ΚΕΠΕ) υπολογίστηκε σε 53,7 hm³ ανά έτος για όλο το Υδατικό Διαμέρισμα.

5.2.5. Συνοπτική αναφορά των προβλημάτων

Το μεγαλύτερο πρόβλημα είναι η κάλυψη της αρδευτικής ζήτησης κατά τους μήνες Ιούνιο, Ιούλιο και Αύγουστο, κατά τους οποίους οι ανάγκες των καλλιεργειών είναι υψηλές και οι διατιθέμενες ποσότητες μειωμένες. Η Θεσσαλία έχει βιώσει τα τελευταία χρόνια, δριμεία, ακραία και παρατεταμένης διάρκειας φαινόμενα ξηρασίας, ιδιαίτερα από τα μέσα έως τα τέλη της δεκαετίας του 1970 και την περίοδο των ετών 1986 έως και 1992. Η μείωση των βροχοπτώσεων τα έτη 1980-1990 της τάξης του 30% σε σχέση με την περίοδο 1958-1973 ενώ κατά τη περίοδο 1989-1990 ήταν της τάξης του 50% [Loukas and Vasiliades, 2004]. Τα έντονα φαινόμενα ξηρασίας συνέβαλαν στην μείωση των αρδευόμενων καλλιεργούμενων εκτάσεων, με άμεσο επακόλουθο την μείωση των αποδόσεων των καλλιεργειών και την εξάντληση των υπόγειων και επιφανειακών υδάτινων αποθεμάτων. Για παράδειγμα, κατά την διάρκεια του υδρολογικού έτους 1989-1990, η παροχή νερού για άρδευση από τη λίμνη Πλαστήρα, ελαττώθηκε κατά 70% και η αρδευόμενη με επιφανειακό νερό περιοχή μειώθηκε κατά 90%. Επίσης η διάνοιξη γεωτρήσεων στο καρστικό σύστημα καθώς και η ανεξέλεγκτη λήψη ύδατος κατά τους καλοκαιρινούς μήνες κυρίως από ιδιωτικά αντλητικά συγκροτήματα τα οποία εκτείνονται σε μεγάλο μήκος, επηρέασε αρνητικά τα υδάτινα αποθέματα του συστήματος. Ακόμα, οι απαιτούμενες ποσότητες για άρδευση στον ελλαδικό χώρο έχουν αυξηθεί σημαντικά σε σχέση με παλαιότερες δεκαετίες. Περισσότερες πληροφορίες για τα υδατικά προβλήματα και στρατηγικές διαχείρισης υδατικών πόρων μπορούν να βρεθούν στη μελέτη των Loukas et al., [2007a].

5.3. Βάσεις Δεδομένων

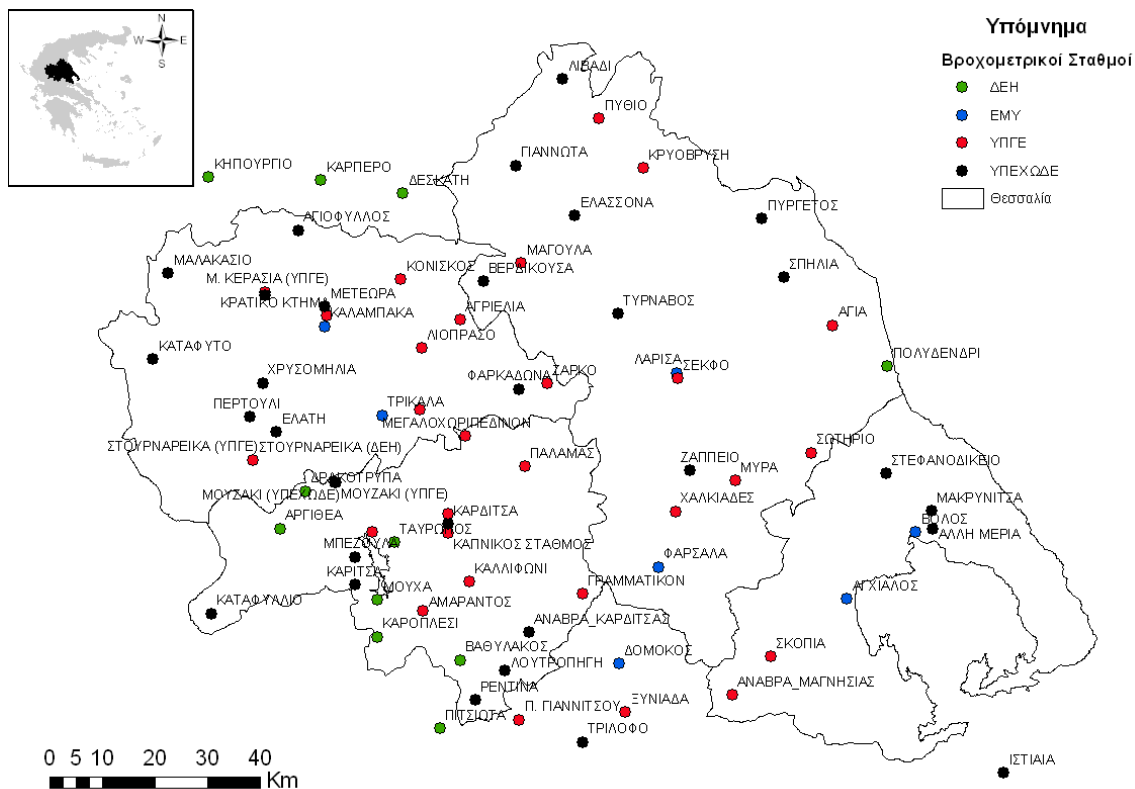
Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιήθηκαν μηνιαία επεξεργασμένα δεδομένα βροχόπτωσης και θερμοκρασίας, για την περίοδο Οκτ. 1960-Σεπ. 2002, από βροχομετρικούς και μετεωρολογικούς σταθμούς της Θεσσαλίας που δημιουργήθηκαν στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος με τίτλο «Οργάνωση της Παρακολούθησης σε Βάση Δεδομένων των Μετρήσεων Επιφανειακών και Υπόγειων Υδάτων και της Αξιολόγησης των Εγγειοβελτιωτικών Έργων της Θεσσαλίας», το οποίο ανατέθηκε και χρηματοδοτήθηκε από το Περιφερειακό Ταμείο Ανάπτυξης της Περιφέρειας Θεσσαλίας με την αριθμ. Α.Π./1559 ΠΤΑ/28-5-2003 απόφαση του Δ.Σ. του Π.Τ.Α. στην «ΜΑΚΕΔΟΝΙΚΗ ΕΤΑΙΡΙΑ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΜΕΛΕΤΩΝ Ε.Ε., Π. ΚΑΡΑΜΟΣΧΟΣ & ΣΥΝΕΡΓΑΤΕΣ Ε.Ε.».

5.3.1. Σταθμοί μέτρησης βροχόπτωσης

Από το ερευνητικό έργο, τελικά αρχειοθετήθηκαν τα επεξεργασμένα δεδομένα μηνιαίας βροχόπτωσης από εβδομήντα οκτώ (78) σταθμούς, για 42 υδρολογικά έτη της περιόδου Οκτ. 1960 – Σεπ. 2002. Οι σταθμοί που χρησιμοποιήθηκαν δεν βρίσκονται μόνο στους τέσσερις νομούς της Θεσσαλίας αλλά και στους γειτονικούς νομούς ώστε το σύνολο των σταθμών να καλύπτουν χωρικά την περιοχή της Θεσσαλίας. Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται οι σταθμοί βροχόπτωσης με τις κυριότερες γενικές πληροφορίες τους και στο Σχήμα 5.4 παρουσιάζεται η χωρική τους κατανομή.

Πίνακας 5.1. Σταθμοί μέτρησης βροχόπτωσης στη ευρύτερη περιοχή μελέτης.

Id	Όνομα σταθμού	Υπηρεσία	Νομός	Υψόμετρο (m)	Id	Όνομα σταθμού	Υπηρεσία	Νομός	Υψόμετρο (m)
1	Αγιά	ΥΠΓΕ	Λάρισας	180	40	Λουτροπηγή	ΥΠΕΧΩΔΕ	Καρδίτσας	730
2	Αγιόφυλλο	ΥΠΕΧΩΔΕ	Τρικάλων	581	41	Μαγούλα	ΥΠΓΕ	Λάρισας	180
3	Αγριελιά	ΥΠΓΕ	Τρικάλων	700	42	Μακρυνίτσα	ΥΠΕΧΩΔΕ	Μαγνησίας	690
4	Αγχιάλος	ΕΜΥ	Μαγνησίας	15	43	Μαλακάσιο	ΥΠΕΧΩΔΕ	Τρικάλων	842
5	Άλλη Μεριά	ΥΠΕΧΩΔΕ	Μαγνησίας	120	44	Μεγάλη Κερασιά	ΥΠΓΕ	Τρικάλων	560
6	Αμάραντος	ΥΠΓΕ	Καρδίτσας	800	45	Μεγάλη Κερασιά	ΥΠΕΧΩΔΕ	Τρικάλων	500
7	Ανάβρα	ΥΠΕΧΩΔΕ	Καρδίτσας	208	46	Μεγαλοχώρι	ΥΠΓΕ	Τρικάλων	100
8	Ανάβρα	ΥΠΓΕ	Μαγνησίας	700	47	Μετέωρα	ΥΠΕΧΩΔΕ	Τρικάλων	596
9	Αργιθέα	ΔΕΗ	Καρδίτσας	980	48	Μορφοβούνι	ΥΠΓΕ	Καρδίτσας	780
10	Βαθύλακος	ΔΕΗ	Καρδίτσας	800	49	Μουζάκι	ΥΠΓΕ	Καρδίτσας	226
11	Βερδικούσα	ΥΠΕΧΩΔΕ	Λάρισας	863	50	Μουζάκι	ΥΠΕΧΩΔΕ	Καρδίτσας	226
12	Βόλος	ΕΜΥ	Μαγνησίας	3	51	Μούχα	ΔΕΗ	Καρδίτσας	870
13	Γιαννωτά	ΥΠΕΧΩΔΕ	Λάρισας	578	52	Μπεζούλα	ΥΠΕΧΩΔΕ	Καρδίτσας	901
14	Γραμματικόν	ΥΠΓΕ	Καρδίτσας	95	53	Μύρα	ΥΠΓΕ	Λάρισας	320
15	Δεσκάτη	ΔΕΗ	Γρεβενών	830	54	Ξυνιάδα	ΥΠΓΕ	Φθιώτιδος	456
16	Δομοκός	ΕΜΥ	Φθιώτιδος	615	55	Π. Γιαννιτσού	ΥΠΓΕ	Φθιώτιδος	960
17	Δρακότρυπα	ΔΕΗ	Καρδίτσας	680	56	Παλαμάς	ΥΠΓΕ	Καρδίτσας	95
18	Ελασσόνα	ΥΠΕΧΩΔΕ	Λάρισας	314	57	Πεδινό	ΥΠΓΕ	Καρδίτσας	95
19	Ελάτη	ΥΠΕΧΩΔΕ	Τρικάλων	900	58	Περτούλι	ΥΠΕΧΩΔΕ	Τρικάλων	1160
20	Ζάππειο	ΥΠΕΧΩΔΕ	Λάρισας	170	59	Πιτσιωτά	ΔΕΗ	Φθιώτιδος	800
21	Ζάρκο	ΥΠΓΕ	Τρικάλων	120	60	Πολυδένδρι	ΔΕΗ	Λάρισας	100
22	Ισταιά	ΥΠΕΧΩΔΕ	Ευβοίας	45	61	Πύθιο	ΥΠΓΕ	Λάρισας	750
23	Καλαμπάκα	ΕΜΥ	Τρικάλων	222	62	Πυργετός	ΥΠΕΧΩΔΕ	Λάρισας	31
24	Καλλιφώνι	ΥΠΓΕ	Καρδίτσας	100	63	Ρεντίνα	ΥΠΕΧΩΔΕ	Καρδίτσας	903
25	Καπνικός Σταθμός	ΥΠΓΕ	Καρδίτσας	110	64	Σέκφο	ΥΠΓΕ	Λάρισας	80
26	Καρδίτσα	ΥΠΕΧΩΔΕ	Καρδίτσας	138	65	Σκοπιά	ΥΠΓΕ	Λάρισας	580
27	Καρδίτσομαγούλα	ΥΠΓΕ	Καρδίτσας	95	66	Σπηλιά	ΥΠΕΧΩΔΕ	Λάρισας	813
28	Καρίτσα	ΥΠΕΧΩΔΕ	Καρδίτσας	900	67	Στεφανοβίκειο	ΥΠΕΧΩΔΕ	Μαγνησίας	80
29	Καροπλέσι	ΔΕΗ	Ευρυτανίας	910	68	Στουρναρέικα	ΔΕΗ	Τρικάλων	860
30	Καρπερό	ΔΕΗ	Γρεβενών	510	69	Στουρναρέικα	ΥΠΓΕ	Τρικάλων	860
31	Καταφυλλίο	ΥΠΕΧΩΔΕ	Καρδίτσας	698	70	Σωτήριο	ΥΠΓΕ	Λάρισας	51
32	Κατάφυτο	ΥΠΕΧΩΔΕ	Τρικάλων	980	71	Ταυρωπός	ΔΕΗ	Καρδίτσας	220
33	Κηπουργιό	ΔΕΗ	Γρεβενών	868	72	Τρικάλα	ΕΜΥ	Τρικάλων	149
34	Κονιάκος Κρατικό Κτήμα	ΥΠΓΕ	Τρικάλων	860	73	Τρίλοφο	ΥΠΕΧΩΔΕ	Φθιώτιδος	580
35	Καλαμπάκας	ΥΠΓΕ	Τρικάλων	532	74	Τύρναβος	ΥΠΕΧΩΔΕ	Λάρισας	92
36	Κρυόβρυση	ΥΠΓΕ	Λάρισας	1030	75	Φαρκαδώνα	ΥΠΕΧΩΔΕ	Τρικάλων	87
37	Λάρισα	ΕΜΥ	Λάρισας	73	76	Φάρσαλα	ΕΜΥ	Λάρισας	148
38	Λιβάδι	ΥΠΕΧΩΔΕ	Λάρισας	1183	77	Χαλκιάδες	ΥΠΓΕ	Λάρισας	250
39	Λιόπρασο	ΥΠΓΕ	Τρικάλων	740	78	Χρυσομηλιά	ΥΠΕΧΩΔΕ	Τρικάλων	940



Σχήμα 5.4. Σταθμοί μέτρησης βροχόπτωσης

5.3.2. Σταθμοί μέτρησης θερμοκρασίας

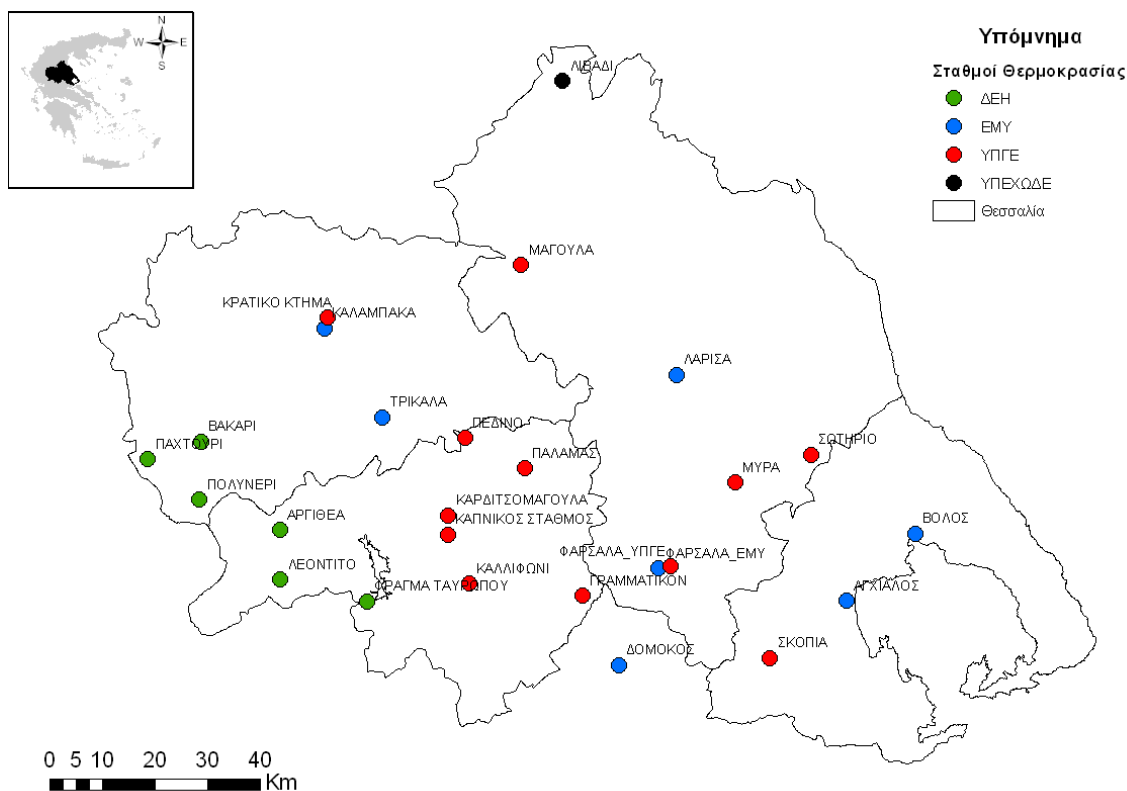
Από το παραπάνω ερευνητικό έργο, τελικά αρχειοθετήθηκαν τα επεξεργασμένα δεδομένα μηνιαίας θερμοκρασίας από 26 σταθμούς, για 42 υδρολογικά έτη της περιόδου Οκτ. 1960 – Σεπ. 2002. Οι σταθμοί που χρησιμοποιήθηκαν δεν βρίσκονται μόνο στους τέσσερις νομούς της Θεσσαλίας αλλά και στους γειτονικούς νομούς ώστε το σύνολο των σταθμών να καλύπτουν χωρικά την περιοχή της Θεσσαλίας. Ο Πίνακας 5.2 παρουσιάζει τους σταθμούς μέτρησης θερμοκρασίας με τις κυριότερες γενικές πληροφορίες τους και η χωρική τους κατανομή απεικονίζεται στο Σχήμα 5.5.

5.3.3. Επιφανειακές τιμές βροχόπτωσης και θερμοκρασίας

Για τη δημιουργία των επιφανειακών τιμών βροχόπτωσης και θερμοκρασίας στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού χρησιμοποιήθηκαν τυπικές μεθοδολογίες για την μετατροπή της σημειακής πληροφορίας σε επιφανειακή. Οι επιφανειακές τιμές της μηνιαίας βροχόπτωσης στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας, στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού αλλά και στις υπολεκάνες που εξετάστηκαν υπολογίστηκαν από τους σταθμούς μέτρησης βροχόπτωσης της ευρύτερης περιοχής (Σχήμα 5.4) δημιουργήθηκαν με τη μέθοδο των πολυγώνων Thiessen και την υψομετρική αναγωγή των επιφανειακών τιμών στο μέσο υψόμετρο της εξεταζόμενης λεκάνης με τη χρήση της μεθόδου της βροχοβαθμίδας. Με τη μέθοδο των πολυγώνων Thiessen υπολογίστηκαν οι συντελεστές στάθμισης για κάθε σταθμό που αντιστοιχούν στα εμβαδά των πολυγώνων επηρεασμού των σταθμών κάθε υπολεκάνης όπως προκύπτει με την χάραξη των μεσοκαθέτων επί των αποστάσεων των σταθμών μεταξύ τους. Η μέση επιφανειακή βροχόπτωση της υδρολογικής λεκάνης προκύπτει ως το άθροισμα των επιμέρους μηνιαίων υψών βροχόπτωσης των σταθμών πολλαπλασιαζόμενες επί τους αντίστοιχους συντελεστές στάθμισης σύμφωνα με την εξίσωση:

Πίνακας 5.2. Σταθμοί μέτρησης βροχόπτωσης στη ευρύτερη περιοχή μελέτης.

A/A	Όνομα σταθμού	Υπηρεσία	Νομός	Υψόμετρο (m)
1	Αγκίαλος	ΕΜΥ	Μαγνησίας	15
2	Αργιθέα	ΔΕΗ	Καρδίτσας	980
3	Βακάρι	ΔΕΗ	Τρικάλων	1150
4	Βόλος	ΕΜΥ	Μαγνησίας	3
5	Γραμματικόν	ΥΠΓΕ	Καρδίτσας	95
6	Δομοκός	ΕΜΥ	Φθιώτιδος	615
7	Καλαμπάκα	ΕΜΥ	Τρικάλων	222
8	Καλλιφώνι	ΥΠΓΕ	Καρδίτσας	100
9	Καπνικός Σταθμός	ΥΠΓΕ	Καρδίτσας	110
10	Καρδίτσομαγούλα	ΥΠΓΕ	Καρδίτσας	95
11	Κρατικό Κτήμα Καλαμπάκας	ΥΠΓΕ	Τρικάλων	532
12	Λάρισα	ΕΜΥ	Λάρισας	73
13	Λεοντίτο	ΔΕΗ	Καρδίτσας	950
14	Λιβάδι	ΥΠΕΧΩΔΕ	Λάρισας	1183
15	Μαγούλα	ΥΠΓΕ	Λάρισας	180
16	Μύρα	ΥΠΓΕ	Λάρισας	320
17	Παλαμάς	ΥΠΓΕ	Καρδίτσας	95
18	Παχτούρι	ΔΕΗ	Τρικάλων	950
19	Πεδινόν	ΥΠΓΕ	Καρδίτσας	95
20	Πολυνέρι	ΔΕΗ	Τρικάλων	730
21	Σκοπιά	ΥΠΓΕ	Λάρισας	580
22	Σωτήριο	ΥΠΓΕ	Λάρισας	51
23	Φράγμα Ταυρωπού	ΔΕΗ	Καρδίτσας	850
24	Τρίκαλα	ΕΜΥ	Τρικάλων	149
25	Φάρσαλα	ΕΜΥ	Λάρισας	148
26	Φάρσαλα	ΥΠΓΕ	Λάρισας	434



Σχήμα 5.5. Σταθμοί μέτρησης θερμοκρασίας.

$$P_0 = \sum_{n=1}^i \left(\frac{A_i \times P_i}{A} \right) \quad (5.1)$$

όπου P_i το μηνιαίο ύψος βροχόπτωσης των σταθμών που επηρεάζουν την λεκάνη και A_i/A το ποσοστό επηρεασμού του κάθε σταθμού. Σύμφωνα με την τροποποιημένη μέθοδος Thiessen η επιφανειακή υετόπτωση ανάγεται στο μέσο υψόμετρο της κάθε μία υδρολογικής λεκάνης με τη χρήση της βροχοβαθμίδας, η οποία βασίζεται στην παρατήρηση ότι το ύψος βροχής αυξάνει με την αύξηση του υψομέτρου και χρησιμοποιεί τη βροχοβαθμίδα που είναι ο όρος που περιγράφει την αύξηση του ετήσιου ύψους ανά 100 μέτρα αύξηση του υψομέτρου. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί μια απλή γραμμική σχέση που συσχετίζει τα υψόμετρα των σταθμών με το μέσο ετήσιο ύψος βροχής κάθε σταθμού και εφόσον υπάρχει ικανοποιητική συσχέτιση (συντελεστής συσχέτισης $r > 0.70$), η σχέση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του ύψους βροχής σε οποιοδήποτε υψόμετρο [Παπαμιχαήλ, 2001]. Για την εκτίμηση της επιφανειακής βροχόπτωσης της υπό εξέταση υδρολογικής λεκάνης χρησιμοποιούνται τα επιφανειακά δεδομένα που προέκυψαν από τη μέθοδο Thiessen. Η εκτίμηση των μηνιαίων υψών βροχόπτωσης που αντιστοιχούν στα μέσα υψόμετρα των δύο ζωνών, για κάθε έτος, γίνεται με τις σχέσεις:

$$P_k = P_{T(k)} - \frac{(H_{thies} - H_{mz}) * \alpha}{100}, \text{ και} \quad (5.2)$$

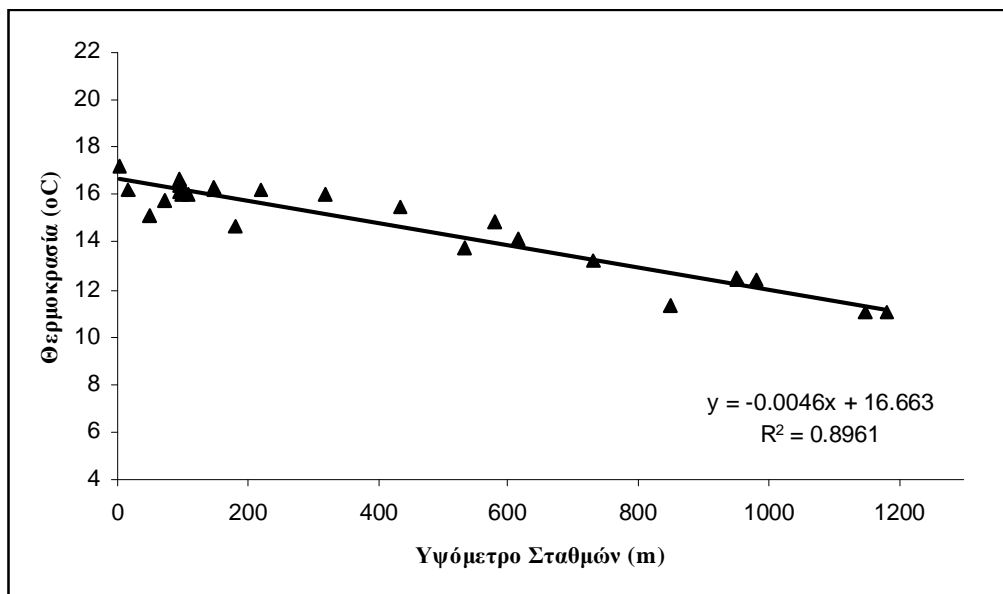
$$P_i^k = \frac{P_k * P_{T(i)}^k}{P_{T(k)}} \quad (5.3)$$

όπου, $P_{T(k)}$ το ετήσιο ύψος βροχόπτωσης κατά Thiessen, κατά το έτος k σε mm, P_k το ετήσιο ύψος της μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης στην υψομετρική ζώνη, κατά το έτος k σε mm, P_i^k το μηνιαίο ύψος επιφανειακής βροχόπτωσης, κατά το μήνα i και το έτος k , στη υπό εξέταση υδρολογική λεκάνη σε mm, $P_{T(i)}^k$ το επιφανειακό μηνιαίο ύψος βροχόπτωσης, κατά το μήνα i και το έτος k , της μεθόδου Thiessen σε mm, α η βροχοβαθμίδα που υπολογίστηκε, και $(H_{thies} - H_{mz})$ η διαφορά ανάμεσα στο σταθμισμένο υψόμετρο των σταθμών Thiessen και του μέσου υψομέτρου της υδρολογικής λεκάνης.

Οι επιφανειακές τιμές της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας δημιουργήθηκαν με την υψομετρική αναγωγή των μετρήσεων των μετεωρολογικών σταθμών (Σχήμα 5.5), στο μέσο υψόμετρο της λεκάνης με τη χρήση της μεθόδου της θερμοβαθμίδας. Η μέθοδος θερμοβαθμίδας βασίζεται στην παρατήρηση ότι η θερμοκρασία μειώνεται με την αύξηση του υψομέτρου και χρησιμοποιεί την ετήσια θερμοβαθμίδα που περιγράφει την μείωση της ετήσιας θερμοκρασίας ανά 100 μέτρα αύξηση του υψομέτρου. Ο υπολογισμός της θερμοβαθμίδας υπολογίστηκε από όλους τους σταθμούς θερμοκρασίας της ευρύτερης περιοχής της Θεσσαλίας (Σχήμα 5.6).

5.4. Στατιστική Ανάλυση Χρονοσειρών

Η εξέλιξη των ποσοτικών χαρακτηριστικών των υπόγειων και επιφανειακών νερών μελετήθηκε με την ανάλυση και έλεγχο των χρονικών τάσεων των χαρακτηριστικών. Η μελέτη αυτή έγινε τόσο για επιλεγμένες σημειακές χρονοσειρές όσο και για ολοκληρωμένες επιφανειακές χρονοσειρές, όπου αυτό ήταν δυνατόν. Η ανάλυση περιλαμβάνει την ανάλυση των χρονοσειρών βροχόπτωσης, θερμοκρασίας, και παροχών υδατορευμάτων. Η ανάλυση τάσεων των χρονοσειρών καθορίζει εάν οι μετρημένες τιμές αυξάνονται ή μειώνονται κατά τη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου [Helsel and Hirsch, 2002].



Σχήμα 5.6. Γραμμική σχέση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας με το υψόμετρο των μετεωρολογικών σταθμών στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού.

Ο στατιστικός έλεγχος που χρησιμοποιήθηκε έχει προταθεί από τους Hirsch και τους συνεργάτες του [Hirsch et al., 1982] και αποτελεί μια εξέλιξη του μη-παραμετρικού τεστ του Kendall για την εξακρίβωση τάσεων σε εποχικά μεταβαλλόμενες χρονοσειρές. Ο συγκεκριμένος στατιστικός έλεγχος μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε χρονοσειρές με κενά [Antonopoulos et al., 2001]. Στην ανάλυση αυτή, χρησιμοποιήθηκε για την εξακρίβωση της ύπαρξης τάσεων στις χρονοσειρές, το στατιστικό μη-παραμετρικό κριτήριο του Spearman. Ο συντελεστής συσχέτισης τάξης του Spearman δίνεται από την εξίσωση:

$$R_s = 1 - \frac{6 \cdot \sum_{i=1}^n (D_i \cdot D_i)}{n \cdot (n^2 - 1)} \quad (5.4)$$

όπου n είναι ο συνολικός αριθμός των τιμών στην χρονοσειρά, D είναι η διαφορά και i είναι η χρονολογική τάξη. Η διαφορά μεταξύ των τάξεων υπολογίζεται ως $D_i = R_{ti} - R_{ri}$, όπου R_{ti} είναι η χρονική σειρά εμφάνισης της κάθε τιμής και R_{ri} είναι η τάξη μεγέθους της κάθε τιμής της χρονοσειράς. Η μηδενική υπόθεση, $H_0: R_s = 0$ (που σημαίνει ότι δεν υπάρχουν στατιστικά σημαντικές τάσεις στη χρονοσειρά) έναντι της εναλλακτικής υπόθεσης, $H_1: R_s < \text{ ή } > 0$ (που σημαίνει ότι υπάρχουν στατιστικά σημαντικές τάσεις στη χρονοσειρά), ελέγχθηκε με το στατιστικό τεστ του t-Student:

$$t_t = R_s \cdot \left[\frac{n-2}{1-R_s^2} \right]^{0.5} \quad (5.5)$$

με $\nu = n-2$ βαθμούς ελευθερίας και σε επίπεδο σημαντικότητας $\alpha = 5\%$. Για δίπλευρο έλεγχο η ύπαρξη τάσεων στην χρονοσειρά καταδεικνύεται από την σύγκριση του t_t με την κρίσιμη τιμή της κατανομής t-Student, t_c η οποία λαμβάνεται από στατιστικούς πίνακες:

$$|t_t| > t_c \quad (5.6)$$

Για όλες τις χρονοσειρές για τις οποίες πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος η κρίσιμη τιμή του t_c είναι 1,96. Το παραπάνω μη-παραμετρικό τεστ χρησιμοποιείται για τη διακρίβωση γραμμικών και μη-γραμμικών

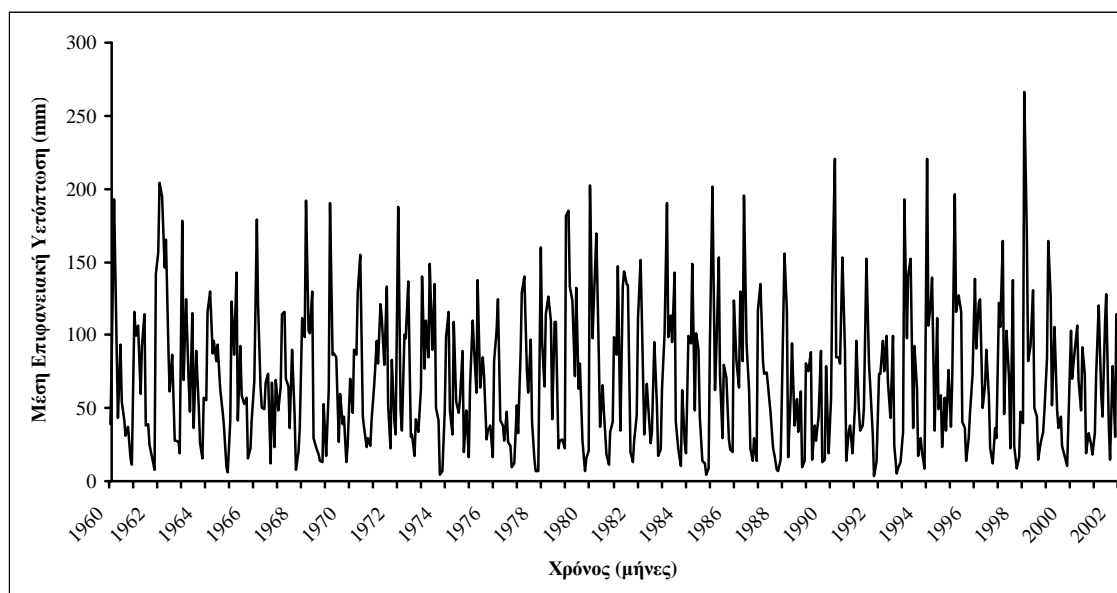
τάσεων. Στην ανάλυση εφαρμόστηκαν δύο μοντέλα τάσεων το γραμμικό ($Y=\alpha+\beta T$) και το πολυωνυμικό δευτέρου βαθμού ($Y=\alpha+\beta T+\gamma T^2$) και επιλέχθηκε κατά περίπτωση το μοντέλο με το μεγαλύτερο συντελεστή συσχέτισης. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης των χρονοσειρών υετόπτωσης, θερμοκρασίας, παροχών υδατορευμάτων, και στάθμης υπόγειων υδάτων.

5.4.1. Βροχόπτωση

Για την διακρίβωση τάσεων στις χρονοσειρές της υετόπτωσης, έγινε αρχικά έλεγχος στη μέση επιφανειακή υετόπτωση της υδρολογικής λεκάνης του Πηνειού ποταμού όπως υπολογίσθηκε προηγουμένως (Πίνακας 5.3, Σχήμα 5.7). Ο έλεγχος αυτός έδειξε ότι δεν υπάρχουν στατιστικά σημαντικές τάσεις στην χρονοσειρά ($t_t = 0,774 < 1,96$).

Πίνακας 5.3. Στατιστικά χαρακτηριστικά της μέσης επιφανειακής υετόπτωσης (σε mm) της υδρολογικής λεκάνης Πηνειού ποταμού

	Μέγεθος δείγματος	Μέση Τιμή	Διάμεση Τιμή	Μέγιστη Τιμή	Ελάχιστη Τιμή	Τυπική Απόκλιση	Συντελεστής Διασποράς (%)
ΟΚΤ	42	90,78	81,33	220,39	17,17	51,64	56,89
ΝΟΕ	42	111,04	98,98	266,10	46,80	48,13	43,34
ΔΕΚ	42	120,40	118,34	220,83	34,53	44,52	36,98
ΙΑΝ	42	89,21	86,76	169,71	14,94	39,96	44,79
ΦΕΒ	42	87,58	86,76	165,50	34,67	36,34	41,49
ΜΑΡ	42	85,20	81,10	195,56	27,45	37,34	43,82
ΑΠΡ	42	70,30	56,86	153,13	22,34	38,93	55,38
ΜΑΪ	42	62,00	57,11	137,42	22,64	27,38	44,16
ΙΟΥΝ	42	30,20	23,51	94,71	12,52	19,78	65,50
ΙΟΥΛ	42	27,31	26,71	83,27	4,48	20,01	73,26
ΑΥΓ	42	24,25	22,93	79,03	3,18	16,04	66,13
ΣΕΠ	42	39,52	30,44	159,78	6,18	33,96	85,92
ΕΤΟΣ	42	837,82	841,04	1204,35	582,68	130,42	15,57

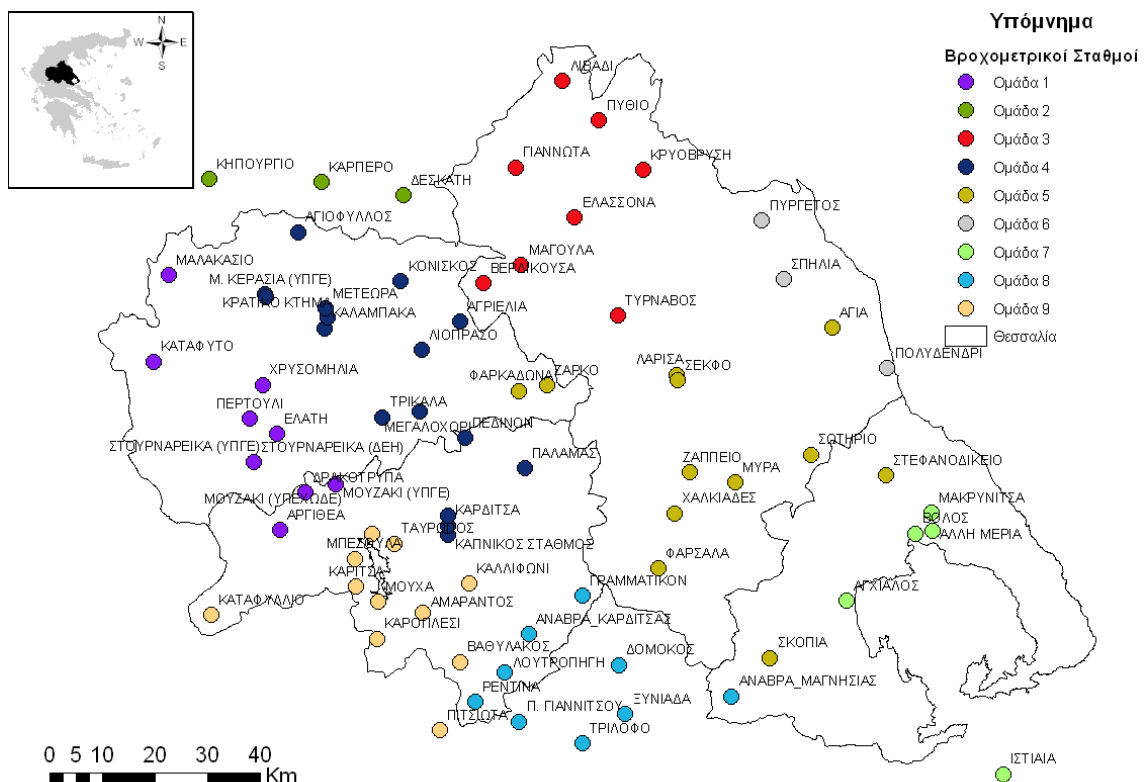


Σχήμα 5.7. Χρονοσειρά μέσης επιφανειακής υετόπτωσης της Θεσσαλίας

Η παραπάνω ανάλυση δείχνει ότι συνολικά για την υδρολογική λεκάνη η μέση επιφανειακή υετόπτωση δεν παρουσιάζει σημαντικές τάσεις. Είναι όμως πιθανόν να υπάρχουν τάσεις σε ορισμένους σταθμούς

ή και περιοχές της υδρολογικής λεκάνης και έτσι πραγματοποιήθηκε ανάλυση τάσεων στις χρονοσειρές υετόπτωσης υπο-περιοχών της Θεσσαλίας. Στην πρώτη φάση της μελέτης οι εβδομήντα οκτώ (78) σταθμοί υετόπτωσης ομαδοποιήθηκαν σε εννέα (9) ομάδες χρησιμοποιώντας την μέθοδο της ιεραρχικής ομαδοποίησης (supervised hierarchical cluster analysis). Με τη μεθοδολογία αυτή οι σταθμοί κατατάσσονται σε ομάδες, οι οποίες έχουν ομοιογενή στατιστική συμπεριφορά. Είναι φυσικό, εφόσον η υετόπτωση επηρεάζεται από την γεωγραφική θέση και το ανάγλυφο, η ομαδοποίηση που προκύπτει με τη μέθοδο αυτή να συσχετίζεται με την γεωγραφική και υδροκλιματική ταξινόμηση. Το Σχήμα 5.8 παρουσιάζει χωρικά τη θέση των ομάδων και των σταθμών που τις αποτελούν.

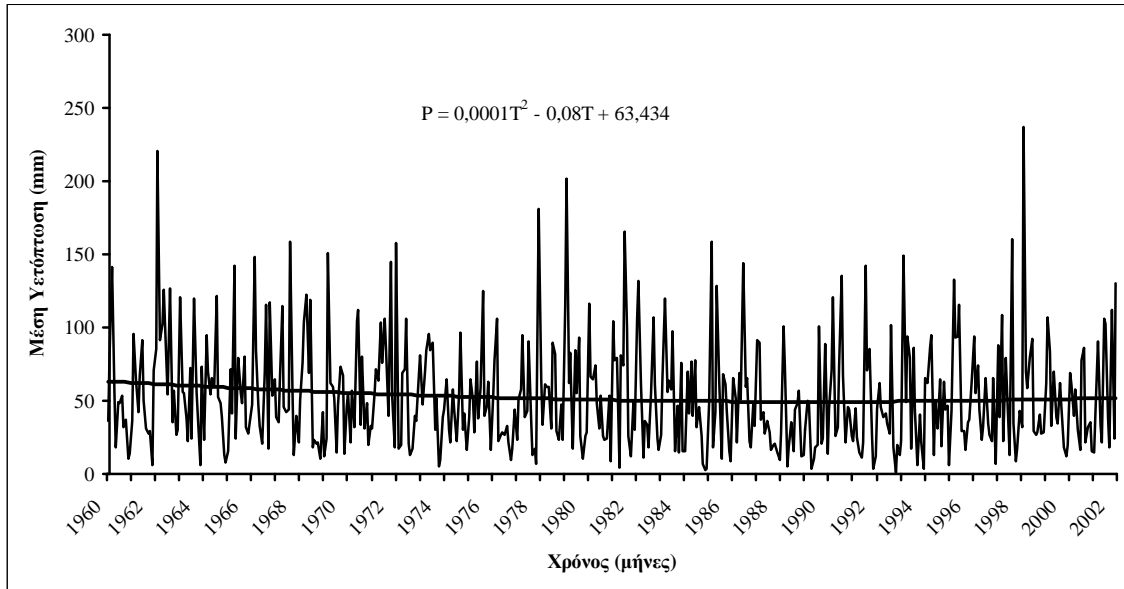
Για καθεμία ομάδα σταθμών υετόπτωσης υπολογίσθηκε η χρονοσειρά της μέσης τιμής της υετόπτωσης και στις τιμές αυτές έγινε ανάλυση τάσεων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι στατιστικά σημαντικές τάσεις ($t_t = 2,36 > 1,96$) υπάρχουν μόνο στην Ομάδα 3 που βρίσκεται στα βορειοανατολικά της Θεσσαλίας (Σχήμα 5.8). Η βέλτιστη γραμμική τάση είναι η πολυωνυμική δευτέρου βαθμού που δείχνει ότι υπάρχει τάση μείωσης της μηνιαίας υετόπτωσης μέχρι και την δεκαετία του 1980 και μετέπειτα σταθεροποίηση της μέσης τιμής της μηνιαίας υετόπτωσης (Σχήμα 5.9).



Σχήμα 5.8. Ομάδες σταθμών υετόπτωσης της Θεσσαλίας.

Εκτός από την παραπάνω ανάλυση η Θεσσαλία διακρίθηκε σε είκοσι μία (21) λεκάνες ή περιοχές. Οι λεκάνες αυτές αποτέλεσαν την βάση της μελέτης του υδατικού ισοζυγίου που παρουσιάζεται στη μελέτη των Loukas et al., [2007]. Για καθεμία λεκάνη υπολογίσθηκε η μέση επιφανειακή υετόπτωση χρησιμοποιώντας την τροποποιημένη μέθοδο πολυγώνων Thiessen. Το Σχήμα 5.10 παρουσιάζει τις θέσεις αυτών των λεκανών. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν ότι στατιστικά σημαντικές τάσεις υπάρχουν μόνο στη μέση επιφανειακή υετόπτωση των λεκανών του Γαύρου ($t_t = 2,57 > 1,96$), Μεσοχωρίου ($t_t = 2,46 > 1,96$) και Τυρνάβου ($t_t = 2,48 > 1,96$). Τα Σχήματα 5.11-5.13 παρουσιάζουν τη διακύμανση της μέσης επιφανειακής υετόπτωσης των τριών αυτών υπολεκανών του Πηνειού ποταμού.

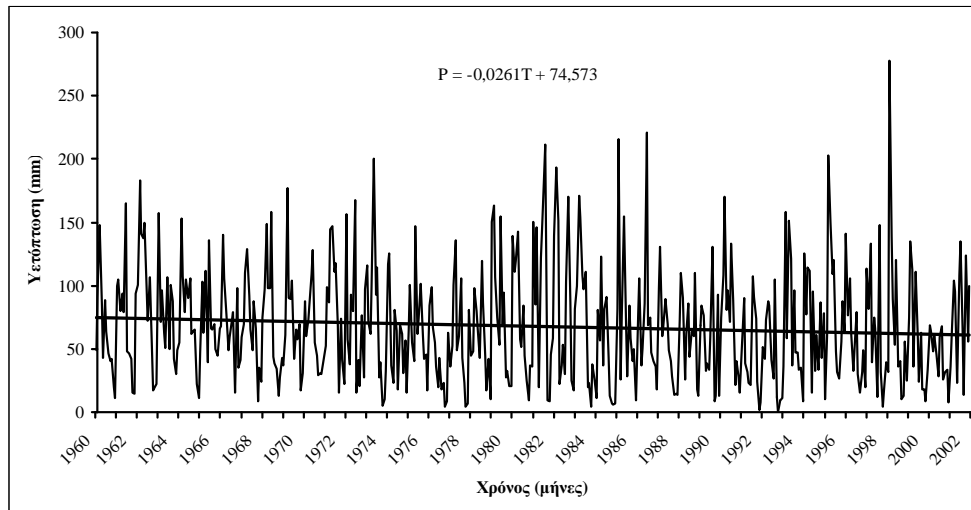
Η βέλτιστη γραμμή τάσης για της λεκάνες του Γαύρου και του Τυρνάβου είναι γραμμική ενώ για τη λεκάνη του Μεσοχωρίου είναι η πολυωνυμική δευτέρου βαθμού που δείχνει ότι υπάρχει τάση μείωσης της μηνιαίας υετόπτωσης μέχρι και την δεκαετία του 1980 και μετέπειτα σταθεροποίηση της μέσης τιμής της μηνιαίας υετόπτωσης (Σχήμα 5.12).



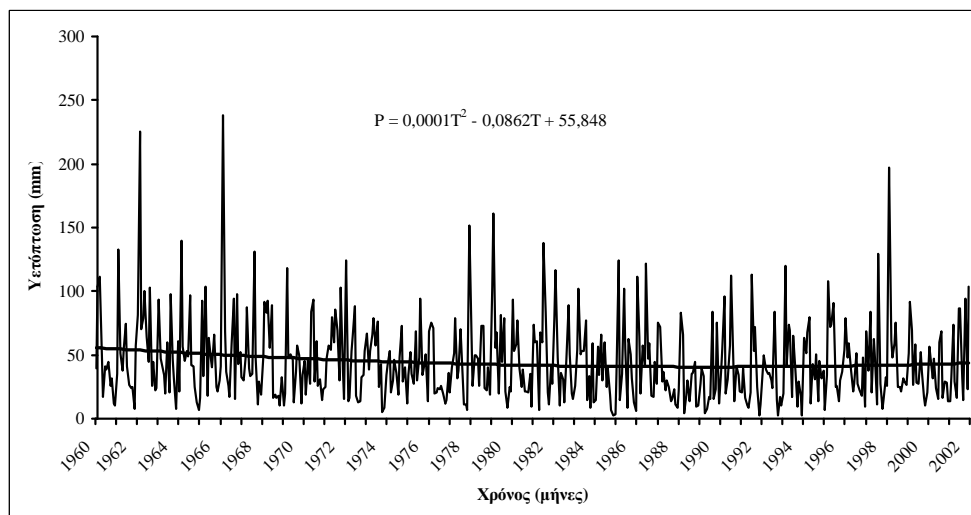
Σχήμα 5.9. Διακύμανση της μέσης υετόπτωσης των σταθμών της Ομάδας 3.



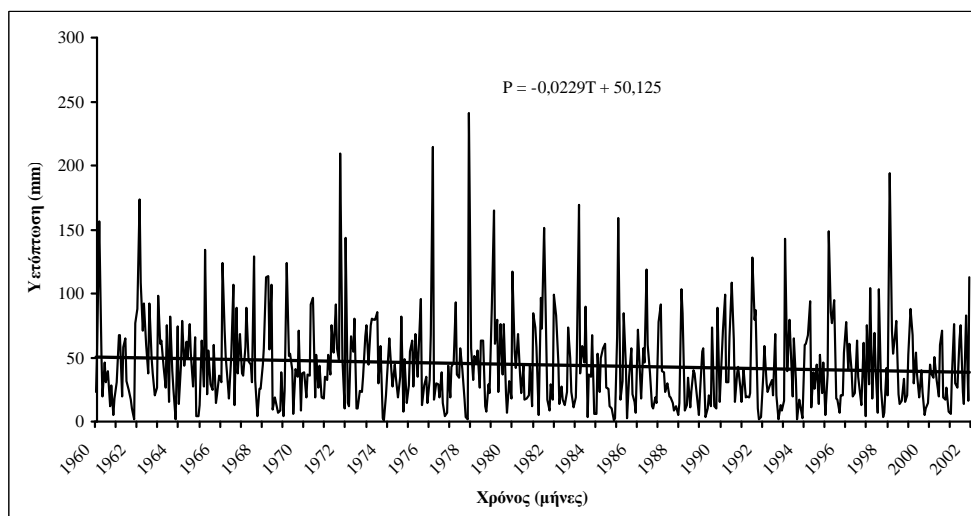
Σχήμα 5.10. Υπολεκάνες Θεσσαλίας.



Σχήμα 5.11. Διακύμανση της μέσης επιφανειακής υετόπτωσης της λεκάνης του Γαούρου.



Σχήμα 5.12. Διακύμανση της μέσης επιφανειακής υετόπτωσης της λεκάνης του Μεσοχωρίου.



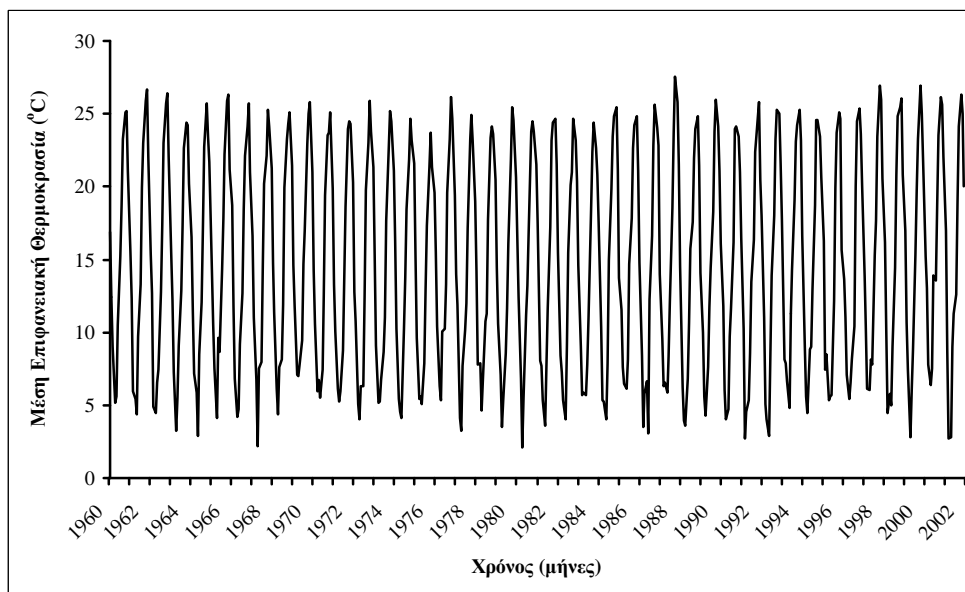
Σχήμα 5.13. Διακύμανση της μέσης επιφανειακής υετόπτωσης της λεκάνης του Τυρνάβου.

5.4.2. Θερμοκρασία

Για την διακρίβωση τάσεων στις χρονοσειρές της θερμοκρασίας, έγινε αρχικά έλεγχος στη μέση επιφανειακή θερμοκρασία της υδρολογικής λεκάνης του Πηνειού ποταμού όπως υπολογίσθηκε προηγουμένως. Ο Πίνακας 5.4 παρουσιάζει τα στατιστικά χαρακτηριστικά της μέσης επιφανειακής θερμοκρασίας της Θεσσαλίας και το Σχήμα 5.14 τη μηνιαία χρονοσειρά της θερμοκρασίας. Ο έλεγχος αυτός έδειξε ότι δεν υπάρχουν στατιστικά σημαντικές τάσεις στη χρονοσειρά ($|t_t| = 0,500 < 1,96$). Εκτός από την παραπάνω ανάλυση έγινε έλεγχος τάσεων στην μέση επιφανειακή θερμοκρασία για κάθε μια από τις είκοσι μία (21) λεκάνες της Θεσσαλίας. Η μέση επιφανειακή θερμοκρασία για κάθε λεκάνη υπολογίσθηκε με τη μέθοδο της θερμοβαθμίδας. Από την ανάλυση αυτή προέκυψε ότι σε καμία λεκάνη δεν υπάρχουν στατιστικά σημαντικές τάσεις αύξησης ή μείωσης της θερμοκρασίας.

Πίνακας 5.4. Στατιστικά χαρακτηριστικά της μέσης επιφανειακής θερμοκρασίας (σε °C) της Θεσσαλίας.

	Μέγεθος δείγματος	Μέση Τιμή	Διάμεση Τιμή	Μέγιστη Τιμή	Ελάχιστη Τιμή	Τυπική Απόκλιση	Συντελεστής Διασποράς (%)
ΟΚΤ	42	15,49	15,38	18,70	12,79	1,41	9,13
ΝΟΕ	42	10,34	10,50	13,05	6,25	1,57	15,18
ΔΕΚ	42	6,15	6,15	9,02	2,68	1,46	23,82
ΙΑΝ	42	4,83	5,17	7,01	2,13	1,24	25,64
ΦΕΒ	42	6,10	6,02	10,04	2,87	1,69	27,75
ΜΑΡ	42	8,92	8,78	13,95	3,02	1,79	20,06
ΑΠΡ	42	13,19	13,18	15,78	10,41	1,38	10,49
ΜΑΪ	42	18,36	18,43	20,84	16,10	1,25	6,81
ΙΟΥΝ	42	23,06	23,20	24,82	20,98	0,83	3,61
ΙΟΥΛ	42	25,10	25,11	27,55	23,54	0,94	3,73
ΑΥΓ	42	24,61	24,68	26,64	21,37	1,12	4,57
ΣΕΠ	42	20,89	21,06	23,20	15,69	1,17	5,60
ΕΤΟΣ	42	14,75	14,80	16,12	13,76	0,51	3,44

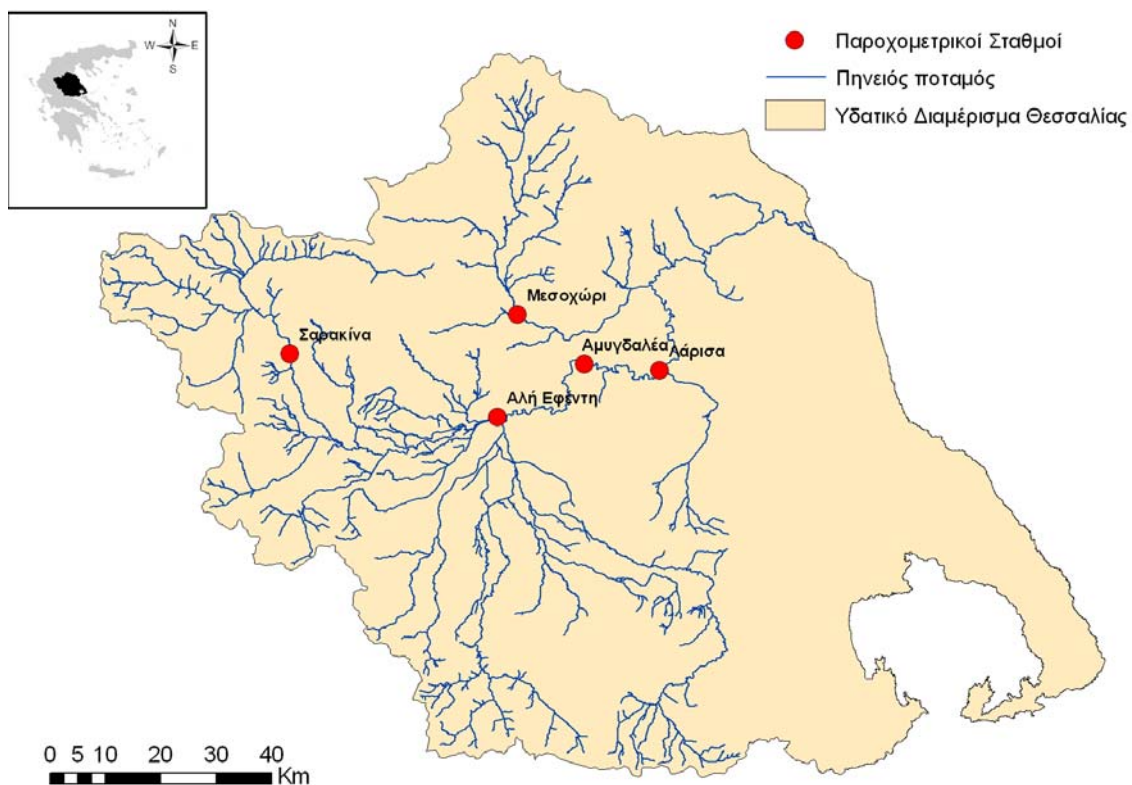


Σχήμα 5.14. Χρονοσειρά μέσης επιφανειακής θερμοκρασίας της Θεσσαλίας

5.4.3. Παροχές υδατορευμάτων

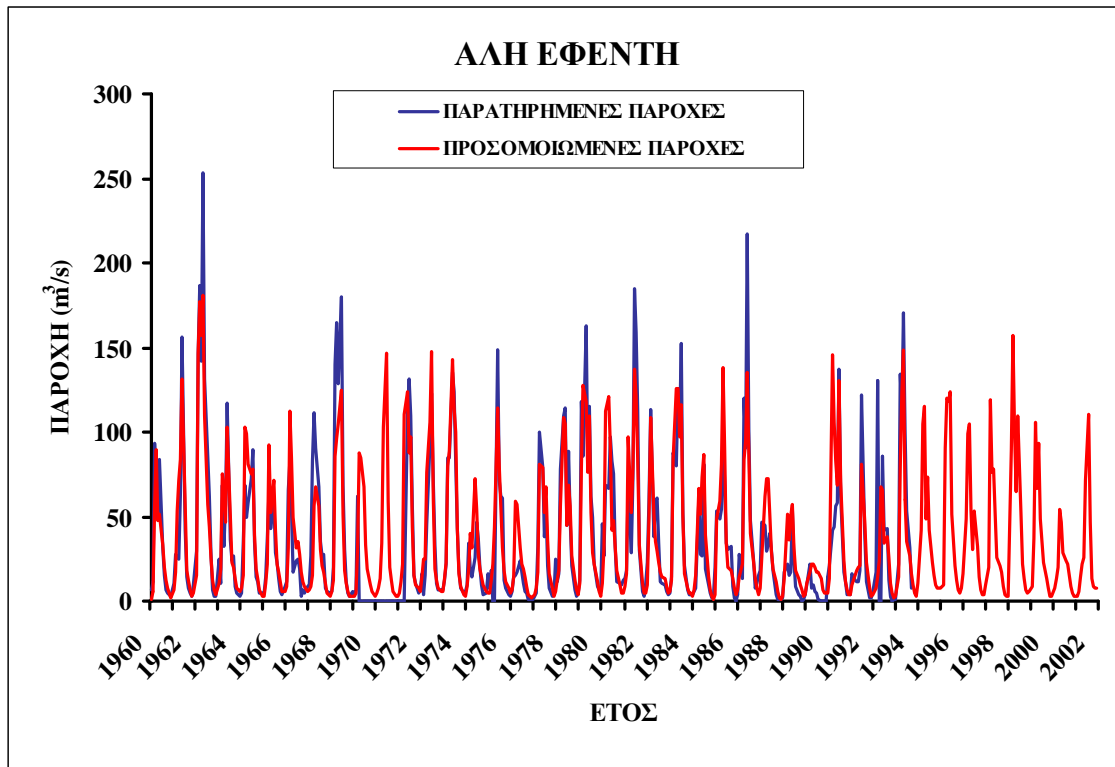
Για την διακρίβωση τάσεων στις χρονοσειρές των παροχών των υδατορευμάτων, έγινε έλεγχος στις χρονοσειρές πέντε κύριων σταθμών του Πηνειού στις θέσεις Σαρακίνα, Αλή Εφέντη, Αμυγδαλέα, Λάρισα και Μεσοχώρι (Σχήμα 5.15). Οι σταθμοί αυτοί επιλέχθηκαν έτσι ώστε να υπάρχει αρκετά μεγάλη χρονοσειρά μετρήσεων αλλά και να είναι αντιπροσωπευτικοί του υδρολογικού συστήματος του Πηνειού. Αλλά, επειδή ακόμα και για αυτούς τους παροχομετρικούς σταθμούς τα δεδομένα δεν είναι

συνεχή και αρκετά ώστε να επιτρέπουν αξιόπιστο στατιστικό έλεγχο έγινε στατιστικός έλεγχος για τη διακρίβωση ύπαρξης τάσεων και σε προσομοιωμένες παροχές. Η παροχή στις παραπάνω θέσεις προσομοιώθηκε για την περίοδο 1960-2002 χρησιμοποιώντας την μέση επιφανειακή υετόπτωση της εκάστοτε λεκάνης, που υπολογίσθηκε με την τροποποιημένη μέθοδο Thiessen, την μέση επιφανειακή θερμοκρασία της εκάστοτε λεκάνης, η οποία υπολογίσθηκε με τη μέθοδο της θερμοβαθμίδας, και τη μέση επιφανειακή δυνητική εξατμισοδιαπνοή, η οποία υπολογίσθηκε από τα δεδομένα θερμοκρασίας με τη μέθοδο Thornthwaite. Το υδρολογικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε είναι το αδρομερές μοντέλο UTHBAL το οποίο έχει προταθεί πρόσφατα και έχει χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση λεκανών απορροής της Θεσσαλίας, της Κρήτης και της Κύπρου [Λουκάς και συνεργάτες, 2003; Loukas et al., 2007; Chrystodoulaki et al., 2004]. Το υδρολογικό μοντέλο παρουσιάζεται διεξοδικά στο 2^ο κεφάλαιο της παρούσας διατριβής. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μπορούν να βρεθούν στις εργασίες των Loukas et al., [2007] και Vasiliades and Loukas [2009a].



Σχήμα 5.15. Υδρομετρικοί σταθμοί που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση χρονοσειρών

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν ότι οι παρατηρημένες και οι προσομοιωμένες παροχές του σταθμού Σαρακίνα δεν παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικές τάσεις ($|t_t| = 0,52$ και $|t_t| = 1,13 < 1,96$, αντίστοιχα). Για τον σταθμό Αλή Εφέντη, η στατιστική ανάλυση έδειξε ότι οι παρατηρημένες παροχές παρουσιάζουν οριακά σημαντική τάση μείωσης στο επίπεδο σημαντικότητας $\alpha=5\%$ ($|t_t| = 2,01 > 1,96$), την περίοδο από το 1960 έως το πέρας της δεκαετίας του 1990. Η ανάλυση όμως των προσομοιωμένων παροχών του σταθμού Αλή Εφέντη έδειξε για την περίοδο 1960-2002 ότι δεν υπάρχει στατιστικά σημαντική τάση ($|t_t| = 0,80 < 1,96$, Σχήμα 5.16).

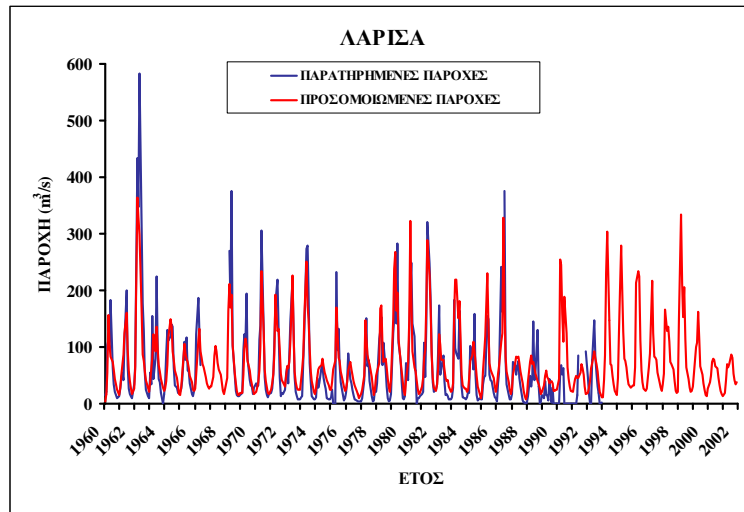


Σχήμα 5.16. Παρατηρημένες και προσομοιωμένες παροχές του σταθμού Αλή Εφέντη.

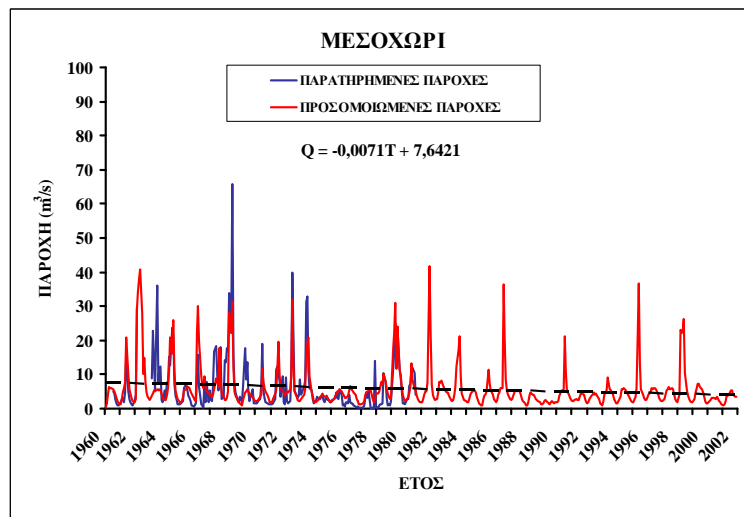
Τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν ότι οι παρατηρημένες και οι προσομοιωμένες παροχές του σταθμού Αμυγδαλέα δεν παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικές τάσεις ($|t_t| = 1,43$ και $|t_t| = 0,414 < 1,96$, αντίστοιχα). Για τον σταθμό Λάρισα, η στατιστική ανάλυση έδειξε ότι οι παρατηρημένες παροχές παρουσιάζουν σημαντική τάση μείωσης στο επίπεδο σημαντικότητας $\alpha=5\%$ ($|t_t| = 2,62 > 1,96$), την περίοδο από το 1960 έως το πέρας της δεκαετίας του 1990. Η ανάλυση όμως των προσομοιωμένων παροχών του σταθμού Λάρισα έδειξε για την περίοδο 1960-2002 ότι δεν υπάρχει στατιστικά σημαντική τάση ($|t_t| = 0,54 < 1,96$ και Σχήμα 5.17).

Τα παραπάνω στατιστικά αποτελέσματα για τους σταθμούς Αλή Εφέντη και Λάρισα δείχνουν ότι επειδή οι διαθέσιμες μετρήσεις παροχής των σταθμών αυτών σταματούν το υδρολογικό έτος 1994-1995 παρουσιάζουν στατιστικά σημαντική τάση μείωσης κυρίως λόγω της ξηρότερης περιόδου της καταγραφής για τη Θεσσαλία που παρατηρήθηκε την περίοδο 1988-1993. Αντίθετα όμως όταν χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα της υδρολογικής προσομοίωσης για την περίοδο 1960-2002 τότε δεν διαπιστώνονται στατιστικά σημαντικές τάσεις, αφού η περίοδος μετά το υδρολογικό έτος 1993-1994 ήταν σχετικά υγρή.

Αντίθετα προς τα παραπάνω, η στατιστική ανάλυση έδειξε ότι για το σταθμό Μεσοχώρι που βρίσκεται στον παραπόταμο του Πηνειού Τιταρήσιο, τόσο οι παρατηρημένες όσο και οι προσομοιωμένες παροχές παρουσιάζουν συνεχή τάση μείωσης ($|t_t| = 2,42$ και $|t_t| = 4,21 > 1,96$, αντίστοιχα, Σχήμα 5.18). Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν τόσο με τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης της μέσης υετόπτωσης των σταθμών της Ομάδας 3 (Σχήμα 5.9) όσο και της μέσης επιφανειακής υετόπτωσης της λεκάνης του Μεσοχωρίου (Σχήμα 5.12).



Σχήμα 5.17. Παρατηρημένες και προσομοιωμένες παροχές του σταθμού Λάρισα



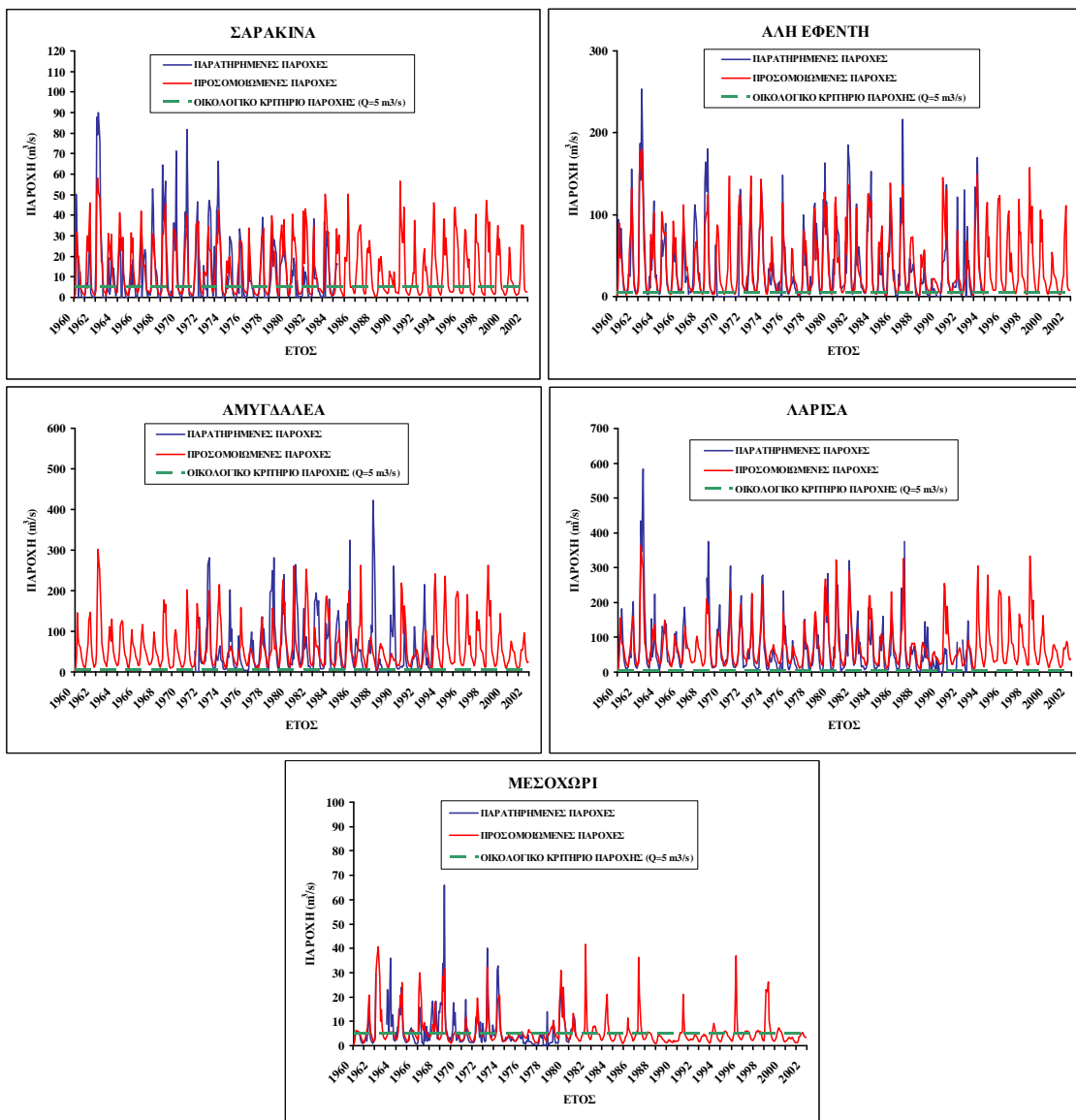
Σχήμα 5.18. Παρατηρημένες και προσομοιωμένες παροχές του σταθμού Μεσοχώρι και γραμμή τάσης.

5.4.4. Διατήρηση υδρόβιας ζωής - περιβάλλοντος

Η διατήρηση της υδρόβιας ζωής σε υδάτινους αποδέκτες (π.χ. ποτάμια, λίμνες, κλπ.) εξαρτάται από την ποσότητα του νερού (π.χ. παροχή), από τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του νερού αλλά και από το είδος της υδρόβιας ζωής. Η παροχή του νερού σε ποτάμια καθορίζει σε ένα βαθμό και τη θερμοκρασία του νερού αλλά και τις διεργασίες οξυγόνωσης του νερού. Για τη Θεσσαλία στο πλαίσιο της μελέτης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της εκτροπής του Αχελώου [ΕΥΔΕ, 1995] καθορίσθηκε ότι για τη διατήρηση της υδρόβιας ζωής στο κυρίως υδατόρρευμα του Πηνειού και στους κύριους παραποτάμους του η παροχή θα πρέπει να διατηρείται σε ένα ελάχιστο επίπεδο $5 \text{ m}^3/\text{s}$ για την περίοδο Μαΐου-Οκτωβρίου. Από την ανάλυση των παροχών που έχει προηγηθεί έχουν σχεδιαστεί οι χρονοσειρές προσομοιωμένης και παρατηρημένης παροχής με το παραπάνω οικολογικό κριτήριο παροχής στο Σχήμα 5.19.

Από την σύγκριση των παρατηρημένων και προσομοιωμένων παροχών στους υδρομετρικούς σταθμούς του κύριου υδατορρέυματος του Πηνειού φαίνεται ότι το οικολογικό ή περιβαλλοντικό κριτήριο της παροχής για τη διατήρηση της υδρόβιας ζωής δεν τηρείται στη θέση Σαρακίνα για την περίοδο Μαΐου-Οκτωβρίου για τα έτη 1960 – 2002. Η παροχή στη θέση Σαρακίνα προέρχεται μόνο από τη

βορειοδυτική λεκάνη του Πηνειού. Στη θέση Αλή Εφέντη το παραπάνω κριτήριο δεν τηρείται κατά τους καλοκαιρινούς μήνες Ιουλίου και Αυγούστου καθώς και του Σεπτεμβρίου για όλα τα έτη. Η παροχή στη θέση Αλή Εφέντη προέρχεται κύρια από τη δυτική λεκάνη του Πηνειού και περιλαμβάνει την παροχή του δυτικού τμήματος του κυρίως υδατορρέυματος του Πηνειού καθώς και των παραποτάμων Πορταϊκού και Πάμισου. Αντίθετα, στη θέση Αμυγδαλέα, στην οποία συνεκτιμάται η παροχή της δυτικής και της νότιας υπολεκάνης του Πηνειού, η οποία περιλαμβάνει την παροχή των κύριων παραποτάμων του Πηνειού, όπως του Καλέντζη, του Σοφαδίτη, του Φαρσαλιώτη και του Ενιπέα, το κριτήριο παροχής γενικά καλύπτεται εκτός από τη δεκαετία του 1980 και από περιόδους παρατεταμένης υδρολογικής ξηρασίας, όπως την περίοδο των ετών 1987-1993 [Loukas and Vasiliades, 2004]. Στις περιόδους αυτές η παροχή ήταν ιδιαίτερως μικρή και προσέγγιζε τη μηδενική τιμή, με αποτέλεσμα, το θάνατο ψαριών και την υποβάθμιση της υδρόβιας ζωής. Στη θέση του υδρομετρικού σταθμού Λάρισα παρατηρούνται παρόμοια αποτελέσματα με αυτά το σταθμού της Αμυγδαλέας. Σύγκριση του κριτηρίου παροχής στη θέση Μεσοχώρι του παραποτάμου του Πηνειού Τιταρήσιου δείχνει ότι το οικολογικό κριτήριο δεν τηρείται και η παροχή για όλη τη περίοδο Μαΐου – Οκτωβρίου είναι μικρότερη από $5 \text{ m}^3/\text{s}$.



Σχήμα 5.19. Σύγκριση του οικολογικού κριτηρίου παροχής με τις παρατηρημένες και προσομοιωμένες παροχές σε πέντε (5) υδρομετρικούς σταθμούς του Πηνειού ποταμού

5.5. Ανάλυση Υδατικού Ισοζυγίου

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται η ανάλυση του υδατικού ισοζυγίου της υδρολογικής λεκάνης του Πηνειού ποταμού σε επίπεδο υπολεκάνης (Σχήμα 5.10). Για την εκτίμηση αυτή θα περιγραφεί η εκτίμηση του διαθέσιμου και εκμεταλλεύσιμου επιφανειακού και υπόγειου υδατικού δυναμικού της Θεσσαλίας καθώς και οι υδατικές απαιτήσεις.

5.5.1. Υφιστάμενο εκμεταλλεύσιμο υδατικό δυναμικό

Στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας υπάρχουν και λειτουργούν, ή είναι υπό κατασκευή και παράδοση, μεγάλα έργα ταμίευσης νερού (φράγματα) καθώς και μικρά έργα ταμίευσης (ταμιευτήρες και λιμνοδεξαμενές). Αυτά είναι και τα βασικά έργα με τα οποία υπολογίσθηκε η προσφορά σε επιφανειακό νερό στο υδατικό ισοζύγιο που θα παρουσιασθεί σε επόμενη παράγραφο. Στον Νομό Καρδίτσας υπάρχει ο μεγάλος ταμιευτήρας του Πλαστήρα, και το φράγμα του Σμοκόβου στον Σοφαδίτη, με συνολική ωφέλιμη χωρητικότητα 437 hm^3 (ή εναλλακτικά 500 hm^3 ανάλογα με τη χρήση του φράγματος Σμοκόβου). Η χρήση τους είναι και υδρευτική και αρδευτική και το γεγονός ότι, τουλάχιστον για το φράγμα του Ταυρωπού, τα έργα αυτά εξυπηρετούν την αγροτική ζήτηση μίας πολύ μεγάλης περιοχής, σε συνδυασμό με την έλλειψη βιώσιμου διαχειριστικού πλαισίου χρήσης, εξηγούν τις εντάσεις που δημιουργούνται κάθε καλοκαίρι μεταξύ των ενδιαφερόμενων φορέων. Στον Νομό Τρικάλων υπάρχουν τα φράγματα της Μεσοχώρας και της Συκιάς, των οποίων η κατασκευή συνδέθηκε με τη μεταφορά νερού από τον άνω ρου του Αχελώου, καθώς και το μικρότερο φράγμα Λογγά. Στον Νομό Μαγνησίας η γενική εικόνα είναι ότι έως πρόσφατα η εκμετάλλευση των επιφανειακών νερών ήταν σχεδόν ανύπαρκτη. Η κατασκευή όμως του Φράγματος Παναγιώτικου στην παράκτια λεκάνη, και κυρίως του ταμιευτήρα της Κάρλας (το μεγαλύτερο μέρος του οποίου θα χρησιμοποιηθεί για τις ανάγκες του νομού) θα ανατρέψουν την κατάσταση αυτή. Τέλος, στον Νομό Λάρισας, υπάρχουν 12 ταμιευτήρες μικρής ωφέλιμης χωρητικότητας (από $0,26$ έως $5,5 \text{ hm}^3$) για την άρδευση συνολικής έκτασης 64000 στρεμμάτων, και 13 μικρά φράγματα, ωφέλιμης χωρητικότητας από $0,050$ έως $1,5 \text{ hm}^3$ ενώ το φράγμα του Αγιονερίου στην Ελασσόνα έχει σχεδιαστεί για 16 hm^3 νερό.

Το εκμεταλλεύσιμο υδατικό δυναμικό διακρίνεται σε επιφανειακό και υπόγειο. Το επιφανειακό εκμεταλλεύσιμο υδατικό δυναμικό περιλαμβάνει τον υδατικό όγκο που αξιοποιείται με τους υπάρχοντες λειτουργούντες μεγάλους και μικρούς ταμιευτήρες και λιμνοδεξαμενές και τους ταμιευτήρες που κατασκευάζονται και πρόκειται να λειτουργήσουν σύντομα. Οι μεγάλοι ταμιευτήρες που ελήφθησαν υπόψη στην κατάρτιση του επιφανειακού υδατικού δυναμικού είναι ο ταμιευτήρας Ν. Πλαστήρα, ο ταμιευτήρας του Σμοκόβου, ο ταμιευτήρας της Κάρλας. Ο ταμιευτήρας του Παναγιώτικου βρίσκεται στην παράκτια περιοχή της Μαγνησίας και δεν επηρεάζει το υδατικό ισοζύγιο της πεδιάδας της Θεσσαλίας (λεκάνες Πηνειού και Κάρλας) και για αυτό δεν λήφθηκε υπόψη. Επίσης, οι μεγάλοι ταμιευτήρες της Μεσοχώρας και της Συκιάς δεν ελήφθησαν υπόψη στον υπολογισμό του ανανεώσιμου και εκμεταλλεύσιμου επιφανειακού υδατικού της Θεσσαλίας, αφού χωρίς τα έργα εκτροπής του Αχελώου δεν επηρεάζουν το υδατικό ισοζύγιο της Θεσσαλίας. Για τον υπολογισμό του εκμεταλλεύσιμου επιφανειακού υδατικού δυναμικού χρησιμοποιήθηκε η φυσική κλιματική μεταβλητότητα όπως αυτή απεικονίζεται στις χρονοσειρές μηνιαίας υετόπτωσης, μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας, και μηνιαίας δυνητικής εξατμισοδιαπνοής για τη περίοδο των υδρολογικών ετών 1960-1961 έως 2001-2002. Η προσομοίωση των μεγάλων ταμιευτήρων και των λιμνοδεξαμενών έγινε σε μηνιαία βάση χρησιμοποιώντας ένα υδρολογικό μοντέλο και ένα μοντέλο ταμιευτήρα. Τα μοντέλα αυτά θα παρουσιασθούν αμέσως μετά. Ο μηνιαίως εκμεταλλεύσιμος όγκος επιφανειακού νερού αντιστοιχεί στις δυνατές απολήψεις από τους ταμιευτήρες και τις λιμνοδεξαμενές, όπως αυτός προκύπτει από τις προσομοιώσεις. Το εκμεταλλεύσιμο υπόγειο υδατικό δυναμικό αντιστοιχεί στη φυσική επαναπλήρωση των υδροφορέων και έχει υπολογισθεί από το υδρολογικό μοντέλο. Πιο

λεπτομερής προσομοίωση θα απαιτούσε τη χρήση μοντέλου υπόγειου υδροφορέα, αλλά λόγω των περιορισμένων διαθέσιμων υδρογεωλογικών δεδομένων αυτό δεν ήταν δυνατό να γίνει.

Από τις είκοσι μια (21) υπολεκάνες απορροής του υδατικού διαμερίσματος Θεσσαλίας, οι λεκάνες της Παράκτιας Λάρισας, της Παράκτιας Μαγνησίας, του Βόλου, του Αλμυρού και της Κάρλας δεν χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση γιατί δεν ανήκουν στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού. Έτσι η ανάλυση επικεντρώθηκε στις 15 υπολεκάνες του Πηνειού ποταμού και είναι οι λεκάνες της Πύλης, Μουζακίου, Γαύρου, Σαρακίνας, Μεσδανίου, Αλή Εφέντη, Νότιας λεκάνης, Σμοκόβου, Σκοπιάς, Αμπελιάς, Πηνειάδας, Αμυγδαλέας, Λάρισας, Μεσοχωρίου και Τεμπών.

Για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης το μηνιαίο αδρομερές υδρολογικό μοντέλο UTHBAL χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση του επιφανειακού υδατικού δυναμικού. Το υδρολογικό αυτό μοντέλο διακρίνει την συνολική απορροή σε τρεις συνιστώσες απορροής, δηλαδή, την επιφανειακή απορροή, την ενδιάμεση ή επιδερμική απορροή, και την βασική απορροή ή απορροή που προέρχεται από την εκροή του υδροφορέα. Για την επιλογή του υδρολογικού μοντέλου, ελήφθη υπόψη η πολυπλοκότητα των μοντέλων υδατικού ισοζυγίου και ο αριθμός των παραμέτρων τους. Όπως έχει διαπιστωθεί από προηγούμενες μελέτες [Pitman, 1973; Vandewiele et al., 1992; Xu and Singh, 1998] τα μοντέλα υδατικού ισοζυγίου που εφαρμόζονται σε λεκάνες απορροής ξηρών και ημίξηρων κλιμάτων απαιτούν μεγαλύτερο αριθμό παραμέτρων από μοντέλα που εφαρμόζονται σε υγρές και ήπιες κλιματολογικά περιοχές. Το μοντέλο έχει εφαρμοσθεί σε λεκάνες απορροής της Θεσσαλίας [Loukas et al., 2007a], της Κρήτης [Christodoulaki et al., 2003] και της Κύπρου [Λουκάς και συνεργάτες, 2003]. Επίσης έχει εφαρμοσθεί στην κατάρτιση του υδατικού ισοζυγίου λεκανών απορροής [Christodoulaki et al., 2004]. Εφαρμογή του μοντέλου σε λεκάνες απορροής με παρόμοια χαρακτηριστικά έδειξε ότι το μοντέλο προσομοιώνει πολύ καλά την απορροή καθώς επίσης και τον όγκο της απορροής και επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μελέτες διαχείρισης υδατικών πόρων. Τα δεδομένα εισόδου του μοντέλου είναι η μηνιαία επιφανειακή υετόπτωση, η μέση μηνιαία επιφανειακή θερμοκρασία και η μέση μηνιαία επιφανειακή δυνητική εξατμισοδιαπνοή. Για κάθε μία υπολεκάνη υπολογίστηκε η μέση επιφανειακή υετόπτωση χρησιμοποιώντας την τροποποιημένη μέθοδο πολυγώνων Thiessen. Η μέθοδος αυτή είναι παραλλαγή της κλασικής μεθόδου των πολυγώνων Thiessen μόνο που η μέση επιφανειακή υετόπτωση προσαρμόζεται για το μέσο υψόμετρο της λεκάνης με τη βοήθεια της υετοβαθμίδας που υπολογίζεται από τα δεδομένα των σταθμών που βρίσκονται εντός της λεκάνης ή στα όρια αυτής. Η μέση επιφανειακή θερμοκρασία για κάθε υπολεκάνη υπολογίστηκε με τη μέθοδο της θερμοβαθμίδας. Η μέση μηνιαία επιφανειακή δυνητική εξατμισοδιαπνοή για κάθε υπολεκάνη υπολογίστηκε με την εμπειρική μέθοδο του Thornthwaite, η οποία χρησιμοποιεί ως δεδομένο εισόδου μόνο τη θερμοκρασία. Η εμπειρική μέθοδος του Thornthwaite έχει χρησιμοποιηθεί στην πράξη περισσότερο από κάθε άλλη, διεθνώς αλλά και στην Ελλάδα, λόγω των μικρών απαιτήσεών της σε δεδομένα εισόδου. Βασίζεται στην εξίσωση:

$$E_p = 16 \cdot \left(\frac{10 \cdot T_a}{I} \right)^a \cdot \frac{\mu \cdot N}{360} \quad (5.7)$$

όπου, E_p είναι η δυνητική εξατμισοδιαπνοή (mm), T_a είναι η μέση μηνιαία θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$), μ είναι ο αριθμός ημερών του μήνα, N είναι η μέση αστρονομική διάρκεια ημέρας, I είναι εμπειρικός συντελεστής που ονομάζεται ετήσιος θερμικός δείκτης, και a είναι εμπειρικός συντελεστής, ο οποίος είναι συνάρτηση του I . Οι δύο εμπειρικοί συντελεστές υπολογίζονται με βάση τις κανονικές μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες (T_n) των 12 μηνών του έτους από τις εξισώσεις:

$$I = \sum_{i=1}^n \left(\frac{T_{n,i}}{5} \right)^{1.514} \quad (5.8)$$

$$a = 6.75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7.71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 1.792 \cdot 10^{-2} \cdot I + 0.49239 \quad (5.9)$$

Η μέση αστρονομική διάρκεια ημέρας, N , υπολογίζεται από τις εξισώσεις:

$$N = \frac{24}{\pi} \cdot \omega_s \quad (5.10)$$

$$\omega_s = \arccos(-\tan \varphi \cdot \tan \delta) \quad (5.11)$$

$$\delta = -0.409 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{365} \cdot t + 0.16\right) \quad (5.12)$$

όπου, t είναι ο αριθμός ημέρας (1 την 1^η Ιανουαρίου και 365 την 31^η Δεκεμβρίου), δ είναι η ηλιακή απόκλιση (rad), φ είναι το γεωγραφικό πλάτος του σταθμού (rad), και ω_s είναι η γωνία δύσης του ήλιου (rad).

Οι παράμετροι του μοντέλου βελτιστοποιήθηκαν με τη μέθοδο multistart GRG2 σε λεκάνες που διέθεταν μετρήσεις παροχής. Οι λεκάνες αυτές ήταν: Σκοπιά, Αμπελιά, Πύλη, Μουζάκι, Γαύρος, Σαρακίνα, Μεσδάνι, Αλή Εφέντη, Πηνειάδα, Αμυγδαλέα, Λάρισα και Μεσοχώρι. Για τις υπόλοιπες λεκάνες χρησιμοποιήθηκαν οι παράμετροι λεκανών με παρόμοια φυσιογραφικά και κλιματικά χαρακτηριστικά. Το υδρολογικό μοντέλο χρησιμοποιήθηκε έτσι για τον υπολογισμό τόσο της φυσικής εισροής στους ταμιευτήρες και λιμνοδεξαμενές των λεκανών. Όλοι οι λειτουργούντες και υπό κατασκευή ταμιευτήρες και λιμνοδεξαμενές στη Θεσσαλία προσομοιώθηκαν με ένα μοντέλο προσομοίωσης λειτουργίας ταμιευτήρα. Οι μεγάλοι ταμιευτήρες προσομοιώθηκαν χρησιμοποιώντας την υπολογισμένη φυσική εισροή της ανάντη λεκάνης, ενώ οι λιμνοδεξαμενές προσομοιώθηκαν ως συνολικός όγκος στην έξοδο της εκάστοτε λεκάνης. Για όλους τους ταμιευτήρες οι καθαρές απώλειες που είναι το άθροισμα της υετόπτωσης στον ταμιευτήρα μείον την εξάτμιση από τον ταμιευτήρα και τις υπόγειες διαφυγές θεωρήθηκαν μηδέν λόγω έλλειψης στοιχείων των υπόγειων διαφυγών.

Η μέθοδος της προσομοίωσης λειτουργίας ενός ταμιευτήρα και η εκτίμηση της πιθανότητας ικανοποίησης δεδομένης κατανάλωσης είναι η περισσότερο χρησιμοποιούμενη μέθοδος για το σχεδιασμό των ταμιευτήρων και των λιμνοδεξαμενών στον Ελλαδικό χώρο [Τσακίρης, 1995]. Σύμφωνα με τη μέθοδο χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου οι εισροές ενός σημαντικού αριθμού ετών (ή αν κριθεί απαραίτητο παράγονται από το υπάρχον δείγμα συνθετικά δεδομένα με τα ίδια στατιστικά χαρακτηριστικά). Η γενική εξίσωση που περιγράφει τη λειτουργία ενός ταμιευτήρα με χρονικό βήμα τον μήνα, είναι η ακόλουθη [Τσακίρης, 1995]:

$$V_i = V_{i-1} + Q_i - E_i - A_i - Y_i \quad (5.13)$$

όπου, V_i, V_{i-1} είναι ο αποθηκευμένος όγκος νερού στον ταμιευτήρα του μήνες $i, i-1$, αντίστοιχα, Q_i είναι η εισροή στον ταμιευτήρα το μήνα i , E_i είναι η καθαρή απώλεια του ταμιευτήρα το μήνα i , A_i είναι η πραγματική απόληψη κατά το μήνα i , και Y_i είναι η υπερχειλίση κατά το μήνα i . Όλες οι ποσότητες είναι εκφρασμένες σε hm^3 . Για μία δεδομένη τιμή της μέγιστης ωφέλιμης χωρητικότητας S του ταμιευτήρα, ισχύουν οι παρακάτω περιπτώσεις:

1. Αν $V_i > S$: $V_i = S$ $A_i = B_i$ $Y_i = V_{i-1} + Q_i - E_i - A_i - S$	2. Αν $0 < V_i < S$ $V_i = V_{i-1} + Q_i - E_i - A_i$ $A_i = B_i$ $Y_i = 0$	3. Αν $V_i = 0$ $A_i = V_{i-1} + Q_i - E_i$ $Y_i = 0$
--	--	---

όπου B_i η επιθυμητή απόληψη του μήνα i .

Σύμφωνα με τη παραπάνω διαδικασία υπολογίσθηκαν τα διαθέσιμα και ανανεώσιμα αποθέματα νερού τόσο για τους επιφανειακούς όσο και για τους υπόγειους υδατικούς πόρους. Ο Πίνακας 5.5 παρουσιάζει τη στατιστικά μέση ετήσια προσφορά νερού ανά πηγή υδροδότησης και λεκάνη. Όπως φαίνεται από τα στοιχεία αυτά για όλη τη λεκάνη του Πηνειού οι συνολικοί ανανεώσιμοι και διαθέσιμοι υδατικοί πόροι ανέρχονται στα $787,68 \text{ hm}^3$ νερό. Το 60% αυτού προέρχεται από τα

ανανεώσιμα αποθέματα του υπογείου νερού και το υπόλοιπο 40% από τα ανανεώσιμα διαθέσιμα αποθέματα του επιφανειακού νερού από λειτουργούντες και υπό κατασκευή ταμιευτήρες και λιμνοδεξαμενές.

Πίνακας 5.5. Μέση ετήσια προσφορά νερού ανά πηγή υδροδότησης και υπολεκάνη (σε hm^3).

Λεκάνες	Πηγή Υδροδότησης		Σύνολο
	Επιφανειακά Νερά	Υπόγεια Νερά	
ΓΑΥΡΟΣ		43,11	43,11
ΣΑΡΑΚΙΝΑ		126,21	126,21
ΜΕΣΔΑΝΙ		106,69	106,69
ΠΥΛΗ		4,95	4,95
ΜΟΥΖΑΚΙ		3,67	3,67
ΑΛΗ ΕΦΕΝΤΗ	2,00	24,56	26,56
ΣΚΟΠΙΑ		18,42	18,42
ΑΜΠΕΛΙΑ		5,89	5,89
ΣΜΟΚΟΒΟ	142,09	42,30	184,40
ΝΟΤΙΑ ΛΕΚΑΝΗ	150,94	68,11	219,05
ΠΗΝΕΙΑΔΑ		0,38	0,38
ΑΜΥΓΔΑΛΕΑ	0,26	6,28	6,54
ΛΑΡΙΣΑ		2,96	2,96
ΜΕΣΟΧΩΡΙ	19,06	9,02	28,08
ΤΥΡΝΑΒΟΣ	0,20	2,24	2,44
ΤΕΜΠΗ	0,40	7,94	8,34
ΛΕΚΑΝΗ ΠΗΝΕΙΟΥ	314,95	472,73	787,68

5.5.2. Υφιστάμενες απαιτήσεις σε νερό

Στην παράγραφο περιγράφονται περιληπτικά οι παραγωγικές δραστηριότητες που λαμβάνουν χώρα στις υπολεκάνες του Πηνειού. Με την καταγραφή και την περιγραφή της ποσοτικής και χωρική κατανομής των δραστηριοτήτων αυτών είναι δυνατή η εκτίμηση των υδατικών απαιτήσεων κάθε μιας από της δραστηριότητες ανά υπολεκάνη. Οι παραγωγικές δραστηριότητες περιλαμβάνουν: α) γεωργία, β) κτηνοτροφία, γ) βιομηχανία, δ) τουρισμό και αναψυχή. Οι υδατικές ανάγκες εκτιμήθηκαν για καθεμία χρήση και καθεμία υπολεκάνη ξεχωριστά. Στις παρακάτω παραγράφους παρουσιάζεται η εκτίμηση των υδατικών αναγκών για κάθε χρήση εκτιμώντας ταυτόχρονα και τις απώλειες. Η διαδικασία υπολογισμού περιγράφεται αναλυτικά στην εργασία των Loukas et al. [2007]. Η συνολική μηνιαία ζήτηση του νερού σε κάθε υπολεκάνη υπολογίσθηκε ως άθροισμα της ζήτησης νερού για τις επιμέρους χρήσεις κάθε υπολεκάνης. Θα πρέπει να τονισθεί ότι για όλη τη χρονοσειρά των υδρολογικών ετών 1960-61 έως 2001-2002, μόνο η γεωργική ζήτηση μεταβάλλεται επειδή εξαρτάται από την μεταβλητότητα του κλίματος, ενώ η ζήτηση για όλες τις άλλες χρήσεις παραμένει σταθερή και αυτή που υπολογίσθηκε για το έτος της απογραφής που χρησιμοποιήθηκε στον υπολογισμό της εκάστοτε δραστηριότητας. Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει τη στατιστικά μέση ετήσια ζήτηση νερού για τις υπολεκάνες του Πηνειού ποταμού. Από τα στοιχεία του Πίνακα 5.6 προκύπτει ότι η μέση ετήσια ζήτηση νερού στη λεκάνη του Πηνειού ανέρχεται σε $1510,48 hm^3$ και ότι το 95% της στατιστικά μέσης ετήσιας ζήτησης νερού στην Θεσσαλία είναι για γεωργική χρήση.

5.5.3. Υδατικό ισοζύγιο

Το μηνιαίο υδατικό ισοζύγιο για κάθε λεκάνη καταρτίστηκε για την περίοδο των υδρολογικών ετών 1960-1961 έως 2001-2002 με τον υπολογισμό της διαφοράς μεταξύ των συνολικά διαθέσιμων και ανανεώσιμων υδατικών πόρων (επιφανειακών και υπόγειων) και της συνολικής ζήτησης νερού στη

λεκάνη. Για εποπτικούς λόγους παρατίθενται τα αποτελέσματα για το στατιστικά μέσο υδρολογικό έτος. Ο Πίνακας 5.7 παρουσιάζει το ετήσιο υδατικό ισοζύγιο των υπολεκανών της λεκάνης απορροής του Πηνειού για το στατιστικά μέσο υδρολογικό έτος. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα αυτά η λεκάνη του Πηνειού παρουσιάζει για το έτος αυτό ετήσιο υδατικό έλλειμμα που ανέρχεται σε περίπου 723 hm³. Το μεγαλύτερο υδατικό έλλειμμα παρουσιάζει η υπολεκάνη Νότια Λεκάνη με 479 hm³.

Πίνακας 5.6. Μέση ετήσια ζήτηση νερού ανά χρήση και λεκάνη (σε hm³).

Λεκάνες	Γεωργική Χρήση	Αστική Χρήση	Κτηνοτροφική Χρήση	Βιομηχανική Χρήση	Τουριστική Χρήση	Σύνολο
ΓΑΥΡΟΣ	1,99	0,34	0,19	0,00	0,00	2,52
ΣΑΡΑΚΙΝΑ	12,75	1,31	0,19	0,00	0,00	14,24
ΜΕΣΔΑΝΙ	129,55	14,55	0,19	0,00	0,05	144,34
ΠΥΛΗ	0,00	0,44	0,19	0,00	0,00	0,63
ΜΟΥΖΑΚΙ	0,00	0,44	0,19	0,00	0,00	0,63
ΑΛΗ ΕΦΕΝΤΗ	211,85	5,02	0,19	0,00	0,05	217,11
ΣΚΟΠΙΑ	24,01	0,59	0,19	0,00	0,00	24,79
ΑΜΠΕΛΙΑ	6,39	0,15	0,19	0,00	0,00	6,73
ΣΜΟΚΟΒΟ	0,82	0,74	0,19	0,00	0,00	1,75
ΝΟΤΙΑ ΛΕΚΑΝΗ	679,41	18,29	0,19	0,00	0,05	697,93
ΠΗΝΕΙΑΔΑ	17,94	0,21	0,19	0,00	0,00	18,34
ΑΜΥΓΔΑΛΕΑ	47,25	0,72	0,19	0,00	0,00	48,16
ΛΑΡΙΣΑ	168,22	22,49	0,19	0,00	0,10	190,99
ΜΕΣΟΧΩΡΙ	51,78	4,91	0,19	0,00	0,00	56,87
ΤΥΡΝΑΒΟΣ	38,90	3,46	0,19	0,00	0,00	42,55
ΤΕΜΠΗ	40,83	1,64	0,19	0,26	0,00	42,92
ΛΕΚΑΝΗ ΠΗΝΕΙΟΥ	1431,70	75,31	2,96	0,26	0,26	1510,48

Πίνακας 5.7. Ετήσιο υδατικό ισοζύγιο του στατιστικά μέσου υδρολογικού έτους (σε hm³)

Λεκάνες	Διαθέσιμο και ανανεώσιμο υδατικό δυναμικό	Ζήτηση νερού	Ισοζύγιο
ΓΑΥΡΟΣ	43,11	2,52	40,59
ΣΑΡΑΚΙΝΑ	126,21	14,24	111,97
ΜΕΣΔΑΝΙ	106,69	144,34	-37,65
ΠΥΛΗ	4,95	0,63	4,32
ΜΟΥΖΑΚΙ	3,67	0,63	3,04
ΑΛΗ ΕΦΕΝΤΗ	26,56	217,11	-190,55
ΣΚΟΠΙΑ	18,42	24,79	-6,37
ΑΜΠΕΛΙΑ	5,89	6,73	-0,84
ΣΜΟΚΟΒΟ	184,4	1,75	182,65
ΝΟΤΙΑ ΛΕΚΑΝΗ	219,05	697,93	-478,88
ΠΗΝΕΙΑΔΑ	0,38	18,34	-17,96
ΑΜΥΓΔΑΛΕΑ	6,54	48,16	-41,62
ΛΑΡΙΣΑ	2,96	190,99	-188,03
ΜΕΣΟΧΩΡΙ	28,08	56,87	-28,79
ΤΥΡΝΑΒΟΣ	2,44	42,55	-40,11
ΤΕΜΠΗ	8,34	42,92	-34,58
ΛΕΚΑΝΗ ΠΗΝΕΙΟΥ	787,68	1510,48	-722,8

Το ετήσιο υδατικό ισοζύγιο των υπολεκανών του Πηνειού ποταμού για το υγρότερο έτος της περιόδου 1960-2002, το οποίο είναι το υδρολογικό έτος 1962-1963, δείχνει ότι η λεκάνη του Πηνειού παρουσιάζει για το έτος αυτό ετήσιο υδατικό έλλειμμα που ανέρχεται σε περίπου 92 hm³. Το ετήσιο υδατικό ισοζύγιο των υπολεκανών του Πηνειού για το ξηρότερο έτος της περιόδου 1960-2002, το οποίο είναι το υδρολογικό έτος 1989-1990 δείχνει ότι η λεκάνη του Πηνειού παρουσιάζει για το έτος αυτό

ετήσιο υδατικό έλλειμμα που ανέρχεται σε περίπου 1268 hm³. Το έτος 1989-1990 είναι το ξηρότερο ιστορικά έτος για τη Θεσσαλία, και η μετεωρολογική ξηρασία του έτους αυτού έπληξε όλο το υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας. Από πρόσφατη μελέτη των μετεωρολογικών ξηρασιών στη Θεσσαλία [Loukas and Vasiliades, 2004] προέκυψε ότι για το έτος 1989-1990 η ξηρασία είχε περίοδο επαναφοράς μεγαλύτερη από 80 έτη για περισσότερο από το 50% της έκτασης της Θεσσαλίας. Σύμφωνα με την μελέτη αυτή η περιοχή που επηρεάστηκε περισσότερο από το γεγονός αυτό της ξηρασίας ήταν η δυτική ορεινή περιοχή της Θεσσαλίας. Από την περιοχή αυτή πηγάζουν ο Πηνειός ποταμός και οι σημαντικότεροι παραπόταμοί του καθώς και αποτελεί περιοχή φόρτισης του υπόγειου υδροφόρου. Αυτό γίνεται επίσης εμφανές και από την παρούσα μελέτη αν συγκριθούν οι τιμές του υδατικού ισοζυγίου για το ξηρότερο έτος (1989-1990) και το υγρότερο έτος (1962-1963).

5.5.4. Συμπεράσματα

Από τα γενικά συμπεράσματα για την εκμετάλλευση των υδατικών αποθεμάτων της Θεσσαλίας της υδρολογικής λεκάνης του Πηνειού ποταμού επιβεβαιώνεται ότι το υδατικό δυναμικό της δέχεται εδώ και σαράντα χρόνια τη μεγαλύτερη ανθρωπογενή πίεση για την κάλυψη αρδευτικών αναγκών συγκριτικά με τα υπόλοιπα διαμερίσματα της χώρας. Η διατάραξη του υδατικού ισοζυγίου στο μεγαλύτερο μέρος του υδατικού διαμερίσματος και η μεγάλη περιβαλλοντική αλλά και οικονομική καταστροφή που τη συνοδεύει, με την εξάντληση των αποθεμάτων του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, τη σοβαρή μείωση των παροχών του ποταμού Πηνειού, τον απειλούμενο κίνδυνο της ερημοποίησης μιας γης κάποτε γόνιμης και ανθούσας και την οικονομική καταστροφή των κατοίκων της περιοχής, είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα περιβαλλοντικού και αναπτυξιακού προβλήματος που χρήζει ιδιαίτερης αντιμετώπισης. Τέλος, η έλλειψη ενός ολοκληρωμένου συστήματος πρόγνωσης και διαχείρισης των διαφόρων τύπων ξηρασίας κάνει την υφιστάμενη κατάσταση ακόμη πιο δύσκολη αφού η έγκαιρη αναγνώριση της μετεωρολογικής ξηρασίας μπορεί να προλάβει δυσοίωνες καταστάσεις σε περίπλοκα υδατικά συστήματα όπως του Πηνειού ποταμού. Κατά συνέπεια η μελέτη της χωρικής και χρονικής κατανομής των διαφόρων μορφών της ξηρασίας στην υδρολογική λεκάνη απορροής της Θεσσαλίας, αποτελεί ένα εξαιρετικά ενδιαφέρον και κρίσιμο αντικείμενο προκειμένου να εξαχθούν όσο το δυνατόν χρήσιμα και ασφαλή συμπεράσματα σχετικά με την μελλοντική συμπεριφορά του φαινομένου.

5.6. Διακρίβωση ξηρασίας

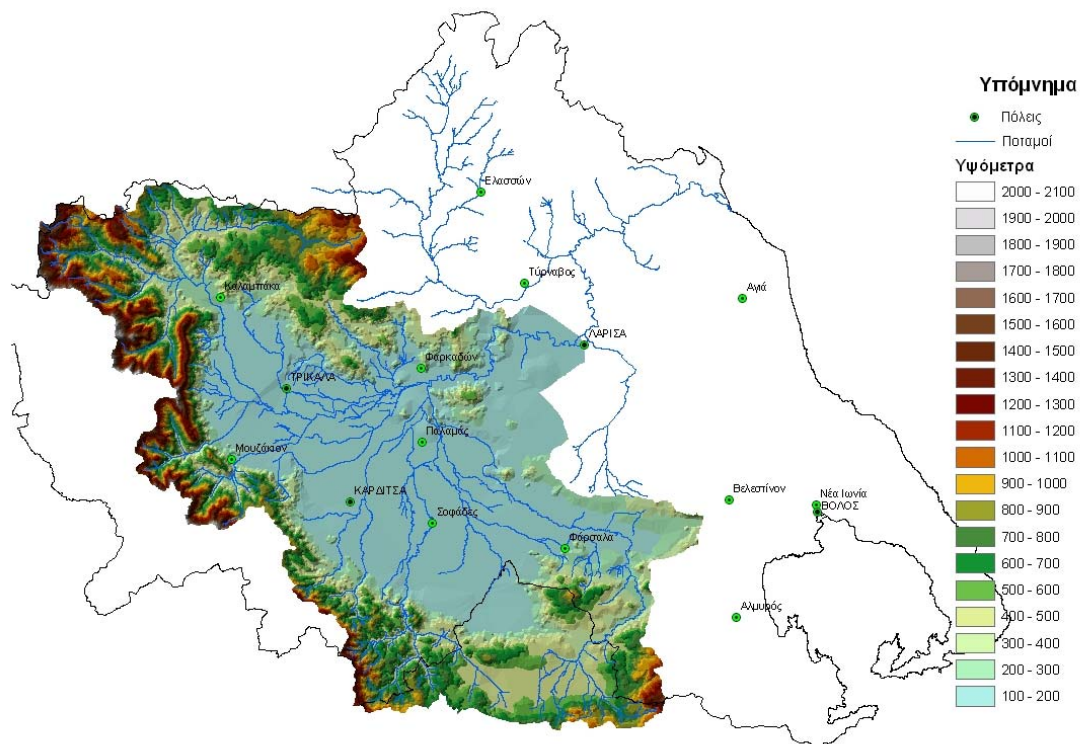
Για την διακρίβωση της τύπων της ξηρασίας με χρήση του μετεωρολογικού δείκτη SPI υπολογισμένου σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες, η μεθοδολογία που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 2 (Παράγραφος 2.4) εφαρμόστηκε για την αναγνώριση της ξηρασίας εδαφικής υγρασίας, υδρολογικής ξηρασίας απορροών και ξηρασίας διαχείρισης υδροσυστημάτων. Για την αναγνώριση της ξηρασίας εδαφικής υγρασίας και υδρολογικής ξηρασίας επιφανειακών απορροών η μεθοδολογία έγινε για μία κύρια υπολεκάνη του Πηνειού ποταμού όπου υπήρχαν διαθέσιμα υδρομετρικά δεδομένα στη θέση Λάρισα. Περισσότερες πληροφορίες για την διακρίβωση της υδρολογικής ξηρασίας με τη χρήση μετεωρολογικών δεικτών σε υδρολογικές λεκάνες της περιοχής μπορούν να βρεθούν στη διεθνή βιβλιογραφία [Vasiliades and Loukas, 2009a; Vasiliades et al., 2010]. Η διακρίβωση της ξηρασίας σε υδροσυστήματα έγινε για τον ταμιευτήρα του Πλαστήρα όπου υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα καθαρών αποθηκεύσεων στον ταμιευτήρα. Τα δεδομένα των καθαρών αποθηκεύσεων του ταμιευτήρα προήλθαν από την μελέτη των Ευστρατιάδη και συνεργατών, [2002].

5.6.1. Αναγνώριση υδρολογικής ξηρασίας

Η λεκάνη της Λάρισας αποτελεί μέρος της λεκάνης απορροής του ποταμού Πηνειού. Στην ουσία καταλαμβάνει όλο το Δυτικό και το μεγαλύτερο μέρος του νοτίου τμήματός της. Η έκταση της λεκάνης είναι ίση με 6591.3 km². Ορίζεται στα βόρεια από τον ορεινό όγκο των Χασίων, στα δυτικά και νοτιοδυτικά από το Θεσσαλικό τμήμα της οροσειράς της Πίνδου και στα νότια από τα όρη της Όθρυος. Το μεγαλύτερο και κυριότερο μέρος της λεκάνης ταυτίζεται με τη δυτική Θεσσαλική πεδιάδα και περιλαμβάνει τις πεδιάδες Τρικάλων, Καρδίτσας, και Σοφάδων. Στα βόρεια, δυτικά και νότια όριά της είναι ορεινή, δασοσκεπής, με έντονο ανάγλυφο και με μεγάλες υψομετρικές διακυμάνσεις. Ο πίνακας 5.8 παρουσιάζει τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής της Λάρισας και το Σχήμα 5.20 τη γεωγραφική της θέση. Όπως φαίνεται από το παρακάτω σχήμα η ανάλυση επικεντρώθηκε στο μεγαλύτερο μέρος του Πηνειού εκτός του παραποτάμου Τιταρησίου και του χειμάρρου Κουσμπασανιώτη.

Πίνακας 5.8. Χαρακτηριστικά λεκάνης απορροής Λάρισας.

Λεκάνη απορροής	Έκταση (km ²)	Υψομετρικό εύρος (m)	Μέσο Υψόμετρο (m)	Μέση Ετήσια Υετόπτωση (mm)	Μέση Ετήσια Απορροή (mm)	Συντελεστής Απορροής
Λάρισα	6591	70-2000	451	720	290	0.40



Σχήμα 5.20. Ψηφιακό μοντέλο εδάφους της λεκάνης απορροής στη θέση Λάρισα

Επεξεργασμένα μηνιαία δεδομένα βροχόπτωσης από ένα μεγάλο δίκτυο βροχομετρικών σταθμών για την περίοδο Οκτώβριος 1960 μέχρι τον Σεπτέμβριο του 2002 χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της

επιφανειακής βροχόπτωσης. Η μηνιαία επιφανειακή υετόπτωση της υδρολογικής λεκάνης υπολογίστηκαν με τη μέθοδο των πολυγώνων Thiessen χρησιμοποιώντας σταθμούς που βρίσκονται μέσα ή κοντά στη λεκάνη απορροής, τροποποιημένη για το μέσο υψόμετρο της λεκάνης με τη χρήση της βροχοβαθμίδας [Παπαμιχαήλ, 2001]. Η μέση μηνιαία επιφανειακή θερμοκρασία υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας τα μέσα μηνιαία στοιχεία θερμοκρασίας από 27 μετεωρολογικούς σταθμούς με τη μέθοδο της θερμοβαθμίδας. Η μηνιαία επιφανειακή δυνητική εξατμισοδιαπνοή έχει υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Thornthwaite [Τσακίρης, 1995]. Τέλος, τα μηνιαία στοιχεία απορροής από τον υδρομετρικό σταθμό της Λάρισας χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση του UTHBAL υδρολογικού μοντέλου. Η εφαρμογή του UTHBAL μοντέλου μαζί με τα στατιστικά κριτήρια της προσομοίωσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.9. Ο βαθμός απόδοσης Eff του υδρολογικού μοντέλου κρίνεται ικανοποιητικός και προσομοιώνει ικανοποιητικά τις παρατηρούμενες απορροές.

Πίνακας 5.9. Στατιστικά αποτελέσματα υδρολογικής προσομοίωσης

Λεκάνη απορροής	Βαθμός Απόδοσης, Eff	DV(%)	Συντελεστής Συσχέτισης, R	Περίοδος Βελτιστοποίησης
Λάρισα	0.76	0.39	0.87	Οκτ 60 - Φεβ 67, Ιαν 69 - Μαρ 91

Στη συνέχεια το υδρολογικό μοντέλο εφαρμόστηκε για την προσομοίωση, συμπλήρωση και επέκταση των χρονοσειρών παροχομετρικών μετρήσεων και τη δημιουργία χρονοσειρών εδαφικής υγρασίας για την περίοδο 1960-2002. Η εφαρμογή των τεστ ελέγχου του συντελεστή ασυμμετρίας των παραγόμενων χρονοσειρών (skewness test of normality), [Snedecor and Cochran, 1980] και του τεστ συσχέτισης Filliben probability plot correlation test [Filliben, 1975] στο 10% επίπεδο σημαντικότητας για κάθε μήνα (24 τεστ για κάθε χρονοσειρά) δείχνουν ότι σχεδόν όλοι οι μήνες (εκτός των καλοκαιρινών) είναι στατιστικά σημαντικοί και δεν ακολουθούν κανονική κατανομή. Για το λόγο αυτό οι προσομοιωμένες χρονοσειρές απορροής και εδαφικής υγρασίας κανονικοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας τον μετασχηματισμό Box-Cox και ανασχηματίστηκαν με βάση την κανονική κατανομή. Έτσι, η υδρολογική δριμύτητα ξηρασίας υπολογίστηκε από τα δεδομένα εξόδου του μηνιαίου εννοιολογικού μοντέλου ισοζυγίου. Οι υπολογισμένες δείκτες της απορροής (Z_{WBI}) και της εδαφικής υγρασίας (Z_{SMI}) συγκρίθηκαν με τους μετεωρολογικούς δείκτες ξηρασίας σε τρεις αναλύσεις: συνεχώς (θεωρώντας όλους τους μήνες ως συνέχεια), μηνιαία και για επιλεγμένα ιστορικά γεγονότα ξηρασίας. Η σύγκριση έγινε με τη χρήση του συντελεστή συσχέτισης Pearson. Ο Πίνακας 5.10 παρουσιάζει το συντελεστή συσχέτισης, R, του δείκτη ξηρασίας SPI υπολογισμένου σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες με τους δείκτες εδαφικής υγρασίας και απορροής της υδρολογικής λεκάνης στη θέση Λάρισα. Από τον Πίνακα 5.10 προκύπτει ότι οι επιφανειακές απορροές συσχετίζονται καλύτερα με τους δείκτες ξηρασίας SPI-5μηνών και SPI-6μηνών, ενώ οι χρονοσειρές της εδαφικής υγρασίας αποκρίνονται καλύτερα με τον δείκτη ξηρασίας SPI-3μηνών και μετά με το SPI-4. Το Σχήμα 5.21 δείχνει τις χρονοσειρές των υπολογισμένων δεικτών ξηρασίας επιφανειακών απορροών Z_{WBI} και εδαφικής υγρασίας Z_{SMI} με τις δύο χρονικές κλίμακες του SPI που παρουσίασαν την καλύτερη συσχέτιση (Πίνακας 5.10). Ο οπτικός έλεγχος των παραπάνω χρονοσειρών δείχνει ότι οι ξηρασίες ήταν αρκετά συχνές τις δεκαετίες του 1970, του 1980 και τις αρχές του 2000. Ωστόσο διακρίνονται τρεις περίοδοι που χαρακτηρίζονται δριμύτατες όπως προκύπτουν από την τιμή των μετεωρολογικών δεικτών και των Z_{WBI} και του Z_{SMI} . Πιο συγκεκριμένα η χρονική εξέλιξη του υδρολογικού δείκτη με τους καλύτερους μετεωρολογικούς δείκτες τα οποία αναλύθηκαν προηγουμένως έδειξαν ότι κατά τα υδρολογικά έτη Οκτώβριος 1976 - Σεπτέμβριος 1978, Οκτώβριος 1987 - Σεπτέμβριος 1990 και Οκτώβριος 2000 -Σεπτέμβριος 2002 σημειώθηκαν χρονικά μεγάλες περίοδοι ξηρασίας με μεγάλη δριμύτητα.

Η σύγκριση των υδρολογικών δεικτών ξηρασίας για τα γεγονότα αυτά με το SPI δείχνει ότι η αμέσως επόμενη χρονική κλίμακα υπολογισμού αντιπροσωπεύει καλύτερα τα γεγονότα ξηρασίας. Έτσι, ενώ

για όλη την χρονοσειρά του δείκτη ξηρασίας Z_{WBI} ο δείκτης SPI-5 αντιπροσωπεύει καλύτερα την υδρολογική ξηρασία, ο δείκτης SPI-6 είναι πιο αντιπροσωπευτικός των γεγονότων ξηρασίας. Το ίδιο παρατηρείται και για τον δείκτη ξηρασίας εδαφικής υγρασίας Z_{SMI} . Η ανάλυση συσχέτισης των μετεωρολογικών δεικτών SPI και των υδρολογικών δεικτών έγινε επίσης σε μηνιαία κλίμακα. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.22 και δείχνει τον συντελεστή συσχέτισης R των SPI με τους αντίστοιχους υδρολογικούς δείκτες ξηρασίας. Ο δείκτης SPI παρουσιάζει μεγάλες τιμές του συντελεστή συσχέτισης (≥ 0.9) με τον Z_{WBI} για χρονικές κλίμακες SPI από 3 έως και 7 μηνών για τους μήνες Οκτώβριο – Ιανουάριο. Για τους μήνα Φεβρουάριο οι δείκτες SPI-2 έως και SPI-10 παρουσιάζουν τις καλύτερες συσχετίσεις, ενώ από Μάρτιο έως Απρίλιο οι δείκτες SPI-2, SPI-3, SPI-4 και SPI-5 παρουσιάζουν την καλύτερη απόκριση. Στους καλοκαιρινούς μήνες ο SPI-5 παρουσιάζει την καλύτερη συσχέτιση με τον υδρολογικό δείκτη (Σχήμα 5.22^α). Ο δείκτης εδαφικής υγρασίας για τους χειμερινούς παρουσιάζει πολύ καλές συσχετίσεις με τους δείκτες SPI 3-6 μηνών, ενώ για τους μήνες Φεβρουάριο και Μάρτιο οι SPI-1 και SPI-2 αποκρίνονται καλύτερα. Για τους καλοκαιρινούς μήνες, ο SPI-3 και SPI-4 είναι οι πιο αντιπροσωπευτικοί δείκτες της εδαφικής υγρασίας (Σχήμα 5.22^β). Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι οι δείκτες SPI-5 και SPI-6 είναι οι πιο αντιπροσωπευτικοί της υδρολογικής ξηρασίας ενώ της εδαφικής υγρασίας ο SPI-3 μηνών.

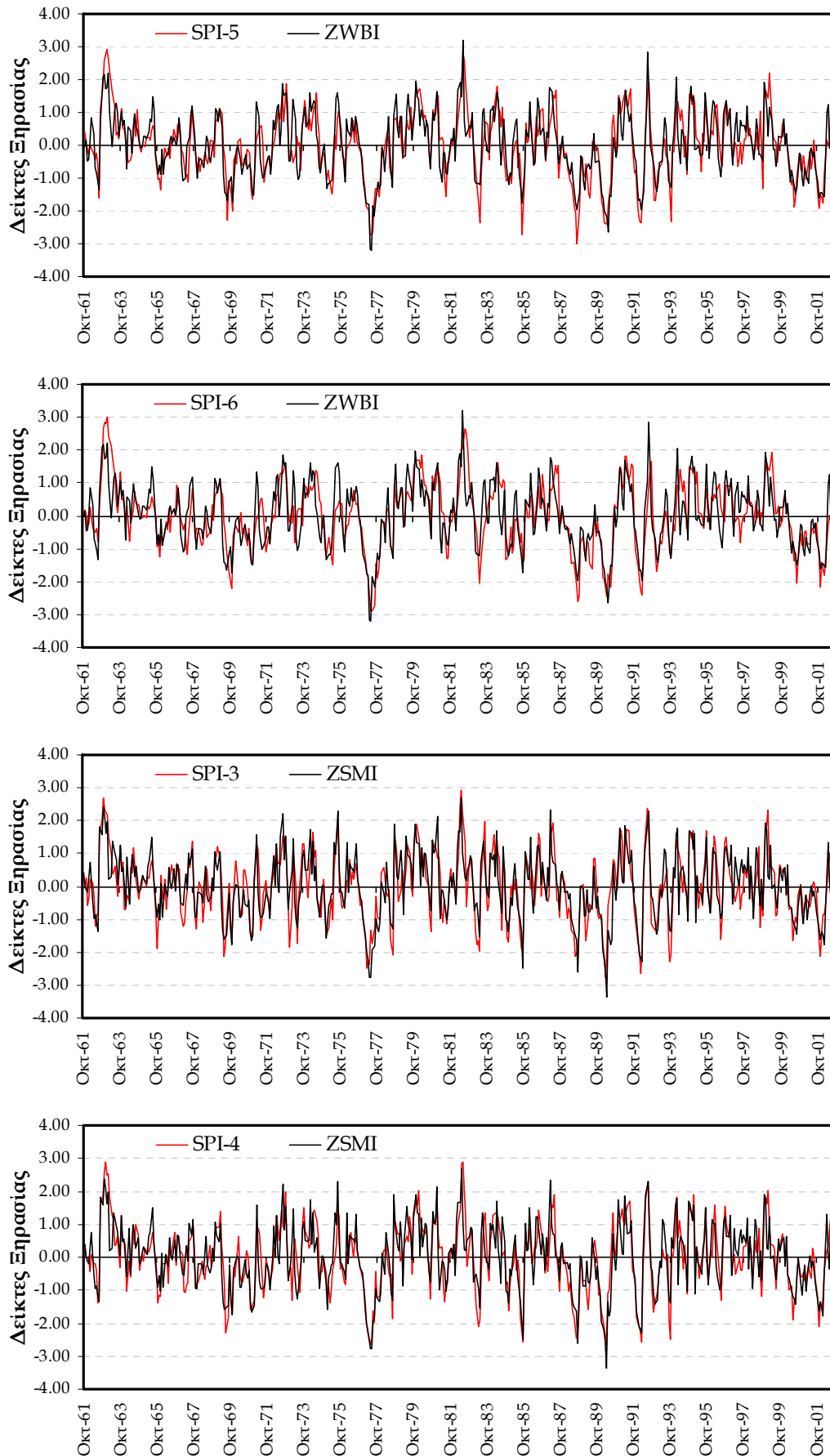
Η διακρίβωση της υδρολογικής ξηρασίας με τους δείκτη SPI υπολογισμένο σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες από 1 μήνα έως 24 μήνες έγινε και τις παρατηρούμενες απορροές της υδρολογικής λεκάνης Λάρισας. Οι παρατηρούμενες απορροές κανονικοποιήθηκαν σε μηνιαία βάση με τον μετασχηματισμό Box-Cox και μετασχηματίστηκαν με βάση την κανονική κατανομή για να δώσουν τον παραγόμενο δείκτη Z-απορροής. Ο Πίνακας 5.11 παρουσιάζει το συντελεστή συσχέτισης, R, του δείκτη ξηρασίας SPI υπολογισμένου σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες με τον δείκτη Z-απορροής. Από τον Πίνακα 5.11 προκύπτει ότι οι επιφανειακές παρατηρούμενες απορροές συσχετίζονται καλύτερα με τον δείκτη ξηρασίας SPI-9 μηνών. Γενικά οι τιμές του συντελεστή συσχέτισης είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες τιμές του δείκτη Z_{WBI} που προέκυψαν από τις προσομοιωμένες απορροές. Επίσης, οι χρονικές κλίμακες του SPI που προσδιορίζουν καλύτερα τον δείκτη Z-απορροής έχουν μεγάλο εύρος (από 2-μηνών έως και 10-μηνών) και έχουν παραπλήσιες συσχετίσεις, που κάνει δύσκολη την εύρεση της κατάλληλης χρονικής κλίμακας του SPI. Ενδεικτικά, οι χρονοσειρές του Z-απορροής και του SPI-9 απεικονίζονται στο Σχήμα 5.23. Και πάλι οι παρατηρούμενες απορροές παρουσιάζουν γεγονότα ξηρασίας για τις ιστορικές περιόδους Οκτώβριος 1976 - Σεπτέμβριος 1978, Οκτώβριος 1988- Σεπτέμβριος 1991. Η ανάλυση συσχέτισης σε μηνιαία κλίμακα παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.24 που και πάλι είναι δύσκολο να αναγνωριστεί η κατάλληλη χρονική κλίμακα του SPI για τον δείκτη Z-απορροής των παρατηρούμενων παροχών.

Πίνακας 5.10. Συντελεστής συσχέτισης, R, της υδρολογικών δεικτών απορροής και εδαφικής υγρασίας με τον δείκτη ξηρασίας SPI για πολλαπλές χρονικές κλίμακες στη λεκάνη απορροής Λάρισα

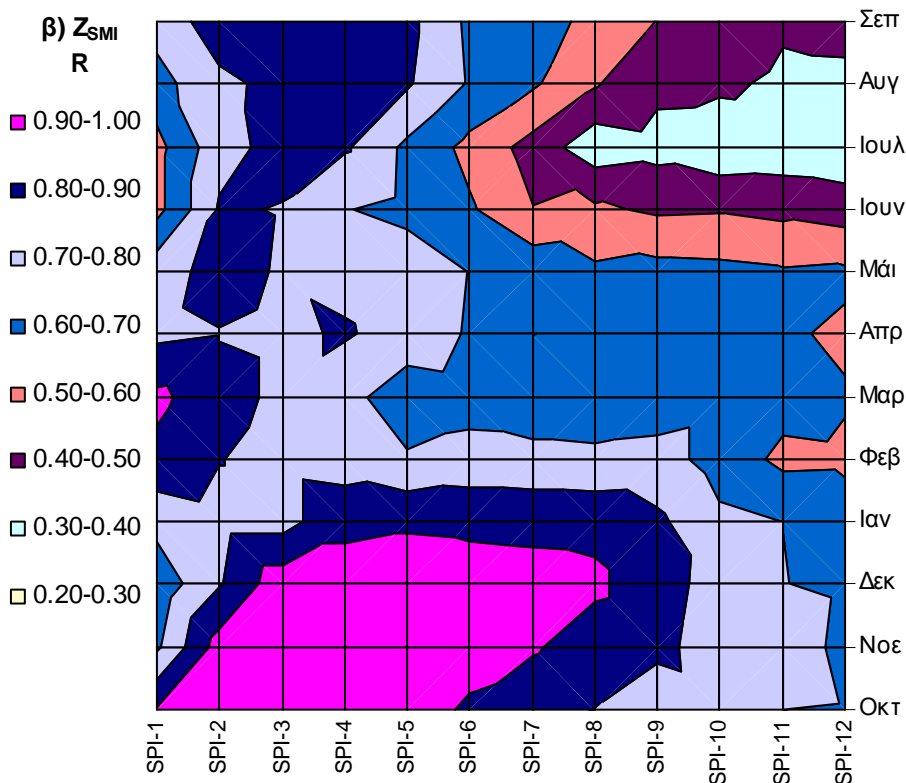
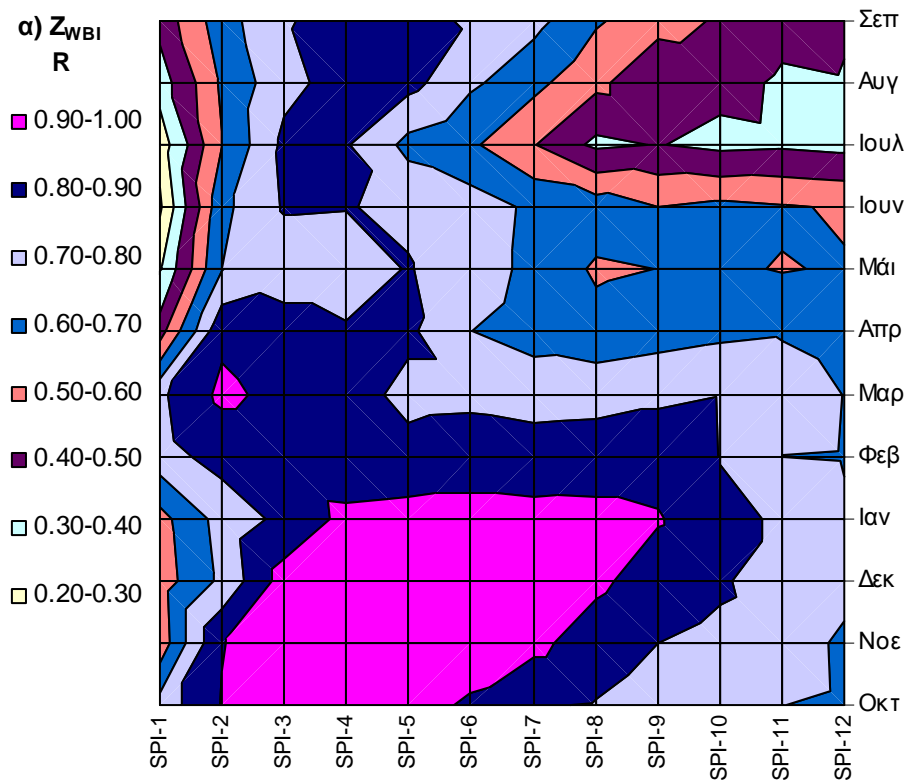
	SPI-1	SPI-2	SPI-3	SPI-4	SPI-5	SPI-6	SPI-7	SPI-8	SPI-9	SPI-10	SPI-11	SPI-12	SPI-24
Z_{WBI}	0.49	0.76	0.80	0.83	0.85	0.84	0.75	0.70	0.68	0.66	0.63	0.60	0.45
Z_{SMI}	0.74	0.83	0.84	0.83	0.80	0.75	0.70	0.66	0.63	0.61	0.57	0.55	0.42

Πίνακας 5.11. Συντελεστής συσχέτισης, R, της υδρολογικών δεικτών απορροής και εδαφικής υγρασίας με τον δείκτη ξηρασίας SPI για πολλαπλές χρονικές κλίμακες στη λεκάνη απορροής Λάρισα

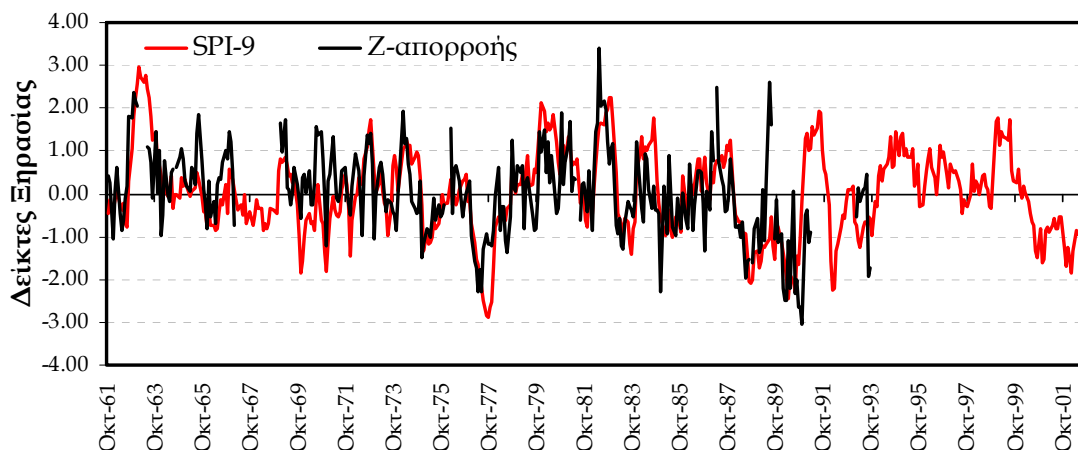
	SPI-1	SPI-2	SPI-3	SPI-4	SPI-5	SPI-6	SPI-7	SPI-8	SPI-9	SPI-10	SPI-11	SPI-12	SPI-24
Z-απορροής	0.49	0.60	0.60	0.58	0.59	0.59	0.59	0.61	0.62	0.60	0.58	0.55	0.44



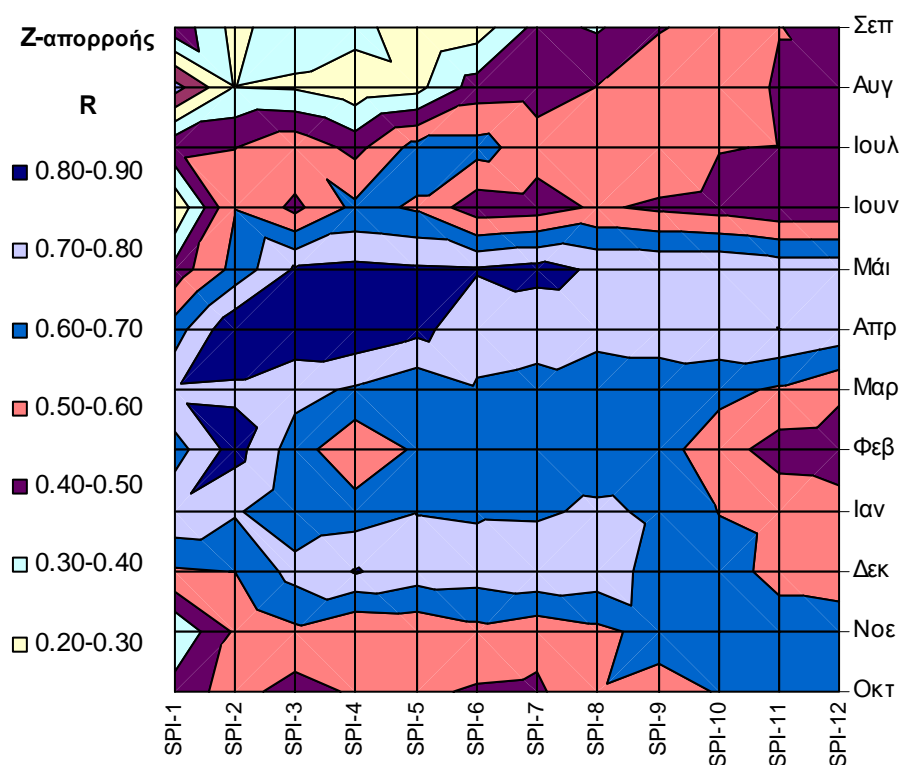
Σχήμα 5.21. Χρονοσειρές μετεωρολογικών και υδρολογικών δεικτών.



Σχήμα 5.22. Μηνιαίες τιμές του συντελεστή συσχέτισης, R, μεταξύ των μετεωρολογικών δεικτών SPI και α) δείκτη ξηρασίας επιφανειακών απορροών Z_{WBI} και β) δείκτη ξηρασίας εδαφικής υγρασίας Z_{SMI} .



Σχήμα 5.23. Χρονοσειρές μετεωρολογικών και υδρολογικών δεικτών.

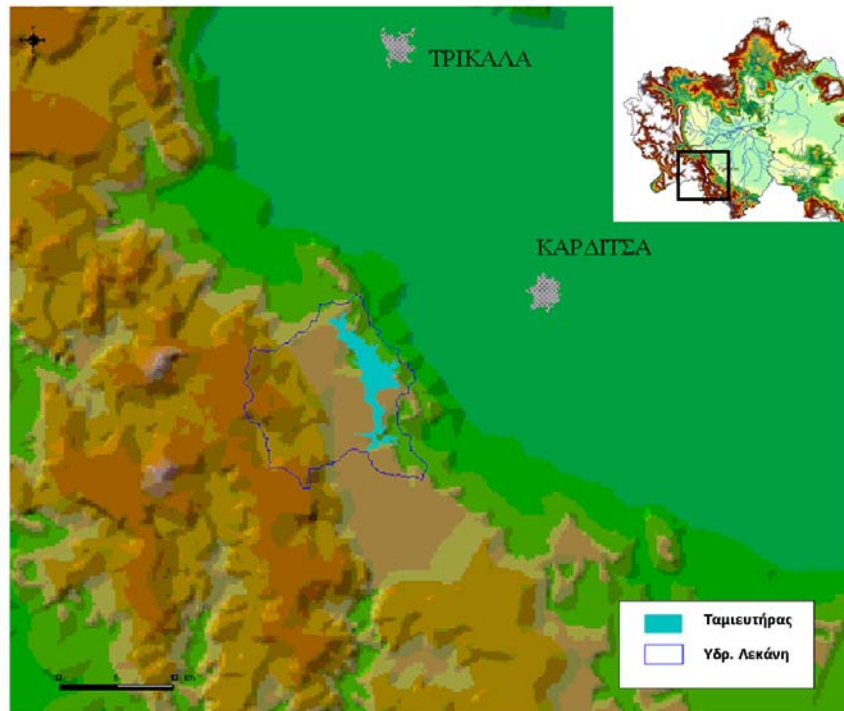


Σχήμα 5.24. Μηνιαίες τιμές του συντελεστή συσχέτισης, R, μεταξύ των μετεωρολογικών δεικτών SPI και του δείκτη ξηρασίας επιφανειακών παρατηρούμενων απορροών Z-απορροής.

5.6.2. Αναγνώριση ξηρασίας υδατικών συστημάτων

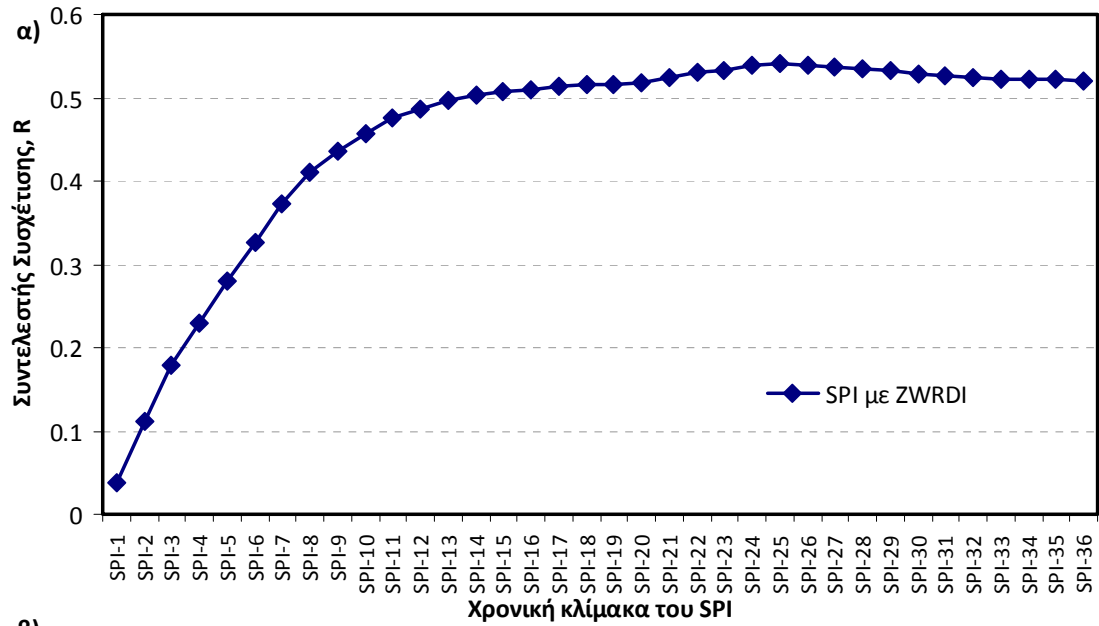
Η διακρίβωση της ξηρασίας σε υδροσυστήματα έγινε για τον ταμιευτήρα του Ταυρωπού ή Πλαστήρα όπου υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα καθαρών αποθηκεύσεων στον ταμιευτήρα. Τα δεδομένα των καθαρών αποθηκεύσεων (απόθεμα ταμιευτήρα την πρώτη κάθε μήνα) προήλθαν από την μελέτη των Ευστρατιάδη και συνεργατών, [2002]. Η περιοχή μελέτης ορίζεται από τη λεκάνη απορροής του ταμιευτήρα Πλαστήρα (Σχήμα 5.25). Η τεχνητή λίμνη Πλαστήρα, η οποία βρίσκεται 18 km δυτικά της πόλης της Καρδίτσας, δημιουργήθηκε από την κατασκευή τοξωτού φράγματος από σκυρόδεμα στον παραπόταμο Ταυρωπό (Μέγδοβα) του Αχελώου, κατά τη χρονική περίοδο 1956-62. Το σχήμα της

λίμνης είναι επίμηκες, με κατεύθυνση βορρά-νότου. Ο ταμιευτήρας έχει μέγιστο μήκος 14 km, μέγιστο πλάτος 4 km και μέγιστο βάθος περί τα 60 m, ενώ το μήκος της ακτογραμμής του ξεπερνά τα 70 km. Ο ταμιευτήρας εξυπηρετεί πολλαπλές χρήσεις νερού (άρδευση, ύδρευση, παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας, αναψυχή) και είναι άρρηκτα συνδεδεμένος με την οικονομικές και κοινωνικές δραστηριότητες της ευρύτερης περιοχής μελέτης. Η στάθμη υδροληψίας του ταμιευτήρα Πλαστήρα βρίσκεται σε απόλυτο υψόμετρο 776.0 m, ενώ η στάθμη υπερχείλισης βρίσκεται στα 792.0 m. Με βάση την καμπύλη στάθμης-αποθέματος, η μικτή χωρητικότητα του ταμιευτήρα ανέρχεται σε 361.8 hm³, ενώ ο νεκρός του όγκος φτάνει τα 75.5 hm³. Κατά συνέπεια, η ωφέλιμη χωρητικότητα του ταμιευτήρα εκτιμάται σε 286.3 hm³ [Ευστρατιάδης και συνεργάτες, 2002].



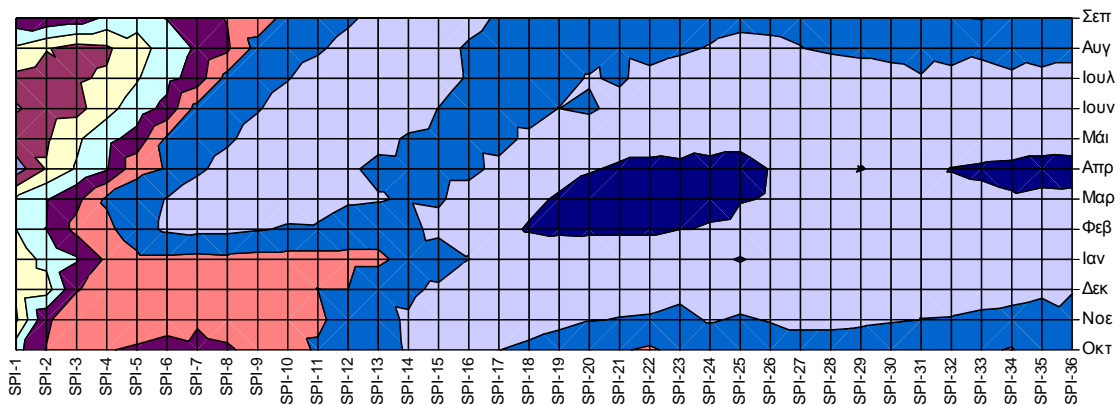
Σχήμα 5.25. Ο ταμιευτήρας Πλαστήρας και η λεκάνη απορροής του (από Ευστρατιάδης και συνεργάτες, 2002).

Η διακρίβωση της ξηρασίας υδατικών συστημάτων έγινε με τον δείκτη SPI υπολογισμένο σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες από 1 μήνα έως 36 μήνες και τις υπολογισμένες καθαρές αποθηκεύσεις (αποθέματα) του ταμιευτήρα. Οι παρατηρούμενοι καθαροί όγκοι κανονικοποιήθηκαν σε μηνιαία βάση με τον μετασχηματισμό Box-Cox και μετασχηματίστηκαν με βάση την κανονική κατανομή για να δώσουν τον παραγόμενο δείκτη ξηρασίας υδατικών συστημάτων Z_{WRDI} . Ο συντελεστής συσχέτισης, R , των χρονοσειρών των παραγόμενων δεικτών παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.26^α όπου φαίνεται ότι οι κλίμακες του SPI-από 23-26 μηνών αντιπροσωπεύουν καλύτερα την ξηρασία υδατικών συστημάτων του ταμιευτήρα. Οι ίδιες χρονικές κλίμακες του SPI παρουσιάζονται ως πιο κατάλληλες για την αναγνώριση του Z_{WRDI} και για τη σύγκριση των δεικτών ξηρασίας σε μηνιαία κλίμακα (Σχήμα 5.26^β). Η σύγκριση του SPI-24 με τον δείκτη Z_{WRDI} δείχνει ότι οι χρονοσειρές ταυτίζονται προς το τέλος της δεκαετίας του 80 και προσομοιώνει ικανοποιητικά το ιστορικό γεγονός ξηρασίας της πενταετίας 1988-1993 (Σχήμα 5.26^γ).

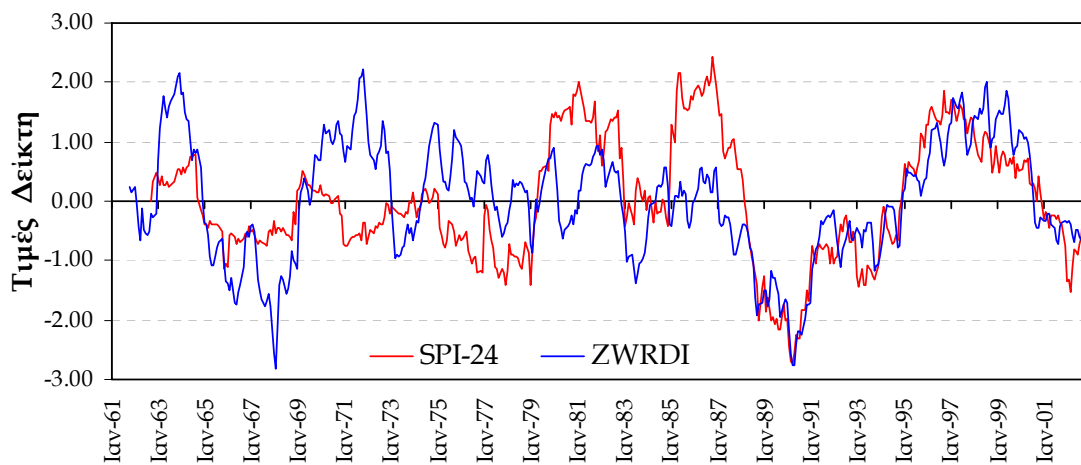


β)

■ -0.20-0.10 ■ -0.10-0.00 □ 0.00-0.10 □ 0.10-0.20 ■ 0.20-0.30 ■ 0.30-0.40 ■ 0.40-0.50 □ 0.50-0.60 ■ 0.60-0.70



γ)



Σχήμα 5.26. Αποτελέσματα συσχέτισης του SPI με τον Z_{WRDI} α) συντελεστής συσχέτισης για όλη τη χρονοσειρά, β) μηνιαίος συντελεστής συσχέτισης και γ) αναγνώριση γεγονότων ξηρασίας.

5.6.3. Συμπεράσματα

Η αναγνώριση διαφόρων τύπων ξηρασίας με βάση τον μετεωρολογικό δείκτη ξηρασίας SPI που υπολογίστηκε σε διάφορες χρονικές κλίμακες επιχειρήθηκε στις προηγούμενες παραγράφους. Η σύγκριση του δείκτη SPI με ένα δείκτη εδαφικής υγρασίας και ένα δείκτη απορροών που υπολογίστηκαν από προσομοιωμένες αντίστοιχες χρονοσειρές του υδρολογικού ισοζυγίου της λεκάνης απορροής Λάρισα έδειξε ότι η χρονική κλίμακα των 3-μηνών του SPI είναι αντιπροσωπευτική της ξηρασίας εδαφικής υγρασίας.

Για τις προσομοιωμένες επιφανειακές απορροές στην ίδια λεκάνη το SPI-6-μηνών αποκρίνεται καλύτερα. Τα αποτελέσματα της συσχέτισης του SPI με τις παρατηρούμενες απορροές της λεκάνης απορροής Λάρισα δείχνουν ότι η χρονική κλίμακα των 9-μηνών προσδιορίζει καλύτερα την μηνιαία απορροή. Μία πρόσφατη μελέτη για την αναγνώριση της υδρολογικής ξηρασίας στις υπολεκάνες του Πηνειού ποταμού δείχνει ότι η χρονική κλίμακα υπολογισμού του SPI μεταβάλλεται από 3 έως 12 μήνες ανάλογα με την υπολεκάνη και ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί το SPI σε επιχειρησιακά συστήματα διαχείρισης της υδρολογικής ξηρασίας αν διαπιστωθεί ακριβώς η χρονική κλίμακα υπολογισμού του SPI για συγκεκριμένο τύπο ξηρασίας και πεδίο εφαρμογής [Vasiliades et al., 2010]. Το παραπάνω συμπέρασμα επιβεβαιώνει και η ανάλυση συσχέτισης των καθαρών αποθηκευμένων όγκων της λίμνης Πλαστήρα με τον δείκτη SPI που αντιπροσωπεύεται καλύτερα από τον SPI-24 μηνών. Παρόμοια αποτελέσματα έδειξαν και άλλες μελέτες σύγκρισης μετεωρολογικών δεικτών με υδρολογικούς δείκτες και δείκτες υδατικών συστημάτων [Szalai et al., 2000; Vicente-Serrano and Lopez-Moreno, 2005; Mendicino et al., 2008; Edossa et al., 2009; Fiorillo and Guadagno, 2009; López-Moreno et al., 2009; Nalbantis and Tsakiris, 2009].

Από τα ανωτέρω συμπεραίνεται ότι το SPI μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιχειρησιακά για αναγνώριση τύπων ξηρασίας σε συστήματα παρακολούθησης και διαχείρισης της ξηρασίας. Έτσι, στην παρούσα διατριβή, ο δείκτης SPI υπολογισμένος για χρονικές κλίμακες 3-μηνών, 6-μηνών, 9-μηνών, 12-μηνών και 24-μηνών επιλέχτηκε για την χωροχρονική ανάλυση, προσομοίωση και πρόγνωση ξηρασίας στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού. Στα επόμενα κεφάλαια παρουσιάζονται τα στάδια της χωροχρονικής προσομοίωσης και πρόγνωσης και το σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης της ξηρασίας.

6. ΧΩΡΟΧΡΟΝΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΞΗΡΑΣΙΑΣ

Ο δείκτης SPI υπολογισμένος για χρονικές κλίμακες 3-month, 6-month, 9-month, 12-month και 24-month επιλέχτηκε για τη χωρική προσομοίωση διαφόρων τύπων ξηρασίας στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού. Οι οκτώ (8) μεθοδολογίες χωρικής παρεμβολής που περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 3 επιλέχθηκαν για την χωροχρονική προσομοίωση των δεικτών ξηρασίας SPI στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού για την περίοδο Οκτ. 1960 – Σεπ. 2002. Οι εξεταζόμενες μέθοδοι περιλαμβάνουν απλές μη γεωστατιστικές μεθόδους, γεωστατιστικές μεθόδους και συνδυαστικές μεθόδους που ενσωματώνουν δευτερογενείς πληροφορίες. Η επιλογή βασίστηκε στη διεθνή βιβλιογραφία και στο σκοπό της παρούσας διατριβής που είναι η δημιουργία ενός κατανεμημένου ψηφιακού (distributed, raster-based) συστήματος πρόγνωσης και προσομοίωσης ξηρασίας για επιχειρησιακές εφαρμογές. Σκοπός της χωροχρονικής προσομοίωσης είναι η αξιολόγηση του σφάλματος των χωρικών μεθόδων παρεμβολής στην απεικόνιση της ξηρασίας και η επιλογή της βέλτιστης μεθόδου χωρικής προσομοίωσης για επιχειρησιακούς σκοπούς. Η αξιολόγηση των μεθόδων βασίστηκε στους παραγόμενους ψηφιακούς χωρικούς χάρτες μηνιαίων τιμών του SPI για χρονικές κλίμακες 3-month, 6-month, 9-month, 12-month και 24-month ισοδιάστασης (μέγεθος φαντίου, pixel size) 1-km αλλά και σε στατιστικά κριτήρια με χρήση της τεχνικής διασταυρωμένη επιβεβαίωση των προβλέψεων (cross-validation) των 48 σταθμών ανάπτυξης και ανεξάρτητης χωρικής πιστοποίησης των 18 βροχομετρικών σταθμών (independent validation). Διαπιστωμένα γεγονότα ξηρασίας επιλέχθηκαν για την θεματική απεικόνιση των χαρτών ξηρασίας.

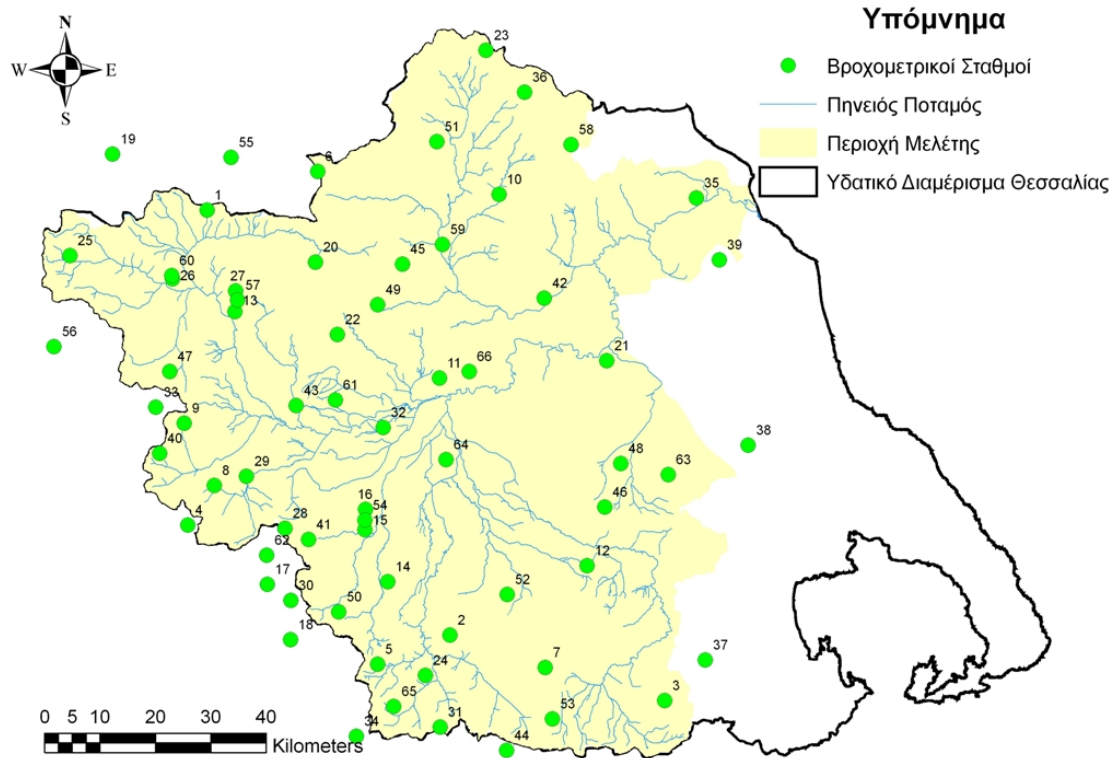
6.1. Βροχομετρικοί Σταθμοί

Για την εφαρμογή των χωρικών μεθόδων παρεμβολής στην χωρική και χρονική ανάλυση του δείκτη ξηρασίας χρησιμοποιήθηκαν 66 βροχομετρικοί σταθμοί που βρίσκονται στην ευρύτερη περιοχή της υδρολογικής λεκάνης. Οι σταθμοί δεν βρίσκονται όλοι μέσα στα όρια της υδρολογικής λεκάνης αλλά ορισμένοι και εκτός αυτής με σκοπό την ακριβέστερη και ολοκληρωμένη χωρική κάλυψη της περιοχής μελέτης. Οι βροχομετρικοί σταθμοί παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.1 και στο Σχήμα 6.1. Για την αξιολόγηση των χωρικών μεθοδολογιών επιχειρήθηκε στην αρχή τυχαίος διαχωρισμός των σταθμών βροχόπτωσης σε σταθμούς ανάπτυξης ($\approx 70\%$) και σταθμούς πιστοποίησης ($\approx 30\%$) αλλά ο τυχαίος διαχωρισμός δεν έδωσε ικανοποιητική χωρική κατανομή σταθμών. Έτσι πραγματοποιήθηκε επιβλεπόμενη ταξινόμηση σταθμών βροχόπτωσης με κριτήρια την χωρική και υψομετρική κάλυψη της περιοχής μελέτης.

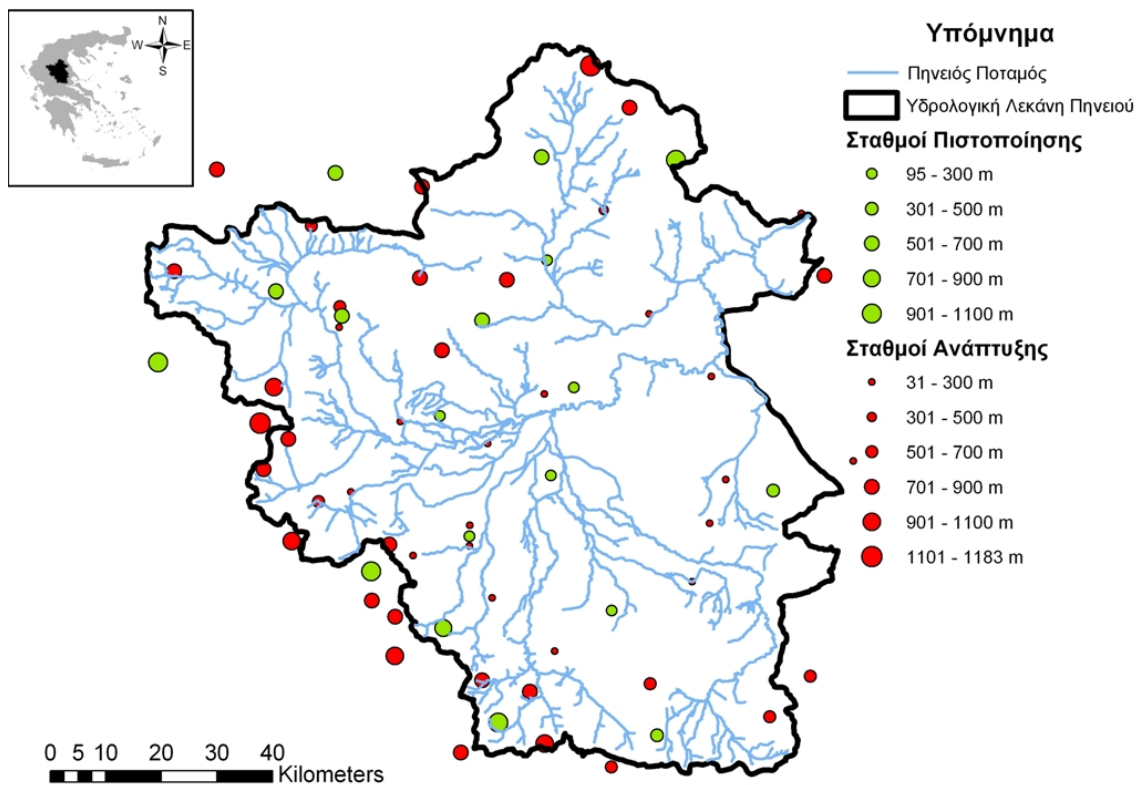
Εφαρμογή της επιβλεπόμενης ταξινόμησης έδωσε 48 σταθμούς ανάπτυξης (73% των συνολικών σταθμών βροχόπτωσης) και 18 σταθμούς πιστοποίησης (27% των συνολικών σταθμών βροχόπτωσης). Τα αποτελέσματα της επιβλεπόμενης χωρικής ταξινόμησης και η υψομετρική κατανομή των βροχομετρικών σταθμών παρουσιάζονται στα Σχήματα 6.2 και 6.3, αντίστοιχα. Επίσης οι σταθμοί ανάπτυξης παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.1 με ID από 1-48 και οι σταθμοί πιστοποίησης (με πλάγια γραφή) με ID από 49-66 (Πίνακας 6.1 και Σχήμα 6.1). Τέλος, το ψηφιακό ανάγλυφο της υδρολογικής λεκάνης του Πηνειού ποταμού με μέγεθος φαντίου 1-km, που χρειάζεται στις συνδυαστικές χωρικές μεθοδολογίες, παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.4.

Πίνακας 6.1. Σταθμοί βροχόπτωσης υδρολογικής λεκάνης Πηνειού

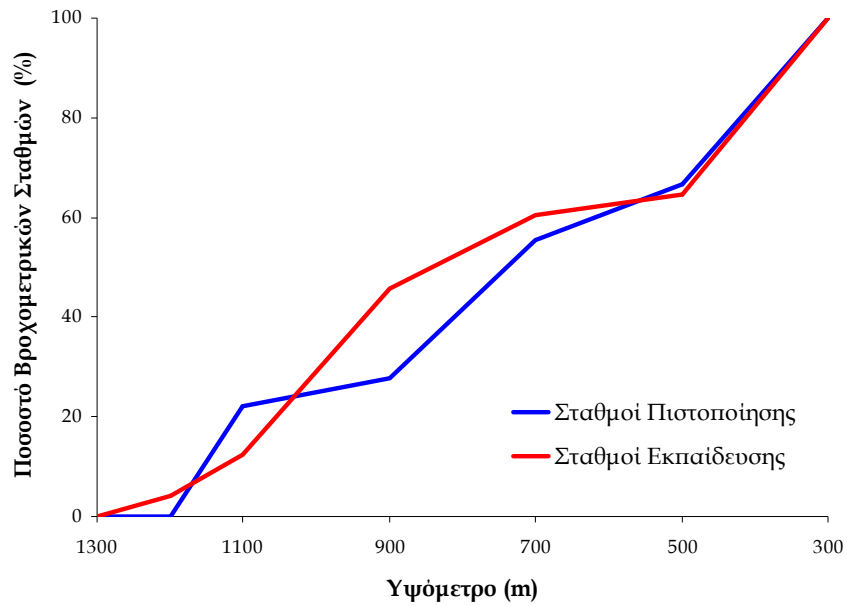
ID	Όνομα Σταθμού	Υψόμετρο (m)	Νομός	ID	Όνομα Σταθμού	Υψόμετρο (m)	Νομός
1	ΑΓΙΟΦΥΛΛΟΣ	581	ΤΡΙΚΑΛΩΝ	34	ΠΙΤΣΙΩΤΑ	800	ΦΘΙΩΤΙΔΑΣ
2	ΑΝΑΒΡΑ ΚΑΡΔΙΤΣΑΣ	208	ΚΑΡΔΙΤΣΑΣ	35	ΠΥΡΓΕΤΟΣ	31	ΛΑΡΙΣΑΣ
3	ΑΝΑΒΡΑ ΜΑΓΝΗΣΙΑΣ	700	ΜΑΓΝΗΣΙΑ	36	ΠΥΘΕΙΟ	750	ΛΑΡΙΣΑΣ
4	ΑΡΓΙΘΕΑ	980	ΚΑΡΔΙΤΣΑΣ	37	ΣΚΟΠΙΑ	580	ΛΑΡΙΣΑΣ
5	ΒΑΘΥΛΑΚΟΣ	800	ΚΑΡΔΙΤΣΑΣ	38	ΣΩΤΗΡΙΟ	51	ΛΑΡΙΣΑΣ
6	ΔΕΣΚΑΤΗ	850	ΓΡΕΒΕΝΩΝ	39	ΣΠΗΛΙΑ	813	ΛΑΡΙΣΑΣ
7	ΔΟΜΟΚΟΣ	615	ΦΘΙΩΤΙΔΑΣ	40	ΣΤΟΥΡΝΑΡΕΪΚΑ	860	ΤΡΙΚΑΛΩΝ
8	ΔΡΑΚΟΤΡΥΠΑ	680	ΚΑΡΔΙΤΣΑΣ	41	ΤΑΥΡΩΠΟΣ	220	ΚΑΡΔΙΤΣΑΣ
9	ΕΛΑΤΗ	900	ΤΡΙΚΑΛΩΝ	42	ΤΥΡΝΑΒΟΣ	92	ΛΑΡΙΣΑΣ
10	ΕΛΑΣΣΟΝΑ	314	ΛΑΡΙΣΑΣ	43	ΤΡΙΚΑΛΑ	149	ΤΡΙΚΑΛΩΝ
11	ΦΑΡΚΑΔΩΝΑ	87	ΤΡΙΚΑΛΩΝ	44	ΤΡΙΛΟΦΟ	580	ΦΘΙΩΤΙΔΑΣ
12	ΦΑΡΣΑΛΑ	138	ΛΑΡΙΣΑΣ	45	ΒΕΡΔΙΚΟΥΣΑ	863	ΛΑΡΙΣΑΣ
13	ΚΑΛΑΜΠΑΚΑ	222	ΤΡΙΚΑΛΩΝ	46	ΧΑΛΚΙΑΔΕΣ	250	ΛΑΡΙΣΑΣ
14	ΚΑΛΛΙΦΩΝΙ	100	ΚΑΡΔΙΤΣΑΣ	47	ΧΡΥΣΟΜΗΛΙΑ	940	ΤΡΙΚΑΛΩΝ
15	ΚΑΠΝΙΚΟΣ	110	ΚΑΡΔΙΤΣΑΣ	48	ΖΑΠΠΕΙΟ	170	ΛΑΡΙΣΑΣ
16	ΚΑΡΔΙΤΣΟΜΑΓΟΥΛΑ	95	ΚΑΡΔΙΤΣΑΣ	49	ΑΓΡΙΕΛΙΑ	700	ΤΡΙΚΑΛΩΝ
17	ΚΑΡΙΤΣΑ	900	ΚΑΡΔΙΤΣΑΣ	50	ΑΜΑΡΑΝΤΟΣ	800.0	ΚΑΡΔΙΤΣΑΣ
18	ΚΑΡΟΠΛΕΣΙ	910	ΕΥΡΥΤΑΝΙΑΣ	51	ΓΙΑΝΝΩΤΑ	578.0	ΛΑΡΙΣΑΣ
19	ΚΗΠΟΥΡΓΙΟ	868	ΓΡΕΒΕΝΩΝ	52	ΓΡΑΜΜΑΤΙΚΟ	95.0	ΚΑΡΔΙΤΣΑΣ
20	ΚΟΝΙΣΚΟΣ	860	ΤΡΙΚΑΛΩΝ	53	ΞΥΝΙΑΔΑ	456.0	ΦΘΙΩΤΙΔΑΣ
21	ΛΑΡΙΣΑ	73	ΛΑΡΙΣΑΣ	54	ΚΑΡΔΙΤΣΑ	138.0	ΚΑΡΔΙΤΣΑΣ
22	ΛΙΟΠΡΑΣΣΟ	740	ΤΡΙΚΑΛΩΝ	55	ΚΑΡΠΕΡΟ	510.0	ΓΡΕΒΕΝΩΝ
23	ΛΙΒΑΔΙ	1183	ΛΑΡΙΣΑΣ	56	ΚΑΤΑΦΥΤΟ	980.0	ΤΡΙΚΑΛΩΝ
24	ΛΟΥΤΡΟΠΗΓΗ	730	ΚΑΡΔΙΤΣΑΣ	57	ΚΡΑΤΙΚΟ ΚΤΗΜΑ	532.0	ΤΡΙΚΑΛΩΝ
25	ΜΑΛΑΚΑΣΙΟ	842	ΤΡΙΚΑΛΩΝ	58	ΚΡΥΟΒΡΥΣΗ	1030.0	ΛΑΡΙΣΑΣ
26	ΜΕΓ.ΚΕΡΑΣΙΑ	500	ΤΡΙΚΑΛΩΝ	59	ΜΑΓΟΥΛΑ	180	ΛΑΡΙΣΑΣ
27	ΜΕΤΕΩΡΑ	596	ΤΡΙΚΑΛΩΝ	60	ΜΕΓ.ΚΕΡΑΣΙΑ	560	ΤΡΙΚΑΛΩΝ
28	ΜΟΡΦΟΒΟΥΝΙ	780	ΚΑΡΔΙΤΣΑΣ	61	ΜΕΓΑΛΟΧΩΡΙ	100	ΤΡΙΚΑΛΩΝ
29	ΜΟΥΖΑΚΙ	226	ΚΑΡΔΙΤΣΑΣ	62	ΜΠΕΖΟΥΛΑ	901	ΚΑΡΔΙΤΣΑΣ
30	ΜΟΥΧΑ	870	ΚΑΡΔΙΤΣΑΣ	63	ΜΥΡΑ	320	ΛΑΡΙΣΑΣ
31	Π.ΓΙΑΝΝΙΤΣΟΥ	960	ΦΘΙΩΤΙΔΑΣ	64	ΠΑΛΑΜΑΣ	95	ΚΑΡΔΙΤΣΑΣ
32	ΠΕΔΙΝΟ	95	ΚΑΡΔΙΤΣΑΣ	65	ΡΕΝΤΙΝΑ	903	ΚΑΡΔΙΤΣΑΣ
33	ΠΕΡΤΟΥΛΙ	1160	ΤΡΙΚΑΛΩΝ	66	ΖΑΡΚΟ	200	ΤΡΙΚΑΛΩΝ



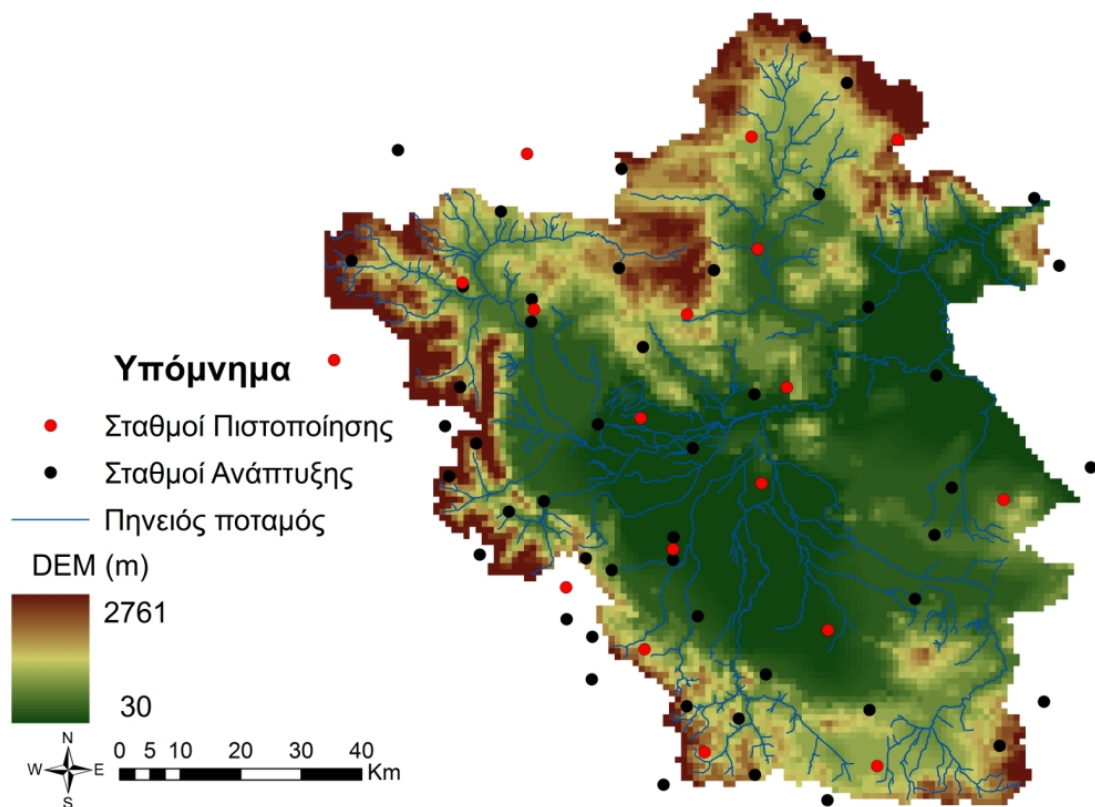
Σχήμα 6.1. Σταθμοί βροχόπτωσης υδρολογικής λεκάνης Πηνειού ποταμού



Σχήμα 6.2. Επιβλεπόμενη ταξινόμηση σταθμών βροχόπτωσης



Σχήμα 6.3. Υψομετρική κατανομή βροχομετρικών σταθμών



Σχήμα 6.4. Ψηφιακό μοντέλο εδάφους με μέγεθος φατνίου 1-km

6.2. Υπολογισμός χρονοσειρών SPI

Ο μετεωρολογικός δείκτης SPI υπολογίστηκε για όλους τους βροχομετρικούς σταθμούς για χρονικές κλίμακες 3-μηνών, 6-μηνών, 9-μηνών, 12-μηνών και 24-μηνών για την περίοδο Οκτ. 1960 – Σεπ. 2002. Ενδεικτικά, το Σχήμα 6.5 παρουσιάζει τις μηνιαίες χρονοσειρές SPI για έξι (6) αντιπροσωπευτικούς σταθμούς της υδρολογικής λεκάνης Πηνειού που είναι οι βροχομετρικοί σταθμοί Αγιάφυλλος (ID_1), Δομοκός (ID_7), Ελάτη (ID_9), Λάρισα (ID_21), Λιβιάδι (ID_23) και Ταυρωπός (ID_41) για χρονικές κλίμακες 3-μηνών, 9-μηνών και 24-μηνών.

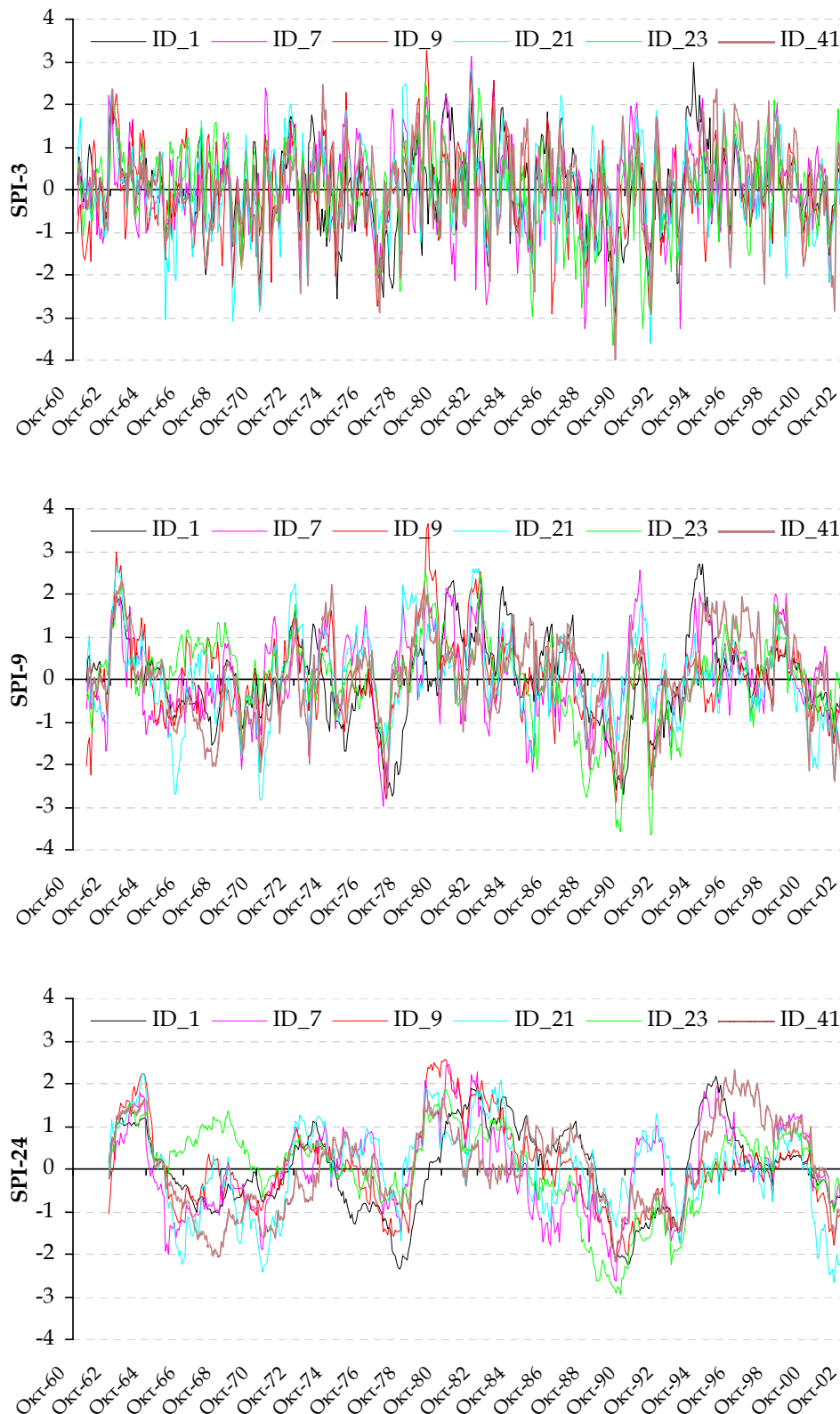
Γενικά, η εφαρμογή της Gamma κατανομής προσομοίωσε ικανοποιητικά την αντίστοιχη μηνιαία βροχόπτωση αφού δεν απορρίπτεται σε καμία περίπτωση σε επίπεδο σημαντικότητας 5% με βάση το Kolmogorov-Smirnov μη παραμετρικό τεστ. Οι παράμετροι της Gamma κατανομής που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο της μέγιστης πιθανοφάνειας για κάθε σταθμό εξετάστηκαν ως προς τη σύγκλιση τους στις βέλτιστες τιμές. Για το σκοπό αυτό, εφαρμόστηκε ένα στοχαστικό μηνιαίο μοντέλο βροχόπτωσης για την αναπαραγωγή και δημιουργία συνθετικών χρονοσειρών βροχόπτωσης και υπολογισμό του δείκτη SPI με βάση τις συνθετικές χρονοσειρές βροχόπτωσης. Λόγω του μεγάλου πλήθους των δεδομένων παρουσιάζονται μόνο τα αποτελέσματα για το βροχομετρικό σταθμό της Λάρισας (ID_21). Ο σταθμός αυτός επιλέχτηκε γιατί βρίσκεται σε χαμηλό υψόμετρο και παρουσιάζει μεγάλο πλήθος μηδενικών τιμών βροχόπτωσης τους καλοκαιρινούς μήνες που καθιστούν την στοχαστική προσομοίωση εξαιρετικά δύσκολη.

6.2.1. Στοχαστικό μοντέλο βροχόπτωσης

Τα στοχαστικά μοντέλα χρησιμοποιούνται για τη γέννηση μεγάλου μήκους συνθετικών χρονοσειρών, οι οποίες αναπαράγουν τη στατιστική δομή και τα χαρακτηριστικά των ιστορικών δεδομένων. Η χρήση συνθετικών χρονοσειρών σε προγράμματα διαχείρισης υδατικών συστημάτων επιτρέπει τη διερεύνηση της λειτουργίας τους για μεγάλο πλήθος υδροκλιματικών καταστάσεων. Με τον τρόπο αυτό ποσοτικοποιείται η αβεβαιότητα ως προς την εξέλιξη της φυσικής διαθεσιμότητας του νερού και παρέχεται η δυνατότητα εξαγωγής ασφαλών συμπερασμάτων ως προς την επίδοση και αξιοπιστία του υπό εξέταση υδροσυστήματος. Στοχαστικές μετεωρολογικές προσομοιώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δεδομένα εισόδου σε υδρολογικές και οικολογικές εφαρμογές για την ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας σε περιβαλλοντικά συστήματα που συνδέονται με την κλιματική μεταβλητότητα [Salas, 1993]. Εν ολίγοις, οι στοχαστικές προσομοιώσεις του κλίματος είναι τυχαίοι αριθμοί που έχουν τροποποιηθεί ώστε να έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά (όσον αφορά τη μέση τιμή, διασπορά, ασυμμετρία, κύρτωση, μακράς διάρκειας ανθεκτικότητα ή εμμονής, κλπ.), όπως τα ιστορικά στοιχεία από τα οποία βασίζονται. Κάθε στοχαστική σειρά (replicate or sequence) είναι διαφορετική και έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά σε σύγκριση με τα ιστορικά στοιχεία, αλλά ο μέσος όρος του κάθε χαρακτηριστικού από όλες τις στοχαστικές σειρές (επαναλήψεις) είναι το ίδιο με τα ιστορικά δεδομένα.

Χρησιμοποιώντας ιστορικά δεδομένα του κλίματος ως εισροές σε υπολογιστικά μοντέλα, σημαίνει ότι τα αποτελέσματα βασίζονται σε μία μόνο υλοποίηση του παρελθόντος κλίματος. Χρονοσειρές που έχουν προκύψει από στοχαστική προσομοίωση των ιστορικών δεδομένων προβλέπουν εναλλακτικές υλοποιήσεις που είναι εξίσου πιθανό να συμβούν, και συνεπώς μπορούν να αξιοποιηθούν σε υδρολογικές και οικολογικές εφαρμογές για την ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας σε περιβαλλοντικά συστήματα που συνδέονται με την κλιματική μεταβλητότητα. Τα δεδομένα στοχαστικών προσομοιώσεων χρησιμοποιούνται παραδοσιακά στην ανάλυση της απόδοσης ταμειωτήρων για δεδομένες απολήψεις και επιθυμητές ζητήσεις, ή για να εκτιμηθεί η αξιοπιστία του συστήματος για ένα συγκεκριμένο όγκο αποθήκευσης και τα χαρακτηριστικά της ζήτησης. Στοχαστικά δεδομένα του υφιστάμενου (ιστορικού) κλίματος μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως εισροές σε όλα τα μοντέλα διαχείρισης υδατικών πόρων για την εκτίμηση της αξιοπιστίας του συστήματος (π.χ., τα ποσά

κατανομής των υδάτινων πόρων για τις διάφορες χρήσεις νερού, για τα εναλλακτικά σενάρια κατανομής της προσφοράς κα ζήτησης και για διάφορες διαχειριστικές πρακτικές).



Σχήμα 6.5. Χρονοσειρές τιμών SPI για αντιπροσωπευτικούς σταθμούς βροχοπτώσης για χρονικές κλίμακες 3-μηνών, 9-μηνών και 24-μηνών.

Ο σκοπός της στοχαστικής προσομοίωσης της βροχόπτωσης είναι να εξετάσει την αβεβαιότητα εκτίμησης των παραμέτρων που σχετίζονται με του υπολογισμό του SPI. Παραδόξως, πολύ λίγη δουλειά έχει γίνει από το 1985 και μετά σε στοχαστική σύνθεση και παραγωγή συνθετικών ετήσιων και μηνιαίων χρονοσειρών βροχοπτώσεων που βασίζονται σε ιστορικά δεδομένα βροχόπτωσης [Srikanthan and McMahon, 2001]. Μηνιαίες τιμές βροχόπτωσης απαιτούνται γενικά στην προσομοίωση συστημάτων υδατικών πόρων για την εκτίμηση της μηνιαίας απορροής στην εκτίμηση του υδατικού δυναμικού σε λεκάνες απορροής. Τα μηνιαία μοντέλα βροχόπτωσης όμως δεν είναι κατάλληλα για περιοχές όπου υπάρχει σημαντικός αριθμός μηνών με μηδενικές τιμές βροχόπτωσης. Σε παλαιότερες μελέτες [Srikanthan and McMahon, 1985; Hipel and McLeod, 1994] συνιστάται η μέθοδος του μηνιαίου επιμερισμού (ή καταμερισμού) (method of fragments) των ετήσιων τιμών βροχόπτωσης που προέκυψαν από ένα αυτοπαλινδρομικό μοντέλο (autoregressive) 1^{ης} τάξης. Το κύριο μειονέκτημα αυτής της μεθοδολογίας είναι η αδυναμία να διαφυλαχθεί η μηνιαία συσχέτιση μεταξύ του πρώτου μήνα ενός έτους και του τελευταίου μήνα του προηγούμενου έτους καθώς και η εμφάνιση παρόμοιων προτύπων από μία μικρή χρονική περίοδο των ιστορικών δεδομένων [Salas, 1993]. Οι Maheerapa and Perera [1996] πρότειναν μία τροποποίηση των τμημάτων επιμερισμού (fragments) ώστε να διατηρείται η συσχέτιση για την αντιμετώπιση του πρώτου μειονεκτήματος. Οι Porter and Pink [1991] χρησιμοποίησαν συνθετικά τμήματα επιμερισμού από ένα μηνιαίο μοντέλο Thomas-Fiering ώστε να υπερκεράσουν το δεύτερο μειονέκτημα. Για σταθμούς με σημαντικό αριθμό μηδενικών τιμών βροχόπτωσης παρουσιάζεται πρόβλημα στην εφαρμογή του Thomas-Fiering μοντέλου. Επειδή η βροχόπτωση εμφανίζει λιγότερη ασυμμετρία από την απορροή η μέθοδος των Mejia and Rousselle [1976] μπορεί να εφαρμοστεί για να επιμερίσει την ετήσια βροχόπτωση σε μηνιαίες τιμές. Επειδή αυτή η μεθοδολογία εμπεριέχει τον υπολογισμό πολλών παραμέτρων (συνολικά 168 παράμετροι), ο Lane [1979] πρότεινε το μηδενισμό πολλών παραμέτρων που δεν είναι σημαντικοί (απαιτείται υπολογισμός 36 συνολικά παραμέτρων).

Με βάση τα ανωτέρω στην παρούσα εργασία για την παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών μηνιαίας βροχόπτωσης επιλέχθηκε η τροποποιημένη μέθοδος τμημάτων επιμερισμού (modified method of fragments). Οι ετήσιες τιμές βροχόπτωσης παρήχθησαν με το αυτοπαλινδρομικό μοντέλο 1^{ης} τάξης με αβεβαιότητα παραμέτρων (AR(1) Model with parameter uncertainty). Η τροποποιημένη μέθοδος τμημάτων επιμερισμού επιλέγει ένα μηνιαίο χρονικό βήμα επιμερισμού που βασίζεται στο τμήμα επιμερισμού της ιστορικής περιόδου. Το σχέδιο επιμερισμού επιλέγεται βασισμένο σε ένα μέτρο της ομοιότητας των παραγμένων ετήσιων βροχοπτώσεων με τις παρατηρούμενες τιμές. Στην τροποποιημένη μέθοδο τμημάτων επιμερισμού, οι παρατηρούμενες μηνιαίες βροχοπτώσεις προσαρμόζονται χρόνο με το χρόνο έτσι ώστε το άθροισμα των μηνιαίων βροχοπτώσεων σε οποιοδήποτε έτος είναι ίσο με ένα. Αυτό πραγματοποιείται με τη διαίρεση των μηνιαίων βροχοπτώσεων σε ένα έτος από τις αντίστοιχες ετήσιες βροχοπτώσεις. Με αυτόν τον τρόπο, από μία περίοδο των n ετών, κάποιο θα έχει τα n τμήματα μηνιαίων βροχοπτώσεων. Τα κατάλληλα μηνιαία τμήματα για ένα δεδομένο έτος, k , επιλέγονται με την εξέταση της ομοιότητας των παραγμένων ετήσιων τιμών βροχόπτωσης και την τιμή της μηνιαίας βροχόπτωσης για τον τελευταίο μήνα του προηγούμενου χρόνου των ήδη επιμερισμένων τιμών στις αντίστοιχες ιστορικές τιμές. Αυτό επιτυγχάνεται με την επιλογή των μηνιαίων τμημάτων ενός έτους, i , στην παραγμένη μηνιαία σειρά που παράγει μια ελάχιστη τιμή για α_i , το οποίο ορίζεται ως:

$$\alpha_i = \left(\frac{x'_k - x_i}{s_x} \right)^2 + \left(\frac{y'_{k-1} - y_{i-1}}{s_y} \right)^2 \quad (6.1)$$

όπου x'_k η παραγόμενη ετήσια βροχόπτωση για το έτος k , x_i η ιστορική ετήσια βροχόπτωση για το έτος i , s_x η τυπική απόκλιση της ετήσιας βροχόπτωσης, y'_{k-1} η επιμερισμένη μηνιαία βροχόπτωση του τελευταίου μήνα του έτους $k-1$, y_{i-1} η ιστορική μηνιαία βροχόπτωση του τελευταίου μήνα του έτους $i-1$,

και s_y , η τυπική απόκλιση της μηνιαίας βροχόπτωσης του τελευταίου μήνα του έτους. Οι παραγόμενες ετήσιες βροχοπτώσεις επιμερίζονται πολλαπλασιάζοντας την παραγόμενη βροχόπτωση με κάθε ένα από τα 12 τμήματα ώστε να δώσουν 12 παραγόμενες μηνιαίες τιμές βροχόπτωσης.

Αν και τα παραγόμενα ετήσια στοιχεία βροχοπτώσεων έχουν μικρή άμεση εφαρμογή, η προσομοίωση των ετήσιων στοιχείων βροχοπτώσεων εξυπηρετεί δύο σκοπούς. Πρώτον, επιτρέπει τη κατανόηση της στοχαστικής φύσης των ετήσιων δεδομένων βροχόπτωσης και τις επιπτώσεις τους για μεγάλες περιόδους ξηρών και υγρών περιόδων βροχοπτώσεων. Αυτή η κατανόηση είναι απαραίτητη για τη διαχείριση των υδατικών συστημάτων κατά τη διάρκεια των ξηρών περιόδων βροχόπτωσης. Δεύτερον, τα στοχαστικά μοντέλα θα πρέπει να διατηρούν τις στατιστικές παράμετροι τους σε διάφορες χρονικές κλίμακες. Ένα καλό και αξιόπιστο μοντέλο αναπαραγωγής ετήσιας βροχόπτωσης επιτρέπει τον επιμερισμό (disaggregation) των ετήσιων τιμών σε μηνιαίες τιμές βροχόπτωσης. Σε αυτή την περίπτωση, τα ετήσια δεδομένα αποτελούν δεδομένα εισόδου σε διάφορα συστήματα καταμερισμού μικρότερης χρονικής κλίμακας (π.χ. μηνιαίας). Στην παρούσα εργασία εφαρμόστηκε το μοντέλο {AR(1) Model with parameter uncertainty} για προσομοίωση και αναπαραγωγή συνθετικών ετήσιων χρονοσειρών βροχόπτωσης για το μετεωρολογικό σταθμό της Λάρισας για τα 42 έτη (Οκτ. 1960 – Σεπ. 2002). Εφαρμογή του μοντέλου αυτού στην Αυστραλία έδειξε ότι αποτελεί την πιο αξιόπιστη λύση για διάφορα κλίματα και προσομοίωση ξηρών και υγρών ετών [Thyer et al., 2002]. Το μοντέλο {AR(1) Model with parameter uncertainty} είναι ένα αυτοπαλινδρομικό μοντέλο ή υπόδειγμα (autoregressive) 1^{ης} τάξης με αβεβαιότητα παραμέτρων και χρησιμοποιείται για τη δημιουργία ετήσιων βροχομετρικών δεδομένων. Το μοντέλο AR(1) αντιλαμβάνεται την ετήσια βροχόπτωση ως εξαρτώμενη από το προηγούμενο χρονικό βήμα μόνο, με ένα προστιθέμενο τυχαίο Gaussian κομμάτι (component). Η χρονική εξάρτηση του μοντέλου AR(1) μπορεί να γραφεί ως:

$$z_t = \mu + \phi_1(z_{t-1} - \mu) + \varepsilon_t \quad (6.2)$$

όπου z_t είναι η μετασχηματισμένη βροχόπτωση (βλ. Εξ. 6.3) στο χρονικό βήμα t , μ είναι το μέσο, ϕ_1 ο αυτοπαλινδρομος συντελεστής και ε_t μία κανονική (Gaussian) τυχαία μεταβλητή με μέσο μηδέν και διασπορά ίση με σ_ε^2 . Τα δεδομένα κανονικοποιούνται χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμό Box-Cox:

$$z_t = \begin{cases} x_t^\lambda - 1 & \lambda \neq 0 \\ \lambda & \lambda = 0 \\ \log x_t & \lambda = 0 \end{cases} \quad (6.3)$$

όπου λ είναι η παράμετρος Box-Cox που μετασχηματίζει τα ασύμμετρα ιστορικά δεδομένα να προσομοιώνουν την κανονική κατανομή. Μαζί με την παράμετρο Box-Cox το διάλυσμα των αγνώστων παραμέτρων του μοντέλου AR(1) δίνεται από:

$$\theta^T = (\mu, \sigma_\varepsilon, \phi_1, \lambda) \quad (6.4)$$

Παρά να υπολογιστεί ένα ενιαίο σετ παραμέτρων μέσω της βελτιστοποίησης, μια Bayesian προσέγγιση ακολουθείται. Αυτή η προσέγγιση αναγνωρίζει ότι υπάρχει αβεβαιότητα που συνδέεται με τις τιμές των παραμέτρων, και συνάγει μία εκ των υστέρων 'posterior' κατανομή των παραμέτρων (μετά την είσοδο των δεδομένων του μοντέλου). Μια προγενέστερη 'prior' κατανομή πρέπει να διευκρινιστεί (η κατανομή πριν από την εισαγωγή των δεδομένων), και σε αυτήν την περίπτωση μια ομοιόμορφη κατανομή υποτίθεται για όλες τις παραμέτρους.

Η μέθοδος των στοχαστικών (Monte Carlo) αλυσίδων Markov (Markov Chain Monte Carlo, MCMC) είναι μια εναλλακτική διαδικασία, που χρησιμοποιείται αντί της ομοιόμορφης δειγματοληψίας για την προσέγγιση της ύστερης κατανομής των παραμέτρων των μοντέλων, που απαιτείται για την ανάλυση των αβεβαιοτήτων, π.χ. την παραγωγή ορίων εμπιστοσύνης της εξεταζόμενης μεταβλητής [Kuczera and Parent, 1998; Engeland and Gottschalk, 2002; Engeland et al., 2005]. Η μέθοδος γεννά μια αλυσίδα Markov, δηλαδή έναν τυχαίο περίπατο από εφικτούς συνδυασμούς παραμέτρων, με τρόπο ώστε το

δείγμα που δημιουργείται να συγκλίνει στην πραγματική συνάρτηση κατανομής. Ως γεννήτρια νέων λύσεων χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος Metropolis [Metropolis et al., 1953], που αποτελεί και το υπόβαθρο της μεθόδου προσομοιωμένης απόπτωσης (simulated annealing) [Kirkpatrick et al., 1983], Η γενίκευση στο Bayesian πλαίσιο απαιτεί τα δείγματα παραμέτρων από την εκ των υστέρων κατανομή. Οι μέθοδοι Markov Chain Monte Carlo (MCMC) παρέχουν έναν μέσο όρο στο δείγμα από την ύστερη κατανομή. Ο αλγόριθμος Metropolis (ένας ιδιαίτερος τύπος MCMC) χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει την εκ των υστέρων κατανομή. Για να βελτιωθεί το ποσοστό αποδοχής του αλγορίθμου Metropolis, ο χώρος των παραμέτρων (parameter space) μετασχηματίζεται για να αφαιρεθούν οι εξαρτήσεις του μέσου και της διασποράς (μ , σ_ε) στην παράμετρο Box-Cox, λ .

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{\mu_x^\lambda - 1}{\lambda} \\ \sigma_\varepsilon &= \mu_x^{\lambda-1} \sigma_x \sqrt{1 - \phi_1^2} \end{aligned} \tag{6.4}$$

όπου μ_x και σ_x αντιπροσωπεύουν μία πρώτης τάξης εκτίμηση της αναμενόμενης τιμής και της τυπικής απόκλισης των πρωτογενών δεδομένων της βροχόπτωσης. Μετά τη δημιουργία δειγμάτων από την εκ των υστέρων κατανομή, τα δείγματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη συνθετική παραγωγή αντιγράφων (replicates) χρονοσειρών. Το διάνυσμα των παραμέτρων θ^T διαλέγεται τυχαία από την εκ των υστέρων κατανομή για την παραγωγή κάθε ξεχωριστής χρονοσειράς [Thyer et al., 2002; Thyer et al., 2006; Wang and Nathan, 2007].

Διάφορα στατιστικά κριτήρια χρησιμοποιήθηκαν για την αποτίμηση των στοχαστικά παραγόμενων χρονοσειρών με βάση την ιστορική περίοδο των δεδομένων. Τα στατιστικά κριτήρια εκτιμούν την απόκλιση των στατιστικών χαρακτηριστικών των συνθετικών χρονοσειρών σε σχέση με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά της ιστορικής περιόδου με βάση μία τιμή κατωφλιού ή ανοχής (tolerance). Εάν η διαφορά είναι μέσα στην τιμή του ορίου ανοχής το στοχαστικό μοντέλο θεωρείται ότι προσομοιώνει ικανοποιητικά το εξεταζόμενο στατιστικό χαρακτηριστικό. Πρέπει να επισημανθεί ότι η εκτίμηση των συνθετικών χρονοσειρών με χρήση στατιστικών κριτηρίων διαφέρει αναλόγως τη χρήση των στοχαστικά παραγόμενων συνθετικών χρονοσειρών. Διαφορετικά στατιστικά χαρακτηριστικά απαιτούνται για την εκτίμηση των πλημμυρών, των χαμηλών απορροών και των ξηρασιών. Όμως για την εκτίμηση της παραγωγής των συνθετικών χρονοσειρών οι ακόλουθοι κανόνες πρέπει να ακολουθούνται:

- Το μήκος (χρονική περίοδος) της συνθετικής χρονοσειράς πρέπει να ακριβώς το ίδιο με το μήκος της ιστορικών δεδομένων
- Πρέπει να υπάρχει ένα ικανοποιητικός αριθμός συνθετικών χρονοσειρών (τουλάχιστον 100)
- Η ιστορική περίοδος των δεδομένων να είναι αρκετά μεγάλη (τουλάχιστον 30 έτη)

Η προσομοίωση της μηνιαίας βροχόπτωσης και η παραγωγή των 1000 συνθετικών μηνιαίων χρονοσειρών έγινε τη χρήση του μηνιαίου στοχαστικού μοντέλου βροχόπτωσης. Η αθροιστική κατανομή των συνθετικών βροχοπτώσεων παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.6 και τα στατιστικά κριτήρια στον Πίνακα 6.2 για τον μετεωρολογικό σταθμό της Λάρισας. Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 6.2 το ετήσιο στοχαστικό μοντέλο θεωρείται ικανοποιητικό αφού 11 από τα 12 στατιστικά κριτήρια είναι μέσα στα όρια του στατιστικού λάθους (ανοχής). Μόνο το εύρος της συνθετικής ετήσιας βροχόπτωσης είναι στατιστικά σημαντική από τις αντίστοιχες μέσες τιμές της ιστορικής περιόδου. Από τον Πίνακα 6.2 αποδεικνύεται ότι η χρήση της διαμέσου (50%) ως παράμετρος ελέγχου των συνθετικών χρονοσειρών είναι πιο κατάλληλη από το μέσο. Γενικά η χρήση της διαμέσου είναι πιο αντιπροσωπευτική για τον έλεγχο στοχαστικών συνθετικών χρονοσειρών [Hipel and McLeod, 1994]. Η μέση μηνιαία βροχόπτωση και η τυπική απόκλιση των συνθετικών βροχοπτώσεων παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.7 με τη μορφή

θηκογραμμάτων και τα στατιστικά κριτήρια στον Πίνακα 6.2. Συνολικά το μοντέλο προσομοιώνει πολύ ικανοποιητικά τη μηνιαία βροχόπτωση και ικανοποιεί 59 από τα 84 μηνιαία στατιστικά κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν στην εκτίμηση. Παρόμοια αποτελέσματα παρουσιάζονται και σε άλλους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς βροχόπτωσης που εφαρμόστηκε το μηνιαίο στοχαστικό μοντέλο. Συμπερασματικά, το μηνιαίο στοχαστικό μοντέλο είναι καλύτερο για ορεινούς σταθμούς βροχόπτωσης σε σχέση με τους πεδινούς σταθμούς που παρουσιάζουν δυσκολία εκτίμησης των μηνών με μηδενικές τιμές βροχόπτωσης (Πίνακας 6.2).

Πίνακας 6.2. Αποτελέσματα στατιστικών παραμέτρων και κριτηρίων των συνθετικών μηνιαίων χρονοσειρών βροχόπτωσης – Βροχομετρικός Σταθμός Λάρισα

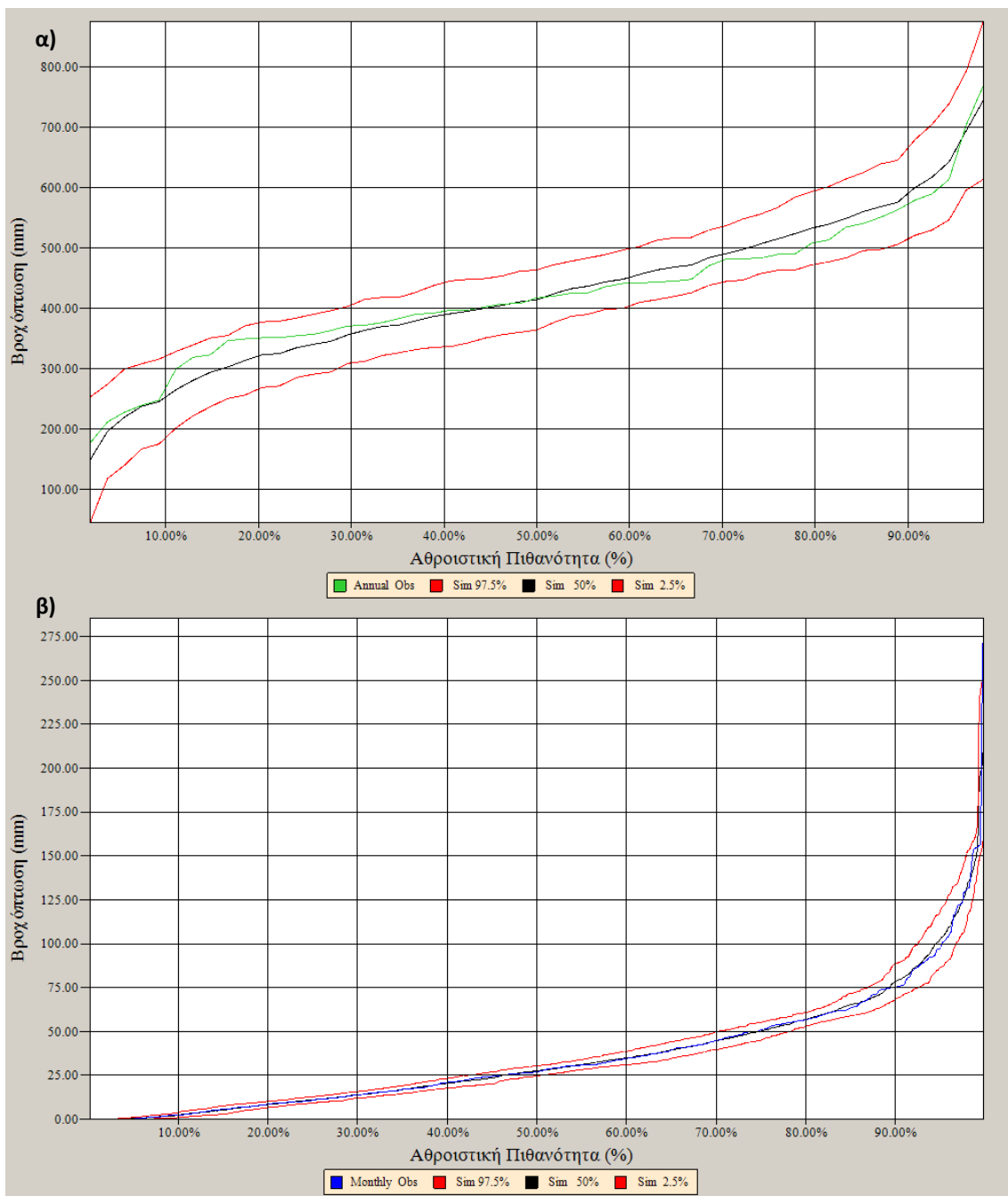
Στοιχείο	Ιστορικά	Μέσο	2.5%	25%	50%	75%	97.5%	Tol.	Y/N
ΕΤΗΣΙΑ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ									
=====									
Μέση Βροχόπτωση									
1	424.762	428.365	373.469	411.641	429.075	444.446	475.275	5%	Y
Τυπική Απόκλιση Βροχόπτωσης									
1	114.476	120.101	87.735	106.706	117.992	128.788	158.824	5%	Y
Συντελεστής ασυμμετρίας βροχόπτωσης									
1	0.475	0.245	-0.583	-0.111	0.206	0.497	1.326	+/-0.5	Y
Βροχόπτωση: Συντελεστής αυτοσυσχέτισης 1ης τάξης									
1	0.012	0.007	-0.353	-0.139	0.001	0.165	0.374	+/-0.15	Y
Μέγιστη Βροχόπτωση									
1	1.812	1.696	1.447	1.561	1.656	1.793	2.195	10%	Y
Ελάχιστη Βροχόπτωση									
1	0.416	0.419	0.073	0.362	0.437	0.514	0.611	10%	Y
Εύρος Βροχόπτωσης									
1	1.861	2.261	1.081	1.724	2.120	2.723	3.857	10%	N
2-έτη Ελάχιστη Αθροιστική Βροχόπτωση									
1	1.248	1.146	0.623	1.022	1.219	1.299	1.448	10%	Y
3-έτη Ελάχιστη Αθροιστική Βροχόπτωση									
1	2.074	2.003	1.332	1.845	2.022	2.227	2.426	10%	Y
5-έτη Ελάχιστη Αθροιστική Βροχόπτωση									
1	3.908	3.782	2.994	3.620	3.816	4.017	4.240	10%	Y
7-έτη Ελάχιστη Αθροιστική Βροχόπτωση									
1	5.547	5.617	4.292	5.396	5.666	5.989	6.315	10%	Y
10-έτη Ελάχιστη Αθροιστική Βροχόπτωση									
1	8.475	8.515	7.004	8.241	8.603	8.879	9.337	10%	Y
ΜΗΝΙΑΙΑ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ									
=====									
Μέση Βροχόπτωση									
Μήνας	Ιστορικά	Μέσο	2.5%	25%	50%	75%	97.5%	Tol.	Y/N
ΙΑΝ	34.966	35.971	28.206	33.638	35.591	39.128	43.258	7.5%	Y
ΦΕΒ	31.685	34.911	26.299	32.178	34.768	37.310	45.146	7.5%	N
ΜΑΡ	36.740	36.388	30.242	33.902	36.427	38.584	42.974	7.5%	Y
ΑΠΡ	32.070	31.851	24.276	28.708	31.422	34.567	42.486	7.5%	Y
ΜΑΙ	38.483	41.696	33.931	38.761	41.355	44.205	50.769	7.5%	N
ΙΟΝ	24.896	23.637	18.240	21.336	23.482	25.862	29.289	7.5%	Y
ΙΟΥ	18.653	20.767	14.034	18.100	20.481	23.186	27.891	7.5%	N
ΑΥΓ	15.606	13.664	8.977	11.908	13.670	15.423	17.952	7.5%	N
ΣΕΠ	33.019	35.765	22.864	30.507	35.287	41.032	49.848	7.5%	N
ΟΚΤ	52.825	49.304	37.548	45.024	49.143	53.255	62.835	7.5%	Y
ΝΟΕ	55.311	52.751	42.504	48.763	52.180	56.121	64.703	7.5%	Y
ΔΕΚ	50.509	51.659	40.849	46.933	52.496	56.508	61.563	7.5%	Y
Τυπική Απόκλιση Βροχόπτωσης									
Μήνας	Ιστορικά	Μέσο	2.5%	25%	50%	75%	97.5%	Tol.	Y/N
ΙΑΝ	27.036	28.198	22.097	25.644	28.135	30.437	34.595	7.5%	Y
ΦΕΒ	23.082	24.894	17.972	21.059	23.720	27.774	35.330	7.5%	N
ΜΑΡ	23.121	23.486	18.222	21.128	23.635	25.178	29.285	7.5%	Y
ΑΠΡ	27.868	26.826	18.595	22.635	26.503	29.942	37.010	7.5%	Y
ΜΑΙ	29.354	29.742	22.447	26.423	28.874	32.362	41.465	7.5%	Y
ΙΟΝ	24.377	21.433	16.325	20.289	21.666	22.956	25.857	7.5%	N
ΙΟΥ	24.014	25.677	17.722	20.772	24.900	30.448	35.779	7.5%	Y
ΑΥΓ	19.116	15.854	11.316	14.462	16.133	17.315	20.218	7.5%	N
ΣΕΠ	45.323	52.278	29.228	42.983	52.724	61.686	71.904	7.5%	N
ΟΚΤ	46.593	35.878	29.348	33.938	35.725	37.754	41.618	7.5%	N
ΝΟΕ	39.509	38.082	30.211	35.067	37.665	41.049	45.637	7.5%	Y
ΔΕΚ	34.664	33.192	26.650	30.400	32.933	35.843	41.143	7.5%	Y
Συντελεστής ασυμμετρίας βροχόπτωσης									
Μήνας	Ιστορικά	Μέσο	2.5%	25%	50%	75%	97.5%	Tol.	Y/N
ΙΑΝ	1.041	1.093	0.478	0.897	1.085	1.283	1.661	+/-0.75	Y
ΦΕΒ	1.235	0.956	0.018	0.354	1.045	1.344	2.056	+/-0.75	Y
ΜΑΡ	0.917	0.838	0.159	0.488	0.843	1.129	1.524	+/-0.75	Y
ΑΠΡ	1.323	1.479	0.730	1.136	1.388	1.751	2.543	+/-0.75	Y
ΜΑΙ	1.245	1.109	0.270	0.904	1.135	1.408	1.771	+/-0.75	Y
ΙΟΝ	1.398	1.072	0.445	0.755	1.056	1.332	1.803	+/-0.75	Y
ΙΟΥ	2.536	1.962	0.622	1.503	2.093	2.359	3.308	+/-0.75	Y

Συντελεστής ασυμμετρίας βροχόπτωσης Συν.)									
Μήνας	Ιστορικά	Μέσο	2.5%	25%	50%	75%	97.5%	Tol.	Y/N
ΑΥΓ	1.661	1.571	0.991	1.326	1.502	1.777	2.456	+/-0.75	Y
ΣΕΠ	2.700	2.584	1.723	2.178	2.556	2.891	3.982	+/-0.75	Y
ΟΚΤ	2.539	0.599	0.131	0.404	0.587	0.783	1.082	+/-0.75	N
ΝΟΕ	1.108	1.160	0.579	0.921	1.150	1.400	1.831	+/-0.75	Y
ΔΕΚ	1.286	1.150	0.245	0.949	1.198	1.375	1.820	+/-0.75	Y
Βροχόπτωση: Συντελεστής αυτοσυσχέτισης 1ης τάξης									
Μήνας	Ιστορικά	Μέσο	2.5%	25%	50%	75%	97.5%	Tol.	Y/N
ΙΑΝ	0.086	0.117	-0.257	0.017	0.120	0.237	0.383	+/-0.2	Y
ΦΕΒ	-0.012	0.055	-0.222	-0.066	0.034	0.164	0.374	+/-0.2	Y
ΜΑΡ	0.251	0.366	0.190	0.302	0.358	0.434	0.570	+/-0.2	Y
ΑΠΡ	0.156	0.148	-0.116	0.052	0.145	0.248	0.408	+/-0.2	Y
ΜΑΙ	0.209	0.373	-0.146	0.223	0.410	0.570	0.709	+/-0.2	Y
ΙΟΝ	0.069	0.087	-0.159	0.000	0.089	0.177	0.328	+/-0.2	Y
ΙΟΛ	-0.053	0.042	-0.135	-0.025	0.031	0.105	0.265	+/-0.2	Y
ΑΥΓ	0.233	0.310	0.080	0.240	0.308	0.383	0.492	+/-0.2	Y
ΣΕΠ	-0.029	-0.171	-0.326	-0.241	-0.187	-0.112	0.033	+/-0.2	Y
ΟΚΤ	0.224	0.277	0.111	0.193	0.260	0.365	0.480	+/-0.2	Y
ΝΟΕ	0.086	0.122	-0.131	0.027	0.112	0.214	0.399	+/-0.2	Y
ΔΕΚ	-0.122	-0.077	-0.357	-0.175	-0.076	0.017	0.183	+/-0.2	Y
Μέγιστη Βροχόπτωση									
Μήνας	Ιστορικά	Μέσο	2.5%	25%	50%	75%	97.5%	Tol.	Y/N
ΙΑΝ	120.000	120.231	87.273	117.198	121.664	130.708	144.146	10%	Y
ΦΕΒ	121.900	113.479	66.523	74.264	122.180	133.619	157.934	10%	Y
ΜΑΡ	116.400	103.474	72.571	84.463	113.597	118.360	121.870	10%	N
ΑΠΡ	122.800	119.880	85.138	95.838	123.082	134.605	159.100	10%	Y
ΜΑΙ	131.500	133.629	87.412	128.413	134.637	141.996	166.873	10%	Y
ΙΟΝ	106.000	83.931	62.314	69.527	77.640	95.096	111.549	10%	N
ΙΟΛ	131.800	114.942	60.863	79.124	130.619	135.411	139.192	10%	N
ΑΥΓ	81.300	63.046	46.777	59.180	65.470	67.690	73.075	10%	N
ΣΕΠ	240.500	234.179	150.475	236.280	247.728	253.282	265.015	10%	Y
ΟΚΤ	285.600	132.203	111.027	130.629	134.032	136.769	140.391	10%	N
ΝΟΕ	155.000	156.219	140.465	153.677	157.757	160.634	167.413	10%	Y
ΔΕΚ	156.500	154.748	113.367	155.229	159.225	161.174	165.063	10%	Y
Ελάχιστη Βροχόπτωση									
Μήνας	Ιστορικά	Μέσο	2.5%	25%	50%	75%	97.5%	Tol.	Y/N
ΙΑΝ	0.000	0.252	0.000	0.000	0.000	0.000	1.821	10%	N
ΦΕΒ	0.000	0.609	0.000	0.000	0.000	0.000	5.299	10%	N
ΜΑΡ	0.000	1.276	0.000	0.000	0.000	0.000	8.935	10%	N
ΑΠΡ	0.000	0.383	0.000	0.000	0.000	0.000	3.622	10%	N
ΜΑΙ	0.000	1.046	0.533	0.576	0.630	0.984	4.644	10%	N
ΙΟΝ	0.000	0.529	0.000	0.000	0.296	1.198	2.055	10%	N
ΙΟΛ	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	10%	Y
ΑΥΓ	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	10%	Y
ΣΕΠ	0.000	0.100	0.000	0.000	0.000	0.000	1.388	10%	Y
ΟΚΤ	0.000	0.266	0.000	0.000	0.000	0.479	2.108	10%	N
ΝΟΕ	2.200	4.276	1.456	2.503	3.305	4.128	10.438	10%	N
ΔΕΚ	2.900	4.085	2.584	2.773	2.889	5.036	11.437	10%	N
Αναλογία μηνών με μηδενικές τιμές βροχόπτωσης									
Μήνας	Ιστορικά	Μέσο	2.5%	25%	50%	75%	97.5%	Tol.	Y/N
ΙΑΝ	3.774	4.340	0.000	1.887	3.774	5.660	13.208	+/-5	Y
ΦΕΒ	3.774	4.340	0.000	1.887	3.774	5.660	13.208	+/-5	Y
ΜΑΡ	3.774	4.340	0.000	1.887	3.774	5.660	13.208	+/-5	Y
ΑΠΡ	3.774	4.340	0.000	1.887	3.774	5.660	13.208	+/-5	Y
ΜΑΙ	1.887	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	+/-5	Y
ΙΟΝ	1.887	0.509	0.000	0.000	0.000	1.887	1.887	+/-5	Y
ΙΟΛ	9.434	11.189	3.774	7.547	11.321	13.208	19.858	+/-5	Y
ΑΥΓ	15.094	15.358	5.660	12.736	15.094	18.868	23.632	+/-5	Y
ΣΕΠ	5.660	4.679	0.000	1.887	3.774	6.132	12.311	+/-5	Y
ΟΚΤ	1.887	1.906	0.000	0.000	1.887	2.358	5.660	+/-5	Y
ΝΟΕ	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	+/-5	Y
ΔΕΚ	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	+/-5	Y

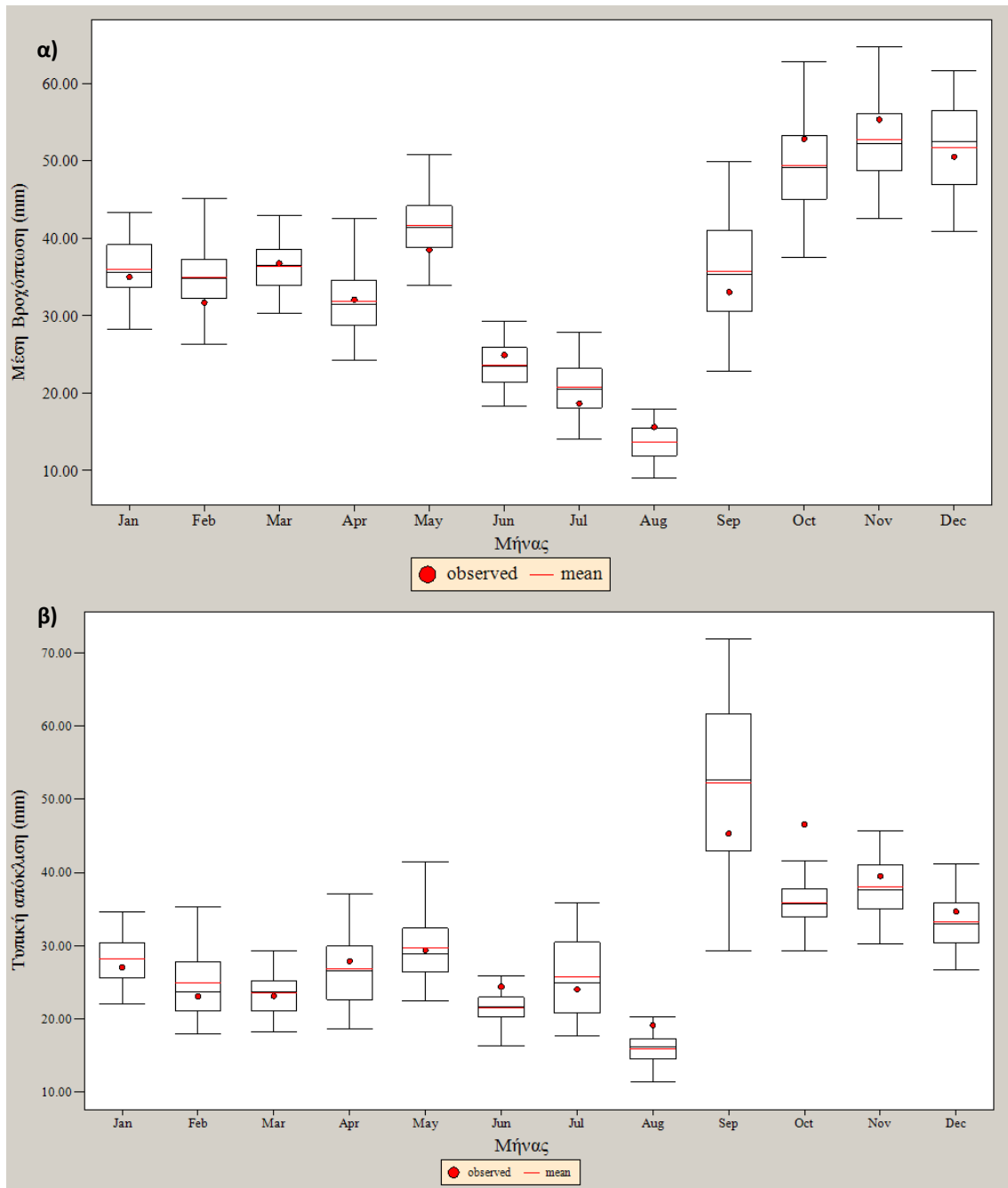
6.2.2. Έλεγχος προσαρμογής των παραμέτρων της Gamma κατανομής

Οι παραγόμενες (1000) μηνιαίες συνθετικές χρονοσειρές βροχόπτωσης χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση του μετεωρολογικού δείκτη SPI για χρονικές κλίμακες 3-month, 6-month, 9-month, 12-month και 24-month. Το σφάλμα εκτίμησης των παραμέτρων της Gamma κατανομής στα βροχομετρικά δεδομένα εκτιμήθηκε με τη χρήση των 1000 συνθετικών χρονοσειρών βροχόπτωσης. Τέσσερα στατιστικά κριτήρια εκτιμήθηκαν για τη σύγκριση των παρατηρούμενων χρονοσειρών SPI και τη χρήση των διάμεσων τιμών των παραμέτρων των 1000 συνθετικών χρονοσειρών στην προσαρμογή της παρατηρούμενης βροχόπτωσης. Τα στατιστικά κριτήρια είναι ο βαθμός απόδοσης Eff, το μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE), το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE), και ο συντελεστής προσδιορισμού (R^2). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η χρήση των διάμεσων τιμών των παραμέτρων α και β της gamma κατανομής των 1000 συνθετικών χρονοσειρών του SPI προσομοιώνουν επακριβώς την ιστορική μηνιαία

βροχόπτωση του σταθμού Λάρισας για όλες τις χρονικές κλίμακες υπολογισμού του SPI (Πίνακας 6.3 και Σχήμα 6.8). Παρόμοια αποτελέσματα παρουσιάζονται και στους άλλους βροχομετρικούς σταθμούς της υδρολογικής λεκάνης του Πηνειού ποταμού. Η χρονική ανάλυση του Σχήματος 6.8 δείχνει ότι ο σταθμός της Λάρισας παρουσιάζει συχνά φαινόμενα ξηρασίας ($SPI \leq -1$) για διάφορους μήνες της περιόδου ανάλυσης. Καθώς η χρονική κλίμακα υπολογισμού του SPI αυξάνει (π.χ. από 3 μήνες σε 12 μήνες), οι χρονοσειρές του SPI γίνονται πιο ομαλές και έτσι τα επεισόδια ξηρασίας και η διάρκεια τους μπορούν εύκολα να αναγνωριστούν και να υπολογιστούν. Η στοχαστική προσομοίωση της μηνιαίας βροχόπτωσης και ο έλεγχος των διάμεσων τιμών των παραμέτρων των συνθετικών χρονοσειρών του δείκτη SPI δείχνει ότι τα δεδομένα της βροχόπτωσης είναι αρκετά για αξιόπιστες εκτιμήσεις του SPI και την προσαρμογή των παραμέτρων στις βέλτιστες τιμές τους.



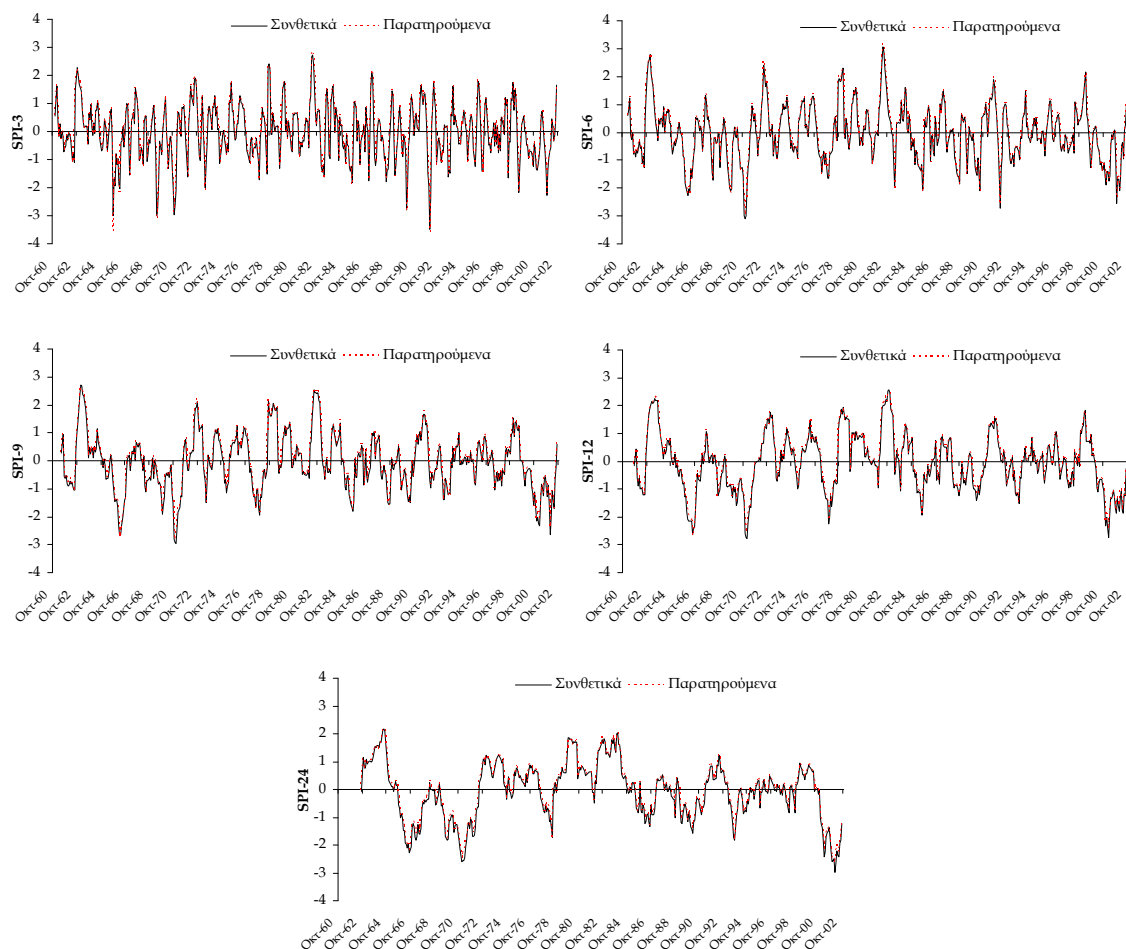
Σχήμα 6.6. Αθροιστική κατανομή βροχόπτωσης του σταθμού Λάρισας (ID_21) α) Ετήσια βροχόπτωση και β) μηνιαία βροχόπτωση



Σχήμα 6.7. Θηκογράμματα α) μέσης τιμής και β) τυπικής απόκλισης μηνιαίας συνθετικής βροχόπτωσης βροχομετρικού σταθμού Λάρισας (ID_21)

Πίνακας 6.3. Στατιστικά κριτήρια εκτίμησης παρατηρούμενων χρονοσειρών SPI και χρονοσειρών SPI υπολογισμένων με τη χρήση της διάμεσου τιμής των παραμέτρων, α και β , της gamma κατανομής των στοχαστικά παραγόμενων χρονοσειρών βροχόπτωσης για την περίοδο Οκτ. 1960 – Σεπ. 2002.

SPI-χρονική κλίμακα	MAE	RMSE	Eff	R ²
SPI-3	0.04	0.05	1.00	1.00
SPI-6	0.05	0.06	1.00	1.00
SPI-9	0.06	0.08	0.99	1.00
SPI-12	0.07	0.08	0.99	1.00
SPI-24	0.08	0.09	0.99	1.00



Σχήμα 6.8. Χρονοσειρές παρατηρούμενων τιμών SPI και υπολογισμένων τιμών SPI ιστορικής βροχόπτωσης με χρήση των διάμεσων τιμών των παραμέτρων των συνθετικών χρονοσειρών SPI για το σταθμό της Λάρισας (ID_21).

6.3. Αποτελέσματα χωρικών μεθόδων για χωροχρονική προσομοίωση και παρεμβολή του δείκτη ξηρασίας SPI

Οι οκτώ (8) μεθοδολογίες χωρικής παρεμβολής εφαρμόστηκαν χωροχρονικά για την εκτίμηση της ξηρασίας στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού για την περίοδο Οκτ. 1960 – Σεπ. 2002. Οι χωρικές μεθοδολογίες που εφαρμόστηκαν είναι:

1. Μέθοδος Πολύγωνων Thiessen (Thiessen Polygons, TP) (Σχήμα 6.9)
2. Μέθοδος αντίστροφης απόστασης (Inverse Distance Weighted, IDW)
3. Μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής kriging (Ordinary Kriging, OK)
4. Μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής simple kriging (Simple Kriging, SK)
5. Μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής kriging με εξωτερική τάση (Kriging with External Drift, KED)
6. Μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής kriging με μοντέλο παλινδρόμησης (υψόμετρο και χωρικές συντεταγμένες) (Regression Kriging using Elevation and spatial coordinates as external variables, RK)

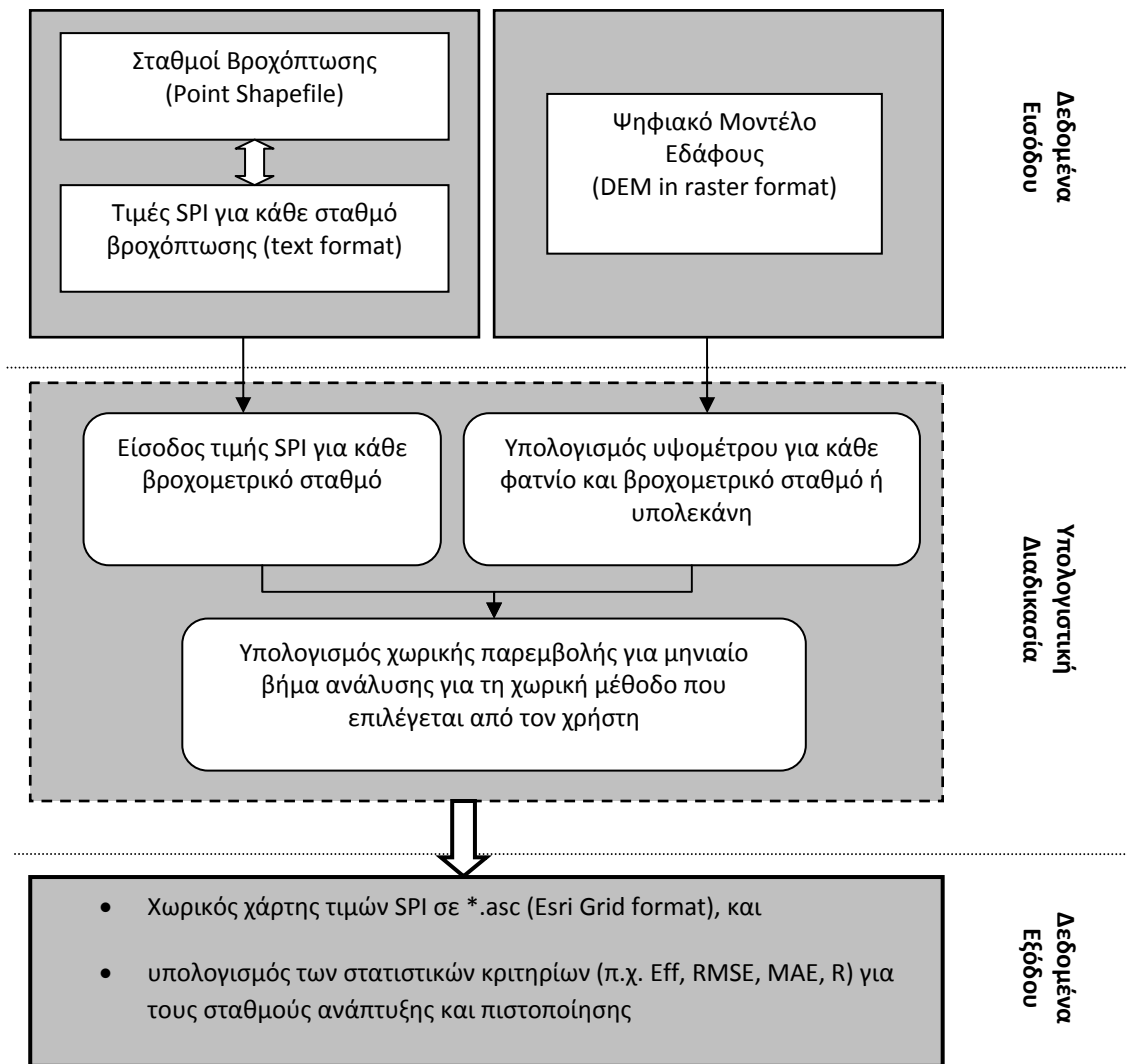
7. Μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής simple kriging με μεταβαλλόμενα τοπικά μέσα και με μοντέλο παλινδρόμησης (υψόμετρο) (Simple Kriging with Varying Local Means with Elevation as external variable, SKIm)
8. Μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής simple kriging με μεταβαλλόμενα τοπικά μέσα και με μοντέλο παλινδρόμησης (υψόμετρο και χωρικές συντεταγμένες) (Simple Kriging with Varying Local Means with Elevation and spatial coordinates as external variables, SKIm_R)



Σχήμα 6.9. Πολύγωνα Thiessen στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού

Για την χωροχρονική εφαρμογή των οκτώ (8) μεθόδων στο δείκτη ξηρασίας SPI μια αυτοματοποιημένη διαδικασία υπολογισμού των μεθόδων παρεμβολής δημιουργήθηκε στο Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών. Το διάγραμμα ροής παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.10. Τα βασικά δεδομένα εισόδου είναι ένα σημειακό αρχείο δεδομένων (point shapefile) που περιλαμβάνει τις γεωγραφικές συντεταγμένες των σταθμών βροχόπτωσης, μηνιαίες τιμές του δείκτη ξηρασίας SPI (για μια εξεταζόμενη χρονική υπολογισμού π.χ. 3-μηνών) για κάθε σταθμό βροχόπτωσης και ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους για την παροχή της υψομετρικής πληροφορίας.

Το πρόγραμμα επεξεργασίας και εφαρμογής χωρικών μεθόδων που αναπτύχθηκε, αυτόματα διαβάζει την τιμή του SPI για κάθε μήνα για όλους τους σταθμούς βροχόπτωσης και η χωρική μέθοδος που επιλέγεται από τον χρήστη πραγματοποιείται για τον υπολογισμό της χωρικής κατανομής του δείκτη SPI. Τα παρεμβαλλόμενα χωρικά δεδομένα εξόδου του δείκτη SPI είναι σε μορφή ψηφιακή (raster format), και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για επιπλέον επεξεργασία. Επιπλέον, διάφορα στατιστικά κριτήρια υπολογίζονται για την εκτίμηση και ακρίβεια της χωρικής μεθόδου με βάση την τεχνική διασταυρωμένη επιβεβαίωση των προβλέψεων (*cross-validation*). Τέλος, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ή τη δημιουργία επιφανειακών τιμών του δείκτη ξηρασίας με βάση ένα γεωγραφικό υπόβαθρο (π.χ. Shapefile υπολεκανών) ή την εκτίμηση της χωρικής μεθόδου και υπολογισμό σημειακών τιμών για ένα ξεχωριστό σημειακό αρχείο που περιέχει σταθμούς βροχόπτωσης που δεν έχουν χρησιμοποιηθεί στην εφαρμογή της μεθόδου (*independent validation*) (Σχήμα 6.10).



Σχήμα 6.10. Διάγραμμα ροής της εφαρμογής των χωρικών μεθόδων

Στην παρούσα εργασία, λόγω του μεγάλου πλήθους θεωρητικών ημιμεταβλητογραφήματων που πρέπει να εφαρμοστούν για τη χωρική παρεμβολή των μηνιαίων τιμών του δείκτη ξηρασίας του SPI για όλη την περίοδο της ανάλυσης (Οκτ. 1960-Σεπ. 2002 = 504 θεωρητικά ημιμεταβλητογραφήματα) για πέντε (5) χρονικές κλίμακες του δείκτη (3-month, 6-month, 9-month, 12-month και 24-month) και για τις έξι (6) γεωστατικές και συνδυαστικές μεθόδους (Σύνολο = 15120 θεωρητικά ημιμεταβλητογραφήματα), η πλήρως αυτοματοποιημένη αριθμητική μέθοδος προσαρμογής ημιμεταβλητογραφήματων ακολουθήθηκε, θεωρώντας ότι το σφαιρικό θεωρητικό ημιμεταβλητογράφημα (spherical semivariogram) προσομοιώνει ικανοποιητικά το πειραματικό ημιμεταβλητογράφημα. Η επιλογή του σφαιρικού ημιμεταβλητογραφήματος βασίστηκε στη βιβλιογραφία (συνίσταται για προσομοίωση μηνιαίων τιμών μετεωρολογικών παραμέτρων) και στις δοκιμές των γεωστατιστικών μεθόδων για χωρική παρεμβολή της μέσης μηνιαίας βροχόπτωσης στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού [Vasilades and Loukas, 2009b]. Η μέθοδος των σταθμισμένων ελαχίστων τετραγώνων χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διατριβή για τον υπολογισμό των σφαιρικών ημιμεταβλητογραφήματων για όλους τους δείκτες ξηρασίας για όλη την περίοδο της ανάλυσης (Οκτ. 1960 – Σεπ. 2002).

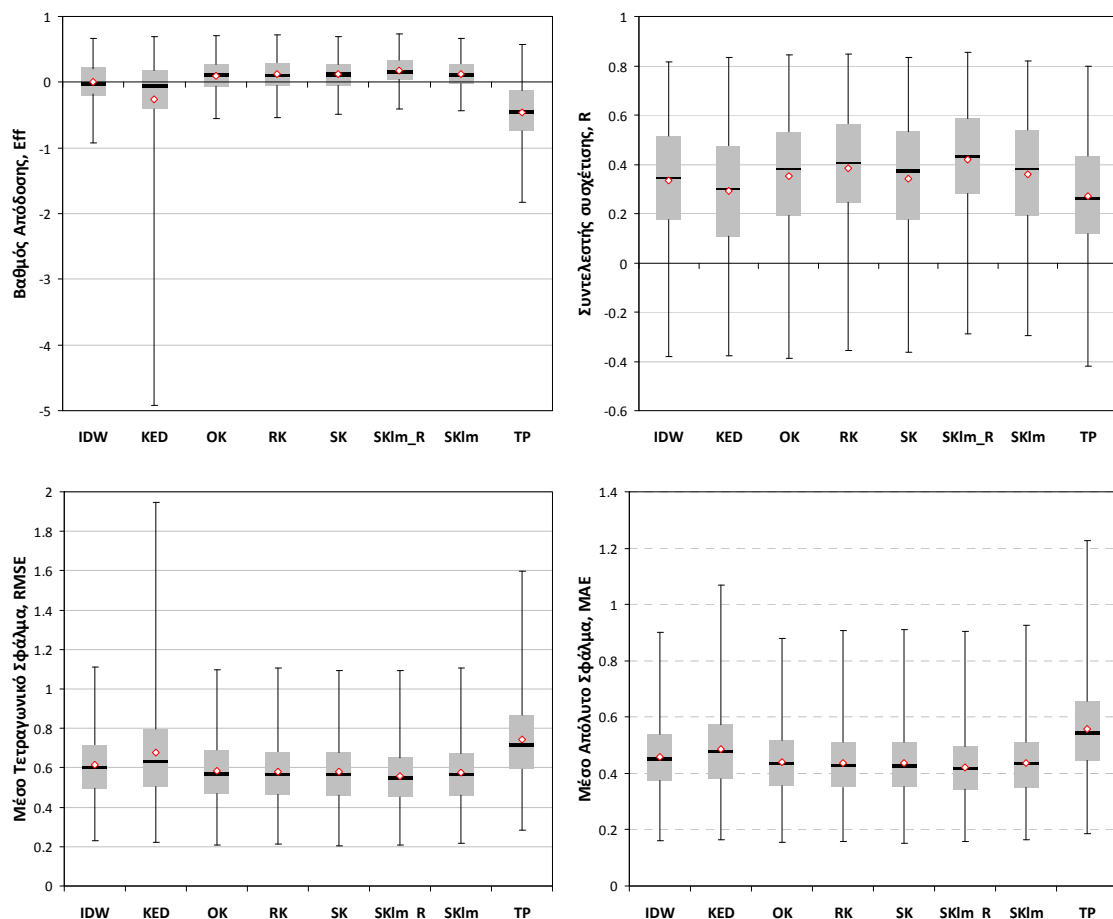
Η απόδοση των χωρικών μεθόδων για την χωροχρονική προσομοίωση και παρεμβολή του δείκτη ξηρασίας SPI υπολογισμένου σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες αξιολογήθηκε για τους σταθμούς ανάπτυξης και ανεξάρτητης χωρικής πιστοποίησης με τη χρήση στατιστικών κριτηρίων για όλη την περίοδο της ανάλυσης (Οκτ. 1960 – Σεπ. 2002). Τα στατιστικά κριτήρια που επιλέχθηκαν για την αξιολόγηση των χωρικών μεθόδων είναι η Nash-Sutcliffe efficiency (Eff), ο συντελεστής συσχέτισης (R), το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE) και το μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE). Αυτά τα κριτήρια είναι τα πιο συχνά ποσοτικά μέτρα εκτίμησης υδρολογικών και μετεωρολογικών εφαρμογών. Από τη χρονική σημειακή σύγκριση των χρονοσειρών SPI για τα υδρολογικά έτη 1960-61 έως 2001-02 παρατηρούνται παρατεταμένα γεγονότα ξηρασίας σε τρεις περιόδους, Οκτώβριος 1976-Σεπτέμβριος 1978, Οκτώβριος 1987-Σεπτέμβριος 1990 και Οκτώβριος 2000- Σεπτέμβριος 2002 (Σχήμα 6.5). Ίδια αποτελέσματα έχουν βρεθεί και από άλλες εργασίες που μελέτησαν το φαινόμενο της ξηρασίας στην υπό μελέτη υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού αλλά και σε ολόκληρο το υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας για τα ίδια υδρολογικά έτη [Loukas and Vasiliades, 2004; Loukas et al., 2008; Vasiliades and Loukas, 2009a; Vasiliades et al., 2010]. Έτσι, οι παραγόμενοι χωρικοί χάρτες με διάσταση φατνίου 1-km θα επικεντρωθούν σε αυτές τις τρεις περιόδους ενώ τα αποτελέσματα της εφαρμογής των χωρικών μεθόδων για τους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης θα παρουσιαστούν για όλη την περίοδο της χωροχρονικής ανάλυσης (Οκτ. 1960 – Σεπ. 2002). Η δομή της παρουσίασης των αποτελεσμάτων γίνεται πρώτα για τους 48 σταθμούς ανάπτυξης με τη χρήση της cross-validation τεχνικής και μετά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την ανεξάρτητη χωρική πιστοποίηση των 18 σταθμών βροχόπτωσης για τρεις χρονικές κλίμακες του SPI. Οι μελετώμενες χρονικές κλίμακες υπολογισμού είναι 3-μηνών, 6-μηνών και 12-μηνών. Τα αποτελέσματα παρουσιάζουν την αξιολόγηση των οκτώ χωρικών μεθόδων παρεμβολής για χωρική παρεμβολή των SPI-3, SPI-6 και SPI-12 και μετά ακολουθεί για τους σταθμούς πιστοποίησης και η χρονική προσομοίωση του SPI. Τέλος, επιλεγμένοι χωρικοί χάρτες παρουσιάζονται και αξιολογούνται για την χωρική παρεμβολή των ιστορικών γεγονότων ξηρασίας με βάση τον δείκτη SPI.

6.3.1. Χρονική κλίμακα SPI-3μηνών

Τα αποτελέσματα των στατιστικών κριτηρίων (Eff, r, RMSE και MAE) της τεχνικής διασταυρωμένη επιβεβαίωση των προβλέψεων (cross-validation) των χωρικών μεθόδων παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.11 για όλη την περίοδο της ανάλυσης (Δεκ 1960-Σεπ 2002 = 502 μήνες) για τους 48 σταθμούς ανάπτυξης. Η πρώτη γενική εντύπωση είναι ότι οι μέθοδοι των Πολύγωνων Thiessen (TP) και της βέλτιστης παρεμβολής kriging με εξωτερική τάση (KED) δεν μπορούν να προσομοιώσουν ικανοποιητικά την χωρική κατανομή του δείκτη ξηρασίας SPI-3. Οι άλλες έξι (6) μέθοδοι (IDW, OK, SK, RK, SKIm και SKIm_R) παρουσιάζουν περίπου ίδια μεταβλητότητα στη χωρική κατανομή του SPI-3. Λεπτομερέστερη ανάλυση του Σχήματος 6.11 δείχνει ότι η μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής simple kriging με μεταβαλλόμενα τοπικά μέσα και με μοντέλο παλινδρόμησης SKIm_R προσομοιώνει καλύτερα την χωρική κατανομή του δείκτη ξηρασίας αφού για το στατιστικό κριτήριο του βαθμού απόδοσης, Eff, παρουσιάζει το μικρότερο εύρος από -0.40 έως 0.73 και η μέση τιμή της ανέρχεται στο 0.18 που είναι η καλύτερη τιμή από όλες τις αντίστοιχες μέσες τιμές των άλλων μεθόδων. Παρόμοια αποτελέσματα παρουσιάζονται και για τα άλλα στατιστικά κριτήρια του συντελεστή συσχέτισης, r, του μέσου τετραγωνικού και μέσου απόλυτου σφάλματος (RMSE και MAE, αντίστοιχα). Αξίζει να σημειωθεί ότι μετά την ελαφριά υπεροχή της μεθόδου SKIm_R, οι μέθοδοι SKIm, SK, RK, και OK παρουσιάζουν παρόμοια αποτελέσματα στην χωρική παρεμβολή του δείκτη ξηρασίας SPI-3 και μπορούν να χρησιμοποιηθούν με αρκετή επιτυχία στην χωρική παρεμβολή της ξηρασίας.

Για την ποιοτική ανάλυση των μεθόδων χωρικής παρεμβολής έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων των στατιστικών κριτηρίων σε μηνιαία κλίμακα. Έτσι υπολογίστηκε ο Πίνακας 6.4 που παρουσιάζει τον αριθμό των μηνών που μία από τις οκτώ μεθόδους υπερτερεί από τις άλλες μεθόδους με βάση το εξεταζόμενο στατιστικό κριτήριο. Σε περίπτωση ισοβαθμίας δύο ή και περισσότερων μεθόδων με βάση

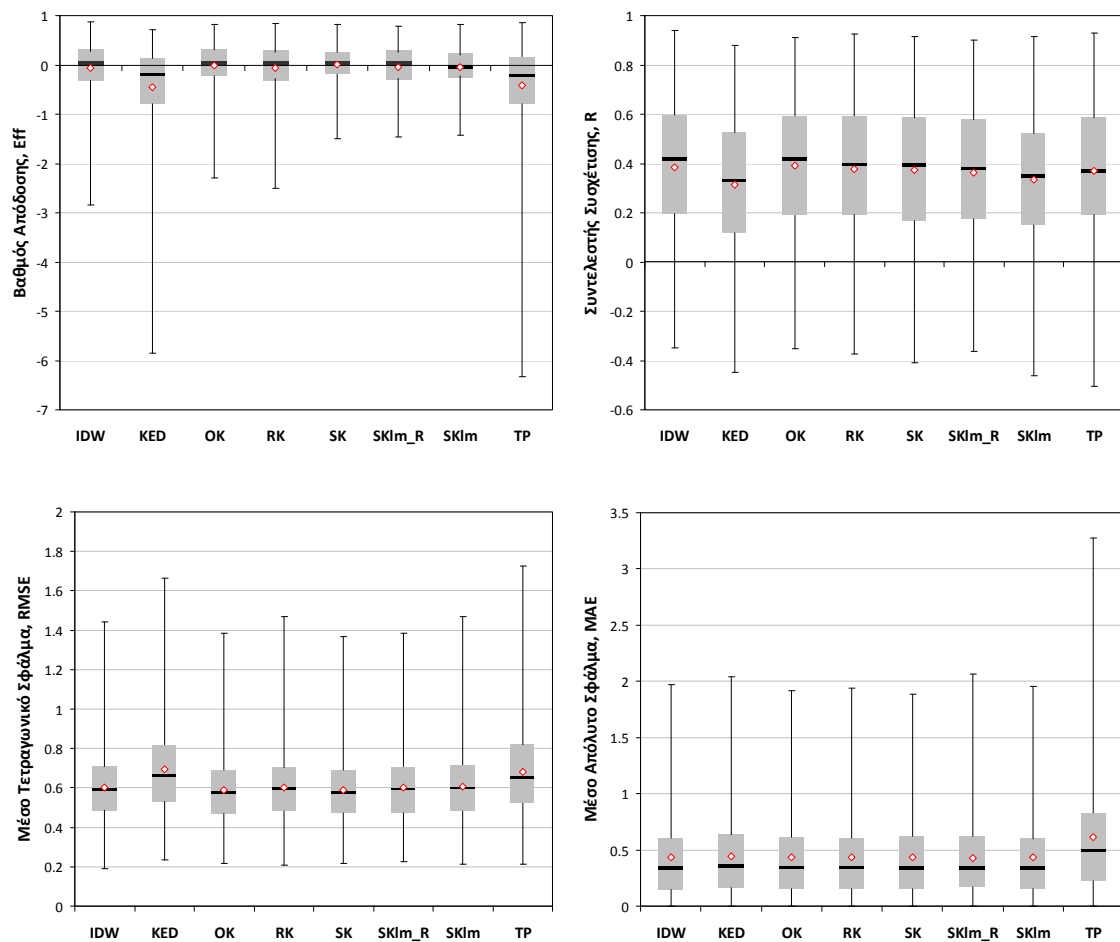
το συγκεκριμένο κριτήριο (π.χ. Eff) όλες οι ισοβαθμούμενες μέθοδοι θεωρούνται ότι προσομοιώνουν καλύτερα τον συγκεκριμένο μήνα. Για παράδειγμα, για τον βαθμό απόδοσης Eff, η μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής simple kriging με μεταβαλλόμενα τοπικά μέσα και με μοντέλο παλινδρόμησης, SKIm_R, υπερτερεί 338 φορές από τις άλλες μεθόδους στους 502 μήνες της χωρικής ανάλυσης. Οι μέθοδοι RK και SK υπερτερούν 53 φορές και 51 φορές αντίστοιχα, και ακολουθούν οι άλλες μέθοδοι. Από τον Πίνακα 6.4 προκύπτει ότι η μέθοδος SKIm_R υπερτερεί έναντι των άλλων μεθόδων στο 67% των μηνών της περιόδου ανάλυσης ενώ οι μέθοδοι RK και SK υπερτερούν στο 10.5% και 10.1% των 502 μηνών όταν χρησιμοποιείται το στατιστικό κριτήριο Eff. Παρόμοια αποτελέσματα παρατηρούνται και για το στατιστικό κριτήριο RMSE (Πίνακας 6.4). Η χρήση των στατιστικών κριτηρίων R, και MAE δείχνουν και πάλι την ανωτερότητα της μεθόδου SKIm_R, αλλά με ελαφρώς χαμηλωμένα ποσοστά ($\approx 58\%$ του συνόλου των 502 μηνών). Αξίζει να σημειωθεί ότι η χρήση του συντελεστή συσχέτισης, R, δείχνει παρόμοια αποτελέσματα με τα στατιστικά κριτήρια Eff, και RMSE. Τα στατιστικά αυτά κριτήρια (Eff, RMSE) δίνουν μεγαλύτερη έμφαση στις αποκλίσεις των ακραίων τιμών από ότι τα R και MAE και είναι πιο ευαίσθητα στην ύπαρξη ακραίων τιμών (outliers), αλλά θεωρούνται πιο αντιπροσωπευτικά κριτήρια για μελέτες ξηρασιών (ή πλημμυρών) με σταθμισμένους δείκτες όπου το ενδιαφέρον παρουσιάζεται σε ακραίες ελάχιστες (ή μέγιστες) τιμές. Από την ανάλυση αυτή προκύπτει ότι για τους 48 σταθμούς ανάπτυξης με βάση την τεχνική cross-validation η μέθοδος SKIm_R είναι η καλύτερη χωρική μέθοδος για τον δείκτη ξηρασίας και μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιχειρησιακά αφού παρουσιάζει την καλύτερη χωρική κατανομή τόσο για ξηρές όσο και για υγρές περιόδους.



Σχήμα 6.11. Στατιστικά χωρικά αποτελέσματα των μεθόδων χωρικής παρεμβολής για τους 48 σταθμούς ανάπτυξης με την τεχνική cross-validation σε μορφή θηκογραμμάτων για την περίοδο της χωρικής παρεμβολής του SPI-3 (Δεκ 1960-Σεπ 2002 = 502 μήνες).

Πίνακας 6.4. Ποιοτικά κριτήρια εκτίμησης χωρικών μεθόδων όπου διάφορες χωρικές μέθοδοι υπερτερούν των άλλων μεθόδων για τα εξεταζόμενα στατιστικά κριτήρια του SPI-3 στους σταθμούς ανάπτυξης με την τεχνική cross-validation: α) Αριθμός μηνών και β) ποσοστό μηνών της περιόδου Δεκ 1960 – Σεπ 2002.

Κριτήριο	IDW	KED	OK	RK	SK	SKIm_R	SKIm	TP
Αριθμός Μηνών								
Eff	12	5	21	53	51	338	31	1
R	30	26	17	89	18	290	22	24
RMSE	12	5	21	55	55	343	40	1
MAE	25	11	42	52	63	293	52	0
Ποσοστό Μηνών								
Eff	2.39	1.00	4.18	10.56	10.16	67.33	6.18	0.20
R	5.98	5.18	3.39	17.73	3.59	57.77	4.38	4.78
RMSE	2.39	1.00	4.18	10.96	10.96	68.33	7.97	0.20
MAE	4.98	2.19	8.37	10.36	12.55	58.37	10.36	0.00



Σχήμα 6.12. Στατιστικά αποτελέσματα των μεθόδων χωρικής παρεμβολής για τους 18 βροχομετρικούς σταθμούς ανεξάρτητης πιστοποίησης σε μορφή θηκογραμμάτων για την για την περίοδο της χωρικής παρεμβολής του SPI-3 (Δεκ 1960-Σεπ 2002 = 502 μήνες).

Η προηγούμενη χωρική ανάλυση έγινε και για τους 18 σταθμούς πιστοποίησης που δεν χρησιμοποιήθηκαν στη χωρική ανάλυση. Τα αποτελέσματα των στατιστικών κριτηρίων (Eff, R, RMSE και MAE) της ανεξάρτητης πιστοποίησης των χωρικών μεθόδων παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.12 για όλη

την περίοδο της χωρικής ανάλυσης (Δεκ 1960-Σεπ 2002 = 502 μήνες) για τους 18 βροχομετρικούς σταθμούς πιστοποίησης. Η πρώτη γενική παρατήρηση είναι ότι οι μέθοδοι των πολύγωνων Thiessen (TP) και της βέλτιστης παρεμβολής kriging με εξωτερική τάση (KED) δεν προσομοιώνουν ικανοποιητικά τη χωρική κατανομή του δείκτη ξηρασίας SPI-3 στους σταθμούς πιστοποίησης. Οι άλλες έξι (6) μέθοδοι (IDW, OK, SK, RK, SKIm και SKIm_R) παρουσιάζουν περίπου ίδια μεταβλητότητα στη χωρική παρεμβολή του SPI-6. Λεπτομερέστερη ανάλυση του Σχήματος 6.12 δείχνει ότι η μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής simple kriging με μεταβαλλόμενα τοπικά μέσα και με μοντέλο παλινδρόμησης SKIm_R προσομοιώνει καλύτερα την χωρική κατανομή του δείκτη ξηρασίας αφού για το στατιστικό κριτήριο του βαθμού απόδοσης, Eff, παρουσιάζει το μικρότερο εύρος από -1.41 έως 0.85 και η μέση τιμή της ανέρχεται στο 0.06 που είναι η καλύτερη τιμή από όλες τις αντίστοιχες μέσες τιμές των άλλων μεθόδων. Παρόμοια αποτελέσματα παρουσιάζονται και για τα άλλα στατιστικά κριτήρια του συντελεστή συσχέτισης, R, και του μέσου τετραγωνικού και απόλυτου σφάλματος, RMSE και MAE, αντίστοιχα. Αξίζει να σημειωθεί ότι μετά την ελαφριά υπεροχή της μεθόδου SKIm_R, οι μέθοδοι SKIm, SK, RK, και OK παρουσιάζουν παρόμοια αποτελέσματα στην χωρική παρεμβολή του δείκτη ξηρασίας SPI-3 και μπορούν να χρησιμοποιηθούν με αρκετή επιτυχία στην χωρική παρεμβολή της ξηρασίας.

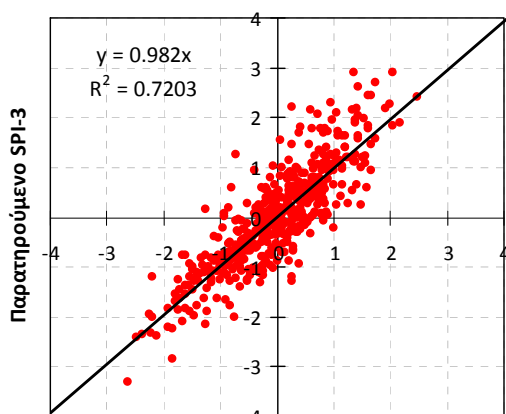
Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των στατιστικών κριτηρίων έγινε και σε μηνιαία κλίμακα για την ποιοτική ανάλυση και αξιολόγηση των μεθόδων χωρικής παρεμβολής. Έτσι υπολογίστηκε ο Πίνακας 6.5 που παρουσιάζει τον αριθμό των μηνών που μία από τις οκτώ μεθόδους υπερτερεί από τις άλλες με βάση το εξεταζόμενο στατιστικό κριτήριο. Σε περίπτωση ισοβαθμίας δύο ή και περισσότερων μεθόδων με βάση το συγκεκριμένο κριτήριο (π.χ. Eff) όλες οι ισοβαθμούμενες μέθοδοι θεωρούνται ότι προσομοιώνουν καλύτερα τον συγκεκριμένο μήνα. Για παράδειγμα για τον βαθμό απόδοσης Eff, η μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής simple kriging με μεταβαλλόμενα τοπικά μέσα και με μοντέλο παλινδρόμησης, SKIm_R, υπερτερεί 86 φορές από τις άλλες μεθόδους, δηλαδή στο 17% του συνόλου των μηνών ανάλυσης. Αξιοσημείωτη είναι η απόδοση της μεθόδου πολυγώνων Thiessen που υπερτερεί από τις άλλες μεθόδους για τα στατιστικά κριτήρια R και MAE με ποσοστά γύρω στο 26% (Πίνακας 6.5). Το τελευταίο αποτέλεσμα έρχεται σε αντίθεση με τα αποτελέσματα των σταθμών ανάπτυξης αλλά και από τα γενικά στατιστικά στοιχεία του Σχήματος 6.12. Από την ανάλυση αυτή προκύπτει ότι για τους 18 σταθμούς πιστοποίησης η μέθοδος SKIm_R είναι η καλύτερη χωρική μέθοδος για τον δείκτη ξηρασίας SPI-3 αφού έχει τα καλύτερα στατιστικά χαρακτηριστικά και κατατάσσεται πρώτη μέθοδος από τις οκτώ (8) μελετημένες μεθόδους για τα κριτήρια Eff και RMSE και δεύτερη για τα κριτήρια R και MAE.

Για την πληρέστερη εκτίμηση των χωρικών μεθόδων, οι παραγόμενες μηνιαίες χρονοσειρές SPI-3 όπως υπολογίστηκαν από τις χωρικές μεθόδους συγκρίθηκαν με τις παρατηρούμενες τιμές SPI-3 στους σταθμούς πιστοποίησης. Η χρονική ανάλυση έγινε για την περίοδο Δεκ 1960 - Σεπ 2002 και τα στατιστικά κριτήρια της χρονικής εκτίμησης που χρησιμοποιήθηκαν είναι ο βαθμός απόδοσης Eff, ο συντελεστής συσχέτισης R, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMSE και το μέσο απόλυτο σφάλμα MAE. Ο Πίνακας 6.6 παρουσιάζει το βαθμό απόδοσης, Eff της χρονικής προσομοίωσης των σταθμών πιστοποίησης και ο Πίνακας 6.7 τα συγκεντρωτικά στατιστικά κριτήρια που προέκυψαν από όλους τους σταθμούς πιστοποίησης. Το Σχήμα 6.13 παρουσιάζει τα διαγράμματα διασποράς του SPI-3 για επιλεγμένες χωρικές μεθοδολογίες του βροχομετρικού σταθμού Αμάραντος με ID_50. Τα αποτελέσματα της χρονικής ανάλυσης δείχνουν και πάλι ότι η μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής simple kriging με μεταβαλλόμενα τοπικά μέσα και με μοντέλο παλινδρόμησης (SKIm_R) προσομοιώνει ελαφρώς καλύτερα την χρονική κατανομή του δείκτη ξηρασίας SPI-3 για τους 18 σταθμούς πιστοποίησης. Οι παραλλαγές της μεθόδου βέλτιστης παρεμβολής kriging (OK, RK, SK, SKIm) και η μέθοδος IDW μπορούν και αυτές να εφαρμοστούν για χωρική και χρονική προσομοίωση. Η μέθοδος KED παρουσιάζει προβλήματα στους σταθμούς Καρπερό (ID_55) και Κατάφυτο (ID_56) που βρίσκονται εκτός της υδρολογικής λεκάνης του Πηνειού. Ένας πιθανός λόγος είναι η προβληματική εφαρμογή του θεωρητικού ημιμεταβλητογραφήματος στους σταθμούς αυτούς. Αν εξαιρεθούν οι δύο προηγούμενοι σταθμοί τότε η απόδοση της KED για χρονική προσομοίωση είναι συγκρίσιμη με τις άλλες συνδυαστικές μεθοδολογίες. Η μέθοδος των πολυγώνων Thiessen (TP) παρουσιάζεται ως η χειρότερη

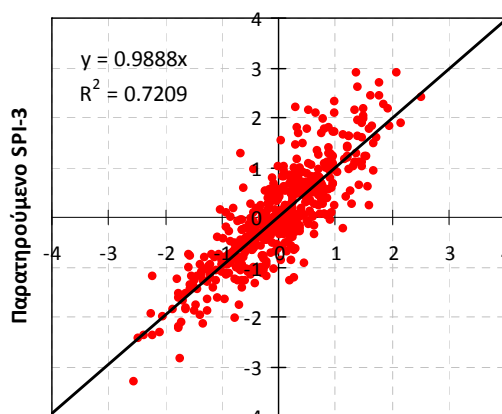
μέθοδος και η χρήση της πρέπει να αποφεύγεται. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι οι χωρικές μεθοδολογίες μπορούν να εφαρμοστούν για χωροχρονική προσομοίωση αλλά προσοχή πρέπει να δοθεί στην επιλογή της χωρικής μεθόδου αφού το χωρικό σφάλμα που παρατηρείται είναι μεγάλο και μεταβάλλεται με τη χρονικό βήμα εφαρμογής. Επίσης, όπως προκύπτει από τα παραπάνω αποτελέσματα ο αριθμός των σταθμών που απαιτούνται για ικανοποιητική χωρική και χρονική προσομοίωση πρέπει να είναι όσο το δυνατόν περισσότεροι για την κάλυψη της υπό μελέτης περιοχής.

Πίνακας 6.5. Ποιοτικά κριτήρια εκτίμησης χωρικών μεθόδων όπου διάφορες χωρικές μέθοδοι υπερτερούν των άλλων μεθόδων για τα εξεταζόμενα στατιστικά κριτήρια του SPI-3 στους σταθμούς πιστοποίησης: α)Αριθμός μηνών και β) ποσοστό μηνών της περιόδου Δεκ 1960 – Σεπ 2002.

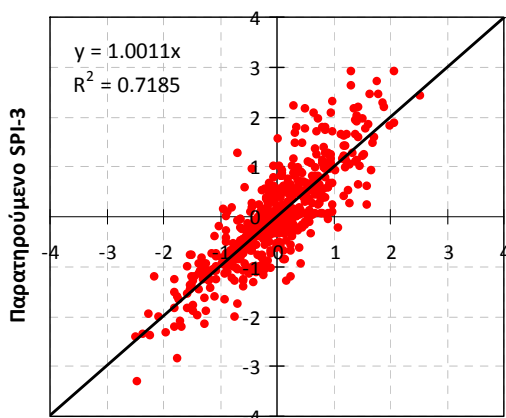
Κριτήριο	IDW	KED	OK	RK	SK	SKIm_R	SKIm	TP
Αριθμός Μηνών								
Eff	75	42	62	37	69	86	64	67
R	63	55	54	45	34	91	29	131
RMSE	75	42	62	37	69	86	64	67
MAE	69	62	40	44	54	71	44	130
Ποσοστό Μηνών								
Eff	14.94	8.37	12.35	7.37	13.75	17.13	12.75	13.35
R	12.55	10.96	10.76	8.96	6.77	18.13	5.78	26.10
RMSE	14.94	8.37	12.35	7.37	13.75	17.13	12.75	13.35
MAE	13.75	12.35	7.97	8.76	10.76	14.14	8.76	25.90



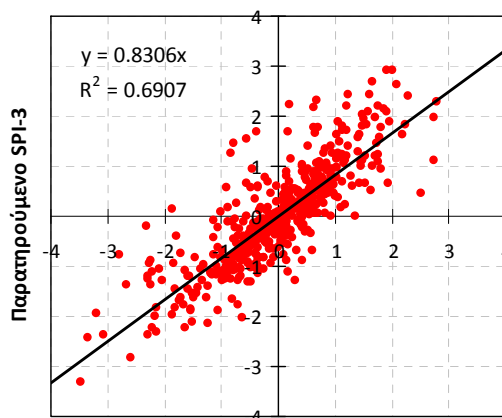
Υπολογισμένο SPI-3 με IDW



Υπολογισμένο SPI-3 με RK



Υπολογισμένο SPI-3 με SKIm_R



Υπολογισμένο SPI-3 με TP

Σχήμα 6.13. Διαγράμματα διασποράς επιλεγμένων μεθόδων χωρικής παρεμβολής για μηνιαία χρονική προσομοίωση του SPI-3 της περιόδου Δεκ 1960-Σεπ 2002 στον βροχομετρικό σταθμό Αμάραντος με ID_50.

Πίνακας 6.6. Βαθμός απόδοσης Eff χωρικών μεθόδων για τη χρονική προσομοίωση του SPI-3 των σταθμών πιστοποίησης της περιόδου Δεκ 1960 – Σεπ 2002.

Σταθμός	IDW	KED	OK	RK	SK	SKlm_R	SKlm	TP
ID_49	0.68	0.66	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.35
ID_50	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.71	0.66
ID_51	0.69	0.70	0.69	0.69	0.70	0.70	0.70	0.57
ID_52	0.74	0.73	0.73	0.73	0.72	0.73	0.72	0.74
ID_53	0.68	0.69	0.67	0.67	0.66	0.68	0.66	0.51
ID_54	0.46	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.41
ID_55	0.63	-0.75	0.64	0.61	0.64	0.64	0.61	0.26
ID_56	0.52	-0.36	0.52	0.34	0.49	0.52	0.25	0.42
ID_57	0.78	0.75	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.74
ID_58	0.59	0.52	0.60	0.59	0.61	0.61	0.58	0.49
ID_59	0.55	0.66	0.61	0.58	0.62	0.62	0.62	0.30
ID_60	0.37	0.57	0.56	0.54	0.57	0.57	0.56	0.36
ID_61	0.91	0.91	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.93
ID_62	0.63	0.53	0.64	0.60	0.64	0.64	0.54	0.49
ID_63	0.60	0.15	0.60	0.59	0.61	0.61	0.61	0.53
ID_64	0.51	0.51	0.52	0.52	0.54	0.54	0.54	0.36
ID_65	0.30	0.29	0.30	0.29	0.31	0.31	0.32	0.16
ID_66	0.51	0.56	0.57	0.56	0.58	0.59	0.58	0.45

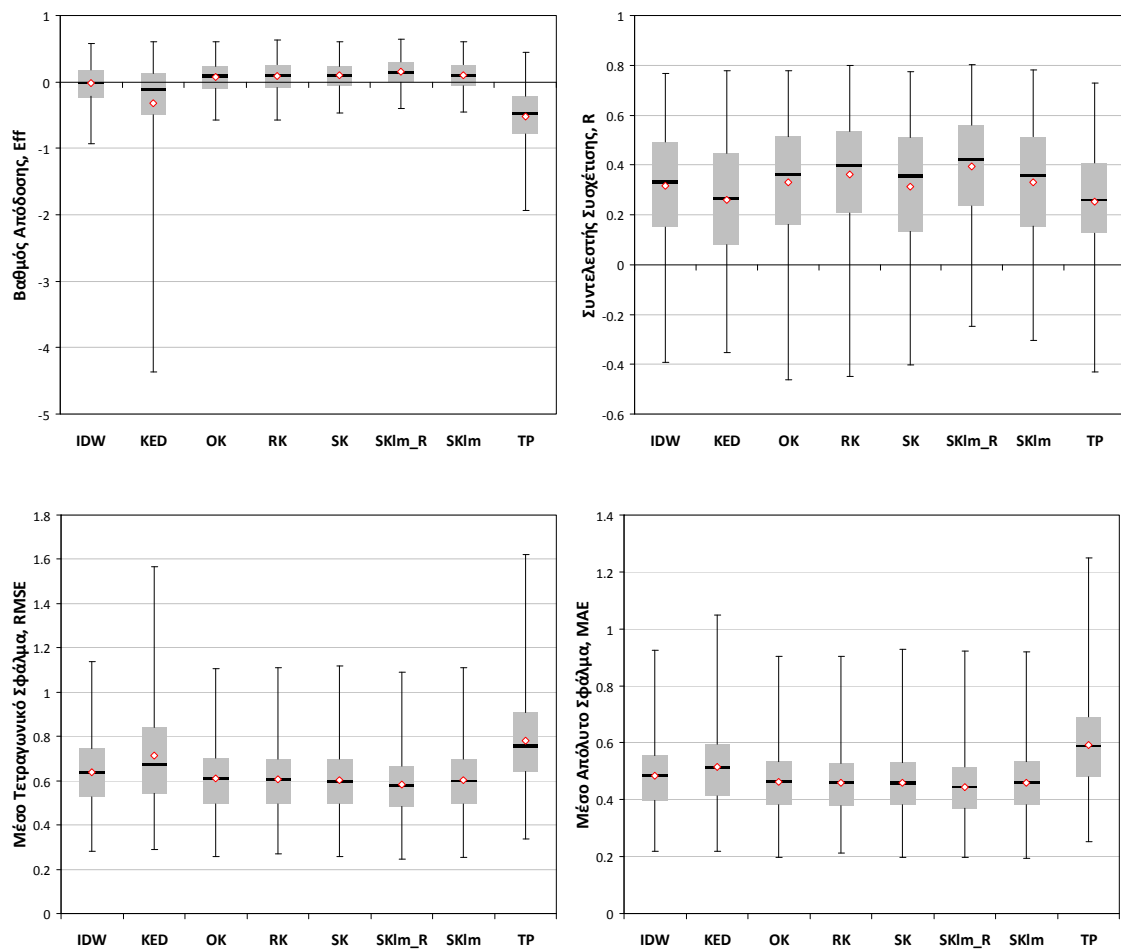
Πίνακας 6.7. Στατιστικά αποτελέσματα χωρικών μεθόδων για τη χρονική προσομοίωση του SPI-3 των σταθμών πιστοποίησης της περιόδου Δεκ 1960 – Σεπ 2002.

	IDW	KED	OK	RK	SK	SKlm_R	SKlm	TP
Βαθμός Απόδοσης, Eff								
Μέση Τιμή	0.60	0.46	0.62	0.60	0.62	0.63	0.60	0.48
Διάμεσος	0.61	0.56	0.62	0.60	0.63	0.63	0.61	0.47
Μέγιστη Τιμή	0.91	0.91	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.93
Ελάχιστη Τιμή	0.30	-0.75	0.30	0.29	0.31	0.31	0.25	0.16
Συντελεστής Συσχέτισης, R								
Μέση Τιμή	0.79	0.75	0.79	0.79	0.79	0.80	0.78	0.74
Διάμεσος	0.79	0.76	0.79	0.78	0.80	0.80	0.78	0.73
Μέγιστη Τιμή	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.96
Ελάχιστη Τιμή	0.60	0.47	0.60	0.59	0.60	0.60	0.58	0.58
Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα, RMSE								
Μέση Τιμή	0.62	0.69	0.60	0.62	0.60	0.59	0.62	0.70
Διάμεσος	0.62	0.66	0.62	0.64	0.61	0.60	0.63	0.73
Μέγιστη Τιμή	0.84	1.32	0.84	0.84	0.83	0.83	0.87	0.92
Ελάχιστη Τιμή	0.30	0.31	0.31	0.31	0.32	0.30	0.32	0.27
Μέσο Απόλυτο Σφάλμα, MAE								
Μέση Τιμή	0.46	0.52	0.45	0.46	0.45	0.45	0.47	0.51
Διάμεσος	0.46	0.49	0.45	0.47	0.45	0.45	0.47	0.54
Μέγιστη Τιμή	0.60	1.01	0.61	0.64	0.61	0.60	0.69	0.65
Ελάχιστη Τιμή	0.21	0.22	0.22	0.22	0.23	0.21	0.23	0.17

6.3.2. Χρονική κλίμακα SPI-6μηνών

Η προηγούμενη χωρική ανάλυση πραγματοποιήθηκε και για τον δείκτη ξηρασίας SPI-6μηνών (SPI-6). Τα αποτελέσματα των στατιστικών κριτηρίων (Eff, r, RMSE και MAE) της τεχνικής διασταυρωμένης επιβεβαίωσης των προβλέψεων (cross-validation) των χωρικών μεθόδων παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.14 για όλη την περίοδο της ανάλυσης (Μαρ 1961-Σεπ 2002 = 499 μήνες) για τους 48 σταθμούς

ανάπτυξης. Η πρώτη γενική εντύπωση είναι ότι οι μέθοδοι των Πολύγωνων Thiessen (TP) και της βέλτιστης παρεμβολής kriging με εξωτερική τάση (KED) δεν μπορούν να προσομοιώσουν ικανοποιητικά την χωρική κατανομή του δείκτη ξηρασίας SPI-6. Το ίδιο επίσης παρατηρείται για τη μέθοδο IDW. Οι άλλες πέντε (5) μέθοδοι (OK, SK, RK, SKIm και SKIm_R) παρουσιάζουν περίπου ίδια μεταβλητότητα στη χωρική κατανομή του SPI-6. Λεπτομερέστερη ανάλυση του Σχήματος 6.14 δείχνει ότι η μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής simple kriging με μεταβαλλόμενα τοπικά μέσα και με μοντέλο παλινδρόμησης SKIm_R προσομοιώνει καλύτερα την χωρική παρεμβολή του δείκτη ξηρασίας SPI-6 αφού για το στατιστικό κριτήριο του βαθμού απόδοσης, Eff, παρουσιάζει τη μικρότερο εύρος από -0.40 (ελάχιστη τιμή) έως 0.64 (μέγιστη τιμή) και η μέση τιμή της ανέρχεται στο 0.15 που είναι η καλύτερη τιμή από όλες τις αντίστοιχες μέσες τιμές των άλλων μεθόδων. Παρόμοια αποτελέσματα παρουσιάζονται και για τα άλλα στατιστικά κριτήρια του συντελεστή συσχέτισης, R, του μέσου τετραγωνικού και απόλυτου σφάλματος, RMSE και MAE, αντίστοιχα. Αξίζει να σημειωθεί ότι μετά την ελαφριά υπεροχή της μεθόδου SKIm_R, οι μέθοδοι SKIm, SK, και RK, παρουσιάζουν παρόμοια αποτελέσματα στην χωρική παρεμβολή του δείκτη ξηρασίας SPI-6 και μπορούν να χρησιμοποιηθούν εναλλακτικά στην χωρική παρεμβολή του δείκτη ξηρασίας SPI-6.



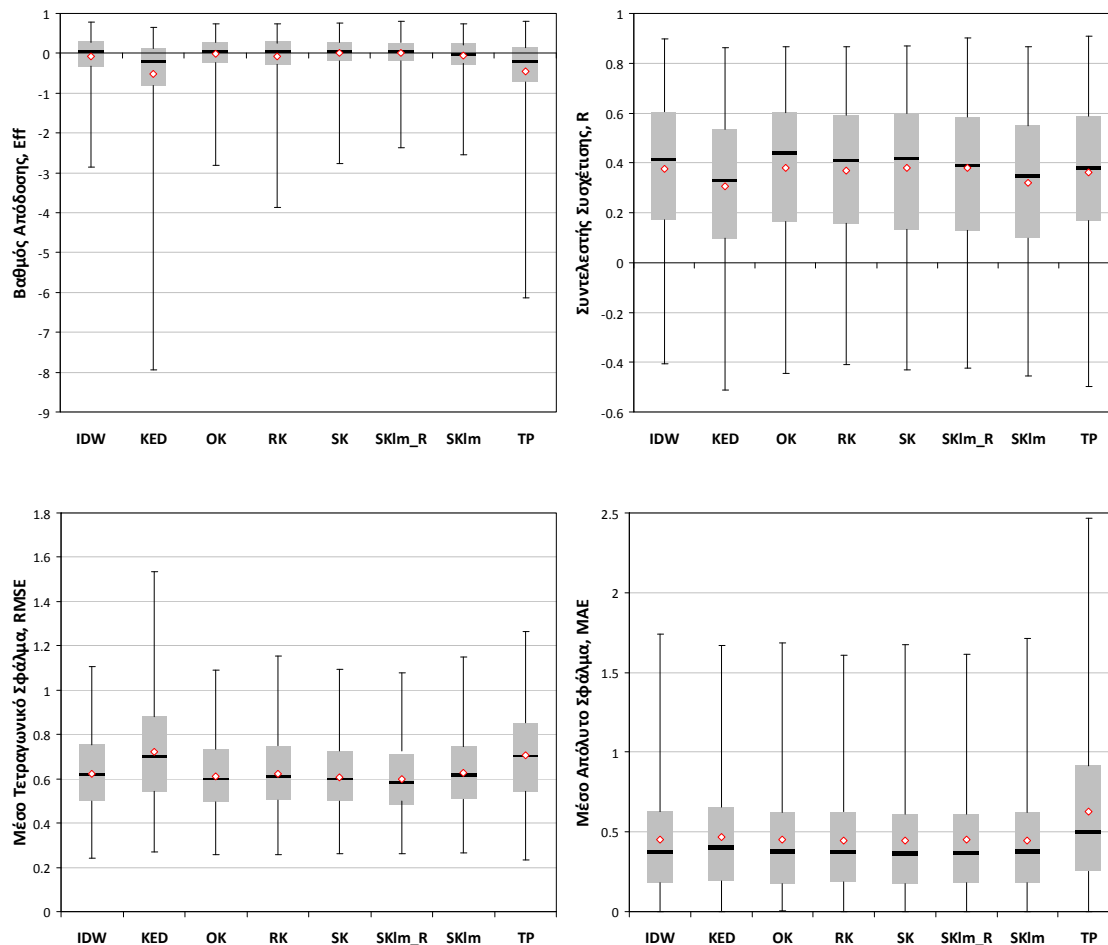
Σχήμα 6.14. Στατιστικά αποτελέσματα των μεθόδων χωρικής παρεμβολής για τους 48 σταθμούς ανάπτυξης με την τεχνική cross-validation σε μορφή θηκογραμμάτων για την περίοδο της χωρικής παρεμβολής του SPI-6 (Μαρ 1961-Σεπ 2002 = 499 μήνες).

Για την ποιοτική ανάλυση των μεθόδων χωρικής παρεμβολής έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων των στατιστικών κριτηρίων σε μηνιαία κλίμακα. Έτσι υπολογίστηκε ο Πίνακας 6.8 που παρουσιάζει τον αριθμό των μηνών που μία από τις οκτώ μεθόδους υπερτερεί από τις άλλες μεθόδους με βάση το εξεταζόμενο στατιστικό κριτήριο. Σε περίπτωση ισοβαθμίας δύο ή και περισσότερων μεθόδων με βάση το συγκεκριμένο κριτήριο (π.χ. Eff) όλες οι ισοβαθμούμενες μέθοδοι θεωρούνται ότι προσομοιώνουν καλύτερα τον συγκεκριμένο μήνα. Η μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής simple kriging με μεταβαλλόμενα τοπικά μέσα και με μοντέλο παλινδρόμησης, SKIm_R, υπερτερεί 344 φορές από τις άλλες μεθόδους στους 499 μήνες της χωρικής ανάλυσης με βάση το στατιστικό κριτήριο Eff. Οι μέθοδοι SK και RK υπερτερούν 49 φορές και 44 φορές αντίστοιχα, και μετά ακολουθούν οι άλλες μέθοδοι (Πίνακας 6.8). Από τον Πίνακα 6.8 προκύπτει ότι η μέθοδος SKIm_R υπερτερεί έναντι των άλλων μεθόδων στο 69% των μηνών της περιόδου ανάλυσης όταν χρησιμοποιείται το στατιστικό κριτήριο Eff. Παρόμοια αποτελέσματα παρατηρούνται και για το στατιστικό κριτήριο RMSE (Πίνακας 6.8). Η χρήση των στατιστικών κριτηρίων R, και MAE δείχνουν και πάλι την ανωτερότητα της μεθόδου SKIm_R, αλλά με ελαφρώς χαμηλωμένα ποσοστά (60.5% και 56%, αντίστοιχα, του συνόλου των 499 μηνών).

Πίνακας 6.8. Ποιοτικά κριτήρια εκτίμησης χωρικών μεθόδων α)Αριθμός μηνών όπου διάφορες χωρικές μέθοδοι υπερτερούν των άλλων μεθόδων για τα εξεταζόμενα στατιστικά κριτήρια του SPI-6 στους σταθμούς ανάπτυξης με την τεχνική cross-validation και β) ποσοστό μηνών της περιόδου Δεκ 1960 – Σεπ 2002.

Κριτήριο	IDW	KED	OK	RK	SK	SKIm_R	SKIm	TP
Αριθμός Μηνών								
Eff	16	4	14	44	49	344	34	0
R	24	17	16	77	27	302	16	29
RMSE	16	4	16	46	51	348	41	0
MAE	28	12	32	51	62	279	63	0
Ποσοστό Μηνών								
Eff	3.21	0.80	2.81	8.82	9.82	68.94	6.81	0.00
R	4.81	3.41	3.21	15.43	5.41	60.52	3.21	5.81
RMSE	3.21	0.80	3.21	9.22	10.22	69.74	8.22	0.00
MAE	5.61	2.40	6.41	10.22	12.42	55.91	12.63	0.00

Η προηγούμενη χωρική ανάλυση έγινε και για τους 18 σταθμούς πιστοποίησης που δεν χρησιμοποιήθηκαν στη χωρική ανάλυση. Τα αποτελέσματα των στατιστικών κριτηρίων (Eff, r, RMSE και MAE) της ανεξάρτητης πιστοποίησης των χωρικών μεθόδων παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.15 για όλη την περίοδο της χωρικής ανάλυσης (Μαρ 1961-Σεπ 2002 = 499 μήνες) για τους 18 βροχομετρικούς σταθμούς πιστοποίησης. Και πάλι οι μέθοδοι των πολύγωνων Thiessen (TP) και της βέλτιστης παρεμβολής kriging με εξωτερική τάση (KED) δεν προσομοιώνουν ικανοποιητικά την χωρική παρεμβολή του δείκτη ξηρασίας SPI-6 στους σταθμούς πιστοποίησης. Οι άλλες έξι (6) μέθοδοι (IDW, OK, SK, RK, SKIm και SKIm_R) παρουσιάζουν περίπου ίδια μεταβλητότητα στη χωρική παρεμβολή του SPI-6. Λεπτομερέστερη ανάλυση του Σχήματος 6.15 δείχνει ότι η μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής simple kriging με μεταβαλλόμενα τοπικά μέσα και με μοντέλο παλινδρόμησης SKIm_R προσομοιώνει καλύτερα την χωρική κατανομή του δείκτη ξηρασίας αφού για το στατιστικό κριτήριο του βαθμού απόδοσης, Eff, παρουσιάζει το μικρότερο εύρος από -0.40 έως 0.73 και η μέση τιμή της ανέρχεται στο 0.18 που είναι η καλύτερη τιμή από όλες τις αντίστοιχες μέσες τιμές των άλλων μεθόδων. Παρόμοια αποτελέσματα παρουσιάζονται και για τα άλλα στατιστικά κριτήρια του συντελεστή συσχέτισης, r, του μέσου τετραγωνικού και μέσου απόλυτου σφάλματος (RMSE και MAE, αντίστοιχα). Αξίζει να σημειωθεί ότι μετά την ελαφριά υπεροχή της μεθόδου SKIm_R, οι μέθοδοι SKIm, SK, RK, και OK παρουσιάζουν παρόμοια αποτελέσματα στην χωρική παρεμβολή του δείκτη ξηρασίας SPI-6 και μπορούν να χρησιμοποιηθούν με αρκετή επιτυχία στην χωρική παρεμβολή της ξηρασίας.



Σχήμα 6.15. Στατιστικά χωρικά αποτελέσματα των μεθόδων χωρικής παρεμβολής για τους 18 βροχομετρικούς σταθμούς ανεξάρτητης πιστοποίησης σε μορφή θηκογραμμάτων για την περίοδο της χωρικής παρεμβολής του SPI-6 (Δεκ 1960-Σεπ 2002 = 502 μήνες).

Η ποιοτική ανάλυση των μεθόδων χωρικής παρεμβολής προέκυψε από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των στατιστικών κριτηρίων σε μηνιαία κλίμακα. Έτσι υπολογίστηκε ο Πίνακας 6.9 που παρουσιάζει τον αριθμό των μηνών που μία από τις οκτώ μεθόδους υπερτερεί από τις άλλες με βάση το εξεταζόμενο στατιστικό κριτήριο. Σε περίπτωση ισοβαθμίας δύο ή και περισσότερων μεθόδων με βάση το συγκεκριμένο κριτήριο (π.χ. Eff) όλες οι ισοβαθμούμενες μέθοδοι θεωρούνται ότι προσομοιώνουν καλύτερα τον συγκεκριμένο μήνα. Για παράδειγμα για τον βαθμό απόδοσης Eff, η μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής simple kriging με μεταβαλλόμενα τοπικά μέσα και με μοντέλο παλινδρόμησης, SKlm_R, υπερτερεί 79 φορές από τις άλλες μεθόδους, δηλαδή στο 16% του συνόλου των μηνών ανάλυσης. Αξιοσημείωτη είναι η απόδοση της μεθόδου πολυγώνων Thiessen που υπερτερεί από τις άλλες μεθόδους για τα στατιστικά κριτήρια R και MAE με ποσοστά στο 29% και 26%, αντίστοιχα, για την περίοδο της ανάλυσης (Πίνακας 6.9). Το τελευταίο αποτέλεσμα έρχεται σε αντίθεση με τα αποτελέσματα των σταθμών ανάπτυξης αλλά και από τα γενικά στατιστικά στοιχεία του Σχήματος 6.15. Από την ανάλυση αυτή προκύπτει ότι για τους 18 σταθμούς πιστοποίησης η μέθοδος SKlm_R είναι η καλύτερη χωρική μέθοδος για τον δείκτη ξηρασίας SPI-6 αφού έχει τα καλύτερα στατιστικά χαρακτηριστικά και κατατάσσεται πρώτη μέθοδος από τις οκτώ (8) χωρικές μεθόδους για τα κριτήρια Eff και RMSE και δεύτερη για τα κριτήρια R και MAE.

Πίνακας 6.9. Ποιοτικά κριτήρια εκτίμησης χωρικών μεθόδων α)Αριθμός μηνών και β) ποσοστό μηνών της περιόδου Δεκ 1960 – Σεπ 2002, όπου διάφορες χωρικές μέθοδοι υπερτερούν των άλλων μεθόδων για τα εξεταζόμενα στατιστικά κριτήρια του SPI-6 στους σταθμούς πιστοποίησης.

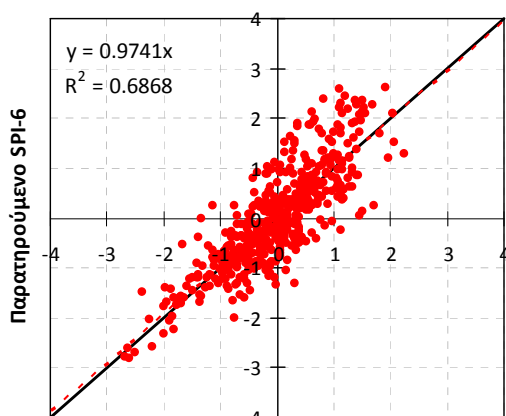
Κριτήριο	IDW	KED	OK	RK	SK	SKIm_R	SKIm	TP
Αριθμός Μηνών								
Eff	67	43	79	32	78	79	67	54
R	52	98	49	49	33	50	25	143
RMSE	67	43	79	32	78	79	67	54
MAE	57	65	29	44	56	72	58	129
Ποσοστό Μηνών								
Eff	13.43	8.62	15.83	6.41	15.63	15.83	13.43	10.82
R	10.42	19.64	9.82	9.82	6.61	10.02	5.01	28.66
RMSE	13.43	8.62	15.83	6.41	15.63	15.83	13.43	10.82
MAE	11.42	13.03	5.81	8.82	11.22	14.43	11.62	25.85

Για την καλύτερη εκτίμηση των χωρικών μεθόδων, οι παραγόμενες μηνιαίες χρονοσειρές SPI-6 όπως υπολογίστηκαν από τις χωρικές μεθόδους συγκρίθηκαν με τις παρατηρούμενες τιμές SPI-6 στους σταθμούς πιστοποίησης. Η χρονική ανάλυση έγινε για την περίοδο Μαρ 1961 - Σεπ 2002 και τα στατιστικά κριτήρια της χρονικής εκτίμησης που χρησιμοποιήθηκαν είναι ο βαθμός απόδοσης Eff, ο συντελεστής συσχέτισης R, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMSE και το μέσο απόλυτο σφάλμα MAE. Ο Πίνακας 6.10 παρουσιάζει το βαθμό απόδοσης, Eff της χρονικής προσομοίωσης των σταθμών πιστοποίησης και ο Πίνακας 6.11 τα συγκεντρωτικά στατιστικά κριτήρια που προέκυψαν από όλους τους σταθμούς πιστοποίησης. Το Σχήμα 6.16 παρουσιάζει τα διαγράμματα διασποράς του SPI-6 για επιλεγμένες χωρικές μεθοδολογίες του βροχομετρικού σταθμού Αμάραντος με ID_50. Τα αποτελέσματα της χρονικής ανάλυσης δείχνουν και πάλι ότι η μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής simple kriging με μεταβαλλόμενα τοπικά μέσα και με μοντέλο παλινδρόμησης (SKIm_R) προσομοιώνει ελαφρώς καλύτερα την χρονική κατανομή του δείκτη ξηρασίας SPI-6 για τους 18 σταθμούς πιστοποίησης. Οι παραλλαγές της μεθόδου βέλτιστης παρεμβολής kriging (OK, RK, SK, SKIm) και η μέθοδος IDW μπορούν και αυτές να εφαρμοστούν για χωρική και χρονική προσομοίωση. Η μέθοδος KED παρουσιάζει προβλήματα στους σταθμούς Καρπερό (ID_55) και Κατάφυτο (ID_56) που βρίσκονται εκτός της υδρολογικής λεκάνης του Πηνειού. Η εξαίρεση των δύο αυτών σταθμών βελτιώνει την απόδοση της KED για χρονική προσομοίωση και είναι συγκρίσιμη με τις άλλες συνδυαστικές μεθοδολογίες. Η μέθοδος των πολυγώνων Thiessen (TP) παρουσιάζεται ως η χειρότερη μέθοδος και η χρήση της πρέπει να αποφεύγεται.

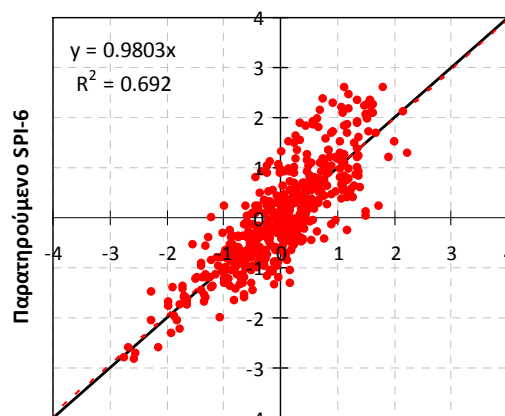
Το γενικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι οι χωρικές μεθοδολογίες μπορούν να εφαρμοστούν για χωροχρονική προσομοίωση του δείκτη ξηρασίας SPI-6 αλλά μεγάλη προσοχή πρέπει να δίνεται στην επιλογή της χωρικής μεθόδου αφού το χωρικό σφάλμα που παρατηρείται είναι μεγάλο και μεταβάλλεται με το χρονικό βήμα εφαρμογής. Επίσης, όπως προκύπτει από τα παραπάνω αποτελέσματα ο αριθμός των σταθμών που απαιτούνται για ικανοποιητική χωρική και χρονική προσομοίωση πρέπει να είναι όσο το δυνατόν περισσότεροι για την κάλυψη της υπό μελέτη περιοχής όπως αποδεικνύει η τεχνική της cross-validation για τους σταθμούς ανάπτυξης.

Πίνακας 6.10. Βαθμός απόδοσης Eff χωρικών μεθόδων για τη χρονική προσομοίωση των σταθμών πιστοποίησης της περιόδου Δεκ 1960 – Σεπ 2002.

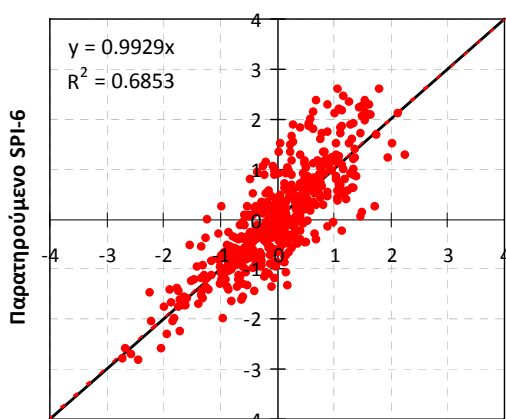
Σταθμός	IDW	KED	OK	RK	SK	SKIm_R	SKIm	TP
ID_49	0.68	0.66	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.36
ID_50	0.69	0.68	0.68	0.69	0.68	0.69	0.68	0.66
ID_51	0.66	0.67	0.68	0.66	0.70	0.70	0.70	0.51
ID_52	0.80	0.76	0.77	0.78	0.75	0.80	0.76	0.82
ID_53	0.70	0.69	0.68	0.69	0.67	0.70	0.67	0.56
ID_54	0.39	0.42	0.42	0.42	0.43	0.43	0.42	0.32
ID_55	0.62	-0.94	0.63	0.60	0.65	0.65	0.62	0.23
ID_56	0.52	-0.49	0.53	0.36	0.49	0.53	0.22	0.44
ID_57	0.75	0.73	0.74	0.74	0.74	0.75	0.74	0.70
ID_58	0.53	0.45	0.54	0.54	0.56	0.56	0.52	0.46
ID_59	0.55	0.66	0.61	0.58	0.63	0.63	0.63	0.29
ID_60	0.33	0.52	0.52	0.51	0.53	0.53	0.52	0.32
ID_61	0.91	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.89	0.94
ID_62	0.59	0.50	0.62	0.54	0.62	0.62	0.48	0.30
ID_63	0.60	0.30	0.60	0.59	0.61	0.61	0.61	0.52
ID_64	0.46	0.47	0.48	0.47	0.49	0.50	0.49	0.31
ID_65	0.24	0.23	0.24	0.23	0.25	0.26	0.26	0.13
ID_66	0.44	0.51	0.51	0.50	0.53	0.54	0.53	0.38



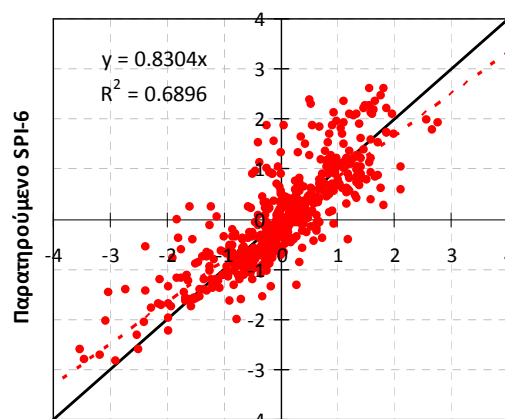
Υπολογισμένο SPI-6 με IDW



Υπολογισμένο SPI-6 με RK



Υπολογισμένο SPI-6 με SKIm_R



Υπολογισμένο SPI-6 με TP

Σχήμα 6.16. Διαγράμματα διασποράς επιλεγμένων μεθόδων χωρικής παρεμβολής για μηνιαία χρονική προσομοίωση της περιόδου Μαρ 1961 - Σεπ 2002 στον βροχομετρικό σταθμό Αμάραντος με ID_50. Με μαύρο χρώμα η Γραμμή 1:1 και με κόκκινο διακεκομμένο η Γραμμή παλινδρόμησης της μορφής $y=ax$.

Πίνακας 6.11. Στατιστικά αποτελέσματα χωρικών μεθόδων για τη χρονική προσομοίωση των σταθμών πιστοποίησης της περιόδου Δεκ 1960 – Σεπ 2002.

	IDW	KED	OK	RK	SK	SKIm_R	SKIm	TP
Βαθμός Απόδοσης, Eff								
Μέση Τιμή	0.58	0.43	0.60	0.58	0.61	0.62	0.58	0.46
Διάμεσος	0.59	0.51	0.61	0.59	0.62	0.63	0.62	0.41
Μέγιστη Τιμή	0.91	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.89	0.94
Ελάχιστη Τιμή	0.24	-0.94	0.24	0.23	0.25	0.26	0.22	0.13
Συντελεστής Συσχέτισης, R								
Μέση Τιμή	0.77	0.73	0.78	0.77	0.78	0.79	0.77	0.73
Διάμεσος	0.78	0.73	0.79	0.78	0.79	0.80	0.79	0.70
Μέγιστη Τιμή	0.96	0.95	0.95	0.95	0.95	0.96	0.94	0.97
Ελάχιστη Τιμή	0.56	0.45	0.55	0.55	0.56	0.56	0.56	0.57
Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα, RMSE								
Μέση Τιμή	0.63	0.71	0.62	0.63	0.62	0.61	0.64	0.72
Διάμεσος	0.64	0.70	0.62	0.64	0.61	0.60	0.62	0.77
Μέγιστη Τιμή	0.87	1.39	0.87	0.88	0.86	0.86	0.88	0.93
Ελάχιστη Τιμή	0.30	0.32	0.32	0.31	0.32	0.30	0.33	0.24
Μέσο Απόλυτο Σφάλμα, MAE								
Μέση Τιμή	0.48	0.54	0.47	0.48	0.47	0.46	0.49	0.54
Διάμεσος	0.49	0.52	0.47	0.49	0.46	0.46	0.47	0.57
Μέγιστη Τιμή	0.64	1.08	0.65	0.65	0.64	0.64	0.68	0.67
Ελάχιστη Τιμή	0.21	0.23	0.23	0.23	0.24	0.21	0.24	0.17

6.3.3. Χρονική κλίμακα SPI-12μηνών

Η χωρική ανάλυση πραγματοποιήθηκε και για τον δείκτη ξηρασίας SPI-12μηνών (SPI-12). Τα αποτελέσματα των στατιστικών κριτηρίων (Eff, r, RMSE και MAE) της τεχνικής διασταυρωμένη επιβεβαίωση των προβλέψεων (cross-validation) των χωρικών μεθόδων παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.17 για όλη την περίοδο της ανάλυσης (Σεπ 1961-Σεπ 2002 = 493 μήνες) για τους 48 σταθμούς ανάπτυξης. Η πρώτη γενική εντύπωση είναι ότι οι μέθοδοι των Πολύγωνων Thiessen (TP) και της βέλτιστης παρεμβολής kriging με εξωτερική τάση (KED) δεν μπορούν να προσομοιώσουν ικανοποιητικά την χωρική κατανομή του δείκτη ξηρασίας SPI-12. Οι άλλες παραλλαγές της μεθόδου Kriging (OK, SK, RK, SKIm και SKIm_R) παρουσιάζουν περίπου ίδια μεταβλητότητα στη χωρική παρεμβολή του SPI-12, ενώ η μέθοδος IDW δεν προσομοιώνει τόσο ικανοποιητικά τη χωρική παρεμβολή του SPI-12. Λεπτομερέστερη ανάλυση του Σχήματος 6.17 δείχνει ότι η μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής simple kriging με μεταβαλλόμενα τοπικά μέσα και με μοντέλο παλινδρόμησης SKIm_R προσομοιώνει καλύτερα την χωρική παρεμβολή του δείκτη ξηρασίας SPI-12 αφού για το στατιστικό κριτήριο του βαθμού απόδοσης, Eff, παρουσιάζει τη μικρότερο εύρος από -0.41 (ελάχιστη τιμή) έως 0.68 (μέγιστη τιμή) και η μέση τιμή της ανέρχεται στο 0.21 που είναι η καλύτερη τιμή από όλες τις αντίστοιχες μέσες τιμές των άλλων μεθόδων. Παρόμοια αποτελέσματα παρουσιάζονται και για τα άλλα στατιστικά κριτήρια του συντελεστή συσχέτισης, r, του μέσου τετραγωνικού και μέσου απόλυτου σφάλματος, RMSE και MAE, αντίστοιχα. Αξίζει να σημειωθεί ότι μετά την ελαφριά υπεροχή της μεθόδου SKIm_R, οι μέθοδοι SKIm, SK, OK, και RK, παρουσιάζουν παρόμοια αποτελέσματα στην χωρική παρεμβολή του δείκτη ξηρασίας SPI-12 και μπορούν να χρησιμοποιηθούν εναλλακτικά για χωρική παρεμβολή για τον συγκεκριμένο δείκτη.

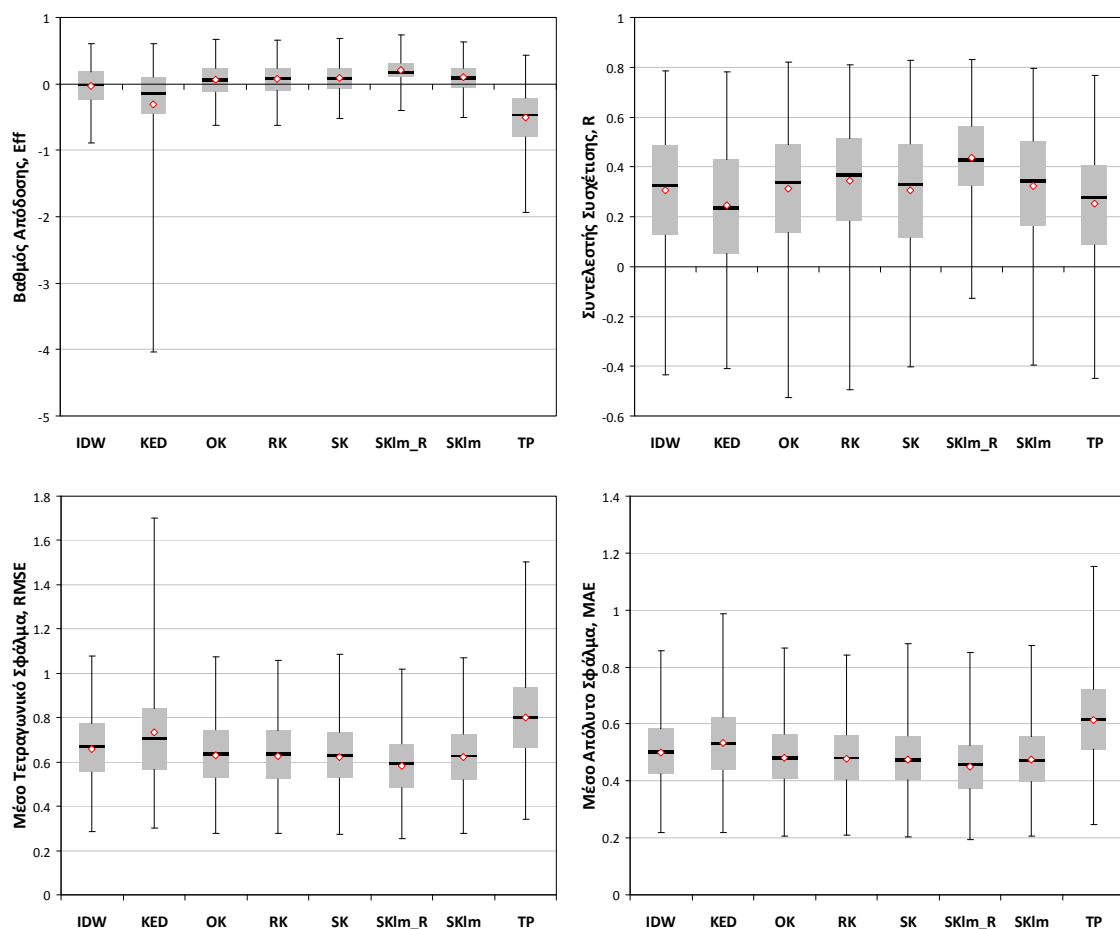
Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των στατιστικών κριτηρίων σε μηνιαία κλίμακα έγινε για την ποιοτική ανάλυση των μεθόδων χωρικής παρεμβολής. Έτσι υπολογίστηκε ο Πίνακας 6.12 που παρουσιάζει τον αριθμό των μηνών που μία από τις οκτώ μεθόδους υπερτερεί από τις άλλες μεθόδους με βάση το

εξεταζόμενο στατιστικό κριτήριο. Σε περίπτωση ισοβαθμίας δύο ή και περισσότερων μεθόδων με βάση το συγκεκριμένο κριτήριο (π.χ. Eff) όλες οι ισοβαθμούμενες μέθοδοι θεωρούνται ότι προσομοιώνουν καλύτερα τον συγκεκριμένο μήνα. Η μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής simple kriging με μεταβαλλόμενα τοπικά μέσα και με μοντέλο παλινδρόμησης, SKIm_R, υπερτερεί 392 φορές από τις άλλες μεθόδους στους 493 μήνες της χωρικής ανάλυσης με βάση το στατιστικό κριτήριο Eff. Οι μέθοδοι SKIm και SK υπερτερούν 29 φορές και 24 φορές αντίστοιχα, και μετά ακολουθούν οι άλλες μέθοδοι (Πίνακας 6.12). Από τον Πίνακα 6.12 προκύπτει ότι η μέθοδος SKIm_R υπερτερεί έναντι των άλλων μεθόδων στο 79.5% των μηνών της περιόδου ανάλυσης όταν χρησιμοποιείται το στατιστικό κριτήριο Eff. Παρόμοια αποτελέσματα παρατηρούνται και για το στατιστικό κριτήριο RMSE (Πίνακας 6.12). Η χρήση των στατιστικών κριτηρίων R, και MAE δείχνουν και πάλι την ανωτερότητα της μεθόδου SKIm_R, αλλά με ελαφρώς χαμηλωμένα ποσοστά (72.4% και 67.6%, αντίστοιχα, του συνόλου των 493 μηνών).

Η προηγούμενη χωρική ανάλυση έγινε και για τους 18 σταθμούς πιστοποίησης που δεν χρησιμοποιήθηκαν στη χωρική ανάλυση. Τα αποτελέσματα των στατιστικών κριτηρίων (Eff, r, RMSE και MAE) της ανεξάρτητης πιστοποίησης των χωρικών μεθόδων παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.18 για όλη την περίοδο της χωρικής ανάλυσης (Σεπ 1961-Σεπ 2002 = 493 μήνες) για τους 18 βροχομετρικούς σταθμούς πιστοποίησης. Και πάλι οι μέθοδοι των πολύγωνων Thiessen (TP) και της βέλτιστης παρεμβολής kriging με εξωτερική τάση (KED) δεν προσομοιώνουν ικανοποιητικά την χωρική παρεμβολή του δείκτη ξηρασίας SPI-6 στους σταθμούς πιστοποίησης. Οι άλλες έξι (6) μέθοδοι (IDW, OK, SK, RK, SKIm και SKIm_R) παρουσιάζουν περίπου ίδια μεταβλητότητα στη χωρική παρεμβολή του SPI-6. Λεπτομερέστερη ανάλυση του Σχήματος 6.15 δείχνει ότι η μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής simple kriging με μεταβαλλόμενα τοπικά μέσα και με μοντέλο παλινδρόμησης SKIm_R προσομοιώνει καλύτερα την χωρική κατανομή του δείκτη ξηρασίας αφού για το στατιστικό κριτήριο του βαθμού απόδοσης, Eff, παρουσιάζει το μικρότερο εύρος από -1.92 (ελάχιστη τιμή) έως 0.68 (μέγιστη τιμή) και η μέση τιμή της ανέρχεται στο 0.00 που είναι η καλύτερη τιμή από όλες τις αντίστοιχες μέσες τιμές των άλλων μεθόδων. Παρόμοια αποτελέσματα παρουσιάζονται και για τα άλλα στατιστικά κριτήρια του συντελεστή συσχέτισης, r, του μέσου τετραγωνικού και μέσου απόλυτου σφάλματος (RMSE και MAE, αντίστοιχα). Αξίζει να σημειωθεί ότι μετά την ελαφριά υπεροχή της μεθόδου SKIm_R, οι μέθοδοι SKIm, SK, RK, παρουσιάζουν παρόμοια χωρικά αποτελέσματα στην χωρική παρεμβολή του δείκτη ξηρασίας SPI-12 και μπορούν να χρησιμοποιηθούν με αρκετή επιτυχία στην χωρική παρεμβολή της ξηρασίας.

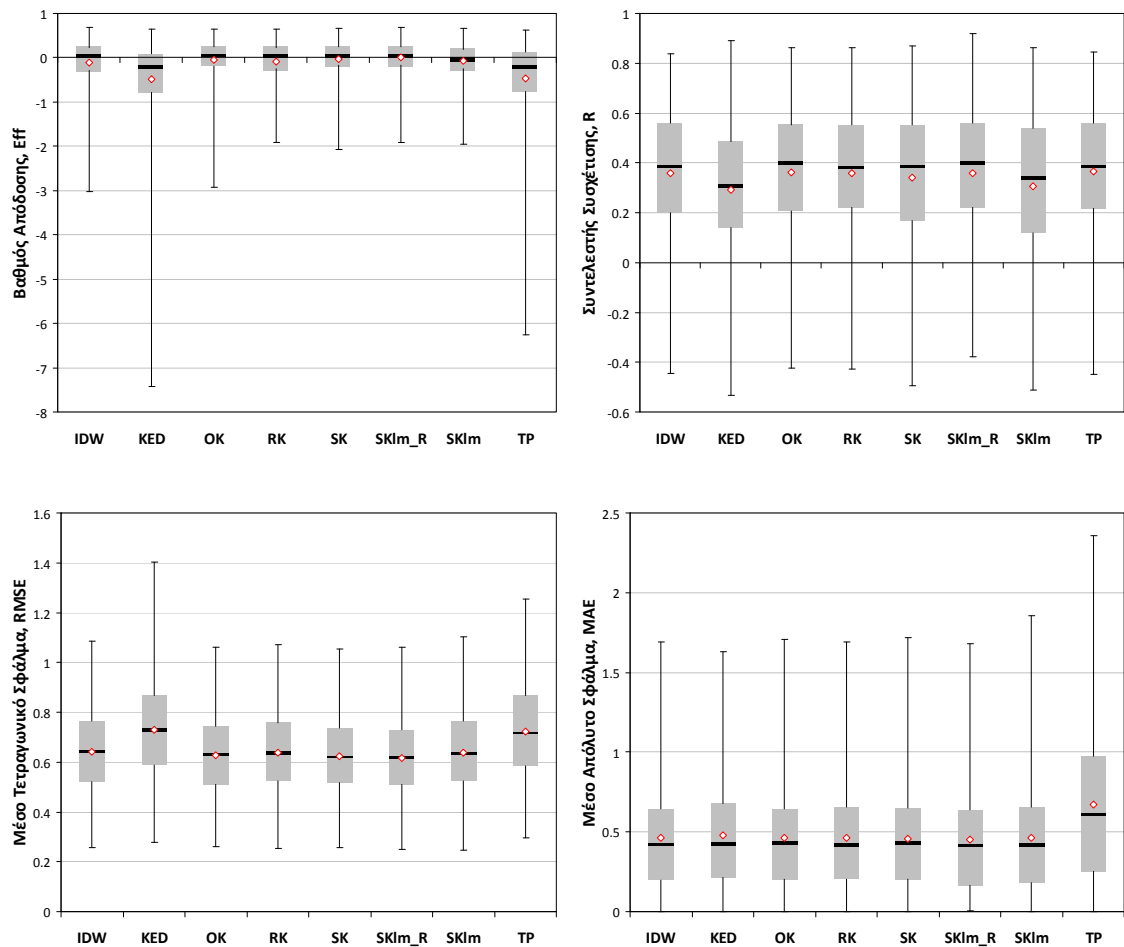
Πίνακας 6.12. Ποιοτικά κριτήρια εκτίμησης χωρικών μεθόδων α)Αριθμός μηνών όπου διάφορες χωρικές μέθοδοι υπερτερούν των άλλων μεθόδων για τα εξεταζόμενα στατιστικά κριτήρια για τους σταθμούς ανάπτυξης με την τεχνική cross-validation και β) ποσοστό μηνών της περιόδου Δεκ 1960 – Σεπ 2002.

Κριτήριο	IDW	KED	OK	RK	SK	SKIm_R	SKIm	TP
Αριθμός Μηνών								
Eff	12	3	13	20	29	392	24	0
R	25	9	14	37	22	357	17	14
RMSE	13	3	13	23	31	393	25	0
MAE	29	4	18	32	51	333	42	1
Ποσοστό Μηνών								
Eff	2.43	0.61	2.64	4.06	5.88	79.51	4.87	0.00
R	5.07	1.83	2.84	7.51	4.46	72.41	3.45	2.84
RMSE	2.64	0.61	2.64	4.67	6.29	79.72	5.07	0.00
MAE	5.88	0.81	3.65	6.49	10.34	67.55	8.52	0.20



Σχήμα 6.17. Στατιστικά αποτελέσματα των μεθόδων χωρικής παρεμβολής για τους 48 σταθμούς ανάπτυξης με την τεχνική cross-validation σε μορφή θηκογραμμάτων για την περίοδο της χωρικής παρεμβολής του SPI-12 (Σεπ 1961-Σεπ 2002 = 493 μήνες).

Η ποιοτική ανάλυση των μεθόδων χωρικής παρεμβολής σε μηνιαία κλίμακα παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.13, που παρουσιάζει τον αριθμό των μηνών που μία από τις οκτώ μεθόδους υπερτερεί από τις άλλες με βάση το εξεταζόμενο στατιστικό κριτήριο. Σε περίπτωση ισοβαθμίας δύο ή και περισσότερων μεθόδων με βάση το συγκεκριμένο κριτήριο (π.χ. Eff) όλες οι ισοβαθμούμενες μέθοδοι θεωρούνται ότι προσομοιώνουν καλύτερα τον συγκεκριμένο μήνα. Για τον βαθμό απόδοσης Eff, η μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής simple kriging με μεταβαλλόμενα τοπικά μέσα και με μοντέλο παλινδρόμησης, SKlm_R, υπερτερεί 107 φορές από τις άλλες μεθόδους, δηλαδή στο 22% του συνόλου των μηνών ανάλυσης. Αξιοσημείωτη είναι η απόδοση της μεθόδου πολυγώνων Thiessen που υπερτερεί από τις άλλες μεθόδους για τα στατιστικά κριτήρια R με ποσοστό στο 29%, για την περίοδο της ανάλυσης (Πίνακας 6.13). Το τελευταίο αποτέλεσμα έρχεται σε αντίθεση με τα αποτελέσματα των σταθμών ανάπτυξης αλλά και από τα γενικά στατιστικά στοιχεία του Σχήματος 6.18. Από την ανάλυση αυτή προκύπτει ότι για τους 18 σταθμούς πιστοποίησης η μέθοδος SKlm_R είναι η καλύτερη χωρική μέθοδος για τον δείκτη ξηρασίας SPI-12 αφού έχει τα καλύτερα στατιστικά χαρακτηριστικά και κατατάσσεται πρώτη μέθοδος από τις οκτώ (8) χωρικές μεθόδους για τα κριτήρια Eff, RMSE και MAE και τρίτη για το κριτήριο R.

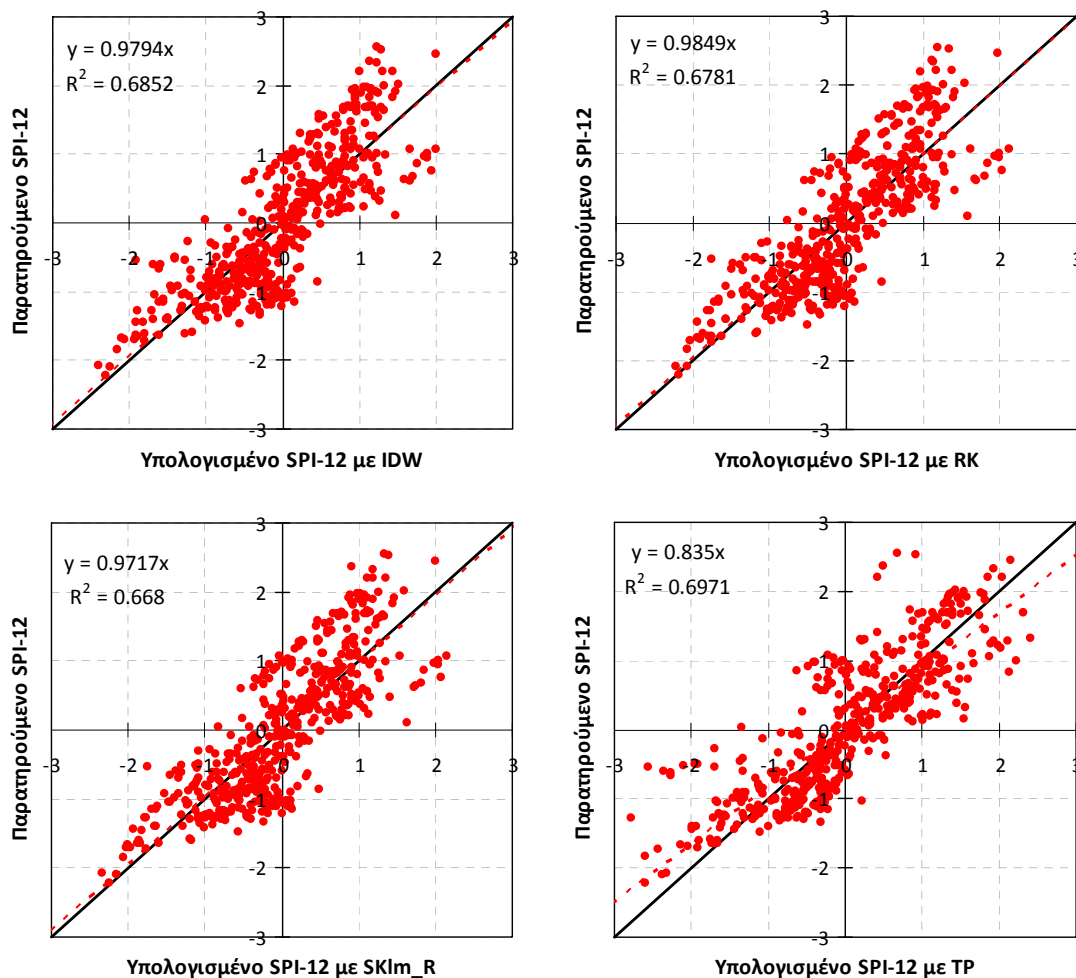


Σχήμα 6.18. Στατιστικά χωρικά αποτελέσματα των μεθόδων χωρικής παρεμβολής για τους 18 βροχομετρικούς σταθμούς ανεξάρτητης πιστοποίησης σε μορφή θηκογραμμάτων για την περίοδο της χωροχρονικής εφαρμογής (Σεπ 1961-Σεπ 2002 = 493 μήνες).

Πίνακας 6.13. Ποιοτικά κριτήρια εκτίμησης χωρικών μεθόδων α)Αριθμός μηνών όπου διάφορες χωρικές μέθοδοι υπερτερούν των άλλων μεθόδων για τα εξεταζόμενα στατιστικά κριτήρια για τους σταθμούς πιστοποίησης και β) ποσοστό μηνών της περιόδου Σεπ 1961 – Σεπ 2002.

Κριτήριο	IDW	KED	OK	RK	SK	SKIm_R	SKIm	TP
Αριθμός Μηνών								
Eff	60	42	49	35	74	107	66	61
R	42	95	26	47	30	84	25	144
RMSE	60	42	49	35	74	107	66	61
MAE	45	65	26	28	46	155	41	95
Ποσοστό (%) των συνολικών μηνών ανάλυσης								
Eff	12.17	8.52	9.94	7.10	15.01	21.70	13.39	12.37
R	8.52	19.27	5.27	9.53	6.09	17.04	5.07	29.21
RMSE	12.17	8.52	9.94	7.10	15.01	21.70	13.39	12.37
MAE	9.13	13.18	5.27	5.68	9.33	31.44	8.32	19.27

Για την καλύτερη εκτίμηση των χωρικών μεθόδων, οι παραγόμενες μηνιαίες χρονοσειρές SPI-12 όπως υπολογίστηκαν από τις χωρικές μεθόδους συγκρίθηκαν με τις παρατηρούμενες τιμές SPI-12 στους σταθμούς πιστοποίησης. Η χρονική ανάλυση έγινε για την περίοδο Σεπ 1961 - Σεπ 2002 και τα στατιστικά κριτήρια της χρονικής εκτίμησης που χρησιμοποιήθηκαν είναι ο βαθμός απόδοσης Eff, ο συντελεστής συσχέτισης R, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMSE και το μέσο απόλυτο σφάλμα MAE. Ο Πίνακας 6.14 παρουσιάζει το βαθμό απόδοσης, Eff της χρονικής προσομοίωσης των σταθμών πιστοποίησης και ο Πίνακας 6.15 τα συγκεντρωτικά στατιστικά κριτήρια που προέκυψαν από όλους τους σταθμούς πιστοποίησης. Το Σχήμα 6.19 παρουσιάζει τα διαγράμματα διασποράς του SPI-12 για επιλεγμένες χωρικές μεθοδολογίες του βροχομετρικού σταθμού Αμάραντος με ID_50. Τα αποτελέσματα της χρονικής ανάλυσης δείχνουν και πάλι ότι η μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής simple kriging με μεταβαλλόμενα τοπικά μέσα και με μοντέλο παλινδρόμησης (SKIm_R) προσομοιώνει ελαφρώς καλύτερα την χρονική κατανομή του δείκτη ξηρασίας SPI-12 για τους 18 σταθμούς πιστοποίησης. Οι παραλλαγές της μεθόδου βέλτιστης παρεμβολής kriging (OK, RK, SK, SKIm) και η μέθοδος IDW μπορούν και αυτές να εφαρμοστούν για χωρική και χρονική προσομοίωση. Η μέθοδος KED παρουσιάζει προβλήματα στους σταθμούς Καρπερό (ID_55) και Κατάφυτο (ID_56) που βρίσκονται εκτός της υδρολογικής λεκάνης του Πηνειού. Η εξαίρεση των δύο αυτών σταθμών βελτιώνει την απόδοση της KED για χρονική προσομοίωση και είναι συγκρίσιμη με τις άλλες συνδυαστικές μεθοδολογίες. Η μέθοδος των πολυγώνων Thiessen (TP) παρουσιάζεται ως η χειρότερη μέθοδος και η χρήση της πρέπει να αποφεύγεται για χωρική παρεμβολή.



Σχήμα 6.19. Διαγράμματα διασποράς επιλεγμένων μεθόδων χωρικής παρεμβολής για μηνιαία χρονική προσομοίωση του SPI-12 της περιόδου Σεπ 1961 - Σεπ 2002 στον βροχομετρικό σταθμό Αμάραντος με ID_50. Με μαύρο χρώμα η Γραμμή 1:1 και με κόκκινο διακεκομμένο η Γραμμή παλινδρόμησης της μορφής $y=ax$.

Πίνακας 6.14. Βαθμός απόδοσης Eff χωρικών μεθόδων για τη χρονική προσομοίωση του SPI-12 στους σταθμούς πιστοποίησης της περιόδου Σεπ 1961 – Σεπ 2002.

Σταθμός	IDW	KED	OK	RK	SK	SKlm_R	SKlm	TP
ID_49	0.68	0.67	0.69	0.68	0.69	0.69	0.68	0.32
ID_50	0.68	0.68	0.67	0.68	0.67	0.68	0.67	0.67
ID_51	0.68	0.69	0.70	0.68	0.73	0.73	0.73	0.48
ID_52	0.83	0.78	0.80	0.81	0.77	0.82	0.77	0.86
ID_53	0.71	0.71	0.70	0.70	0.68	0.71	0.69	0.59
ID_54	0.32	0.37	0.37	0.36	0.37	0.38	0.36	0.25
ID_55	0.63	-0.95	0.63	0.60	0.65	0.66	0.66	0.28
ID_56	0.61	-0.27	0.62	0.46	0.57	0.62	0.37	0.52
ID_57	0.68	0.67	0.68	0.67	0.67	0.69	0.67	0.58
ID_58	0.45	0.36	0.47	0.50	0.50	0.50	0.46	0.46
ID_59	0.56	0.68	0.63	0.61	0.65	0.68	0.65	0.31
ID_60	0.16	0.41	0.40	0.39	0.41	0.42	0.40	0.15
ID_61	0.94	0.92	0.92	0.93	0.92	0.94	0.92	0.97
ID_62	0.60	0.56	0.60	0.60	0.60	0.60	0.51	0.36
ID_63	0.55	0.38	0.57	0.55	0.58	0.59	0.58	0.46
ID_64	0.43	0.43	0.44	0.43	0.45	0.45	0.44	0.29
ID_65	0.14	0.13	0.13	0.12	0.15	0.19	0.15	0.02
ID_66	0.40	0.46	0.47	0.46	0.48	0.51	0.49	0.32

Πίνακας 6.15. Στατιστικά αποτελέσματα χωρικών μεθόδων για τη χρονική προσομοίωση του SPI-12 στους σταθμούς πιστοποίησης της περιόδου Σεπ 1961 – Σεπ 2002.

	IDW	KED	OK	RK	SK	SKlm_R	SKlm	TP
Βαθμός Απόδοσης, Eff								
Μέση Τιμή	0.56	0.43	0.58	0.57	0.59	0.60	0.57	0.44
Διάμεσος	0.61	0.51	0.62	0.60	0.63	0.64	0.61	0.41
Μέγιστη Τιμή	0.94	0.92	0.92	0.93	0.92	0.94	0.92	0.97
Ελάχιστη Τιμή	0.14	-0.95	0.13	0.12	0.15	0.19	0.15	0.02
Συντελεστής Συσχέτισης, R								
Μέση Τιμή	0.76	0.73	0.77	0.76	0.77	0.78	0.76	0.72
Διάμεσος	0.78	0.73	0.79	0.79	0.79	0.80	0.79	0.71
Μέγιστη Τιμή	0.97	0.96	0.96	0.97	0.96	0.97	0.96	0.98
Ελάχιστη Τιμή	0.49	0.47	0.48	0.47	0.48	0.52	0.48	0.51
Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα, RMSE								
Μέση Τιμή	0.64	0.72	0.63	0.64	0.63	0.62	0.64	0.73
Διάμεσος	0.63	0.70	0.62	0.63	0.61	0.61	0.62	0.77
Μέγιστη Τιμή	0.93	1.40	0.93	0.94	0.92	0.90	0.92	0.99
Ελάχιστη Τιμή	0.25	0.27	0.28	0.26	0.28	0.24	0.28	0.19
Μέσο Απόλυτο Σφάλμα, MAE								
Μέση Τιμή	0.50	0.55	0.49	0.50	0.49	0.48	0.50	0.55
Διάμεσος	0.47	0.55	0.47	0.48	0.46	0.46	0.48	0.57
Μέγιστη Τιμή	0.70	1.13	0.66	0.67	0.66	0.64	0.66	0.70
Ελάχιστη Τιμή	0.20	0.21	0.21	0.20	0.22	0.19	0.21	0.15

6.3.4. Ψηφιακοί χάρτες ξηρασίας

Η εφαρμογή των χωρικών μεθόδων στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού για χωροχρονική παρεμβολή του SPI έδειξε ότι η συνδυαστική μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής simple kriging με μεταβαλλόμενα τοπικά μέσα και με μοντέλο παλινδρόμησης υψόμετρου και χωρικών συντεταγμένων (Simple Kriging with Varying Local Means with Elevation and spatial coordinates as external variables,

SKIm_R) είναι η καλύτερη χωρική μέθοδος σε σχέση με τις άλλες επτά τεχνικές. Η τεχνική της διασταυρωμένης επιβεβαίωσης των εκτιμήσεων (cross-validation) των σταθμών ανάπτυξης έδειξε ότι η SKIm_R υπερτερεί των άλλων μεθόδων πάνω από το 50% των συνολικών μηνών της ανάλυσης. Παρόμοια αποτελέσματα παρουσιάζονται και για τους δείκτες ξηρασίας SPI-9μηνών (SPI-9) και SPI-24μηνών (SPI-24). Στους σταθμούς πιστοποίησης η μέθοδος SKIm_R παρουσιάζει συγκριτικά λίγο καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τις άλλες μεθόδους για χωρική και χρονική προσομοίωση του δείκτη ξηρασίας SPI. Έτσι, η μέθοδος αυτή επιλέχθηκε ως η βέλτιστη για την χωρική παρεμβολή του δείκτη ξηρασίας για τις παρατηρούμενες τιμές του δείκτη ξηρασίας SPI για χρονικές κλίμακες 3-μηνών, 6-μηνών, 9-μηνών, 12-μηνών και 24-μηνών.

Από τη χρονική μηνιαία σημειακή σύγκριση των χρονοσειρών SPI για τα υδρολογικά έτη 1960-61 έως 2001-02 παρατηρούνται παρατεταμένα γεγονότα ξηρασίας σε τρεις περιόδους, Οκτώβριος 1976-Σεπτέμβριος 1978, Οκτώβριος 1987-Σεπτέμβριος 1990 και Οκτώβριος 2000- Σεπτέμβριος 2002. Ίδια αποτελέσματα έχουν βρεθεί και από άλλες εργασίες που μελέτησαν το φαινόμενο της ξηρασίας στην υπό μελέτη υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού αλλά και σε ολόκληρο το υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας για τα ίδια υδρολογικά έτη [Loukas and Vasiliades, 2004; Loukas et al., 2008; Vasiliades and Loukas, 2009a; Vasiliades et al., 2010]. Έτσι, οι παραγόμενοι χωρικοί χάρτες με διάσταση φατνίου 1-km θα επικεντρωθούν σε αυτές τις τρεις περιόδους. Ενδεικτικά, ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει τους 20 δριμύτερους μήνες που παρουσιάζουν γεγονότα ξηρασίας με βάση τη μέση δριμύτητα ξηρασίας των σταθμών ανάπτυξης. Στον ίδιο πίνακα φαίνεται και ο αριθμός των σταθμών ανάπτυξης που πλήττονται από ξηρασία ($SPI \leq -1$) (Πίνακας 6.16). Επίσης, παρουσιάζονται για τους ίδιους μήνες ο αριθμός των σταθμών πιστοποίησης που πλήττονται από ξηρασία, η μέση δριμύτητα και τυπική απόκλιση του SPI. Ο Πίνακας 6.17 παρουσιάζει και πάλι τους 20 μήνες που παρουσιάζουν όμως χωρικά το μέγιστο αριθμό σταθμών ανάπτυξης που πλήττονται από ξηρασία ($SPI \leq -1$). Προσεκτική μελέτη του Πίνακα 6.16 και του Πίνακα 6.17 επιβεβαιώνει τα γεγονότα ξηρασίας που αναγνωρίστηκαν σε προηγούμενες μελέτες. Γενικά, οι ακραίες τιμές μέσης δριμύτητας ξηρασίας συνοδεύονται και από μεγάλο αριθμό σταθμών (κοινοί μήνες στους Πίνακες 6.16-6.17). Το τελευταίο είναι πολύ εμφανές για μεγάλες κλίμακες υπολογισμού του SPI (12 μηνών και 24 μηνών).

Πίνακας 6.16. Στατιστικά χαρακτηριστικά των 20 δριμύτερων μηνών με βάση τη μέση δριμύτητα ξηρασίας των σταθμούς ανάπτυξης της περιόδου Οκτ 1960 – Σεπ 2002.

Μήνας	Αριθμός Σταθμών Ανάπτυξης με $SPI \leq -1$	Μέση Δριμύτητα SPI Σταθμών Ανάπτυξης	Τυπική απόκλιση SPI Σταθμών Ανάπτυξης	Αριθμός Σταθμών Πιστοποίησης με $SPI \leq -1$	Μέση Δριμύτητα SPI Σταθμών Πιστοποίησης	Τυπική απόκλιση SPI Σταθμών Πιστοποίησης
Χρονική κλίμακα SPI-3μηνών, SPI-3						
Οκτ-65	44	-1.60	0.62	16	-1.65	0.59
Ιουν-69	45	-1.84	0.65	17	-1.77	0.61
Ιουλ-69	37	-1.52	0.66	11	-1.32	0.54
Μαρ-77	44	-1.87	0.64	16	-1.57	0.56
Απρ-77	45	-1.74	0.57	14	-1.54	0.65
Μαϊ-77	42	-1.78	0.62	15	-1.75	0.66
Αυγ-78	42	-1.65	0.68	14	-1.52	0.83
Μαϊ-83	38	-1.58	0.70	14	-1.48	0.79
Σεπ-85	45	-1.76	0.54	15	-1.59	0.86
Ιουλ-88	41	-1.55	0.63	17	-1.87	0.57
Σεπ-88	36	-1.53	0.67	12	-1.33	0.59
Ιαν-90	36	-1.50	0.89	11	-1.34	0.67
Φεβ-90	37	-1.79	0.92	12	-1.48	0.64
Μαρ-90	45	-2.43	0.83	18	-2.15	0.69
Απρ-90	43	-1.84	0.74	16	-1.89	0.69

Μήνας	Αριθμός Σταθμών Ανάπτυξης με SPI ≤ -1	Μέση Δριμύτητα SPI Σταθμών Ανάπτυξης	Τυπική απόκλιση SPI Σταθμών Ανάπτυξης	Αριθμός Σταθμών Πιστοποίησης με SPI ≤ -1	Μέση Δριμύτητα SPI Σταθμών Πιστοποίησης	Τυπική απόκλιση SPI Σταθμών Πιστοποίησης
Χρονική κλίμακα SPI-3μηνών, SPI-3 (συν.)						
Φεβ-92	43	-2.05	0.98	17	-2.23	0.74
Μαρ-92	41	-1.54	0.75	17	-1.70	0.46
Σεπ-93	42	-1.56	0.60	14	-1.72	0.90
Οκτ-93	41	-1.66	0.74	14	-1.72	0.91
Νοε-01	40	-1.56	0.49	16	-1.60	0.42
Χρονική κλίμακα SPI-6μηνών, SPI-6						
Οκτ-69	44	-1.71	0.51	13	-1.44	0.71
Νοε-69	44	-1.72	0.51	14	-1.56	0.62
Μαΐ-77	42	-1.76	0.79	16	-1.63	0.77
Ιουν-77	46	-2.15	0.57	17	-1.93	0.60
Ιουλ-77	46	-2.16	0.62	17	-2.00	0.69
Αυγ-77	46	-1.99	0.65	17	-1.96	0.64
Οκτ-77	36	-1.34	0.54	12	-1.42	0.62
Αυγ-88	39	-1.69	0.64	18	-1.73	0.37
Σεπ-88	45	-1.92	0.59	18	-2.01	0.50
Οκτ-88	45	-1.85	0.54	18	-1.98	0.60
Ιαν-90	40	-1.62	0.83	15	-1.43	0.65
Φεβ-90	44	-1.75	0.77	14	-1.50	0.59
Μαρ-90	43	-1.95	0.83	15	-1.66	0.59
Απρ-90	45	-2.15	0.84	16	-2.02	0.68
Ιουν-90	42	-1.77	0.63	17	-1.75	0.65
Ιαν-92	37	-1.42	0.73	14	-1.56	0.65
Φεβ-92	43	-1.84	0.77	17	-1.99	0.58
Μαρ-92	46	-1.99	0.77	17	-2.07	0.59
Νοε-01	41	-1.51	0.52	15	-1.50	0.44
Φεβ-02	39	-1.40	0.44	15	-1.37	0.37
Χρονική κλίμακα SPI-9μηνών, SPI-9						
Νοε-69	39	-1.44	0.48	15	-1.32	0.49
Μαΐ-77	42	-1.59	0.71	15	-1.41	0.64
Ιουν-77	40	-1.59	0.76	15	-1.45	0.77
Ιουλ-77	43	-1.77	0.77	15	-1.64	0.83
Αυγ-77	45	-2.03	0.81	17	-1.91	0.83
Σεπ-77	47	-2.06	0.58	17	-1.90	0.59
Οκτ-77	47	-2.02	0.56	16	-1.90	0.60
Νοε-77	45	-1.88	0.54	18	-1.83	0.61
Αυγ-88	39	-1.55	0.76	15	-1.58	0.49
Σεπ-88	39	-1.57	0.65	17	-1.68	0.52
Οκτ-88	42	-1.68	0.59	17	-1.71	0.48
Φεβ-90	36	-1.48	0.82	12	-1.18	0.58
Μαρ-90	40	-1.78	0.81	15	-1.44	0.59
Απρ-90	44	-2.17	0.80	16	-2.01	0.59
Μαΐ-90	40	-1.73	0.73	16	-1.56	0.49
Ιουν-90	40	-1.81	0.77	17	-1.70	0.50
Ιουλ-90	39	-1.89	0.80	16	-1.86	0.72
Φεβ-92	40	-1.70	0.87	16	-1.80	0.82
Μαρ-92	41	-1.68	0.84	16	-1.76	0.75
Φεβ-02	41	-1.43	0.42	15	-1.37	0.38
Χρονική κλίμακα SPI-12μηνών, SPI-12						
Ιουν-77	33	-1.40	0.66	13	-1.25	0.61
Ιουλ-77	40	-1.56	0.64	13	-1.43	0.64

Μήνας	Αριθμός Σταθμών Ανάπτυξης με SPI ≤ -1	Μέση Δριμύτητα SPI Σταθμών Ανάπτυξης	Τυπική απόκλιση SPI Σταθμών Ανάπτυξης	Αριθμός Σταθμών Πιστοποίησης με SPI ≤ -1	Μέση Δριμύτητα SPI Σταθμών Πιστοποίησης	Τυπική απόκλιση SPI Σταθμών Πιστοποίησης
Χρονική κλίμακα SPI-12μηνών, SPI-12 (συν.)						
Αυγ-77	44	-1.80	0.74	16	-1.65	0.68
Σεπ-77	36	-1.62	0.80	16	-1.49	0.74
Οκτ-77	44	-1.79	0.72	16	-1.69	0.76
Νοε-77	45	-2.02	0.79	17	-1.88	0.76
Δεκ-77	47	-2.00	0.50	17	-2.01	0.63
Ιαν-89	37	-1.41	0.74	15	-1.55	0.71
Φεβ-89	39	-1.51	0.72	17	-1.68	0.70
Δεκ-89	37	-1.42	0.82	14	-1.30	0.86
Ιαν-90	36	-1.43	0.83	15	-1.29	0.79
Φεβ-90	35	-1.54	0.90	15	-1.35	0.76
Μαρ-90	42	-1.93	0.87	15	-1.63	0.76
Απρ-90	41	-1.81	0.84	14	-1.56	0.76
Μαϊ-90	38	-1.50	0.77	14	-1.30	0.52
Ιουν-90	39	-1.67	0.76	15	-1.50	0.49
Ιουλ-90	43	-1.97	0.76	16	-1.93	0.54
Αυγ-90	35	-1.48	0.79	14	-1.34	0.55
Σεπ-90	34	-1.49	0.80	16	-1.39	0.56
Οκτ-90	35	-1.49	0.78	13	-1.40	0.73
Χρονική κλίμακα SPI-24μηνών, SPI-24						
Ιουλ-78	38	-1.43	0.65	14	-1.42	0.59
Αυγ-78	38	-1.59	0.69	15	-1.55	0.61
Μαϊ-89	37	-1.36	0.71	14	-1.53	0.68
Οκτ-89	36	-1.42	0.79	14	-1.50	0.84
Νοε-89	42	-1.64	0.78	15	-1.73	0.80
Δεκ-89	42	-1.61	0.79	15	-1.65	0.77
Ιαν-90	43	-1.90	0.81	17	-1.90	0.72
Φεβ-90	44	-2.01	0.79	17	-2.01	0.67
Μαρ-90	44	-2.09	0.76	17	-2.06	0.68
Απρ-90	44	-2.14	0.77	17	-2.16	0.70
Μαϊ-90	44	-1.85	0.74	17	-1.86	0.67
Ιουν-90	44	-1.84	0.73	17	-1.85	0.66
Ιουλ-90	43	-1.83	0.74	17	-1.87	0.70
Αυγ-90	39	-1.49	0.75	15	-1.52	0.67
Σεπ-90	40	-1.53	0.78	15	-1.53	0.66
Οκτ-90	39	-1.48	0.77	14	-1.45	0.61
Νοε-90	38	-1.56	0.76	16	-1.51	0.54
Δεκ-01	34	-1.34	0.55	13	-1.31	0.46
Ιαν-02	34	-1.32	0.52	12	-1.29	0.44
Φεβ-02	42	-1.56	0.55	17	-1.57	0.51

Πίνακας 6.17. Στατιστικά χαρακτηριστικά των 20 χωρικά δριμύτερων μηνών με βάση τον αριθμό των σταθμών ανάπτυξης που πλήττονται από ξηρασία για την περίοδο Οκτ 1960 – Σεπ 2002.

Μήνας	Αριθμός Σταθμών Ανάπτυξης με SPI ≤ -1	Μέση Δριμύτητα SPI Σταθμών Ανάπτυξης	Τυπική απόκλιση SPI Σταθμών Ανάπτυξης	Αριθμός Σταθμών Πιστοποίησης με SPI ≤ -1	Μέση Δριμύτητα SPI Σταθμών Πιστοποίησης	Τυπική απόκλιση SPI Σταθμών Πιστοποίησης
Χρονική κλίμακα SPI-3μηνών, SPI-3						
Οκτ-65	44	-1.60	0.62	16	-1.65	0.59
Ιουν-69	45	-1.84	0.65	17	-1.77	0.61

Μήνας	Αριθμός Σταθμών Ανάπτυξης με $SPI \leq -1$	Μέση Δριμύτητα SPI Σταθμών Ανάπτυξης	Τυπική απόκλιση SPI Σταθμών Ανάπτυξης	Αριθμός Σταθμών Πιστοποίησης με $SPI \leq -1$	Μέση Δριμύτητα SPI Σταθμών Πιστοποίησης	Τυπική απόκλιση SPI Σταθμών Πιστοποίησης
Χρονική κλίμακα SPI-3μηνών, SPI-3 (συν.)						
Μαρ-77	44	-1.87	0.64	16	-1.57	0.56
Απρ-77	45	-1.74	0.57	14	-1.54	0.65
Μαϊ-77	42	-1.78	0.62	15	-1.75	0.66
Αυγ-78	42	-1.65	0.68	14	-1.52	0.83
Μαϊ-83	38	-1.58	0.70	14	-1.48	0.79
Αυγ-85	39	-1.50	0.61	14	-1.43	0.85
Σεπ-85	45	-1.76	0.54	15	-1.59	0.86
Ιουλ-88	41	-1.55	0.63	17	-1.87	0.57
Φεβ-90	37	-1.79	0.92	12	-1.48	0.64
Μαρ-90	45	-2.43	0.83	18	-2.15	0.69
Απρ-90	43	-1.84	0.74	16	-1.89	0.69
Δεκ-91	40	-1.42	0.65	14	-1.46	0.71
Ιαν-92	43	-1.49	0.66	15	-1.64	0.56
Φεβ-92	43	-2.05	0.98	17	-2.23	0.74
Μαρ-92	41	-1.54	0.75	17	-1.70	0.46
Σεπ-93	42	-1.56	0.60	14	-1.72	0.90
Οκτ-93	41	-1.66	0.74	14	-1.72	0.91
Νοε-01	40	-1.56	0.49	16	-1.60	0.42
Χρονική κλίμακα SPI-6μηνών, SPI-6						
Οκτ-69	44	-1.71	0.51	13	-1.44	0.71
Νοε-69	44	-1.72	0.51	14	-1.56	0.62
Μαϊ-77	42	-1.76	0.79	16	-1.63	0.77
Ιουν-77	46	-2.15	0.57	17	-1.93	0.60
Ιουλ-77	46	-2.16	0.62	17	-2.00	0.69
Αυγ-77	46	-1.99	0.65	17	-1.96	0.64
Αυγ-88	39	-1.69	0.64	18	-1.73	0.37
Σεπ-88	45	-1.92	0.59	18	-2.01	0.50
Οκτ-88	45	-1.85	0.54	18	-1.98	0.60
Ιαν-90	40	-1.62	0.83	15	-1.43	0.65
Φεβ-90	44	-1.75	0.77	14	-1.50	0.59
Μαρ-90	43	-1.95	0.83	15	-1.66	0.59
Απρ-90	45	-2.15	0.84	16	-2.02	0.68
Ιουν-90	42	-1.77	0.63	17	-1.75	0.65
Ιαν-92	37	-1.42	0.73	14	-1.56	0.65
Φεβ-92	43	-1.84	0.77	17	-1.99	0.58
Μαρ-92	46	-1.99	0.77	17	-2.07	0.59
Αυγ-00	36	-1.42	0.64	14	-1.45	0.57
Νοε-01	41	-1.51	0.52	15	-1.50	0.44
Φεβ-02	39	-1.40	0.44	15	-1.37	0.37
Χρονική κλίμακα SPI-9μηνών, SPI-9						
Νοε-69	39	-1.44	0.48	15	-1.32	0.49
Μαϊ-77	42	-1.59	0.71	15	-1.41	0.64
Ιουν-77	40	-1.59	0.76	15	-1.45	0.77
Ιουλ-77	43	-1.77	0.77	15	-1.64	0.83
Αυγ-77	45	-2.03	0.81	17	-1.91	0.83
Σεπ-77	47	-2.06	0.58	17	-1.90	0.59
Οκτ-77	47	-2.02	0.56	16	-1.90	0.60
Νοε-77	45	-1.88	0.54	18	-1.83	0.61
Αυγ-88	39	-1.55	0.76	15	-1.58	0.49
Σεπ-88	39	-1.57	0.65	17	-1.68	0.52

Μήνας	Αριθμός Σταθμών Ανάπτυξης με $SPI \leq -1$	Μέση Δριμύτητα SPI Σταθμών Ανάπτυξης	Τυπική απόκλιση SPI Σταθμών Ανάπτυξης	Αριθμός Σταθμών Πιστοποίησης με $SPI \leq -1$	Μέση Δριμύτητα SPI Σταθμών Πιστοποίησης	Τυπική απόκλιση SPI Σταθμών Πιστοποίησης
Χρονική κλίμακα SPI-9μηνών, SPI-9 (συν.)						
Οκτ-88	42	-1.68	0.59	17	-1.71	0.48
Φεβ-90	36	-1.48	0.82	12	-1.18	0.58
Μαρ-90	40	-1.78	0.81	15	-1.44	0.59
Απρ-90	44	-2.17	0.80	16	-2.01	0.59
Μαϊ-90	40	-1.73	0.73	16	-1.56	0.49
Ιουν-90	40	-1.81	0.77	17	-1.70	0.50
Ιουλ-90	39	-1.89	0.80	16	-1.86	0.72
Φεβ-92	40	-1.70	0.87	16	-1.80	0.82
Μαρ-92	41	-1.68	0.84	16	-1.76	0.75
Φεβ-02	41	-1.43	0.42	15	-1.37	0.38
Μηνιαία Κλίμακα SPI-12μηνών, SPI-12						
Ιουλ-77	40	-1.56	0.64	13	-1.43	0.64
Αυγ-77	44	-1.80	0.74	16	-1.65	0.68
Σεπ-77	36	-1.62	0.80	16	-1.49	0.74
Οκτ-77	44	-1.79	0.72	16	-1.69	0.76
Νοε-77	45	-2.02	0.79	17	-1.88	0.76
Δεκ-77	47	-2.00	0.50	17	-2.01	0.63
Οκτ-88	38	-1.37	0.68	14	-1.41	0.45
Ιαν-89	37	-1.41	0.74	15	-1.55	0.71
Φεβ-89	39	-1.51	0.72	17	-1.68	0.70
Δεκ-89	37	-1.42	0.82	14	-1.30	0.86
Ιαν-90	36	-1.43	0.83	15	-1.29	0.79
Φεβ-90	35	-1.54	0.90	15	-1.35	0.76
Μαρ-90	42	-1.93	0.87	15	-1.63	0.76
Απρ-90	41	-1.81	0.84	14	-1.56	0.76
Μαϊ-90	38	-1.50	0.77	14	-1.30	0.52
Ιουν-90	39	-1.67	0.76	15	-1.50	0.49
Ιουλ-90	43	-1.97	0.76	16	-1.93	0.54
Αυγ-90	35	-1.48	0.79	14	-1.34	0.55
Οκτ-90	35	-1.49	0.78	13	-1.40	0.73
Φεβ-02	40	-1.31	0.41	14	-1.26	0.41
Μηνιαία Κλίμακα SPI-24μηνών, SPI-24						
Ιουλ-78	38	-1.43	0.65	14	-1.42	0.59
Αυγ-78	38	-1.59	0.69	15	-1.55	0.61
Απρ-89	36	-1.30	0.70	12	-1.45	0.63
Μαϊ-89	37	-1.36	0.71	14	-1.53	0.68
Ιουν-89	35	-1.29	0.71	14	-1.43	0.59
Οκτ-89	36	-1.42	0.79	14	-1.50	0.84
Νοε-89	42	-1.64	0.78	15	-1.73	0.80
Δεκ-89	42	-1.61	0.79	15	-1.65	0.77
Ιαν-90	43	-1.90	0.81	17	-1.90	0.72
Φεβ-90	44	-2.01	0.79	17	-2.01	0.67
Μαρ-90	44	-2.09	0.76	17	-2.06	0.68
Απρ-90	44	-2.14	0.77	17	-2.16	0.70
Μαϊ-90	44	-1.85	0.74	17	-1.86	0.67
Ιουν-90	44	-1.84	0.73	17	-1.85	0.66
Ιουλ-90	43	-1.83	0.74	17	-1.87	0.70
Αυγ-90	39	-1.49	0.75	15	-1.52	0.67
Σεπ-90	40	-1.53	0.78	15	-1.53	0.66
Οκτ-90	39	-1.48	0.77	14	-1.45	0.61

Μήνας	Αριθμός Σταθμών Ανάπτυξης με $SPI \leq -1$	Μέση Δριμύτητα SPI Σταθμών Ανάπτυξης	Τυπική απόκλιση SPI Σταθμών Ανάπτυξης	Αριθμός Σταθμών Πιστοποίησης με $SPI \leq -1$	Μέση Δριμύτητα SPI Σταθμών Πιστοποίησης	Τυπική απόκλιση SPI Σταθμών Πιστοποίησης
Χρονική κλίμακα SPI-24μηνών, SPI-24 (συν.)						
Νοε-90	38	-1.56	0.76	16	-1.51	0.54
Φεβ-02	42	-1.56	0.55	17	-1.57	0.51

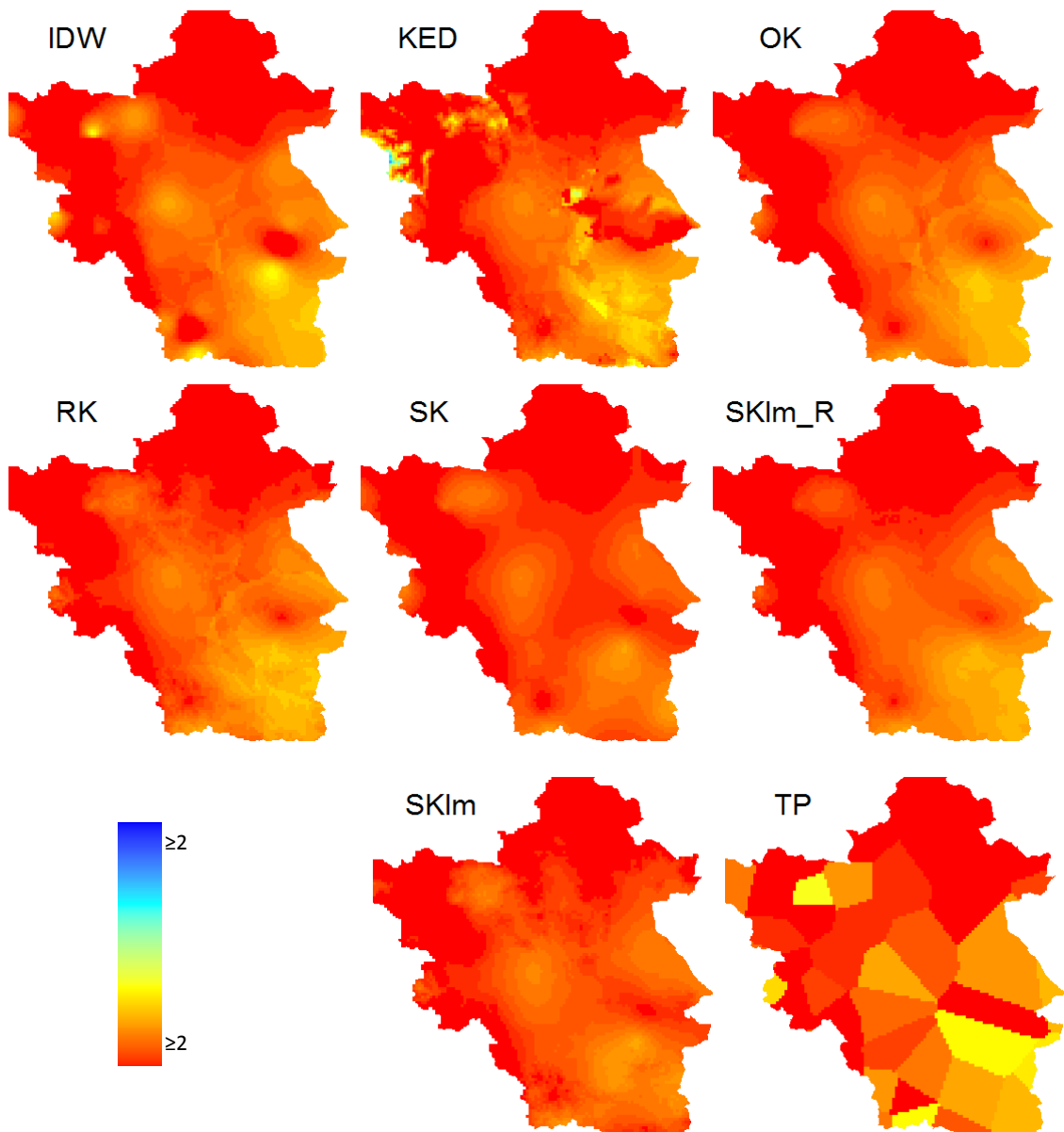
Η σύγκριση των ψηφιακών χαρτών ξηρασίας ενδεικτικά παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα για τον δείκτη ξηρασίας SPI-6 του μήνα Μάρτιος 1990. Για το μήνα αυτό η χωρική ανάλυση έδειξε ότι η συνδυαστική μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής simple kriging με μεταβαλλόμενα τοπικά μέσα και με μοντέλο παλινδρόμησης υψόμετρου και χωρικών συντεταγμένων παρουσιάζει τα καλύτερα στατιστικά κριτήρια από τις άλλες μεθόδους για τους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης. Όλοι οι ψηφιακοί χάρτες με μέγεθος φατίου 1-km που υπολογιστήκαν με τις χωρικές μεθόδους υπολογίζουν το γεγονός ξηρασίας ως δριμύ (-2 < SPI ≤ -1.5) για το μήνα Μάρτιος 1990. Τα στατιστικά χαρακτηριστικά των χαρτών παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.18 και η χωρική κατανομή των χαρτών στο Σχήμα 6.20. Η μέση ένταση (δριμύτητα) του SPI-6 κυμαίνεται από -1.81 έως -1.87. Το Σχήμα 6.21 παρουσιάζει την ταξινόμηση των χωρικών μεθόδων ανάλογα με την κατηγορίες των κλάσεων των τιμών του SPI. Αυτή η κατηγοριοποίηση είναι χρήσιμη και για εποπτικούς λόγους (ύπαρξη ξηρασίας ή όχι) αλλά και για την εξαγωγή χωρικών περιοχικών χαρακτηριστικών που σχετίζονται με την έκταση που πλήττεται από ξηρασία με βάση τη δριμύτητά της. Ο Πίνακας 6.19 παρουσιάζει τη έκταση που πλήττεται ανάλογα με τη δριμύτητα των κλάσεων του δείκτη ξηρασίας SPI. Γενικά, η χωρική κατανομή του γεγονότος είναι αρκετά διαφορετική για τις μεθόδους KED, TP και IDW (Σχήμα 6.20 και 6.21) και δείχνουν ότι ένα μικρό ποσοστό της περιοχής δεν καλύπτεται από ξηρασία. Σε αντίθεση, όλες οι άλλες μεθοδολογίες δείχνουν ότι η περιοχή καλύπτεται όλη από ξηρασία αλλά με διαφορετική ένταση (δριμύτητα) ανά κλάση ξηρασίας (Πίνακας 6.19).

Πίνακας 6.18. Στατιστικά αποτελέσματα ψηφιακών χαρτών ξηρασίας του SPI-6 για το μήνα Μάρτιος 1990.

	IDW	KED	OK	RK	SK	SKIm_R	SKIm	TP
Ελάχιστη Τιμή	-3.20	-5.50	-3.10	-3.30	-2.80	-3.10	-3.00	-4.90
Μέγιστη Τιμή	-0.60	1.10	-1.00	-1.00	-1.20	-1.10	-1.20	-0.60
Μέση Τιμή	-1.81	-1.86	-1.81	-1.81	-1.87	-1.84	-1.84	-1.81
Τυπική απόκλιση	0.44	0.55	0.41	0.43	0.24	0.40	0.29	0.64

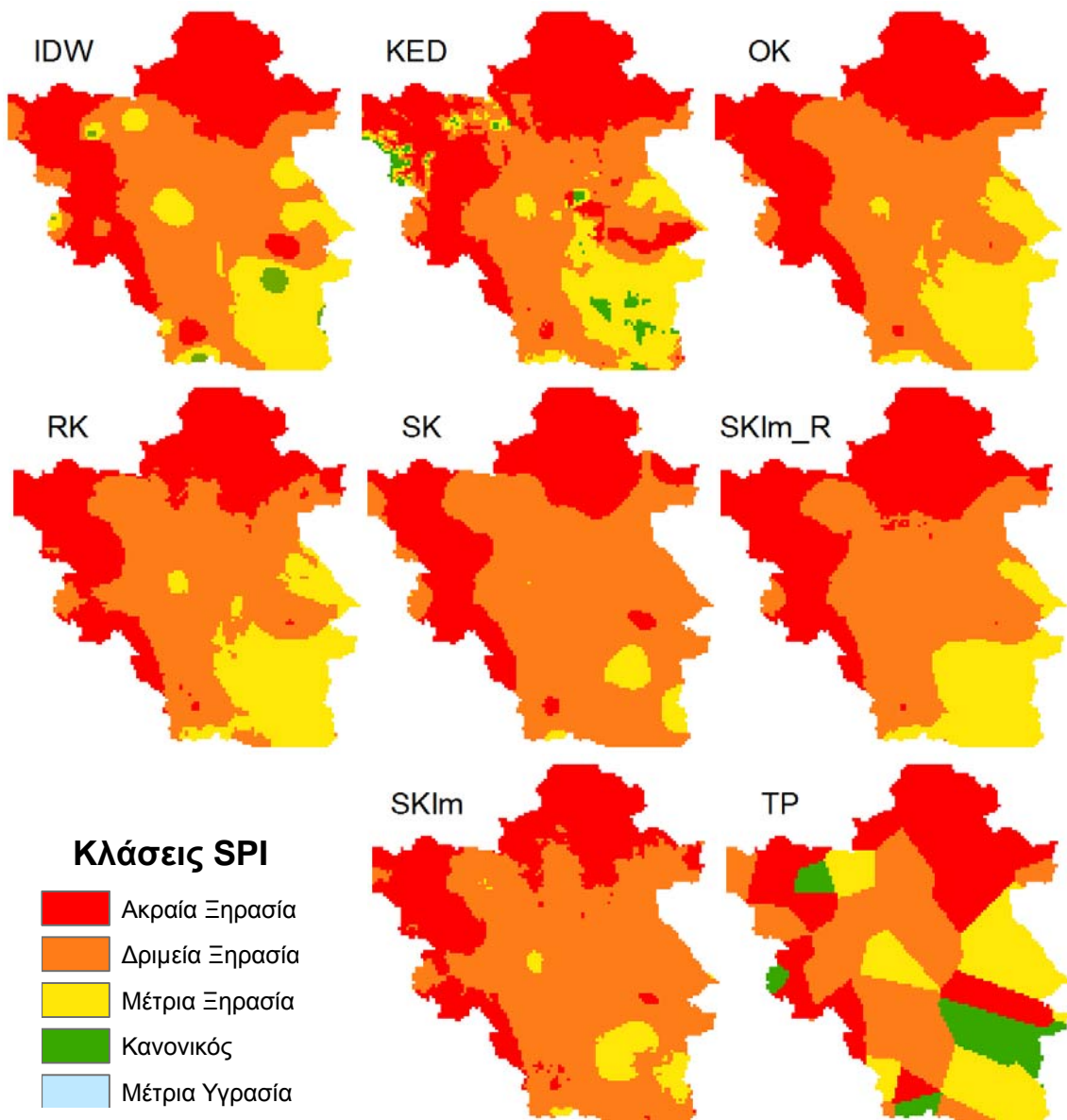
Πίνακας 6.19. Ποσοστό έκτασης (%) υδρολογικής λεκάνης Πηνειού ποταμού που πλήττεται από ξηρασία για τους οκτώ χωρικούς χάρτες του SPI-6 του μήνα Μάρτιος 1990.

	IDW	KED	OK	RK	SK	SKIm_R	SKIm	TP
Ποσοστό έκτασης με ακραία ξηρασία	36.77	39.75	36.88	34.15	34.98	38.95	31.62	36.27
Ποσοστό έκτασης με δριμεία ξηρασία	43.12	39.26	43.93	45.74	61.62	43.94	62.97	32.26
Ποσοστό έκτασης με μέτρια ξηρασία	19.02	18.87	19.19	20.11	3.40	17.10	5.41	22.52
Ποσοστό έκτασης χωρίς ξηρασία	1.09	2.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.95
Συνολικό Ποσοστό έκτασης με ξηρασία	98.91	97.88	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	91.05



Σχήμα 6.20. Σύγκριση ψηφιακών χαρτών του SPI-6 που δημιουργήθηκαν με τις οκτώ μεθόδους χωρικής παρεμβολής για το μήνα Μάρτιος 1990.

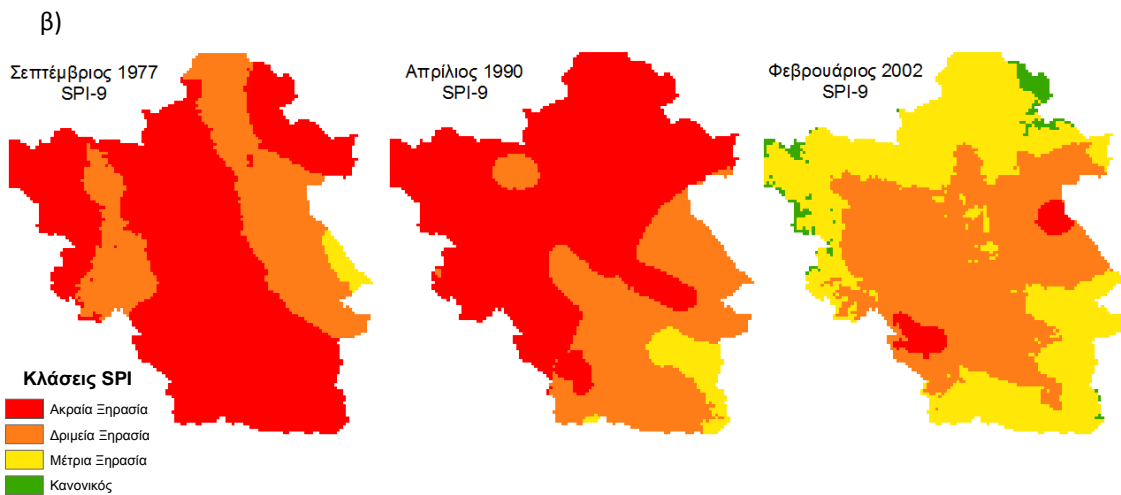
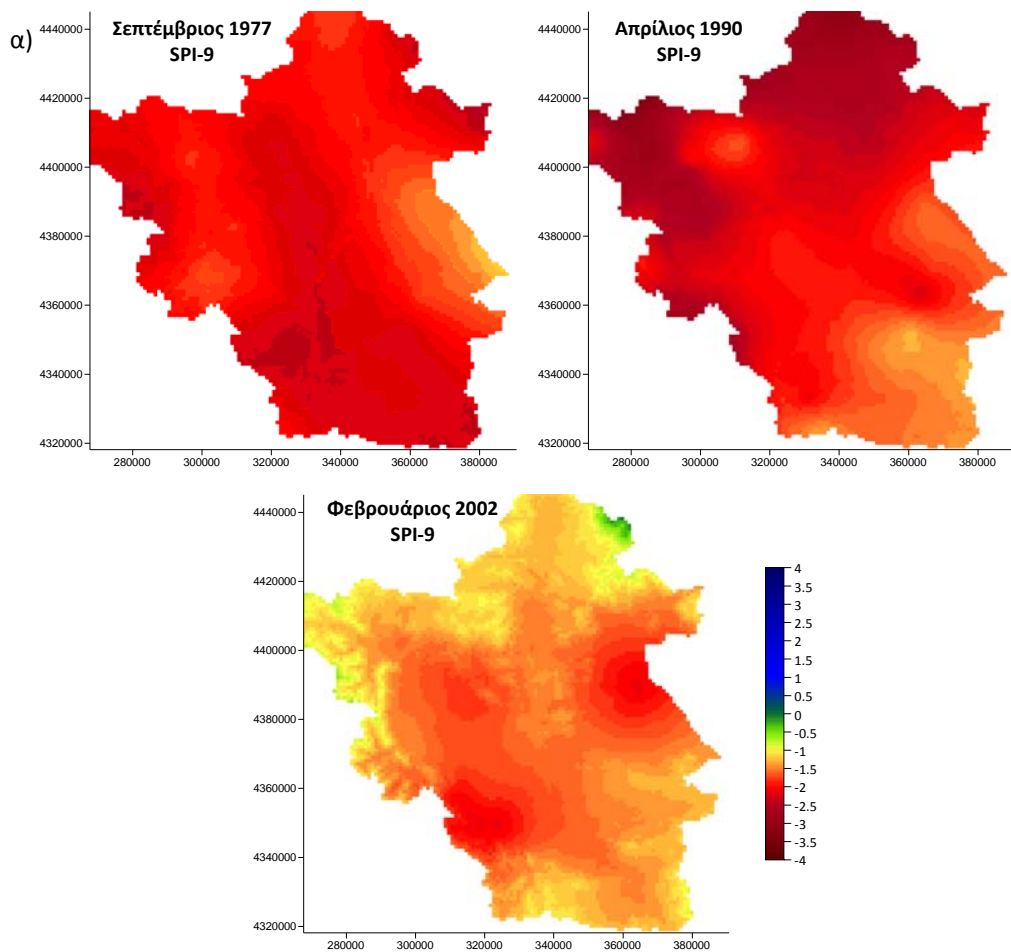
Η παραγωγή και σύγκριση των ψηφιακών χαρτών μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως μέθοδος εκτίμησης της αβεβαιότητας του χωρικού σφάλματος. Πρέπει πάντως να σημειωθεί ότι μία τέτοια ανάλυση είναι χρήσιμη μόνο όταν δεν έχουν χρησιμοποιηθεί οι τεχνικές της cross-validation ή/και της ανεξάρτητης χωρικής πιστοποίησης. Τέτοιες περιπτώσεις αποτελούν τα συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης για την ξηρασία που προβλέπουν χρονικά την εξέλιξη της ξηρασίας αγνοώντας την χωρική αβεβαιότητα. Τέλος, το Σχήμα 6.22 παρουσιάζει την μέθοδο SKIm_R στην χωρική απεικόνιση του δείκτη ξηρασίας SPI-9 για δύο ακραία γεγονότα ξηρασίας (Σεπ-77 και Απρ-90) και ένα μέτριο επεισόδιο ξηρασίας (Φεβ-02). Όπως φαίνεται από το Σχήμα 6.21 και τον Πίνακα 6.20 τα επεισόδια ξηρασίας έπληξαν σχεδόν όλη την υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού αλλά με διαφορετική ένταση και χωρική έκταση. Ο μήνας Σεπ-77 παρουσιάζεται χωρικά υπό συνθήκες ακραίας ξηρασίας ενώ ο Απρ-1990 παρουσιάζει τη μέγιστη δριμύτητα του δείκτη ξηρασίας SPI-9 (Πίνακας 6.20). Περισσότερα ιστορικά γεγονότα ξηρασίας για άλλες χρονικές κλίμακες υπολογισμού του SPI θα παρουσιαστούν στο υβριδικό σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης της ξηρασίας.



Σχήμα 6.21. Σύγκριση ψηφιακών χαρτών ανά κλάση SPI που δημιουργήθηκαν με τις οκτώ μεθόδους χωρικής παρεμβολής για τον δείκτη ξηρασίας SPI-6, Μάρτιος 1990.

Πίνακας 6.20. Χαρακτηριστικά ιστορικών γεγονότων ξηρασίας για τους χωρικούς χάρτες της μεθόδου SKIm_R του δείκτη ξηρασίας SPI-9.

	Σεπτέμβριος 1977	Απρίλιος 1990	Φεβρουάριος 2002
Στατιστικά χαρακτηριστικά ψηφιακών χαρτών			
Μέγιστη δριμύτητα SPI	2.50	3.30	2.10
Ελάχιστη δριμύτητα SPI	1.20	1.30	0.10
Μέση δριμύτητα SPI	2.06	2.10	1.45
Τυπική απόκλιση SPI	0.22	0.39	0.26
Χωρικά χαρακτηριστικά ψηφιακών χαρτών			
Ποσοστό έκτασης με ακραία ξηρασία (%)	69.25	64.32	2.85
Ποσοστό έκτασης με δριμεία ξηρασία (%)	29.38	31.23	48.41
Ποσοστό έκτασης με μέτρια ξηρασία (%)	1.37	4.45	46.06
Ποσοστό έκτασης χωρίς ξηρασία (%)	0.00	0.00	2.68
Συνολικό ποσοστό έκτασης με ξηρασία (%)	100.00	100.00	97.32



Σχήμα 6.22. Η μέθοδος SKIm_R για θεματική απεικόνιση του δείκτη ξηρασίας SPI-9 για επιλεγμένα ιστορικά γεγονότα ξηρασίας με βάση α) την κατανομή του SPI και β) τις κλάσεις του SPI.

6.3.5. Συμπεράσματα εφαρμογής χωρικών μεθόδων

Η χωροχρονική εφαρμογή των χωρικών μεθόδων στους δείκτες ξηρασίας SPI-3, SPI-6 και SPI-12 έδωσε παραπλήσια αποτελέσματα για τους σταθμούς ανάπτυξης και σταθμούς πιστοποίησης. Η μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής simple kriging με μεταβαλλόμενα τοπικά μέσα και με μοντέλο παλινδρόμησης SKIm_R προσομοιώνει καλύτερα την χωρική κατανομή του δείκτη ξηρασίας SPI από τις άλλες επτά

χωρικές μεθόδους στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού. Τα αποτελέσματα των σταθμών ανάπτυξης με την τεχνική cross-validation έδειξαν τη σαφή υπεροχή της χωρικής μεθόδου SKIm_R για χωροχρονική εφαρμογή στην υδρολογική λεκάνη. Η μέθοδος SKIm_R αναδείχτηκε επίσης η καλύτερη χωρική μέθοδος για χωρική προσομοίωση ημερήσιας, μηνιαίας και ετήσιας βροχόπτωσης σε δύο πρόσφατες μελέτες [Zhang and Srinivasan, 2009; Moral, 2010]. Η χωροχρονική εφαρμογή των χωρικών μεθόδων για χρονική προσομοίωση του δείκτη ξηρασίας SPI στους σταθμούς πιστοποίησης έδειξε ότι αν και όλες οι μέθοδοι παρουσιάζουν παραπλήσια ποσοτικά και ποιοτικά στατιστικά χαρακτηριστικά, μία ελαφριά υπεροχή της μεθόδου SKIm_R παρατηρείται. Τα ίδια αποτελέσματα παρουσιάζονται και για τους δείκτες ξηρασίας SPI-9μηνών (SPI-9) και SPI-24μηνών (SPI-24).

Επιλεγμένα ιστορικά γεγονότα ξηρασίας επιλέχθηκαν για την θεματική απεικόνιση των δεικτών ξηρασίας SPI και επιλεγμένες χρονικές κλίμακες υπολογισμού του SPI στην υδρολογική λεκάνη. Οι παραγόμενοι ψηφιακοί χάρτες με μέγεθος φατνίου 1-km που υπολογιστήκαν με τις χωρικές μεθόδους παρουσιάζουν παραπλήσιες επιφανειακές τιμές (μέση τιμή των ψηφιακών χαρτών) αλλά διαφορετική χωρική κατανομή. Η χωρική κατανομή των γεγονότων ξηρασίας είναι αρκετά διαφορετική για τις μεθόδους KED, TP και IDW και παρόμοια για τις άλλες πέντε μεθόδους με διαφορετική όμως δριμύτητα και έκταση ανά κλάση του δείκτη SPI.

Το γενικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι οι χωρικές μεθοδολογίες μπορούν να εφαρμοστούν για χωροχρονική προσομοίωση του δείκτη ξηρασίας σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες αλλά προσοχή πρέπει να δοθεί στην επιλογή της χωρικής μεθόδου αφού το χωρικό σφάλμα που παρατηρείται είναι μεγάλο και μεταβάλλεται με το χρονικό βήμα εφαρμογής. Τα αποτελέσματα της χρονικής εφαρμογής των χωρικών μεθόδων στους σταθμούς πιστοποίησης δείχνουν ότι οι χωρικές μέθοδοι προσομοιώνουν αρκετά ικανοποιητικά τη χρονική εξέλιξη του δείκτη ξηρασίας SPI αλλά με μεγάλο χρονικό και χωρικό σφάλμα. Η μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής simple kriging με μεταβαλλόμενα τοπικά μέσα και με μοντέλο παλινδρόμησης SKIm_R προσομοιώνει την χωρική κατανομή του δείκτη ξηρασίας SPI πολύ ικανοποιητικά στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού. Βέβαια, για τη γενίκευση των αποτελεσμάτων πρέπει να εφαρμοστούν οι χωρικές μεθοδολογίες και σε άλλες περιοχές με διαφορετικές κλιματικές συνθήκες και μεταβλητές (π.χ. βροχόπτωση, θερμοκρασία και άλλοι δείκτες ξηρασίας). Η παρούσα εφαρμογή υποδεικνύει ότι πολλές χωρικές μεθοδολογίες πρέπει να εφαρμόζονται σε μία υπο-εξέταση περιοχή για την ελαχιστοποίηση του χωρικού σφάλματος της εξεταζόμενης μεταβλητής όταν η μεταβλητή (π.χ. βροχόπτωση, SPI) έχει χωρική εξάρτηση και συσχέτιση.

Η αυτοματοποιημένη διαδικασία, που αναπτύχθηκε στην παρούσα διατριβή, επιτρέπει στον χρήστη να επιλέξει τη χωρική μεθοδολογία που δίνει τα καλύτερα στατιστικά κριτήρια με βάση την τεχνική cross-validation όταν τα όλα τα δεδομένα παρεμβολής χρησιμοποιούνται. Οι μέθοδοι που εφαρμόστηκαν περιλαμβάνουν απλές μη γεωστατιστικές μεθόδους (μέθοδοι αντίστροφης απόστασης IDW, και πολυγώνων Thiessen TP) γεωστατιστικές μεθόδους (μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής Ordinary kriging OK, Simple kriging SK) και συνδυαστικές μεθόδους που ενσωματώνουν δευτερογενείς πληροφορίες γεωγραφικού ανάγλυφου και γεωγραφικών συντεταγμένων (Kriging with External Drift KED, Ordinary kriging με μοντέλο παλινδρόμησης RK, Simple kriging με μεταβαλλόμενα τοπικά μέσα και με μοντέλο παλινδρόμησης με υψόμετρο SKIm, Simple kriging με μεταβαλλόμενα τοπικά μέσα και μοντέλο παλινδρόμησης με υψόμετρο και χωρικές συντεταγμένες SKIm_R). Η επιλογή των μεθόδων βασίστηκε στην διεθνή βιβλιογραφία και στην επιτυχή εφαρμογή των χωρικών μεθόδων σε διάφορες υδρολογικές, μετεωρολογικές και περιβαλλοντικές εφαρμογές. Αξίζει να σημειωθεί ότι η αυτοματοποιημένη τεχνική μπορεί να εφαρμοστεί χωροχρονικά και για άλλες πρωτογενείς και δευτερογενείς μεταβλητές στην περιοχή μελέτης όπως βροχόπτωση και θερμοκρασία ή άλλους μετεωρολογικούς δείκτες (π.χ. RDI, PDSI). Η σύγκριση των χωρικών μεθόδων σε χωρικά μεταβαλλόμενες μεταβλητές (π.χ. βροχόπτωση, θερμοκρασία, δείκτες ξηρασίας) παρέχει τη δυνατότητα εκτίμησης της χωρικής αβεβαιότητας της εξεταζόμενης μεταβλητής. Σε περίπτωση που

υπάρχουν δεδομένα (π.χ. σταθμοί βροχόπτωσης) ώστε να δημιουργούν δύο σετ δεδομένων, ένα σετ για την ανάπτυξη των μεθόδων και ένα σετ για την ανεξάρτητη χωρική πιστοποίηση, τότε υπολογίζονται οι τιμές των ανεξάρτητων σημειακών δεδομένων. Πρέπει, όμως, να επισημανθεί ότι για την επιτυχή εφαρμογή των χωρικών μεθόδων και ιδιαίτερα των μεθόδων βέλτιστης παρεμβολής kriging που χρειάζονται πολλά σημειακά δεδομένα (>50) για την επιτυχή προσομοίωση των θεωρητικών ημιμεταβλητογραφήματων στα πειραματικά ημιμεταβλητογραφήματα, συνήθως όλα τα σημειακά χωρικά δεδομένα χρησιμοποιούνται για τη παρεμβολή της εξεταζόμενης μεταβλητής. Στην περίπτωση αυτή, δίνεται η δυνατότητα υπολογισμού επιφανειακών (ή περιοχικών) τιμών της εξεταζόμενης μεταβλητής ανά υδρολογική λεκάνη (ή υπολεκάνη) που παρέχεται από τον χρήστη. Επίσης, η δημιουργία των ψηφιακών (raster) χαρτών σε μορφή *.asc δίνει τη δυνατότητα για επιπλέον χωρική ανάλυση στα πιο συνηθισμένα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (π.χ. ArcGIS, MapInfo, Surfer, Grass GIS) και εξαγωγή χωρικών χαρακτηριστικών όπως π.χ. η παρακολούθηση της χωρικής και χρονικής εξάπλωσης της ξηρασίας, και ο υπολογισμός της δριμύτητας της ξηρασίας ανά κλάση του SPI καθώς και της κρίσιμης έκτασης που πλήττεται από ξηρασία.

7. ΧΡΟΝΙΚΗ ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΞΗΡΑΣΙΑΣ

Ο σκοπός του προτεινόμενου επιχειρησιακού συστήματος πρόβλεψης της ξηρασίας είναι να μπορεί να δώσει ικανοποιητικές προγνώσεις των δεικτών του SPI σε διάφορα σημεία της υδρολογικής λεκάνης του Πηνειού ποταμού. Ο πιο σημαντικός παράγοντας είναι ο σχεδιασμός του χρονικού ορίζοντα πρόβλεψης του συστήματος ξηρασίας. Η αποτελεσματικότητα ενός συστήματος ξηρασίας μπορεί να μεγιστοποιηθεί όταν τα χρονικά βήματα της πρόβλεψης δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα. Έτσι, ιδιαίτερη έμφαση δίνεται για βραχυπρόθεσμα και μεσοπρόθεσμα χρονικά διαστήματα πρόβλεψης (από 1-6 μήνες). Τα μοντέλα πρόβλεψης που αναπτύχθηκαν για τα παραπάνω χρονικά βήματα πρόγνωσης για να λειτουργήσουν επιχειρησιακά απαιτούν την άμεση συλλογή δεδομένων και γρήγορους υπολογισμούς ώστε να δώσουν μία γρήγορη πρόγνωση. Είναι επίσης απαραίτητο ότι το σύστημα θα λειτουργεί αυτόματα ώστε να χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση της ξηρασίας και την έγκαιρη προειδοποίηση των επερχόμενων ξηρασιών με τη χρήση των δεικτών του SPI. Η παρούσα διατριβή έχει στόχο να δώσει ένα ικανοποιητικό μοντέλο χωροχρονικής πρόγνωσης της ξηρασίας (prototype) για χρήση σε ένα επιχειρησιακό σύστημα πρόγνωσης και διαχείρισης της ξηρασίας και αγνοεί τα προβλήματα που σχετίζονται με την μέτρηση και καταγραφή σημειακών δεδομένων βροχόπτωσης που είναι απαραίτητα για τον υπολογισμό των δεικτών του SPI. Για ένα πραγματικό επιχειρησιακό σύστημα πρόγνωσης της ξηρασίας πρέπει να υπάρξει και ο απαραίτητος τηλεμετρικός εξοπλισμός και η υποδομή συλλογής δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.

Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 4 εφαρμόστηκε για την σημειακή χωροχρονική πρόγνωση. Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα εφαρμόστηκαν χωροχρονικά για την χωροχρονική πρόγνωση του δείκτη SPI (για χρονικές κλίμακες 3-μηνών, 6-μηνών, 9-μηνών, 12 μηνών και 24-μηνών) για βραχυπρόθεσμες (1-2 μήνες μπροστά) και μεσοπρόθεσμες προγνώσεις (3-6 μήνες μπροστά). Η χωροχρονική εφαρμογή έγινε για τους 48 σταθμούς ανάπτυξης για την περίοδο Οκτ. 1960 – Σεπ. 1992. Στα υπόλοιπα 10 χρόνια (Οκτ. 1992 – Σεπ. 2002) πραγματοποιήθηκε η χρονική πιστοποίηση της μεθοδολογίας. Επίσης, η μεθοδολογία εφαρμόστηκε και για την ανεξάρτητη χωρική και χρονική πιστοποίηση των 18 βροχομετρικών σταθμών που δεν χρησιμοποιήθηκαν στην εκπαίδευση της μεθόδου. Οι σταθμοί ανάπτυξης και πιστοποίησης παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 6 (Πίνακας 6.1 και Σχήμα 6.2). Η αξιολόγηση της χωροχρονικής σημειακής πρόγνωσης έγινε με στατιστικά κριτήρια για τις παρατηρημένες τιμές των δεικτών ξηρασίας και συγκρίθηκαν και με τον αλγόριθμο αναφοράς του μοντέλου εμμονής (persistent model). Επίσης, διάφορα ποιοτικά κριτήρια πρόγνωσης εκτιμήθηκαν για την καλύτερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων πρόγνωσης.

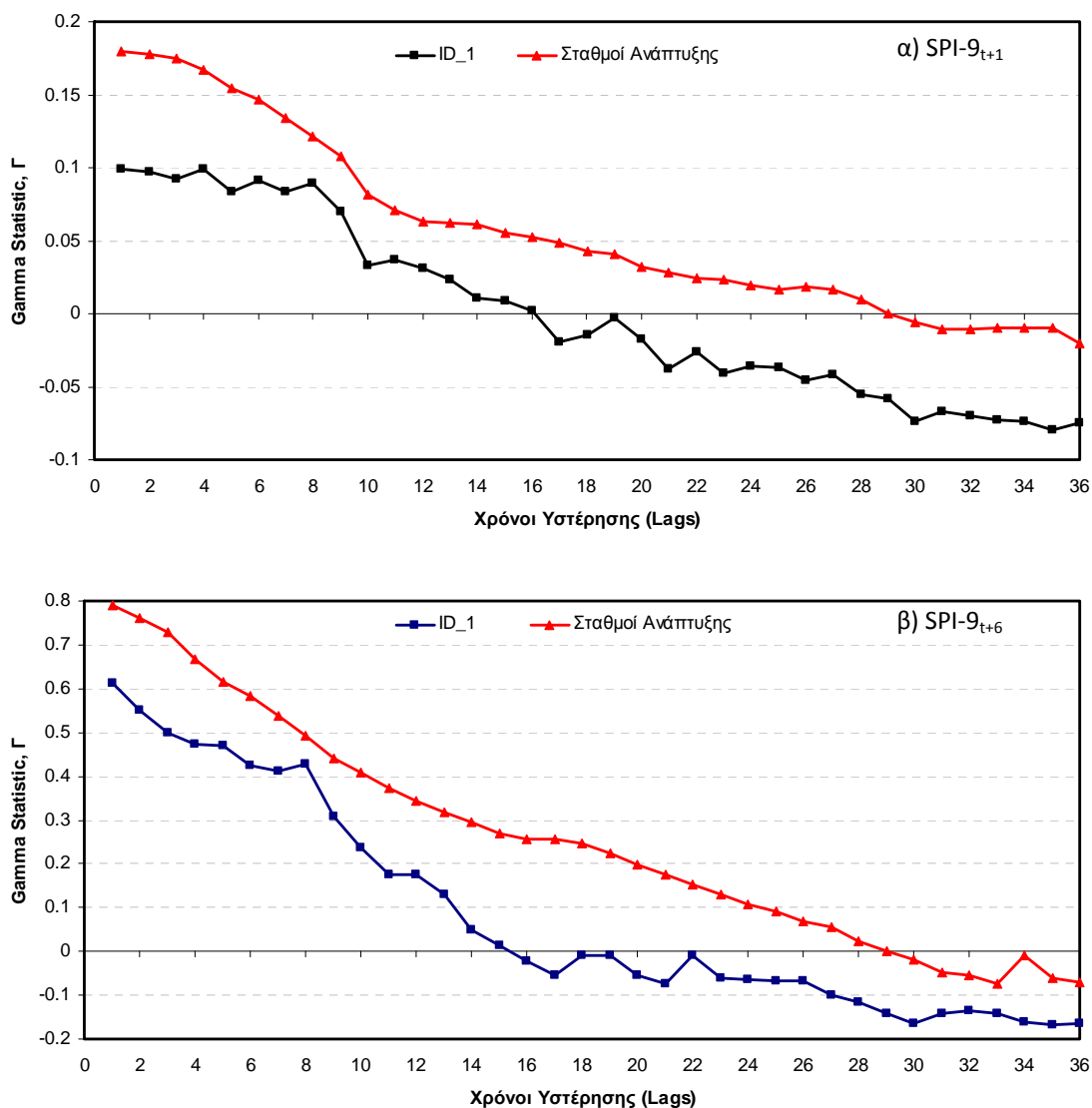
7.1. Εφαρμογή του Gamma Test για επιλογή δεδομένων εισόδου

Το Gamma test εφαρμόστηκε για την επιλογή των δεδομένων εισόδου της πρόγνωσης των χρονοσειρών του δείκτη ξηρασίας σε χρονικές κλίμακες 3-μηνών, 6-μηνών, 9-μηνών, 12-μηνών και 24-μηνών. Η επιλογή των δεδομένων εισόδου βασίστηκε στην αναγνώριση των κατάλληλων χρόνων υστέρησης (lags) των τιμών του SPI. Στην παρούσα διατριβή το Gamma test εφαρμόστηκε αρχικά για την εκτίμηση της διάστασης του μητρώου δεδομένων εισόδου ώστε να βρεθούν οι χρόνοι υστέρησης της υπό εξέταση χρονοσειράς (π.χ. SPI 9-month) για όλους τους 48 σταθμούς ανάπτυξης. Αφού βρεθούν οι πρότερες τιμές που είναι απαραίτητες για την πρόγνωση του χρονικού βήματος, το M-test εφαρμόζεται για την εύρεση των πλήθους των δεδομένων που απαιτούνται για ένα γενικευμένο μοντέλο που να εφαρμόζεται και στους 48 σταθμούς ανάπτυξης. Τέλος, ευρετικές τεχνικές με βάση το

Gamma test εφαρμόστηκαν, ώστε να υπολογιστεί το κατάλληλο σετ του μητρώου των δεδομένων εισόδου. Η διαδικασία περιγράφεται αναλυτικά παρακάτω.

7.1.1. Αναγνώριση των χρόνων υστέρησης

Το πρώτο βήμα για την αναγνώριση των χρόνων υστέρησης είναι η κατασκευή του μητρώου αυτοσυσχέτισης των χρονοσειρών του SPI για κάθε σταθμό ανάπτυξης. Μία τεχνική παρόμοια με την ανάλυση αυτοσυσχέτισης (Delta autocorrelation) ακολουθήθηκε με βάση το Gamma test που είναι κατάλληλη για μη-γραμμικές χρονοσειρές. Στην αρχή, 36 χρόνοι υστέρησης υπολογίστηκαν από τις τιμές του SPI για κάθε σταθμό. Η διαδικασία αυτή έγινε για όλους τους σταθμούς ανάπτυξης. Η τεχνική της αυξανόμενης διάστασης μητρώου (increasing embedding) εφαρμόστηκε για τον υπολογισμό του Gamma Test. Το Σχήμα 7.1 παρουσιάζει τα αποτελέσματα του Gamma test του SPI-9 για χρονικό βήμα πρόβλεψης ενός (1) μήνα ($SPI-9_{t+1}$) και έξι μηνών ($SPI-9_{t+6}$) του σταθμού Αγιόφυλλος με ID_1. Από το σχήμα φαίνεται ότι απαιτούνται 10 χρόνοι υστέρησης για μία αξιόπιστη πρόβλεψη του $SPI-9_{t+1}$ και 11 χρόνοι υστέρησης για την πρόβλεψη του $SPI-9_{t+6}$. Όπως φαίνεται από την τιμή του Gamma test (Gamma statistic), Γ , το σφάλμα ενός ιδεατού μοντέλου πρόγνωσης αυξάνει με το χρονικό βήμα πρόγνωσης. Η αναγνώριση των χρόνων υστέρησης έγινε και για όλους τους σταθμούς ανάπτυξης για να διαπιστωθεί εάν ένα γενικευμένο μοντέλο πρόγνωσης μπορεί να εφαρμοστεί ταυτόχρονα σε όλους τους σταθμούς. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.1. Η χρήση όλων των σταθμών ανάπτυξης δείχνει ένα πιο ομαλοποιημένο σχήμα των τιμών του Gamma που μειώνονται καθώς οι χρόνοι υστέρησης αυξάνονται. Αξιοσημείωτο είναι ότι αρνητικές τιμές παρουσιάζονται μετά τον 29^ο χρόνο υστέρησης σε αντίθεση με την μεμονωμένη ανάλυση όπου αρνητικές τιμές παρουσιάζονται από τον 16^ο μηνιαίο χρονικό βήμα υστέρησης (Σχήμα 7.1). Για όλους τους σταθμούς ανάπτυξης οι κατάλληλοι χρόνοι υστέρησης είναι 13 προηγούμενες τιμές για το $SPI-9_{t+1}$ και 16 για το $SPI-9_{t+6}$. Επίσης, οι τιμές του Gamma στατιστικού που προέκυψαν από όλους τους σταθμούς ανάπτυξης είναι ελαφρώς πιο μεγάλες σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές του Gamma στατιστικού για κάθε σταθμό. Αυτό σημαίνει ότι το γενικευμένο ιδεατό μη-γραμμικό μοντέλο θα είναι πιο πολύπλοκο αφού το μητρώο των δεδομένων εισόδου έχει περισσότερα χρονικά βήματα υστέρησης για να επιτύχει το ίδιο τετραγωνισμένο σφάλμα που προκύπτει για κάθε σταθμό. Έτσι, για την πρόγνωση του δείκτη ξηρασίας SPI-9 το μητρώο δεδομένων εισόδου αποτελείται από 13 χρονικά βήματα υστέρησης για πρόβλεψη ενός μηνός μπροστά ($SPI-9_{t+1}$) και αυξάνεται έως 16 για πρόγνωση των επόμενων 6 χρονικών βημάτων ($SPI-9_{t+6}$). Παρόμοια αποτελέσματα παρουσιάζονται και για τους χρόνους πρόβλεψης από 2 έως 5 μήνες που απαιτούν περίπου 13-16 lags. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα διαφορετικά μητρώα εισόδου χρησιμοποιούνται μόνο στην περίπτωση της ευθείας πρόγνωσης πολλαπλών χρονικών βημάτων (DANN). Για την πρόγνωση των πολλαπλών βημάτων με την επαναληπτική μέθοδο (RANN) το μητρώο εισόδου αποτελείται από τους χρόνους υστέρησης που απαιτούνται για την πρόγνωση του χρονικού βήματος $t+1$. Έτσι, για τον δείκτη ξηρασίας SPI-9 το μητρώο εισόδου περιλαμβάνει 13 χρονικά βήματα υστέρησης (lags). Με βάση τα παραπάνω, για να μπορέσουν οι δύο μεθοδολογίες πρόγνωσης να είναι συγκρίσιμες και να είναι πιο απλή η δομή των νευρωνικών δικτύων αποφασίστηκε το μητρώο εισόδου και στις δύο περιπτώσεις των νευρωνικών δικτύων που θα εξεταστούν στην συνέχεια να είναι το ίδιο και ίσο με αυτό που αναγνωρίστηκε για το χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$. Παραπλήσια αποτελέσματα παρουσιάζονται και για τις άλλες χρονικές κλίμακες του SPI και τα τελικά μητρώα εισόδου παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.1. Στον ίδιο πίνακα παρουσιάζονται και οι τιμές των σημαντικών στατιστικών στοιχείων του Gamma test που προέκυψαν από την αναγνώριση των χρόνων υστέρησης με την τεχνική της αυξανόμενης διάστασης μητρώου για το χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$.



Σχήμα 7.1. Εύρεση των χρόνων υστέρησης με την τεχνική της αυξανόμενης διάστασης μητρώου.

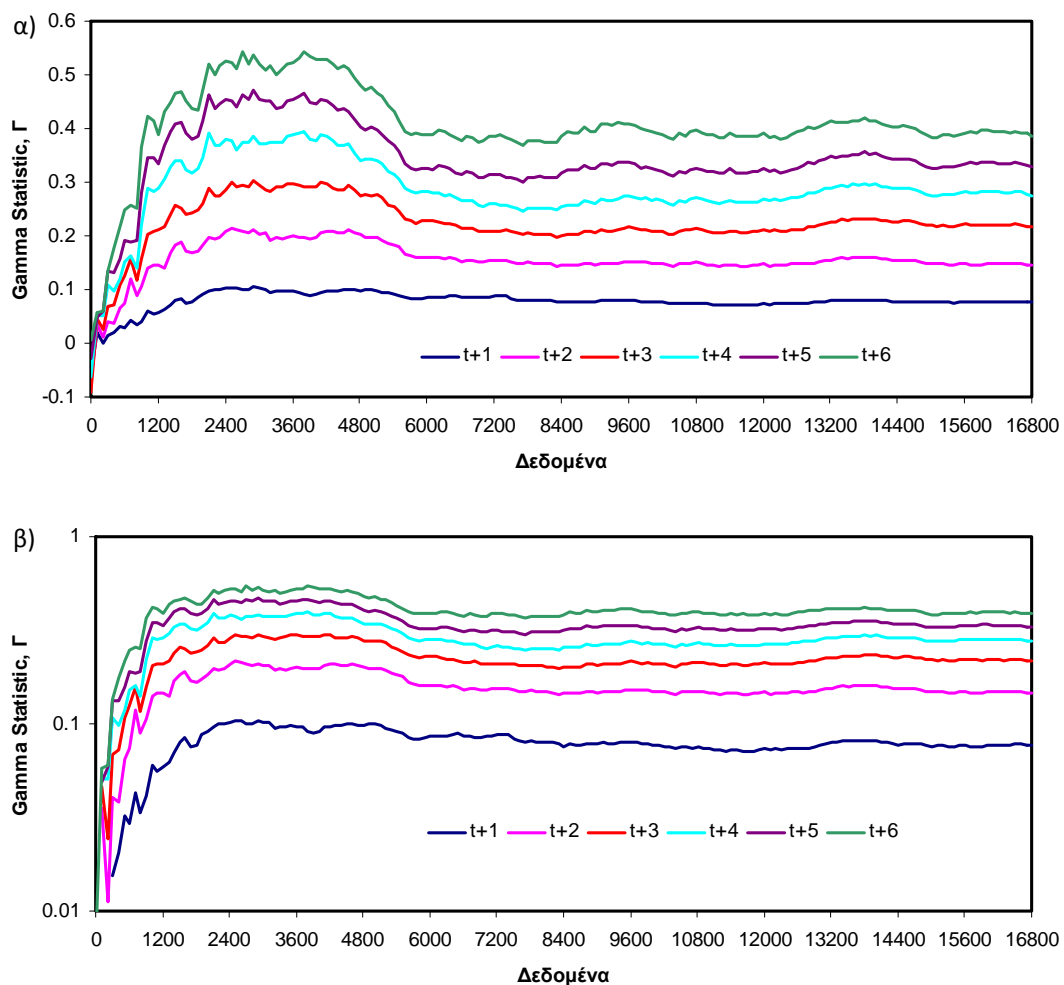
Πίνακας 7.1. Βέλτιστος αριθμός χρόνων υστέρησης που αναγνωρίστηκαν με την τεχνική της αυξανόμενης διάστασης μητρώου για χρονικό βήμα πρόβλεψης $t+1$

Δείκτης ξηρασίας	Χρόνοι υστέρησης (Lags)	Gamma Statistic	Κλίση (Gradient)	Τυπικό Σφάλμα (Standard Error)	V-ratio
SPI-3	16	0.104	0.098	0.0045	0.103
SPI-6	14	0.081	0.093	0.0031	0.076
SPI-9	13	0.068	0.101	0.0024	0.065
SPI-12	14	0.047	0.081	0.0022	0.046
SPI-24	14	0.031	0.081	0.0009	0.033

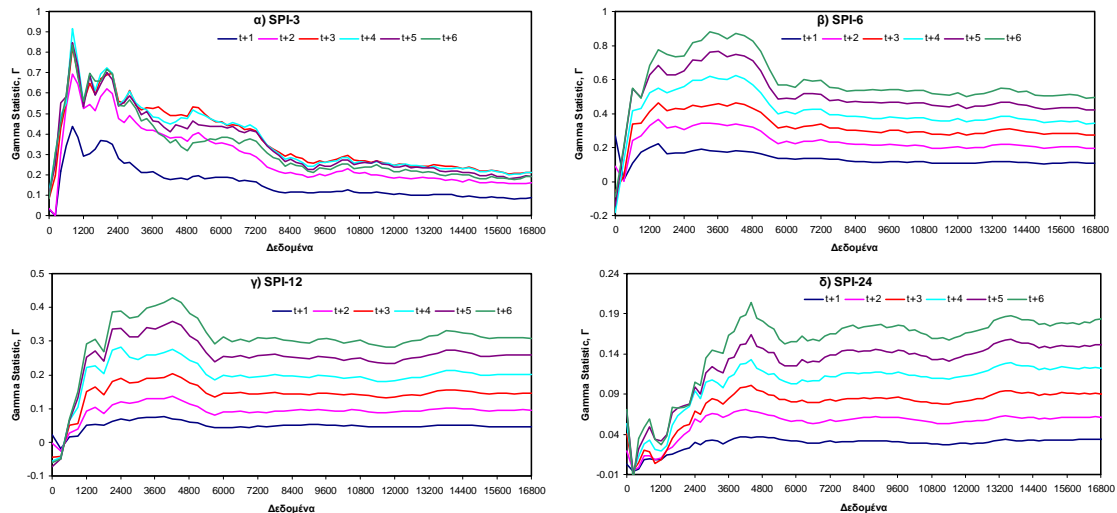
7.1.2. Εύρεση του πλήθους των δεδομένων

Αφού βρεθούν οι πρότερες τιμές που είναι απαραίτητες για την πρόγνωση του χρονικού βήματος (Πίνακας 7.1), το M-test εφαρμόζεται για την εύρεση των πλήθους των δεδομένων που απαιτούνται για ένα γενικευμένο μοντέλο που να εφαρμόζεται και στους 48 σταθμούς. Επισημαίνεται ότι το M-test εφαρμόστηκε μόνο για την περίοδο της βελτιστοποίησης Οκτ. 1960 – Σεπ. 1992. Κάθε σταθμός περιέχει

τελικά 350 δεδομένα αφού τα πρώτα δύο χρόνια χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή των χρόνων υστέρησης (48 σταθμοί * 350 δεδομένα = 16800 δεδομένα). Το Σχήμα 7.2 παρουσιάζει το M-test του SPI-9 για τα έξι μηνιαία χρονικά βήματα πρόγνωσης (lead times 1-6). Για όλα τα χρονικά βήματα πρόγνωσης το M-test δείχνει ότι μετά τα 7000 δεδομένα η τιμή του Γ σταθεροποιείται κοντά στην θεωρητική του τιμή. Άρα τα δεδομένα για όλους τους σταθμούς ανάπτυξης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη μη-γραμμικών μοντέλων όπως είναι τα νευρωνικά δίκτυα. Από το ίδιο σχήμα φαίνεται επίσης ότι τα δεδομένα μπορούν να χωριστούν σε δύο σετ, ένα σετ εκπαίδευσης και ένα σετ γενίκευσης αν η τεχνική της γρήγορης διακοπής (early stopping procedure) εφαρμοστεί στην εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων (Σχήμα 7.2). Επειδή όμως υπάρχουν και δεδομένα εκτός της περιόδου βελτιστοποίησης που δεν χρησιμοποιήθηκαν στο M-test για την περίοδο Οκτ. 1992 – Σεπ. 2002 των 48 σταθμών ανάπτυξης (48 σταθμοί * 120 δεδομένα = 5760 δεδομένα = χρονική πιστοποίηση) και άλλοι 18 σταθμοί για όλη την περίοδο της χρονικής ανάλυσης (18 σταθμοί * 470 δεδομένα = 8460 δεδομένα = χωροχρονική πιστοποίηση) όλα τα δεδομένα της περιόδου βελτιστοποίησης χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη των νευρωνικών δικτύων. Τέλος, η διαδικασία της γρήγορης διακοπής δεν ακολουθήθηκε αφού το Gamma test αποτελεί από μόνο του ένα κριτήριο γενίκευσης. Για τη σωστή γενίκευση των μοντέλων που αναπτύχθηκαν διάφορες τεχνικές ακολουθήθηκαν που περιγράφηκαν στο 4^ο κεφάλαιο (Bayesian regularization). Για τις άλλες χρονικές κλίμακες του SPI, παραπλήσια αποτελέσματα παρουσιάζονται και δείχνουν ότι τα δεδομένα της περιόδου Οκτ. 1960 – Σεπ. 1992 όλων των σταθμών ανάπτυξης είναι επαρκή για τη δημιουργία ενός γενικευμένου χωροχρονικού μοντέλου. Το Σχήμα 7.3 επιβεβαιώνει τα παραπάνω συμπεράσματα.



Σχήμα 7.2. Το M-test του SPI-9 για τα χρονικά βήματα πρόγνωσης με όλα τα δεδομένα της χρονικής βελτιστοποίησης των σταθμών ανάπτυξης α) σε κανονική κλίμακα και β) σε λογαριθμική κλίμακα.



Σχήμα 7.3. Το M-test για τα χρονικά βήματα πρόγνωσης με όλα τα δεδομένα της χρονικής βελτιστοποίησης των σταθμών ανάπτυξης για α) SPI-3, β) SPI-6, γ) SPI-12 και δ) SPI-24.

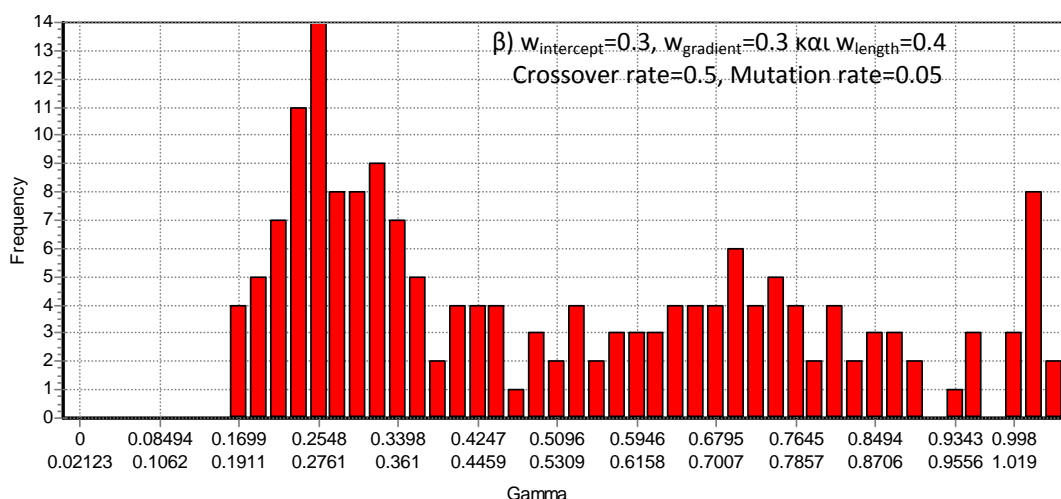
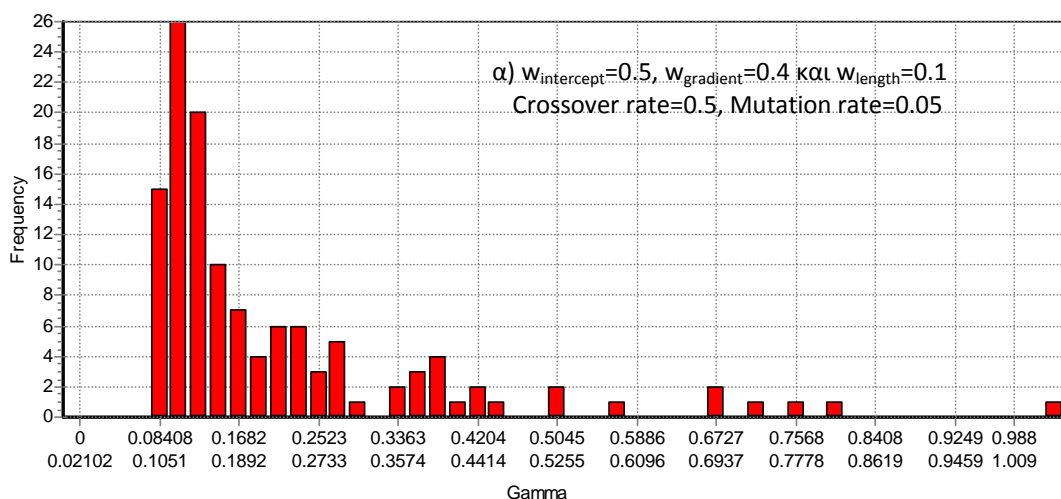
7.1.3. Εύρεση του βέλτιστου συνδυασμού του μητρώου εισόδου

Οι προηγούμενες αναλύσεις της αυξανόμενης διάστασης μητρώου εξετάζουν τις σχέσεις των βημάτων πρόγνωσης με τους προηγούμενους χρόνους υστέρησης σταδιακά αφού προσθέτουν τους επόμενους χρόνους υστέρησης (από $t-1$ έως $t-36$) σε κάθε βήμα και δεν εξετάζουν τυχόν αλληλεπιδράσεις των μεταβλητών εισόδου. Η διάσταση του μητρώου εισόδου του Πίνακα 7.1 εξετάστηκε για τυχόν αλληλεπιδράσεις των χρόνων υστέρησης και για την αποφυγή των lags που δεν χρειάζονται. Γενικά για d αριθμό χρόνων υστέρησης οι πιθανοί συνδυασμοί είναι $2^d - 1$. Για παράδειγμα, για την πρόγνωση του $SPI-3_{t+1}$ για 16 lags απαιτούνται 65535 Gamma tests που είναι υπολογιστικά πολύ χρονοβόρο. Οι γενετικοί αλγόριθμοι που περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 4 εφαρμόστηκαν για την διακρίβωση των απαραίτητων χρόνων υστέρησης για όλες τις χρονικές κλίμακες του SPI και τα χρονικά βήματα πρόβλεψης. Ο βαθμός καταλληλότητας ενός σετ χαρακτηριστικών ή μάσκας μπορεί να προσδιοριστεί από τρεις βασικούς συντελεστές του Gamma test: 1) Τη σταθερά (*intercept*) - the Gamma statistic, Γ 2) Την κλίση (*gradient*) - ο υπολογισμός της πολυπλοκότητας του μοντέλου και 3) Τον αριθμό (*length*) των δεδομένων εισόδου. Η σχετική βαρύτητα των συντελεστών αυτών μπορεί να προσαρμοστεί σε λύσεις για ένα συγκεκριμένο πρόβλημα. Για παράδειγμα, αν ζητούνται λύσεις που χρησιμοποιούν μικρό αριθμό δεδομένων εισόδου τότε ο αριθμός καταλληλότητας πρέπει να έχει μεγαλύτερη βαρύτητα από την σταθερά και την κλίση. Από τη βιβλιογραφία και αρχικούς πειραματισμούς οι συντελεστές που απαιτούνται για την επιτυχή εφαρμογή των γενετικών αλγόριθμων παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.2. Τα εύρη των συντελεστών που διερευνήθηκαν παρουσιάζονται επίσης στον ίδιο πίνακα. Το Σχήμα 7.4 παρουσιάζει δύο ιστογράμματα του SPI-9 για χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$ και παρουσιάζει 100 πληθυσμούς που προέκυψαν με χρήση διαφορετικών συντελεστών βαρύτητας. Όπως φαίνεται από το σχήμα οι 100 πληθυσμοί δίνουν μία διαφορετική κατανομή της στατιστικής παραμέτρου Γ ανάλογα με την τιμή των βαρών. Για το Σχήμα 7.4^α τα αποτελέσματα δείχνουν ότι βέλτιστες λύσεις προκύπτουν με 10 έως 12 lags ενώ το Σχήμα 7.4^β δίνει βέλτιστες λύσεις για 6 έως 8 lags. Μεγαλύτερες όμως βαρύτητες του μητρώου εισόδου μπορούν να δώσουν αποτελέσματα που δεν παρουσιάζουν μεγάλες ικανότητες πρόβλεψης (Σχήμα 7.4^β). Έτσι, στους συντελεστές βαρύτητας μεγαλύτερη έμφαση δόθηκε στην τιμή της σταθεράς Γ και στην κλίση και λιγότερη στο μητρώο εισόδου των χρόνων υστέρησης. Ο σκοπός των τιμών των βαρών έγκειται στο ότι τα μη-γραμμικά μοντέλα πρέπει να μπορούν να αποδώσουν όσο καλύτερα γίνεται την ακρίβεια των χρονικών βημάτων πρόγνωσης χωρίς όμως να είναι αρκετά πολύπλοκα. Βέβαια όσο μεγαλύτερο είναι το μητρώο εισόδου τόσο θα αυξάνει και το υπολογιστικό φορτίο που θα αυξάνει και την πολυπλοκότητα των μοντέλων. Οι βέλτιστες τιμές των συντελεστών του

Πίνακα 7.2 προέκυψαν από την πρόγνωση μόνο του χρονικού βήματος $t+1$ και διατηρήθηκαν σταθερές για όλες τις χρονικές κλίμακες του SPI και για όλα τα χρονικά βήματα πρόγνωσης.

Πίνακας 7.2. Τιμές των συντελεστών που απαιτούνται για την εφαρμογή των γενετικών αλγορίθμων

Συντελεστής	Θεωρητικό Εύρος	Εύρος αναζήτησης	Βέλτιστη Τιμή
Αριθμός Πληθυσμών (population size)	$1 - (2^d - 1)$	50 - 10000	1000
Ρυθμός διασταύρωσης (crossover rate)	0 - 1	0.4 - 0.9	0.5
Ρυθμός μετάλλαξης (mutation rate)	0 - 1	0.01 - 0.10	0.05
Βαρύτητα της σταθεράς Gamma (weight of Gamma function)	0 - 1	0.3 - 0.8	0.5
Βαρύτητα της κλίσης (weight of gradient function)	0 - 1	0.2 - 0.5	0.4
Βαρύτητα του μητρώου εισόδου (weight of number of lags)	0 - 1	0.0 - 0.4	0.1



Σχήμα 7.4. Ιστογράμματα του Gamma test από την εφαρμογή των γενετικών αλγορίθμων του SPI-9_{t+1} για διαφορετικές βαρύτητες του ρυθμού καταλληλότητας: α) μεγαλύτερη βαρύτητα στην ακρίβεια πρόγνωσης και υπολογισμού του μοντέλου πρόγνωσης, και β) μεγαλύτερη βαρύτητα στο μητρώο εισόδου.

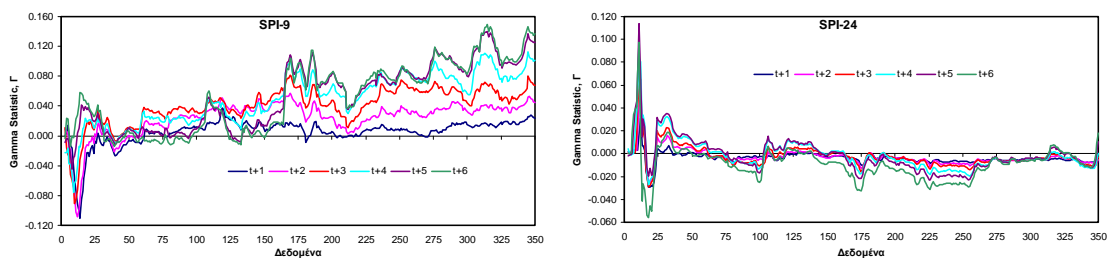
Η τελική δομή του μητρώου εισόδου παρουσιάζεται στον Πίνακα 7.3 για όλες τις χρονικές κλίμακες του SPI και τα χρονικά βήματα πρόγνωσης. Η τιμή της στατιστικής παραμέτρου Γ χρησιμοποιήθηκε ως μέτρο ένδειξης του μέσου τετραγωνισμένου σφάλματος (Mean Square Error, MSE) για την εκπαίδευση των τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Από τον πίνακα φαίνεται ότι αυξάνει το χρονικό βήμα πρόγνωσης τόσο αυξάνει και το θεωρητικό μέσο τετραγωνισμένο σφάλμα που μπορεί να έχει ένα μη-γραμμικό μοντέλο. Επίσης, όταν αυξάνει η χρονική κλίμακα του SPI (π.χ. για SPI-12) το θεωρητικό σφάλμα μειώνεται και κάνει το θεωρητικό ομαλό μοντέλο πιο αξιόπιστο.

Πίνακας 7.3. Τελικά χαρακτηριστικά μητρώου εισόδου νευρωνικών δικτύων

Βήμα Πρόγνωσης	Χρόνοι υστέρησης (Lags)	Gamma Statistic	Κλίση (Gradient)	Τυπικό Σφάλμα (Standard Error)	V-ratio
SPI-3μηνών, SPI-3					
$t+1$	13	0.1490	0.1357	0.0064	0.1399
$t+2$	13	0.2268	0.1255	0.0049	0.2129
$t+3$	13	0.2702	0.1541	0.0049	0.2537
$t+4$	13	0.3134	0.1463	0.0047	0.2943
$t+5$	13	0.3893	0.1888	0.0057	0.3655
$t+6$	13	0.5682	0.1999	0.0104	0.5335
SPI-6μηνών, SPI-6					
$t+1$	12	0.1221	0.1009	0.0066	0.1134
$t+2$	13	0.1748	0.1217	0.0056	0.1626
$t+3$	13	0.2176	0.1393	0.0073	0.2040
$t+4$	13	0.2829	0.1428	0.0113	0.2678
$t+5$	13	0.3308	0.1417	0.0094	0.3172
$t+6$	13	0.3759	0.1510	0.0133	0.3304
SPI-9μηνών, SPI-9					
$t+1$	11	0.077	0.099	0.0028	0.071
$t+2$	12	0.147	0.145	0.0040	0.137
$t+3$	12	0.217	0.177	0.0057	0.205
$t+4$	12	0.275	0.212	0.0077	0.263
$t+5$	12	0.328	0.241	0.0099	0.317
$t+6$	12	0.386	0.259	0.0103	0.376
SPI-12μηνών, SPI-12					
$t+1$	10	0.0468	0.0811	0.0022	0.0435
$t+2$	11	0.0957	0.1096	0.0029	0.0895
$t+3$	11	0.1447	0.1341	0.0026	0.1366
$t+4$	11	0.2023	0.1519	0.0036	0.1931
$t+5$	11	0.2590	0.1639	0.0059	0.2499
$t+6$	11	0.3085	0.1816	0.0069	0.3011
SPI-24μηνών, SPI-24					
$t+1$	10	0.0336	0.0634	0.0007	0.0330
$t+2$	11	0.0608	0.0926	0.0015	0.0600
$t+3$	11	0.0912	0.1134	0.0022	0.0907
$t+4$	11	0.1231	0.1334	0.0029	0.1229
$t+5$	11	0.1500	0.1511	0.0027	0.1505
$t+6$	11	0.1790	0.1600	0.0042	0.1805

7.2. Εφαρμογή Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων

Η υλοποίηση των νευρωνικών δικτύων πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια του πακέτου Matlab Neural Network Toolbox. Το μητρώο εισόδου του Πίνακα 7.3 χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων. Η τοπολογία, γεωμετρία και αρχιτεκτονική των ΤΝΔ, που καθορίζει τον αριθμό βαρών σύνδεσης και πώς αυτοί τακτοποιούνται, εξαρτάται από τον αριθμό κρυμμένων επιπέδων και τον αριθμό κρυμμένων νευρώνων σε αυτά τα επίπεδα. Στην παρούσα διατριβή ένα και δύο κρυμμένα επίπεδα διευρύνθηκαν για τη βέλτιστη δομή των νευρωνικών δικτύων χρησιμοποιώντας όλα τα δεδομένα των σταθμών ανάπτυξης της περιόδου Οκτ. 1960 – Σεπ. 1992. Η βέλτιστη δομή των νευρωνικών δικτύων έγινε με τη μέθοδο δοκιμής και λάθους για το υπολογισμένο μέσο τετραγωνισμένο σφάλμα. Για την καλύτερη γενίκευση των ANNs, η τεχνική της Bayesian regularization και η τεχνική της γρήγορης διακοπής (early stopping) χρησιμοποιήθηκαν για σύγκριση των σταθμών γενίκευσης. Η εκπαίδευση των ANNs έγινε με τον αλγόριθμο προσαρμοσίμη μη μονότονη κλιμακωτή μέθοδο BFGS (Adaptive Self-scaling Nonmonotone BFGS, ASCNMBFGS) [Peng and Magoulas, 2007] και η αντικειμενική συνάρτηση βελτιστοποίησης ήταν το μέσο τετραγωνισμένο σφάλμα. Μόλις βρεθεί η βέλτιστη αρχιτεκτονική των νευρωνικών δικτύων, η τεχνική bagging [Breiman, 1996], εφαρμόζεται για τη βέλτιστη προσαρμογή της αρχιτεκτονικής των ANNs σε συνθετικά παραγόμενα δεδομένα των σταθμών ανάπτυξης για την περίοδο της εκπαίδευσης. Η τεχνική αυτή ακολουθήθηκε γιατί όπως έδειξε το M-test οι χρονοσειρές του SPI για κάθε σταθμό (350 δεδομένα) δεν επαρκούν για ένα αξιόπιστο προγνωστικό μοντέλο. Το Σχήμα 7.5 παρουσιάζει το M-test για τον σταθμό Αγιόφυλλος με ID_1 για το SPI-9 και SPI-24. Για όλες τις κλίμακες υπολογισμού το M-test έδειξε ότι γενικά απαιτούνται 10000 δεδομένα για αξιόπιστες χρονικές σημειακές προγνώσεις για κάθε σταθμό. Συνθετικά δεδομένα για κάθε σταθμό δημιουργήθηκαν με την τεχνική δειγματοληψίας bootstrap με αντικατάσταση (bootstrap resampling with replacement). Τριάντα (30) σετ δεδομένων (ensembles) σχηματίστηκαν από τυχαία επιλογή δειγμάτων με ίση πιθανότητα από την κατανομή της ιστορικής χρονοσειράς του SPI ($30 \times 350 = 10500$) και χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση της βέλτιστης αρχιτεκτονικής των ANNs. Η εφαρμογή της μεθοδολογίας αναλύεται στις επόμενες παραγράφους.

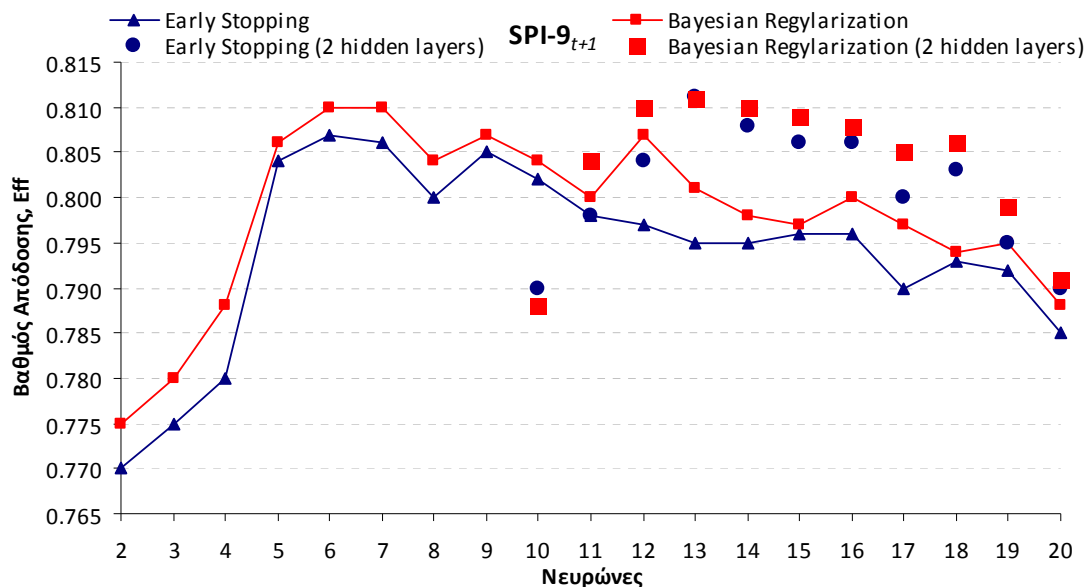


Σχήμα 7.5. Το M-test του σταθμού Αγιόφυλλος (ID_1) για τα χρονικά βήματα πρόγνωσης με όλα τα δεδομένα της χρονικής βελτιστοποίησης.

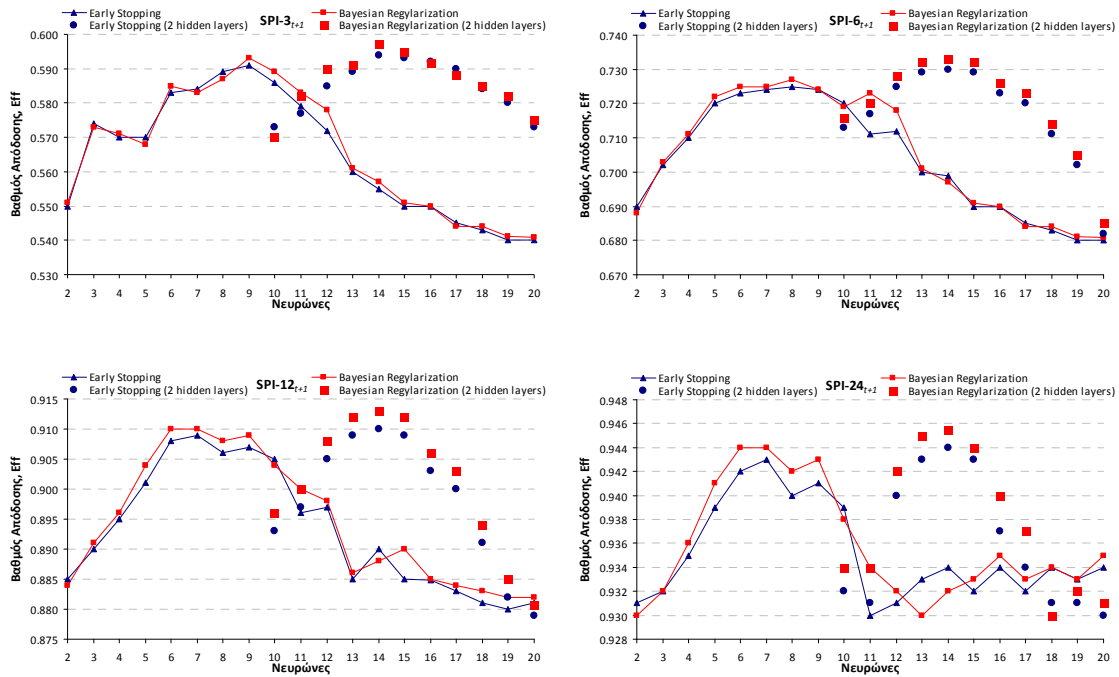
7.2.1. Γενίκευση μέσω της διαδικασίας εκπαίδευσης

Τα χρονικά δεδομένα των σταθμών ανάπτυξης (16800 δεδομένα) χωρίστηκαν τυχαία σε ποσοστό 60% και 40%. Έτσι δημιουργήθηκαν δύο σετ δεδομένων ένα σετ εκπαίδευσης (training set) και ένα σετ ελέγχου (testing set) για την διακρίβωση της δομής των αρχιτεκτονικών δικτύων στην πρόγνωση του χρονικού βήματος $t+1$. Τα νευρωνικά δίκτυα βελτιστοποιήθηκαν για το σετ εκπαίδευσης και δοκιμάστηκαν στο σετ ελέγχου. Ο βαθμός απόδοσης Eff χρησιμοποιήθηκε ως μέτρο αξιολόγησης του αρχικού πειράματος. Δύο τεχνικές γενίκευσης χρησιμοποιήθηκαν για την αναγνώριση της βέλτιστης δομής των κρυμμένων νευρώνων: η τεχνική early stopping (στο σετ ελέγχου) και η τεχνική Bayesian

regularization. Η εκπαίδευση των ANNs έγινε με τον αλγόριθμο BFGS και η αντικειμενική συνάρτηση βελτιστοποίησης ήταν η ελαχιστοποίηση του μέσου τετραγωνισμένου σφάλματος για τη τεχνική της γρήγορης διακοπής. Για την τεχνική της Bayesian regularization η συνάρτηση του μέσου τετραγωνισμένου σφάλματος τροποποιήθηκε προσθέτοντας έναν όρο E_w ίσο με το άθροισμα των τετραγώνων των συναπτικών βαρών των νευρώνων ώστε η αντικειμενική συνάρτηση να είναι $F_{BR} = \alpha * E_{MSE} + \beta E_w$, όπου α και β οι παράμετροι που βελτιστοποιούνται στο Bayesian πλαίσιο του Mackay [1992a,b]. Τα συναπτικά βάρη του δικτύου (weights + biases) θεωρούνται τυχαίες μεταβλητές που ακολουθούν κανονικές κατανομές και οι παράμετροι συνδέονται με τις άγνωστες διασπορές (διακυμάνσεις) που σχετίζονται με τις κατανομές. Η διαδικασία αυτή μειώνει την πιθανότητα μεγάλων διακυμάνσεων στην απόκριση των ANNs σε δεδομένα εισόδου με ακραίες τιμές. Το Σχήμα 7.6 παρουσιάζει το βαθμό απόδοσης Eff για το SPI-9_{t+1}. Από το σχήμα φαίνεται ότι η τεχνική Bayesian regularization δίνει καλύτερα αποτελέσματα στο σετ ελέγχου άρα εμφανίζει καλύτερες ικανότητες γενίκευσης. Γενικά η απόδοση των νευρωνικών δικτύων εμφανίζεται ικανοποιητική για 5 έως 9 κρυμμένους νευρώνες και μειώνεται ελαφρώς μετά από 10 νευρώνες κοντά στη βέλτιστη τους τιμή (Σχήμα 7.6). Για το λόγο αυτό, δύο κρυμμένα επίπεδα μελετήθηκαν για νευρώνες μεγαλύτερους από 10. Στο πρώτο κρυμμένο επίπεδο δοκιμάστηκαν νευρώνες με αριθμό μεγαλύτερο των πέντε νευρώνων και στο δεύτερο επίπεδο κρατήθηκαν σταθεροί και ίσοι με πέντε νευρώνες αφού αρχικοί πειραματισμοί με τον αριθμό των νευρώνων του δεύτερου κρυμμένου επιπέδου δεν βελτίωσαν την απόδοση των νευρωνικών δικτύων για αριθμό νευρώνων μεγαλύτερο του πέντε. Το Σχήμα 7.6 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των δύο τεχνικών γενίκευσης και για τα νευρωνικά δίκτυα με δύο κρυμμένα επίπεδα και συνολικό αριθμό νευρώνων (π.χ. 13 νευρώνες = 8 νευρώνες στο πρώτο επίπεδο και 5 σταθεροί νευρώνες στο δεύτερο επίπεδο). Παρόμοια αποτελέσματα παρουσιάζονται και για τις άλλες χρονικές κλίμακες του SPI για χρονικό βήμα πρόγνωσης t+1 (Σχήμα 7.7). Από τα παραπάνω φαίνεται ότι η χρήση των δύο κρυμμένων επιπέδων με εννέα νευρώνες στο πρώτο επίπεδο και πέντε νευρώνες στο δεύτερο επίπεδο σε συνδυασμό με την τεχνική Bayesian regularization βελτιώνει την πρόγνωση του SPI και αυτή η τοπολογία εφαρμόστηκε για όλες τις χρονικές κλίμακες του SPI και τα χρονικά βήματα πρόγνωσης.



Σχήμα 7.6. Βαθμός απόδοσης Eff για το σετ ελέγχου των δύο τεχνικών γενίκευσης για ένα και δύο κρυμμένα επίπεδα και συνολικό αριθμό νευρώνων του SPI-9_{t+1}.



Σχήμα 7.7. Βαθμός απόδοσης Eff για το σετ ελέγχου των δύο τεχνικών γενίκευσης για ένα και δύο κρυμμένα επίπεδα και συνολικό αριθμό νευρώνων για χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$.

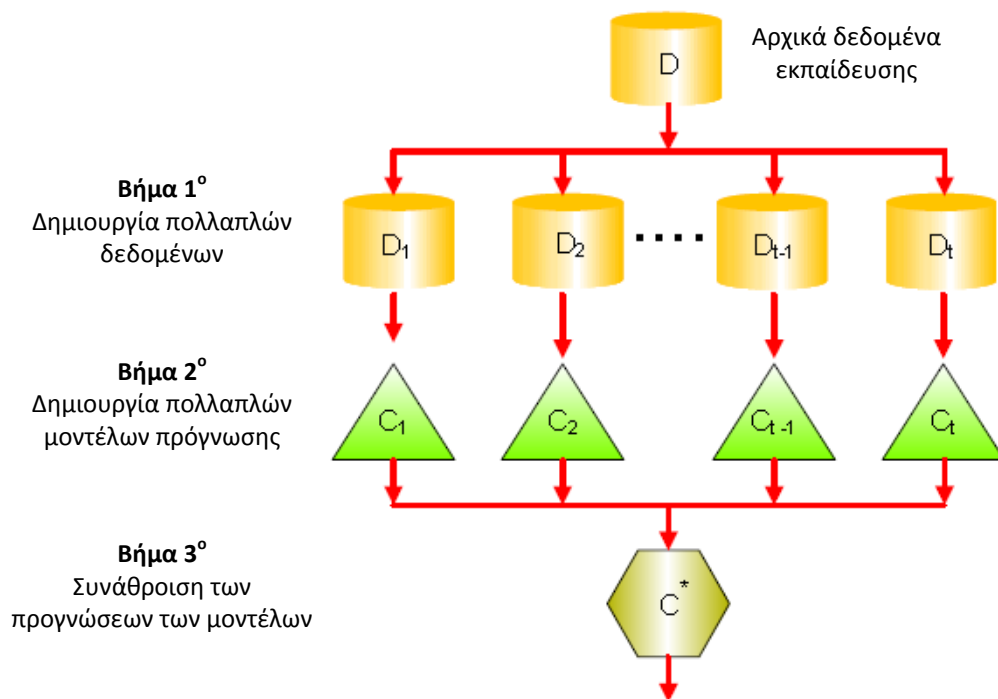
7.2.2. Γενίκευση μέσω δειγματοληψίας των δεδομένων εισόδου

Εκτός των τεχνικών γενίκευσης μέσω της διαδικασίας εκπαίδευσης υπάρχουν και άλλες τεχνικές που σχετίζονται με τα δεδομένα εισόδου. Οι *μετα-μαθησιακοί αλγόριθμοι* (meta-classifiers) βασίζονται στη θεμελιώδη ιδέα ότι μπορεί να δημιουργηθεί ένα μοντέλο με τεχνικές μηχανικής μάθησης, που να εμπεριέχει πολλά επιμέρους μοντέλα. Η πρόβλεψη της κλάσης ενός νέου στιγμιότυπου γίνεται με τη “συνάθροιση” των προβλέψεων των επιμέρους αλγορίθμων σε πολλαπλά σύνολα δεδομένων (Σχήμα 7.8). Λόγω της επαναληπτικής διαδικασίας δημιουργίας μοντέλων με διαφορετικές προσεγγίσεις, είναι δυνατό να βελτιώνεται η προβλεπτική ικανότητα του τελικού μοντέλου, ωστόσο τα εξαγόμενα δεδομένα είναι δύσκολο να αναλυθούν.

Οι αλγόριθμοι μπορούν να συνδυαστούν ακολουθώντας μια από τις ακόλουθες μεθόδους:

- **Εμφύλιασμα (Bagging):** δίνεται ένα σετ δεδομένων S με γνωρίσματα s , και σε κάθε επανάληψη i δημιουργείται ένα σετ εκπαίδευσης S_i , σύμφωνα με τη μέθοδο της δειγματοληψίας με επανατοποθέτηση. Έπειτα, δημιουργείται ένα μοντέλο M_i με βάση κάθε ένα από τα σύνολα εκπαίδευσης S_i . Για να γίνει πρόγνωση ενός άγνωστου στιγμιότυπου X , το κάθε μοντέλο M_i επιστρέφει το αποτέλεσμα του. Στη συνέχεια, το εμφωλευμένο μοντέλο M^* το μοντέλο M^* δίνει ως αποτέλεσμα το μέσο όρο των τιμών όλων των προβλέψεων για προβλήματα πρόγνωσης ή παλινδρόμησης αριθμητικών τιμών ή μετρά τις αναθέσεις σε κάθε κλάση των επιμέρους ταξινομητών, και δίνει αυτή με τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης για προβλήματα ταξινόμησης.
- **Ενδυνάμωση (Boosting):** δίνεται ένα σύνολο δεδομένων S με γνωρίσματα s , στα οποία αναθέτονται αρχικά βάρη. Μια σειρά από k αλγορίθμους προχωρά στην επαναληπτική εκπαίδευση και τη δημιουργία μοντέλου M_i , τα βάρη του οποίου ανανεώνονται κάθε φορά, ώστε το επόμενο μοντέλο M_{i+1} που θα εκπαιδευτεί, να δώσει μεγαλύτερη βαρύτητα σε εκείνα τα υποσύνολα που

είχαν την μικρότερη ακρίβεια πρόγνωσης από το M_i . Το τελικό μοντέλο M^* συνδυάζει τα αποτελέσματα των μεμονωμένων μοντέλων, σταθμίζοντας τους συναρτήσει της ακρίβειας τους.



Σχήμα 7.8. Αναπαράσταση της γενικής μεθοδολογίας των μετα-μαθησιακών αλγορίθμων.

Συγκρινόμενων των δύο μεθοδολογιών, η τεχνική της ενδυνάμωσης τείνει να επιτυγχάνει μεγαλύτερη ακρίβεια, αλλά ενέχει και μεγαλύτερο ρίσκο στο να οδηγηθεί σε υπερπροσαρμογή του τελικού μοντέλου εκπαίδευσης στο σύνολο των δεδομένων. Προηγούμενες αναλύσεις μέσω του μη γραμμικού Gamma test έδειξαν ότι το πλήθος των χρονικών δεδομένων για κάθε σταθμό δεν είναι αρκετό ώστε να υπάρξει ένα αξιόπιστο μοντέλο για κάθε σταθμό. Μία τεχνική γενίκευσης μέσω δειγματοληψίας που ικανοποιεί και την παραπάνω διαπίστωση είναι η τεχνική bagging [Breiman, 1996]. Τριάντα (30) σετ δεδομένων (ensembles) δημιουργήθηκαν για κάθε σταθμό από την χρονοσειρά της περιόδου Οκτ. 1960 – Σεπ. 1992 με την τεχνική bootstrap resampling with replacement. Κάθε ένα από τα παραγόμενα σετ εκπαίδευσης, χρησιμοποιήθηκε στην εκπαίδευση των βέλτιστων τεχνητών νευρωνικών δικτύων που αναγνωρίστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Έτσι μία ομάδα (pool) μοντέλων δημιουργήθηκε και ένας βέλτιστος ολικός προγνώστης υπολογίστηκε από τη μέση τιμή των υπολογισμένων τιμών των μοντέλων. Η βελτιστοποίηση των νευρωνικών δικτύων έγινε και πάλι για το σετ εκπαίδευσης (60% της περιόδου Οκτ. 1962 - Σεπ. 1992) με τη τεχνική Bayesian regularization και η αξιολόγηση για το σετ πιστοποίησης (40% της περιόδου ανάπτυξης) για το χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$. Ο βαθμός απόδοσης Eff χρησιμοποιήθηκε ως μέτρο αξιολόγησης της γενίκευσης μέσω δειγματοληψίας των δεδομένων εισόδου. Η ίδια τεχνική εφαρμόστηκε και για την τεχνική της γρήγορης διακοπής στο τεστ ελέγχου ώστε να αξιολογηθούν και οι δυο τεχνικές γενίκευσης μέσω εκπαίδευσης και ταυτόχρονης δειγματοληψίας. Τα αποτελέσματα της τεχνικής γενίκευσης bagging για το στατιστικό κριτήριο Eff παρουσιάζονται στο Πίνακα 7.4 για όλες τις χρονικές κλίμακες του SPI και χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$. Στον ίδιο Πίνακα παρουσιάζονται επίσης οι τιμές του βαθμού απόδοσης Eff για τις τεχνικές γενίκευσης μέσω εκπαίδευσης. Η τεχνική γενίκευσης μέσω δειγματοληψίας γενικά βελτιώνει τις προγνώσεις για το χρονικό βήμα $t+1$ για όλες τις χρονικές κλίμακες του SPI. Ο βέλτιστος συνδυασμός τεχνικών γενίκευσης είναι ο συνδυασμός της Bayesian Regularization με την τεχνική Bagging.

Πίνακας 7.4. Βαθμός απόδοσης Eff τεχνικών γενίκευσης εκπαίδευσης και δειγματοληψίας του σετ ελέγχου της περιόδου ανάπτυξης για τους 48 σταθμούς ανάπτυξης στο χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$

Χρονική κλίμακα SPI	Early Stopping	Bayesian Regularization	Early Stopping + Bagging	Bayesian Regularization + Bagging
SPI-3	0.594	0.597	0.613	0.615
SPI-6	0.729	0.733	0.777	0.783
SPI-9	0.811	0.811	0.862	0.870
SPI-12	0.910	0.913	0.921	0.923
SPI-24	0.944	0.945	0.949	0.949

7.2.3. Εφαρμογή νευρωνικών δικτύων

Τα βέλτιστα νευρωνικά δίκτυα που προέκυψαν εφαρμόστηκαν για όλη την χρονική περίοδο εκπαίδευσης των νευρωνικών δικτύων των σταθμών ανάπτυξης που είναι η περίοδος Οκτ 1960 έως Σεπ 1992 και πιστοποιήθηκαν χρονικά για την περίοδο Οκτ 1992 – Σεπ 2002 για τους σταθμούς ανάπτυξης και για τους 18 ανεξάρτητους σταθμούς πιστοποίησης για την περίοδο Οκτ. 1960 – Σεπ 2002. Υπενθυμίζεται ότι στο τελικό στάδιο εφαρμογής δεν χρησιμοποιήθηκε τεστ ελέγχου. Όλα τα δεδομένα των 48 σταθμών ανάπτυξης της περιόδου Οκτ 1960 έως Σεπ 1992 αποτέλεσαν το σετ εκπαίδευσης των νευρωνικών δικτύων. Η βελτιστοποίηση έγινε και πάλι με τον αλγόριθμο BFGS και η γενίκευση έγινε με την συνδυασμένη τεχνική της Bayesian regularization και Bagging. Η δομή του μητρώου εισόδου είναι ο Πίνακας 7.3 και η βέλτιστη αρχιτεκτονική που αναγνωρίστηκε προηγουμένως χρησιμοποιήθηκε για το χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$ για όλες τις χρονικές κλίμακες του SPI. Για τη διαδικασία βελτιστοποίησης αφού δεν υπήρχε τεστ ελέγχου η τιμή της στατιστικής παραμέτρου Gamma (Γ) χρησιμοποιήθηκε ως κριτήριο τερματισμού. Σε περίπτωση που η θεωρητική τιμή του Γ στατιστικού είναι πολύ μικρότερη από το υπολογιζόμενο MSE, τότε η διαδικασία τερματίζεται μετά από 1000 κύκλους (epochs). Σημειώνεται ότι στην παράγραφο 7.7.2 η βελτιστοποίηση τερματίζεται μετά από 150-200 κύκλους και σχεδόν συγκλίνει μετά από 50 κύκλους.

Δύο μεθοδολογίες εφαρμόστηκαν για πολλαπλά χρονικά βήματα πρόγνωσης μεγαλύτερα του $t+1$. Η πρώτη μεθοδολογία καλείται ευθεία πρόγνωση (Direct Artificial Neural Networks, DANN) ή ανεξάρτητη μέθοδος πρόγνωσης (independent multi step forecasting) πολλαπλών χρονικών βημάτων [Kline, 2004]. Προϋποθέτει την ανάπτυξη μοντέλων για ξεχωριστά βήματα πρόγνωσης. Έτσι, αναπτύχθηκαν έξι (6) μοντέλα για πρόγνωση μέχρι έξι μηνιαίων χρονικών βημάτων ($t+1$ έως $t+6$) για κάθε μία χρονική κλίμακα του SPI (π.χ για το SPI-6 αναπτύχθηκαν έξι μοντέλα πρόγνωσης για χρονικά βήματα πρόγνωσης έως έξι μήνες). Η δεύτερη προσέγγιση για την πρόγνωση πολλαπλών χρονικών βημάτων με νευρωνικά δίκτυα καλείται επαναληπτική (iterative ή recursive) πρόγνωση (Iterative or Recursive Artificial Neural Networks, RANN). Η επαναληπτική πρόγνωση χρησιμοποιείται όπως τα Box-Jenkins μοντέλα στα οποία οι προγνώσεις των μοντέλων εισέρχονται στο σύστημα ως δεδομένα εισόδου για τις προγνώσεις των επόμενων χρονικών βημάτων. Έχοντας εκπαιδεύσει το νευρωνικό δίκτυο για πρόγνωση $t+1$, και ζητείται η πρόγνωση για $t+6$, η διαδικασία γίνεται ως εξής. Η πρόβλεψη t ενσωματώνεται στα δεδομένα εισόδου και τροφοδοτεί το νευρώνα εισόδου με την τιμή της χρονοσειράς στο χρονικό βήμα $t+1$ για δημιουργηθεί η πρόγνωση στο επόμενο χρονικό βήμα $t+2$. Στη συνέχεια η είσοδος του δικτύου τροφοδοτείται και με την πρόγνωση του χρονικού βήματος $t+2$, οπότε προκύπτει η πρόγνωση για το χρονικό βήμα $t+3$. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται συνεχώς, μέχρι να παραχθεί η επιθυμητή πρόγνωση για το χρονικό βήμα $t+6$. Η αρχιτεκτονική των νευρωνικών δικτύων ήταν σταθερή για την τεχνική RANN και ίδια με την αρχιτεκτονική του χρονικού βήματος πρόγνωσης $t+1$. Για χρονικά βήματα μεγαλύτερα από $t+1$ η βέλτιστη δομή των νευρωνικών δικτύων της τεχνικής DANN διερευνήθηκε μόνο για δύο κρυμμένα επίπεδα και νευρώνες από 5-15 στο πρώτο επίπεδο και 5 νευρώνες στο δεύτερο επίπεδο. Όπως και για το χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$ έτσι και για τα άλλα βήματα πρόγνωσης η βέλτιστη δομή των DANN βρίσκεται μεταξύ των 6-10 νευρώνες στο πρώτο επίπεδο.

Η αξιολόγηση των δύο τεχνικών βασίστηκε σε ποσοτικά κριτήρια πρόγνωσης όπως είναι τα στατιστικά κριτήρια RMSE, R, MAE, και Eff, που είναι και τα συνηθέστερα στατιστικά κριτήρια για προβλήματα πρόγνωσης. Επίσης η αξιολόγηση των δύο τεχνικών (DANN, RANN) γίνεται και με την σύγκριση ενός αλγορίθμου αναφοράς: το μοντέλο εμμονής (Persistence model). Τέλος, ποιοτικά κριτήρια εκτίμησης της πρόγνωσης υπολογίστηκαν με βάση την ύπαρξη ή μη-ύπαρξη ξηρασίας ($SPI \leq -1$). Η απόδοση ενός μοντέλου πρόβλεψης της ξηρασίας μπορεί να κριθεί από το ποσοστό των επεισοδίων που θα προβλεφθούν σωστά από το μοντέλο, σε αντιδιαστολή με το ποσοστό των ψεύτικων-λανθασμένων συναγερμών (δηλ. προβλέψεις επεισοδίων ξηρασίας που δεν συνέβησαν στην πραγματικότητα). Για τη δημιουργία των ποιοτικών κριτηρίων απαιτείται ένας πίνακας αξιολόγησης των αποτελεσμάτων (contingency table) που δείχνει τη συχνότητα των σωστών και λανθασμένων προγνώσεων και των πραγματικών συμβάντων ξηρασίας (Πίνακας 7.5). Ο πίνακας αυτός είναι πολύ χρήσιμος για τη διαπίστωση των σφαλμάτων που δημιουργούν τα προγνωστικά μοντέλα. Ένα τέλειο προγνωστικό μοντέλο θα παράγει μόνο επιτυχίες και σωστά μη-επεισόδια ξηρασίας χωρίς αστοχίες ή λανθασμένους συναγερμούς [Jolliffe and Stephenson, 2003].

Πίνακας 7.5. Ποιοτικός πίνακας αξιολόγησης πρόγνωσης συμβάντων ξηρασίας ($SPI \leq -1$).

		Παρατηρούμενα συμβάντα ξηρασίας (observed)		
		ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΣΥΝΟΛΙΚΑ
Πρόγνωση συμβάντων ξηρασίας (forecast)	ΝΑΙ	Επιτυχίες = A (hits)	Λανθασμένοι συναγερμοί = C (false alarms)	forecast NAI = (A+C)
	ΟΧΙ	Αστοχίες = B (misses)	Σωστά μη-επεισόδια ξηρασίας = D (correct negatives)	forecast OXI = (B+D)
ΣΥΝΟΛΙΚΑ		Παρατηρούμενα επεισόδια ξηρασίας = (A+B) (observed NAI)	Μη παρατηρούμενα επεισόδια ξηρασίας = (C+D) (observed OXI)	ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΩΝ, $N = (A+B+C+D)$

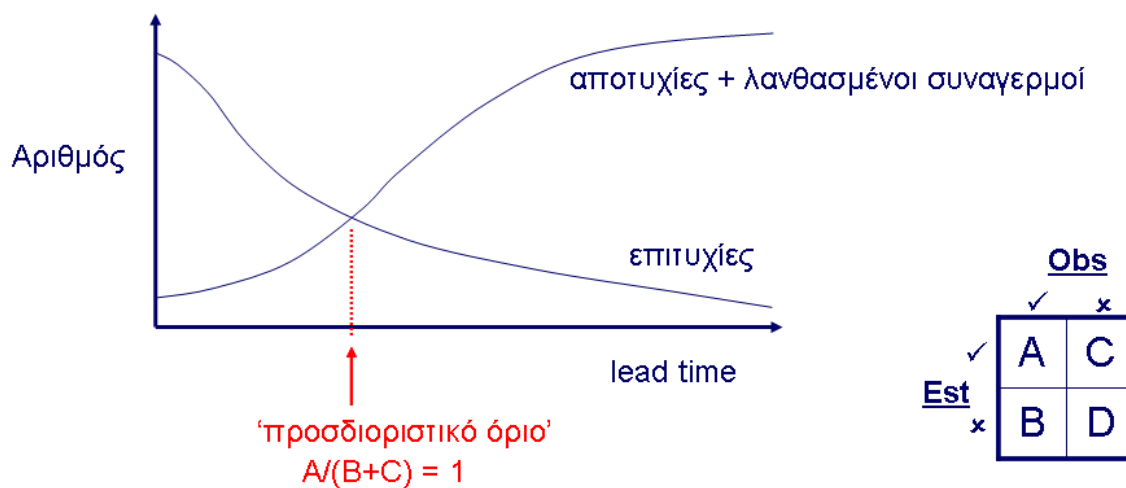
Ένας μεγάλος αριθμός κατηγοριοποιημένων ποιοτικών στατιστικών μπορεί να δημιουργηθεί από τα στοιχεία του Πίνακα 7.5 για την αξιολόγηση των προγνώσεων με βάση τα στοιχεία A: τον αριθμό των περιπτώσεων όπου ένα επεισόδιο **πραγματοποιήθηκε** και **προβλέφθηκε**, B: το σύνολο των περιπτώσεων όπου ένα επεισόδιο **πραγματοποιήθηκε** αλλά **δεν προβλέφθηκε**, C: τον αριθμό των περιπτώσεων όπου ένα επεισόδιο **προβλέφθηκε** αλλά **δεν πραγματοποιήθηκε** και D: αριθμό των περιπτώσεων όπου ένα επεισόδιο ξηρασίας **δεν πραγματοποιήθηκε** και **δεν προβλέφθηκε**. Με άλλα λόγια, η παράμετρος A είναι ο αριθμός των σωστών προβλέψεων των επεισοδίων ξηρασίας, ενώ η παράμετρος C των λανθασμένων προβλέψεων. Τα κυριότερα ποιοτικά στατιστικά κριτήρια που υπολογίστηκαν είναι τα ακόλουθα [von Storch and Zwiers, 1999; Wilks, 2005]:

- **Ακρίβεια πρόγνωσης (Accuracy ή fraction correct)** $= \frac{A+D}{N}$. Έχει εύρος από 0 έως 1 (τέλειο σκορ) και δίνει απάντηση για το ποσοστό των σωστών προβλέψεων, επηρεάζεται όμως από την πιο συχνή κατηγορία που είναι η μη-ύπαρξη ξηρασίας.
- **Bias score (frequency bias), BIAS** $= \frac{A+C}{A+B}$. Μετράει την αναλογία των επεισοδίων ξηρασίας των προγνώσεων με τα παρατηρούμενα επεισόδια ξηρασίας. Δείχνει αν το σύστημα έχει την τάση να υποεκτιμά ($BIAS < 1$) ή υπερεκτιμά ($BIAS > 1$) τα επεισόδια ξηρασίας. Έχει εύρος από 0 - ∞ και τέλειο σκορ ίσο με 1. Μετράει μόνο σχετικές συχνότητες και δεν μετράει πόσο καλά οι προγνώσεις ανταποκρίνονται με τις παρατηρούμενες τιμές.

- Πιθανότητα ανίχνευσης επεισοδίων ξηρασίας (Probability of detection ή hit rate) $POD = \frac{A}{A+B}$, αναλογία λανθασμένων συναγερμών (False alarm ratio) $FAR = \frac{C}{A+C}$, και πιθανότητα λανθασμένης ανίχνευσης (Probability of false detection ή false alarm rate) $POFD = \frac{C}{D+C}$. Και τα τρία αυτά κριτήρια έχουν εύρος από 0 έως 1 και βέλτιστη τιμή 0. Απαντούν τα ερωτήματα ποιο ποσοστό των παρατηρούμενων επεισοδίων ξηρασίας προβλέφθηκαν σωστά (POD), ποιο ποσοστό των υπολογισμένων επεισοδίων δεν προβλέφτηκε σωστά (FAR) και ποιο ποσοστό των παρατηρούμενων μη-επεισοδίων ξηρασίας προβλέφθηκαν λανθασμένα ως επεισόδια ξηρασίας (POFD).
- Δείκτης Κρίσιμης Επιτυχίας (Critical Success Index ή Threat Score), $CSI = \frac{A}{A+B+C}$. Ο δείκτης CSI χρησιμοποιείται για να υποδείξει την αξία, τη σημαντικότητα των προειδοποιήσεων ενός συστήματος πρόβλεψης καταστάσεων. Ο δείκτης CSI αρχικά χρησιμοποιήθηκε το 1982 από την Εθνική Υπηρεσία Καιρού (National Weather Service) των ΗΠΑ, ως ένας δείκτης ποιότητας των προβλέψεων σφοδρών καταιγίδων, ενώ μέχρι σήμερα έχει υιοθετηθεί για την αξιολόγηση πλήθους διαφορετικών προβλεπτικών υπολογιστικών συστημάτων. Ο μαθηματικός τύπος στον οποίο στηρίζεται, ουσιαστικά υποστηρίζει ότι όταν ένα επεισόδιο δεν συμβαίνει αλλά ούτε προβλέπεται λάθος από το σύστημα ότι θα συμβεί, τότε δεν έχει καμία αρνητική συνέπεια στην αποτελεσματικότητα του μοντέλου πρόβλεψης [Schaefer 1990]. Ο δείκτης CSI θεωρείται μέτρο της ακρίβειας και της αξιοπιστίας ενός μοντέλου πρόβλεψης, η ικανότητα του οποίου εξαρτάται από δύο παράγοντες: (1) τη δυνατότητα του αλγορίθμου να εκτιμά το επίπεδο εμπιστοσύνης στο οποίο ένα δεδομένο επεισόδιο θα συμβεί, και (2) τη στρατηγική επιλογή του ορίου συναγερμού (warning threshold), έτσι ώστε η τιμή του CSI να έχει μεγαλύτερη πιθανότητα να μεγιστοποιηθεί. Έχει εύρος από 0 (καμία επιτυχία) έως 1 που είναι και το βέλτιστο σκορ.
- Hanssen and Kuipers discriminant ή true skill statistic ή Peirces's skill score, $HK = \frac{A}{A+B} - \frac{C}{C+D}$. Απαντά στην ερώτηση πόσο καλά το προγνωστικό μοντέλο ξεχωρίζει τα γεγονότα ξηρασίας από τα μη γεγονότα ξηρασίας. Χρησιμοποιεί όλα τα στοιχεία του πίνακα αξιολόγησης και μπορεί να θεωρηθεί ως ακρίβεια πρόγνωσης επεισοδίων ξηρασίας + ακρίβεια πρόγνωσης μη επεισοδίων - 1. Έχει εύρος από -1 έως 1 και για τιμή=0 το μοντέλο θεωρείται ότι δεν έχει καμία ικανότητα πρόγνωσης και βέλτιστη τιμή=1.
- Odds ratio, $OR = \frac{A * D}{B * C} = \frac{\left(\frac{POD}{1-POD}\right)}{\left(\frac{POFD}{1-POFD}\right)}$. Απαντά στην ερώτηση ποια είναι η αναλογία της πιθανότητας μία πρόγνωση ξηρασίας να είναι σωστή σε σχέση με την πιθανότητα πρόγνωσης λανθασμένου επεισοδίου ξηρασίας. Παρουσιάζει εύρος από 0 - ∞ και για τιμή=1 το προγνωστικό μοντέλο θεωρείται ότι δεν έχει ικανότητα πρόγνωσης.

Πρόσφατα, ο Hewson [2007] πρότεινε την ιδέα του προσδιοριστικού ορίου (deterministic limit) για την πρόγνωση ενός ακραίου μετεωρολογικού φαινομένου (όπως είναι η ξηρασία). Ένας απλός ορισμός για το προσδιοριστικό όριο είναι απλά το χρονικό σημείο πρόγνωσης (lead time) μετά το οποίο οι προγνώσεις είναι πιθανόν να είναι λανθασμένες παρά σωστές. Αυτό το χρονικό σημείο πρόγνωσης μπορεί να παρέχει πληροφορίες σχετικά με τη μεθοδολογία πρόγνωσης που ακολουθείται και να δίνει

οδηγίες για το πότε πιθανοθεωρητική (probabilistic) προσέγγιση πρέπει να ακολουθείται και πότε προσδιοριστική (deterministic). Επίσης, για μελέτη ακραίων φαινομένων οι σωστές μη-επιτυχίες πρόγνωσης (Αριθμός D στο πίνακα ποιοτικής αξιολόγησης ακραίων φαινομένων) πρέπει να αγνοούνται. Το προσδιοριστικό όριο είναι απλά το χρονικό διάστημα πρόγνωσης στο οποίο ο αριθμός των επιτυχιών είναι ίσος με το άθροισμα των αποχιών και των λανθασμένων συναγερμών που προκύπτει από τον πίνακα ποιοτικής αξιολόγησης ακραίων φυσικών φαινομένων (contingency table) (Σχήμα 7.9) ή αλλιώς όταν ο δείκτης κρίσιμης επιτυχίας CSI ισούται με 0.5 (CSI=0.5). Έτσι όταν ο δείκτης CSI είναι μεγαλύτερος ή ίσος του 0.5 τότε τα προσδιοριστικά μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολύ αξιόπιστα. Η απόδειξη του προσδιοριστικού ορίου για σε ένα ιδεατό και αμερόληπτο (unbiased) μοντέλο πρόγνωσης όπου παρουσιάζει μόνο επιτυχίες και καθόλου αποτυχίες και λανθασμένους συναγερμούς (B αποτυχίες = C λανθασμένοι συναγερμοί) οδηγεί σε ένα επιπλέον κριτήριο πρόγνωσης. Το προσδιοριστικό όριο $A/(B+C) = 1$, γίνεται $A = 2B$ για το αξιόπιστο και αμερόληπτο μοντέλο πρόγνωσης. Ισχύει όμως ότι ο αριθμός των παρατηρούμενων επεισοδίων ξηρασίας είναι $O = A+B \rightarrow O = 3B = 3A/2$. Άρα το προσδιοριστικό όριο για μία αμερόληπτη πρόγνωση φτάνεται όταν ο αριθμός των επιτυχιών A πέφτει στα 2/3 των παρατηρημένων επεισοδίων ξηρασίας.



Σχήμα 7.9. Το προσδιοριστικό όριο πρόγνωσης ενός ακραίου μετεωρολογικού φαινομένου [Hewson, 2007].

Τέλος, όλα τα στατιστικά κριτήρια (ποσοτικά και ποιοτικά) υπολογίστηκαν επίσης και για τη μέθοδο αναφοράς. Ιδιαίτερα για το μοντέλο εμμονής έγινε και σύγκριση των αποτελεσμάτων των μεθοδολογιών DANN και RANN για πολλαπλά χρονικά βήματα με το στατιστικό κριτήριο ικανότητας πρόγνωσης Skill Score το οποίο συγκρίνει ένα στατιστικό κριτήριο (ποσοτικό ή ποιοτικό) με το αντίστοιχο κριτήριο για το μοντέλο αναφοράς (π.χ. του μοντέλου εμμονής=persistence ή του μέσου όρου=climatology) και δίνεται από τον τύπο:
$$\text{Skill Score} = \frac{\text{score}_{\text{forecast}} - \text{score}_{\text{reference}}}{\text{score}_{\text{perfectforecast}} - \text{score}_{\text{reference}}}$$
. Έτσι

παρέχει την πληροφορία για την αξία της πρόγνωσης σε σχέση με το μοντέλο αναφοράς. Το κατώτατο όριο του Skill Score έχει σχέση με το στατιστικό κριτήριο που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της ικανότητας πρόγνωσης και τη μέθοδο αναφοράς, αλλά το ανώτατο όριο είναι πάντα η τιμή 1. Η τιμή του Skill Score =0 δείχνει ότι το μοντέλο πρόγνωσης δεν παρουσιάζει καμία βελτίωση σε σχέση με το μοντέλο αναφοράς. Όπως γίνεται αντιληπτό, για τιμές μεγαλύτερες του 0 το μοντέλο πρόγνωσης παρουσιάζει βελτίωση σε σχέση με το μοντέλο αναφοράς. Όταν το στατιστικό κριτήριο που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του Skill Score είναι το MSE τότε λέγεται και κριτήριο μείωσης της διασποράς (reduction of variance). Στην παρούσα διατριβή το Skill Score υπολογίστηκε για το μέσο τετραγωνισμένο σφάλμα MSE.

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της χωροχρονικής πρόγνωσης γίνεται πρώτα για τη χρονική κλίμακα του SPI-3μηνών και μετά ακολουθούν τα αποτελέσματα για όλες τις άλλες χρονικές κλίμακες του SPI (SPI-6, SPI-9, SPI-12 και SPI-24). Στην αρχή παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας DANN για το χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$ και μετά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για χρονικά βήματα πρόγνωσης μεγαλύτερα από ένα μήνα για τις δύο τεχνικές DANN και RANN. Υπενθυμίζεται ότι για το χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$ μόνο η μέθοδος DANN εφαρμόζεται για τον SPI. Σε όλα τα χρονικά βήματα πρόγνωσης παρουσιάζονται πρώτα τα ποσοτικά στατιστικά κριτήρια της πρόγνωσης, μετά τα αντίστοιχα ποιοτικά κριτήρια και ακολουθούν οι αλγόριθμοι αναφοράς. Λόγω του μεγάλου όγκου των σταθμών ανάπτυξης και πιστοποίησης, επιλέχθηκαν ενδεικτικοί σταθμοί για την παρουσίαση των χρονικών προγνώσεων, και ενδεικτικά χρονικά βήματα πρόγνωσης για ένα έως έξι μήνες μπροστά. Ο σχολιασμός γίνεται σε σχέση με το μοντέλο εμμονής και η επιλογή του χρονικού βήματος πρόγνωσης για επιχειρησιακή χρήση βασίζεται στο δείκτη κρίσιμης επιτυχίας CSI.

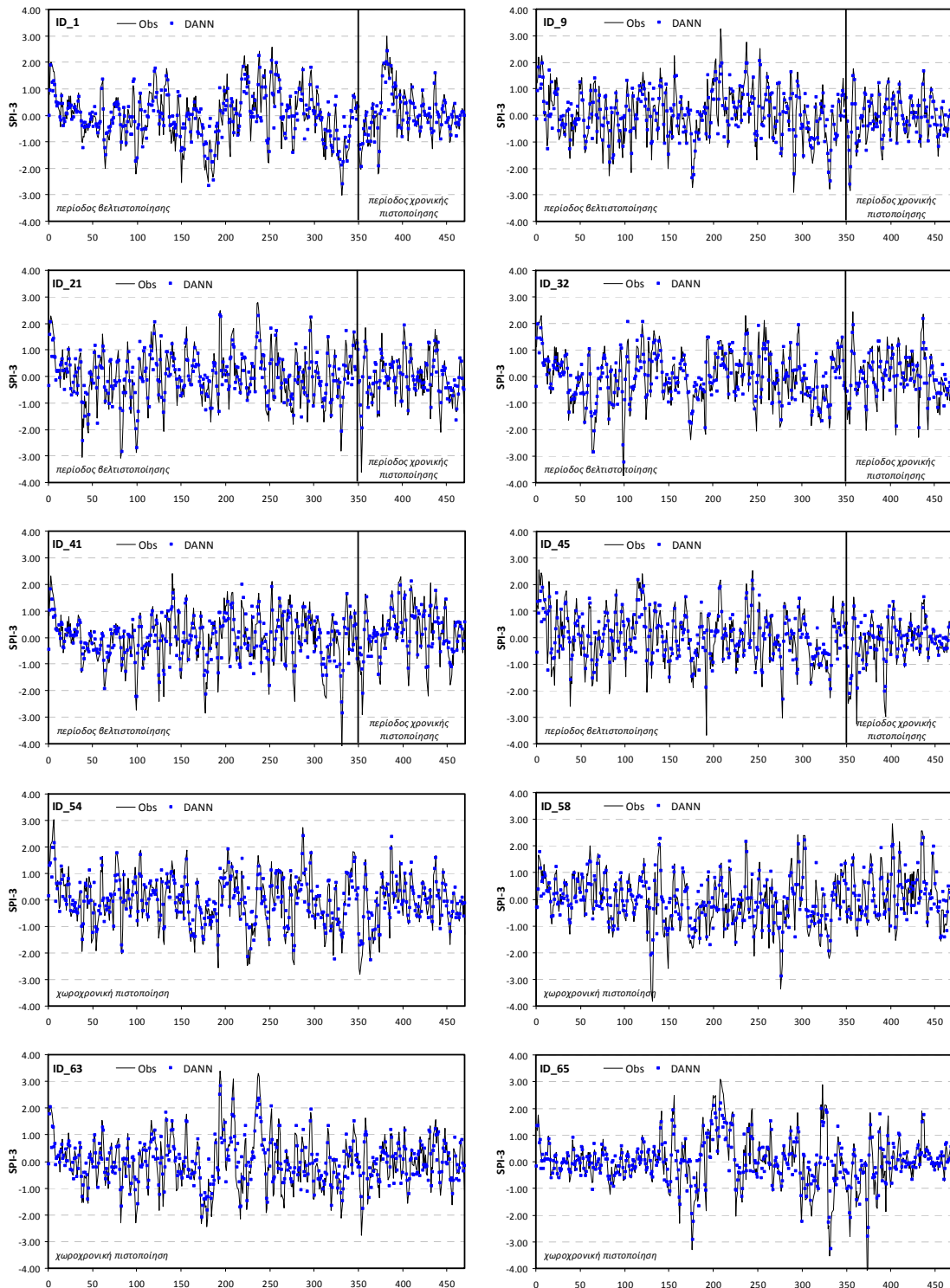
7.3. Χρονική πρόγνωση SPI-3μηνών

Οι χρονικές μεθοδολογίες πρόγνωσης DANN και RANN εφαρμόστηκαν για βραχυπρόθεσμες (1-2 μήνες μπροστά) και μεσοπρόθεσμες προγνώσεις (3-6 μήνες μπροστά) του SPI-3. Λόγω του μεγάλου πλήθους των αποτελεσμάτων τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικά για χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$ και περιληπτικά για τα υπόλοιπα βήματα πρόγνωσης. Τα αποτελέσματα για μεγαλύτερα βήματα πρόγνωσης παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα Ι.

7.3.1. Χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$, SPI-3 _{$t+1$}

Ο Πίνακας 7.6 παρουσιάζει τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των στατιστικών παραμέτρων της πρόγνωσης του SPI-3 για χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$ για την περίοδο βελτιστοποίησης και χρονικής πιστοποίησης των σταθμών ανάπτυξης, και τη χωροχρονική περίοδο των σταθμών πιστοποίησης. Στον ίδιο πίνακα, παρουσιάζονται τα στατιστικά κριτήρια για το μοντέλο εμμονής (Persistence model). Όπως φαίνεται από τον παρακάτω Πίνακα, η μέθοδος DANN βελτιώνει κατά πολύ την πρόγνωση του SPI-3 για χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$ σε σχέση με την μέθοδο αναφοράς αφού παρουσιάζει μία αύξηση του βαθμού απόδοσης Eff κατά 60% περίπου. Όλες οι στατιστικές παράμετροι βελτιώνονται σημαντικά για τις τρεις περιόδους ελέγχου (εκπαίδευση, χρονική πιστοποίηση και χωροχρονική πιστοποίηση). Το Σχήμα 7.10 παρουσιάζει τις προγνώσεις του SPI-3 για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης και φαίνεται ότι το μοντέλο DANN κρίνεται ικανοποιητικό. Παρατηρείται όμως ότι το μοντέλο δεν μπορεί να προσομοιώσει αρκετά καλά κάποιες ακραίες τιμές του SPI και γενικά υποεκτιμά το εύρος του SPI αφού η τιμή της τυπικής απόκλισης των προβλέψεων είναι 0.8 και είναι μικρότερη της θεωρητικής τιμής (=1). Για την καλύτερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων πρόγνωσης υπολογίστηκε ο πίνακας ποιοτικής αξιολόγησης συμβάντων ξηρασίας με βάση τον Πίνακα 7.5. Τα στοιχεία του Πίνακα 7.5 παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.7 για τα μοντέλα DANN και Persistence. Με βάση τα στοιχεία του Πίνακα 7.7 υπολογίστηκαν τα ποιοτικά κριτήρια πρόγνωσης ξηρασίας για το SPI-3 _{$t+1$} και παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.8. Η υπεροχή της μεθόδου DANN που εμφανίζεται παραπάνω δεν είναι τόσο εμφανής αφού παρουσιάζει παραπλήσια ποιοτικά στατιστικά κριτήρια με το μοντέλο εμμονής. Μάλιστα σε κάποια κριτήρια η μέθοδος αναφοράς (Persistence) παρουσιάζεται καλύτερη (Bias, πιθανότητα ανίχνευσης επεισοδίων, και HK). Γενικά, όπως φαίνεται το δείκτη κρίσιμης επιτυχίας CSI οι δύο μέθοδοι έχουν περιορισμένη ακρίβεια πρόγνωσης επεισοδίων ξηρασίας ενώ η μέθοδος DANN υποεκτιμά τα επεισόδια ξηρασίας και δεν διακρίνει ξεκάθαρα τα επεισόδια ξηρασίας από τα μη-επεισόδια. Παρόλα αυτά όμως η αναλογία πιθανοτήτων OR για τη μέθοδο DANN δείχνει ότι οι

πιθανότητες πρόβλεψης μία πρόγνωση να είναι σωστή είναι τουλάχιστον 20 φορές μεγαλύτερη από την πιθανότητα να είναι λανθασμένη πρόγνωση. Η αντίστοιχη αναλογία πιθανοτήτων είναι αρκετά μικρότερη για το μοντέλο εμμονής (13.5 φορές μεγαλύτερη πιθανότητα η πρόβλεψη να είναι σωστή) (Πίνακας 7.8). Τέλος, η ικανότητα πρόγνωσης όπως δίνεται από κριτήριο Skill Score του μέσου τετραγωνισμένου σφάλματος (SS_{MSE}) και μέθοδο αναφοράς το μοντέλο εμμονής δείχνει ότι η μέθοδος DANN παρουσιάζει βελτίωση στην πρόγνωση του $SPI-3_{t+1}$ και για τις τρεις περιόδους ελέγχου (Πίνακας 7.6).



Σχήμα 7.10. Διαγράμματα χρονοσειρών πρόγνωσης του $SPI-3_{t+1}$ για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και χωρικής πιστοποίησης.

Πίνακας 7.6. Στατιστικά αποτελέσματα πρόγνωσης SPI-3_{t+1} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης

Κριτήριο	Εκπαίδευση	DANN		Εκπαίδευση	Persistence	
		Χρονική Πιστοποίηση	Χωροχρονική Πιστοποίηση		Χρονική Πιστοποίηση	Χωροχρονική Πιστοποίηση
Eff	0.63	0.61	0.59	0.38	0.34	0.37
R	0.79	0.78	0.77	0.69	0.67	0.69
RMSE	0.63	0.59	0.65	0.81	0.76	0.80
MAE	0.47	0.44	0.49	0.61	0.56	0.60
SS _{MSE}	0.41	0.40	0.34	Μοντέλο αναφοράς		

Πίνακας 7.7. Ποιοτικός πίνακας αξιολόγησης πρόγνωσης συμβάντων ξηρασίας (SPI≤-1).

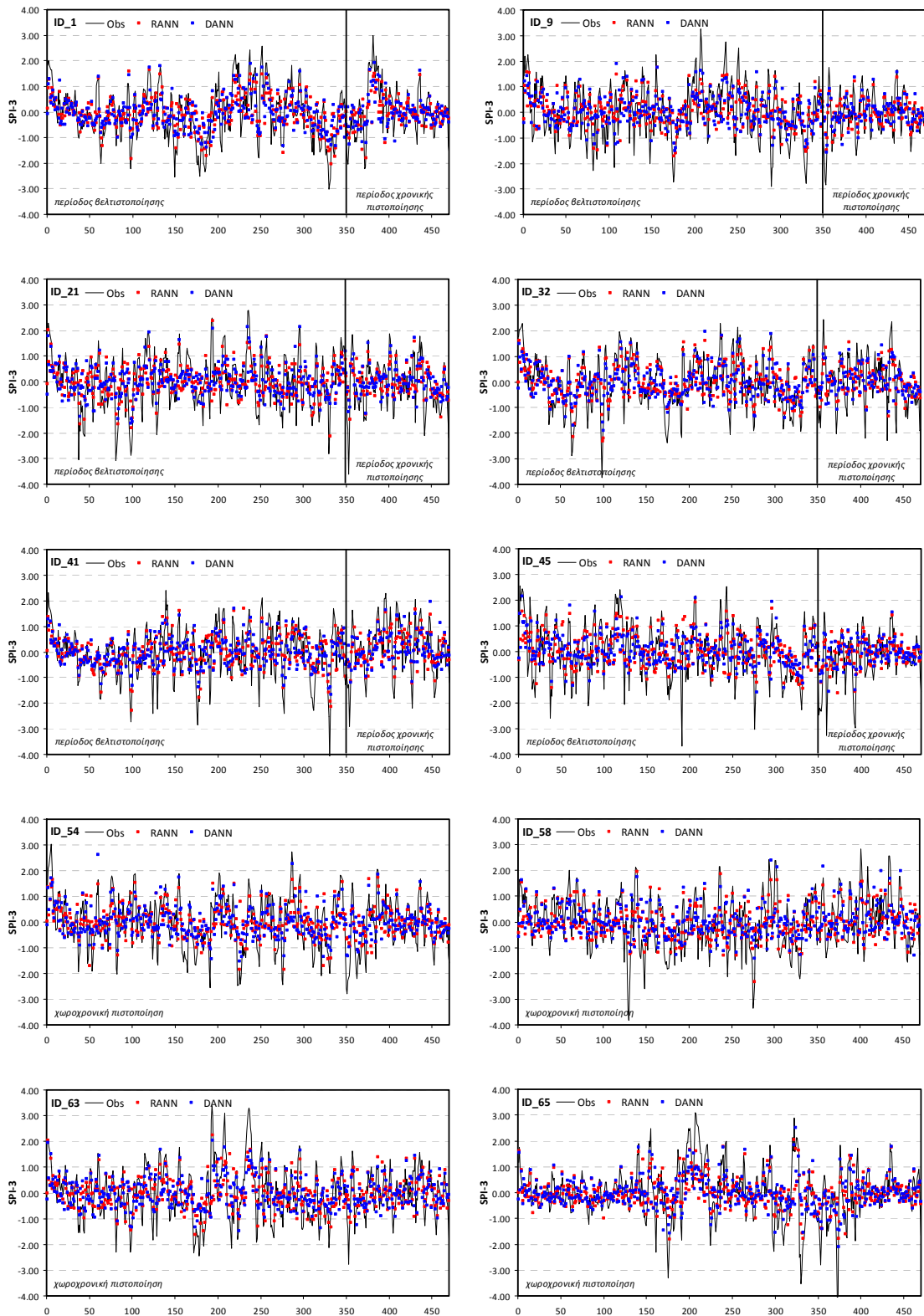
	Παρατηρούμενα συμβάντα ξηρασίας		Παρατηρούμενα συμβάντα ξηρασίας		Παρατηρούμενα συμβάντα ξηρασίας	
	Περίοδος εκπαίδευσης		Χρονική πιστοποίηση		Χωροχρονική πιστοποίηση	
DANN	A=1181 B=1462	C=524 D=13633	A=329 B=446	C=110 D=4875	A=566 B=754	C=256 D=6884
Persistence	A=1460 B=1183	C=1184 D=12973	A=416 B=359	C=335 D=4650	A=740 B=580	C=574 D=6566

Πίνακας 7.8. Στατιστικά αποτελέσματα ποιοτικής πρόγνωσης SPI-3_{t+1} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης

Κριτήριο	Εκπαίδευση	DANN		Εκπαίδευση	Persistence	
		Χρονική Πιστοποίηση	Χωροχρονική Πιστοποίηση		Χρονική Πιστοποίηση	Χωροχρονική Πιστοποίηση
Accuracy	0.88	0.90	0.88	0.86	0.88	0.86
Bias	0.65	0.57	0.62	1.00	0.97	1.00
POD	0.45	0.42	0.43	0.55	0.54	0.56
FAR	0.31	0.25	0.31	0.45	0.45	0.44
POFD	0.04	0.02	0.04	0.08	0.07	0.08
CSI	0.37	0.37	0.36	0.38	0.37	0.39
HK	0.41	0.40	0.39	0.47	0.47	0.48
OR	21.02	32.69	20.19	13.52	16.08	14.59

7.3.2. Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+2, SPI-3_{t+2}

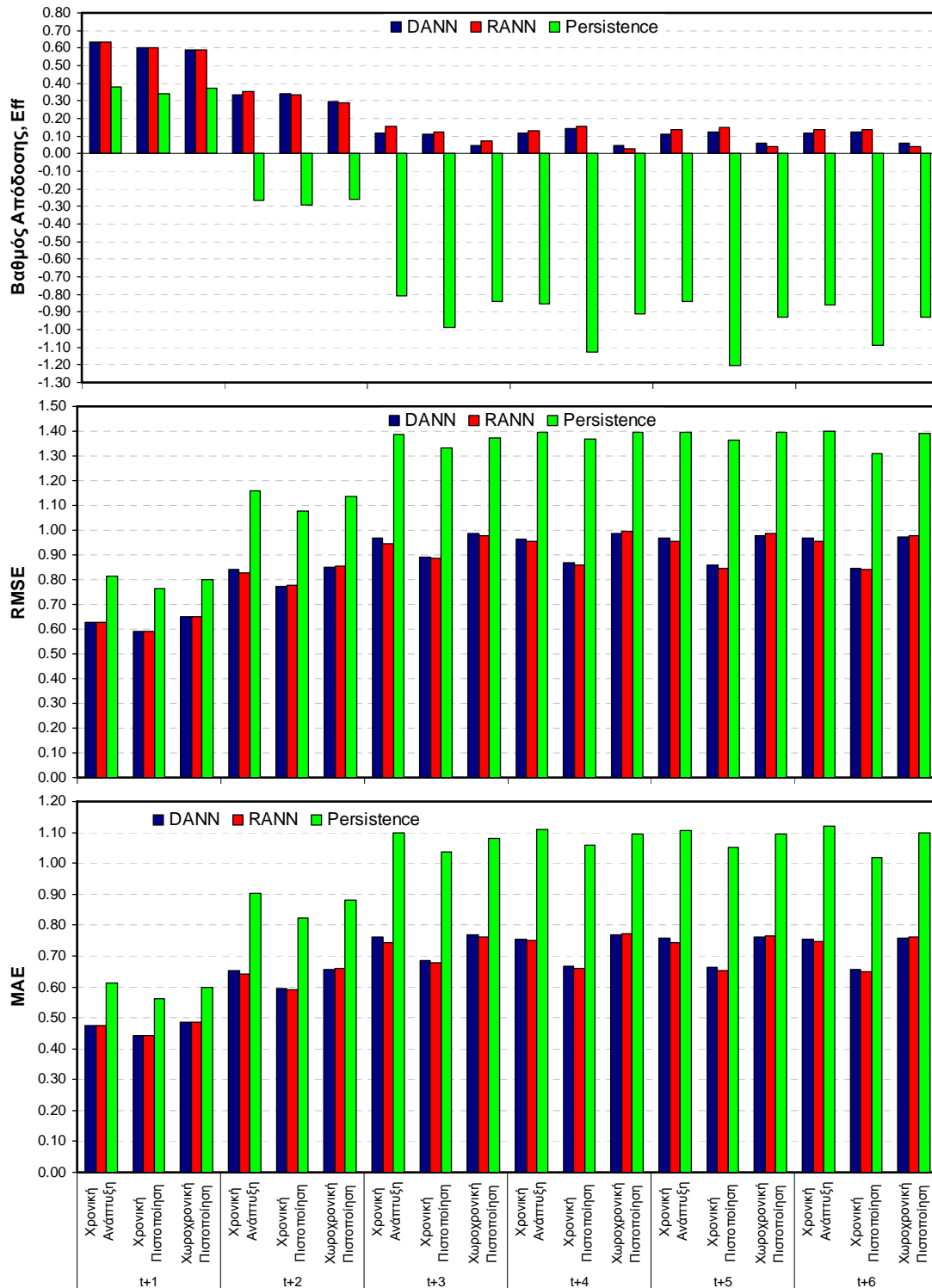
Για το δεύτερο χρονικό βήμα πρόγνωσης t+2, δύο μεθοδολογίες πρόγνωσης με τα νευρωνικά δίκτυα εφαρμόστηκαν: η μέθοδος DANN (ευθεία πρόγνωση του χρονικού βήματος) και η μέθοδος RANN όπου τα αποτελέσματα των προγνώσεων του χρονικού βήματος t+1 ενσωματώνονται στο μοντέλο για την πρόβλεψη του χρονικού βήματος t+2. Στο Παράρτημα I παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των στατιστικών παραμέτρων της πρόγνωσης του SPI-3 για χρονικό βήμα πρόγνωσης t+2 για την περίοδο βελτιστοποίησης (εκπαίδευσης) και χρονικής πιστοποίησης των σταθμών ανάπτυξης, και τη χωροχρονική περίοδο των σταθμών πιστοποίησης. Οι μέθοδοι DANN και RANN και βελτιώνουν κατά πολύ την πρόγνωση του SPI-3_{t+2} σε σχέση με το μοντέλο εμμονής αφού όλες οι στατιστικές παράμετροι βελτιώνονται σημαντικά για τις τρεις περιόδους ελέγχου (εκπαίδευση, χρονική πιστοποίηση και χωροχρονική πιστοποίηση). Η ικανότητα πρόγνωσης όπως δίνεται από κριτήριο Skill Score του μέσου τετραγωνισμένου σφάλματος (SS_{MSE}) και μέθοδο αναφοράς το μοντέλο εμμονής Persistence δείχνει ότι οι μέθοδοι DANN και RANN παρουσιάζουν βελτίωση στην πρόγνωση του SPI-3_{t+2} και για τις τρεις περιόδους ελέγχου. Το Σχήμα 7.11 παρουσιάζει τις προγνώσεις του SPI-3 για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης για τις μεθόδους DANN και RANN.



Σχήμα 7.11. Διαγράμματα χρονοσειρών πρόγνωσης του $SPI-3_{t+2}$ για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.

Παρατηρείται όμως ότι το μοντέλο δεν μπορεί να προσομοιώσει αρκετά καλά τις ακραίες τιμές του SPI και γενικά υποεκτιμά το εύρος του SPI αφού η τιμή της τυπικής απόκλισης των προβλέψεων είναι 0.59 και είναι μικρότερη της θεωρητικής τιμής ($=1$). Για την καλύτερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων

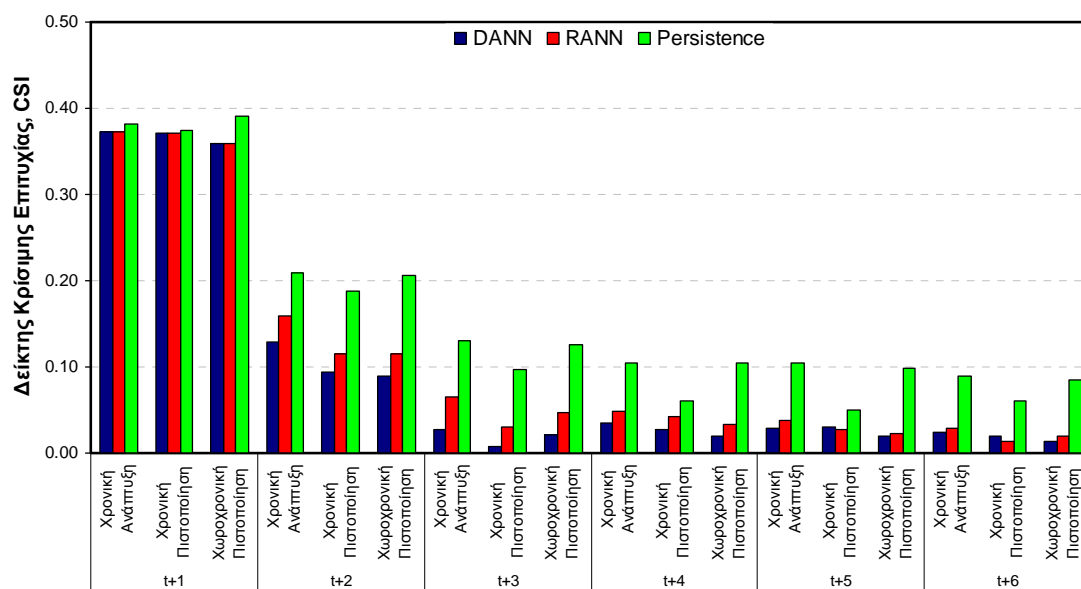
πρόγνωσης υπολογίστηκε ο πίνακας ποιοτικής αξιολόγησης συμβάντων ξηρασίας με βάση τον Πίνακα 7.5. Τα στοιχεία του Πίνακα 7.5 παρουσιάζονται στο Παράρτημα για τα μοντέλα DANN, RANN και Persistence. Από τα στοιχεία αυτά φαίνεται ότι τα μοντέλα DANN και RANN δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν επιχειρησιακά για πρόγνωση του SPI-3_{t+2} αφού δεν μπορούν να προσομοιώσουν τα επεισόδια ξηρασίας. Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγουν και τα ποιοτικά κριτήρια πρόγνωσης ξηρασίας που παρουσιάζονται στον Παράρτημα. Η υπεροχή του μοντέλου εμμονής έναντι των μεθόδων RANN και DANN είναι εμφανής σε όλα τα στατιστικά χαρακτηριστικά (βλ. Παράρτημα).



Σχήμα 7.12. Συνολικά ποσοτικά στατιστικά κριτήρια πρόγνωσης του SPI-3 για όλα τα χρονικά βήματα πρόγνωσης.

7.3.3. Χρονικά βήματα πρόγνωσης μεγαλύτερα από 2 μήνες του SPI-3

Για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα πρόγνωσης η πρόγνωση του SPI-3 μηνών με τα μοντέλα DANN και RANN, όπως φαίνεται από τα προηγούμενα βραχυπρόθεσμα διαστήματα πρόγνωσης, αναμένεται να μην μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιχειρησιακά σε συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης. Τα Σχήματα 7.12 και 7.13 παρουσιάζουν τις κύριες ποσοτικές (Eff, RMSE και MAE) και το δείκτη κρίσιμης επιτυχίας (CSI) για όλα τα βήματα πρόγνωσης από ένα έως έξι μήνες και επιβεβαιώνουν ότι τα μοντέλα DANN και RANN δεν μπορούν να προβλέψουν έγκαιρα τα αναγνωρισμένα επεισόδια ξηρασίας για χρονικά βήματα πρόγνωσης από ένα μήνα έως έξι μήνες μπροστά.



Σχήμα 7.13. Δείκτης κρίσιμης επιτυχίας αναγνώρισης επεισοδίων ξηρασίας του SPI-3 για όλα τα χρονικά βήματα πρόγνωσης.

7.4. Χρονική πρόγνωση SPI-6μηνών

Οι χρονικές μεθοδολογίες πρόγνωσης DANN και RANN εφαρμόστηκαν για βραχυπρόθεσμες (1-2 μήνες μπροστά) και μεσοπρόθεσμες προγνώσεις (3-6 μήνες μπροστά) του SPI-6. Λόγω του μεγάλου πλήθους των αποτελεσμάτων τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικά για χρονικό βήμα πρόγνωσης t+1 και περιληπτικά για τα υπόλοιπα βήματα πρόγνωσης. Τα αποτελέσματα για μεγαλύτερα βήματα πρόγνωσης παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα.

7.4.1. Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+1, SPI-6_{t+1}

Ο Πίνακας 7.9 παρουσιάζει τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των στατιστικών παραμέτρων της πρόγνωσης του SPI-6 για χρονικό βήμα πρόγνωσης t+1 για την περίοδο βελτιστοποίησης και χρονικής πιστοποίησης των σταθμών ανάπτυξης, και τη χωροχρονική περίοδο των σταθμών πιστοποίησης. Στον ίδιο πίνακα, παρουσιάζονται τα στατιστικά κριτήρια για το μοντέλο εμμονής (Persistence model). Όπως φαίνεται από τον παρακάτω πίνακα, η μέθοδος DANN βελτιώνει κατά πολύ τα στατιστικά κριτήρια πρόγνωσης του SPI-6 για χρονικό βήμα πρόγνωσης t+1 σε σχέση με την μέθοδο αναφοράς αφού

παρουσιάζει σημαντική αύξηση σε όλα τα κριτήρια και για τις τρεις περιόδους ελέγχου (ανάπτυξη, χρονική πιστοποίηση και χωροχρονική πιστοποίηση). Η ικανότητα πρόγνωσης όπως δίνεται από κριτήριο Skill Score του μέσου τετραγωνισμένου σφάλματος (SS_{MSE}) και μέθοδο αναφοράς το Persistence μοντέλο δείχνει ότι η μέθοδος DANN παρουσιάζει βελτίωση στην πρόγνωση του $SPI-6_{t+1}$ και για τις τρεις περιόδους ελέγχου (Πίνακας 7.9). Το Σχήμα 7.14 παρουσιάζει τις προγνώσεις του $SPI-6$ για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης και διαπιστώνεται ότι το μοντέλο DANN κρίνεται πολύ ικανοποιητικό. Παρατηρείται όμως ότι το μοντέλο δεν μπορεί να προσομοιώσει αρκετά καλά κάποιες ακραίες τιμές του SPI και γενικά υποεκτιμά το εύρος του SPI αφού η τιμή της τυπικής απόκλισης των προβλέψεων είναι 0.91 που είναι μικρότερη της θεωρητικής τιμής των παρατηρημένων τιμών (=1). Για την καλύτερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων πρόγνωσης υπολογίστηκε ο πίνακας ποιοτικής αξιολόγησης συμβάντων ξηρασίας με βάση τον Πίνακα 7.5. Τα στοιχεία του Πίνακα 7.5 παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.10 για τα μοντέλα DANN και Persistence. Με βάση τα στοιχεία του Πίνακα 7.10 υπολογίστηκαν τα ποιοτικά κριτήρια πρόγνωσης ξηρασίας για το $SPI-6_{t+1}$ που παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.11. Η υπεροχή της μεθόδου DANN που εμφανίζεται παραπάνω δεν είναι τόσο εμφανής αφού παρουσιάζει παραπλήσια ποιοτικά στατιστικά κριτήρια με το μοντέλο εμμονής για χρονικό βήμα πρόγνωσης ενός μήνα για την αναγνώριση των επεισοδίων ξηρασίας. Μάλιστα σε κάποια κριτήρια η μέθοδος του μοντέλου εμμονής παρουσιάζεται καλύτερη (Bias, πιθανότητα ανίχνευσης επεισοδίων) αλλά παρουσιάζει μεγάλο αριθμό λανθασμένων συναγερωμών. Γενικά, όπως φαίνεται το δείκτη κρίσιμης επιτυχίας CSI η μέθοδος DANN υπερτερεί της μεθόδου αναφοράς και έχει καλύτερη ακρίβεια πρόγνωσης επεισοδίων ξηρασίας ενώ η ικανότητα της μεθόδου DANN να διακρίνει ξεκάθαρα τα επεισόδια ξηρασίας από τα μη-επεισόδια είναι ανάλογη του μοντέλου εμμονής. Η αναλογία πιθανοτήτων OR για τη μέθοδο DANN δείχνει ότι οι πιθανότητες πρόβλεψης μία πρόγνωση να είναι σωστή είναι τουλάχιστον 53 φορές μεγαλύτερη από την πιθανότητα να είναι λανθασμένη πρόγνωση. Η αντίστοιχη αναλογία πιθανοτήτων είναι αρκετά μικρότερη για τη μέθοδο Persistence (36 φορές μεγαλύτερη πιθανότητα η πρόβλεψη να είναι σωστή) (Πίνακας 7.11).

Πίνακας 7.9. Στατιστικά αποτελέσματα πρόγνωσης $SPI-6_{t+1}$ για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης

Κριτήριο	Εκπαίδευση	DANN		Εκπαίδευση	Persistence	
		Χρονική Πιστοποίηση	Χωροχρονική Πιστοποίηση		Χρονική Πιστοποίηση	Χωροχρονική Πιστοποίηση
Eff	0.81	0.78	0.80	0.69	0.66	0.70
R	0.90	0.88	0.90	0.85	0.83	0.85
RMSE	0.45	0.43	0.45	0.57	0.53	0.55
MAE	0.33	0.32	0.33	0.42	0.38	0.40
SS_{MSE}	0.38	0.34	0.34	Μοντέλο αναφοράς		

Πίνακας 7.10. Ποιοτικός πίνακας αξιολόγησης πρόγνωσης συμβάντων ξηρασίας για $SPI-6_{t+1}$ ($SPI \leq -1$).

Στοιχεία*	Εκπαίδευση	DANN		Εκπαίδευση	Persistence	
		Χρονική Πιστοποίηση	Χωροχρονική Πιστοποίηση		Χρονική Πιστοποίηση	Χωροχρονική Πιστοποίηση
A	1844	395	840	1809	430	857
C	488	188	260	818	205	389
B	906	251	445	805	216	387
D	13562	4926	6915	13368	4909	6827

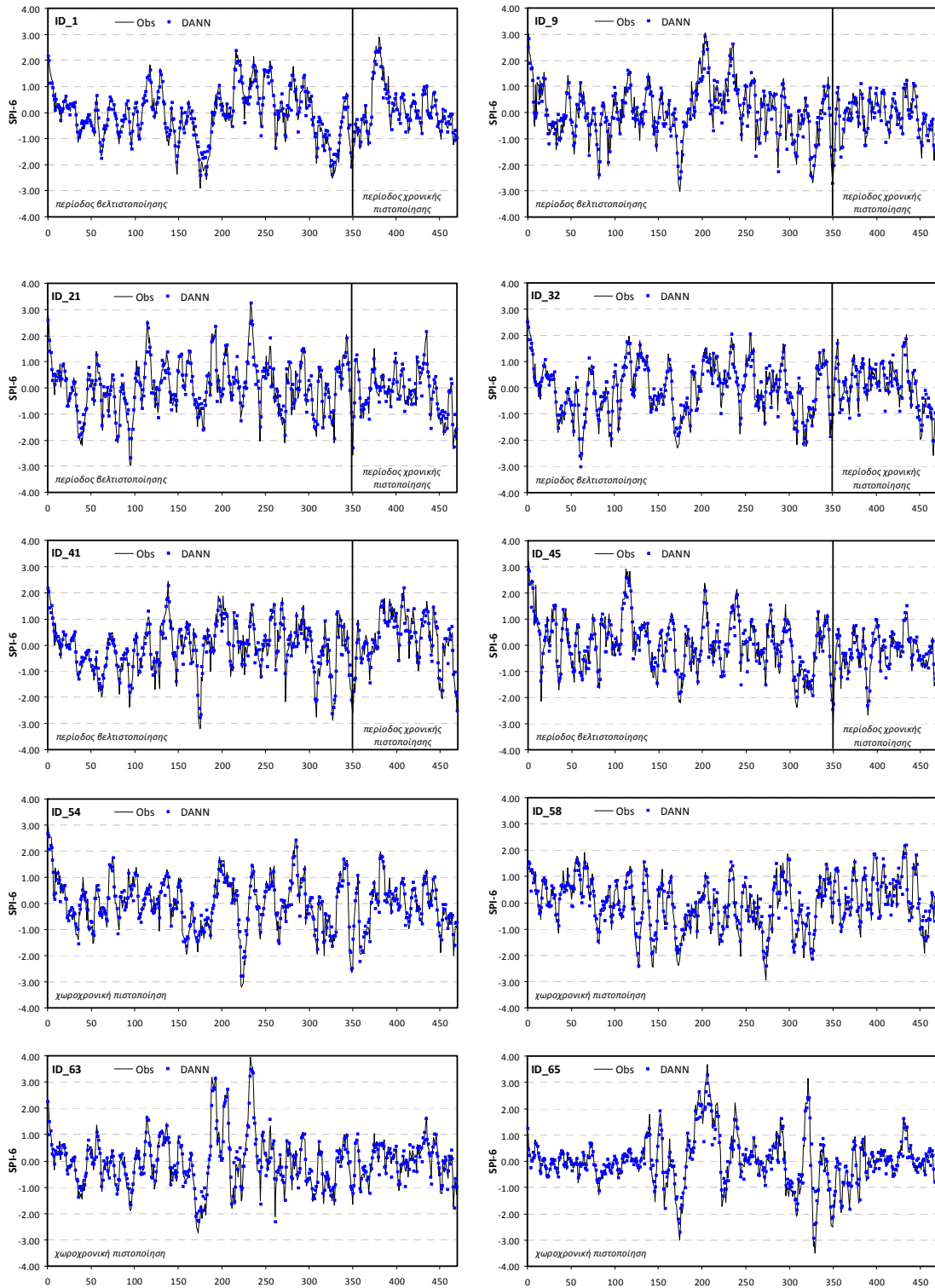
*A=επιτυχίες, B=αστοχίες, C=λανθασμένοι συναγερωμοί, και D=σωστά μη επεισόδια ξηρασίας

Πίνακας 7.11. Στατιστικά αποτελέσματα ποιοτικής πρόγνωσης SPI-6_{t+1} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης

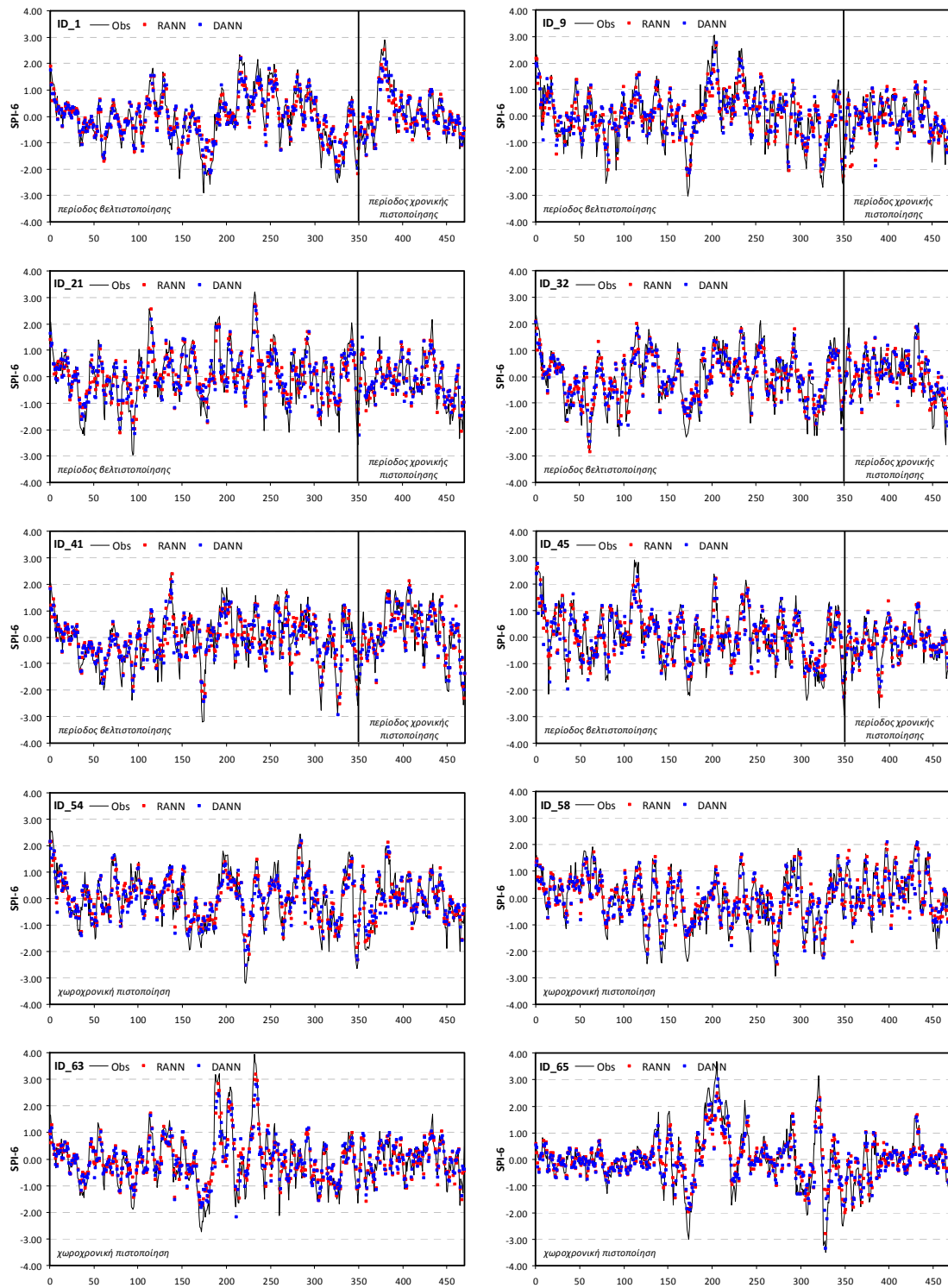
Κριτήριο	Εκπαίδευση	DANN		Εκπαίδευση	Persistence	
		Χρονική Πιστοποίηση	Χωροχρονική Πιστοποίηση		Χρονική Πιστοποίηση	Χωροχρονική Πιστοποίηση
Accuracy	0.92	0.92	0.92	0.90	0.93	0.91
Bias	0.85	0.90	0.86	1.00	0.98	1.00
POD	0.67	0.61	0.65	0.69	0.67	0.69
FAR	0.21	0.32	0.24	0.31	0.32	0.31
POFD	0.03	0.04	0.04	0.06	0.04	0.05
CSI	0.57	0.47	0.54	0.53	0.51	0.52
HK	0.64	0.57	0.62	0.63	0.63	0.63
OR	56.56	41.23	50.20	36.72	47.67	38.86

7.4.2. Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+2, SPI-6_{t+2}

Για το δεύτερο χρονικό βήμα πρόγνωσης t+2, δύο μεθοδολογίες πρόγνωσης με τα νευρωνικά δίκτυα εφαρμόστηκαν: η μέθοδος DANN (ευθεία πρόγνωση του χρονικού βήματος) και η μέθοδος RANN, όπου τα αποτελέσματα των προγνώσεων του χρονικού βήματος t+1 ενσωματώνονται στο μοντέλο για την πρόβλεψη του χρονικού βήματος t+2. Στο Παράρτημα παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των στατιστικών παραμέτρων της πρόγνωσης του SPI-6 για χρονικό βήμα πρόγνωσης t+2 για την περίοδο βελτιστοποίησης (εκπαίδευσης) και χρονικής πιστοποίησης των σταθμών ανάπτυξης, και τη χωροχρονική περίοδο των σταθμών πιστοποίησης. Στον ίδιο πίνακα, παρουσιάζονται τα στατιστικά κριτήρια για το μοντέλο εμμονής. Οι μέθοδοι DANN και RANN βελτιώνουν κατά πολύ την πρόγνωση του SPI-6_{t+2} σε σχέση με την μέθοδο αναφοράς αφού όλες οι στατιστικές παράμετροι βελτιώνονται σημαντικά για τις τρεις περιόδους ελέγχου (εκπαίδευση, χρονική πιστοποίηση και χωροχρονική πιστοποίηση). Η ικανότητα πρόγνωσης όπως δίνεται από κριτήριο Skill Score του μέσου τετραγωνισμένου σφάλματος (SS_{MSE}) και μέθοδο αναφοράς το μοντέλο Persistence δείχνει ότι οι μέθοδοι DANN και RANN παρουσιάζουν βελτίωση στην πρόγνωση του SPI-6_{t+2} και για τις τρεις περιόδους ελέγχου. Η μέθοδος RANN εμφανίζεται ελαφρώς ανώτερη από τη μέθοδο DANN. Το Σχήμα 7.15 παρουσιάζει τις προγνώσεις του SPI-6 για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης για τις μεθόδους DANN και RANN. Παρατηρείται όμως ότι τα μοντέλα δεν μπορεί να προσομοιώσουν αρκετά καλά τις ακραίες τιμές του SPI και γενικά υποεκτιμούν το εύρος του SPI αφού η τιμή της τυπικής απόκλισης των προβλέψεων είναι 0.80 και 0.81 για DANN και RANN αντίστοιχα, και είναι μικρότερη της θεωρητικής τιμής (=1). Τα στοιχεία της ποιοτικής αξιολόγησης συμβάντων ξηρασίας και τα ποιοτικά στατιστικά κριτήρια παρουσιάζονται στο Παράρτημα για τα μοντέλα DANN, RANN και Persistence. Από τα στοιχεία αυτά φαίνεται ότι τα μοντέλα DANN και RANN μπορούν να χρησιμοποιηθούν επιχειρησιακά για πρόγνωση του SPI-6_{t+2} αφού προσομοιώσουν καλύτερα τα επεισόδια ξηρασίας από τη μέθοδο αναφοράς. Η υπεροχή της μεθόδου RANN έναντι των μεθόδων DANN και Persistence είναι εμφανής σε όλα τα στατιστικά χαρακτηριστικά αλλά όπως δείχνει ο δείκτης κρίσιμης επιτυχίας CSI καμία μέθοδος δεν πρέπει να χρησιμοποιείται σε συστήματα διαχείρισης της ξηρασίας για προγνώσεις του SPI-6 δύο μήνες μπροστά (βλ. Παράρτημα).



Σχήμα 7.14. Διαγράμματα χρονοσειρών πρόγνωσης του $SPI-6_{t+1}$ για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.

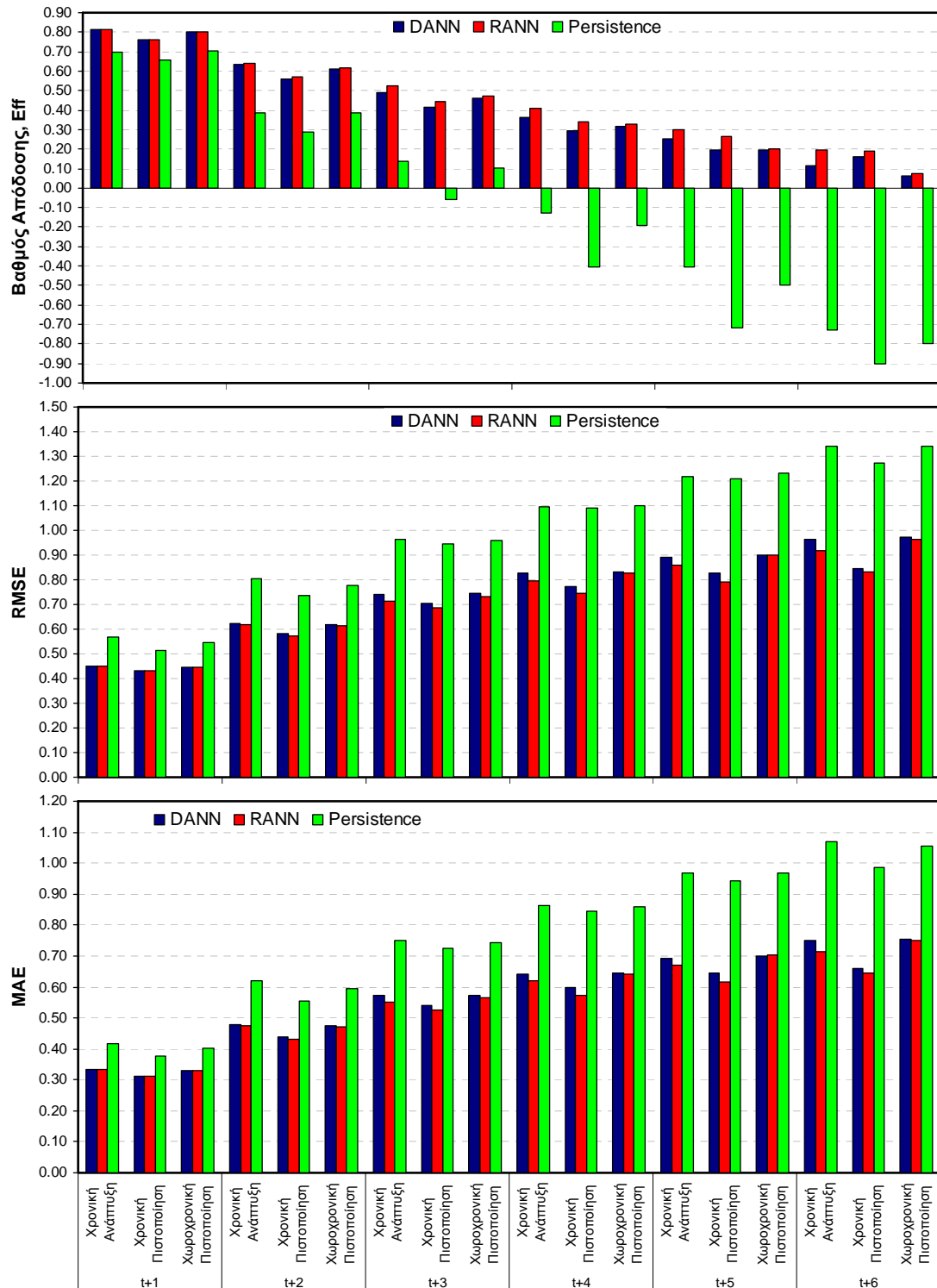


Σχήμα 7.15. Διαγράμματα χρονοσειρών πρόγνωσης του SPI-6_{t+2} για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.

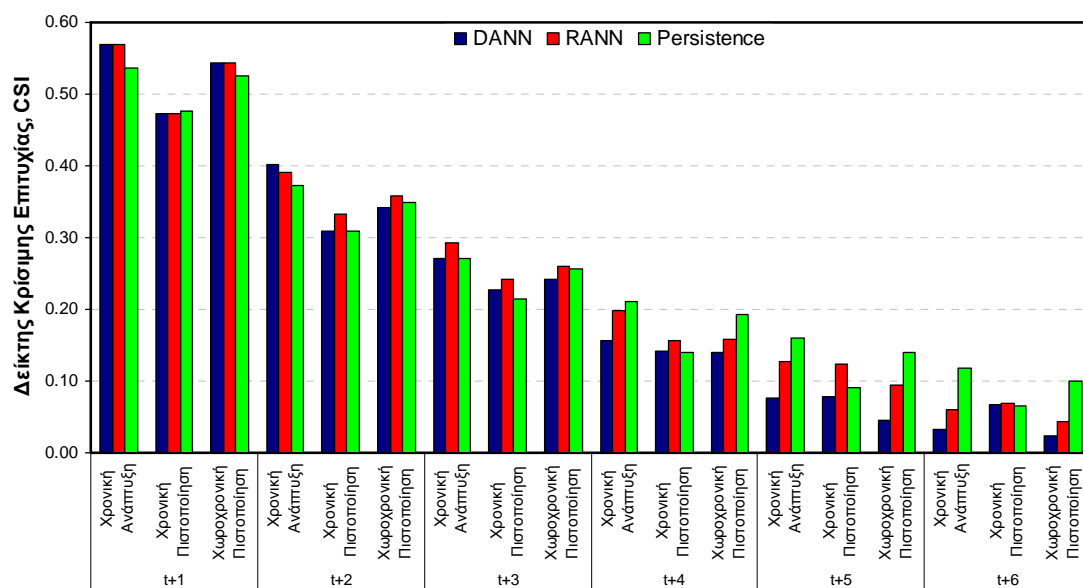
7.4.3. Χρονικά βήματα πρόγνωσης μεγαλύτερα από 2 μήνες του SPI-6

Για χρονικά διαστήματα πρόγνωσης μεγαλύτερα των δύο μηνών η πρόγνωση του SPI-6 μηνών με τα μοντέλα DANN και RANN, όπως φαίνεται από τα προηγούμενα διαστήματα πρόγνωσης, αναμένεται να μην μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιχειρησιακά σε συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης. Τα Σχήματα

7.16 και 7.17 παρουσιάζουν αντίστοιχα, τις κύριες ποσοτικές στατιστικές παραμέτρους (Eff, RMSE και MAE) και τον δείκτη κρίσιμης επιτυχίας αναγνώρισης επεισοδίων ξηρασίας (CSI) για όλα τα βήματα πρόγνωσης από ένα έως έξι μήνες και επιβεβαιώνουν ότι τα μοντέλα DANN και RANN δεν μπορούν να προβλέψουν έγκαιρα τα αναγνωρισμένα επεισόδια ξηρασίας για χρονικά βήματα πρόγνωσης μεγαλύτερα από ένα μήνα.



Σχήμα 7.16. Συνολικά ποσοτικά στατιστικά κριτήρια πρόγνωσης του SPI-3 για όλα τα χρονικά βήματα πρόγνωσης.



Σχήμα 7.17. Δείκτης κρίσιμης επιτυχίας αναγνώρισης επεισοδίων ξηρασίας του SPI-6 για όλα τα χρονικά βήματα πρόγνωσης.

7.5. Χρονική πρόγνωση SPI-9μηνών

Οι χρονικές μεθοδολογίες πρόγνωσης DANN και RANN εφαρμόστηκαν για βραχυπρόθεσμες (1-2 μήνες μπροστά) και μεσοπρόθεσμες προγνώσεις (3-6 μήνες μπροστά) του SPI-9. Λόγω του μεγάλου πλήθους των αποτελεσμάτων τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικά για χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$ και περιληπτικά για τα υπόλοιπα βήματα πρόγνωσης. Τα αποτελέσματα για μεγαλύτερα βήματα πρόγνωσης παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα.

7.5.1. Χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$, SPI-9 $_{t+1}$

Ο Πίνακας 7.12 παρουσιάζει τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των στατιστικών παραμέτρων της πρόγνωσης του SPI-9 για χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$ για την περίοδο βελτιστοποίησης και χρονικής πιστοποίησης των σταθμών ανάπτυξης, και τη χωροχρονική περίοδο των σταθμών πιστοποίησης. Στον ίδιο πίνακα, παρουσιάζονται τα στατιστικά κριτήρια για το μοντέλο εμμονής (Persistence model). Όπως φαίνεται από τον παρακάτω πίνακα, η μέθοδος DANN βελτιώνει κατά πολύ τα στατιστικά κριτήρια πρόγνωσης του SPI-9 για χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$ σε σχέση με την μέθοδο αναφοράς αφού παρουσιάζει σημαντική αύξηση σε όλα τα κριτήρια και για τις τρεις περιόδους ελέγχου (ανάπτυξη, χρονική πιστοποίηση και χωροχρονική πιστοποίηση). Η ικανότητα πρόγνωσης όπως δίνεται από κριτήριο Skill Score του μέσου τετραγωνισμένου σφάλματος (SS_{MSE}) και μέθοδο αναφοράς το Persistence μοντέλο δείχνει ότι η μέθοδος DANN παρουσιάζει βελτίωση στην πρόγνωση του SPI-9 $_{t+1}$ και για τις τρεις περιόδους ελέγχου (Πίνακας 7.12). Το Σχήμα 7.18 παρουσιάζει τις προγνώσεις του SPI-9 για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης και διαπιστώνεται ότι το μοντέλο DANN κρίνεται πολύ ικανοποιητικό. Παρατηρείται όμως ότι το μοντέλο δεν μπορεί να προσομοιώσει αρκετά καλά κάποιες ακραίες τιμές του SPI και γενικά υποεκτιμά το εύρος του SPI αφού η τιμή της τυπικής απόκλισης των προβλέψεων είναι 0.94 που είναι λίγο μικρότερη της θεωρητικής τιμής των

παρατηρημένων τιμών (=1). Για την καλύτερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων πρόγνωσης υπολογίστηκε ο πίνακας ποιοτικής αξιολόγησης συμβάντων ξηρασίας με βάση τον Πίνακα 7.5. Τα στοιχεία του Πίνακα 7.5 και τα ποιοτικά κριτήρια πρόγνωσης ξηρασίας παρουσιάζονται στους Πίνακες 7.13 και 7.14, αντίστοιχα, για τα μοντέλα DANN και Persistence. Η υπεροχή της μεθόδου DANN που εμφανίζεται από τα ποιοτικά κριτήρια επαληθεύεται και από τα ποιοτικά στατιστικά κριτήρια αναγνώρισης των επεισοδίων ξηρασίας για χρονικό βήμα πρόγνωσης ενός μήνα. Σε κάποια κριτήρια όμως το μοντέλο εμμονής παρουσιάζεται καλύτερη (Bias, πιθανότητα ανίχνευσης επεισοδίων) με μεγάλο όμως αριθμό λανθασμένων συναγερωμών. Γενικά, όπως φαίνεται το δείκτη κρίσιμης επιτυχίας CSI η μέθοδος DANN υπερτερεί της μεθόδου αναφοράς και έχει καλύτερη ακρίβεια πρόγνωσης επεισοδίων ξηρασίας ενώ η ικανότητα της μεθόδου DANN να διακρίνει ξεκάθαρα τα επεισόδια ξηρασίας από τα μη-επεισόδια είναι ανάλογη του μοντέλου εμμονής. Η αναλογία πιθανοτήτων OR για τη μέθοδο DANN δείχνει ότι οι πιθανότητες πρόβλεψης μία πρόγνωση να είναι σωστή είναι τουλάχιστον 83 φορές μεγαλύτερη από την πιθανότητα να είναι λανθασμένη πρόγνωση. Η αντίστοιχη αναλογία πιθανοτήτων είναι αρκετά μικρότερη για τη μέθοδο Persistence (50 φορές μεγαλύτερη πιθανότητα η πρόβλεψη να είναι σωστή) (Πίνακας 7.14).

Πίνακας 7.12. Στατιστικά αποτελέσματα πρόγνωσης SPI-9_{t+1} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης

Κριτήριο	Εκπαίδευση	DANN		Εκπαίδευση	Persistence	
		Χρονική Πιστοποίηση	Χωροχρονική Πιστοποίηση		Χρονική Πιστοποίηση	Χωροχρονική Πιστοποίηση
Eff	0.89	0.86	0.88	0.81	0.80	0.82
R	0.94	0.93	0.94	0.91	0.90	0.91
RMSE	0.35	0.33	0.35	0.45	0.39	0.43
MAE	0.26	0.25	0.26	0.33	0.29	0.32
SS _{MSE}	0.38	0.29	0.32	Μοντέλο αναφοράς		

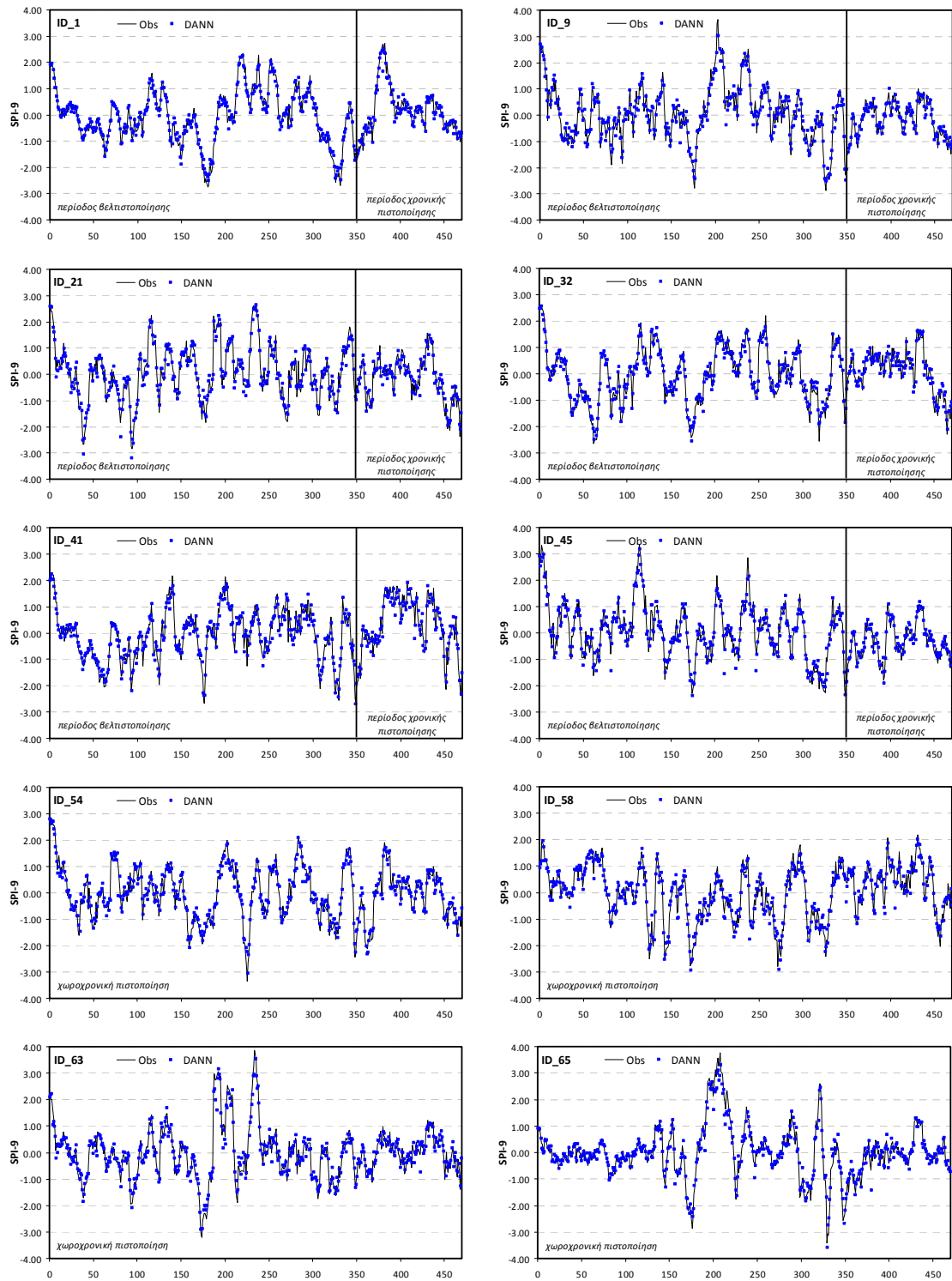
Πίνακας 7.13. Στοιχεία του ποιοτικού πίνακα αξιολόγησης πρόγνωσης συμβάντων ξηρασίας SPI-9_{t+1}.

Στοιχεία*	Εκπαίδευση	DANN		Εκπαίδευση	Persistence	
		Χρονική Πιστοποίηση	Χωροχρονική Πιστοποίηση		Χρονική Πιστοποίηση	Χωροχρονική Πιστοποίηση
A	2078	428	978	2124	430	1009
C	418	130	205	649	217	345
B	722	198	376	676	196	345
D	13582	5004	6901	13351	4917	6761

*A=επιτυχίες, B=αστοχίες, C=Λανθασμένοι συναγερωμοί, και D=σωστά μη επεισόδια ξηρασίας

Πίνακας 7.14. Στατιστικά αποτελέσματα ποιοτικής πρόγνωσης SPI-9_{t+1} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης

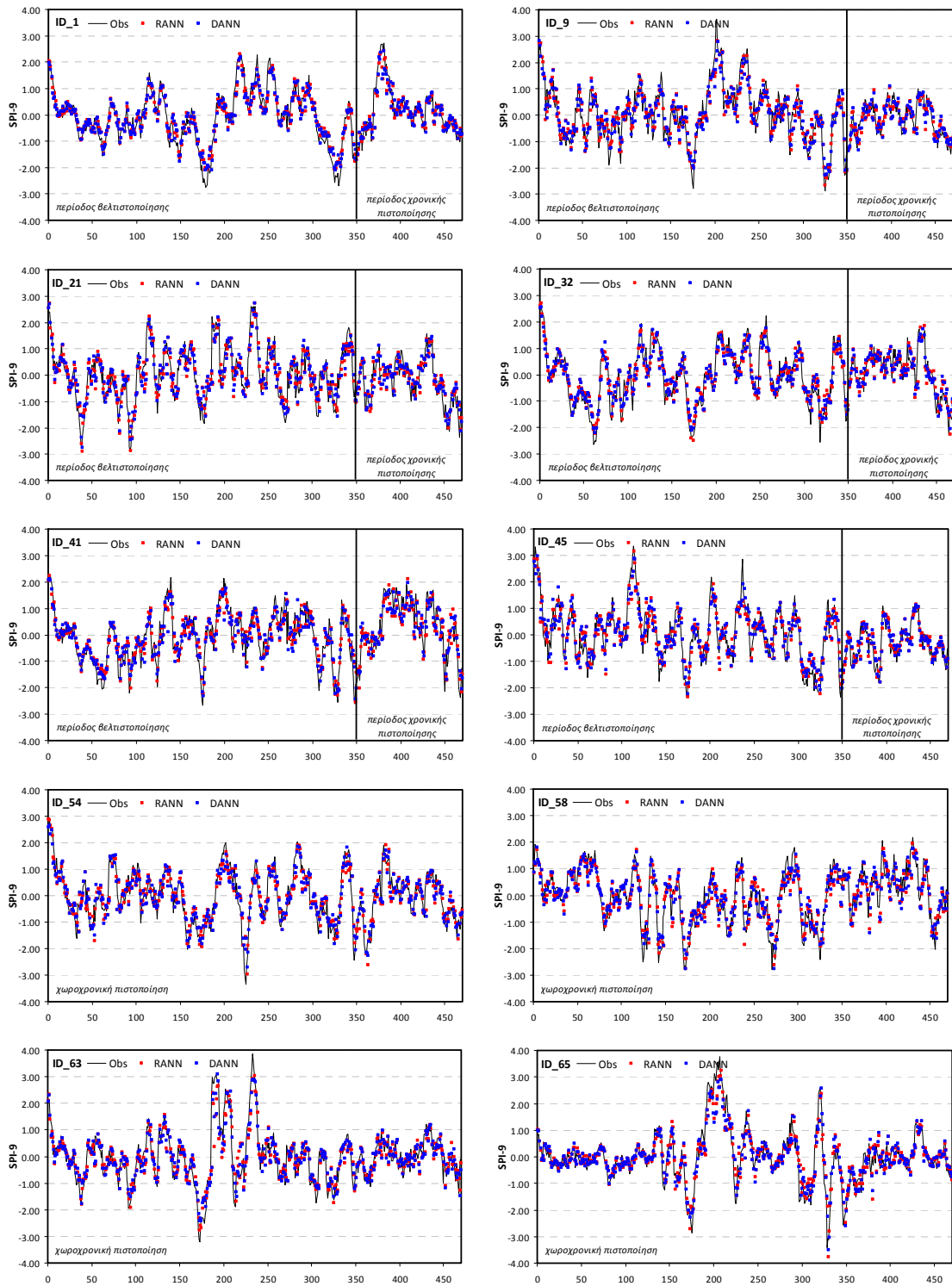
Κριτήριο	Εκπαίδευση	DANN		Εκπαίδευση	Persistence	
		Χρονική Πιστοποίηση	Χωροχρονική Πιστοποίηση		Χρονική Πιστοποίηση	Χωροχρονική Πιστοποίηση
Accuracy	0.93	0.94	0.93	0.92	0.93	0.92
Bias	0.89	0.89	0.87	0.99	1.03	1.00
POD	0.74	0.68	0.72	0.76	0.69	0.75
FAR	0.17	0.23	0.17	0.23	0.34	0.25
POFD	0.03	0.03	0.03	0.05	0.04	0.05
CSI	0.65	0.57	0.63	0.62	0.51	0.59
HK	0.71	0.66	0.69	0.71	0.64	0.70
OR	93.52	83.21	87.56	64.64	49.71	57.31



Σχήμα 7.18. Διαγράμματα χρονοσειρών πρόγνωσης του $SPI-9_{t+1}$ για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.

7.5.2. Χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+2$, $SPI-9_{t+2}$

Για το δεύτερο χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+2$, δύο μεθοδολογίες πρόγνωσης με τα νευρωνικά δίκτυα εφαρμόστηκαν: η μέθοδος DANN (ευθεία πρόγνωση του χρονικού βήματος) και η μέθοδος RANN, όπου τα αποτελέσματα των προγνώσεων του χρονικού βήματος $t+1$ ενσωματώνονται στο μοντέλο για την πρόβλεψη του χρονικού βήματος $t+2$. Το Σχήμα 7.19 παρουσιάζει τις προγνώσεις του $SPI-9_{t+2}$ για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης για τις μεθόδους DANN και RANN.



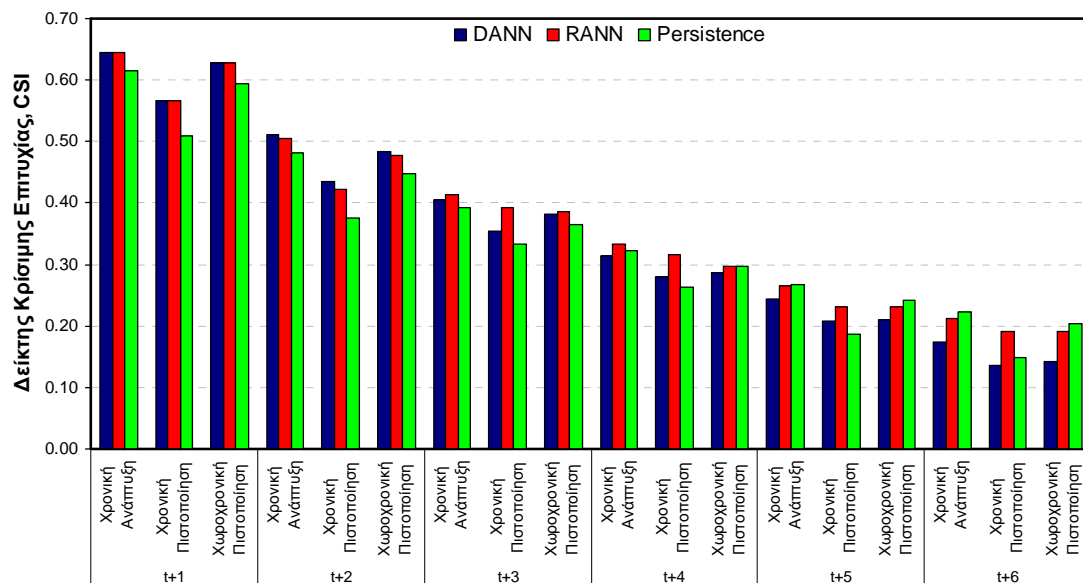
Σχήμα 7.19. Διαγράμματα χρονοσειρών πρόγνωσης του $SPI-9_{t+2}$ για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.

Όπως φαίνεται από τα στατιστικά στοιχεία που παρουσιάζονται στο Παράρτημα, οι μέθοδοι DANN και RANN βελτιώνουν κατά πολύ την πρόγνωση του $SPI-9_{t+2}$ σε σχέση με τη μέθοδο αναφοράς αφού όλες οι στατιστικές παράμετροι βελτιώνονται σημαντικά για τις τρεις περιόδους ελέγχου. Η ικανότητα πρόγνωσης όπως δίνεται από κριτήριο Skill Score του μέσου τετραγωνισμένου σφάλματος (SS_{MSE}) και μέθοδο αναφοράς το μοντέλο εμμονής (Persistence model) δείχνει ότι οι μέθοδοι DANN και RANN παρουσιάζουν βελτίωση στην πρόγνωση του $SPI-9_{t+2}$ και για τις τρεις περιόδους ελέγχου. Αξιοσημείωτο

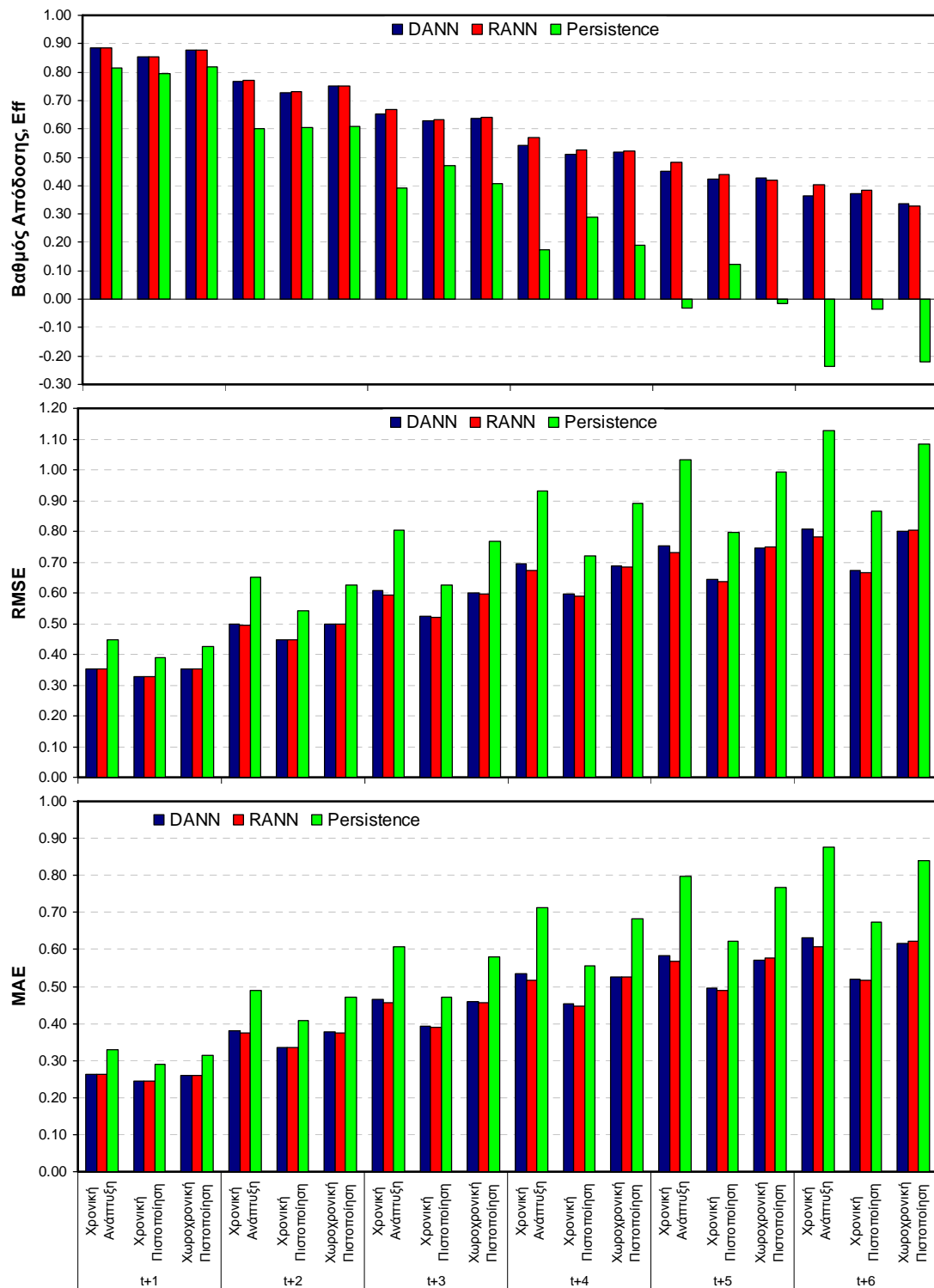
είναι ότι και οι δύο μέθοδοι DANN και RANN έχουν ακριβώς τα ίδια ποσοτικά στατιστικά χαρακτηριστικά άρα έχουν την ίδια ικανότητα πρόγνωσης του $SPI-9_{t+2}$. Παρατηρείται όμως ότι τα μοντέλα δεν μπορεί να προσομοιώσουν αρκετά καλά τις ακραίες τιμές του SPI και γενικά υποεκτιμούν το εύρος του SPI αφού η τιμή της τυπικής απόκλισης των προβλέψεων είναι 0.86 και για τις δύο τεχνικές των νευρωνικών δικτύων. Η ποιοτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων πρόγνωσης έγινε για τα επεισόδια ξηρασίας με τιμές $SPI \leq 1$. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Παράρτημα δείχνουν την υπεροχή των μεθόδων RANN και DANN σε σχέση με το μοντέλο εμμονής εκτός της μεροληψίας (Bias) και της πιθανότητας ανίχνευσης επεισοδίων ξηρασίας. Ο δείκτης κρίσιμης επιτυχίας CSI δείχνει ότι και οι δύο τεχνικές (DANN και RANN) μπορούν να χρησιμοποιηθούν οριακά σε συστήματα διαχείρισης της ξηρασίας με βάση το SPI-9μηνών για προγνώσεις μέχρι και δύο μήνες μπροστά αφού μόνο στους σταθμούς ανάπτυξης παρουσιάζουν τιμές μεγαλύτερες του 0.5 (βλ. Παράρτημα).

7.5.3. Χρονικά βήματα πρόγνωσης μεγαλύτερα από 2 μήνες του SPI-9

Για χρονικά διαστήματα πρόγνωσης μεγαλύτερα των δύο μηνών η πρόγνωση του SPI-9 μηνών με τα μοντέλα DANN και RANN, όπως φαίνεται από τα προηγούμενα διαστήματα πρόγνωσης, αναμένεται να μην μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιχειρησιακά σε συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης. Τα Σχήματα 7.20 και 7.21 παρουσιάζουν αντίστοιχα, τον δείκτη κρίσιμης επιτυχίας αναγνώρισης επεισοδίων ξηρασίας (CSI) και τις κύριες ποσοτικές στατιστικές παραμέτρους (Eff, RMSE και MAE) για όλα τα βήματα πρόγνωσης από ένα έως έξι μήνες και επιβεβαιώνουν ότι τα μοντέλα DANN και RANN δεν μπορούν να προβλέψουν έγκαιρα τα αναγνωρισμένα επεισόδια ξηρασίας για χρονικά βήματα πρόγνωσης μεγαλύτερα από δύο μήνες.



Σχήμα 7.20. Δείκτης κρίσιμης επιτυχίας αναγνώρισης επεισοδίων ξηρασίας του SPI-9 για όλα τα χρονικά βήματα πρόγνωσης.



Σχήμα 7.21. Συνολικά ποσοτικά στατιστικά κριτήρια πρόγνωσης του SPI-9 για όλα τα χρονικά βήματα πρόγνωσης.

7.6. Χρονική πρόγνωση SPI-12μηνών

Οι χρονικές μεθοδολογίες πρόγνωσης DANN και RANN εφαρμόστηκαν για βραχυπρόθεσμες (1-2 μήνες μπροστά) και μεσοπρόθεσμες προγνώσεις (3-6 μήνες μπροστά) του SPI-12. Λόγω του μεγάλου πλήθους

των αποτελεσμάτων τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικά για χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$ και περιληπτικά για τα υπόλοιπα βήματα πρόγνωσης. Τα αποτελέσματα για μεγαλύτερα βήματα πρόγνωσης παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα.

7.6.1. Χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$, SPI-12 _{$t+1$}

Ο Πίνακας 7.15 παρουσιάζει τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των στατιστικών παραμέτρων της πρόγνωσης του SPI-12 για χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$ για την περίοδο βελτιστοποίησης και χρονικής πιστοποίησης των σταθμών ανάπτυξης, και τη χωροχρονική περίοδο των σταθμών πιστοποίησης. Στον ίδιο πίνακα, παρουσιάζονται τα στατιστικά κριτήρια για το μοντέλο εμμονής (Persistence model). Όπως φαίνεται από τον παρακάτω πίνακα, η μέθοδος DANN βελτιώνει κατά πολύ τα στατιστικά κριτήρια πρόγνωσης του SPI-12 για χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$ σε σχέση με την μέθοδο αναφοράς αφού παρουσιάζει σημαντική αύξηση σε όλα τα κριτήρια και για τις τρεις περιόδους ελέγχου (ανάπτυξη, χρονική πιστοποίηση και χωροχρονική πιστοποίηση). Η ικανότητα πρόγνωσης όπως δίνεται από κριτήριο Skill Score του μέσου τετραγωνισμένου σφάλματος (SS_{MSE}) και μέθοδο αναφοράς το Persistence μοντέλο δείχνει ότι η μέθοδος DANN παρουσιάζει βελτίωση στην πρόγνωση του SPI-12 _{$t+1$} και για τις τρεις περιόδους ελέγχου (Πίνακας 7.15). Το Σχήμα 7.22 παρουσιάζει τις προγνώσεις του SPI-12 για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης και διαπιστώνεται ότι το μοντέλο DANN κρίνεται πολύ ικανοποιητικό. Παρατηρείται όμως ότι το μοντέλο δεν μπορεί να προσομοιώσει αρκετά καλά το εύρος του SPI αφού η τιμή της τυπικής απόκλισης των προβλέψεων είναι 0.96 που είναι λίγο μικρότερη της θεωρητικής τιμής των παρατηρημένων τιμών ($\sigma_{SPI}=1$). Για την καλύτερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων πρόγνωσης υπολογίστηκε ο πίνακας ποιοτικής αξιολόγησης συμβάντων ξηρασίας με βάση τον Πίνακα 7.5. Τα στοιχεία του Πίνακα 7.5 παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.16 για τα μοντέλα DANN και Persistence. Με βάση τα στοιχεία του Πίνακα 7.16 υπολογίστηκαν τα ποιοτικά κριτήρια πρόγνωσης ξηρασίας για το SPI-12 _{$t+1$} που παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.17. Η υπεροχή της μεθόδου DANN που εμφανίζεται από τα ποσοτικά στατιστικά κριτήρια, δεν είναι τόσο εμφανής στα ποιοτικά στατιστικά κριτήρια αναγνώρισης των επεισοδίων ξηρασίας για χρονικό βήμα πρόγνωσης ενός μήνα. Σε κάποια κριτήρια το μοντέλο εμμονής παρουσιάζεται καλύτερο (Bias, πιθανότητα ανίχνευσης επεισοδίων) αλλά έχει και μεγάλο αριθμό λανθασμένων συναγεργμών. Γενικά, όπως φαίνεται το δείκτη κρίσιμης επιτυχίας CSI η μέθοδος DANN υπερτερεί ελαφρώς της μεθόδου αναφοράς και έχει καλύτερη ακρίβεια πρόγνωσης επεισοδίων ξηρασίας ενώ η ικανότητα της μεθόδου DANN να διακρίνει ξεκάθαρα τα επεισόδια ξηρασίας από τα μη-επεισόδια είναι ανάλογη του μοντέλου εμμονής. Η αναλογία πιθανοτήτων OR για τη μέθοδο DANN δείχνει ότι οι πιθανότητες πρόβλεψης μία πρόγνωση να είναι σωστή είναι τουλάχιστον 116 φορές μεγαλύτερη από την πιθανότητα να είναι λανθασμένη πρόγνωση. Η αντίστοιχη αναλογία πιθανοτήτων είναι λίγο μικρότερη για τη μέθοδο Persistence (100 φορές μεγαλύτερη πιθανότητα η πρόβλεψη να είναι σωστή) (Πίνακας 7.17).

Πίνακας 7.15. Στατιστικά αποτελέσματα πρόγνωσης SPI-12 _{$t+1$} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης

Κριτήριο	Εκπαίδευση	DANN			Persistence	
		Χρονική Πιστοποίηση	Χωροχρονική Πιστοποίηση	Εκπαίδευση	Χρονική Πιστοποίηση	Χωροχρονική Πιστοποίηση
Eff	0.93	0.91	0.92	0.88	0.85	0.88
R	0.96	0.95	0.96	0.94	0.93	0.94
RMSE	0.28	0.27	0.29	0.36	0.34	0.35
MAE	0.21	0.20	0.21	0.25	0.24	0.25
SS_{MSE}	0.39	0.36	0.34	Μοντέλο αναφοράς		

Πίνακας 7.16. Ποιοτικός πίνακας αξιολόγησης πρόγνωσης συμβάντων ξηρασίας για SPI-12_{t+1} (SPI≤-1).

Στοιχεία*	DANN				Persistence	
	Εκπαίδευση	Χρονική Πιστοποίηση	Χωροχρονική Πιστοποίηση	Εκπαίδευση	Χρονική Πιστοποίηση	Χωροχρονική Πιστοποίηση
A	2193	534	1079	2210	570	1109
C	376	117	192	517	175	254
B	556	194	285	539	158	255
D	13675	4915	6904	13534	4857	6842

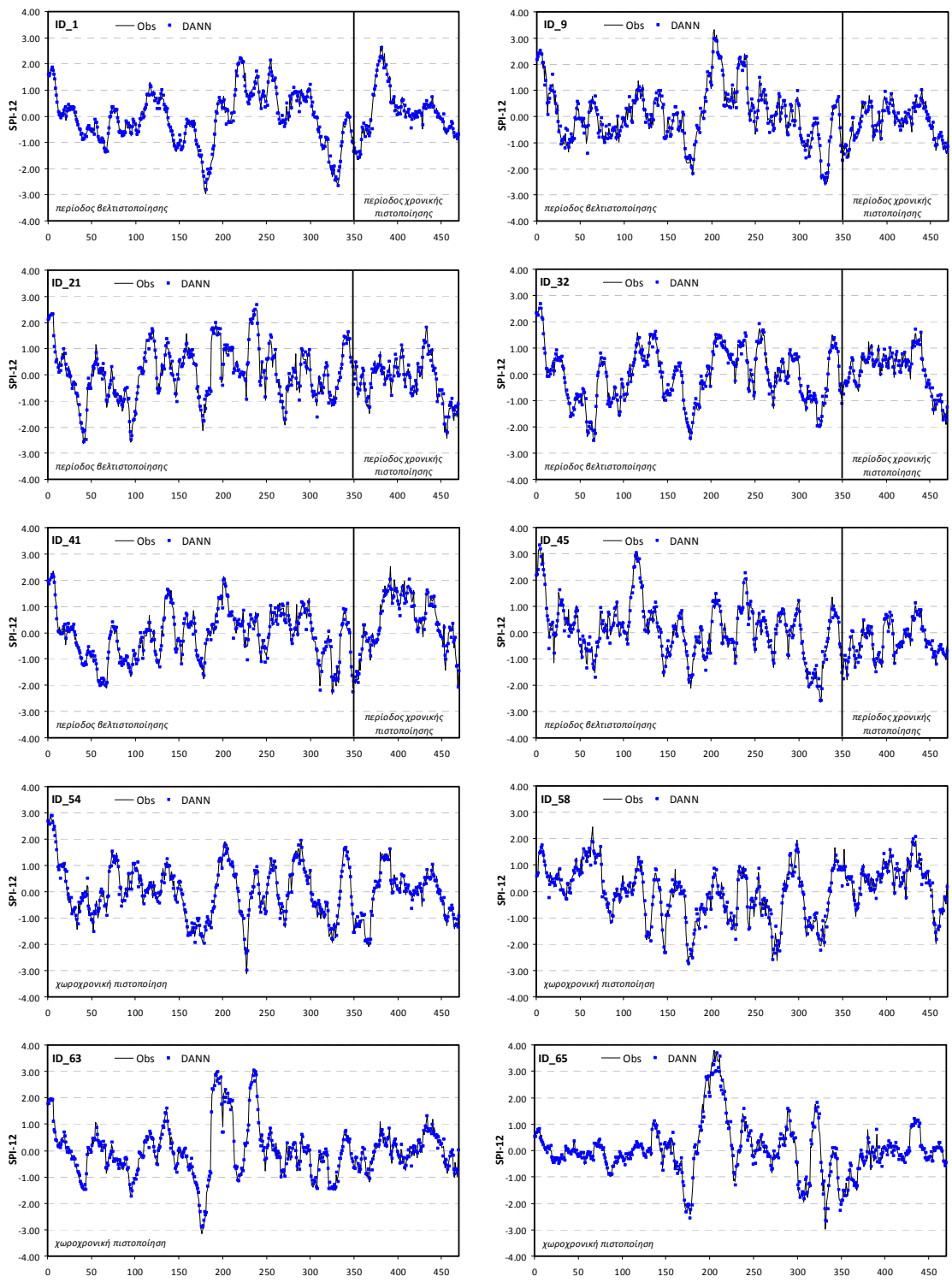
*A=επιτυχίες, B=ασοχίες, C=λανθασμένοι συναγερμοί, και D=σωστά μη επεισόδια ξηρασίας

Πίνακας 7.17. Στατιστικά αποτελέσματα ποιοτικής πρόγνωσης SPI-12_{t+1} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης

Κριτήριο	DANN				Persistence	
	Εκπαίδευση	Χρονική Πιστοποίηση	Χωροχρονική Πιστοποίηση	Εκπαίδευση	Χρονική Πιστοποίηση	Χωροχρονική Πιστοποίηση
Accuracy	0.94	0.95	0.94	0.94	0.94	0.94
Bias	0.93	0.89	0.93	0.99	1.02	1.00
POD	0.80	0.73	0.79	0.80	0.78	0.81
FAR	0.15	0.18	0.15	0.19	0.23	0.19
POFD	0.03	0.02	0.03	0.04	0.03	0.04
CSI	0.70	0.63	0.69	0.68	0.63	0.69
HK	0.77	0.71	0.76	0.77	0.75	0.78
OR	143.45	115.63	136.14	107.33	100.13	117.15

7.6.2. Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+2, SPI-12_{t+2}

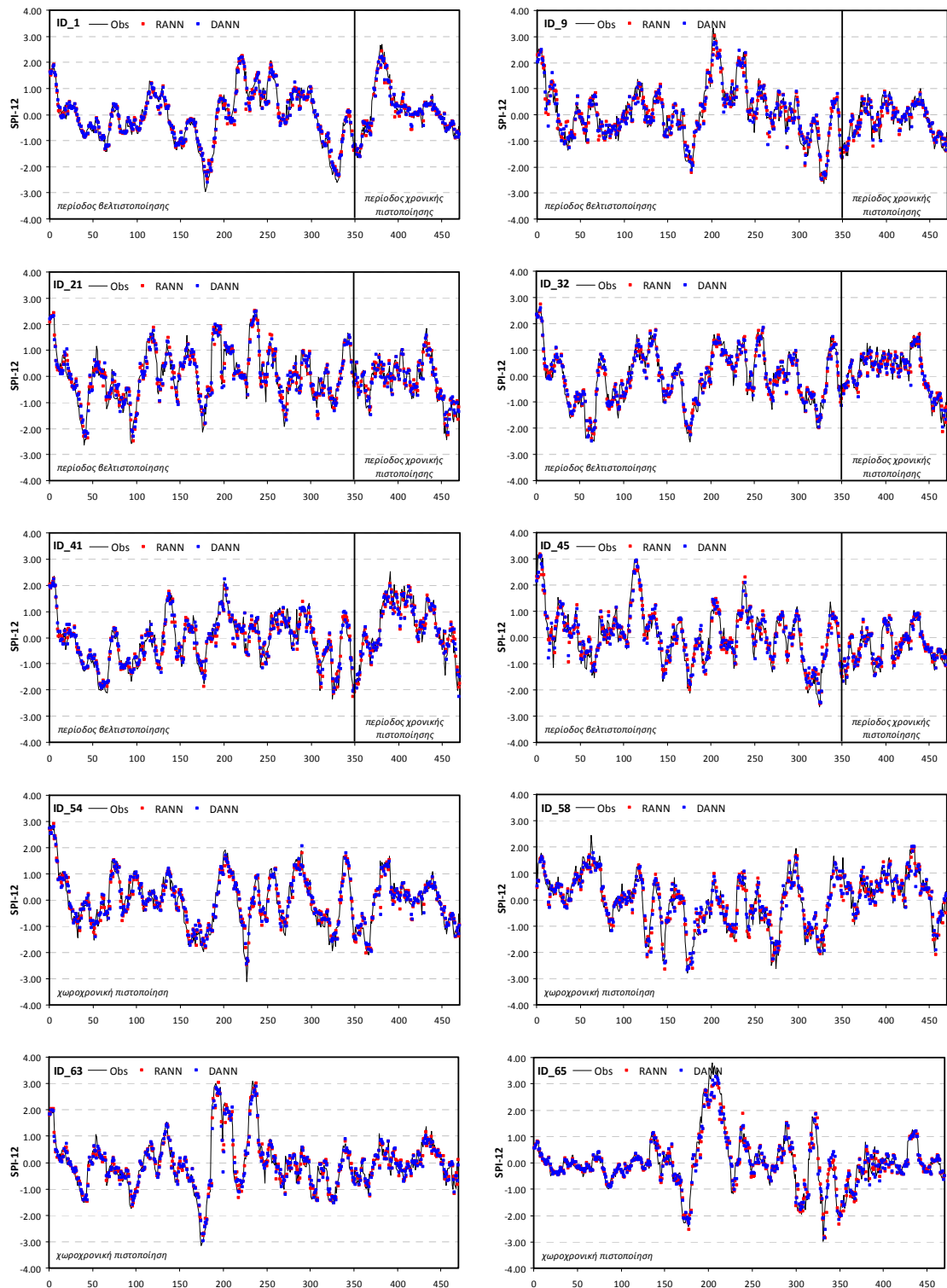
Για το δεύτερο χρονικό βήμα πρόγνωσης t+2, δύο μεθοδολογίες πρόγνωσης με τα νευρωνικά δίκτυα εφαρμόστηκαν: η μέθοδος DANN (ευθεία πρόγνωση του χρονικού βήματος) και η μέθοδος RANN, όπου τα αποτελέσματα των προγνώσεων του χρονικού βήματος t+1 ενσωματώνονται στο μοντέλο για την πρόβλεψη του χρονικού βήματος t+2. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των στατιστικών παραμέτρων της πρόγνωσης του SPI-12 για χρονικό βήμα πρόγνωσης t+2 για τις τρεις περιόδους ελέγχου (εκπαίδευση, χρονική πιστοποίηση και χωροχρονική πιστοποίηση) παρουσιάζονται στο Παράρτημα Ι. Τα ποσοτικά στατιστικά αποτελέσματα δείχνουν ότι οι μέθοδοι DANN και RANN βελτιώνουν την πρόγνωση του SPI-12_{t+2} σε σχέση με τη μέθοδο αναφοράς αφού όλες οι ποσοτικές στατιστικές παράμετροι βελτιώνονται σημαντικά για τις τρεις περιόδους ελέγχου. Η ικανότητα πρόγνωσης όπως δίνεται από κριτήριο Skill Score του μέσου τετραγωνισμένου σφάλματος (SS_{MSE}) και μέθοδο αναφοράς το μοντέλο Persistence δείχνει ότι οι μέθοδοι DANN και RANN παρουσιάζουν βελτίωση στην πρόγνωση του SPI-12_{t+2} και για τις τρεις περιόδους ελέγχου. Η μέθοδος RANN εμφανίζεται και πάλι καλύτερη από τη μέθοδο DANN για βήμα πρόγνωσης t+2. Το Σχήμα 7.23 παρουσιάζει τις προγνώσεις του SPI-12_{t+2} για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης για τις μεθόδους DANN και RANN. Παρατηρείται όμως ότι τα μοντέλα δεν μπορεί να προσομοιώσουν αρκετά καλά τις ακραίες τιμές του SPI και γενικά υποεκτιμούν το εύρος του SPI αφού η τιμή της τυπικής απόκλισης των προβλέψεων είναι 0.92 και για τις δύο τεχνικές των νευρωνικών δικτύων (Σχήμα 7.23). Τα αποτελέσματα της ποιοτικής αξιολόγησης συμβάντων ξηρασίας για SPI≤1 παρουσιάζονται επίσης στο Παράρτημα Ι για τα μοντέλα DANN, RANN και Persistence. Από τα στοιχεία αυτά φαίνεται ότι τα μοντέλα DANN και RANN μπορούν να χρησιμοποιηθούν επιχειρησιακά για πρόγνωση του SPI-12_{t+2} αφού παρουσιάζουν παραπλήσιο αριθμό επιτυχιών και αποτυχιών με τη μέθοδο αναφοράς και μικρότερο αριθμό λανθασμένων συναγερμών.



Σχήμα 7.22. Διαγράμματα χρονοσειρών πρόγνωσης του $SPI-12_{t+1}$ για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.

Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγουν και τα ποιοτικά κριτήρια πρόγνωσης ξηρασίας που παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.38. Παρόλα αυτά η υπεροχή των μεθόδων RANN και DANN σε σχέση με το μοντέλο αναφοράς δεν είναι τόσο εμφανής όσο στα ποσοτικά στατιστικά χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν παραπάνω. Ο δείκτης κρίσιμης επιτυχίας δείχνει ότι και οι δύο τεχνικές (DANN και RANN) μπορούν να

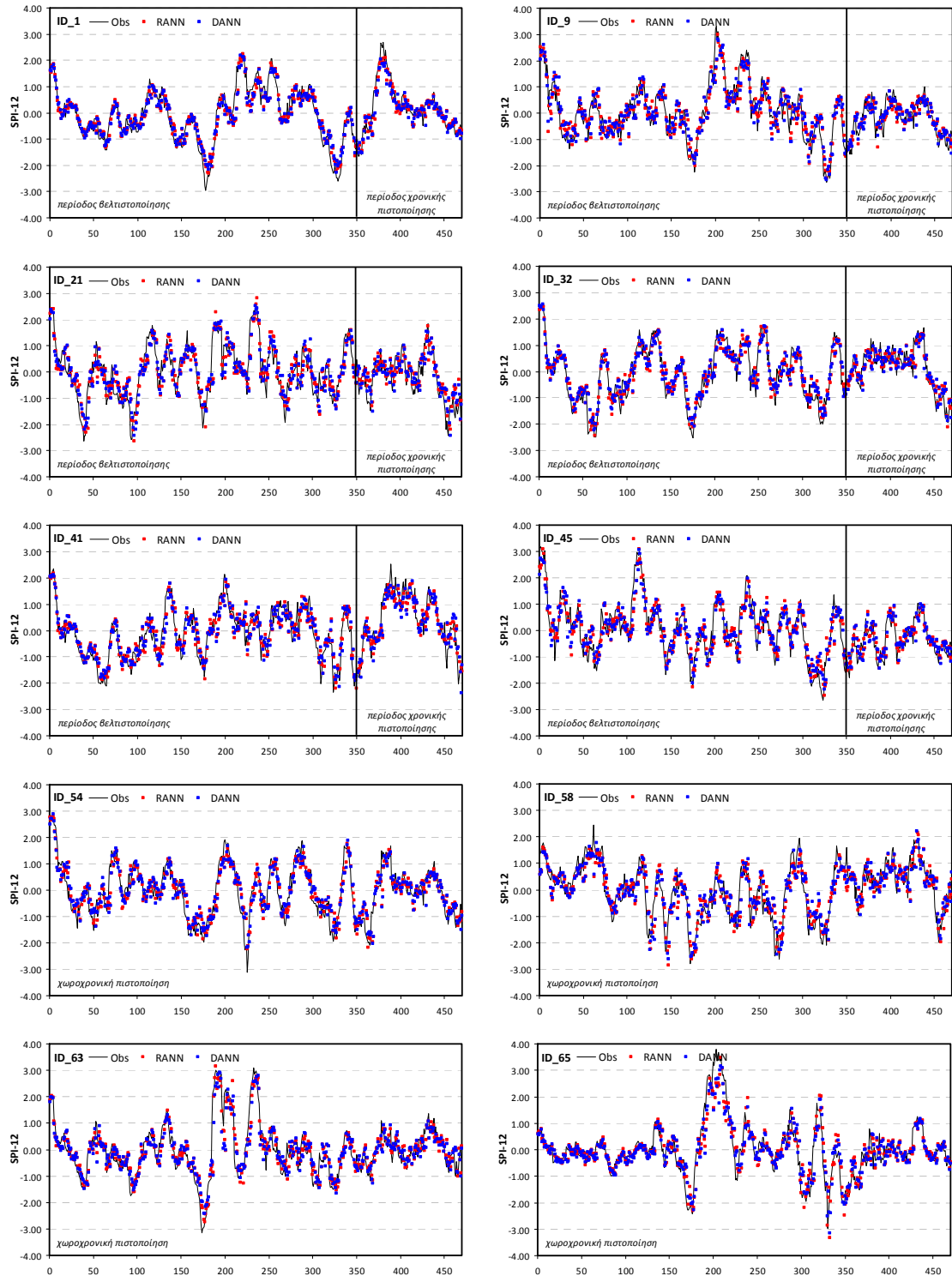
χρησιμοποιηθούν σε συστήματα διαχείρισης της ξηρασίας με βάση το SPI-12μηνών για προγνώσεις μέχρι και δύο μήνες μπροστά (βλ. Παράρτημα).



Σχήμα 7.23. Διαγράμματα χρονοσειρών πρόγνωσης του $SPI-12_{t+2}$ για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.

7.6.3. Χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+3$, SPI-12 $_{t+3}$

Οι δύο τεχνικές πρόγνωσης με τα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιήθηκαν για την πρόγνωση του τρίτου χρονικού βήματος $t+3$. Στη μέθοδο RANN, τα αποτελέσματα των προγνώσεων του χρονικού βήματος $t+2$ ενσωματώθηκαν στο μοντέλο για την πρόβλεψη του χρονικού βήματος $t+3$. Το Σχήμα 7.24 παρουσιάζει τις χρονοσειρές των προγνώσεων του SPI-12 $_{t+3}$ για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης για τις μεθόδους DANN και RANN.

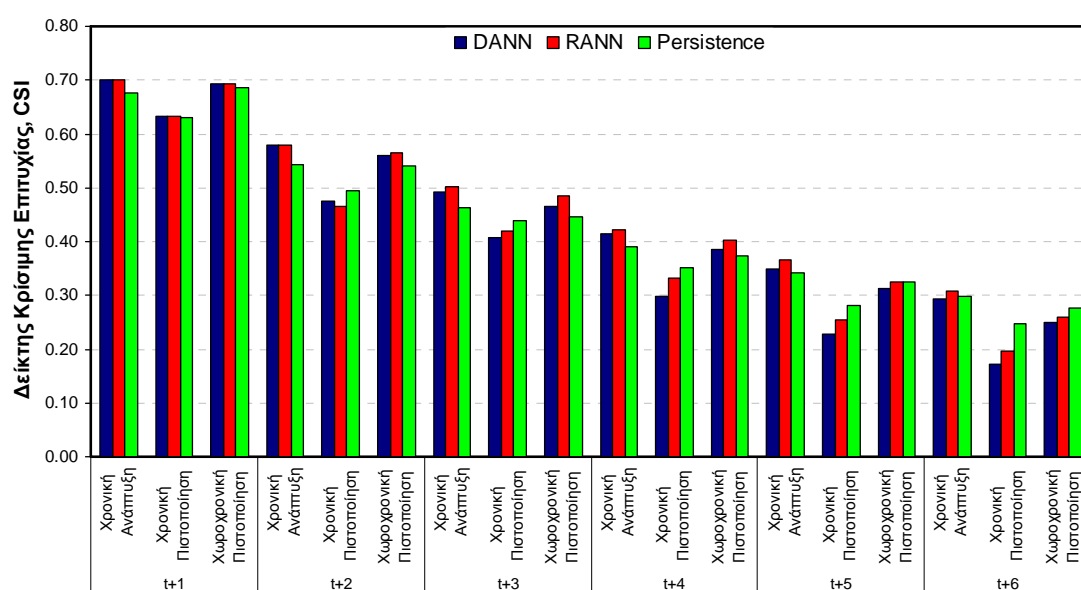


Σχήμα 7.24. Διαγράμματα χρονοσειρών πρόγνωσης του SPI-12 $_{t+3}$ για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.

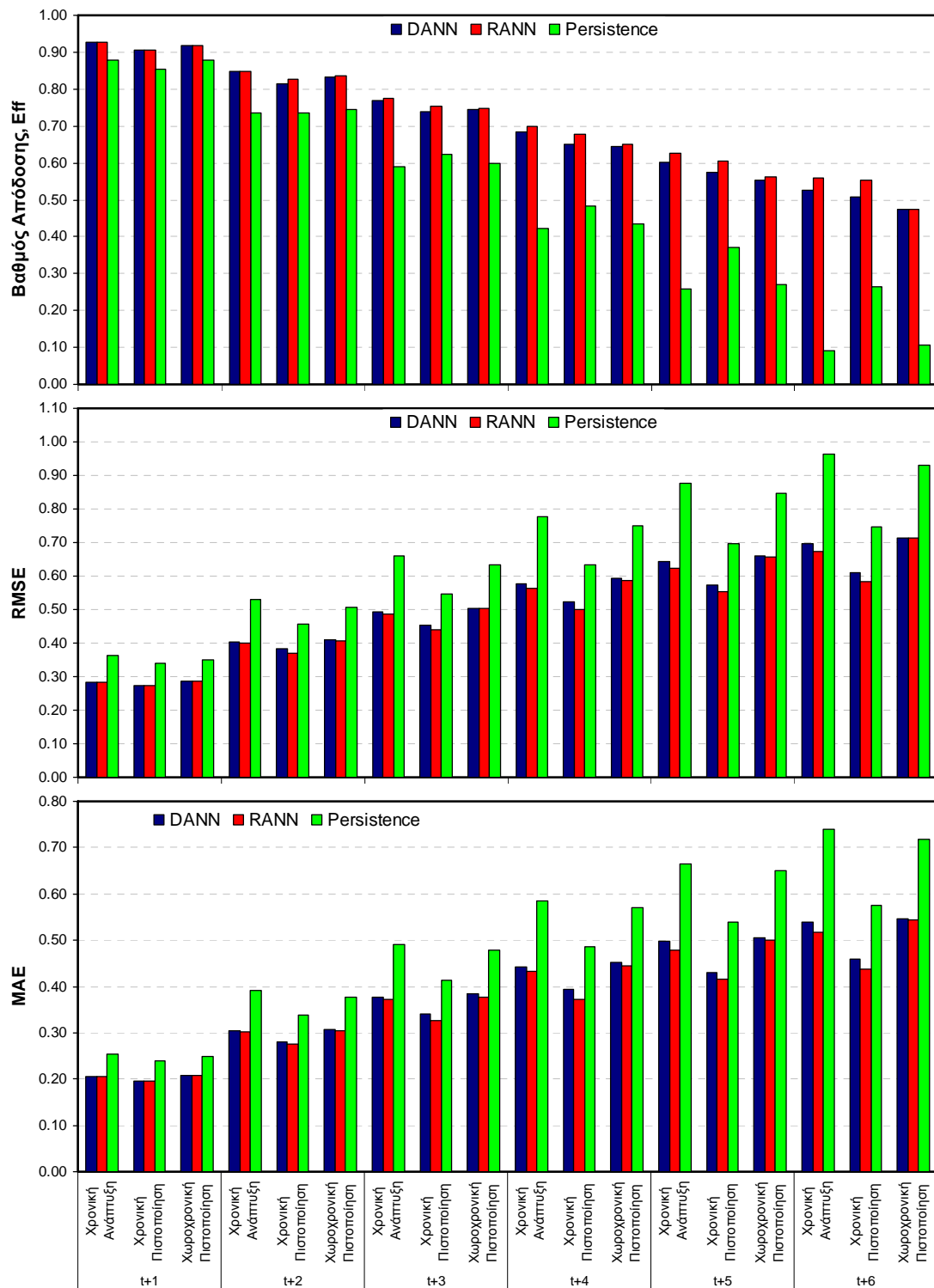
Οι μέθοδοι DANN και RANN βελτιώνουν την πρόγνωση του SPI-12_{t+3} σε σχέση με την μέθοδο αναφοράς αφού όλες οι στατιστικές παράμετροι βελτιώνονται σημαντικά για τις τρεις περιόδους ελέγχου (εκπαίδευση, χρονική πιστοποίηση και χωροχρονική πιστοποίηση). Η ικανότητα πρόγνωσης όπως δίνεται από κριτήριο Skill Score του μέσου τετραγωνισμένου σφάλματος (SS_{MSE}) και μέθοδο αναφοράς το μοντέλο Persistence δείχνει ότι οι μέθοδοι DANN και RANN παρουσιάζουν βελτίωση στην πρόγνωση του SPI-12_{t+3} και για τις τρεις περιόδους ελέγχου. Η μέθοδος RANN εμφανίζεται και πάλι καλύτερη από τη μέθοδο DANN για βήμα πρόγνωσης $t+3$. Παρατηρείται όμως ότι τα μοντέλα DANN και RANN δεν μπορούν να προσομοιώσουν αρκετά καλά τις ακραίες τιμές του SPI και γενικά υποεκτιμούν το εύρος του SPI αφού η τιμή της τυπικής απόκλισης των προβλέψεων είναι μικρότερη των παρατηρούμενων τιμών του SPI-12 και ίση με 0.87 και 0.88 αντίστοιχα, για τις δύο μεθόδους (Σχήμα 7.24). Τα ποιοτικά στατιστικά κριτήρια αξιολόγησης των προγνώσεων επεισοδίων ξηρασίας δείχνουν ότι τα μοντέλα DANN και RANN μπορούν να χρησιμοποιηθούν επιχειρησιακά για πρόγνωση του SPI-12_{t+3}. Η υπεροχή της μεθόδου RANN έναντι των μεθόδων DANN και Persistence είναι εμφανής σε κάποια στατιστικά χαρακτηριστικά (Accuracy, FAR, POFD, HK, OR) και ο δείκτης κρίσιμης επιτυχίας CSI υποδεικνύει ότι η μέθοδος RANN μπορεί οριακά να χρησιμοποιείται σε συστήματα διαχείρισης της ξηρασίας με βάση το SPI-12μηνών για προγνώσεις μέχρι και τρεις μήνες μπροστά (βλ. Παράρτημα).

7.6.4. Χρονικά βήματα πρόγνωσης μεγαλύτερα από 3 μήνες του SPI-12

Για χρονικά διαστήματα πρόγνωσης μεγαλύτερα των τριών μηνών η πρόγνωση του SPI-12 μηνών με τα μοντέλα DANN και RANN, όπως φαίνεται από τα προηγούμενα διαστήματα πρόγνωσης, αναμένεται να μην μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιχειρησιακά σε συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης. Τα Σχήματα 7.25 και 7.26 παρουσιάζουν αντίστοιχα, τον δείκτη κρίσιμης επιτυχίας αναγνώρισης επεισοδίων ξηρασίας (CSI) και τις κύριες ποσοτικές στατιστικές παραμέτρους (Eff, RMSE και MAE) για όλα τα βήματα πρόγνωσης από ένα έως έξι μήνες. Τα παρακάτω σχήματα επιβεβαιώνουν ότι τα μοντέλα DANN και RANN δεν μπορούν να προβλέψουν έγκαιρα τα αναγνωρισμένα επεισόδια ξηρασίας για χρονικά βήματα πρόγνωσης μεγαλύτερα από δύο μήνες αφού παρουσιάζουν δείκτη κρίσιμης επιτυχίας CSI μικρότερο του 0.5 για μεσοπρόθεσμα διαστήματα πρόγνωσης (3-6 μήνες). Διακρίνεται όμως ξεκάθαρα ότι το μοντέλο RANN μπορεί να χρησιμοποιηθεί με αρκετή επιφύλαξη για πρόγνωση 3-μηνών μπροστά αφού η τιμή του δείκτη κρίσιμης επιτυχίας CSI είναι μεγαλύτερη από 0.5 μόνο για τους σταθμούς εκπαίδευσης της περιόδου βελτιστοποίησης (Σχήμα 7.25).



Σχήμα 7.25. Δείκτης κρίσιμης επιτυχίας αναγνώρισης επεισοδίων ξηρασίας του SPI-12 για όλα τα χρονικά βήματα πρόγνωσης.



Σχήμα 7.26. Συνολικά ποσοτικά στατιστικά κριτήρια πρόγνωσης του SPI-12 για όλα τα χρονικά βήματα πρόγνωσης.

7.7. Χρονική πρόγνωση SPI-24μηνών

Οι χρονικές μεθοδολογίες πρόγνωσης DANN και RANN εφαρμόστηκαν για βραχυπρόθεσμες (1-2 μήνες μπροστά) και μεσοπρόθεσμες προγνώσεις (3-6 μήνες μπροστά) του SPI-24. Λόγω του μεγάλου πλήθους

των αποτελεσμάτων τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικά για χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$ και περιληπτικά για τα υπόλοιπα βήματα πρόγνωσης. Τα αποτελέσματα για μεγαλύτερα βήματα πρόγνωσης παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα.

7.7.1. Χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$, SPI-24 _{$t+1$}

Το Σχήμα 7.27 παρουσιάζει τις προγνώσεις του SPI-24 για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης και διαπιστώνεται ότι το μοντέλο DANN κρίνεται πάρα πολύ ικανοποιητικό. Ο Πίνακας 7.18 παρουσιάζει τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των στατιστικών παραμέτρων της πρόγνωσης του SPI-24 για χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$ για την περίοδο βελτιστοποίησης και χρονικής πιστοποίησης των σταθμών ανάπτυξης, και τη χωροχρονική περίοδο των σταθμών πιστοποίησης. Στον ίδιο πίνακα, παρουσιάζονται τα στατιστικά κριτήρια για το μοντέλο εμμονής (Persistence model). Όπως φαίνεται από τον παρακάτω πίνακα, η μέθοδος DANN βελτιώνει τα στατιστικά κριτήρια πρόγνωσης του SPI-24 για χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$ σε σχέση με την μέθοδο αναφοράς αφού παρουσιάζει μικρή αύξηση σε όλα τα κριτήρια και για τις τρεις περιόδους ελέγχου (ανάπτυξη, χρονική πιστοποίηση και χωροχρονική πιστοποίηση). Η ικανότητα πρόγνωσης όπως δίνεται από κριτήριο Skill Score του μέσου τετραγωνισμένου σφάλματος (SS_{MSE}) και μέθοδο αναφοράς το Persistence μοντέλο δείχνει ότι η μέθοδος DANN παρουσιάζει βελτίωση στην πρόγνωση του SPI-24 _{$t+1$} και για τις τρεις περιόδους ελέγχου (Πίνακας 7.18). Παρατηρείται επίσης ότι το μοντέλο προσομοιώνει αρκετά καλά το εύρος του SPI αφού η τιμή της τυπικής απόκλισης των προβλέψεων είναι 0.97 που είναι λίγο μικρότερη της θεωρητικής τιμής των παρατηρημένων τιμών ($\sigma_{SPI}=1$) (Σχήμα 7.31). Για την καλύτερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων πρόγνωσης υπολογίστηκε ο πίνακας ποιοτικής αξιολόγησης συμβάντων ξηρασίας με βάση τον Πίνακα 7.5. Τα στοιχεία του Πίνακα 7.5 παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.19 για τα μοντέλα DANN και Persistence. Με βάση τα στοιχεία του Πίνακα 7.19 υπολογίστηκαν τα ποιοτικά κριτήρια πρόγνωσης ξηρασίας για το SPI-24 _{$t+1$} που παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.20. Η υπεροχή της μεθόδου DANN που εμφανίζεται από τα ποσοτικά στατιστικά κριτήρια, δεν είναι τόσο εμφανής στα ποιοτικά στατιστικά κριτήρια αναγνώρισης των επεισοδίων ξηρασίας για χρονικό βήμα πρόγνωσης ενός μήνα. Σε κάποια κριτήρια η μέθοδος του μοντέλου εμμονής παρουσιάζεται καλύτερη (Bias, πιθανότητα ανίχνευσης επεισοδίων) αλλά έχει και μεγάλο αριθμό λανθασμένων συναγερωμών. Γενικά, όπως φαίνεται το δείκτη κρίσιμης επιτυχίας CSI η μέθοδος DANN υπερτερεί ελαφρώς της μεθόδου αναφοράς και έχει καλύτερη ακρίβεια πρόγνωσης επεισοδίων ξηρασίας ενώ η ικανότητα της μεθόδου DANN να διακρίνει ξεκάθαρα τα επεισόδια ξηρασίας από τα μη-επεισόδια είναι ανάλογη του μοντέλου εμμονής. Η αναλογία πιθανοτήτων OR για τη μέθοδο DANN δείχνει ότι οι πιθανότητες πρόβλεψης μία πρόγνωση να είναι σωστή είναι τουλάχιστον 276 φορές μεγαλύτερη από την πιθανότητα να είναι λανθασμένη πρόγνωση. Η αντίστοιχη αναλογία πιθανοτήτων είναι λίγο μικρότερη για τη μέθοδο Persistence (251 φορές μεγαλύτερη πιθανότητα η πρόβλεψη να είναι σωστή για τους σταθμούς της χωρικής και χρονικής πιστοποίησης) (Πίνακας 7.20).

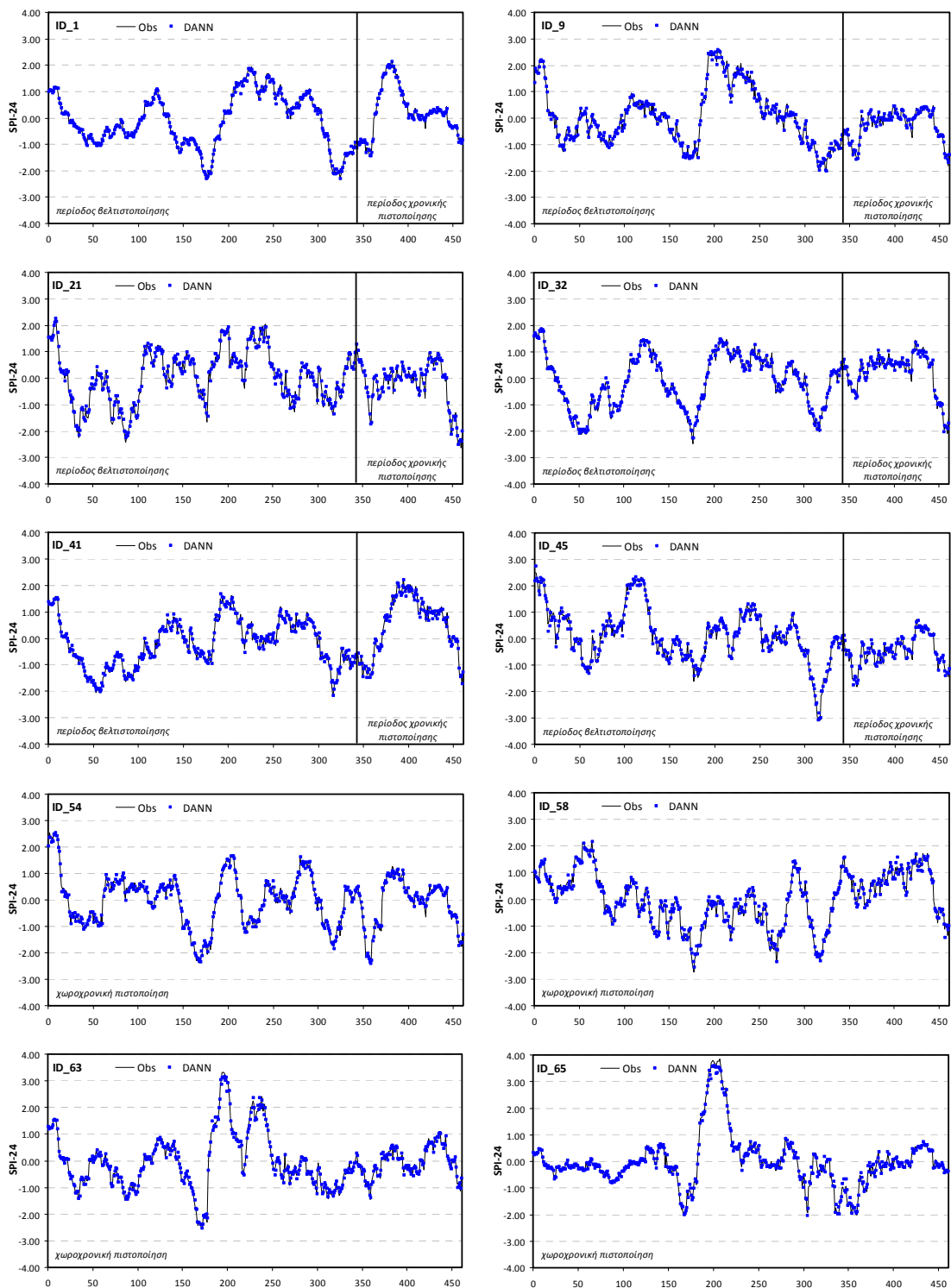
Πίνακας 7.18. Στατιστικά αποτελέσματα πρόγνωσης SPI-24 _{$t+1$} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης

Κριτήριο	Εκπαίδευση	DANN		Εκπαίδευση	Persistence	
		Χρονική Πιστοποίηση	Χωροχρονική Πιστοποίηση		Χρονική Πιστοποίηση	Χωροχρονική Πιστοποίηση
Eff	0.95	0.95	0.95	0.94	0.93	0.94
R	0.98	0.97	0.97	0.97	0.96	0.97
RMSE	0.22	0.22	0.23	0.24	0.25	0.24
MAE	0.16	0.15	0.16	0.17	0.17	0.17
SS_{MSE}	0.15	0.24	0.14	Μοντέλο αναφοράς		

Πίνακας 7.19. Ποιοτικός πίνακας αξιολόγησης πρόγνωσης συμβάντων ξηρασίας για SPI-24_{t+1} (SPI≤-1).

Στοιχεία*	DANN			Persistence		
	Εκπαίδευση	Χρον. Πιστ.	Χωροχ. Πιστ.	Εκπαίδευση	Χρον. Πιστ.	Χωροχ. Πιστ.
A	2475	686	1127	2500	674	1145
C	274	71	141	368	89	172
B	397	92	198	372	104	180
D	13222	4911	6832	13128	4893	6801

*A=επιτυχίες, B=ασοχίες, C=Λανθασμένοι συναγερμοί, και D=σωστά μη επεισόδια ξηρασίας



Σχήμα 7.27. Διαγράμματα χρονοσειρών πρόγνωσης του SPI-24_{t+1} για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.

Πίνακας 7.20. Στατιστικά αποτελέσματα ποιοτικής πρόγνωσης SPI-24_{t+1} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης

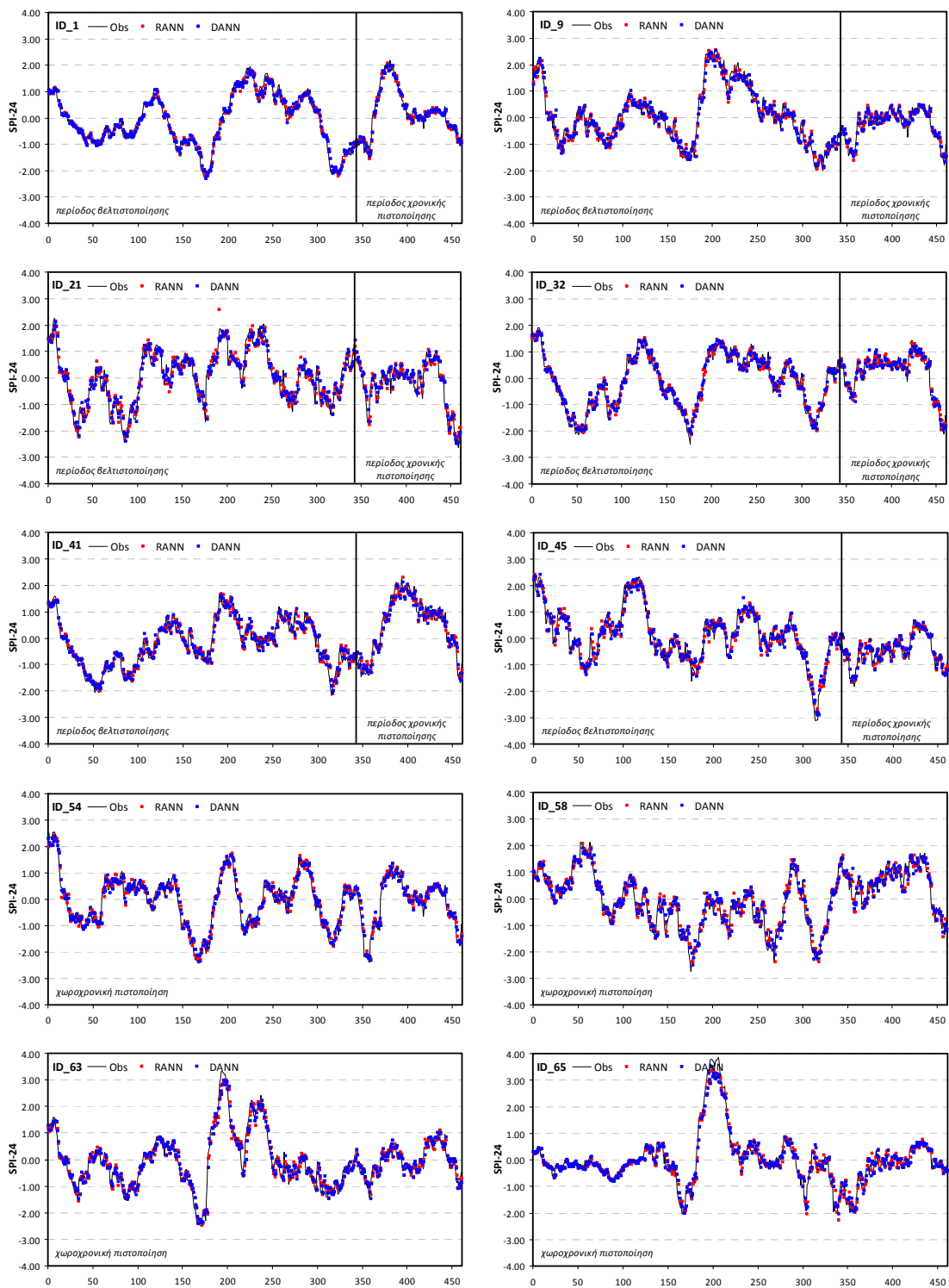
Κριτήριο	DANN			Persistence		
	Εκπαίδευση	Χρονική Πιστοποίηση	Χωροχρονική Πιστοποίηση	Εκπαίδευση	Χρονική Πιστοποίηση	Χωροχρονική Πιστοποίηση
Accuracy	0.96	0.97	0.96	0.95	0.97	0.96
Bias	0.96	0.97	0.96	1.00	0.98	0.99
POD	0.86	0.88	0.85	0.87	0.87	0.86
FAR	0.10	0.09	0.11	0.13	0.12	0.13
POFD	0.02	0.01	0.02	0.03	0.02	0.02
CSI	0.79	0.81	0.77	0.77	0.78	0.76
HK	0.84	0.87	0.83	0.84	0.85	0.84
OR	300.84	515.76	275.80	239.74	356.30	251.52

7.7.2. Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+2, SPI-24_{t+2}

Για το δεύτερο χρονικό βήμα πρόγνωσης t+2, δύο μεθοδολογίες πρόγνωσης με τα νευρωνικά δίκτυα εφαρμόστηκαν: η μέθοδος DANN (ευθεία πρόγνωση του χρονικού βήματος) και η μέθοδος RANN, όπου τα αποτελέσματα των προγνώσεων του χρονικού βήματος t+1 ενσωματώνονται στο μοντέλο για την πρόβλεψη του χρονικού βήματος t+2. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των στατιστικών παραμέτρων της πρόγνωσης του SPI-24 για χρονικό βήμα πρόγνωσης t+2 για τις τρεις περιόδους ελέγχου (εκπαίδευση, χρονική πιστοποίηση και χωροχρονική πιστοποίηση) παρουσιάζονται στο Παράρτημα Ι. Οι μέθοδοι DANN και RANN βελτιώνουν την πρόγνωση του SPI-24_{t+2} σε σχέση με τη μέθοδο αναφοράς αφού όλες οι ποσοτικές στατιστικές παράμετροι βελτιώνονται σημαντικά για τις τρεις περιόδους ελέγχου. Η ικανότητα πρόγνωσης όπως δίνεται από κριτήριο Skill Score του μέσου τετραγωνισμένου σφάλματος (SS_{MSE}) και μέθοδο αναφοράς το μοντέλο Persistence δείχνει ότι οι μέθοδοι DANN και RANN παρουσιάζουν βελτίωση στην πρόγνωση του SPI-24_{t+2} και για τις τρεις περιόδους ελέγχου. Η μέθοδος RANN εμφανίζεται και πάλι καλύτερη από τη μέθοδο DANN για βήμα πρόγνωσης t+2. Το Σχήμα 7.28 παρουσιάζει τις προγνώσεις του SPI-24_{t+2} για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης για τις μεθόδους DANN και RANN. Παρατηρείται όμως ότι τα μοντέλα μπορούν και προσομοιώνουν αρκετά καλά τις ακραίες τιμές του SPI αλλά γενικά υποεκτιμούν το εύρος των τιμών του SPI-24 αφού η μέση τιμή της τυπικής απόκλισης των προβλέψεων είναι 0.94 και για τις δύο τεχνικές των νευρωνικών δικτύων (Σχήμα 7.28). Τα στοιχεία του πίνακα ποιοτικής αξιολόγησης συμβάντων ξηρασίας για $SPI \leq 1$ και τα ποιοτικά στατιστικά κριτήρια παρουσιάζονται επίσης στο Παράρτημα Ι. Από τα στοιχεία αυτά φαίνεται ότι τα μοντέλα DANN και RANN μπορούν να χρησιμοποιηθούν επιχειρησιακά για πρόγνωση του SPI-24_{t+2} αφού παρουσιάζουν παραπλήσιο αριθμό επιτυχιών και αποτυχιών με τη μέθοδο αναφοράς και μικρότερο αριθμό λανθασμένων συναγεμμένων. Παρόλα αυτά η υπεροχή των μεθόδων RANN και DANN σε σχέση με το μοντέλο αναφοράς δεν είναι τόσο εμφανής όσο στα ποσοτικά στατιστικά χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν παραπάνω. Ο δείκτης κρίσιμης επιτυχίας CSI δείχνει ότι και οι δύο τεχνικές (DANN και RANN) μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συστήματα διαχείρισης της ξηρασίας με βάση το SPI-24μηνών για προγνώσεις μέχρι και δύο μήνες μπροστά (βλ. Παράρτημα).

7.7.3. Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+3, SPI-24_{t+3}

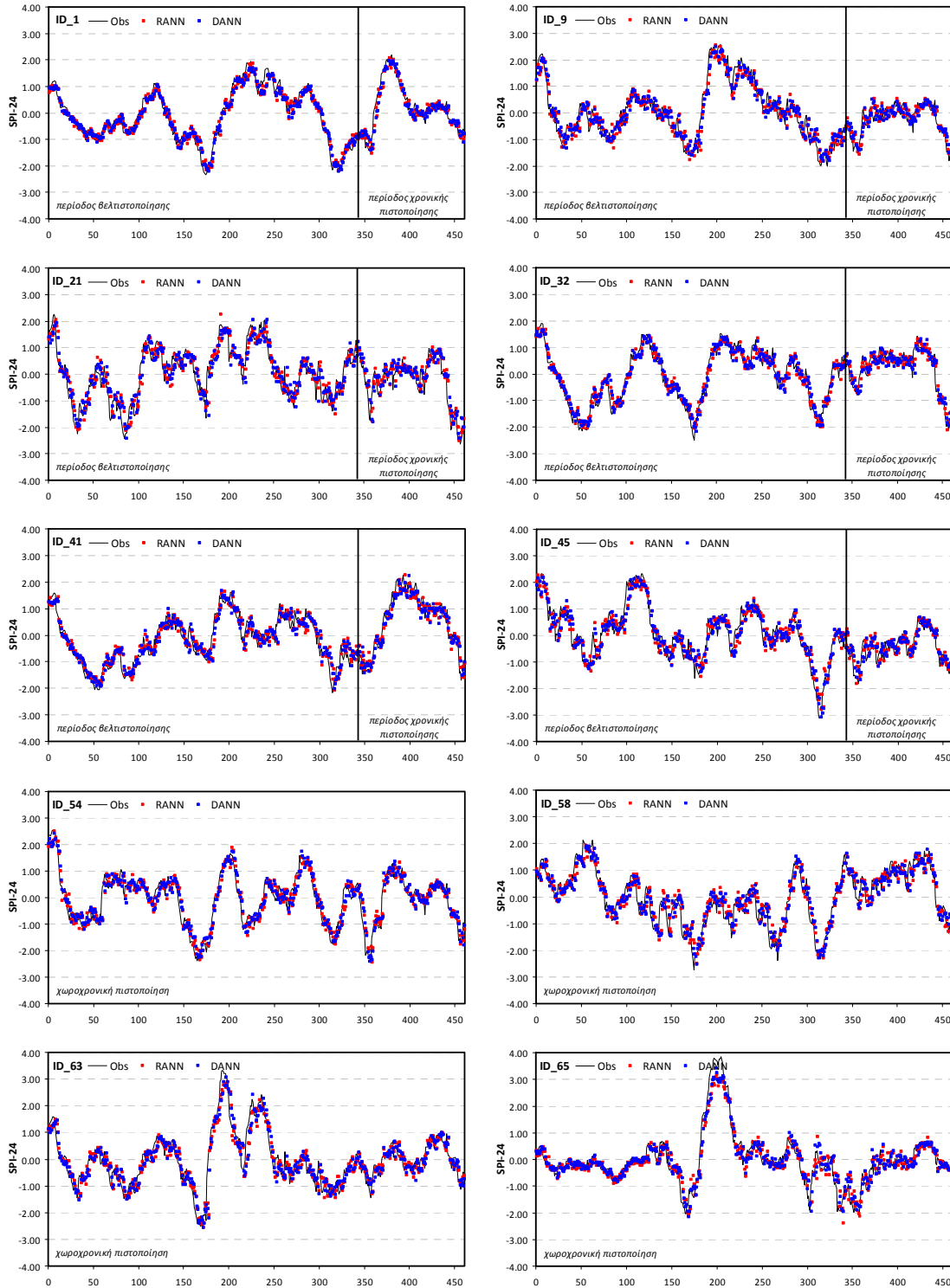
Οι δύο τεχνικές πρόγνωσης με τα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιήθηκαν για την πρόγνωση του τρίτου χρονικού βήματος t+3. Στη μέθοδο RANN, τα αποτελέσματα των προγνώσεων του χρονικού βήματος t+2 ενσωματώθηκαν στο μοντέλο για την πρόβλεψη του χρονικού βήματος t+3. Το Σχήμα 7.29 παρουσιάζει τις χρονοσειρές των προγνώσεων του SPI-24_{t+3} για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης για τις μεθόδους DANN και RANN.



Σχήμα 7.28. Διαγράμματα χρονοσειρών πρόγνωσης του $SPI-24_{t+2}$ για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.

Η αξιολόγηση των ποσοτικών στατιστικών κριτηρίων που παρουσιάζονται στο Παράρτημα Ι δείχνουν ότι οι μέθοδοι DANN και RANN βελτιώνουν την πρόγνωση του $SPI-24_{t+3}$ σε σχέση με την μέθοδο αναφοράς αφού όλες οι στατιστικές παράμετροι βελτιώνονται σημαντικά για τις τρεις περιόδους ελέγχου (εκπαίδευση, χρονική πιστοποίηση και χωροχρονική πιστοποίηση). Η μέθοδος RANN εμφανίζεται και πάλι καλύτερη από τη μέθοδο DANN για βήμα πρόγνωσης $t+3$. Τα μοντέλα DANN και RANN προσομοιώνουν αρκετά καλά τις ακραίες τιμές του SPI αλλά υποεκτιμούν το εύρος του SPI αφού

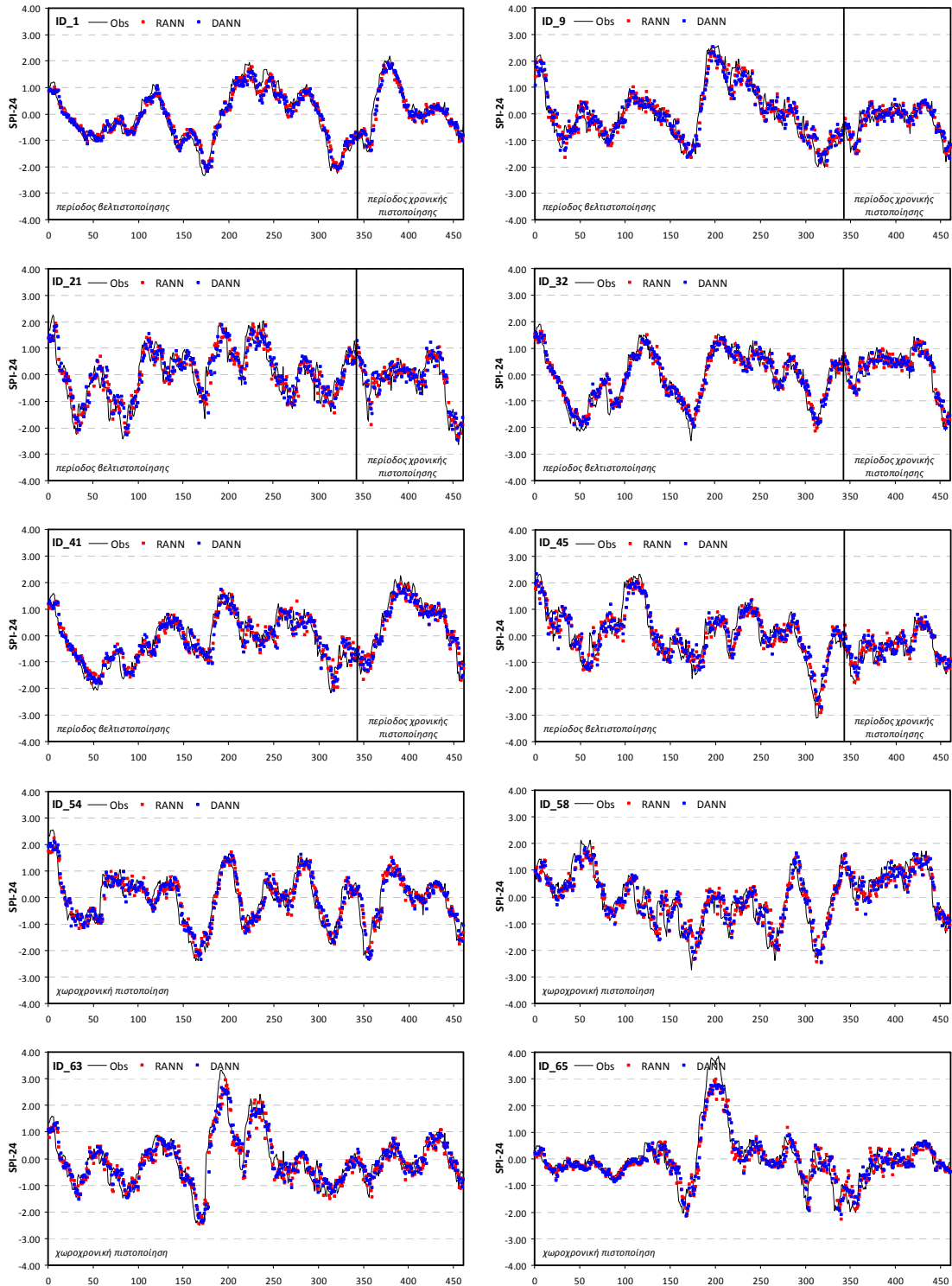
η μέση τιμή της τυπικής απόκλισης των προβλέψεων είναι μικρότερη των παρατηρούμενων τιμών του SPI-24 και ίση με 0.91 και για τις δύο μεθόδους. Τα ποιοτικά στατιστικά κριτήρια αξιολόγησης των προγνώσεων επεισοδίων ξηρασίας των μοντέλων DANN και RANN δείχνουν την υπεροχή της μεθόδου RANN έναντι των μεθόδων DANN και Persistence και ο δείκτης κρίσιμης επιτυχίας CSI υποδεικνύει ότι η μέθοδος RANN πρέπει να χρησιμοποιείται σε συστήματα διαχείρισης της ξηρασίας με βάση το SPI-24μηνών για προγνώσεις μέχρι και τρεις μήνες μπροστά (βλ. Παράρτημα).



Σχήμα 7.29. Διαγράμματα χρονοσειρών πρόγνωσης του SPI-24_{t+3} για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.

7.7.4. Χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+4$, SPI-24 $_{t+4}$

Οι δύο τεχνικές πρόγνωσης με τα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιήθηκαν για την πρόγνωση του τέταρτου χρονικού βήματος $t+4$. Στη μέθοδο RANN, τα αποτελέσματα των προγνώσεων του χρονικού βήματος $t+3$ ενσωματώνονται στο μοντέλο για την πρόβλεψη του χρονικού βήματος $t+4$. Το Σχήμα 7.34 παρουσιάζει τις χρονοσειρές των προγνώσεων του SPI-24 $_{t+4}$ για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης για τις μεθόδους DANN και RANN.



Σχήμα 7.30. Διαγράμματα χρονοσειρών πρόγνωσης του SPI-24 $_{t+4}$ για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.

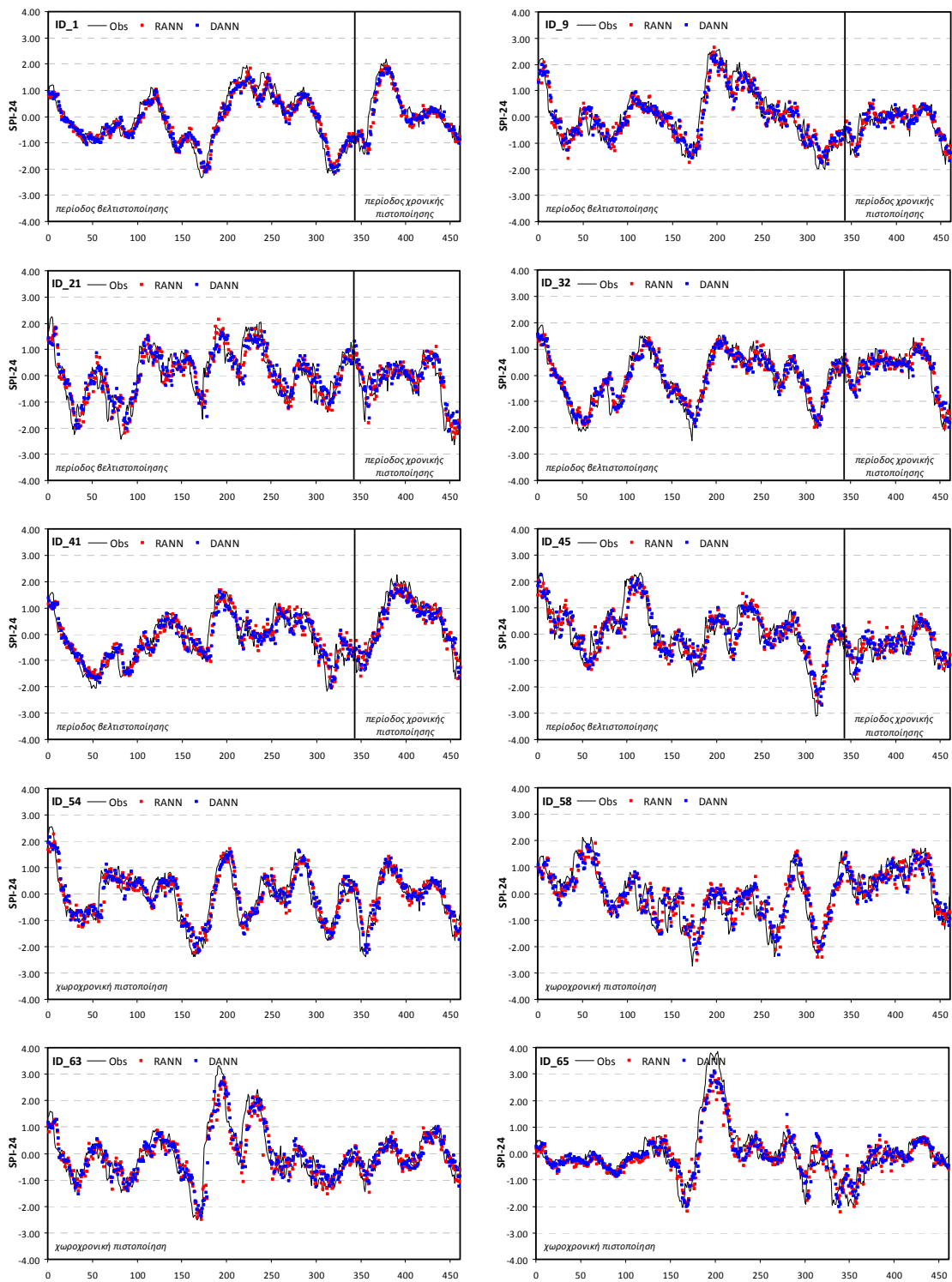
Προσεκτική θεώρηση του Σχήματος 7.34 δείχνει ότι τα μοντέλα DANN και RANN παρουσιάζουν μία υστέρηση σε κάποια γεγονότα ξηρασίας και ενώ προσομοιώνουν ικανοποιητικά το εύρος των τιμών του SPI υποεκτιμούν το SPI αφού η μέση τιμή της τυπικής απόκλισης των προβλέψεων είναι 0.88 και 0.89, αντίστοιχα, για όλους τους σταθμούς εκπαίδευσης και χωρικής πιστοποίησης. Οι μέθοδοι DANN και RANN βελτιώνουν την πρόγνωση του SPI-24_{t+4} σε σχέση με την μέθοδο αναφοράς αφού όλες οι στατιστικές παράμετροι βελτιώνονται σημαντικά και για τις τρεις περιόδους ελέγχου (εκπαίδευση, χρονική πιστοποίηση και χωροχρονική πιστοποίηση). Τα ποιοτικά στατιστικά κριτήρια αξιολόγησης των προγνώσεων επεισοδίων ξηρασίας δείχνουν ότι τα μοντέλα DANN και RANN μπορούν να χρησιμοποιηθούν επιχειρησιακά για πρόγνωση του SPI-24_{t+4} (Πίνακας 7.59). Η υπεροχή της μεθόδου RANN έναντι των μεθόδων DANN και Persistence είναι εμφανής σε κάποια στατιστικά χαρακτηριστικά (Accuracy, FAR, POFD, HK, OR) και ο δείκτης κρίσιμης επιτυχίας CSI υποδεικνύει ότι η μέθοδος RANN πρέπει να χρησιμοποιείται σε συστήματα διαχείρισης της ξηρασίας για προγνώσεις του SPI-24μηνών μέχρι και τέσσερις μήνες μπροστά (βλ. Παράρτημα).

7.7.5. Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+5, SPI-24_{t+5}

Οι δύο τεχνικές πρόγνωσης με τα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιήθηκαν για την πρόγνωση του πέμπτου χρονικού βήματος t+5. Στη μέθοδο RANN, τα αποτελέσματα των προγνώσεων του χρονικού βήματος t+4 ενσωματώθηκαν στο μοντέλο για την πρόβλεψη του χρονικού βήματος t+5. Στο Παράρτημα παρουσιάζονται αναλυτικά τα ποσοτικά και ποιοτικά στατιστικά κριτήρια για τις τρεις περιόδους ελέγχου. Οι μέθοδοι DANN και RANN βελτιώνουν την πρόγνωση του SPI-24_{t+5} σε σχέση με την μέθοδο αναφοράς αφού όλες οι ποσοτικές στατιστικές παράμετροι βελτιώνονται σημαντικά και για τις τρεις περιόδους ελέγχου (εκπαίδευση, χρονική πιστοποίηση και χωροχρονική πιστοποίηση). Η μέθοδος RANN εμφανίζεται και πάλι καλύτερη από τη μέθοδο DANN για βήμα πρόγνωσης t+5. Το Σχήμα 7.31 παρουσιάζει τις χρονοσειρές των προγνώσεων του SPI-24_{t+5} για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης για τις μεθόδους DANN και RANN. Προσεκτική μελέτη του Σχήματος 7.31 δείχνει ότι τα μοντέλα DANN και RANN παρουσιάζουν μία υστέρηση σε κάποια γεγονότα ξηρασίας και ενώ προσομοιώνουν αρκετά ικανοποιητικά το εύρος των τιμών του SPI υποεκτιμούν το SPI αφού η μέση τιμή της τυπικής απόκλισης των προβλέψεων είναι 0.85 και 0.87, αντίστοιχα, για όλους τους σταθμούς εκπαίδευσης και χωρικής πιστοποίησης. Τα ποιοτικά στατιστικά κριτήρια αξιολόγησης των προγνώσεων επεισοδίων ξηρασίας δείχνουν ότι τα μοντέλα DANN και RANN μπορεί να χρησιμοποιηθούν επιχειρησιακά για πρόγνωση του SPI-24_{t+5} αφού παρουσιάζουν λίγο καλύτερα κριτήρια από το μοντέλο εμμονής. Συμπερασματικά, η υπεροχή της μεθόδου RANN έναντι των μεθόδων DANN και Persistence είναι εμφανής σε κάποια στατιστικά χαρακτηριστικά (Accuracy, FAR, POFD, HK, OR) και ο δείκτης κρίσιμης επιτυχίας CSI υποδεικνύει ότι η μέθοδος RANN μπορεί οριακά να χρησιμοποιείται σε συστήματα διαχείρισης της ξηρασίας για προγνώσεις του SPI-24μηνών πέντε μήνες μπροστά (βλ. Παράρτημα).

7.7.6. Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+6, SPI-24_{t+6}

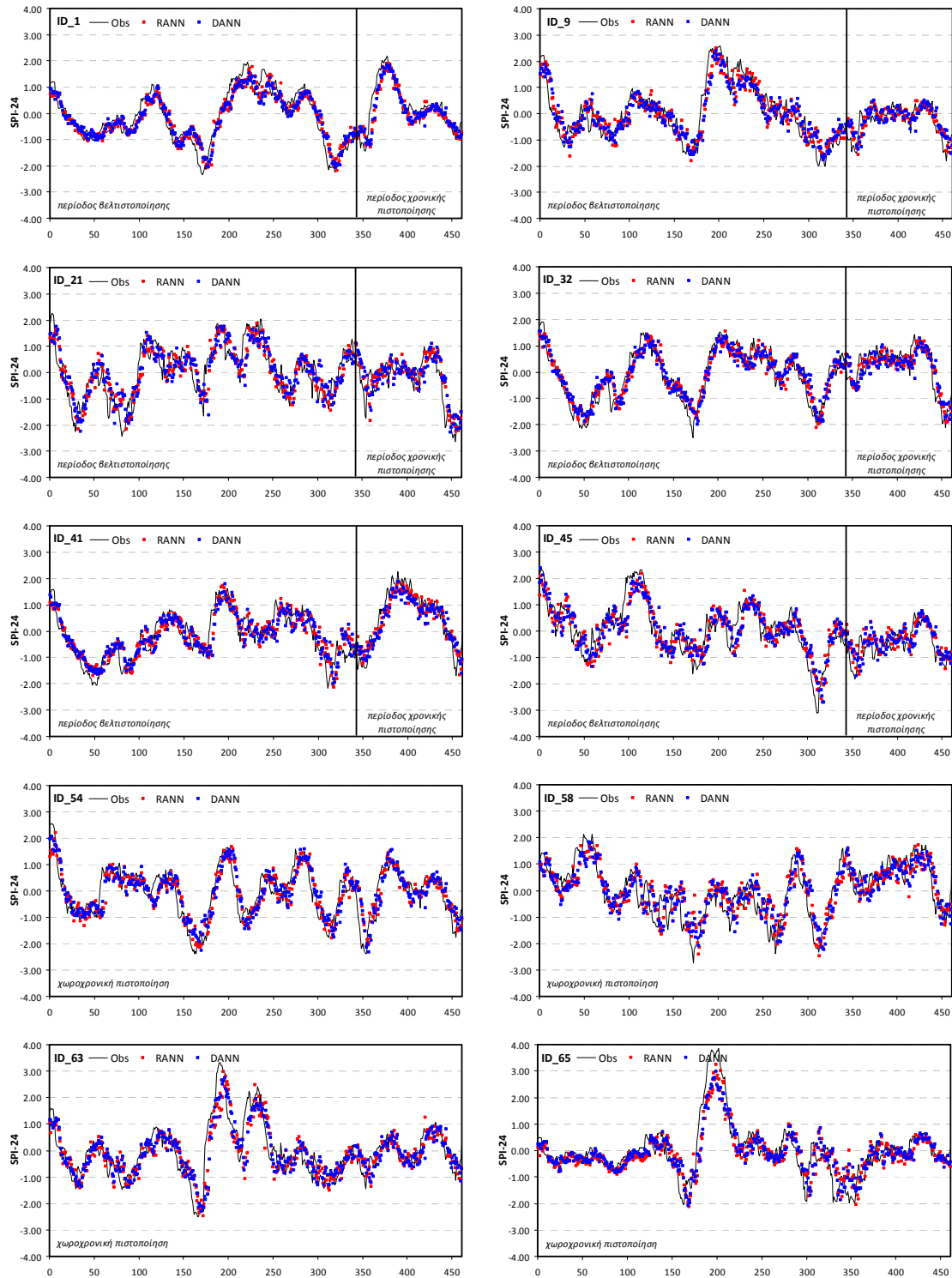
Οι δύο τεχνικές πρόγνωσης με τα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιήθηκαν για την πρόγνωση του έκτου χρονικού βήματος t+6. Στη μέθοδο RANN, τα αποτελέσματα των προγνώσεων του χρονικού βήματος t+5 ενσωματώθηκαν στο μοντέλο για την πρόβλεψη του χρονικού βήματος t+6. Στο Παράρτημα I παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των ποσοτικών και ποιοτικών στατιστικών παραμέτρων της πρόγνωσης του SPI-24 για χρονικό βήμα πρόγνωσης t+6 για τις τρεις περιόδους ελέγχου (εκπαίδευσης, χρονικής πιστοποίησης, χωροχρονικής πιστοποίησης). Οι μέθοδοι DANN και RANN βελτιώνουν την πρόγνωση του SPI-24_{t+6} σε σχέση με το μοντέλο εμμονής αφού όλες οι ποσοτικές στατιστικές παράμετροι βελτιώνονται σημαντικά και για τις τρεις περιόδους ελέγχου. Η μέθοδος RANN εμφανίζεται και πάλι καλύτερη από τη μέθοδο DANN για βήμα πρόγνωσης t+6.



Σχήμα 7.31. Διαγράμματα χρονοσειρών πρόγνωσης του SPI-24_{t+5} για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.

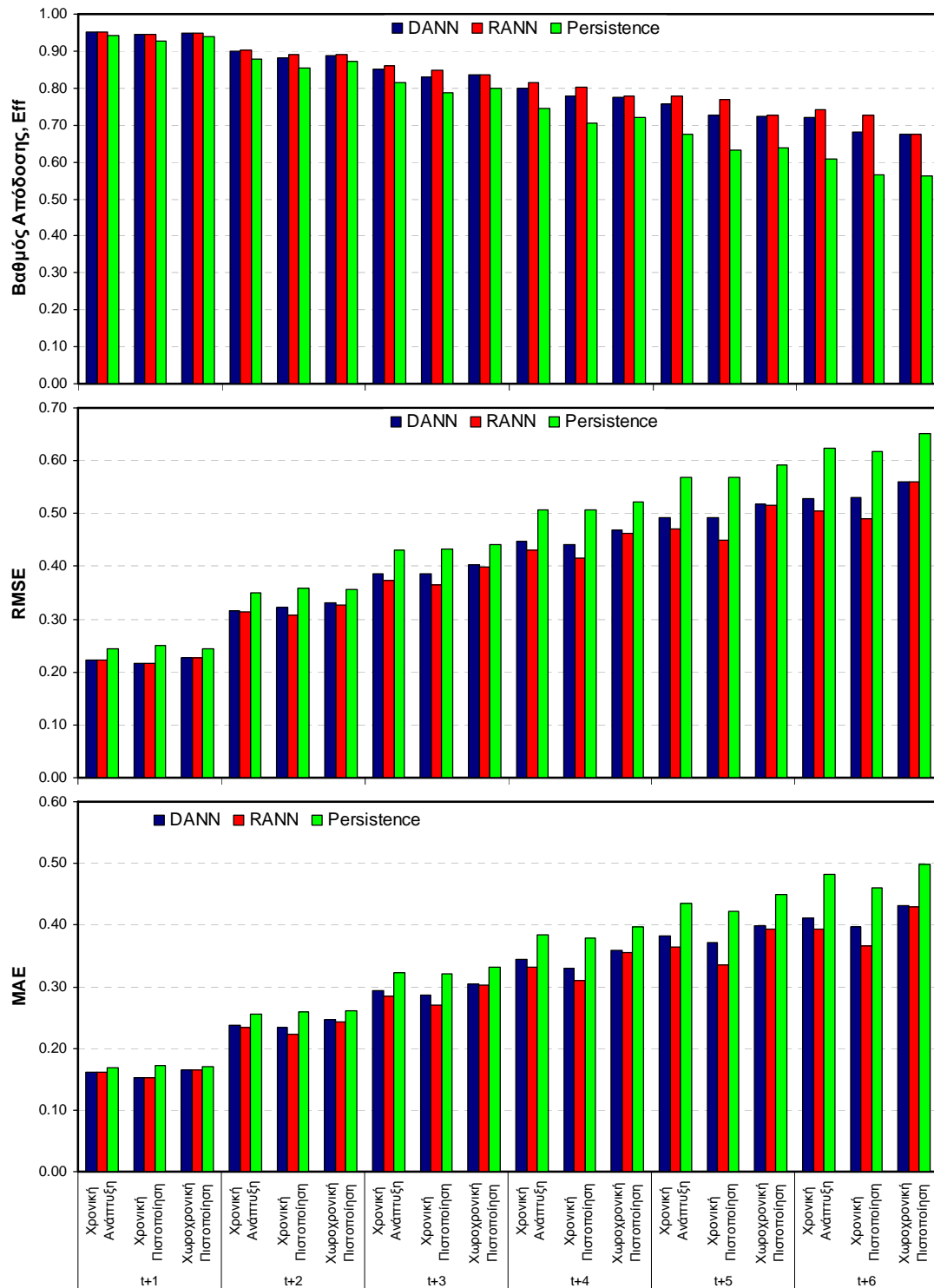
Το Σχήμα 7.32 παρουσιάζει τις χρονοσειρές των προγνώσεων του SPI-24_{t+6} για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης για τις μεθόδους DANN και RANN. Προσεκτική μελέτη του Σχήματος 7.32 δείχνει ότι τα μοντέλα DANN και RANN παρουσιάζουν μία υστέρηση σε κάποια γεγονότα ξηρασίας και ενώ προσομοιώνουν αρκετά ικανοποιητικά το εύρος των τιμών του SPI, υποεκτιμούν το SPI αφού η μέση τιμή της τυπικής απόκλισης των προβλέψεων είναι 0.82 και 0.84, αντίστοιχα, για όλους τους

σταθμούς εκπαίδευσης και χωρικής πιστοποίησης. Τα ποιοτικά στατιστικά κριτήρια αξιολόγησης των προγνώσεων επεισοδίων ξηρασίας δείχνουν ότι το μοντέλο RANN μπορεί οριακά να χρησιμοποιηθεί επιχειρησιακά για πρόγνωση του $SPI-24_{t+6}$ αφού η τιμή του δείκτη κρίσιμης επιτυχίας CSI είναι ίση με 0.5 μόνο για τους σταθμούς ανάπτυξης της περιόδου βελτιστοποίησης αλλά δεν πιστοποιεί χωροχρονικά την αξιοπιστία των προβλέψεων (βλ. Παράρτημα).

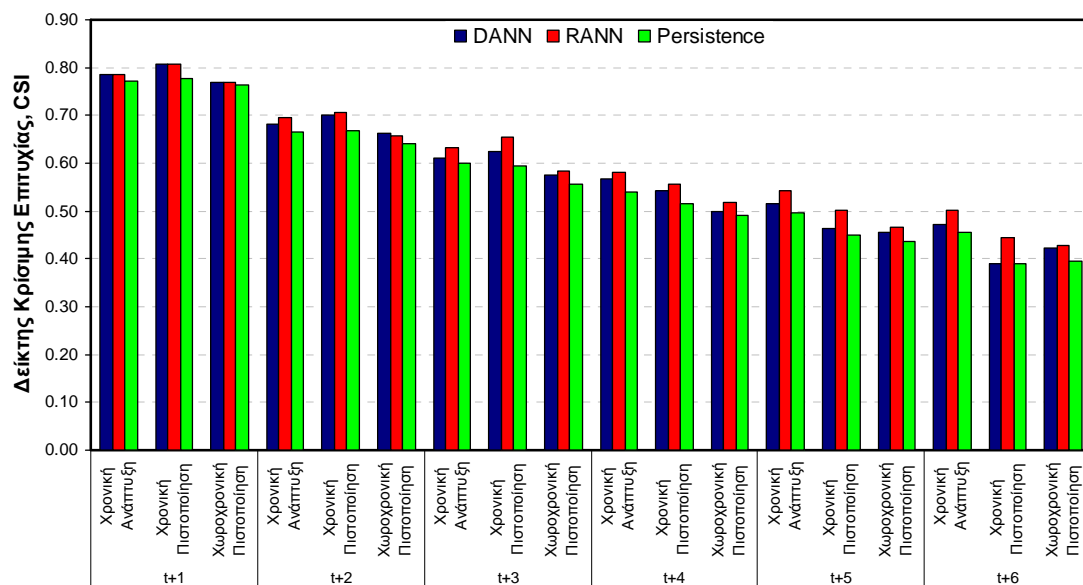


Σχήμα 7.32. Διαγράμματα χρονοσειρών πρόγνωσης του $SPI-24_{t+5}$ για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα διαπιστώνεται ότι η μέθοδος RANN μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόγνωση του SPI-24 για χρονικό βήμα πρόγνωσης μέχρι έξι μηνών μπροστά. Τα Σχήματα 7.33 και 7.34 παρουσιάζουν αντίστοιχα, τις κύριες ποσοτικές στατιστικές παραμέτρους (Eff, RMSE και MAE) και τον δείκτη κρίσιμης επιτυχίας αναγνώρισης επεισοδίων ξηρασίας (CSI) για όλα τα βήματα πρόγνωσης από ένα έως έξι μήνες και επιβεβαιώνουν ότι το μοντέλο RANN μπορεί να προβλέψει ικανοποιητικά τα αναγνωρισμένα επεισόδια ξηρασίας. Διακρίνεται όμως ξεκάθαρα ότι το μοντέλο RANN πρέπει να χρησιμοποιείται με αρκετή επιφύλαξη για πρόγνωση 5-6 μηνών χρονικών βημάτων αφού ο δείκτης κρίσιμης επιτυχίας CSI παρουσιάζει τιμές κοντά στο 0.5 (Σχήμα 7.34).



Σχήμα 7.33. Συνολικά ποσοτικά στατιστικά κριτήρια πρόγνωσης του SPI-24 για όλα τα χρονικά βήματα πρόγνωσης.



Σχήμα 7.34. Δείκτης κρίσιμης επιτυχίας αναγνώρισης επεισοδίων ξηρασίας του SPI-24 για όλα τα χρονικά βήματα πρόγνωσης.

7.8. Σχολιασμός χρονικής πρόγνωσης SPI

Η ανάπτυξη ενός γενικευμένου χρονικού μοντέλου για πρόγνωση πολλαπλών χρονικών βημάτων ήταν ο σκοπός της παρούσας διατριβής. Μία τεχνική πρόγνωσης αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας 48 σταθμούς ανάπτυξης για την περίοδο Οκτ. 1960 - Σεπ. 1992 και πιστοποιήθηκε χρονικά για την περίοδο Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002 για τους ίδιους βροχομετρικούς σταθμούς. Επίσης, το μοντέλο πιστοποιήθηκε και χωρικά σε 18 ανεξάρτητους βροχομετρικούς σταθμούς για ολόκληρη την περίοδο Οκτ. 1960 - Σεπ. 2002. Τα προηγούμενα αποτελέσματα της χρονικής πρόγνωσης έδειξαν ότι μπορεί ένα γενικευμένο χρονικό μοντέλο με νευρωνικά δίκτυα να προγνώσει χρονικά και χωρικά τις τιμές του SPI για χρονικά διαστήματα πρόγνωσης από ένα έως έξι μήνες μπροστά. Η ακρίβεια της πρόγνωσης εξαρτάται όμως από την χρονική κλίμακα υπολογισμού του SPI. Τα ποσοτικά στατιστικά κριτήρια (π.χ. βαθμός απόδοσης Eff, μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMSE) που υπολογίστηκαν σε αυτή τη διατριβή δείχνουν ότι η πρόγνωση με τα νευρωνικά δίκτυα (μέθοδοι DANN και RANN) βελτιώνεται για όλα τα διαστήματα πρόγνωσης (1-6μήνες). Όσο μεγαλύτερη είναι η κλίμακα υπολογισμού του SPI (π.χ. SPI-12) τόσο τα ποσοτικά στατιστικά κριτήρια βελτιώνονται για το αντίστοιχο βήμα πρόγνωσης. Βέβαια τα ποσοτικά στατιστικά κριτήρια μειώνονται σταδιακά όσο αυξάνει το χρονικό βήμα πρόγνωσης για όλες τις κλίμακες υπολογισμού του SPI. Η σύγκριση των δύο μεθόδων της ευθείας πρόγνωσης του χρονικού βήματος πρόγνωσης (DANN) με την επαναληπτική μέθοδο των βημάτων πρόγνωσης (RANN) έδειξε ότι η επαναληπτική μέθοδος βοηθάει στη χρονική πρόγνωση σε όλες τις κλίμακες υπολογισμού του SPI και τα βήματα πρόγνωσης για την περίοδο εκπαίδευσης και χρονικής πιστοποίησης των σταθμών ανάπτυξης και την περίοδο της χωροχρονικής πιστοποίησης των σταθμών χωρικής πιστοποίησης. Το μεγάλο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε σημείο της υδρολογικής λεκάνης εφόσον υπάρχουν διαθέσιμοι χρόνοι υστέρησης (lags). Η χωροχρονική πιστοποίηση των ανεξάρτητων σημειακών 18 σταθμών έδειξε ότι η ακρίβεια της χρονικής πρόγνωσης δεν επηρεάζεται χωρικά και ότι μπορούν οι δύο μεθοδολογίες (DANN και RANN) να εφαρμοστούν σημειακά. Αυτό είναι πολύ σημαντικό στην πρόγνωση και διαχείριση ξηρασίας σε μία υδρολογική λεκάνη όπως είναι του Πηνειού ποταμού. Έτσι, αν είναι διαθέσιμες οι υδρολογικές υπολεκάνες ενός

ποταμού και υπολογιστούν οι επιφανειακές τιμές του SPI με κάποια τεχνική (Κεφάλαιο 6) ή υπολογιστούν οι τιμές της επιφανειακής βροχόπτωσης και μετά να εκτιμηθεί το SPI, μπορούν τα νευρωνικά δίκτυα να προβλέψουν μελλοντικά επεισόδια ξηρασίας σε επίπεδο υπολεκάνης. Τέλος, θα μπορούσε να εφαρμοστεί μία μέθοδος χωρικής παρεμβολής στις σημειακές προγνώσεις του SPI για την χωρική παρεμβολή των προγνώσεων και εκτίμηση περιοχικών ή ψηφιακών (raster) προγνώσεων σε όλη την υδρολογική λεκάνη με απώτερο στόχο το επιχειρησιακό σύστημα πρόγνωσης του SPI στον χώρο και στον χρόνο (spatiotemporal forecasting).

Η αξιολόγηση των νευρωνικών δικτύων βασίστηκε επίσης στον ποιοτικό πίνακα αξιολόγησης επεισοδίων (συμβάντων) ξηρασίας που υπολογίστηκε για τιμές του SPI μικρότερες ή ίσες του -1. Έτσι υπολογίστηκαν διάφορα ποιοτικά κριτήρια που αξιολογούν την απόδοση των νευρωνικών δικτύων στην πρόγνωση επεισοδίων ξηρασίας. Για να μπορεί να χαρακτηριστεί ένα μοντέλο πρόγνωσης επιχειρησιακό πρέπει να προβλέπει σωστά και έγκαιρα τα επεισόδια ξηρασίας και να έχει πολύ μικρό αριθμό λανθασμένων συναγερμών (false alarms). Επίσης, πρέπει να παρουσιάζει καλύτερα στοιχεία πρόγνωσης από μία μέθοδο αναφοράς. Ως μέθοδος αναφοράς επιλέχτηκε το μοντέλο εμμονής (Persistence model) που είναι απλώς η τιμή του SPI στο χρονικό βήμα t (χρόνος υστέρησης) και είναι η ίδια τιμή για όλα τα χρονικά βήματα πρόγνωσης από $t+1$ έως $t+6$. Τα αποτελέσματα των ποιοτικών κριτηρίων του πίνακα αξιολόγησης πρόγνωσης επεισοδίων ξηρασίας για τα νευρωνικά δίκτυα δείχνουν ότι η υπεροχή τους στα ποσοτικά στατιστικά κριτήρια δεν είναι αντιστοίχως ανάλογη και στα ποιοτικά κριτήρια και εξαρτώνται από τη κλίμακα υπολογισμού του SPI. Στο SPI-3μηνών τα νευρωνικά δίκτυα έχουν μικρές ικανότητες αναγνώρισης επεισοδίων ξηρασίας ακόμα και για το χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$. Η μέθοδος του μοντέλου εμμονής παρουσιάζεται καλύτερη για όλα τα χρονικά βήματα πρόγνωσης με βάση το δείκτη κρίσιμης επιτυχίας CSI αναγνώρισης επεισοδίων ξηρασίας (Σχήμα 7.11). Όσο αυξάνει η κλίμακα υπολογισμού του SPI τόσο αυξάνει και η ικανότητα των νευρωνικών δικτύων στην πρόγνωση επεισοδίων ξηρασίας. Αυτό οφείλεται στο ότι το σήμα (χρονοσειρά) του SPI γίνεται πιο ομαλό και δεν παρουσιάζει απότομες αλλαγές κατάστασης (π.χ. μετάβαση από ξηρές σε υγρές καταστάσεις σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα). Επίσης, η συσχέτιση των χρόνων υστέρησης μεγαλώνει για το χρονικό βήμα πρόγνωσης όσο αυξάνει η κλίμακα υπολογισμού του SPI που διευκολύνει την πρόγνωση του SPI. Έτσι, η επαναληπτική μέθοδος των νευρωνικών δικτύων (RANN) με βάση το δείκτη κρίσιμης επιτυχίας CSI και τη σύγκριση της με τη μέθοδο αναφοράς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόγνωση του SPI-6 μέχρι τρεις μήνες μπροστά (SPI-6_{t+3}), του SPI-9 μέχρι τέσσερις μήνες μπροστά (SPI-9_{t+4}), του SPI-12 μέχρι πέντε μήνες μπροστά (SPI-12_{t+5}), και του SPI-24 μέχρι έξι μήνες μπροστά (SPI-24_{t+6}) και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόγνωση του SPI-3. Από τα παραπάνω φαίνεται ότι η ακρίβεια πρόγνωσης επεισοδίων ξηρασίας αυξάνει όσο μεγαλώνει η χρονική κλίμακα υπολογισμού του SPI (από 3 μήνες έως 24 μήνες).

Για αξιόπιστες και επιχειρησιακές προγνώσεις του SPI ο δείκτης κρίσιμης επιτυχίας δείχνει ότι για το SPI-3μηνών δεν υπάρχει ικανοποιητική και αμερόληπτη προσδιοριστική πρόγνωση για κανένα χρονικό βήμα πρόγνωσης αφού ο δείκτης κρίσιμης επιτυχίας CSI είναι μικρότερος από 0.5 για όλα τα χρονικά διαστήματα πρόγνωσης (Σχήμα 7.12). Στις άλλες κλίμακες υπολογισμού του SPI, τα νευρωνικά δίκτυα μπορούν να χρησιμοποιηθούν επιχειρησιακά για το SPI-6_{t+1} (Σχήμα 7.17), το SPI-9_{t+2} (Σχήμα 7.23), το SPI-12_{t+3} (Σχήμα 7.30), και το SPI-24_{t+5} (Σχήμα 7.38). Τέλος, όπως φαίνεται από το Gamma test (Πίνακας 7.3) τα νευρωνικά δίκτυα δεν μπορούν να φτάσουν την τιμή της στατιστικής παραμέτρου Γ (Gamma) και υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης της πρόγνωσης. Για το λόγο αυτό, χωρικά αναδρομικά νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση των χρονικών και χωρικών προβλέψεων. Η χωροχρονική μεθοδολογία πρόγνωσης περιγράφεται στο επόμενο κεφάλαιο.

8. ΧΩΡΟΧΡΟΝΙΚΗ ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΞΗΡΑΣΙΑΣ

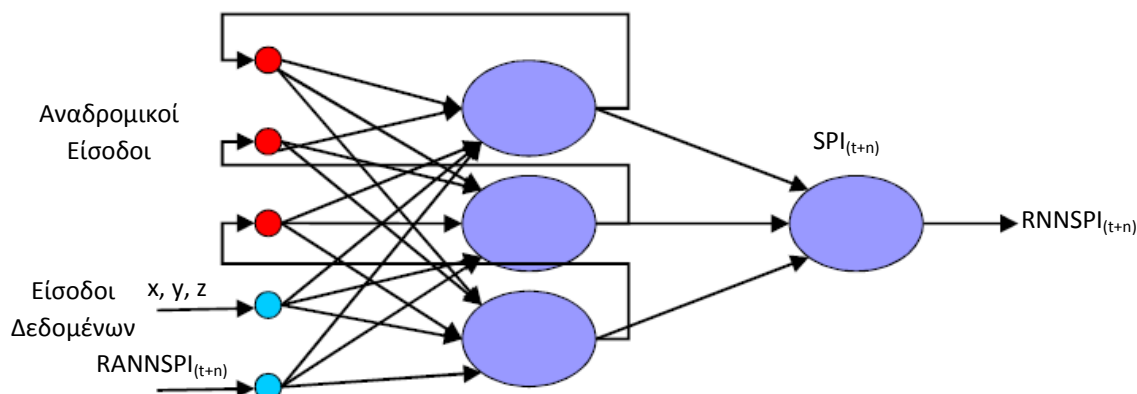
Η χωροχρονική εφαρμογή της χρονικής μεθόδου RANN που αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο έδειξε ότι για το SPI-3μηνών δεν υπάρχει ικανοποιητική και αμερόληπτη προσδιοριστική πρόγνωση για κανένα χρονικό βήμα πρόγνωσης αφού ο δείκτης κρίσιμης επιτυχίας CSI είναι μικρότερος από 0.5 για όλα τα χρονικά διαστήματα πρόγνωσης. Στις άλλες κλίμακες υπολογισμού του SPI, η μέθοδος RANN μπορεί οριακά να χρησιμοποιηθεί επιχειρησιακά για το SPI-6_{t+1} (ένα lead time), το SPI-9_{t+2} (δύο lead times), το SPI-12_{t+3} (τρία lead times), και το SPI-24_{t+5} (πέντε lead times). Η χωροχρονική εφαρμογή έδειξε επίσης ότι οι προγνώσεις είναι αξιόπιστες και αμερόληπτες αλλά υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης αφού στα μεγαλύτερα χρονικά βήματα πρόγνωσης παρατηρείται μία χρονική υστέρηση των προγνώσεων σε κάποια παρατηρούμενα επεισόδια ξηρασίας. Για το λόγο αυτό, χωρικά αναδρομικά νευρωνικά δίκτυα τύπου Elman (Recurrent Neural Networks, RNN) [Elman, 1990] χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση των χρονικών και χωρικών προβλέψεων της μεθόδου RANN. Δεδομένα εισόδου στο RNN τύπου Elman είναι οι γεωγραφικές συντεταγμένες και το υψόμετρο των σταθμών και οι προβλέψεις του επαναληπτικού νευρωνικού δικτύου RNN. Οι παρατηρούμενες τιμές του SPI για όλα τα χρονικά βήματα πρόγνωσης χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση του RNN. Και πάλι η ίδια χρονική περίοδος εκπαίδευσης των 48 σταθμών ανάπτυξης (Οκτ. 1962 – Σεπ 1992) χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση του δικτύου Elman. Η χρονική πιστοποίηση των σταθμών ανάπτυξης έγινε για την περίοδο Οκτ. 1992– Σεπ 2002 και η χωροχρονική πιστοποίηση των 18 ανεξάρτητων σταθμών για όλη την περίοδο Οκτ. 1962 – Σεπ 2002. Η εκπαίδευση των αναδρομικών νευρωνικών δικτύων πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια του πακέτου Matlab Neural Network Toolbox και η βελτιστοποίηση έγινε με τη μέθοδο προσαρμόσιμη μη μονότονη κλιμακωτή μέθοδο BFGS (Adaptive Self-scaling Nonmonotone BFGS, ASCNMBFGS) των Peng and Magoulas [2007]. Η ASCNMBFGS έχει αποδειχτεί ότι είναι μία αξιόπιστη μέθοδος εκπαίδευσης αναδρομικών νευρωνικών δικτύων [Peng and Magoulas, 2007; 2009]. Υπενθυμίζεται ότι ένα μοντέλο πρόγνωσης για να είναι επιχειρησιακό πρέπει να δίνει καλύτερα αποτελέσματα από μία μέθοδο αναφοράς και να μπορεί να προσομοιώνει ικανοποιητικά την δριμύτητα και διάρκεια των επεισοδίων ξηρασίας αλλά και την περιοχική εξάπλωση του φαινομένου. Ως μέθοδοι αναφοράς χρησιμοποιήθηκαν το μοντέλο εμμονής (Persistence Model) και η επαναληπτική μέθοδος των νευρωνικών δικτύων πρόγνωσης RANN. Η αναγνώριση των επεισοδίων ξηρασίας βασίστηκε και πάλι στον ποιοτικό πίνακα αξιολόγησης συμβάντων ξηρασίας (contingency table) που δημιουργήθηκε για τιμές SPI ≤ -1. Ο έλεγχος της RNN έγινε και για τις τρεις περιόδους ανάπτυξης, χρονικής πιστοποίησης και χωροχρονικής πιστοποίησης.

8.1. Εφαρμογή αναδρομικών νευρωνικών δικτύων RNN

Τα τεχνητά αναδρομικά (ή ανατροφοδοτούμενα) νευρωνικά δίκτυα [Bishop, 2006] αποτελούν την εξέλιξη των τεχνητών νευρωνικών δικτύων τα οποία, με την σειρά τους, επιχειρούν να προσομοιώσουν την λειτουργία των φυσικών νευρωνικών δικτύων. Χρησιμοποιείται ένα δίκτυο τριών επιπέδων στο οποίο έχει προστεθεί ένα σύνολο από μονάδες περιεχομένου (context units) στο επίπεδο εισόδου. Υπάρχουν συνδέσεις από το μεσαίο (κρυφό) επίπεδο σε αυτές τις μονάδες περιεχομένου οι οποίες έχουν σταθερό βάρος ίσο με 1. Σε κάθε βήμα, η είσοδος προωθείται προς το επόμενο επίπεδο (feed-forward) κι έπειτα εφαρμόζεται ένας κανόνας εκμάθησης. Οι σταθερές συνδέσεις προς τα πίσω καταλήγουν στις μονάδες περιεχομένου κρατώντας ένα αντίγραφο των προηγούμενων τιμών από τις κρυφές μονάδες. Έτσι, το δίκτυο μπορεί να διατηρήσει μία κατάσταση, έτσι ώστε να έχει την ικανότητα

να φέρνει εις πέρας εργασίες όπως πρόβλεψη ακολουθίας που είναι πέρα από τις δυνατότητες ενός απλού πολυεπίπεδου νευρωνικού δικτύου. Οι αναδρομικές συνδέσεις καθιστούν τα δίκτυα αυτά ικανά να αναγνωρίζουν χωρικές ή και χρονικές συσχετίσεις μεταξύ των δεδομένων, χωρίς να χρειάζεται τα δεδομένα που αναφέρονται σε διαφορετικές χρονικές ή χωρικές θέσεις να εμφανιστούν στο δίκτυο ταυτόχρονα. Η ύπαρξη αναδρομικών συνδέσεων δημιουργεί την ανάγκη συγχρονισμού στο δίκτυο, όσον αφορά τη μετάδοση των σημάτων. Έτσι εισάγονται καθυστερήσεις (delays) στις αναδρομικές συνδέσεις.

Το δίκτυο Elman αποτελείται από δύο επίπεδα νευρώνων. Στο πρώτο επίπεδο χρησιμοποιήθηκαν νευρώνες με σιγμοειδείς συναρτήσεις ενεργοποίησης από -1 έως 1. Η *συνάρτηση υπερβολικής εφαπτομένης* (hyperbolic tangent function), χρησιμοποιήθηκε για την ενεργοποίηση των νευρώνων των δεδομένων εισόδου αλλά και των νευρώνων των αναδρομικών συνδέσεων. Τα δεδομένα εισόδου στο RNN τύπου Elman ήταν οι γεωγραφικές συντεταγμένες (x και y) και το υψόμετρο (z) των σταθμών και οι προβλέψεις του επαναληπτικού νευρωνικού δικτύου RANN για το αντίστοιχο χρονικό βήμα πρόγνωσης και κλίμακα υπολογισμού του SPI (π.χ. $RANNSPI-6_{t+1}$). Όλα τα δεδομένα εισόδου μετασχηματίστηκαν γραμμικά στο εύρος -1 (ελάχιστη τιμή) έως 1 (μέγιστη τιμή) για την ομοιόμορφη κατανομή των πεδίων τιμών τους. Στο επίπεδο εξόδου (δεύτερο επίπεδο νευρώνων) γραμμικές συναρτήσεις ενεργοποίησης χρησιμοποιήθηκαν. Οι παρατηρούμενες τιμές του SPI το αντίστοιχο χρονικό βήμα πρόγνωσης και κλίμακα υπολογισμού χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση του RNN (π.χ. $SPI-6_{t+1}$). Μία δομή του χωροχρονικού μοντέλου RNN Elman παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.1. Η εκπαίδευση των αναδρομικών νευρωνικών δικτύων πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο προσαρμόσιμη μη μονότονη κλιμακωτή μέθοδο BFGS (Adaptive Self-scaling Nonmonotone BFGS, ASCNMBFGS) των Peng and Magoulas [2007]. Η ASCNMBFGS έχει αποδειχτεί ότι είναι μία αξιόπιστη μέθοδος εκπαίδευσης αναδρομικών νευρωνικών δικτύων για ποικίλες εφαρμογές [Peng and Magoulas, 2007; 2009]. Πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι μπορεί και εκπαιδεύει ικανοποιητικά και πολύ γρήγορα τα αναδρομικά δίκτυα με μεγάλο αριθμό κρυφών νευρώνων. Η λειτουργία των RNN βασίζεται στην έξοδο των νευρώνων του κρυφού επιπέδου που παρουσιάζονται ως είσοδος στους ίδιους νευρώνες την επόμενη χρονική στιγμή. Άρα η έξοδος του δικτύου Elman εξαρτάται τόσο από την είσοδο του όσο και από τις προηγούμενες εισόδους του. Είναι λοιπόν αναμενόμενο για δεδομένο διάνυσμα εισόδου να προκύψει σε δύο διαφορετικές δοκιμές διαφορετική έξοδος, εάν τα προηγούμενα διανύσματα που παρουσιάστηκαν στην είσοδο δεν ήταν ίδια. Με δεδομένο ότι η απόκριση του δικτύου Elman εξαρτάται όχι μόνο από την τρέχουσα είσοδο, αλλά και από τις προηγούμενες, κατά την εκπαίδευση πρέπει τα παραδείγματα μάθησης να παρουσιάζονται πάντα με τη σωστή χρονική σειρά. Η βέλτιστη δομή του δικτύου Elman βρέθηκε με τη μέθοδο δοκιμής και λάθους για κάθε χρονικό βήμα πρόγνωσης και κλίμακα υπολογισμού του SPI. Τα χωρικά δεδομένα και οι χρονικές προγνώσεις των 48 σταθμών ανάπτυξης (16800 δεδομένα) της περιόδου εκπαίδευσης (Οκτ. 1962-Σεπ 1992) χρησιμοποιήθηκαν για την διακρίβωση της δομής των RNN. Τα νευρωνικά δίκτυα βελτιστοποιήθηκαν για το σετ εκπαίδευσης και η αντικειμενική συνάρτηση βελτιστοποίησης ήταν το μέσο τετραγωνισμένο σφάλμα MSE. Για τη διαδικασία βελτιστοποίησης αφού δεν υπήρχε τεστ ελέγχου η τιμή της στατιστικής παραμέτρου Γ (Gamma statistic) χρησιμοποιήθηκε ως κριτήριο τερματισμού. Σε περίπτωση που η θεωρητική τιμή της στατιστικής παραμέτρου Γ είναι πολύ μικρότερη από το υπολογιζόμενο MSE, τότε η διαδικασία τερματίζεται μετά από 500 κύκλους (epochs). Σημειώνεται ότι η βελτιστοποίηση τερματίζεται μετά από 50-150 κύκλους για όλες τις χρονικές κλίμακες του SPI και βήματα πρόγνωσης. Για όλες τις κλίμακες υπολογισμού του SPI και χρονικά διαστήματα πρόγνωσης στα χωροχρονικά αναδρομικά δίκτυα χρησιμοποιήθηκαν από 4 έως 8 νευρώνες στο κρυφό επίπεδο. Οι νευρώνες με το μικρότερο τετραγωνισμένο σφάλμα χρησιμοποιήθηκαν ως βέλτιστη δομή των χωροχρονικών αναδρομικών δικτύων RNN τύπου Elman.



Σχήμα 8.1. Γενική δομή των αναδρομικών νευρωνικών δικτύων RNN τύπου Elman.

Η αξιολόγηση των RNN τύπου Elman βασίστηκε σε ποσοτικά κριτήρια πρόγνωσης όπως είναι τα στατιστικά κριτήρια RMSE, R, MAE, και Eff, που είναι και τα συνηθέστερα στατιστικά κριτήρια για προβλήματα πρόγνωσης. Επίσης η αξιολόγηση των RNN γίνεται και με την σύγκριση του αλγορίθμου αναφοράς του μοντέλου εμμονής και της χρονικής μεθοδολογίας RANN. Ιδιαίτερα για το μοντέλο αναφοράς έγινε και σύγκριση των αποτελεσμάτων των RNN για πολλαπλά χρονικά βήματα με το στατιστικό κριτήριο ικανότητας πρόγνωσης Skill Score το οποίο συγκρίνει ένα στατιστικό κριτήριο με το αντίστοιχο κριτήριο για το μοντέλο αναφοράς. Η ικανότητα πρόγνωσης Skill Score (SS) υπολογίστηκε για το μέσο τετραγωνισμένο σφάλμα MSE. Τέλος, ποιοτικά κριτήρια εκτίμησης της πρόγνωσης υπολογίστηκαν με βάση την ύπαρξη ή μη-ύπαρξη ξηρασίας ($SPI \leq -1$). Η απόδοση ενός μοντέλου πρόβλεψης της ξηρασίας μπορεί να κριθεί από το ποσοστό των επεισοδίων που θα προβλεφθούν σωστά από το μοντέλο, σε αντιδιαστολή με το ποσοστό των ψεύτικων-λανθασμένων συναγεργμών (δηλ. προβλέψεις επεισοδίων ξηρασίας που δεν συνέβησαν στην πραγματικότητα). Για την εκτίμηση των ποιοτικών κριτηρίων ο πίνακας αξιολόγησης των αποτελεσμάτων (contingency table) που δείχνει τη συχνότητα των σωστών και λανθασμένων προγνώσεων και των πραγματικών συμβάντων ξηρασίας υπολογίστηκε όπως και στο Κεφάλαιο 7 (Πίνακας 7.5). Τα ποιοτικά κριτήρια ήταν και πάλι η ακρίβεια πρόγνωσης (Accuracy) το σκορ μεροληψίας (Bias score, BIAS), η πιθανότητα ανίχνευσης επεισοδίων ξηρασίας (POD), η αναλογία λανθασμένων συναγεργμών (FAR), η πιθανότητα λανθασμένων συναγεργμών (POFD), ο δείκτης κρίσιμης επιτυχίας (CSI), το Hanssen and Kuipers discriminant ή true skill statistic ή Peirces's skill score (HK), και η αναλογία πιθανοτήτων Odds ratio (OR).

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της χωροχρονικής πρόγνωσης RNN γίνεται πρώτα για τη χρονική κλίμακα του SPI-3μηνών και μετά ακολουθούν τα αποτελέσματα για όλες τις άλλες χρονικές κλίμακες του SPI (SPI-6, SPI-9, SPI-12 και SPI-24). Στην αρχή παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας RNN για το χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$ και μετά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για χρονικά βήματα πρόγνωσης μεγαλύτερα από ένα μήνα. Σε όλα τα χρονικά βήματα πρόγνωσης παρουσιάζονται πρώτα τα ποσοτικά στατιστικά κριτήρια της πρόγνωσης, μετά τα αντίστοιχα ποιοτικά κριτήρια και ακολουθούν οι αλγόριθμοι αναφοράς. Λόγω του μεγάλου όγκου των σταθμών ανάπτυξης και πιστοποίησης, επιλέχτηκαν ενδεικτικοί σταθμοί για την παρουσίαση των χρονικών προγνώσεων με τη μέθοδο RNN τύπου Elman. Ο σχολιασμός γίνεται σε σχέση με τον αλγόριθμο αναφοράς και το χρονικό μοντέλο πρόβλεψης RANN. Τέλος, το μοντέλο RNN σχολιάζεται για την ικανότητα ανίχνευσης επεισοδίων ξηρασίας και ο δείκτης κρίσιμης επιτυχίας CSI καθορίζει αν το υβριδικό χωροχρονικό μοντέλο RNN μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιχειρησιακά σε συστήματα διαχείρισης της ξηρασίας.

8.2. Χωροχρονική πρόγνωση SPI-3μηνών

Η εφαρμογή της χρονικής μεθόδου RANN που αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο έδειξε ότι για το SPI-3μηνών δεν υπάρχει ικανοποιητική και αμερόληπτη προσδιοριστική πρόγνωση για κανένα χρονικό βήμα πρόγνωσης αφού ο δείκτης κρίσιμης επιτυχίας CSI είναι μικρότερος από 0.5 για όλα τα χρονικά διαστήματα πρόγνωσης. Η χρονική εφαρμογή έδειξε επίσης ότι υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης των προγνώσεων λόγω της χρονικής υστέρησης των προγνώσεων σε κάποια παρατηρούμενα επεισόδια ξηρασίας. Για το λόγο αυτό, αναδρομικά νευρωνικά δίκτυα τύπου Elman (Recurrent Neural Networks, RNN) χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση των χρονικών και χωρικών προβλέψεων της μεθόδου RANN. Δεδομένα εισόδου στο RNN τύπου Elman ήταν οι σημειακές γεωγραφικές συντεταγμένες και το υψόμετρο των σταθμών και οι προβλέψεις του επαναληπτικού νευρωνικού δικτύου RANN για τους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης. Λόγω του μεγάλου πλήθους των αποτελεσμάτων τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικά για χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$ και περιληπτικά για τα υπόλοιπα βήματα πρόγνωσης. Τα αποτελέσματα για μεγαλύτερα βήματα πρόγνωσης παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα II.

8.2.1. Χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$, SPI-3 _{$t+1$}

Ο Πίνακας 8.1 παρουσιάζει τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των στατιστικών παραμέτρων της πρόγνωσης του SPI-3 για χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$ για την περίοδο βελτιστοποίησης και χρονικής πιστοποίησης των σταθμών ανάπτυξης, και τη χωροχρονική περίοδο των σταθμών πιστοποίησης. Στον ίδιο πίνακα, παρουσιάζονται τα στατιστικά κριτήρια για τη μέθοδο του μοντέλου εμμονής και της μεθόδου RANN. Στο Παράρτημα παρουσιάζονται αναλυτικά τα στατιστικά κριτήρια για κάθε σταθμό ανάπτυξης και χωροχρονικής πιστοποίησης των αναδρομικών νευρωνικών δικτύων των χρονικών προγνώσεων. Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 8.1, η μέθοδος RNN βελτιώνει κατά πολύ την χωροχρονική πρόγνωση του SPI-3 για χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$ σε σχέση με τη μέθοδο αναφοράς και τη χρονική μέθοδο RANN. Όλες οι στατιστικές παράμετροι βελτιώνονται σημαντικά και για τις τρεις περιόδους ελέγχου (εκπαίδευση, χρονική πιστοποίηση και χωροχρονική πιστοποίηση). Το Σχήμα 8.2 παρουσιάζει τις προγνώσεις του SPI-3 για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης και φαίνεται ότι το χωροχρονικό μοντέλο RNN κρίνεται πολύ ικανοποιητικό. Παρατηρείται όμως ότι το μοντέλο δεν μπορεί να προσομοιώσει αρκετά καλά κάποιες ακραίες τιμές του SPI και γενικά υποεκτιμά το εύρος του SPI αφού η τιμή της τυπικής απόκλισης των προβλέψεων είναι 0.86 και είναι μικρότερη της θεωρητικής τιμής (=1). Τέλος, η ικανότητα πρόγνωσης όπως δίνεται από κριτήριο Skill Score του μέσου τετραγωνισμένου σφάλματος (SS_{MSE}) και μέθοδο αναφοράς το Persistence μοντέλο δείχνει ότι η μέθοδος RNN παρουσιάζει βελτίωση στην πρόγνωση του SPI-3 _{$t+1$} και για τις τρεις περιόδους ελέγχου (Πίνακας 8.1). Για την καλύτερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων πρόγνωσης υπολογίστηκε ο πίνακας ποιοτικής αξιολόγησης συμβάντων ξηρασίας. Τα στοιχεία του Πίνακα 7.5 παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.2 για το μοντέλο DANN και Persistence. Με βάση τα στοιχεία του Πίνακα 8.2 υπολογίστηκαν τα ποιοτικά κριτήρια πρόγνωσης ξηρασίας για το SPI-3 _{$t+1$} (Πίνακας 8.2). Η υπεροχή της χωροχρονικής μεθόδου RNN είναι εμφανής και στα ποιοτικά κριτήρια εκτίμησης επεισοδίων ξηρασίας εκτός του σκορ μεροληψίας (bias). Γενικά, όπως φαίνεται από το δείκτη κρίσιμης επιτυχίας CSI η μέθοδος RNN έχει 55% περίπου ακρίβεια πρόγνωσης επεισοδίων ξηρασίας ($POD=0.55$) και οριακά μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιχειρησιακά σε συστήματα διαχείρισης της ξηρασίας. Παρόλα αυτά όμως η αναλογία πιθανοτήτων OR για τη μέθοδο RNN δείχνει ότι οι πιθανότητες πρόβλεψης μία πρόγνωση να είναι σωστή είναι τουλάχιστον 33 φορές μεγαλύτερη από την πιθανότητα να είναι λανθασμένη πρόγνωση. Οι αντίστοιχες αναλογίες πιθανοτήτων είναι αρκετά μικρότερες για τη μέθοδο Persistence και RANN (13.5 και 20 φορές αντίστοιχα). Τα ποιοτικά κριτήρια πρόγνωσης επεισοδίων ξηρασίας της υβριδικής

χωροχρονικής τεχνικής για τους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης παρουσιάζονται στο Παράρτημα, από όπου διαπιστώνεται ότι το 38% (18 από 48) και το 22% (4 από 18) των σταθμών ανάπτυξης και χωρικής πιστοποίησης, αντίστοιχα, παρουσιάζουν δείκτη κρίσιμη επιτυχίας CSI μεγαλύτερο του 0.5 (βλ. Παράρτημα). Άρα οι χωροχρονικές προγνώσεις του SPI-3 για ένα μήνα μπροστά μπορούν να χρησιμοποιηθούν με αξιοπιστία στους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης που παρουσιάζουν $CSI \geq 0.5$ και με επιφύλαξη στους άλλους σταθμούς.

Πίνακας 8.1. Στατιστικά αποτελέσματα χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-3_{t+1} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης

Κριτήριο	RNN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Eff	0.73	0.71	0.71	0.63	0.61	0.59	0.38	0.34	0.37
R	0.85	0.84	0.84	0.79	0.78	0.77	0.69	0.67	0.69
RMSE	0.54	0.51	0.55	0.63	0.59	0.65	0.81	0.76	0.80
MAE	0.41	0.39	0.42	0.47	0.44	0.49	0.61	0.56	0.60
SS _{MSE}	0.57	0.56	0.53	0.41	0.40	0.34	Μοντέλο Αναφοράς		

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

Πίνακας 8.2. Στατιστικά αποτελέσματα ποιοτικής χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-3_{t+1} συμβάντων ξηρασίας (SPI_{≤-1}) για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης

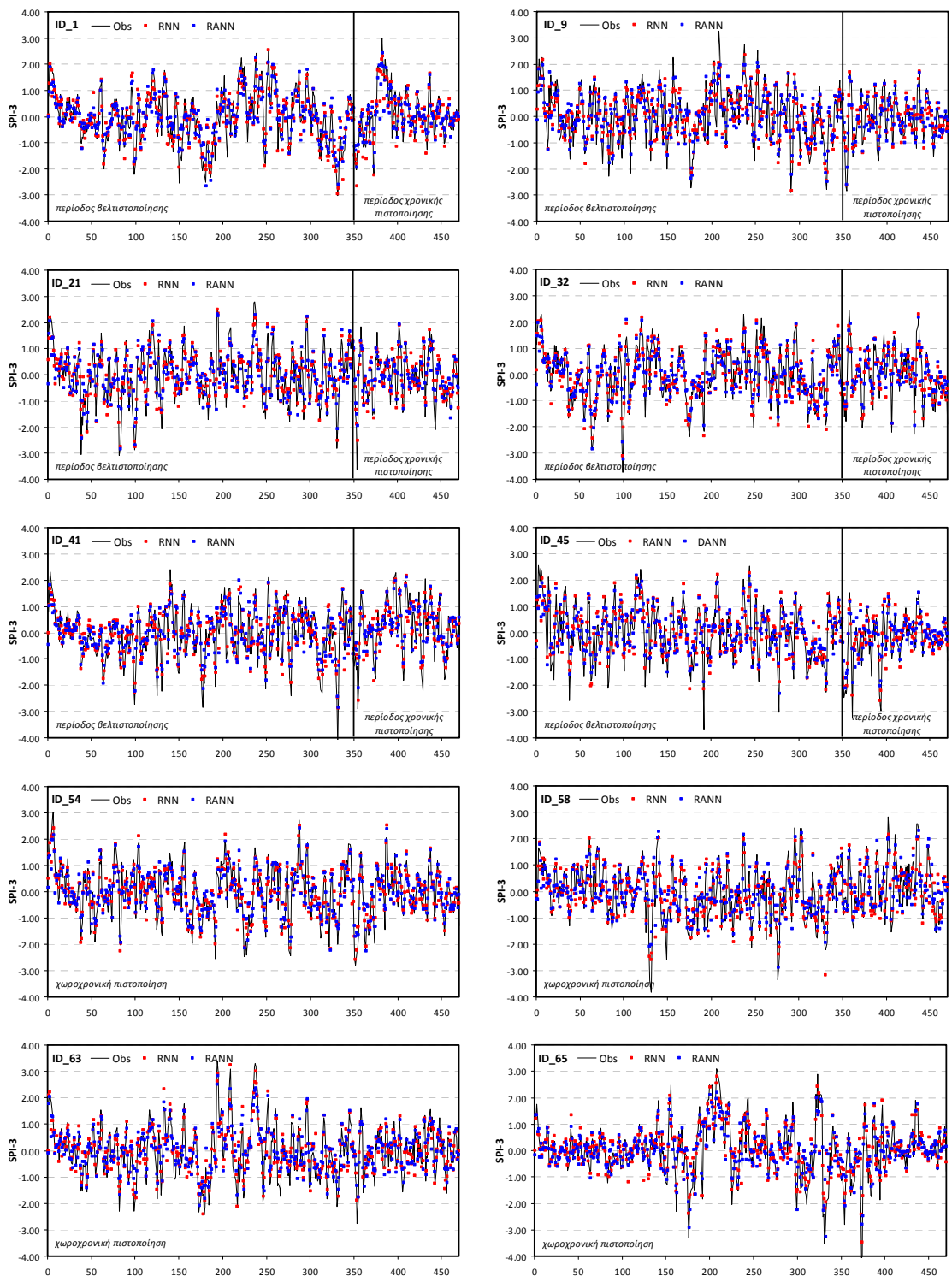
Στοιχεία	RNN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
A	1446	407	692	1181	329	566	1460	416	740
C	462	123	233	524	110	256	1184	335	574
B	1197	368	628	1462	446	754	1183	359	580
D	13695	4862	6907	13633	4875	6884	12973	4650	6566
Κριτήριο	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Accuracy	0.90	0.91	0.90	0.88	0.90	0.88	0.86	0.88	0.86
Bias	0.72	0.68	0.70	0.65	0.57	0.62	1.00	0.97	1.00
POD	0.55	0.53	0.52	0.45	0.42	0.43	0.55	0.54	0.56
FAR	0.24	0.23	0.25	0.31	0.25	0.31	0.45	0.45	0.44
POFD	0.03	0.02	0.03	0.04	0.02	0.04	0.08	0.07	0.08
CSI	0.47	0.45	0.45	0.37	0.37	0.36	0.38	0.37	0.39
HK	0.51	0.50	0.49	0.41	0.40	0.39	0.47	0.47	0.48
OR	35.81	43.72	32.66	21.02	32.69	20.19	13.52	16.08	14.59

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

A=επιτυχίες, B=αστοχίες, C=Ανθρασμένοι συναγερμοί, και D=σωστά μη επεισόδια ξηρασίας

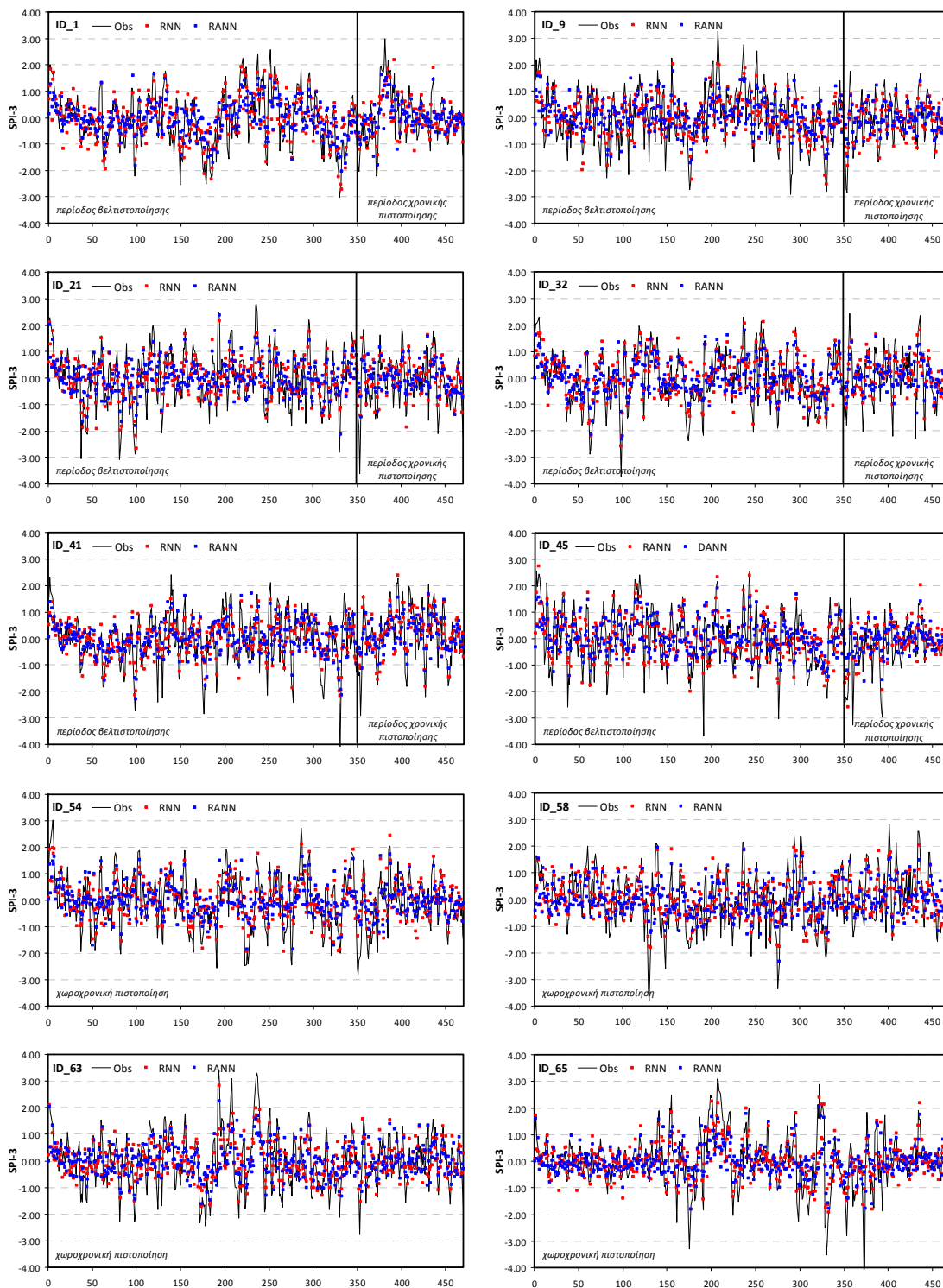
8.2.2. Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+2, SPI-3_{t+2}

Για το δεύτερο χρονικό βήμα πρόγνωσης t+2, η χωροχρονική μέθοδος RNN αναμένεται να μην μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αξιόπιστη και αμερόληπτη πρόγνωση του SPI-3μηνών. Το Σχήμα 8.3 παρουσιάζει τις προγνώσεις του SPI-3_{t+2} για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης της χωροχρονικής RNN μεθόδου. Παρατηρείται όμως ότι το μοντέλο δεν μπορεί να προσομοιώσει αρκετά καλά τις ακραίες τιμές του SPI και γενικά υποεκτιμά το εύρος του SPI αφού η τιμή της τυπικής απόκλισης των προβλέψεων είναι 0.72 και είναι μικρότερη της θεωρητικής τιμής (=1). Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των στατιστικών παραμέτρων της πρόγνωσης του SPI-3 για χρονικό βήμα πρόγνωσης t+2 για την περίοδο βελτιστοποίησης (εκπαίδευσης) και χρονικής πιστοποίησης των σταθμών ανάπτυξης, και τη χωροχρονική περίοδο των σταθμών πιστοποίησης παρουσιάζονται στο Παράρτημα II.



Σχήμα 8.2. Διαγράμματα χρονοσειρών χωροχρονικής πρόγνωσης του $SPI-3_{t+1}$ για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.

Η μέθοδος RNN αν και βελτιώνει τα ποσοτικά στατιστικά κριτήρια στις τρεις περιόδους ελέγχου δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αξιόπιστες και αμερόληπτες προγνώσεις επεισοδίων ξηρασίας του $SPI-3_{t+2}$, όπως αποδεικνύουν τα ποιοτικά κριτήρια εκτίμησης της χωροχρονικής πρόγνωσης (βλ. Παράρτημα II). Η υβριδική χωροχρονική μέθοδος RNN βελτιώνει όμως κατά πολύ τα ποιοτικά στατιστικά κριτήρια των χρονικών προβλέψεων της RANN μεθόδου σε σχέση με το μοντέλο εμμονής (Παράρτημα II).

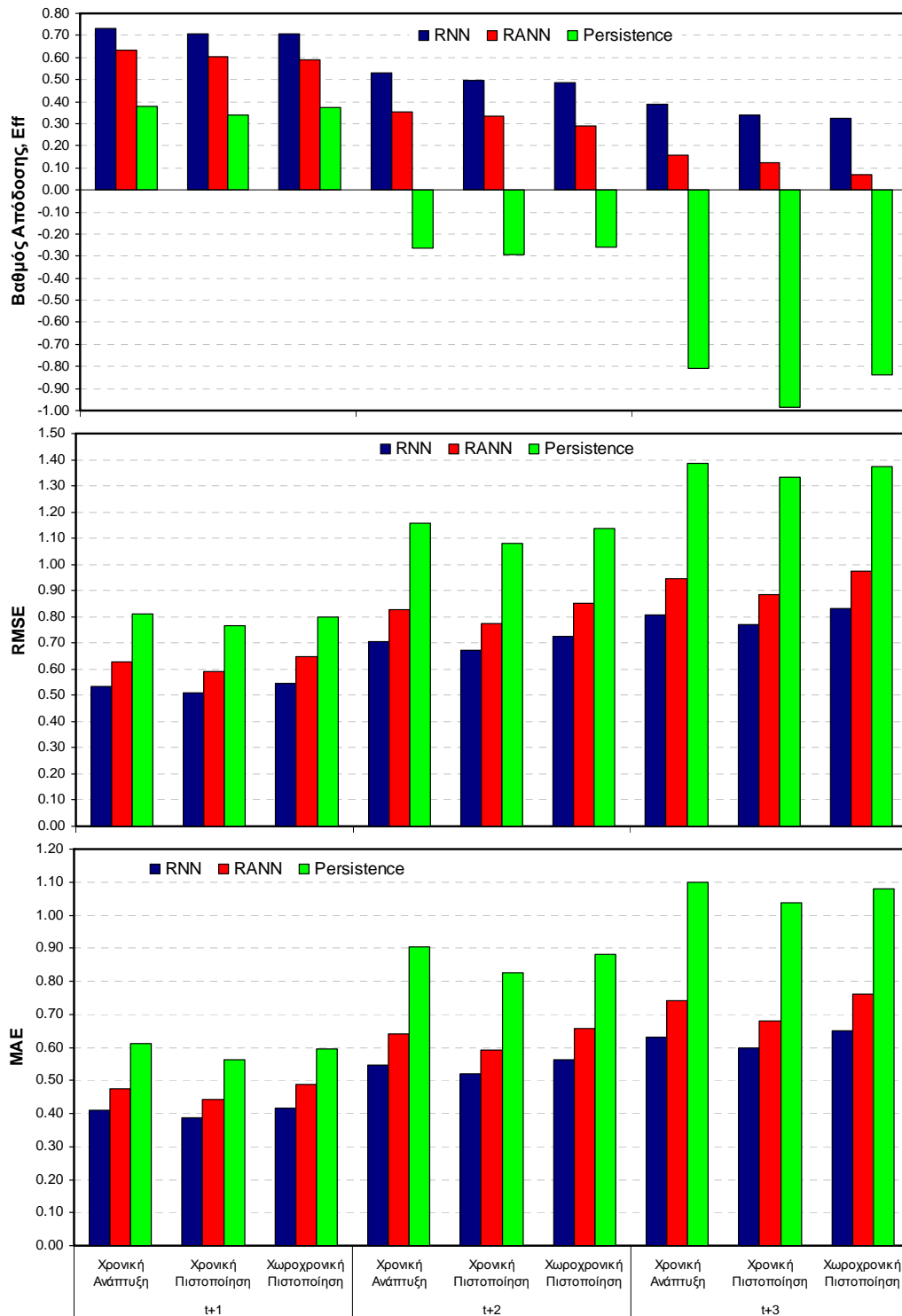


Σχήμα 8.3. Διαγράμματα χρονοσειρών χωροχρονικής πρόγνωσης του $SPI-3_{t+2}$ για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.

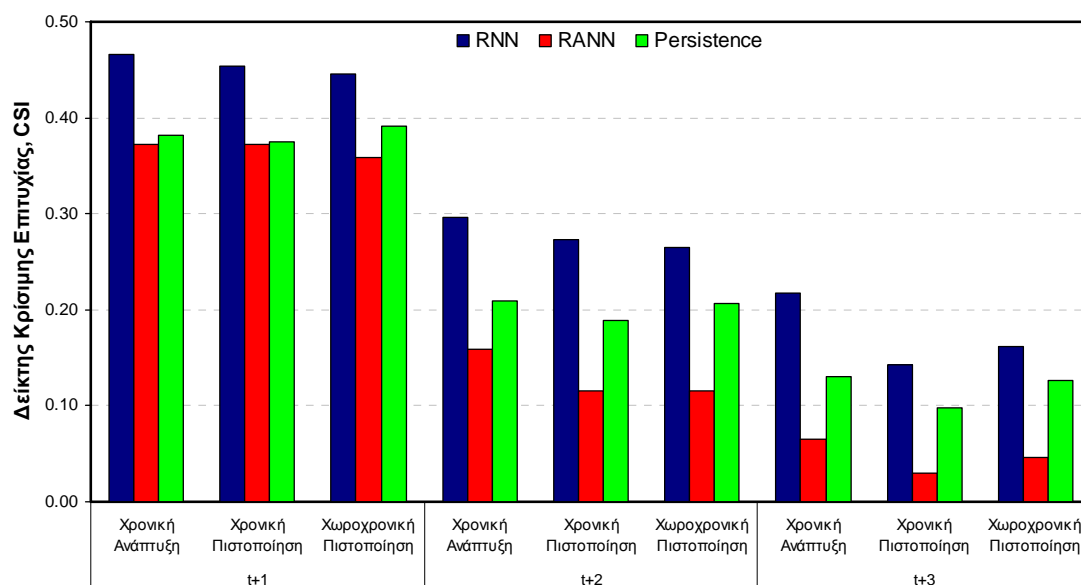
8.2.3. Σχολιασμός χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-3

Το χωροχρονικό αναδρομικό μοντέλο των προγνώσεων της χρονικής μεθόδου βελτιώνει την πρόγνωση του SPI-3 για τα βραχυπρόθεσμα διαστήματα πρόγνωσης (1 έως 2 μήνες). Το ίδιο ισχύει και για μεσοπρόθεσμα διαστήματα πρόγνωσης (3-6 μήνες). Οι χωροχρονικές προγνώσεις όμως δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν με αξιοπιστία για μεσοπρόθεσμα διαστήματα πρόγνωσης σε συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης. Τα Σχήματα 8.4 και 8.5 παρουσιάζουν τις κύριες ποσοτικές (Eff, RMSE και MAE)

στατιστικές παραμέτρους και το δείκτη κρίσιμης επιτυχίας (CSI) για βήματα πρόγνωσης από ένα έως τρεις μήνες μπροστά και επιβεβαιώνουν ότι το μοντέλο RNN δεν μπορεί να προβλέψει έγκαιρα τα αναγνωρισμένα επεισόδια ξηρασίας για χρονικά βήματα πρόγνωσης μεγαλύτερα από ένα μήνα. Τα χωροχρονικά αναδρομικά νευρωνικά δίκτυα καταφέρνουν τις προγνώσεις SPI_{t+1} της χρονικής μεθόδου RANN να τις κάνουν αξιόπιστες. Έτσι για το SPI-3 το προτεινόμενο υβριδικό χωροχρονικό σύστημα μπορεί να εφαρμοστεί σε συστήματα διαχείρισης της ξηρασίας για χρονικό βήμα πρόγνωσης ενός μήνα. Για διαστήματα πρόγνωσης μεγαλύτερα από ένα μήνα οι προγνώσεις δεν έχουν αξιοπιστία και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πιθανές ενδείξεις ξηρασίας αλλά με μεγάλη αβεβαιότητα.



Σχήμα 8.4. Συνολικά ποσοτικά στατιστικά κριτήρια πρόγνωσης του SPI-3 για χρονικά βήματα πρόγνωσης από 1 έως 3 μήνες μπροστά.



Σχήμα 8.5. Δείκτης κρίσιμης επιτυχίας αναγνώρισης επεισοδίων ξηρασίας του SPI-3 για χρονικά βήματα πρόγνωσης από 1 έως 3 μήνες μπροστά.

8.3. Χωροχρονική πρόγνωση SPI-6μηνών

Η εφαρμογή της χρονικής μεθόδου RANN που αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο έδειξε ότι για το SPI-6μηνών υπάρχει ικανοποιητική και αμερόληπτη προσδιοριστική πρόγνωση μόνο για το χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$. Η χρονική εφαρμογή έδειξε επίσης ότι υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης των προγνώσεων λόγω της χρονικής υστέρησης των προγνώσεων σε κάποια παρατηρούμενα επεισόδια ξηρασίας κυρίως για χρονικά βήματα πρόγνωσης μεγαλύτερα από ένα μήνα. Για το λόγο αυτό, αναδρομικά νευρωνικά δίκτυα τύπου Elman (Recurrent Neural Networks, RNN) χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση των χρονικών και χωρικών προβλέψεων της μεθόδου RANN. Δεδομένα εισόδου στο RNN τύπου Elman ήταν οι σημειακές γεωγραφικές συντεταγμένες και το υψόμετρο των σταθμών και οι προβλέψεις του επαναληπτικού νευρωνικού δικτύου RANN για τους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης. Λόγω του μεγάλου πλήθους των αποτελεσμάτων τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικά για χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$ και περιληπτικά για τα υπόλοιπα βήματα πρόγνωσης. Τα αποτελέσματα για μεγαλύτερα βήματα πρόγνωσης παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα II.

8.3.1. Χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$, SPI-6 $_{t+1}$

Ο Πίνακας 8.3 παρουσιάζει τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των στατιστικών παραμέτρων της πρόγνωσης του SPI-6 για χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$ για την περίοδο βελτιστοποίησης και χρονικής πιστοποίησης των σταθμών ανάπτυξης, και τη χωροχρονική περίοδο των σταθμών πιστοποίησης. Στον ίδιο πίνακα, παρουσιάζονται τα στατιστικά κριτήρια για το μοντέλο εμμονής και της μεθόδου RANN. Η μέθοδος RNN, όπως φαίνεται από τον Πίνακα 8.3, βελτιώνει κατά πολύ την χωροχρονική πρόγνωση του SPI-6 για χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$ σε σχέση με τη μέθοδο αναφοράς και τη χρονική μέθοδο RANN. Όλες οι στατιστικές παράμετροι βελτιώνονται σημαντικά και για τις τρεις περιόδους ελέγχου (εκπαίδευση, χρονική πιστοποίηση και χωροχρονική πιστοποίηση). Το Σχήμα 8.6 παρουσιάζει τις προγνώσεις του SPI-6 για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης και φαίνεται ότι το χωροχρονικό μοντέλο RNN κρίνεται πολύ ικανοποιητικό. Παρατηρείται όμως ότι το μοντέλο δεν μπορεί

να προσομοιώσει αρκετά καλά κάποιες ακραίες τιμές του SPI και γενικά υποεκτιμά το εύρος του SPI αφού η τιμή της τυπικής απόκλισης των προβλέψεων είναι 0.93 και είναι λίγο μικρότερη της θεωρητικής τιμής (=1). Τέλος, η ικανότητα πρόγνωσης όπως δίνεται από κριτήριο Skill Score του μέσου τετραγωνισμένου σφάλματος (SS_{MSE}) και μέθοδο αναφοράς το Persistence μοντέλο δείχνει ότι η μέθοδος RNN παρουσιάζει βελτίωση στην πρόγνωση του SPI-6_{t+1} και για τις τρεις περιόδους ελέγχου (Πίνακας 8.3). Τα στοιχεία του πίνακα ποιοτικής αξιολόγησης συμβάντων ξηρασίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.4 για το υβριδικό χωροχρονικό μοντέλο RNN τύπου Elman. Τα ποιοτικά κριτήρια πρόγνωσης επεισοδίων ξηρασίας για το SPI-6_{t+1} δείχνονται επίσης στον Πίνακα 8.4. Η υπεροχή της χωροχρονικής μεθόδου RNN είναι εμφανής και στα ποιοτικά κριτήρια εκτίμησης επεισοδίων ξηρασίας εκτός του σκορ μεροληψίας (bias). Γενικά, όπως φαίνεται από το δείκτη κρίσιμης επιτυχίας CSI η μέθοδος RNN έχει πάνω από 60% ακρίβεια επιτυχίας και μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιχειρησιακά σε συστήματα διαχείρισης της ξηρασίας. Αξιοσημείωτο είναι η αναλογία πιθανοτήτων OR της μεθόδου RNN για την περίοδο εκπαίδευσης που δείχνει ότι οι πιθανότητες πρόβλεψης μία πρόγνωση να είναι σωστή είναι τουλάχιστον 80 φορές μεγαλύτερη από την πιθανότητα να είναι λανθασμένη πρόγνωση. Οι αντίστοιχες αναλογίες πιθανοτήτων είναι αρκετά μικρότερες για τις μεθόδους Persistence και RANN (37 και 57 φορές αντίστοιχα) (Πίνακας 8.4). Τα ποιοτικά κριτήρια πρόγνωσης επεισοδίων ξηρασίας της υβριδικής χωροχρονικής τεχνικής για τους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης δείχνουν ότι το 100% (48 από 48) και το 94% (17 από 18) των σταθμών ανάπτυξης και χωρικής πιστοποίησης, αντίστοιχα, παρουσιάζουν δείκτη κρίσιμη επιτυχίας CSI μεγαλύτερο του 0.5. Τέλος, το 79% των σταθμών ανάπτυξης και το 78% των σταθμών πιστοποίησης έχουν πιθανότητα ανίχνευσης επεισοδίων (POD) μεγαλύτερη του 67%.

Πίνακας 8.3. Στατιστικά αποτελέσματα χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-6_{t+1} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης

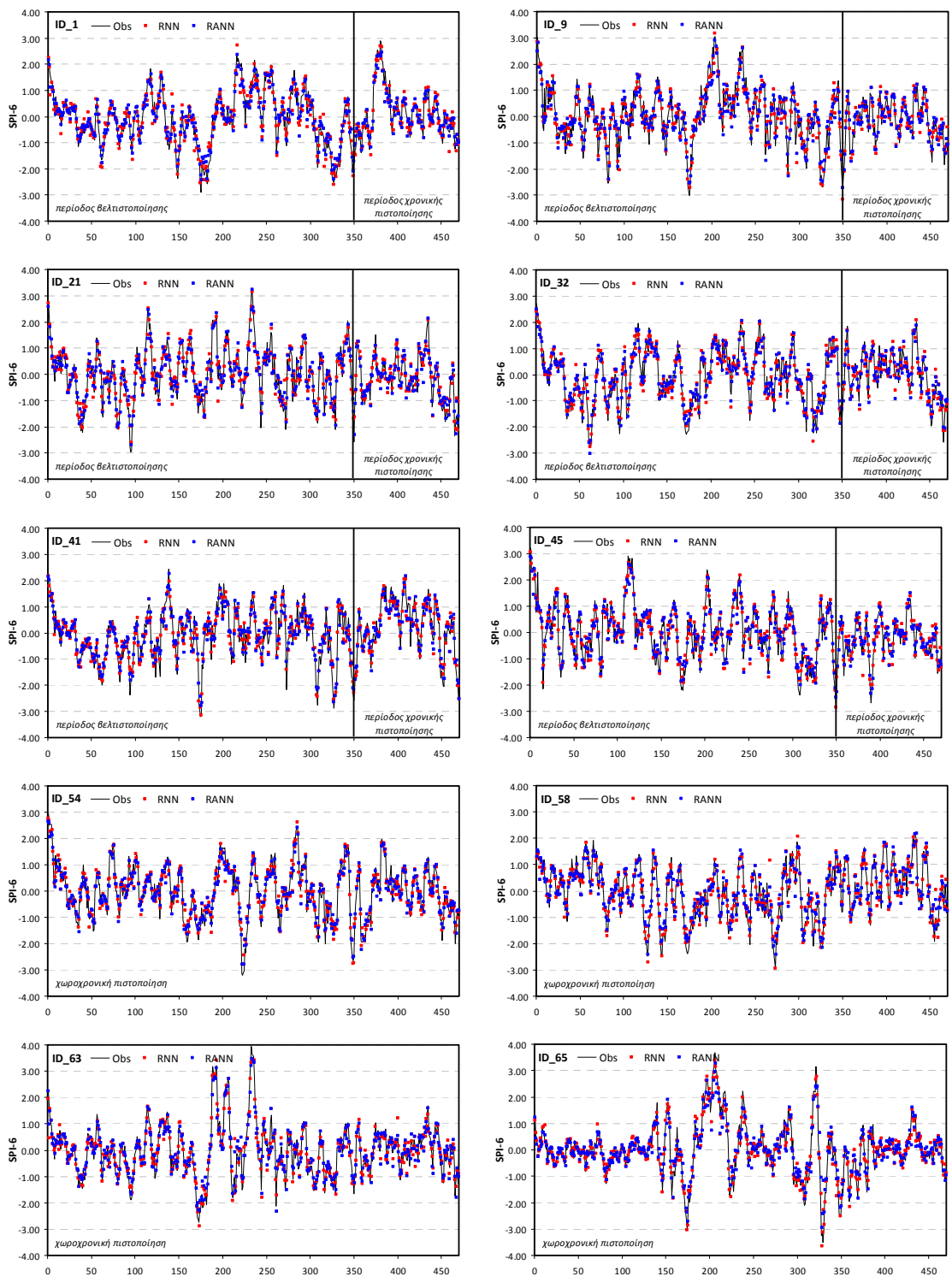
Κριτήριο	RNN			RANN			Persistence Model		
	1 ⁿ	2 ⁿ	3 ⁿ	1 ⁿ	2 ⁿ	3 ⁿ	1 ⁿ	2 ⁿ	3 ⁿ
Eff	0.86	0.82	0.85	0.81	0.78	0.80	0.69	0.66	0.70
R	0.93	0.91	0.92	0.90	0.88	0.90	0.85	0.83	0.85
RMSE	0.38	0.37	0.38	0.45	0.43	0.45	0.57	0.53	0.55
MAE	0.29	0.28	0.29	0.33	0.32	0.33	0.42	0.38	0.40
SS _{MSE}	0.55	0.49	0.51	0.38	0.34	0.34	Μοντέλο αναφοράς		

1ⁿ = περίοδος ανάπτυξης, 2ⁿ = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3ⁿ = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

Πίνακας 8.4. Στατιστικά αποτελέσματα ποιοτικής χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-6_{t+1} συμβάντων ξηρασίας (SPI≤1) για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης

Στοιχεία	RNN			RANN			Persistence Model		
	1 ⁿ	2 ⁿ	3 ⁿ	1 ⁿ	2 ⁿ	3 ⁿ	1 ⁿ	2 ⁿ	3 ⁿ
A	1984	456	921	1844	395	840	1809	430	857
C	444	173	248	488	188	260	818	205	389
B	766	190	364	906	251	445	805	216	387
D	13606	4941	6927	13562	4926	6915	13368	4909	6827
Κριτήριο	1 ⁿ	2 ⁿ	3 ⁿ	1 ⁿ	2 ⁿ	3 ⁿ	1 ⁿ	2 ⁿ	3 ⁿ
Accuracy	0.93	0.94	0.93	0.92	0.92	0.92	0.90	0.93	0.91
Bias	0.88	0.97	0.91	0.85	0.90	0.86	1.00	0.98	1.00
POD	0.72	0.71	0.72	0.67	0.61	0.65	0.69	0.67	0.69
FAR	0.18	0.28	0.21	0.21	0.32	0.24	0.31	0.32	0.31
POFD	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.06	0.04	0.05
CSI	0.62	0.56	0.60	0.57	0.47	0.54	0.53	0.51	0.52
HK	0.69	0.67	0.68	0.64	0.57	0.62	0.63	0.63	0.63
OR	79.37	68.55	70.67	56.56	41.23	50.20	36.72	47.67	38.86

1ⁿ = περίοδος ανάπτυξης, 2ⁿ = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3ⁿ = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης
A=επιτυχίες, B=αστοχίες, C=λανθασμένοι συναγερμοί, και D=σωστά μη επεισόδια ξηρασίας

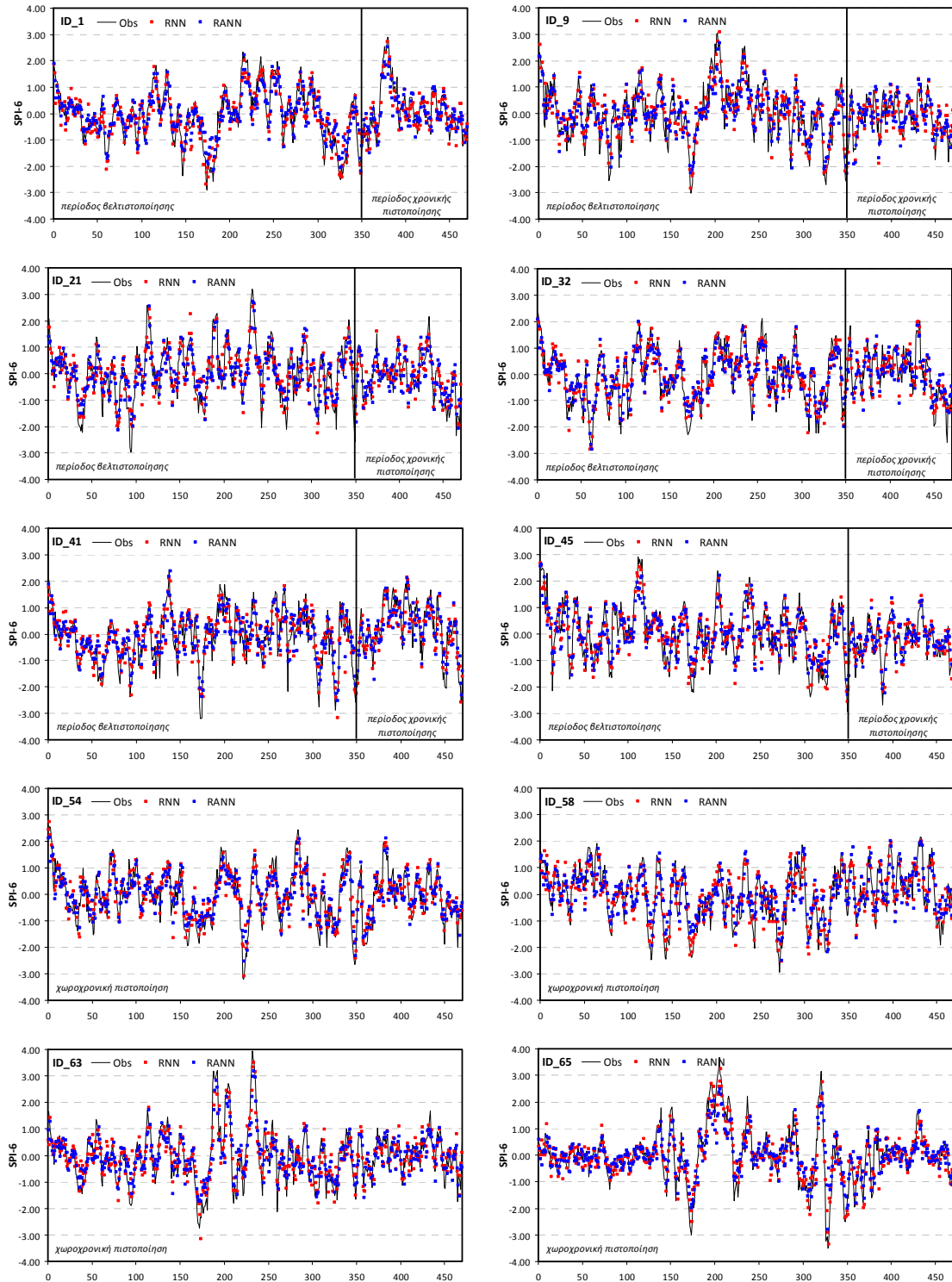


Σχήμα 8.6. Διαγράμματα χρονοσειρών χωροχρονικής πρόγνωσης του $SPI-6_{t+1}$ για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.

8.3.2. Χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+2$, $SPI-6_{t+2}$

Για το δεύτερο χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+2$, η εφαρμογή της υβριδικής χωροχρονικής μεθοδολογίας που συνδυάζει τις προγνώσεις της χρονικής μεθόδου RANN με τις γεωγραφικές συντεταγμένες των σταθμών ανάπτυξης έδωσε τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των ποσοτικών στατιστικών παραμέτρων της πρόγνωσης του SPI-6 για χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+2$ για τις τρεις περιόδους ελέγχου (Παράρτημα

II). Η μέθοδος RNN βελτιώνει κατά πολύ την χωροχρονική πρόγνωση του SPI-6 για χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+2$ σε σχέση με τη μέθοδο αναφοράς και τη χρονική μέθοδο RANN. Όλες οι στατιστικές παράμετροι βελτιώνονται σημαντικά και για τις τρεις περιόδους ελέγχου (εκπαίδευση, χρονική πιστοποίηση και χωροχρονική πιστοποίηση). Το Σχήμα 8.7 παρουσιάζει τις προγνώσεις του SPI-6 $_{t+2}$ για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης και φαίνεται ότι το χωροχρονικό μοντέλο RNN κρίνεται αρκετά ικανοποιητικό.



Σχήμα 8.7. Διαγράμματα χρονοσειρών πρόγνωσης του SPI-6 $_{t+2}$ για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.

Παρατηρείται όμως ότι το μοντέλο δεν μπορεί να προσομοιώσει αρκετά καλά κάποιες ακραίες τιμές του SPI και γενικά υποεκτιμά το εύρος του SPI αφού η τιμή της τυπικής απόκλισης των προβλέψεων είναι 0.86 και είναι μικρότερη της θεωρητικής τιμής (=1). Η ποιοτική ανάλυση των προγνώσεων που παρουσιάζεται στο Παράρτημα δείχνει την υπεροχή της χωροχρονικής μεθόδου RNN και στα ποιοτικά κριτήρια εκτίμησης επεισοδίων ξηρασίας εκτός του σκορ μεροληψίας (bias). Γενικά, όπως φαίνεται από το δείκτη κρίσιμης επιτυχίας CSI η μέθοδος RNN έχει πάνω από 45% ακρίβεια επιτυχίας χωροχρονικά και μπορεί οριακά να χρησιμοποιηθεί επιχειρησιακά σε συστήματα διαχείρισης της ξηρασίας με βάση το SPI-6 για προγνώσεις μέχρι και δύο μήνες μπροστά αφού ο δείκτης CSI των σταθμών ανάπτυξης είναι ίσος με 0.5 για την περίοδο ανάπτυξης. Για τα ποιοτικά κριτήρια πρόγνωσης επεισοδίων ξηρασίας της υβριδικής χωροχρονικής τεχνικής διαπιστώνεται ότι το 52% (25 από 48) και το 28% (5 από 18) των σταθμών ανάπτυξης και χωρικής πιστοποίησης, αντίστοιχα, παρουσιάζουν δείκτη κρίσιμη επιτυχίας CSI μεγαλύτερο του 0.5.

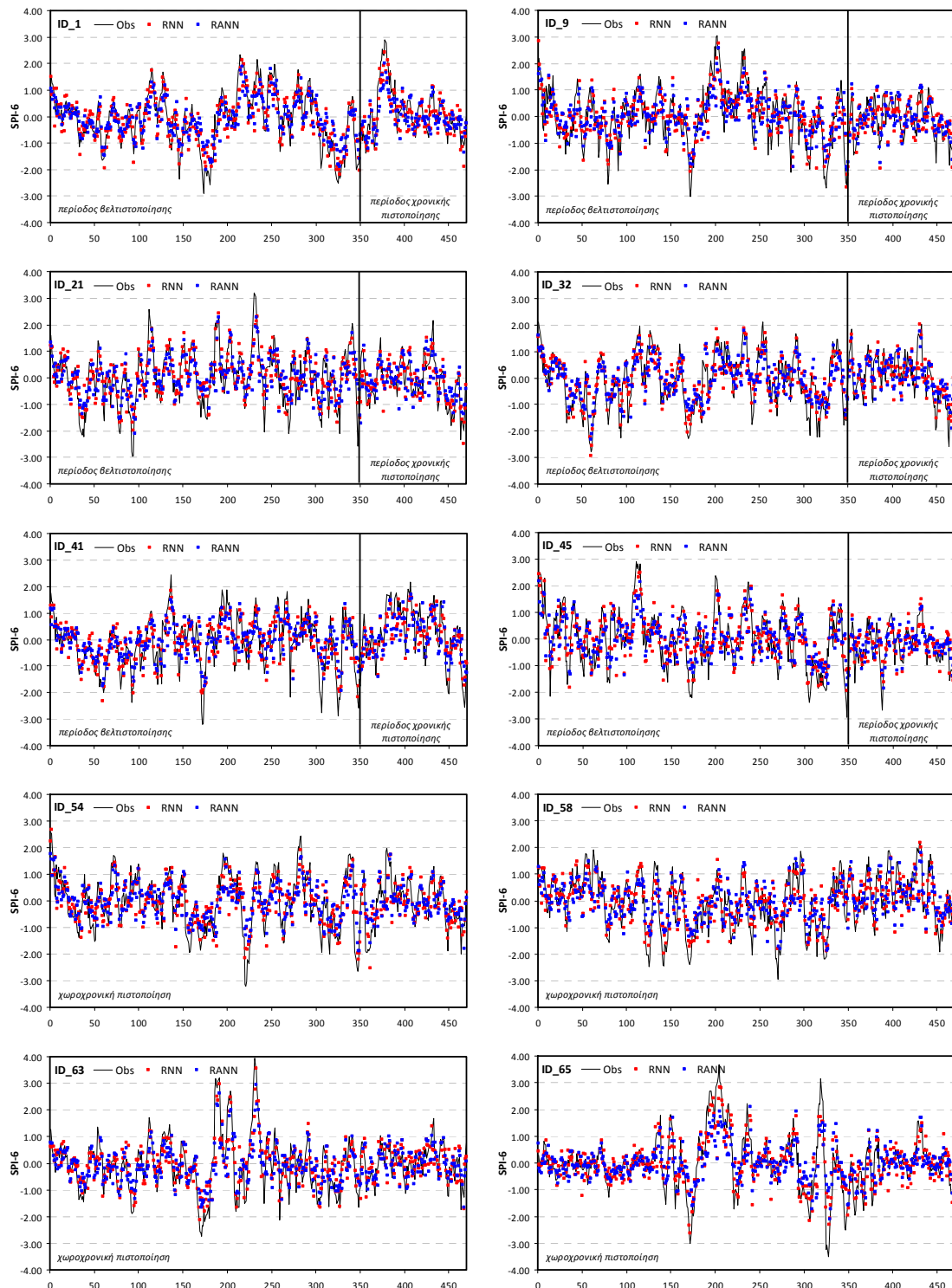
8.3.3. Χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+3$, SPI-6 _{$t+3$}

Για το τρίτο χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+3$, η εφαρμογή της υβριδικής χωροχρονικής μεθοδολογίας που συνδυάζει τις προγνώσεις της χρονικής μεθόδου RANN με τις γεωγραφικές συντεταγμένες των σταθμών ανάπτυξης αναμένεται να μην μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιχειρησιακά με αξιοπιστία προβλέψεων. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των ποσοτικών και ποιοτικών στατιστικών παραμέτρων της πρόγνωσης του SPI-6 για χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+3$ στις τρεις περιόδους ελέγχου επιβεβαιώνουν τα παραπάνω. Το Σχήμα 8.8 παρουσιάζει τις προγνώσεις του SPI-6 _{$t+3$} για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης και φαίνεται ότι το χωροχρονικό μοντέλο RNN κρίνεται αρκετά ικανοποιητικό. Παρατηρείται όμως ότι το μοντέλο δεν μπορεί να προσομοιώσει αρκετά καλά κάποιες ακραίες τιμές του SPI και γενικά υποεκτιμά το εύρος του SPI αφού η τιμή της τυπικής απόκλισης των προβλέψεων είναι 0.80 και είναι μικρότερη της θεωρητικής τιμής (=1). Η υπεροχή της χωροχρονικής μεθόδου RNN είναι εμφανής και στα ποιοτικά κριτήρια εκτίμησης επεισοδίων ξηρασίας εκτός του σκορ μεροληψίας (bias) αλλά δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συστήματα διαχείρισης της ξηρασίας με βάση το SPI-6 για προγνώσεις μέχρι και τρεις μήνες μπροστά. Από τα ποιοτικά κριτήρια πρόγνωσης επεισοδίων ξηρασίας της υβριδικής χωροχρονικής τεχνικής για τους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης διαπιστώνεται ότι το 21% (10 από 48) και το 0% (0 από 18) των σταθμών ανάπτυξης και χωρικής πιστοποίησης, αντίστοιχα, παρουσιάζουν δείκτη κρίσιμη επιτυχίας CSI μεγαλύτερο του 0.5. Άρα οι χωροχρονικές προγνώσεις του SPI-6 για τρεις μήνες μπροστά μπορούν να χρησιμοποιηθούν με αξιοπιστία στους σταθμούς ανάπτυξης που παρουσιάζουν CSI \geq 0.5 και με επιφύλαξη στους άλλους σταθμούς.

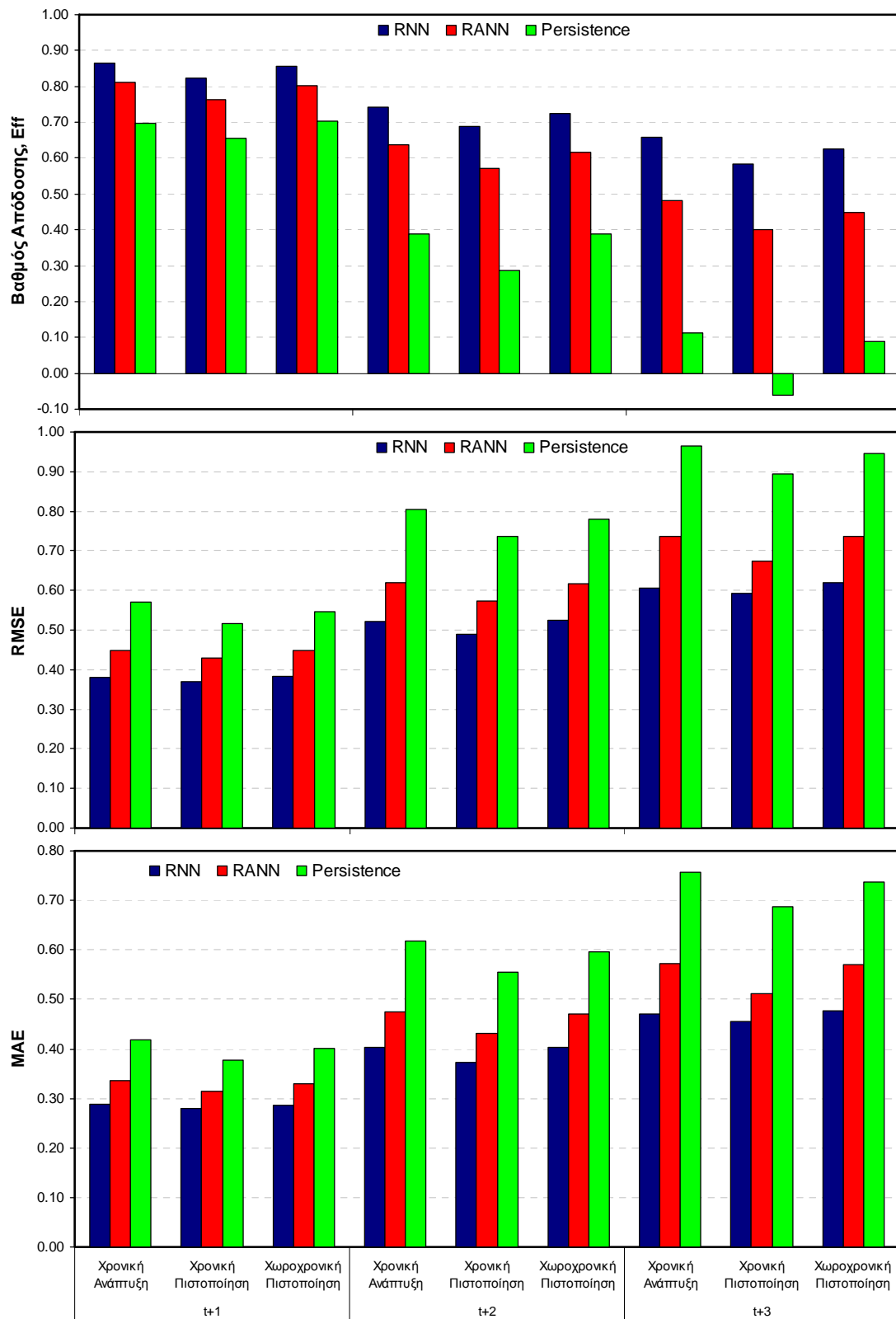
8.3.4. Σχολιασμός χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-6

Το χωροχρονικό αναδρομικό μοντέλο των προγνώσεων της χρονικής μεθόδου βελτιώνει την πρόγνωση του SPI-6 για τα βραχυπρόθεσμα διαστήματα πρόγνωσης (1 έως 2 μήνες). Το ίδιο ισχύει και για μεσοπρόθεσμα διαστήματα πρόγνωσης (3-6 μήνες). Οι χωροχρονικές προγνώσεις όμως δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν με αξιοπιστία για μεσοπρόθεσμα διαστήματα πρόγνωσης σε συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης. Τα Σχήματα 8.9 και 8.10 παρουσιάζουν τις κύριες ποσοτικές (Eff, RMSE και MAE) και το δείκτη κρίσιμης επιτυχίας (CSI) για βήματα πρόγνωσης από ένα έως τρεις μήνες μπροστά και επιβεβαιώνουν ότι το μοντέλο RNN δεν μπορεί να προβλέψει έγκαιρα τα αναγνωρισμένα επεισόδια ξηρασίας για χρονικά βήματα πρόγνωσης μεγαλύτερα από δύο μήνες. Τα χωροχρονικά αναδρομικά νευρωνικά δίκτυα καταφέρνουν τις προγνώσεις SPI _{$t+2$} της χρονικής μεθόδου RANN να τις κάνουν αξιόπιστες. Έτσι για το SPI-6 το προτεινόμενο υβριδικό χωροχρονικό σύστημα μπορεί να εφαρμοστεί σε συστήματα διαχείρισης της ξηρασίας για χρονικό βήμα πρόγνωσης δύο μηνών. Για διαστήματα

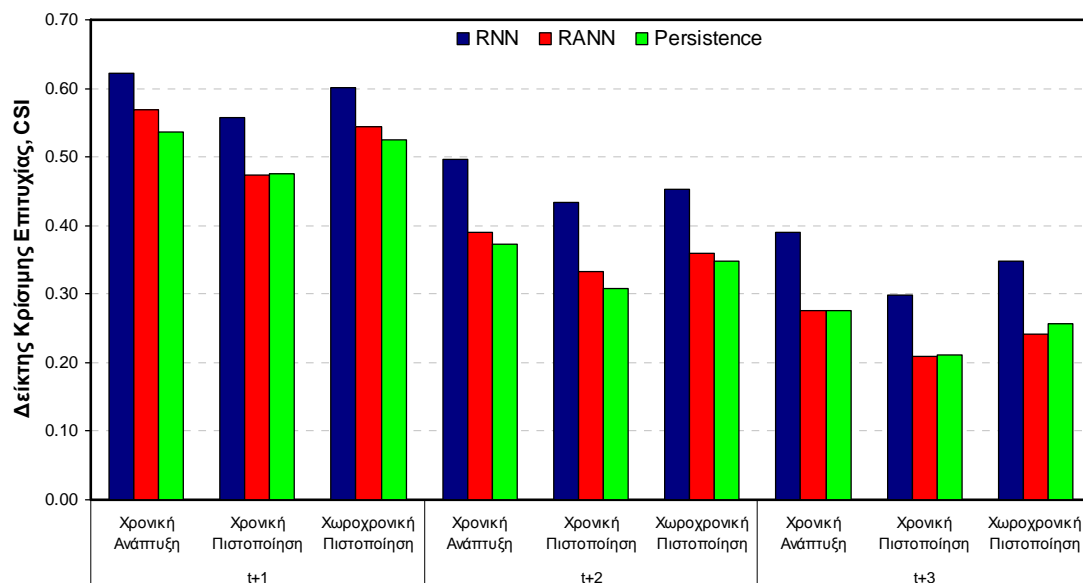
πρόγνωσης μεγαλύτερα από δύο μήνες οι προγνώσεις δεν έχουν αξιοπιστία και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πιθανές ενδείξεις ξηρασίας αλλά με μεγάλη αβεβαιότητα.



Σχήμα 8.8. Διαγράμματα χρονοσειρών πρόγνωσης του $SPI-6_{t+3}$ για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.



Σχήμα 8.9. Συνολικά ποσοτικά στατιστικά κριτήρια πρόγνωσης του SPI-6 για χρονικά βήματα πρόγνωσης από 1 έως 3 μήνες μπροστά.



Σχήμα 8.10. Δείκτης κρίσιμης επιτυχίας αναγνώρισης επεισοδίων ξηρασίας του SPI-6 για χρονικά βήματα πρόγνωσης από 1 έως 3 μήνες μπροστά.

8.4. Χωροχρονική πρόγνωση SPI-9μηνών

Η εφαρμογή της χρονικής μεθόδου RANN που αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο έδειξε ότι για το SPI-9μηνών υπάρχει ικανοποιητική και αμερόληπτη προσδιοριστική πρόγνωση μόνο για τα πρώτα δύο χρονικά βήματα πρόγνωσης ($t+1$ και $t+2$). Η χρονική εφαρμογή έδειξε επίσης ότι υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης των προγνώσεων λόγω της χρονικής υστέρησης των προγνώσεων σε κάποια παρατηρούμενα επεισόδια ξηρασίας κυρίως για χρονικά βήματα πρόγνωσης μεγαλύτερα από ένα μήνα. Για το λόγο αυτό, αναδρομικά νευρωνικά δίκτυα τύπου Elman (Recurrent Neural Networks, RNN) χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση των χρονικών και χωρικών προβλέψεων της μεθόδου RANN. Δεδομένα εισόδου στο RNN τύπου Elman ήταν οι σημειακές γεωγραφικές συντεταγμένες και το υψόμετρο των σταθμών και οι προβλέψεις του επαναληπτικού νευρωνικού δικτύου RANN για τους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης. Λόγω του μεγάλου πλήθους των αποτελεσμάτων τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικά για χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$ και περιληπτικά για τα υπόλοιπα βήματα πρόγνωσης. Τα αποτελέσματα για μεγαλύτερα βήματα πρόγνωσης παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα II.

8.4.1. Χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$, SPI-9 _{$t+1$}

Ο Πίνακας 8.5 παρουσιάζει τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των στατιστικών παραμέτρων της πρόγνωσης του SPI-9 για χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$ για την περίοδο βελτιστοποίησης και χρονικής πιστοποίησης των σταθμών ανάπτυξης, και τη χωροχρονική περίοδο των σταθμών πιστοποίησης. Στον ίδιο πίνακα, παρουσιάζονται τα στατιστικά κριτήρια για το μοντέλο εμμονής και της μεθόδου RANN. Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 8.5, η μέθοδος RNN βελτιώνει την χωροχρονική πρόγνωση του SPI-9 για χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$ σε σχέση με τη μέθοδο αναφοράς και τη χρονική μέθοδο RANN. Όλες οι στατιστικές παράμετροι βελτιώνονται σημαντικά και για τις τρεις περιόδους ελέγχου (εκπαίδευση, χρονική πιστοποίηση και χωροχρονική πιστοποίηση). Το Σχήμα 8.11 παρουσιάζει τις προγνώσεις του SPI-9 για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης και φαίνεται ότι το χωροχρονικό μοντέλο RNN κρίνεται πολύ ικανοποιητικό. Επίσης, το μοντέλο προσομοιώνει αρκετά καλά τις ακραίες τιμές του SPI και το εύρος του SPI αφού η τιμή της τυπικής απόκλισης των προβλέψεων είναι 0.95 και

είναι λίγο μικρότερη της θεωρητικής τιμής (=1). Η ικανότητα πρόγνωσης όπως δίνεται από κριτήριο Skill Score του μέσου τετραγωνισμένου σφάλματος (SS_{MSE}) και μέθοδο αναφοράς το Persistence μοντέλο δείχνει ότι η μέθοδος RNN παρουσιάζει βελτίωση στην πρόγνωση του $SPI-9_{t+1}$ και για τις τρεις περιόδους ελέγχου (Πίνακας 8.5). Τα στοιχεία και τα ποιοτικά στατιστικά κριτήρια της ποιοτικής ανάλυσης της πρόγνωσης επεισοδίων ξηρασίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.6 για το υβριδικό χωροχρονικό μοντέλο RNN τύπου Elman. Η υπεροχή της χωροχρονικής μεθόδου RNN είναι εμφανής και στα ποιοτικά κριτήρια εκτίμησης επεισοδίων ξηρασίας εκτός του σκορ μεροληψίας (bias). Γενικά, όπως φαίνεται από το δείκτη κρίσιμης επιτυχίας CSI η μέθοδος RNN έχει πάνω από 60% ακρίβεια επιτυχίας και μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιχειρησιακά σε συστήματα διαχείρισης της ξηρασίας. Αξιοσημείωτο είναι η αναλογία πιθανοτήτων OR για τη μέθοδο RNN που δείχνει ότι οι πιθανότητες πρόβλεψης μία πρόγνωση να είναι σωστή είναι τουλάχιστον 95 φορές μεγαλύτερη από την πιθανότητα να είναι λανθασμένη πρόγνωση. Οι αντίστοιχες αναλογίες πιθανοτήτων είναι αρκετά μικρότερες για τις μεθόδους Persistence και RANN (50 και 83 φορές αντίστοιχα) (Πίνακας 8.6). Από τα ποιοτικά κριτήρια πρόγνωσης επεισοδίων ξηρασίας της υβριδικής χωροχρονικής τεχνικής για τους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης διαπιστώνεται ότι το 98% (47 από 48) και το 94% (17 από 18) των σταθμών ανάπτυξης και χωρικής πιστοποίησης, αντίστοιχα, παρουσιάζουν δείκτη κρίσιμη επιτυχίας CSI μεγαλύτερο του 0.5. Τέλος, το 88% των σταθμών ανάπτυξης και το 89% των σταθμών πιστοποίησης έχουν πιθανότητα ανίχνευσης επεισοδίων (POD) ξηρασίας μεγαλύτερη του 67%.

Πίνακας 8.5. Στατιστικά αποτελέσματα χωροχρονικής πρόγνωσης $SPI-9_{t+1}$ για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης

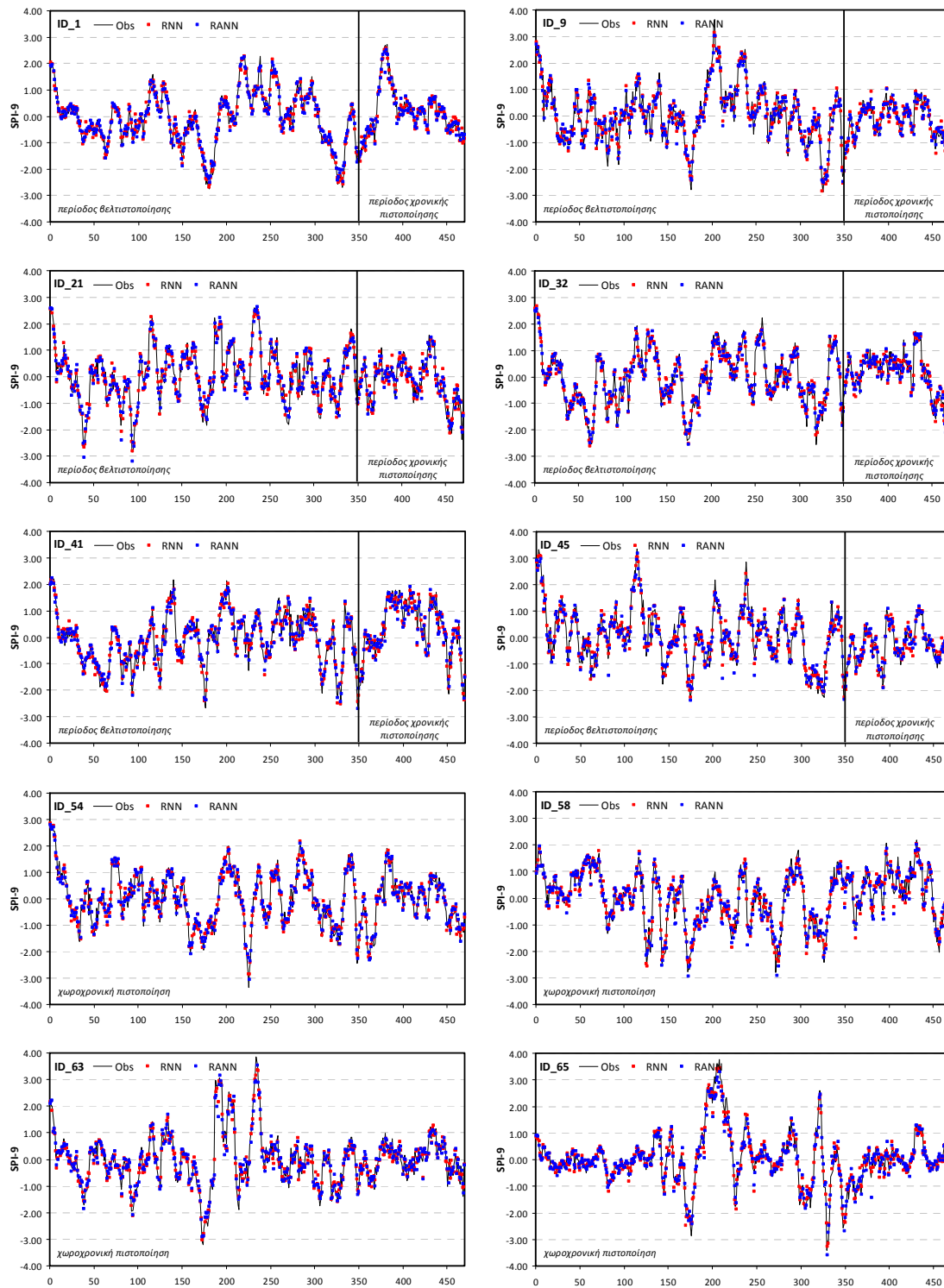
Κριτήριο	RNN			RANN			Persistence Model		
	1 ⁿ	2 ⁿ	3 ⁿ	1 ⁿ	2 ⁿ	3 ⁿ	1 ⁿ	2 ⁿ	3 ⁿ
Eff	0.92	0.89	0.91	0.89	0.86	0.88	0.81	0.80	0.82
R	0.96	0.95	0.96	0.94	0.93	0.94	0.91	0.90	0.91
RMSE	0.29	0.28	0.30	0.35	0.33	0.35	0.45	0.39	0.43
MAE	0.22	0.21	0.22	0.26	0.25	0.26	0.33	0.29	0.32
SS_{MSE}	0.57	0.47	0.52	0.38	0.29	0.32	Μοντέλο Αναφοράς		

1ⁿ = περίοδος ανάπτυξης, 2ⁿ = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3ⁿ = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

Πίνακας 8.6. Στατιστικά αποτελέσματα ποιοτικής χωροχρονικής πρόγνωσης $SPI-9_{t+1}$ συμβάντων ξηρασίας ($SPI \leq -1$) για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης

Στοιχεία	RNN			RANN			Persistence Model		
	1 ⁿ	2 ⁿ	3 ⁿ	1 ⁿ	2 ⁿ	3 ⁿ	1 ⁿ	2 ⁿ	3 ⁿ
A	2215	445	1047	2078	428	978	2124	430	1009
C	369	130	184	418	130	205	649	217	345
B	585	181	307	722	198	376	676	196	345
D	13631	5004	6922	13582	5004	6901	13351	4917	6761
Κριτήριο	1 ⁿ	2 ⁿ	3 ⁿ	1 ⁿ	2 ⁿ	3 ⁿ	1 ⁿ	2 ⁿ	3 ⁿ
Accuracy	0.94	0.95	0.94	0.93	0.94	0.93	0.92	0.93	0.92
Bias	0.92	0.92	0.91	0.89	0.89	0.87	0.99	1.03	1.00
POD	0.79	0.71	0.77	0.74	0.68	0.72	0.76	0.69	0.75
FAR	0.14	0.23	0.15	0.17	0.23	0.17	0.23	0.34	0.25
POFD	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.05	0.04	0.05
CSI	0.70	0.59	0.68	0.65	0.57	0.63	0.62	0.51	0.59
HK	0.76	0.69	0.75	0.71	0.66	0.69	0.71	0.64	0.70
OR	139.87	94.64	128.30	93.52	83.21	87.56	64.64	49.71	57.31

1ⁿ = περίοδος ανάπτυξης, 2ⁿ = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3ⁿ = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης
A=επιτυχίες, B=αστοχίες, C=Λανθασμένοι συναγερμοί, και D=σωστά μη επεισόδια ξηρασίας

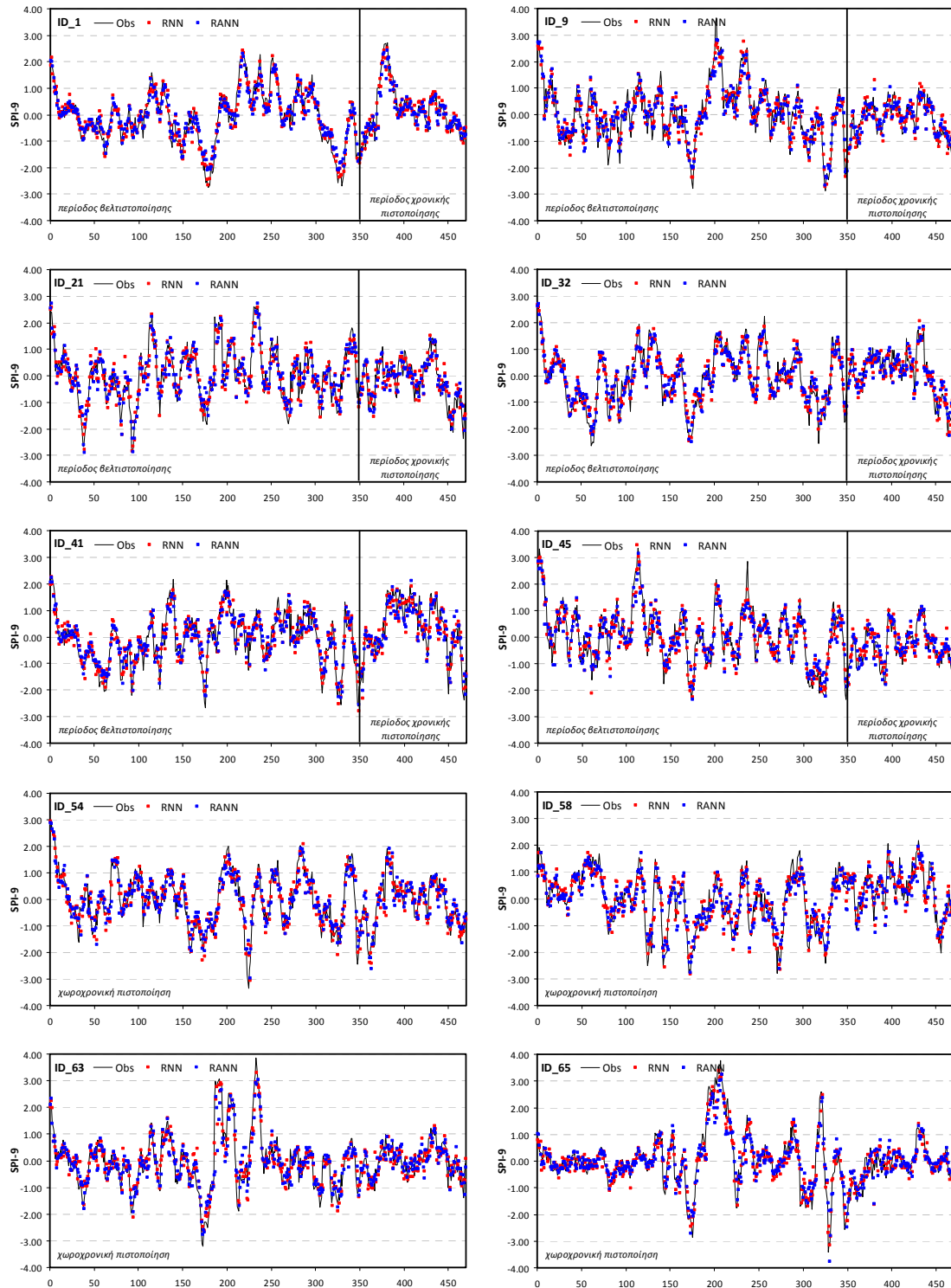


Σχήμα 8.11. Διαγράμματα χρονοσειρών χωροχρονικής πρόγνωσης του $SPI-9_{t+1}$ για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.

8.4.2. Χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+2$, $SPI-9_{t+2}$

Για το δεύτερο χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+2$, η εφαρμογή της υβριδικής χωροχρονικής μεθοδολογίας που συνδυάζει τις προγνώσεις της χρονικής μεθόδου RANN με τις γεωγραφικές συντεταγμένες των σταθμών ανάπτυξης έδωσε τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των ποσοτικών και ποιοτικών στατιστικών παραμέτρων της πρόγνωσης του $SPI-9$ για χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+2$ για τις τρεις περιόδους

ελέγχου (Παράρτημα II). Το Σχήμα 8.12 παρουσιάζει τις προγνώσεις του $SPI-9_{t+2}$ για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης και φαίνεται ότι το χωροχρονικό μοντέλο RNN κρίνεται πολύ ικανοποιητικό. Επίσης, το μοντέλο προσομοιώνει αρκετά καλά τις ακραίες τιμές του SPI και το εύρος του SPI αφού η τιμή της τυπικής απόκλισης των προβλέψεων είναι 0.90 και είναι λίγο μικρότερη της θεωρητικής τιμής (=1).



Σχήμα 8.12. Διαγράμματα χρονοσειρών χωροχρονικής πρόγνωσης του $SPI-9_{t+2}$ για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.

Τα ποσοτικά και ποιοτικά κριτήρια πρόγνωσης επεισοδίων ξηρασίας για το SPI-9_{t+2} που παρουσιάζονται στο Παράρτημα II δείχνουν την υπεροχή της χωροχρονικής μεθόδου RNN σε όλα τα κριτήρια εκτός του σκορ μεροληψίας (bias). Γενικά, όπως φαίνεται από το δείκτη κρίσιμης επιτυχίας CSI η μέθοδος RNN έχει πάνω από 55% ακρίβεια επιτυχίας χωροχρονικά και μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιχειρησιακά σε συστήματα διαχείρισης της ξηρασίας με βάση το SPI-9 για προγνώσεις μέχρι και δύο μήνες μπροστά. Από τα ποιοτικά κριτήρια πρόγνωσης επεισοδίων ξηρασίας της υβριδικής χωροχρονικής τεχνικής για τους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης διαπιστώνεται ότι το 85% (41 από 48) και το 78% (14 από 18) των σταθμών ανάπτυξης και χωρικής πιστοποίησης, αντίστοιχα, παρουσιάζουν δείκτη κρίσιμη επιτυχίας CSI μεγαλύτερο του 0.5. Τέλος, το 54% των σταθμών ανάπτυξης και το 50% των σταθμών πιστοποίησης έχουν πιθανότητα ανίχνευσης επεισοδίων (POD) μεγαλύτερη του 67% (βλ. Παράρτημα).

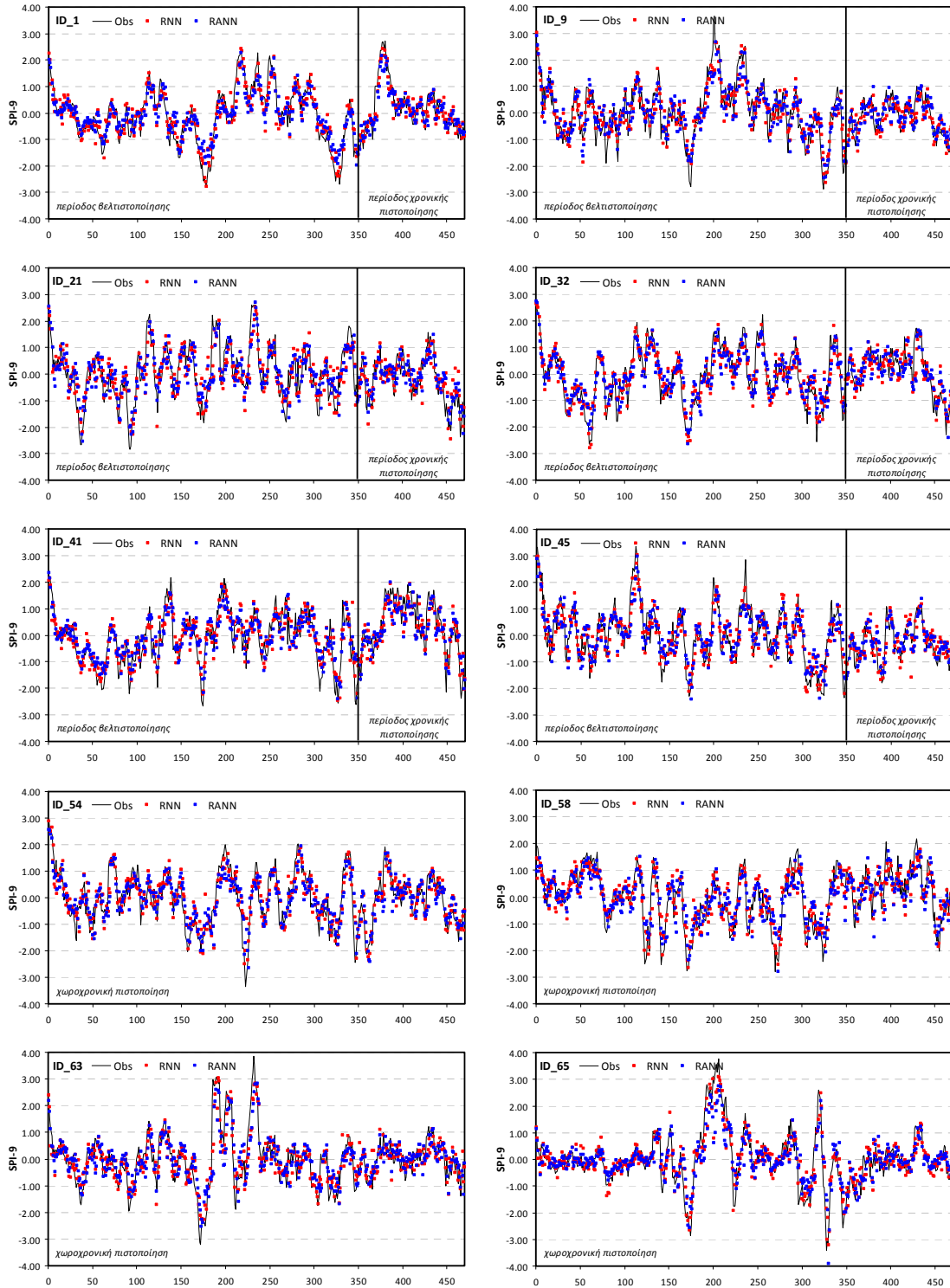
8.4.3. Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+3, SPI-9_{t+3}

Η εφαρμογή της υβριδικής χωροχρονικής μεθοδολογίας που συνδυάζει τις προγνώσεις της χρονικής μεθόδου RANN με τις γεωγραφικές συντεταγμένες των σταθμών ανάπτυξης έδωσε τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των ποσοτικών και ποιοτικών στατιστικών της πρόγνωσης του SPI-9 για χρονικό βήμα πρόγνωσης t+3 για τις τρεις περιόδους ελέγχου που παρουσιάζονται στο Παράρτημα II. Το Σχήμα 8.13 παρουσιάζει τις προγνώσεις του SPI-9_{t+3} για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης και φαίνεται ότι το χωροχρονικό μοντέλο RNN κρίνεται αρκετά ικανοποιητικό. Επίσης, το μοντέλο προσομοιώνει καλά τις ακραίες τιμές του SPI αλλά υποεκτιμά το εύρος των τιμών του SPI αφού η μέση τιμή της τυπικής απόκλισης των προβλέψεων είναι 0.86 και είναι μικρότερη της θεωρητικής τιμής (=1). Η υπεροχή της χωροχρονικής μεθόδου RNN είναι εμφανής τόσο στα ποσοτικά όσο και στα ποιοτικά κριτήρια εκτίμησης επεισοδίων ξηρασίας εκτός του σκορ μεροληψίας (bias). Γενικά, όπως φαίνεται από το δείκτη κρίσιμης επιτυχίας CSI η μέθοδος RNN έχει πάνω από 50% ακρίβεια επιτυχίας στους σταθμούς ανάπτυξης και μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιχειρησιακά σε συστήματα διαχείρισης της ξηρασίας με βάση το SPI-9 για προγνώσεις μέχρι και τρεις μήνες μπροστά. Τα ποιοτικά κριτήρια πρόγνωσης επεισοδίων ξηρασίας της υβριδικής χωροχρονικής τεχνικής για τους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης παρουσιάζονται στο Παράρτημα, από όπου διαπιστώνεται ότι το 58% (28 από 48) και το 44% (8 από 18) των σταθμών ανάπτυξης και χωρικής πιστοποίησης, αντίστοιχα, παρουσιάζουν δείκτη κρίσιμη επιτυχίας CSI μεγαλύτερο του 0.5. Τέλος, το 31% των σταθμών ανάπτυξης και το 11% των σταθμών πιστοποίησης έχουν πιθανότητα ανίχνευσης επεισοδίων (POD) μεγαλύτερη του 67%.

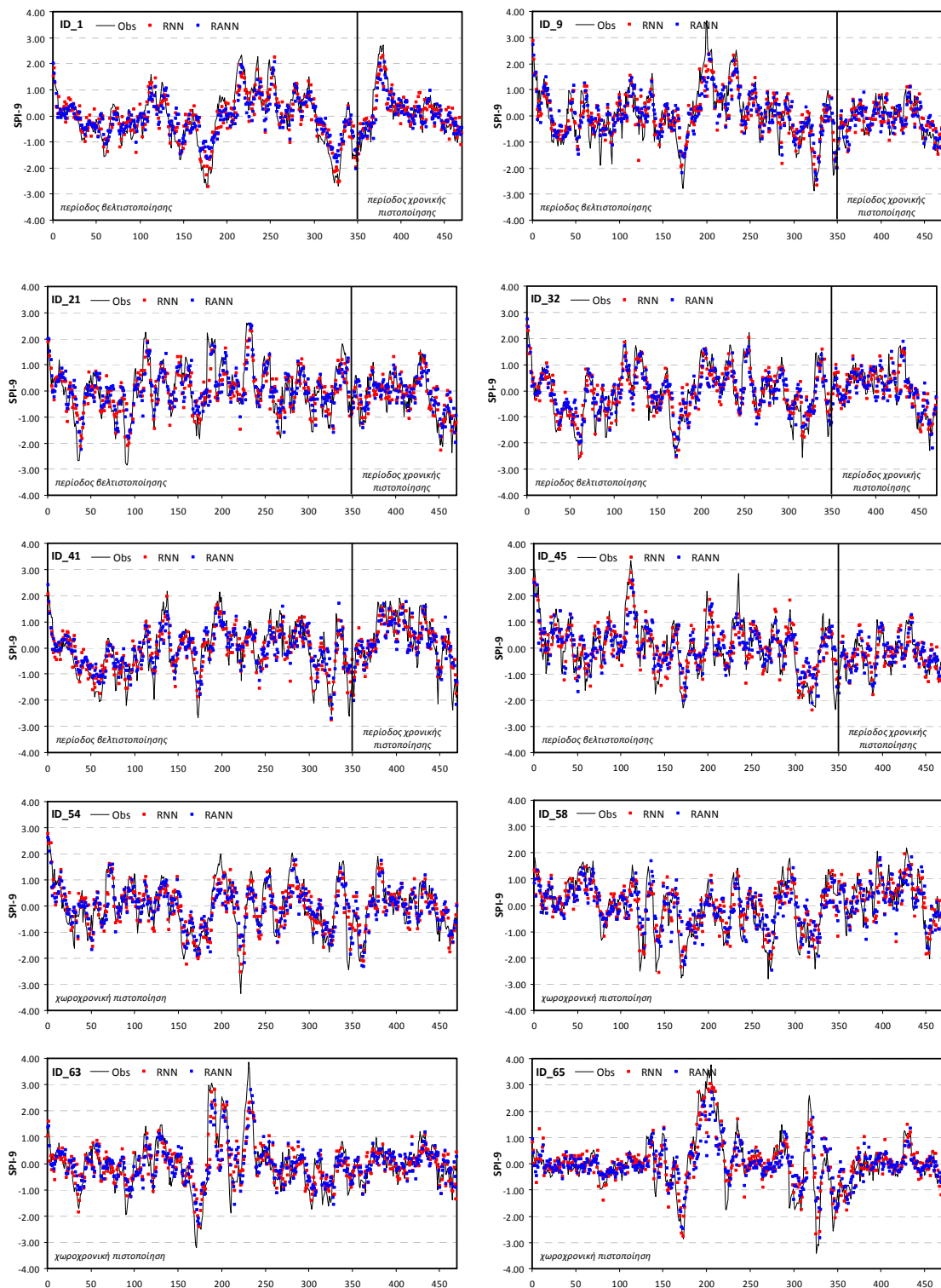
8.4.4. Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+4, SPI-9_{t+4}

Η εφαρμογή της υβριδικής χωροχρονικής μεθοδολογίας που συνδυάζει τις προγνώσεις της χρονικής μεθόδου RANN με τις γεωγραφικές συντεταγμένες των σταθμών ανάπτυξης αναμένεται να μην μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιχειρησιακά με αξιοπιστία προβλέψεων για χρονικό βήμα πρόγνωσης t+4. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των ποσοτικών και ποιοτικών στατιστικών παραμέτρων της πρόγνωσης του SPI-9 για χρονικό βήμα πρόγνωσης t+4 στις τρεις περιόδους ελέγχου επιβεβαιώνουν την παραπάνω υπόθεση (Παράρτημα II). Η μέθοδος RNN αν και βελτιώνει κατά πολύ την χωροχρονική πρόγνωση του SPI-9 για χρονικό βήμα πρόγνωσης t+4 σε σχέση με το μοντέλο εμμονής και τη χρονική μέθοδο RANN δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συστήματα διαχείρισης της ξηρασίας με βάση το SPI-9 για προγνώσεις μέχρι και τέσσερις μήνες μπροστά (δείκτης κρίσιμης επιτυχίας CSI<0.5). Το Σχήμα 8.14 παρουσιάζει τις προγνώσεις του SPI-9_{t+4} για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης και φαίνεται ότι το χωροχρονικό μοντέλο RNN κρίνεται ικανοποιητικό. Παρατηρείται όμως ότι το μοντέλο δεν μπορεί να προσομοιώσει αρκετά καλά κάποιες ακραίες τιμές του SPI και γενικά υποεκτιμά το εύρος του SPI αφού η μέση τιμή της τυπικής απόκλισης των προβλέψεων είναι 0.81 και είναι μικρότερη της θεωρητικής τιμής (=1). Από την αξιολόγηση των ποιοτικών κριτηρίων πρόγνωσης επεισοδίων ξηρασίας της υβριδικής χωροχρονικής τεχνικής για τους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης διαπιστώνεται

ότι το 23% (11 από 48) και το 0% (0 από 18) των σταθμών ανάπτυξης και χωρικής πιστοποίησης, αντίστοιχα, παρουσιάζουν δείκτη κρίσιμη επιτυχίας CSI μεγαλύτερο του 0.5. Άρα οι χωροχρονικές προγνώσεις του SPI-9 για τέσσερις μήνες μπροστά μπορούν να χρησιμοποιηθούν με αξιοπιστία στους σταθμούς ανάπτυξης που παρουσιάζουν $CSI \geq 0.5$ και με επιφύλαξη στους άλλους σταθμούς.



Σχήμα 8.13. Διαγράμματα χρονοσειρών πρόγνωσης του $SPI-9_{t+3}$ για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.

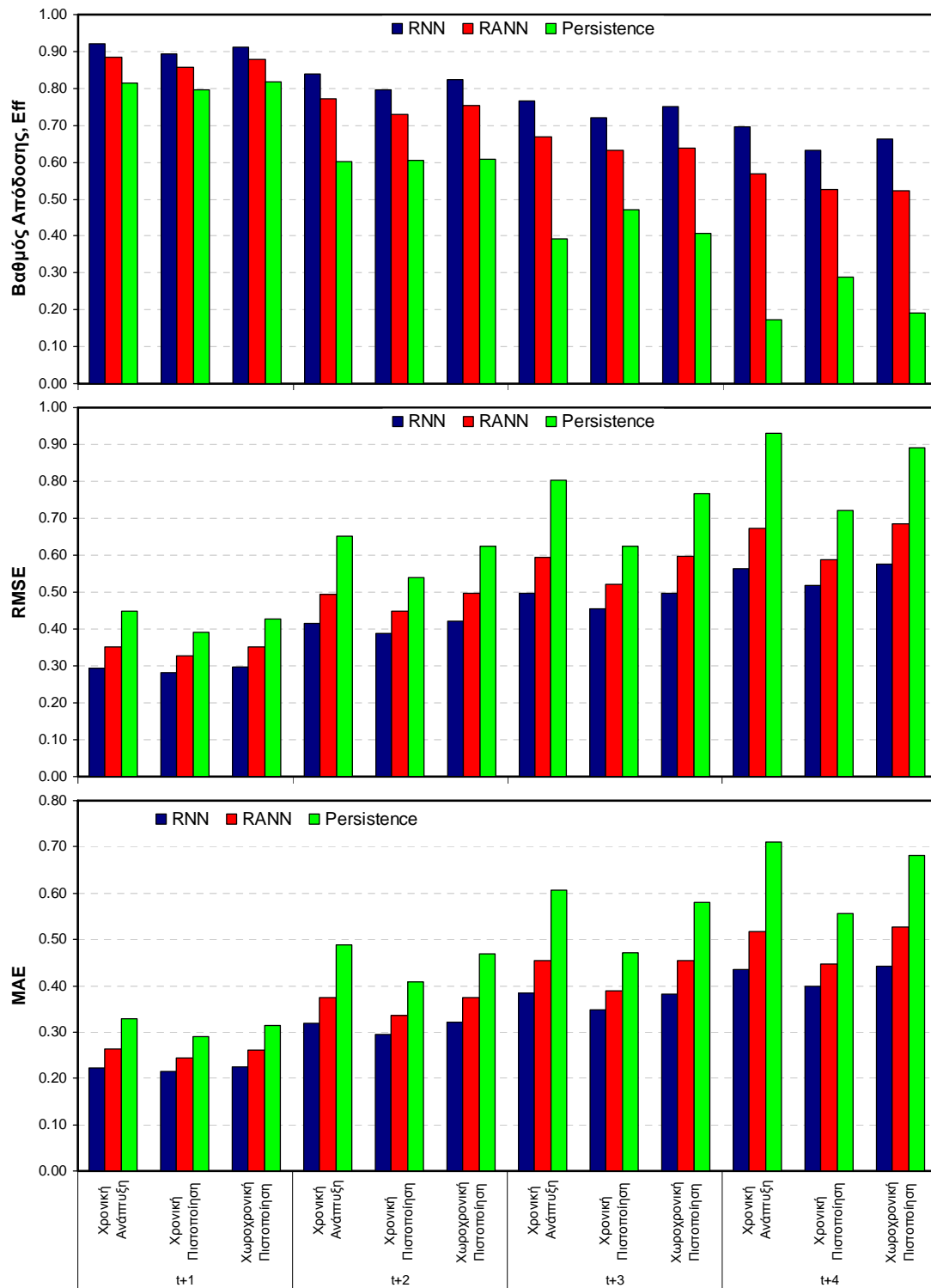


Σχήμα 8.14. Διαγράμματα χρονοσειρών πρόγνωσης του SPI-9_{t+4} για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.

8.4.5. Σχολιασμός χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-9

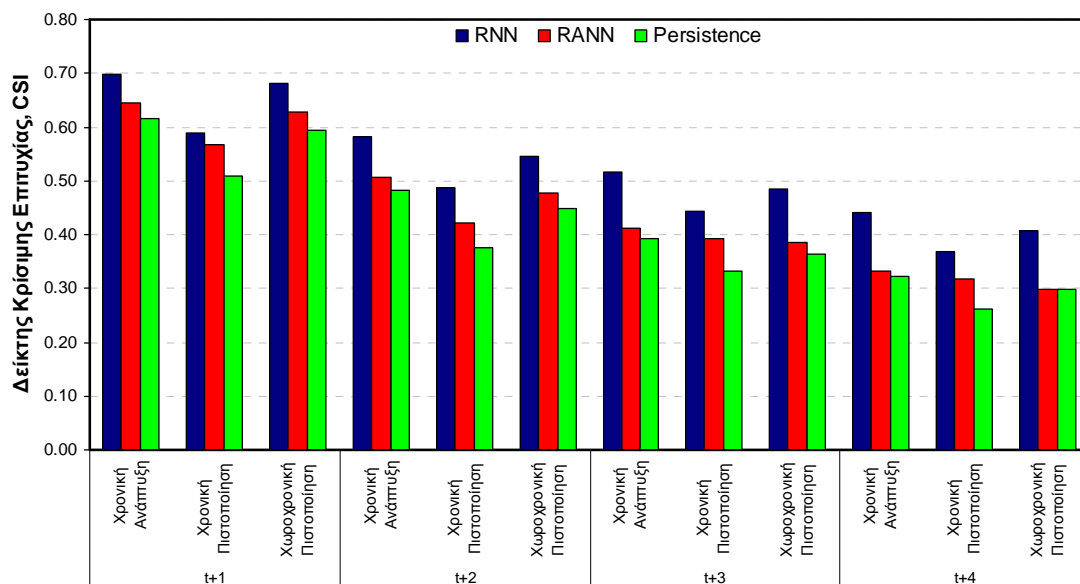
Το χωροχρονικό αναδρομικό μοντέλο των προγνώσεων της χρονικής μεθόδου βελτιώνει την πρόγνωση του SPI-9 για τα βραχυπρόθεσμα διαστήματα πρόγνωσης (1 έως 2 μήνες). Το ίδιο ισχύει και για μεσοπρόθεσμα διαστήματα πρόγνωσης (3-6 μήνες). Οι χωροχρονικές προγνώσεις όμως δεν μπορούν

να χρησιμοποιηθούν με αξιοπιστία για διαστήματα πρόγνωσης μεγαλύτερα από τρεις μήνες σε συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης της ξηρασίας. Τα Σχήματα 8.15 και 8.16 παρουσιάζουν τις κύριες ποσοτικές (Eff, RMSE και MAE) και το δείκτη κρίσιμης επιτυχίας (CSI) για βήματα πρόγνωσης από ένα έως τέσσερις μήνες μπροστά και επιβεβαιώνουν ότι το μοντέλο RNN δεν μπορεί να προβλέψει έγκαιρα τα αναγνωρισμένα επεισόδια ξηρασίας για χρονικά βήματα πρόγνωσης μεγαλύτερα από τρεις μήνες. Όμως, τα χωροχρονικά αναδρομικά νευρωνικά δίκτυα καταφέρνουν τις προγνώσεις SPI_{t+3} της χρονικής μεθόδου RANN να τις κάνουν αξιόπιστες.



Σχήμα 8.15. Συνολικά ποσοτικά στατιστικά κριτήρια πρόγνωσης του SPI-9 για χρονικά βήματα πρόγνωσης από 1 έως 4 μήνες μπροστά.

Έτσι για το SPI-9 το προτεινόμενο υβριδικό χωροχρονικό σύστημα μπορεί να εφαρμοστεί σε συστήματα διαχείρισης της ξηρασίας για χρονικό βήμα πρόγνωσης τριών μηνών. Για διαστήματα πρόγνωσης μεγαλύτερα από τρεις μήνες οι προγνώσεις δεν έχουν αξιοπιστία και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πιθανές ενδείξεις ξηρασίας αλλά με μεγάλη αβεβαιότητα. Αξίζει όμως να σημειωθεί η απόδοση της RNN στα ακραία γεγονότα ξηρασίας ($SPI \leq -2$) που προσομοιώνει ικανοποιητικά τη δριμύτητα και τη διάρκεια των γεγονότων ξηρασίας για διάστημα πρόγνωσης 4 μηνών (Σχήμα 8.14)



Σχήμα 8.16. Δείκτης κρίσιμης επιτυχίας αναγνώρισης επεισοδίων ξηρασίας του SPI-9 για χρονικά βήματα πρόγνωσης από 1 έως 4 μήνες μπροστά.

8.5. Χωροχρονική πρόγνωση SPI-12μηνών

Η εφαρμογή της χρονικής μεθόδου RANN που αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο έδειξε ότι για το SPI-12μηνών υπάρχει ικανοποιητική και αμερόληπτη προσδιοριστική πρόγνωση μόνο για τα πρώτα δύο χρονικά βήματα πρόγνωσης ($t+1$ και $t+2$) και οριακά μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το χρονικό βήμα $t+3$. Η χρονική εφαρμογή έδειξε επίσης ότι υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης των προγνώσεων λόγω της χρονικής υστέρησης των προγνώσεων σε κάποια παρατηρούμενα επεισόδια ξηρασίας κυρίως για χρονικά βήματα πρόγνωσης μεγαλύτερα από ένα μήνα. Για το λόγο αυτό, αναδρομικά νευρωνικά δίκτυα τύπου Elman (Recurrent Neural Networks, RNN) χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση των χρονικών και χωρικών προβλέψεων της μεθόδου RANN. Δεδομένα εισόδου στο RNN τύπου Elman ήταν οι σημειακές γεωγραφικές συντεταγμένες και το υψόμετρο των σταθμών και οι προβλέψεις του επαναληπτικού νευρωνικού δικτύου RANN για τους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης. Λόγω του μεγάλου πλήθους των αποτελεσμάτων τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικά για χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$ και περιληπτικά για τα υπόλοιπα βήματα πρόγνωσης. Τα αποτελέσματα για μεγαλύτερα βήματα πρόγνωσης παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα II.

8.5.1. Χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$, SPI-12 $_{t+1}$

Ο Πίνακας 8.7 παρουσιάζει τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των ποσοτικών στατιστικών παραμέτρων της πρόγνωσης του SPI-12 για χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$ για την περίοδο βελτιστοποίησης και

χρονικής πιστοποίησης των σταθμών ανάπτυξης, και τη χωροχρονική περίοδο των σταθμών πιστοποίησης. Στον ίδιο πίνακα, παρουσιάζονται τα στατιστικά κριτήρια για το μοντέλο εμμονής και της χρονικής μεθόδου RANN. Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 8.7, η μέθοδος RNN βελτιώνει την χωροχρονική πρόγνωση του SPI-12 για χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$ σε σχέση με τη μέθοδο αναφοράς και τη χρονική μέθοδο RANN και για τις τρεις περιόδους ελέγχου. Το Σχήμα 8.17 παρουσιάζει τις προγνώσεις του SPI-12 για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης και συμπεραίνεται ότι το χωροχρονικό μοντέλο RNN κρίνεται πάρα πολύ ικανοποιητικό. Επίσης, το μοντέλο προσομοιώνει αρκετά καλά τις ακραίες τιμές του SPI και το εύρος του SPI αφού η μέση τιμή της τυπικής απόκλισης των προβλέψεων είναι 0.98 και είναι λίγο μικρότερη της θεωρητικής τιμής (=1). Τα στοιχεία και τα ποιοτικά στατιστικά κριτήρια της ανάλυσης πρόγνωσης επεισοδίων ξηρασίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.20 για το υβριδικό χωροχρονικό μοντέλο RNN τύπου Elman. Η υπεροχή της χωροχρονικής μεθόδου RNN είναι εμφανής και στα ποιοτικά κριτήρια εκτίμησης επεισοδίων ξηρασίας εκτός του σκορ μεροληψίας (bias). Γενικά, όπως φαίνεται από το δείκτη κρίσιμης επιτυχίας CSI η μέθοδος RNN έχει τουλάχιστον 74% ακρίβεια επιτυχίας χωροχρονικά και μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιχειρησιακά σε συστήματα διαχείρισης της ξηρασίας. Αξιοσημείωτη είναι η αναλογία πιθανοτήτων OR για τη μέθοδο RNN που δείχνει ότι οι πιθανότητες πρόβλεψης μία πρόγνωση να είναι σωστή είναι τουλάχιστον 170 φορές μεγαλύτερη από την πιθανότητα να είναι λανθασμένη πρόγνωση. Οι αντίστοιχες αναλογίες πιθανοτήτων είναι αρκετά μικρότερες για τις μεθόδους Persistence και RANN (100 και 115 φορές αντίστοιχα) (Πίνακας 8.20).

Πίνακας 8.7. Στατιστικά αποτελέσματα χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-12_{t+1} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης

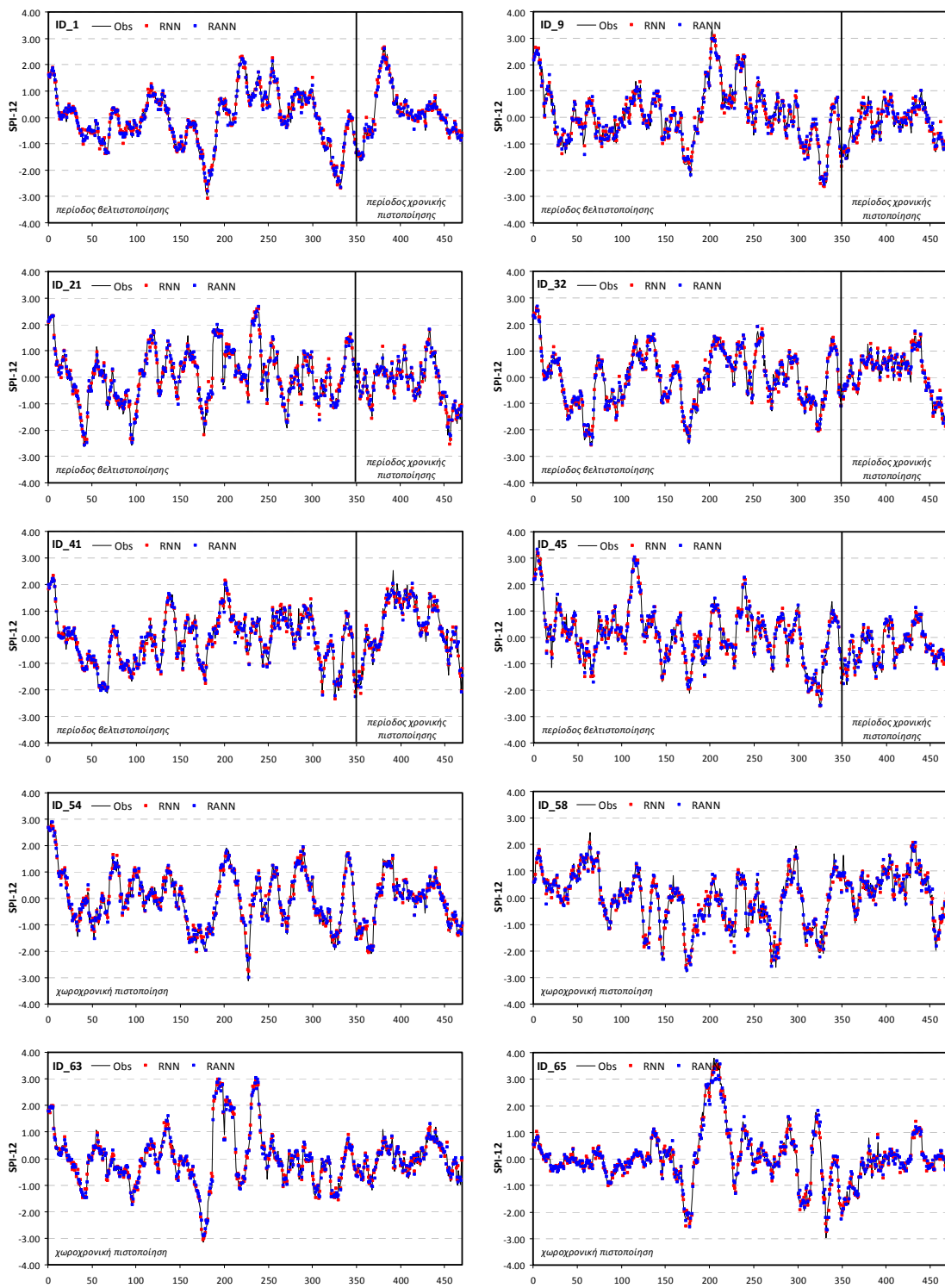
Κριτήριο	RNN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Eff	0.95	0.93	0.94	0.93	0.91	0.92	0.88	0.85	0.88
R	0.97	0.97	0.97	0.96	0.95	0.96	0.94	0.93	0.94
RMSE	0.24	0.23	0.24	0.28	0.27	0.29	0.36	0.34	0.35
MAE	0.18	0.17	0.18	0.21	0.20	0.21	0.25	0.24	0.25
SS _{MSE}	0.57	0.55	0.54	0.39	0.36	0.34	Μοντέλο αναφοράς		

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

Πίνακας 8.8. Στατιστικά αποτελέσματα ποιοτικής χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-12_{t+1} συμβάντων ξηρασίας (SPI≤-1) για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης

Στοιχεία	RNN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
A	2296	574	1132	2193	534	1079	2210	570	1109
C	322	108	163	376	117	192	517	175	254
B	453	154	232	556	194	285	539	158	255
D	13729	4924	6933	13675	4915	6904	13534	4857	6842
Κριτήριο	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Accuracy	0.95	0.95	0.95	0.94	0.95	0.94	0.94	0.94	0.94
Bias	0.95	0.94	0.95	0.93	0.89	0.93	0.99	1.02	1.00
POD	0.84	0.79	0.83	0.80	0.73	0.79	0.80	0.78	0.81
FAR	0.12	0.16	0.13	0.15	0.18	0.15	0.19	0.23	0.19
POFD	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.04	0.03	0.04
CSI	0.75	0.69	0.74	0.70	0.63	0.69	0.68	0.63	0.69
HK	0.81	0.77	0.81	0.77	0.71	0.76	0.77	0.75	0.78
OR	216.10	169.94	207.54	143.45	115.63	136.14	107.33	100.13	117.15

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης
A=επιτυχίες, B=αστοχίες, C=Λανθασμένοι συναγερμοί, και D=σωστά μη επεισόδια ξηρασίας

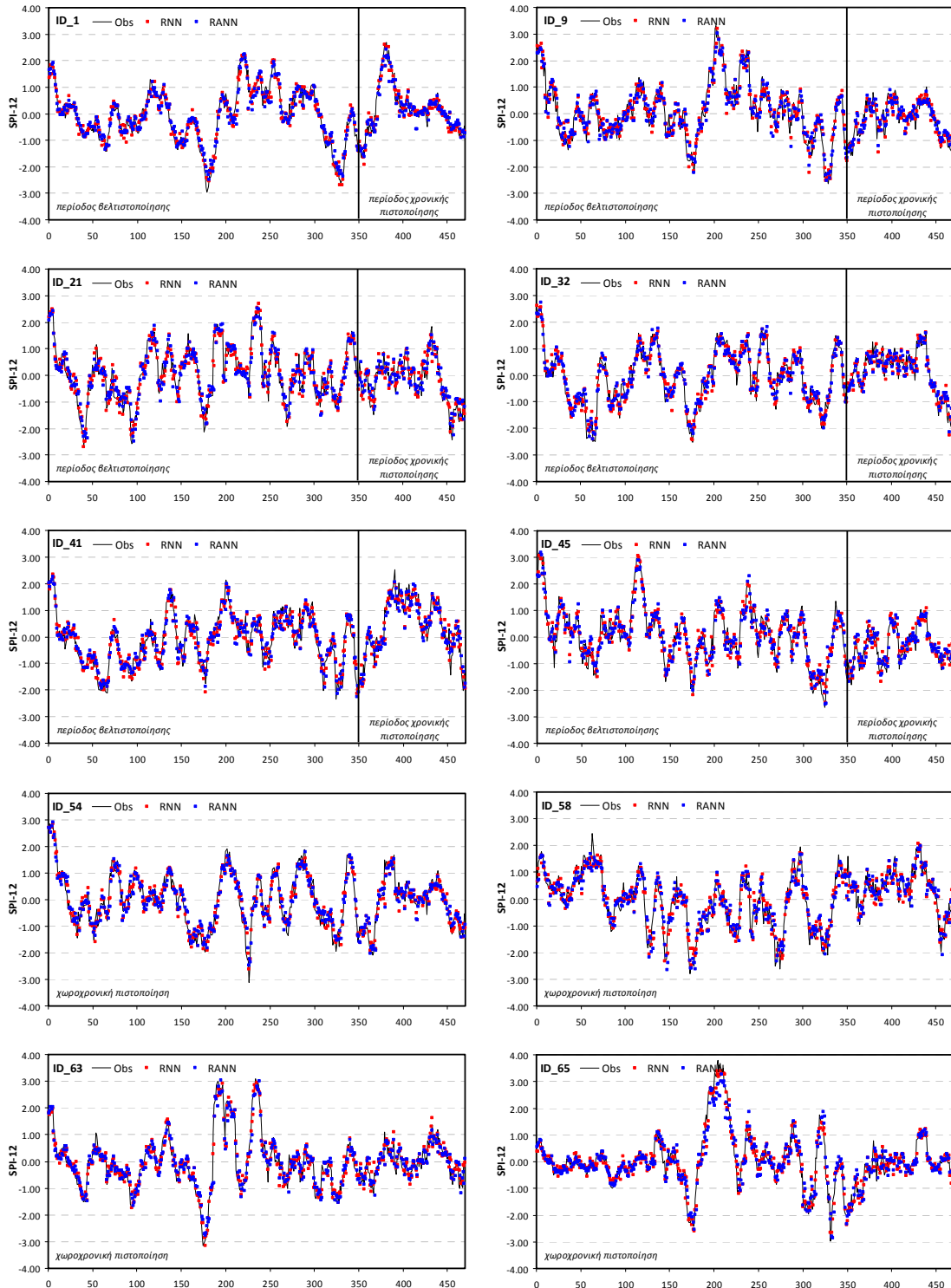


Σχήμα 8.17. Διαγράμματα χρονοσειρών χωροχρονικής πρόγνωσης του $SPI-12_{t+1}$ για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.

Από την ανάλυση των ποιοτικών κριτηρίων πρόγνωσης επεισοδίων ξηρασίας της υβριδικής χωροχρονικής τεχνικής για τους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης διαπιστώνεται ότι το 100% (48 από 48) και το 100% (18 από 18) των σταθμών ανάπτυξης και χωρικής πιστοποίησης, αντίστοιχα, παρουσιάζουν δείκτη κρίσιμη επιτυχίας CSI μεγαλύτερο του 0.5 και έχουν πιθανότητα ανίχνευσης επεισοδίων ξηρασίας (POD) μεγαλύτερη του 67%.

8.5.2. Χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+2$, SPI-12 _{$t+2$}

Η εφαρμογή της υβριδικής χωροχρονικής μεθοδολογίας που συνδυάζει τις προγνώσεις της χρονικής μεθόδου RANN με τις γεωγραφικές συντεταγμένες των σταθμών ανάπτυξης έδωσε τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των ποσοτικών και ποιοτικών στατιστικών παραμέτρων της πρόγνωσης του SPI-12 για χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+2$ για τις τρεις περιόδους ελέγχου που παρουσιάζονται στο Παράρτημα II. Το Σχήμα 8.19 παρουσιάζει τις προγνώσεις του SPI-12 _{$t+2$} για τους επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης και φαίνεται ότι το χωροχρονικό μοντέλο RNN κρίνεται πολύ ικανοποιητικό.



Σχήμα 8.18. Διαγράμματα χρονοσειρών χωροχρονικής πρόγνωσης του SPI-12 _{$t+2$} για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.

Επίσης, το μοντέλο προσομοιώνει αρκετά καλά τις ακραίες τιμές του SPI και το εύρος του SPI αφού η μέση τιμή της τυπικής απόκλισης των προβλέψεων είναι 0.94 και είναι λίγο μικρότερη της θεωρητικής τιμής (=1). Τα στοιχεία και ποιοτικά κριτήρια πρόγνωσης επεισοδίων ξηρασίας για το SPI-12_{t+2} φανερώνουν την υπεροχή της χωροχρονικής μεθόδου RNN σε όλα τα ποιοτικά κριτήρια εκτίμησης επεισοδίων ξηρασίας εκτός του σκορ μεροληψίας (bias). Γενικά, όπως φαίνεται από το δείκτη κρίσιμης επιτυχίας CSI η μέθοδος RNN έχει πάνω από 64% ακρίβεια επιτυχίας χωροχρονικά και μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιχειρησιακά σε συστήματα διαχείρισης της ξηρασίας με βάση το SPI-12 για προγνώσεις μέχρι και δύο μήνες μπροστά. Από τα ποιοτικά κριτήρια πρόγνωσης επεισοδίων ξηρασίας της υβριδικής χωροχρονικής τεχνικής για τους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης διαπιστώνεται ότι το 98% (47 από 48) και το 100% (18 από 18) των σταθμών ανάπτυξης και χωρικής πιστοποίησης, αντίστοιχα, παρουσιάζουν δείκτη κρίσιμης επιτυχίας CSI μεγαλύτερο του 0.5. Τέλος, το 92% (44 από 48) των σταθμών ανάπτυξης και το 89% (16 από 18) των σταθμών πιστοποίησης έχουν πιθανότητα ανίχνευσης επεισοδίων (POD) ξηρασίας μεγαλύτερη του 67% .

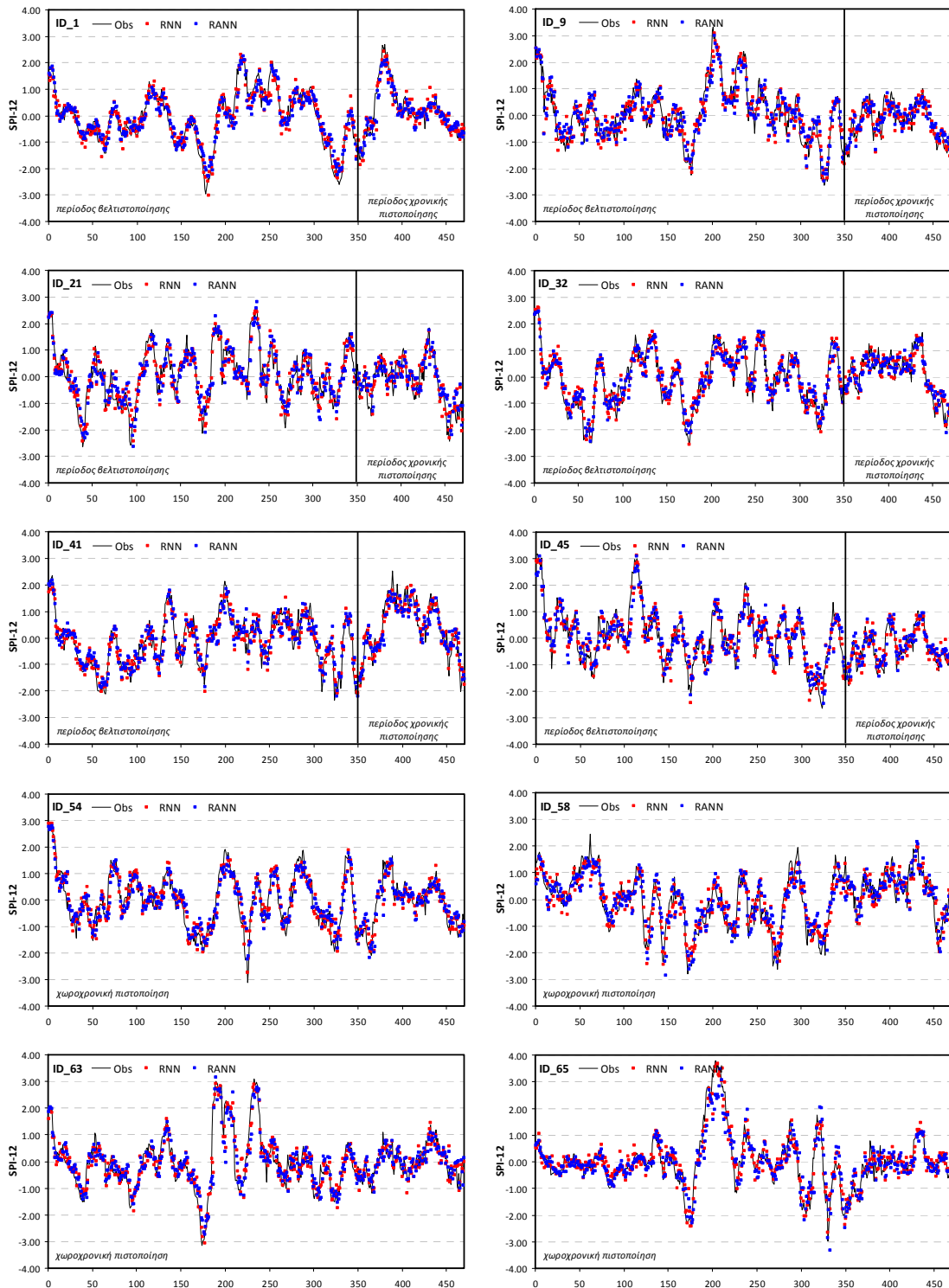
8.5.3. Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+3, SPI-12_{t+3}

Η εφαρμογή της υβριδικής χωροχρονικής έδωσε τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των ποσοτικών και ποιοτικών στατιστικών παραμέτρων της πρόγνωσης του SPI-12 για χρονικό βήμα πρόγνωσης t+3 για τις τρεις περιόδους ελέγχου που παρουσιάζονται στο Παράρτημα II. Το Σχήμα 8.19 παρουσιάζει τις προγνώσεις του SPI-12_{t+3} για τους επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης και φαίνεται ότι το χωροχρονικό μοντέλο RNN κρίνεται πολύ ικανοποιητικό. Επίσης, το μοντέλο προσομοιώνει καλά τις ακραίες τιμές του SPI αλλά υποεκτιμά το εύρος των τιμών του SPI αφού η μέση τιμή της τυπικής απόκλισης των προβλέψεων είναι 0.91 και είναι μικρότερη της θεωρητικής τιμής (=1). Τα συγκεντρωτικά ποσοτικά και ποιοτικά κριτήρια πρόγνωσης ξηρασίας για το SPI-12_{t+3} δείχνουν την υπεροχή της χωροχρονικής μεθόδου RNN σε όλα τα κριτήρια εκτός του σκορ μεροληψίας (bias). Γενικά, όπως φαίνεται από το δείκτη κρίσιμης επιτυχίας CSI η μέθοδος RNN έχει πάνω από 57% ακρίβεια επιτυχίας χωροχρονικά και μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιχειρησιακά σε συστήματα διαχείρισης της ξηρασίας με βάση το SPI-12 για προγνώσεις μέχρι και τρεις μήνες μπροστά. Από τα σημειακά ποιοτικά κριτήρια πρόγνωσης επεισοδίων ξηρασίας της υβριδικής χωροχρονικής τεχνικής για τους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης διαπιστώνεται ότι το 92% (44 από 48) και το 78% (14 από 18) των σταθμών ανάπτυξης και χωρικής πιστοποίησης, αντίστοιχα, παρουσιάζουν δείκτη κρίσιμης επιτυχίας CSI μεγαλύτερο του 0.5. Τέλος, το 69% (33 από 48) των σταθμών ανάπτυξης και το 67% (12 από 18) των σταθμών πιστοποίησης έχουν πιθανότητα ανίχνευσης επεισοδίων (POD) μεγαλύτερη του 67%.

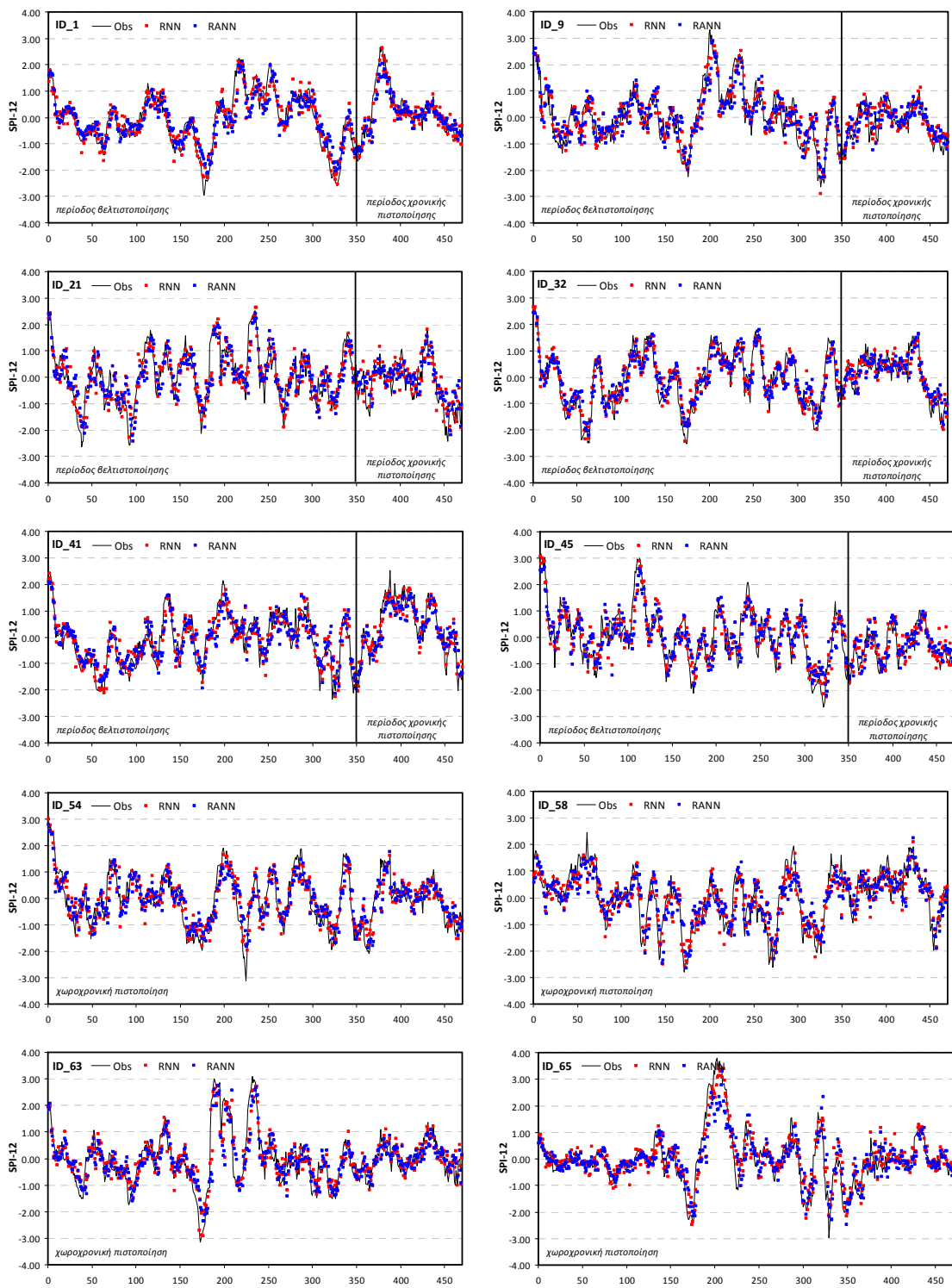
8.5.4. Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+4, SPI-12_{t+4}

Η υβριδική χωροχρονική μεθοδολογία παρήγαγε τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των ποσοτικών και ποιοτικών στατιστικών παραμέτρων της πρόγνωσης του SPI-12 για χρονικό βήμα πρόγνωσης t+4 για τις τρεις περιόδους ελέγχου που παρουσιάζονται στο Παράρτημα II. Το Σχήμα 8.20 παρουσιάζει τις προγνώσεις του SPI-12_{t+4} για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης και φαίνεται ότι το χωροχρονικό μοντέλο RNN κρίνεται αρκετά ικανοποιητικό. Παρατηρείται όμως ότι το μοντέλο δεν μπορεί να προσομοιώσει αρκετά καλά κάποιες ακραίες τιμές του SPI και γενικά υποεκτιμά το εύρος του SPI αφού η μέση τιμή της τυπικής απόκλισης των προβλέψεων είναι 0.87 και είναι μικρότερη της θεωρητικής τιμής (=1). Τα συγκεντρωτικά ποσοτικά και ποιοτικά κριτήρια πρόγνωσης ξηρασίας για το SPI-12_{t+4} δείχνουν την υπεροχή της χωροχρονικής μεθόδου RNN σε όλα τα κριτήρια εκτός του σκορ μεροληψίας (bias). Άρα η υβριδική χωροχρονική μεθοδολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συστήματα διαχείρισης της ξηρασίας με βάση το SPI-12 για προγνώσεις μέχρι και τέσσερις μήνες μπροστά (δείκτης κρίσιμης επιτυχίας CSI=0.5 των σταθμών χρονικής ανάπτυξης). Από τα ποιοτικά κριτήρια πρόγνωσης επεισοδίων ξηρασίας της υβριδικής χωροχρονικής τεχνικής του SPI-12_{t+4} για κάθε

σταθμό ανάπτυξης και χωροχρονικής πιστοποίησης, διαπιστώνεται ότι το 56% (27 από 48) και το 33% (6 από 18) των σταθμών ανάπτυξης και χωρικής πιστοποίησης, αντίστοιχα, παρουσιάζουν δείκτη κρίσιμη επιτυχίας CSI μεγαλύτερο του 0.5.



Σχήμα 8.19. Διαγράμματα χρονοσειρών πρόγνωσης του $SPI-12_{t+3}$ για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.

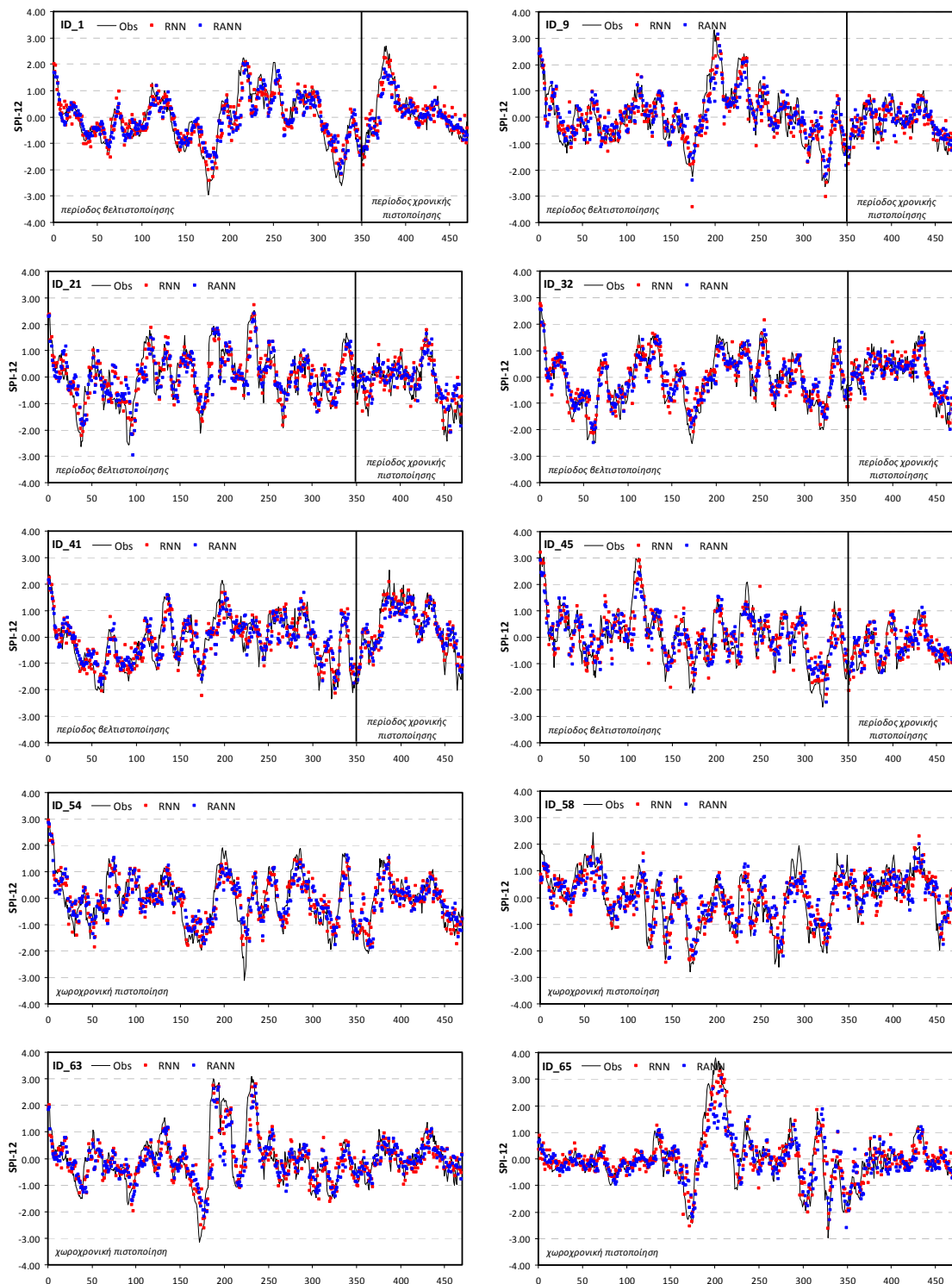


Σχήμα 8.20. Διαγράμματα χρονοσειρών πρόγνωσης του $SPI-12_{t+4}$ για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.

8.5.5. Χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+5$, $SPI-12_{t+5}$

Η υβριδική χωροχρονική μεθοδολογία εφαρμόστηκε και για το χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+5$. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των ποσοτικών και ποιοτικών στατιστικών παραμέτρων της πρόγνωσης του $SPI-12_{t+5}$ στις τρεις περιόδους ελέγχου παρουσιάζονται στο Παράρτημα II. Το Σχήμα 8.21 παρουσιάζει τις προγνώσεις του $SPI-12_{t+5}$ για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης και

φαίνεται ότι το χωροχρονικό μοντέλο RNN κρίνεται ικανοποιητικό. Παρατηρείται όμως ότι το μοντέλο δεν μπορεί να προσομοιώσει αρκετά καλά κάποιες ακραίες τιμές του SPI και γενικά υποεκτιμά το εύρος του SPI αφού η μέση τιμή της τυπικής απόκλισης των προβλέψεων είναι 0.84 και είναι μικρότερη της θεωρητικής τιμής (=1).



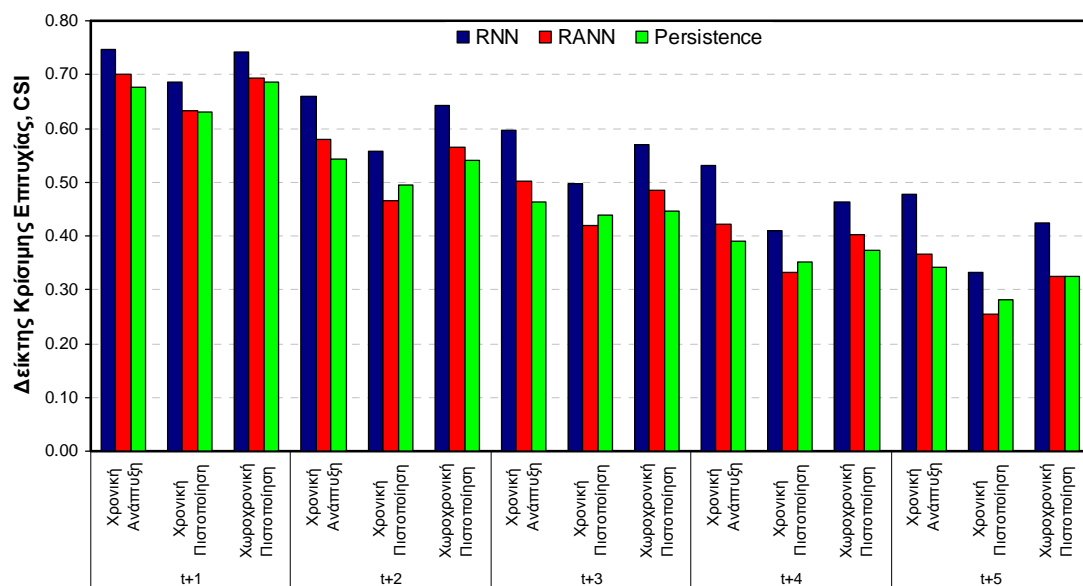
Σχήμα 8.21. Διαγράμματα χρονοσειρών χωροχρονικής πρόγνωσης του $SPI-12_{t+5}$ για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.

Η υπεροχή της χωροχρονικής μεθόδου RNN είναι εμφανής τόσο στις ποσοτικές στατιστικές παραμέτρους όσο και στα ποιοτικά κριτήρια εκτίμησης επεισοδίων ξηρασίας εκτός του σκορ

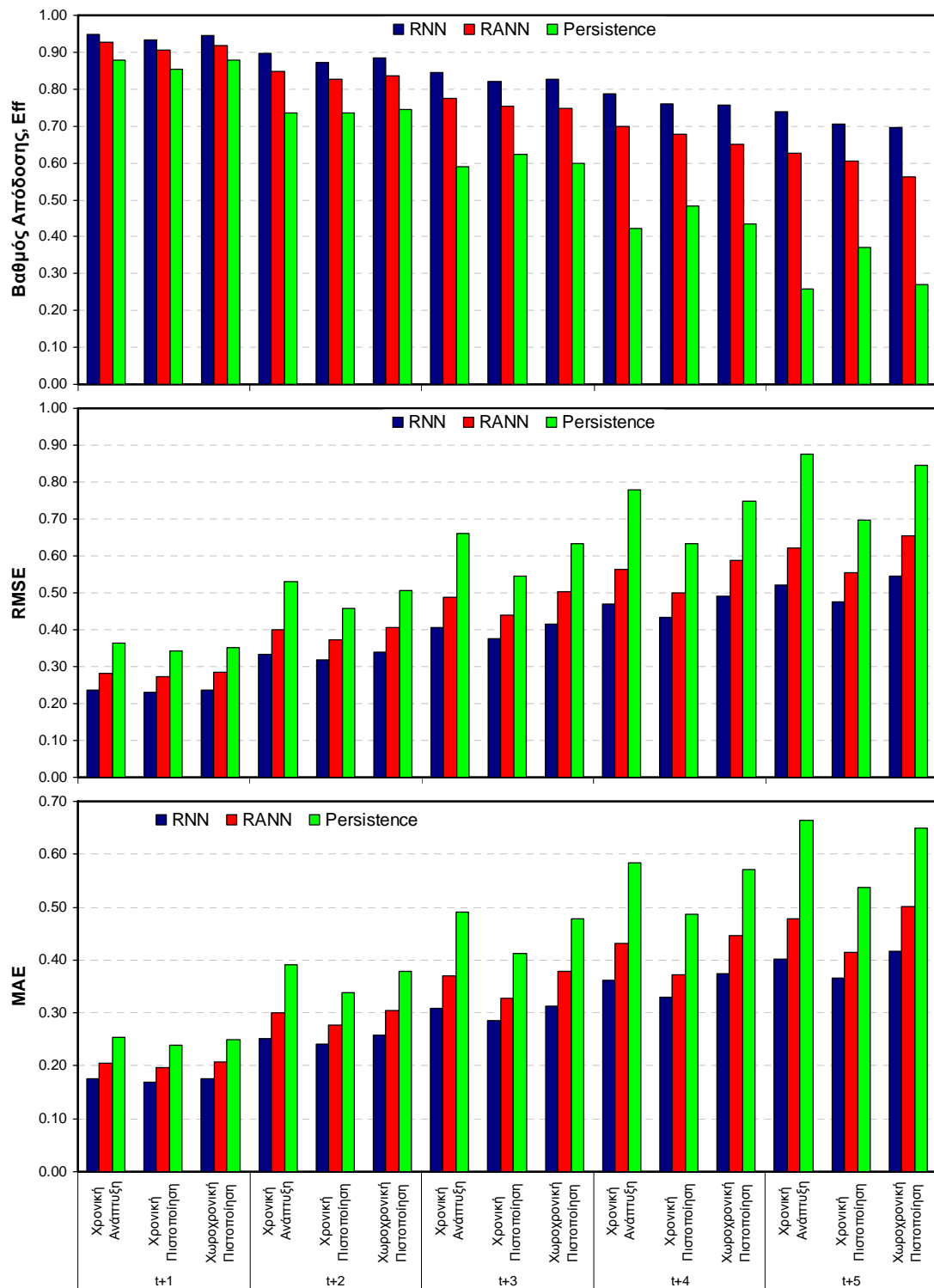
μεροληψίας (bias) αλλά δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιχειρησιακά σε συστήματα διαχείρισης της ξηρασίας για προγνώσεις SPI-12 πέντε μήνες μπροστά αφού ο δείκτης κρίσιμης επιτυχίας CSI είναι μικρότερος του 0.5 και για τις τρεις περιόδους ελέγχου (βλ. Παράρτημα). Από την ανάλυση των ποιοτικών κριτηρίων πρόγνωσης επεισοδίων ξηρασίας της υβριδικής χωροχρονικής τεχνικής του SPI-12_{t+5} για κάθε σταθμό ανάπτυξης και χωροχρονικής πιστοποίησης, προκύπτει ότι το 38% (18 από 48) και 6% (1 από 18) των σταθμών ανάπτυξης και χωροχρονικής πιστοποίησης, αντίστοιχα, παρουσιάζουν δείκτη κρίσιμη επιτυχίας CSI μεγαλύτερο του 0.5. Άρα οι χωροχρονικές προγνώσεις του SPI-12 για πέντε μήνες μπροστά μπορούν να χρησιμοποιηθούν με αξιοπιστία στους σταθμούς ανάπτυξης που παρουσιάζουν CSI \geq 0.5 και με επιφύλαξη στους άλλους σταθμούς ανάπτυξης και χωρικής πιστοποίησης με CSI \leq 0.5.

8.5.6. Σχολιασμός χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-12

Το χωροχρονικό αναδρομικό μοντέλο των προγνώσεων της χρονικής μεθόδου βελτιώνει την πρόγνωση του SPI-12 για βραχυπρόθεσμα (1 έως 2 μήνες) και μεσοπρόθεσμα διαστήματα πρόγνωσης (3 έως 5 μήνες). Οι χωροχρονικές προγνώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν με αξιοπιστία για διαστήματα πρόγνωσης έως τέσσερις μήνες σε συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης της ξηρασίας. Τα Σχήματα 8.22 και 8.23 παρουσιάζουν το δείκτη κρίσιμης επιτυχίας (CSI) και τις κύριες ποσοτικές στατιστικές παραμέτρους (Eff, RMSE και MAE) για βήματα πρόγνωσης από ένα έως πέντε μήνες μπροστά και επιβεβαιώνουν ότι το μοντέλο RNN δεν μπορεί να προβλέψει έγκαιρα τα αναγνωρισμένα επεισόδια ξηρασίας για χρονικά βήματα πρόγνωσης μεγαλύτερα από τέσσερις μήνες. Όμως, τα χωροχρονικά αναδρομικά νευρωνικά δίκτυα βελτιώνουν τις προγνώσεις SPI_{t+3} και SPI_{t+4} της χρονικής μεθόδου RANN και τις κάνουν αξιόπιστες για επιχειρησιακή εφαρμογή. Έτσι για το SPI-12 το προτεινόμενο υβριδικό χωροχρονικό σύστημα μπορεί να εφαρμοστεί σε συστήματα διαχείρισης της ξηρασίας για χρονικό βήμα πρόγνωσης τεσσάρων μηνών. Για διαστήματα πρόγνωσης μεγαλύτερα από τέσσερις μήνες οι χωροχρονικές προγνώσεις δεν έχουν αξιοπιστία και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πιθανές ενδείξεις ξηρασίας αλλά με μεγάλη αβεβαιότητα. Σε κάποιους όμως από τους σταθμούς ανάπτυξης (18 από 48) η μέθοδος RNN εμφανίζει δείκτη κρίσιμης επιτυχίας μεγαλύτερο του 0.5 για χρονικό βήμα πρόγνωσης t+5. Στους σταθμούς αυτούς η πρόβλεψη είναι αξιόπιστη και μπορεί να χρησιμοποιηθεί η χωροχρονική μέθοδος ως σημειακή για τους σταθμούς αυτούς. Τέλος, αξίζει όμως να σημειωθεί η απόδοση της RNN στα ακραία γεγονότα ξηρασίας (SPI \leq -2) που προσομοιώνει ικανοποιητικά τη δραμύτητα και τη διάρκεια των γεγονότων ξηρασίας για διάστημα πρόγνωσης 5 μηνών (Σχήμα 8.21).



Σχήμα 8.22. Δείκτης κρίσιμης επιτυχίας αναγνώρισης επεισοδίων ξηρασίας χωροχρονικής μεθόδου για χρονικά βήματα πρόγνωσης του SPI-12 από 1 έως 5 μήνες μπροστά.



Σχήμα 8.23. Συνολικά ποσοτικά στατιστικά κριτήρια πρόγνωσης χωροχρονικής μεθόδου για χρονικά βήματα πρόγνωσης του SPI-12 από 1 έως 5 μήνες μπροστά.

8.6. Χωροχρονική πρόγνωση SPI-24μηνών

Η εφαρμογή της χρονικής μεθόδου RANN που αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο έδειξε ότι για το SPI-24μηνών υπάρχει ικανοποιητική και αμερόληπτη προσδιοριστική πρόγνωση για τα τέσσερα πρώτα χρονικά βήματα πρόγνωσης ($t+1$, $t+2$, $t+3$, και $t+4$) και οριακά μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το χρονικό βήμα $t+5$. Η χρονική εφαρμογή έδειξε επίσης ότι υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης των προγνώσεων λόγω της χρονικής υστέρησης των προγνώσεων σε κάποια παρατηρούμενα επεισόδια ξηρασίας κυρίως για χρονικά βήματα πρόγνωσης μεγαλύτερα από τρεις μήνες. Για το λόγο αυτό, αναδρομικά νευρωνικά δίκτυα τύπου Elman (Recurrent Neural Networks, RNN) χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση των χρονικών και χωρικών προβλέψεων της μεθόδου RANN. Δεδομένα εισόδου στο RNN τύπου Elman ήταν οι σημειακές γεωγραφικές συντεταγμένες και το υψόμετρο των σταθμών και οι προβλέψεις του επαναληπτικού νευρωνικού δικτύου RANN για τους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης. Λόγω του μεγάλου πλήθους των αποτελεσμάτων τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικά για χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$ και περιληπτικά για τα υπόλοιπα βήματα πρόγνωσης. Τα αποτελέσματα για μεγαλύτερα βήματα πρόγνωσης παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα II.

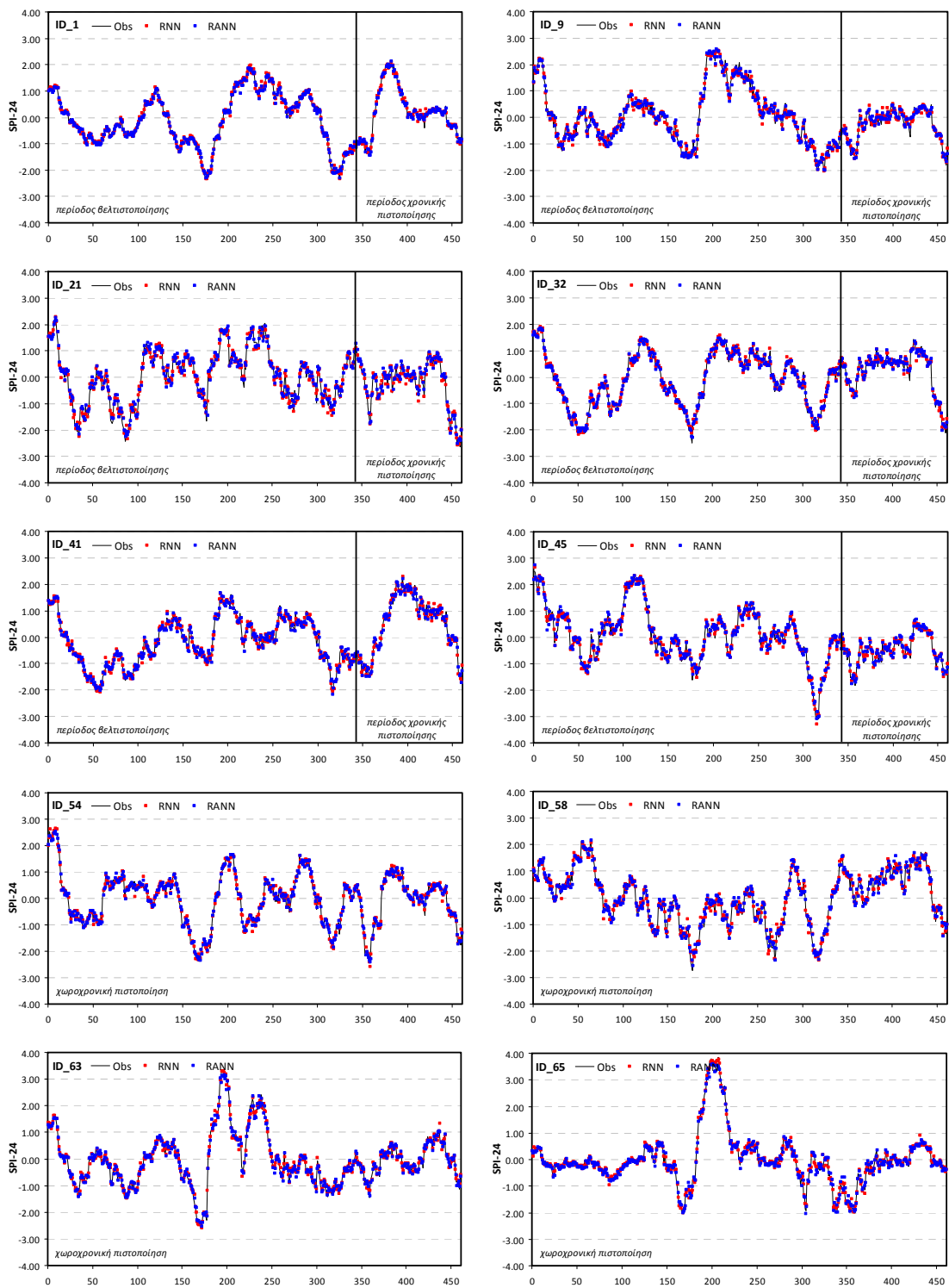
8.6.1. Χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$, SPI-24 $_{t+1}$

Ο Πίνακας 8.9 παρουσιάζει τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των ποσοτικών στατιστικών παραμέτρων της πρόγνωσης του SPI-24 για χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$ για την περίοδο βελτιστοποίησης και χρονικής πιστοποίησης των σταθμών ανάπτυξης, και τη χωροχρονική περίοδο των σταθμών πιστοποίησης. Στον ίδιο πίνακα, παρουσιάζονται τα στατιστικά κριτήρια για τα μοντέλα εμμονής και της μεθόδου RANN. Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 8.9, η μέθοδος RNN βελτιώνει την χωροχρονική πρόγνωση του SPI-24 για χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$ σε σχέση με τη μέθοδο αναφοράς και τη χρονική μέθοδο RANN. Όλες οι στατιστικές παράμετροι βελτιώνονται σημαντικά και για τις τρεις περιόδους ελέγχου (εκπαίδευση, χρονική πιστοποίηση και χωροχρονική πιστοποίηση). Το Σχήμα 8.24 παρουσιάζει τις προγνώσεις του SPI-24 για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης και συμπεραίνεται ότι το χωροχρονικό μοντέλο RNN κρίνεται πάρα πολύ ικανοποιητικό. Επίσης, το μοντέλο προσομοιώνει αρκετά καλά τις ακραίες τιμές του SPI και το εύρος του SPI αφού η μέση τιμή της τυπικής απόκλισης των προβλέψεων είναι 0.98 που είναι παρόμοια της θεωρητικής τιμής (=1). Η ικανότητα πρόγνωσης όπως δίνεται από κριτήριο Skill Score του μέσου τετραγωνισμένου σφάλματος (SS_{MSE}) και μέθοδο αναφοράς το Persistence μοντέλο δείχνει ότι η μέθοδος RNN παρουσιάζει βελτίωση στην πρόγνωση του SPI-24 $_{t+1}$ και για τις τρεις περιόδους ελέγχου (Πίνακας 8.9).

Πίνακας 8.9. Στατιστικά αποτελέσματα χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-24 $_{t+1}$ για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης

Κριτήριο	RNN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Eff	0.97	0.96	0.96	0.95	0.95	0.95	0.94	0.93	0.94
R	0.98	0.98	0.98	0.98	0.97	0.97	0.97	0.96	0.97
RMSE	0.19	0.18	0.19	0.22	0.22	0.23	0.24	0.25	0.24
MAE	0.14	0.13	0.14	0.16	0.15	0.16	0.17	0.17	0.17
SS_{MSE}	0.42	0.48	0.39	0.15	0.24	0.14	Μοντέλο αναφοράς		

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης



Σχήμα 8.24. Διαγράμματα χρονοσειρών χωροχρονικής πρόγνωσης του $SPI-24_{t+1}$ για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.

Η ανάλυση των επεισοδίων ξηρασίας ($SPI-24 \leq -1$) έγινε για τον υπολογισμό των ποιοτικών κριτηρίων εκτίμησης της πρόγνωσης. Τα στοιχεία του πίνακα ποιοτικής αξιολόγησης συμβάντων ξηρασίας (contingency table) και τα ποιοτικά κριτήρια πρόγνωσης επεισοδίων ξηρασίας για το $SPI-24_{t+1}$ παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.10. Η υπεροχή της χωροχρονικής μεθόδου RNN είναι εμφανής και στα ποιοτικά κριτήρια εκτίμησης επεισοδίων ξηρασίας. Γενικά, όπως φαίνεται από το δείκτη κρίσιμης

επιτυχίας CSI η μέθοδος RNN έχει τουλάχιστον 80% ακρίβεια επιτυχίας χωροχρονικά και μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιχειρησιακά σε συστήματα διαχείρισης της ξηρασίας. Η ανάλυση των ποιοτικών κριτηρίων πρόγνωσης επεισοδίων ξηρασίας της υβριδικής χωροχρονικής μεθόδου RNN διαπιστώνει ότι όλοι οι σταθμοί ανάπτυξης και χωρικής πιστοποίησης παρουσιάζουν δείκτη κρίσιμη επιτυχίας CSI μεγαλύτερο του 0.5 και πιθανότητα ανίχνευσης επεισοδίων (POD) μεγαλύτερη του 67%.

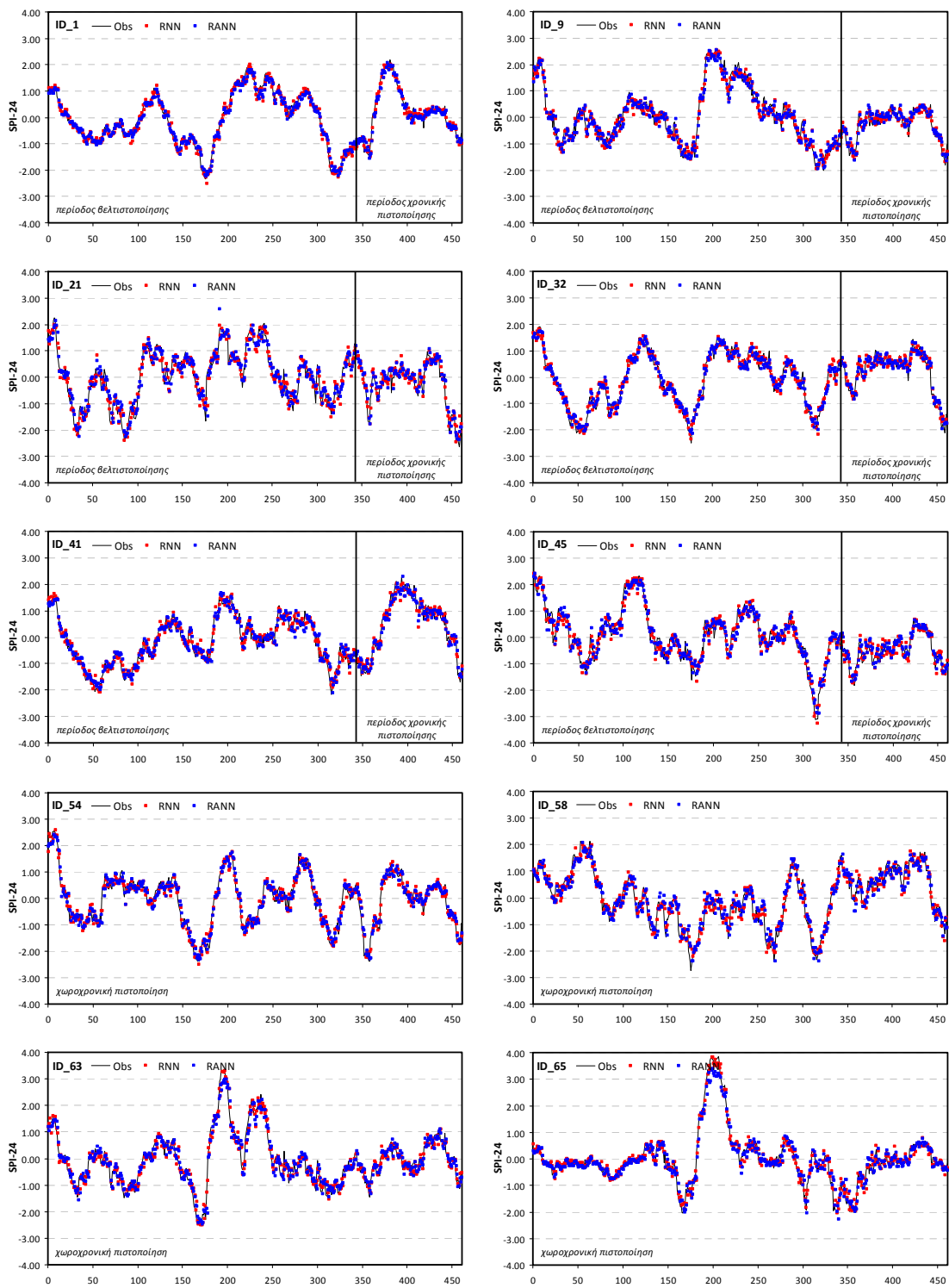
Πίνακας 8.10. Στατιστικά αποτελέσματα ποιοτικής χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-24_{t+1} συμβάντων ξηρασίας (SPI≤-1) για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης

Στοιχεία	RNN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
A	2545	693	1168	2475	686	1127	2500	674	1145
C	262	61	127	274	71	141	368	89	172
B	327	85	157	397	92	198	372	104	180
D	13234	4921	6846	13222	4911	6832	13128	4893	6801
Κριτήριο	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Accuracy	0.96	0.97	0.97	0.96	0.97	0.96	0.95	0.97	0.96
Bias	0.98	0.97	0.98	0.96	0.97	0.96	1.00	0.98	0.99
POD	0.89	0.89	0.88	0.86	0.88	0.85	0.87	0.87	0.86
FAR	0.09	0.08	0.10	0.10	0.09	0.11	0.13	0.12	0.13
POFD	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.03	0.02	0.02
CSI	0.81	0.83	0.80	0.79	0.81	0.77	0.77	0.78	0.76
HK	0.87	0.88	0.86	0.84	0.87	0.83	0.84	0.85	0.84
OR	393.12	657.72	401.03	300.84	515.76	275.80	239.74	356.30	251.52

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης
A=επιτυχίες, B=αστοχίες, C=Λανθασμένοι συναγερμοί, και D=σωστά μη επεισόδια ξηρασίας

8.6.2. Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+2, SPI-24_{t+2}

Η εφαρμογή της υβριδικής χωροχρονικής μεθοδολογίας που συνδυάζει τις προγνώσεις της χρονικής μεθόδου RANN με τις γεωγραφικές συντεταγμένες των σταθμών ανάπτυξης έδωσε τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των ποσοτικών και ποιοτικών στατιστικών παραμέτρων για χρονικό βήμα πρόγνωσης t+2 του SPI-24 για τις τρεις περιόδους ελέγχου που παρουσιάζονται στο Παράρτημα II. Το Σχήμα 8.25 παρουσιάζει τις προγνώσεις του SPI-24_{t+2} για τους επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης και φαίνεται ότι το χωροχρονικό μοντέλο RNN κρίνεται πολύ ικανοποιητικό. Επίσης, το μοντέλο προσομοιώνει αρκετά καλά τις ακραίες τιμές του SPI και το εύρος του SPI αφού η μέση τιμή της τυπικής απόκλισης των προβλέψεων είναι 0.95 και είναι λίγο μικρότερη της θεωρητικής τιμής (=1). Η υπεροχή της χωροχρονικής μεθόδου RNN είναι εμφανής στις ποσοτικές στατιστικές παραμέτρους και στα ποιοτικά κριτήρια εκτίμησης επεισοδίων ξηρασίας εκτός του σκορ μεροληψίας (bias) (βλ. Παράρτημα). Γενικά, όπως φαίνεται από το δείκτη κρίσιμης επιτυχίας CSI η μέθοδος RNN έχει πάνω από 70% ακρίβεια επιτυχίας χωροχρονικά και μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιχειρησιακά σε συστήματα διαχείρισης της ξηρασίας με βάση το SPI-24 για προγνώσεις μέχρι και δύο μήνες μπροστά. Η ανάλυση των ποιοτικών κριτηρίων πρόγνωσης επεισοδίων ξηρασίας για τους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης διαπιστώνει ότι όλοι οι σταθμοί ανάπτυξης και χωρικής πιστοποίησης παρουσιάζουν δείκτη κρίσιμη επιτυχίας μεγαλύτερο του 0.5 και πιθανότητα ανίχνευσης επεισοδίων (POD) μεγαλύτερη του 67%.

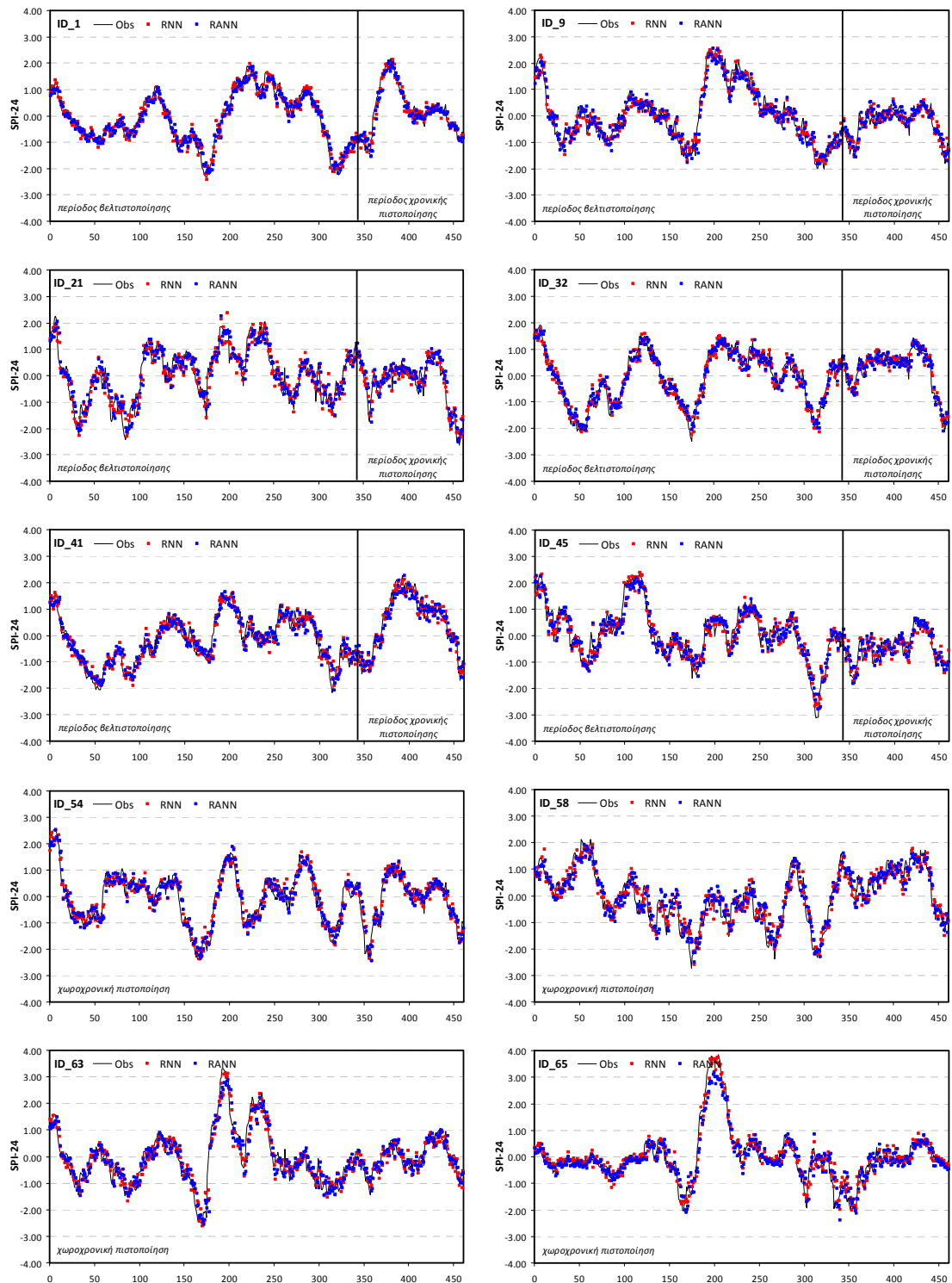


Σχήμα 8.25. Διαγράμματα χρονοσειρών χωροχρονικής πρόγνωσης του $SPI-24_{t+2}$ για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.

8.6.3. Χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+3$, $SPI-24_{t+3}$

Η εφαρμογή της υβριδικής χωροχρονικής μεθοδολογίας RNN έδωσε τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των ποσοτικών στατιστικών παραμέτρων για χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+3$ του SPI-24 στις τρεις περιόδους ελέγχου που παρουσιάζονται στο Παράρτημα II. Το Σχήμα 8.26 παρουσιάζει τις προγνώσεις του $SPI-24_{t+3}$ για τους επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης και φαίνεται ότι το

χωροχρονικό μοντέλο RNN κρίνεται πολύ ικανοποιητικό. Επίσης, το μοντέλο προσομοιώνει αρκετά καλά τις ακραίες τιμές του SPI και το εύρος των τιμών του SPI αφού η μέση τιμή της τυπικής απόκλισης των προβλέψεων είναι 0.94 και είναι ελάχιστα μικρότερη της θεωρητικής τιμής (=1).



Σχήμα 8.26. Διαγράμματα χρονοσειρών χωροχρονικής πρόγνωσης του $SPI-24_{t+3}$ για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.

Τα συγκεντρωτικά ποσοτικά και ποιοτικά κριτήρια πρόγνωσης ξηρασίας για το $SPI-24_{t+3}$ δείχνουν την υπεροχή της μεθόδου RNN σε σχέση με το μοντέλο εμμονής και τη χρονική μέθοδο RANN σε όλα τα

κριτήρια εκτός του σκορ μεροληψίας (bias). Γενικά, όπως φαίνεται από το δείκτη κρίσιμης επιτυχίας CSI η μέθοδος RNN έχει πάνω από 65% ακρίβεια επιτυχίας χωροχρονικά και μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιχειρησιακά σε συστήματα διαχείρισης της ξηρασίας με βάση το SPI-24 για προγνώσεις μέχρι και τρεις μήνες μπροστά. Από την ανάλυση των ποιοτικών κριτηρίων πρόγνωσης επεισοδίων ξηρασίας της υβριδικής χωροχρονικής τεχνικής για τους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης διαπιστώνεται ότι το 98% (47 από 48) και το 100% (18 από 18) των σταθμών ανάπτυξης και χωρικής πιστοποίησης, αντίστοιχα, παρουσιάζουν δείκτη κρίσιμη επιτυχίας CSI μεγαλύτερο του 0.5. Τέλος, το 92% των σταθμών ανάπτυξης και το 94% των σταθμών πιστοποίησης έχουν πιθανότητα ανίχνευσης επεισοδίων ξηρασίας (POD) μεγαλύτερη του 67%.

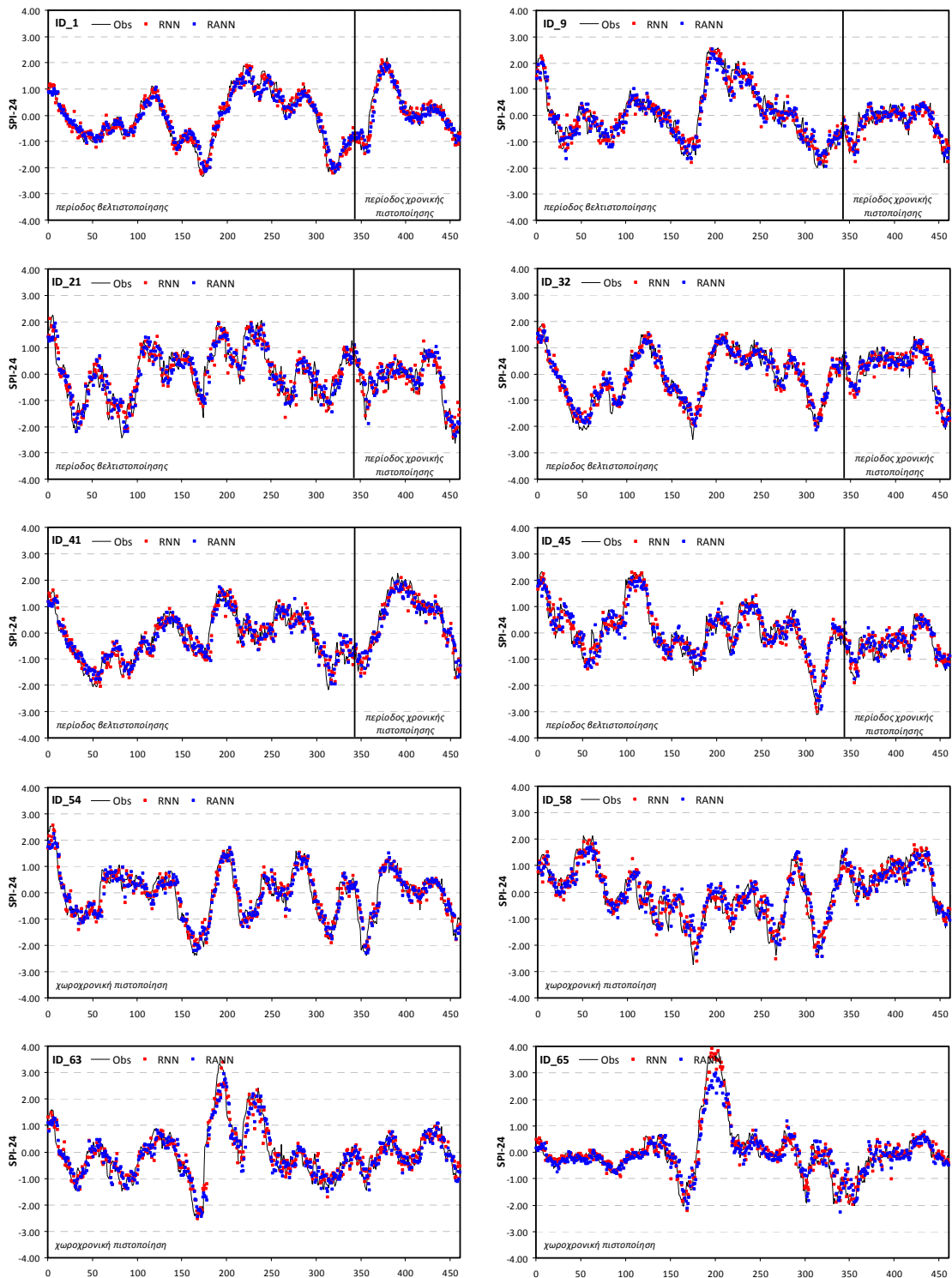
8.6.4. Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+4, SPI-24_{t+4}

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των ποσοτικών και ποιοτικών στατιστικών παραμέτρων της πρόγνωσης του SPI-24_{t+4} με την υβριδική χωροχρονική μεθοδολογία παρουσιάζονται στο Παράρτημα II για τις τρεις περιόδους ελέγχου. Το Σχήμα 8.27 παρουσιάζει τις προγνώσεις του SPI-24_{t+4} για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης και φαίνεται ότι το χωροχρονικό μοντέλο RNN κρίνεται αρκετά ικανοποιητικό. Παρατηρείται επίσης, ότι το μοντέλο προσομοιώνει αρκετά καλά τις ακραίες τιμές και το εύρος των τιμών του SPI αφού η μέση τιμή της τυπικής απόκλισης των προβλέψεων είναι 0.91 και είναι μικρότερη της θεωρητικής τιμής (=1). Η βελτίωση της χρονικής μεθόδου RANN με τα αναδρομικά νευρωνικά δίκτυα RNN εμφανίζεται σε όλα τα κριτήρια της πρόγνωσης εκτός του σκορ μεροληψίας (bias), και όπως φαίνεται από το δείκτη κρίσιμης επιτυχίας CSI η μέθοδος RNN έχει πάνω από 57% ακρίβεια επιτυχίας χωροχρονικά. Η ανάλυση των ποιοτικών κριτηρίων πρόγνωσης επεισοδίων ξηρασίας της υβριδικής χωροχρονικής τεχνικής του SPI-24_{t+4} για κάθε σταθμό ανάπτυξης και χωροχρονικής πιστοποίησης, διαπιστώνει ότι το 90% (43 από 48) και 89% (16 από 18) των σταθμών ανάπτυξης και χωρικής πιστοποίησης, αντίστοιχα, παρουσιάζουν δείκτη κρίσιμη επιτυχίας CSI μεγαλύτερο του 0.5. Τέλος, το 81% (39 από 48) των σταθμών ανάπτυξης και το 61% (11 από 18) των σταθμών πιστοποίησης έχουν πιθανότητα ανίχνευσης επεισοδίων (POD) ξηρασίας μεγαλύτερη του 67%. Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι η υβριδική μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συστήματα διαχείρισης της ξηρασίας με βάση το SPI-24 για προγνώσεις μέχρι και τέσσερις μήνες μπροστά (δείκτης κρίσιμης επιτυχίας CSI>0.5) με μεγάλη αξιοπιστία.

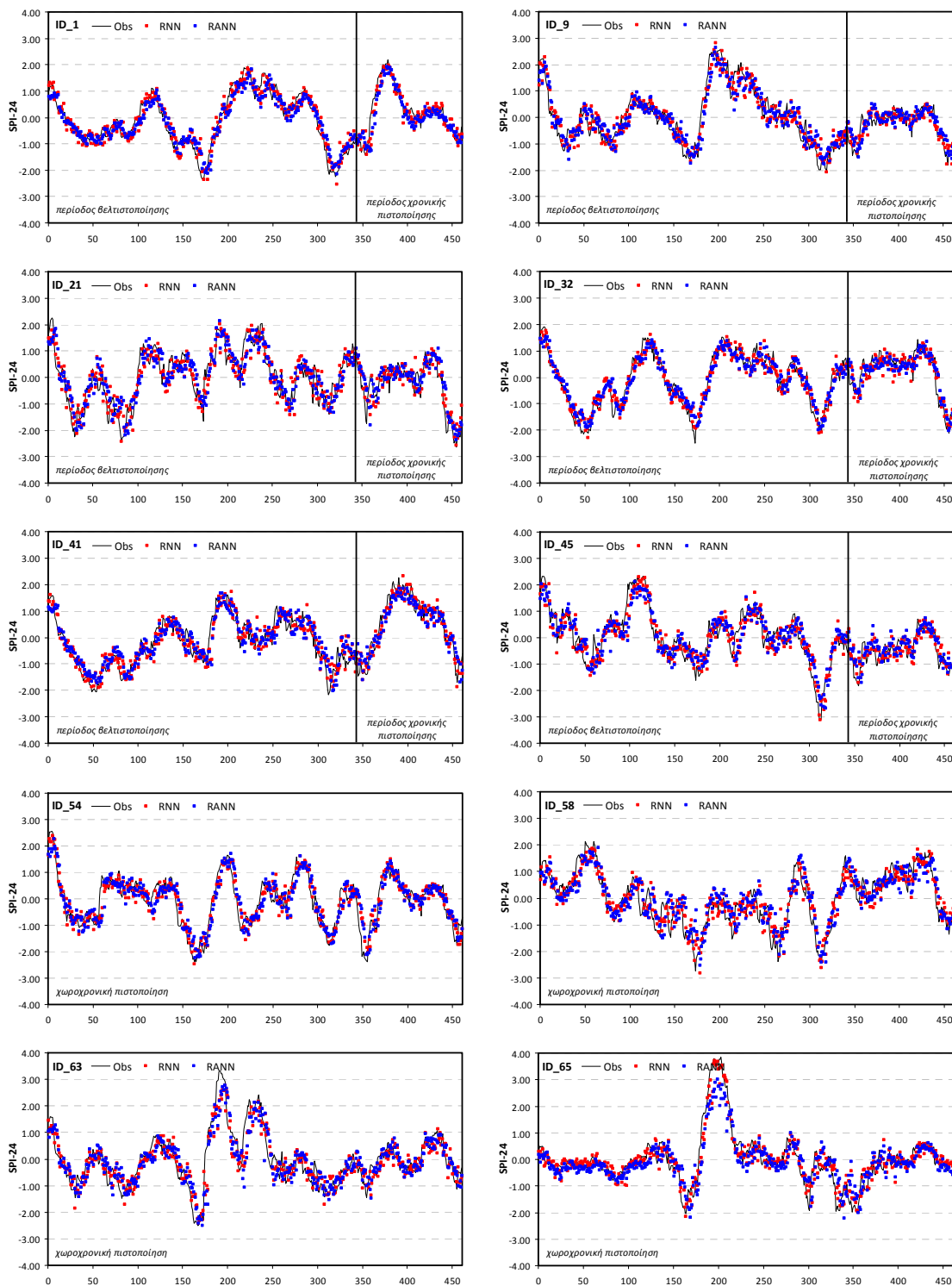
8.6.5. Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+5, SPI-24_{t+5}

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των ποσοτικών και ποιοτικών στατιστικών παραμέτρων της πρόγνωσης του SPI-24_{t+4} με την μέθοδο RNN παρουσιάζονται στο Παράρτημα II για τις τρεις περιόδους ελέγχου. Το Σχήμα 8.28 παρουσιάζει τις προγνώσεις του SPI-24_{t+5} για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης και φαίνεται ότι το χωροχρονικό μοντέλο RNN κρίνεται ικανοποιητικό. Η μέθοδος δεν προσομοιώνει αρκετά καλά τις ακραίες τιμές του SPI και γενικά υποεκτιμά το εύρος του SPI αφού η μέση τιμή της τυπικής απόκλισης των προβλέψεων είναι 0.90 και είναι μικρότερη της θεωρητικής τιμής (=1). Η υπεροχή της χωροχρονικής μεθόδου RNN είναι εμφανής και στα ποσοτικά και ποιοτικά κριτήρια εκτίμησης επεισοδίων ξηρασίας εκτός του σκορ μεροληψίας (bias), και όπως φαίνεται από το δείκτη κρίσιμης επιτυχίας CSI η μέθοδος RNN έχει πάνω από 55% ακρίβεια επιτυχίας χωροχρονικά. Από τα ποιοτικά κριτήρια πρόγνωσης επεισοδίων ξηρασίας της υβριδικής χωροχρονικής τεχνικής του SPI-24_{t+4} για κάθε σταθμό ανάπτυξης και χωροχρονικής πιστοποίησης, διακρίβνεται ότι το 88% (42 από 48) και 67% (12 από 18) των σταθμών ανάπτυξης και χωρικής πιστοποίησης, αντίστοιχα, παρουσιάζουν δείκτη κρίσιμη επιτυχίας CSI μεγαλύτερο του 0.5. Τέλος, το 73% των σταθμών ανάπτυξης και το 50% των σταθμών πιστοποίησης έχουν πιθανότητα ανίχνευσης επεισοδίων (POD) ξηρασίας μεγαλύτερο του 67%. Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι η υβριδική μέθοδος μπορεί

να χρησιμοποιηθεί σε συστήματα διαχείρισης της ξηρασίας με βάση το SPI-24 για προγνώσεις πέντε μηνών μπροστά με μεγάλη αξιοπιστία (δείκτης κρίσιμης επιτυχίας $CSI > 0.5$).



Σχήμα 8.27. Διαγράμματα χρονοσειρών πρόγνωσης του $SPI-24_{t+t4}$ για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.

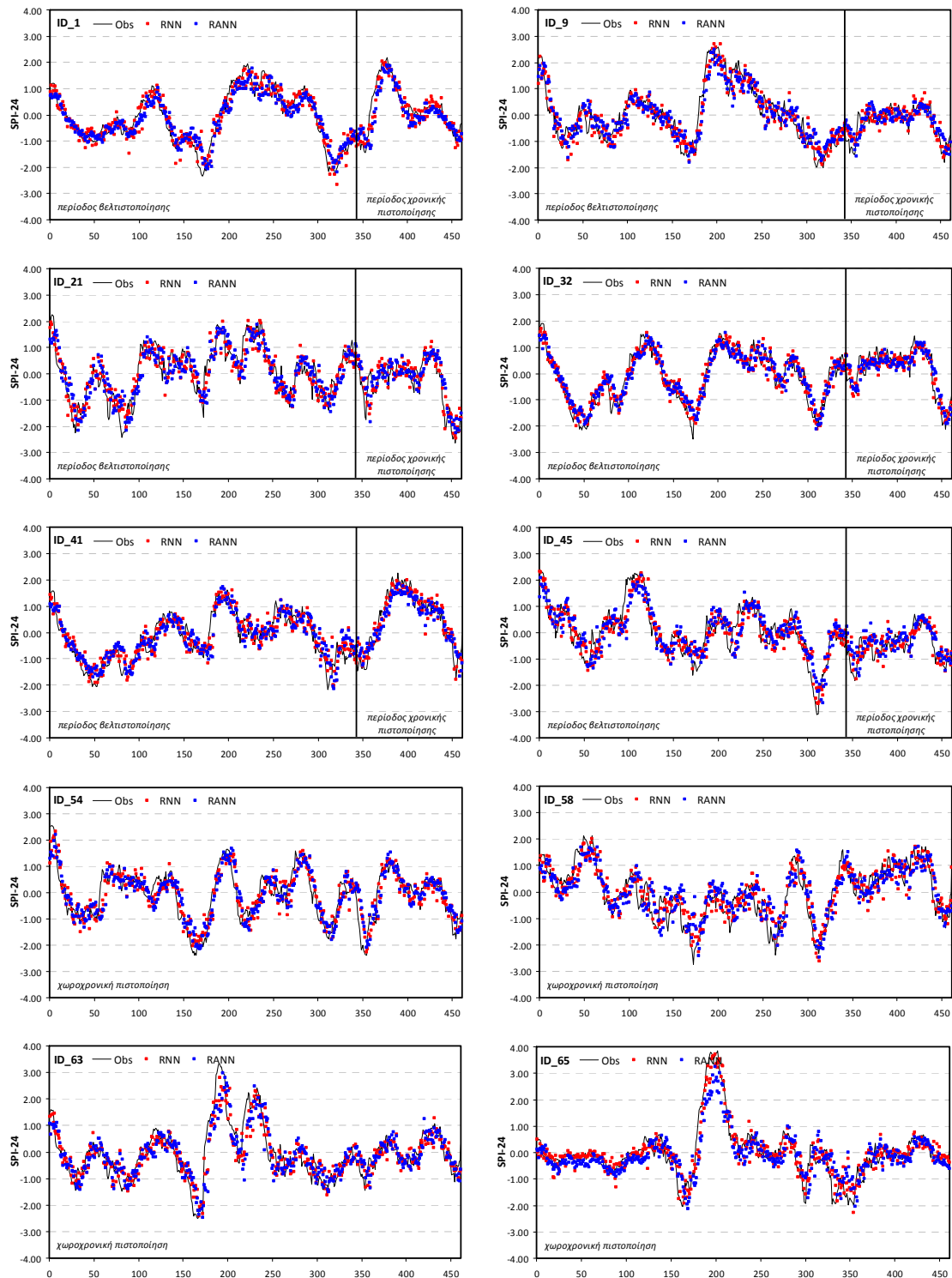


Σχήμα 8.28. Διαγράμματα χρονοσειρών χωροχρονικής πρόγνωσης του $SPI-24_{t+5}$ για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.

8.6.6. Χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+6$, $SPI-24_{t+6}$

Η εφαρμογή της υβριδικής RNN μεθόδου έδωσε τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των ποσοτικών και ποιοτικών στατιστικών παραμέτρων της πρόγνωσης του $SPI-24_{t+6}$ στις τρεις περιόδους ελέγχου που παρουσιάζονται στο Παράρτημα II. Το Σχήμα 8.29 παρουσιάζει τις προγνώσεις του $SPI-24_{t+6}$ για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης και φαίνεται ότι το χωροχρονικό μοντέλο RNN

κρίνεται ικανοποιητικό. Παρατηρείται όμως ότι το μοντέλο δεν μπορεί να προσομοιώσει αρκετά καλά κάποιες ακραίες τιμές του SPI και παρουσιάζει μία χρονική υστέρηση σε κάποια ακραία γεγονότα ξηρών ή/και υγρών περιόδων. Η μέση τιμή της τυπικής απόκλισης των προβλέψεων είναι 0.88 και αφού είναι μικρότερη της θεωρητικής τιμής (=1) υποεκτιμά το εύρος των τιμών του SPI.



Σχήμα 8.29. Διαγράμματα χρονοσειρών χωροχρονικής πρόγνωσης του $SPI-24_{t+6}$ για επιλεγμένους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.

Τα ποσοτικά και ποιοτικά κριτήρια δείχνουν την υπεροχή της χωροχρονικής μεθόδου RNN σε όλα τα κριτήρια εκτός του σκορ μεροληψίας (bias), και όπως φαίνεται από το δείκτη κρίσιμης επιτυχίας CSI η

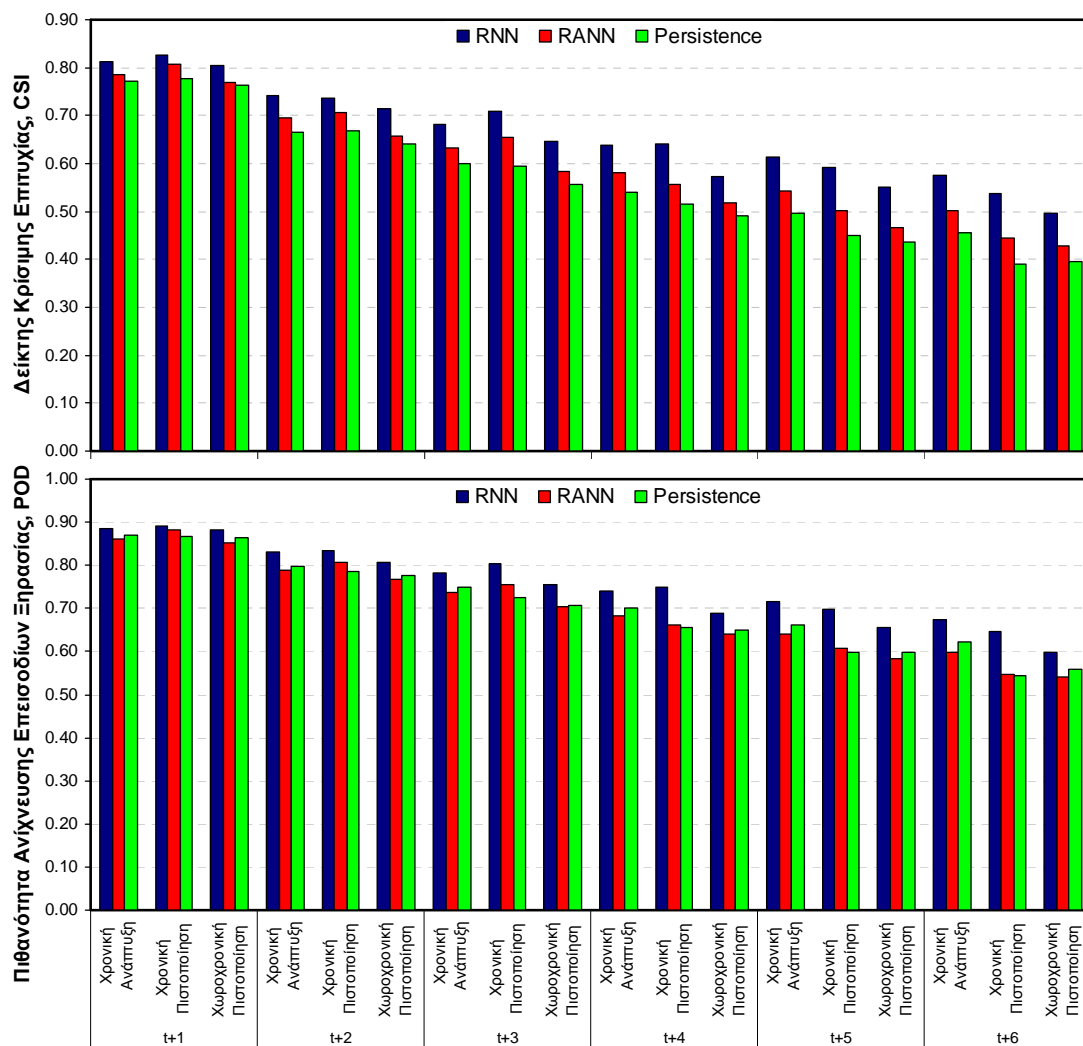
μέθοδος RNN έχει πάνω από 50% ακρίβεια επιτυχίας χωροχρονικά. Τα ποιοτικά κριτήρια πρόγνωσης επεισοδίων ξηρασίας της υβριδικής χωροχρονικής τεχνικής του SPI-24_{t+4} για κάθε σταθμό ανάπτυξης και χωροχρονικής πιστοποίησης, διαπιστώνουν ότι το 73% (35 από 48) και το 40% (7 από 18) των σταθμών ανάπτυξης και χωρικής πιστοποίησης, αντίστοιχα, παρουσιάζουν δείκτη κρίσιμη επιτυχίας CSI μεγαλύτερο του 0.5. Τέλος, το 50% των σταθμών ανάπτυξης και το 20% των σταθμών πιστοποίησης έχουν πιθανότητα ανίχνευσης επεισοδίων (POD) ξηρασίας μεγαλύτερη του 67%. Από τα ανωτέρω συμπεραίνεται ότι η υβριδική μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συστήματα διαχείρισης της ξηρασίας με βάση το SPI-24 για χρονικές προγνώσεις έξι μηνών μπροστά με αρκετή αξιοπιστία (δείκτης κρίσιμης επιτυχίας CSI>0.5). Προσοχή όμως πρέπει να δοθεί στην χωροχρονική εφαρμογή αφού το χωρικό και χρονικό σφάλμα που εισέρχεται από τις χρονικές προγνώσεις των έξι μηνών της μεθόδου RANN είναι οριακό.

8.6.7. Σχολιασμός χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-24

Το χωροχρονικό αναδρομικό μοντέλο των προγνώσεων της χρονικής μεθόδου βελτιώνει την πρόγνωση του SPI-24 για βραχυπρόθεσμα (1 έως 2 μήνες) και μεσοπρόθεσμα διαστήματα πρόγνωσης (3 έως 6 μήνες). Οι χωροχρονικές προγνώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν με αξιοπιστία για διαστήματα πρόγνωσης έως έξι μήνες σε συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης της ξηρασίας. Τα Σχήματα 8.29 και 8.30 παρουσιάζουν τις κύριες ποιοτικές (δείκτη κρίσιμης επιτυχίας CSI και πιθανότητα ανίχνευσης επεισοδίων ξηρασίας POD) και ποσοτικές στατιστικές παράμετροι (Eff, RMSE και MAE) για βήματα πρόγνωσης από ένα έως έξι μήνες μπροστά και επιβεβαιώνουν ότι το υβριδικό μοντέλο RNN μπορεί να προβλέψει έγκαιρα τα αναγνωρισμένα επεισόδια ξηρασίας για χρονικά βήματα πρόγνωσης έως έξι μήνες. Βέβαια μία χρονική υστέρηση εμφανίζεται σε μεγάλα χρονικά διαστήματα πρόγνωσης για κάποια γεγονότα ξηρασίας και σε κάποιους σταθμούς αλλά η μέθοδος RNN μπορεί και προβλέπει σωστά και την ένταση και τη διάρκεια του φαινομένου. Τα χωροχρονικά αναδρομικά νευρωνικά δίκτυα καταφέρνουν να βελτιώσουν τις προγνώσεις της χρονικής μεθόδου RANN και να αυξήσουν το χρονικό βήμα πρόγνωσης που μπορεί να επιτύχει μια μη-γραμμική μέθοδος όπως συμβαίνει για τα SPI-24_{t+5} και SPI-24_{t+6} της χρονικής μεθόδου RANN που τις κάνουν αξιόπιστες. Έτσι ενώ για τη χρονική μέθοδο RANN οι προγνώσεις της είναι αξιόπιστες για το SPI-24_{t+5} μόνο για την χρονική περίοδο της εκπαίδευσης της μεθόδου των σταθμών ανάπτυξης, το προτεινόμενο υβριδικό χωροχρονικό σύστημα καταφέρνει να κάνει αξιόπιστες τις προγνώσεις και στις τρεις περιόδους ελέγχου (εκπαίδευσης, χρονικής πιστοποίησης και χωροχρονικής πιστοποίησης) για το SP-24_{t+5} αλλά και για το SPI-24_{t+6}. Έτσι, μπορεί να εφαρμοστεί σε συστήματα διαχείρισης της ξηρασίας για χρονικό βήμα πρόγνωσης έξι μηνών με μεγάλη αξιοπιστία.

8.7. Συμπεράσματα χωροχρονικής πρόγνωσης SPI

Η ανάπτυξη ενός χωροχρονικού μοντέλου για πρόγνωση πολλαπλών χρονικών βημάτων ήταν ο σκοπός του κεφαλαίου. Μία χωρική και χρονική τεχνική πρόγνωσης αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας τις προγνώσεις της επαναληπτικής χρονικής μεθόδου πρόγνωσης RANN και γεωγραφικές συντεταγμένες των σταθμών ανάπτυξης και χωρικής πιστοποίησης. Το υβριδικό αναδρομικό μοντέλο εκπαιδεύτηκε για την περίοδο Οκτ. 1960 - Σεπ. 1992 και πιστοποιήθηκε χρονικά για την περίοδο Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002 στους 48 σταθμούς ανάπτυξης για βραχυπρόθεσμα και μεσοπρόθεσμα διαστήματα πρόγνωσης του SPI. Επίσης, το μοντέλο πιστοποιήθηκε και χωρικά σε 18 ανεξάρτητους βροχομετρικούς σταθμούς για ολόκληρη την περίοδο Οκτ. 1960 - Σεπ. 2002.

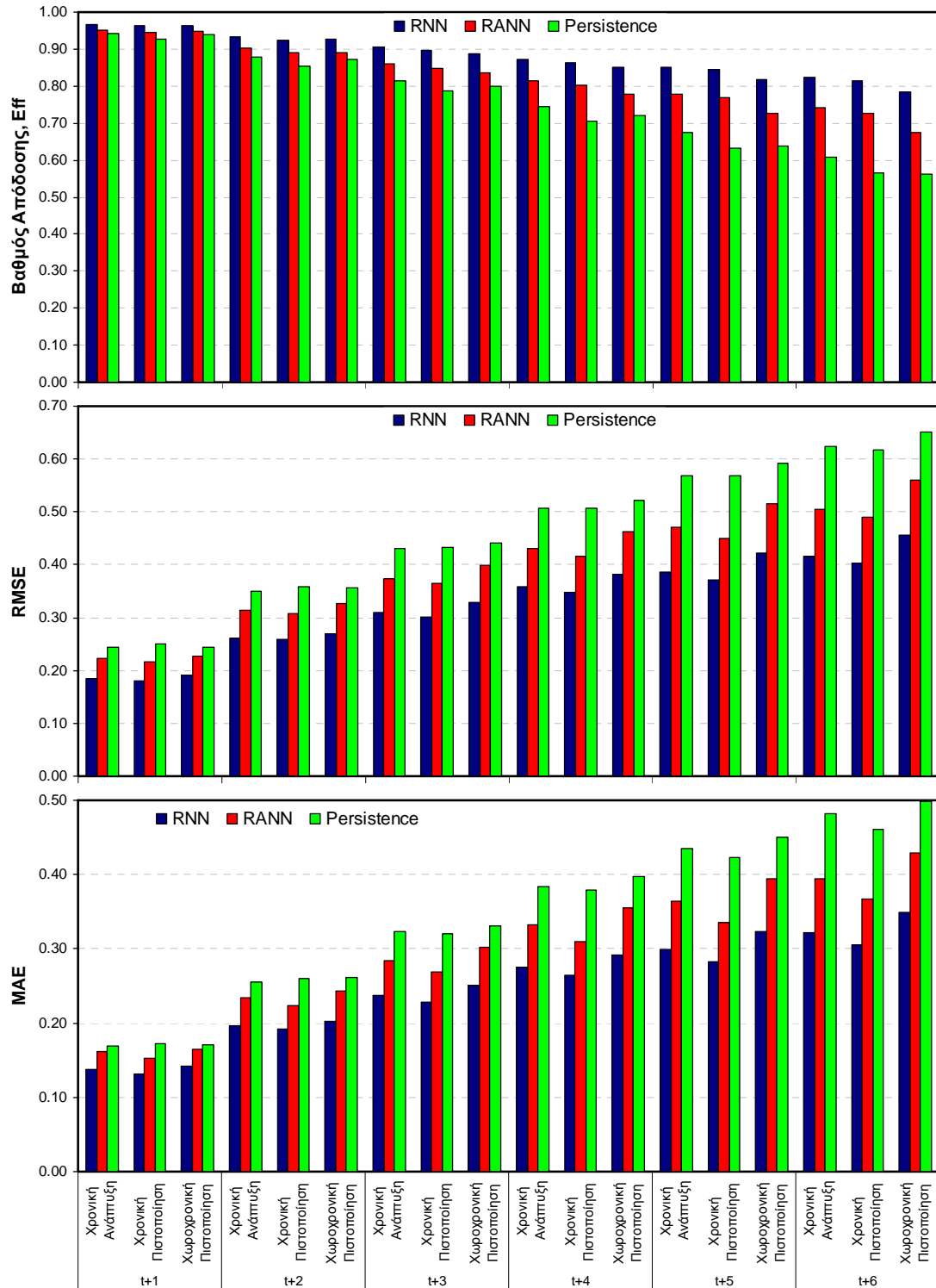


Σχήμα 8.30. Δείκτης κρίσιμης επιτυχίας αναγνώρισης επεισοδίων ξηρασίας χωροχρονικής μεθόδου για χρονικά βήματα πρόγνωσης του SPI-24 από 1 έως 5 μήνες μπροστά.

Τα αποτελέσματα της χωροχρονικής μεθοδολογίας έδειξαν ότι οι χρονικές προγνώσεις βελτιώνονται για όλες τις κλίμακες υπολογισμού του SPI για χρονικά διαστήματα πρόγνωσης από ένα έως έξι μήνες μπροστά. Η ακρίβεια της χωροχρονικής πρόγνωσης εξαρτάται όμως από την χρονική κλίμακα υπολογισμού του SPI. Όσο μεγαλύτερη είναι η κλίμακα υπολογισμού του SPI (π.χ. SPI-12) τόσο τα ποσοτικά και τα ποιοτικά στατιστικά κριτήρια βελτιώνονται για το αντίστοιχο βήμα πρόγνωσης. Βέβαια τα ποσοτικά και ποιοτικά στατιστικά κριτήρια μειώνονται σταδιακά όσο αυξάνει το χρονικό βήμα πρόγνωσης για όλες τις κλίμακες υπολογισμού του SPI.

Η αξιολόγηση των χωροχρονικών αναδρομικών νευρωνικών δικτύων RNN των χρονικών προγνώσεων για επιχειρησιακή χρήση βασίστηκε στο δείκτη κρίσιμης επιτυχίας CSI αναγνώρισης επεισοδίων ξηρασίας. Για να μπορεί να χαρακτηριστεί ένα μοντέλο πρόγνωσης επιχειρησιακό πρέπει να προβλέπει σωστά και έγκαιρα τα επεισόδια ξηρασίας και να έχει πολύ μικρό αριθμό λανθασμένων συναγερμών (false alarms). Η κρίσιμη τιμή του δείκτη ορίστηκε στο 0.5 [Hewson, 2007]. Έτσι, αν η μέθοδος έχει τιμή $CSI \geq 0.5$ τότε η μέθοδος θεωρείται επιχειρησιακή για το μελετώμενο χρονικό βήμα πρόγνωσης του SPI. Στο SPI-3μηνών η υβριδική μέθοδος δίνει αξιόπιστες προβλέψεις μόνο για το χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$. Πιθανοθεωρητικά (probabilistic) μοντέλα πρέπει να αναπτυχθούν για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα πρόγνωσης του SPI-3. Όσο αυξάνει η κλίμακα υπολογισμού του SPI τόσο αυξάνει και η ικανότητα των χωροχρονικών αναδρομικών νευρωνικών δικτύων στην πρόγνωση επεισοδίων ξηρασίας.

Αυτό οφείλεται στο ότι το σήμα (χρονοσειρά) του SPI γίνεται πιο ομαλό και δεν παρουσιάζει απότομες αλλαγές κατάστασης (π.χ. μετάβαση από ξηρές σε υγρές καταστάσεις σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα). Επίσης, η συσχέτιση των χρόνων υστέρησης μεγαλώνει για το χρονικό βήμα πρόγνωσης όσο αυξάνει η κλίμακα υπολογισμού του SPI που διευκολύνει την πρόγνωση του SPI.



Σχήμα 8.31. Συνολικά ποσοτικά στατιστικά κριτήρια πρόγνωσης χωροχρονικής μεθόδου για χρονικά βήματα πρόγνωσης του SPI-24 από 1 έως 6 μήνες μπροστά.

Έτσι, η υβριδική χωροχρονική μέθοδος RNN με βάση το δείκτη κρίσιμης επιτυχίας CSI μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αξιόπιστες και επιχειρησιακές προγνώσεις του SPI-6 μέχρι δύο μήνες μπροστά (SPI-6_{t+2}), του SPI-9 μέχρι τρεις μήνες μπροστά (SPI-9_{t+3}), του SPI-12 μέχρι τέσσερις μήνες μπροστά (SPI-12_{t+4}), και του SPI-24 μέχρι έξι μήνες μπροστά (SPI-24_{t+6}). Επίσης, η υβριδική χωροχρονική μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί και στα αμέσως επόμενα χρονικά βήματα πρόγνωσης (π.χ. από $t+4$ στο $t+5$) του SPI μόνο ως χρονική μέθοδος αφού ένας μεγάλος αριθμός σταθμών παρουσιάζει δείκτη κρίσιμης επιτυχίας αναγνώρισης επεισοδίων ξηρασίας $CSI \geq 0.5$ (π.χ. SPI12_{t+5}). Το μεγάλο πλεονέκτημα της υβριδικής μεθόδου είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε σημείο της υδρολογικής λεκάνης εφόσον υπάρχουν οι προγνώσεις της χρονικής μεθόδου RANN. Η χωροχρονική πιστοποίηση των ανεξάρτητων σημειακών 18 σταθμών έδειξε ότι η ακρίβεια της χωροχρονικής πρόγνωσης βελτιώνεται χωρικά και ότι μπορεί η μεθοδολογία να εφαρμοστεί και χρονικά και χωρικά για αξιόπιστες προγνώσεις επεισοδίων ξηρασίας. Αυτό είναι πολύ σημαντικό στην πρόγνωση και διαχείριση ξηρασίας σε μία υδρολογική λεκάνη όπως είναι του Πηνειού ποταμού. Έτσι, αν είναι διαθέσιμες οι υδρολογικές υπολεκάνες ενός ποταμού και υπολογιστούν οι επιφανειακές χρονικές τιμές του SPI με τη μέθοδο RANN, μπορεί η υβριδική μεθοδολογία να εφαρμοστεί σε επίπεδο υπολεκάνης. Τέλος, θα μπορούσε να εφαρμοστεί μία μέθοδος χωρικής παρεμβολής στις σημειακές προγνώσεις του SPI για την χωρική παρεμβολή των προγνώσεων και εκτίμηση περιοχικών ή ψηφιακών (raster) προγνώσεων σε όλη την υδρολογική λεκάνη με απώτερο στόχο το επιχειρησιακό σύστημα πρόγνωσης του SPI στον χώρο και στον χρόνο (spatiotemporal forecasting). Το τελευταίο πραγματοποιείται στο επόμενο κεφάλαιο όπου αναπτύσσεται ένα ολοκληρωμένο και κατανεμημένο (ψηφιακό raster) σύστημα πρόγνωσης της ξηρασίας στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού Θεσσαλίας.

9. ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΧΩΡΟΧΡΟΝΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ ΞΗΡΑΣΙΑΣ

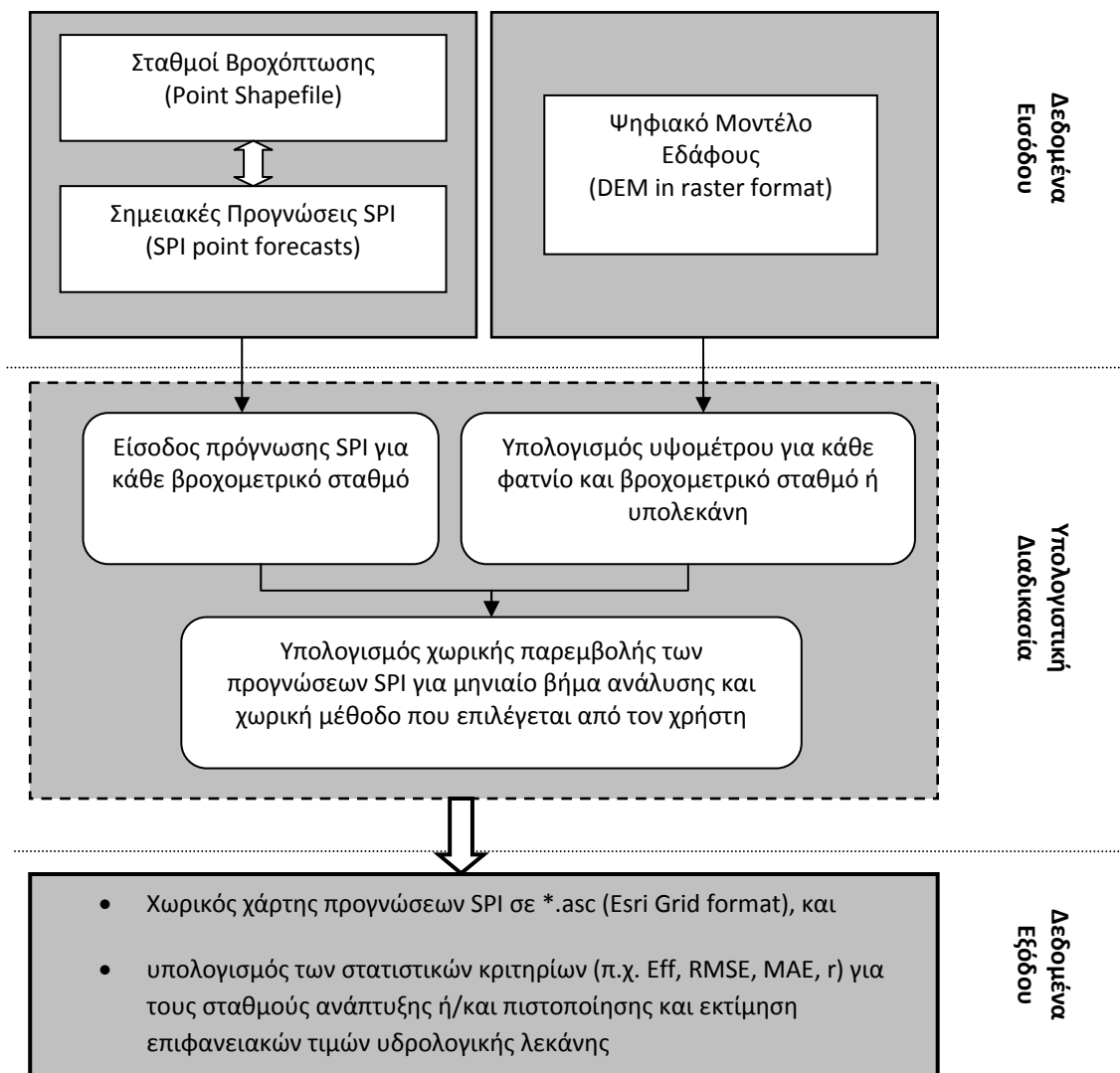
Τα προηγούμενα κεφάλαια έδειξαν ότι η υβριδική χωροχρονική μέθοδος πρόγνωσης του SPI μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε σημείο της υδρολογικής λεκάνης εφόσον υπάρχουν οι προγνώσεις της χρονικής μεθόδου RANN. Η χωροχρονική πιστοποίηση των ανεξάρτητων σημειακών 18 σταθμών έδειξε ότι η ακρίβεια της υβριδικού συστήματος βελτιώνεται χωρικά και ότι μπορεί η μεθοδολογία να εφαρμοστεί και χρονικά και χωρικά για αξιόπιστες προγνώσεις επεισοδίων ξηρασίας. Αυτό είναι πολύ σημαντικό στην πρόγνωση και διαχείριση ξηρασίας σε μία υδρολογική λεκάνη όπως είναι του Πηνειού ποταμού. Έτσι, αν είναι διαθέσιμες οι υδρολογικές υπολεκάνες ενός ποταμού και υπολογιστούν οι επιφανειακές χρονικές τιμές του SPI με τη μέθοδο RANN, μπορεί η υβριδική μεθοδολογία να εφαρμοστεί σε επίπεδο υπολεκάνης. Επίσης, η υβριδική μέθοδος μπορεί να συνδυαστεί με μία μέθοδο χωρικής παρεμβολής για την χωρική παρεμβολή των προγνώσεων του SPI και εκτίμηση περιοχικών ή ψηφιακών (raster) προγνώσεων σε όλη την υδρολογική λεκάνη με στόχο ένα κατανεμημένο (distributed) επιχειρησιακό σύστημα πρόγνωσης του SPI στον χώρο και στον χρόνο. Το σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης της ξηρασίας πραγματοποιείται για τα χρονικά βήματα πρόγνωσης του SPI που μπορούν να χρησιμοποιηθούν επιχειρησιακά όπως αναγνωρίστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Επισημαίνεται ότι μόνο οι σταθμοί ανάπτυξης χρησιμοποιήθηκαν για την χωρική παρεμβολή των προγνώσεων του SPI, τη δημιουργία ψηφιακών χαρτών ξηρασίας με μέγεθος φατνίου 1-km και την εκτίμηση των επιφανειακών τιμών του SPI της υδρολογικής λεκάνης του Πηνειού ποταμού Θεσσαλίας. Οι σταθμοί πιστοποίησης χρησιμοποιήθηκαν μόνο για την χωρική και χρονική σύγκριση της υβριδικής μεθόδου. Τέλος, οι προγνώσεις της χωροχρονικής μεθοδολογίας RNN συνδυάζονται με την καλύτερη μέθοδο χωρικής παρεμβολής για τη δημιουργία ψηφιακών χαρτών πρόγνωσης και μέγεθος φατνίου 1-km. Η μέθοδος χωρικής ολοκλήρωσης προέκυψε από την αξιολόγηση των χωρικών μεθόδων που αναπτύχθηκαν στο Κεφάλαιο 6 και είναι η μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής simple kriging με μεταβαλλόμενα τοπικά μέσα και με μοντέλο παλινδρόμησης (υψόμετρο και χωρικές συντεταγμένες) (Simple Kriging with Varying Local Means with Elevation and spatial coordinates as external variables, SKIm_R). Οι παραγόμενοι προγνωστικοί χάρτες ξηρασίας με μέγεθος φατνίου 1-km συγκρίθηκαν με τους παρατηρημένους χάρτες ξηρασίας για επιλεγμένα επεισόδια ξηρασίας για όλες τις κλίμακες υπολογισμού του SPI και τα βήματα πρόγνωσης που αναγνωρίστηκαν για την αξιολόγηση της υβριδικής χωροχρονικής μεθοδολογίας και για την εκτίμηση των επιφανειακών τιμών του SPI της υδρολογικής λεκάνης του Πηνειού ποταμού στη Θεσσαλία

9.1. Υβριδικό χωροχρονικό σύστημα πρόγνωσης ξηρασίας

Η υβριδική χωροχρονική μεθοδολογία RNN πρόγνωσης του SPI συνδυάστηκε με το αυτοματοποιημένο σύστημα χωροχρονικής προσομοίωσης και ανάλυσης του SPI που δημιουργήθηκε στο Κεφάλαιο 6. Έτσι, για τη χωρική παρεμβολή των προγνώσεων του SPI, οι οκτώ χωρικές τεχνικές (Μέθοδος Πολύγωνων Thiessen TP, Μέθοδος αντίστροφης απόστασης IDW, Μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής kriging OK, Μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής simple kriging SK, Μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής kriging με εξωτερική τάση KED, Μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής kriging με μοντέλο παλινδρόμησης RK, Μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής simple kriging με μεταβαλλόμενα τοπικά μέσα SKIm, Μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής simple kriging με μεταβαλλόμενα τοπικά μέσα και με μοντέλο παλινδρόμησης

SKIm_R) είναι διαθέσιμες για την ψηφιακή παραγωγή των χαρτών ξηρασίας. Το διάγραμμα ροής του συστήματος έγκαιρης προειδοποίησης ξηρασίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 9.1. Τα βασικά δεδομένα εισόδου είναι ένα σημειακό αρχείο δεδομένων (point shapefile) που περιλαμβάνει τις γεωγραφικές συντεταγμένες των σταθμών βροχόπτωσης, μηνιαίες προγνώσεις του δείκτη ξηρασίας SPI για μια εξεταζόμενη χρονική υπολογισμού (π.χ. 3-μηνών) και χρονικό βήμα πρόγνωσης (π.χ. $t+1$) για κάθε σταθμό βροχόπτωσης και ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους για την παροχή της γεωγραφικής και υψομετρικής πληροφορίας. Το γεωγραφικό πρόγραμμα που αναπτύχθηκε, αυτόματα διαβάζει την τιμή των προγνώσεων SPI για κάθε μήνα για όλους τους σταθμούς βροχόπτωσης και η χωρική μέθοδος που επιλέγεται από τον χρήστη πραγματοποιείται για τον υπολογισμό της χωρικής κατανομής των προγνώσεων του δείκτη SPI. Τα παρεμβαλλόμενα χωρικά δεδομένα εξόδου του δείκτη SPI είναι σε μορφή ψηφιακή (raster format), και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για επιπλέον επεξεργασία. Επιπλέον, διάφορα στατιστικά κριτήρια υπολογίζονται για την εκτίμηση και ακρίβεια της χωρικής μεθόδου με βάση την τεχνική διασταυρωμένη επιβεβαίωση των προβλέψεων (*cross-validation*). Στο υβριδικό σύστημα ξηρασίας, λόγω του μεγάλου πλήθους θεωρητικών ημιμεταβλητογραφημάτων που πρέπει να εφαρμοστούν για τη χωρική παρεμβολή των προγνώσεων του δείκτη ξηρασίας του SPI για πέντε (5) χρονικές κλίμακες του δείκτη (3-μηνών, 6- μηνών, 9- μηνών, 12- μηνών και 24- μηνών) και τα αντίστοιχα χρονικά βήματα και για τις έξι (6) γεωστατικές και συνδυαστικές μεθόδους, η πλήρως αυτοματοποιημένη αριθμητική μέθοδος προσαρμογής ημιμεταβλητογραφημάτων ακολουθήθηκε, θεωρώντας ότι το σφαιρικό θεωρητικό ημιμεταβλητογράφημα (spherical semivariogram) προσομοιώνει ικανοποιητικά το πειραματικό ημιμεταβλητογράφημα. Τέλος, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ή τη δημιουργία επιφανειακών τιμών του δείκτη ξηρασίας με βάση ένα γεωγραφικό υπόβαθρο (π.χ. shapefile υπολεκανών) ή την εκτίμηση της χωρικής μεθόδου και υπολογισμό σημειακών τιμών για ένα ξεχωριστό σημειακό αρχείο που περιέχει σταθμούς βροχόπτωσης που δεν έχουν χρησιμοποιηθεί στην εφαρμογή της μεθόδου (*independent validation*). Στην παρούσα εφαρμογή, η υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση των επιφανειακών τιμών του SPI. Ο υπολογισμός των επιφανειακών τιμών της υδρολογικής λεκάνης έγινε για τη μέση τιμή των κατανομημένων (raster) τιμών του SPI με μέγεθος φατνίου 1-km. Υπενθυμίζεται ότι υπολογίστηκαν 9366 φατνία για όλη την υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού.

Η εφαρμογή των χωρικών μεθόδων για χωροχρονική προσομοίωση και παρεμβολή του δείκτη ξηρασίας SPI υπολογισμένου σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες αξιολογήθηκε στο Κεφάλαιο 6. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής simple kriging με μεταβαλλόμενα τοπικά μέσα και με μοντέλο παλινδρόμησης SKIm_R είναι η πιο κατάλληλη μέθοδος χωρικής παρεμβολής του SPI στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού με βάση την τεχνική διασταυρωμένη επιβεβαίωση των προβλέψεων (*cross-validation*) των σταθμών ανάπτυξης. Στους σταθμούς πιστοποίησης η μέθοδος SKIm_R παρουσιάζει συγκριτικά λίγο καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τις άλλες μεθόδους για χωρική και χρονική προσομοίωση του δείκτη ξηρασίας SPI. Έτσι, η μέθοδος SKIm_R επιλέχτηκε ως η βέλτιστη για την χωρική παρεμβολή της υβριδικής μεθόδου των προγνώσεων του SPI για χρονικές κλίμακες 3-μηνών, 6-μηνών, 9-μηνών, 12-μηνών και 24-μηνών και τη δημιουργία ψηφιακών χαρτών ξηρασίας ισοδιάστασης 1-km. Επίσης, δεν πραγματοποιήθηκε έλεγχος της ανεξάρτητης χωρικής πιστοποίησης αφού η υβριδική μέθοδος δίνει καλύτερα χωρικά και χρονικά αποτελέσματα από τα αποτελέσματα των χωρικών μεθόδων. Ενδεικτικά για το SPI-3 μηνών, η υβριδική μεθοδολογία πρόγνωσης RNN_SPI-3_{t+1} δίνει καλύτερα αποτελέσματα από ότι οι χωρικές μέθοδοι για την παρεμβολή του SPI-3_t στους σταθμούς πιστοποίησης. Το ίδιο συμβαίνει και στις μεγαλύτερες κλίμακες υπολογισμού του SPI και τα αντίστοιχα χρονικά βήματα της πρόγνωσης.



Σχήμα 9.1. Διάγραμμα ροής της εφαρμογής του υβριδικού συστήματος πρόγνωσης SPI

9.2. Αξιολόγηση υβριδικού συστήματος πρόγνωσης

Η υβριδική χωροχρονική μέθοδος RNN όπως διαπιστώθηκε μπορεί να δώσει ικανοποιητικές προγνώσεις του SPI. Το χρονικό βήμα πρόγνωσης εξαρτάται από την χρονική κλίμακα υπολογισμού του SPI. Για την επιχειρησιακή λειτουργία του συστήματος πρόγνωσης ξηρασίας απαιτείται η άμεση συλλογή δεδομένων και γρήγορες υπολογιστικές διαδικασίες. Είναι επίσης αυτονόητο ότι το σύστημα θα λειτουργεί αυτόματα ώστε να χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση της ξηρασίας και την έγκαιρη προειδοποίηση των επερχόμενων ξηρασιών με τη χρήση των δεικτών του SPI. Η απόδοση της υβριδικής μεθόδου RNN για την χωρική προσομοίωση του δείκτη ξηρασίας SPI υπολογισμένου σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες αξιολογήθηκε για τους σταθμούς ανάπτυξης και ανεξάρτητης χωρικής πιστοποίησης με τη χρήση στατιστικών κριτηρίων για όλη την περίοδο της ανάλυσης (Οκτ. 1962 – Σεπ. 2002). Τα στατιστικά κριτήρια που επιλέχθηκαν για την αξιολόγηση της υβριδικής μεθόδου RNN είναι ο βαθμός απόδοσης Nash-Sutcliffe efficiency (Eff), ο συντελεστής συσχέτισης (r), το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE) και το μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE). Αυτά τα κριτήρια είναι τα πιο συχνά ποσοτικά

μέτρα εκτίμησης υδρολογικών και μετεωρολογικών εφαρμογών. Η μηνιαία σύγκριση των χρονοσειρών SPI για τα υδρολογικά έτη 1960-61 έως 2001-02 έδειξε ότι παρατηρούνται παρατεταμένα γεγονότα ξηρασίας σε τρεις περιόδους, Οκτώβριος 1976-Σεπτέμβριος 1978, Οκτώβριος 1988-Σεπτέμβριος 1990 και Οκτώβριος 2000-Σεπτέμβριος 2002. Ίδια αποτελέσματα έχουν βρεθεί και από άλλες εργασίες που μελέτησαν το φαινόμενο της ξηρασίας στην υπό μελέτη υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού αλλά και σε ολόκληρο το υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας για τα ίδια υδρολογικά έτη [Loukas and Vasiliades, 2004; Loukas et al., 2008; Vasiliades and Loukas, 2009a; Vasiliades et al., 2010]. Έτσι, οι παραγόμενοι χωρικοί χάρτες με διάσταση φατινίου 1-km θα επικεντρωθούν σε αυτές τις τρεις περιόδους και τα αποτελέσματα της εφαρμογής της υβριδικής μεθόδου πρόγνωσης ως χωρική μέθοδος παρεμβολής για τους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης θα παρουσιαστούν για όλη την περίοδο της χωροχρονικής ανάλυσης (Οκτ. 1962 – Σεπ. 2002). Τέλος, η μέθοδος αναφοράς του μοντέλου εμμονής (Persistence model) συγκρίνεται και αυτή ως χωρική μέθοδος των προγνώσεων για όλη την περίοδο της ανάλυσης.

9.2.1. Αξιολόγηση προγνώσεων SPI-3μηνών

Στο SPI-3μηνών η υβριδική μέθοδος δίνει αξιόπιστες προβλέψεις μόνο για το χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$. Τα αποτελέσματα των στατιστικών κριτηρίων (Eff, r, RMSE και MAE) της υβριδικής μεθόδου RNN και του μοντέλου εμμονής (Persistence model, Pers.) ως χωρικές μέθοδοι πρόγνωσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 9.1 για όλη την περίοδο της ανάλυσης των 48 σταθμών ανάπτυξης και 18 σταθμών χωρικής πιστοποίησης. Τα ποσοτικά χωρικά στατιστικά κριτήρια των δύο μεθόδων πρόγνωσης αξιολογήθηκαν και ποιοτικά σε μηνιαία κλίμακα. Έτσι υπολογίστηκε το ποσοστό του αριθμού των μηνών που μία από τις δύο μεθόδους υπερτερεί από την άλλη με βάση το εξεταζόμενο στατιστικό κριτήριο. Σε περίπτωση ισοβαθμίας των μεθόδων με βάση το συγκεκριμένο κριτήριο (π.χ. Eff) οι δύο ισοβαθμούμενες μέθοδοι θεωρούνται ότι προσομοιώνουν καλύτερα τον συγκεκριμένο μήνα. Για παράδειγμα, για τον βαθμό απόδοσης Eff, η RNN υπερτερεί χωρικά 391 φορές από τη μέθοδο Persistence, δηλαδή στο 83.2% του συνόλου των 470 μηνών χωρικής ανάλυσης στους σταθμούς ανάπτυξης. Παραπλήσια είναι η απόδοση της μεθόδου RNN και για τα άλλα στατιστικά κριτήρια (R, RMSE και MAE) στους σταθμούς ανάπτυξης και χωρικής πιστοποίησης (Πίνακας 9.1).

Πίνακας 9.1. Στατιστικά κριτήρια εκτίμησης μεθόδων πρόγνωσης για χωρική παρεμβολή των σταθμών ανάπτυξης και πιστοποίησης της περιόδου Οκτ 1962 – Σεπ 2002.

	Eff		R		RMSE		MAE	
	Pers.	RNN	Pers.	RNN	Pers.	RNN	Pers.	RNN
Σταθμοί ανάπτυξης								
Μέση τιμή	-0.76	0.23	0.68	0.75	0.72	0.50	0.51	0.37
Διάμεσος	-0.04	0.40	0.73	0.77	0.63	0.47	0.41	0.30
Μέγιστη	0.90	0.90	0.97	0.95	3.00	1.30	2.77	1.77
Ελάχιστη	-15.64	-4.71	-0.17	0.23	0.19	0.24	0.00	0.00
% χωρική υπεροχή	16.81	83.19	33.19	66.81	16.81	83.19	38.09	61.91
Σταθμοί χωρικής πιστοποίησης								
Μέση τιμή	-0.91	0.13	0.68	0.73	0.71	0.51	0.59	0.39
Διάμεσος	-0.08	0.34	0.75	0.78	0.62	0.48	0.44	0.31
Μέγιστη	0.90	0.92	0.99	0.97	2.79	1.66	2.89	2.54
Ελάχιστη	-18.11	-3.37	-0.19	-0.14	0.17	0.20	0.00	0.00
% χωρική υπεροχή	22.13	77.87	41.49	58.51	22.13	77.87	37.66	62.34

Ιστορικά ακραία και δριμύ γεγονότα ξηρασίας επιλέχθηκαν για τη θεματική απεικόνιση του SPI-3. Ο Πίνακας 9.2 παρουσιάζει τα στατιστικά αποτελέσματα των μεθόδων πρόγνωσης για χωρική παρεμβολή των μηνών του SPI-3 για χρονικό βήμα πρόγνωσης ενός μήνα μπροστά. Στα πέντε επεισόδια ξηρασίας η μέθοδος RNN παρουσιάζεται χωρικά καλύτερη από την Persistence στους 4 από τους 5 μήνες στους σταθμούς ανάπτυξης (Πίνακας 9.2). Έτσι η χωρική μέθοδος SKIm_R εφαρμόστηκε στις προγνώσεις της RNN μεθόδου για την δημιουργία ψηφιακών προγνωστικών χαρτών ξηρασίας με μέγεθος φατνίου 1-km. Ο Πίνακας 9.3 παρουσιάζει τα στατιστικά χαρακτηριστικά των μηνών του SPI-3 που επιλέχθηκαν για τη θεματική απεικόνιση της υβριδικής μεθόδου για χρονικό βήμα πρόγνωσης ενός μήνα μπροστά και παρατηρείται ότι γενικά οι προγνώσεις του SPI-3 υποεκτιμούν και τη δριμύτητα και τον αριθμό των σταθμών που πλήττονται από ξηρασία (Πίνακας 9.3). Τα στατιστικά χαρακτηριστικά των προγνωστικών και παρατηρούμενων χαρτών ξηρασίας του SPI-3 παρουσιάζονται στον Πίνακα 9.4 και η χωρική κατανομή των χαρτών στο Σχήμα 9.2 από όπου αποδεικνύεται ότι η μέθοδος RNN υποεκτιμά και τη δριμύτητα και την έκταση της περιοχής που πλήττονται από την ξηρασία.

Πίνακας 9.2. Στατιστικά κριτήρια εκτίμησης μεθόδων πρόγνωσης για χωρική παρεμβολή των επιλεγμένων γεγονότων ξηρασίας του SPI-3 στους σταθμούς ανάπτυξης.

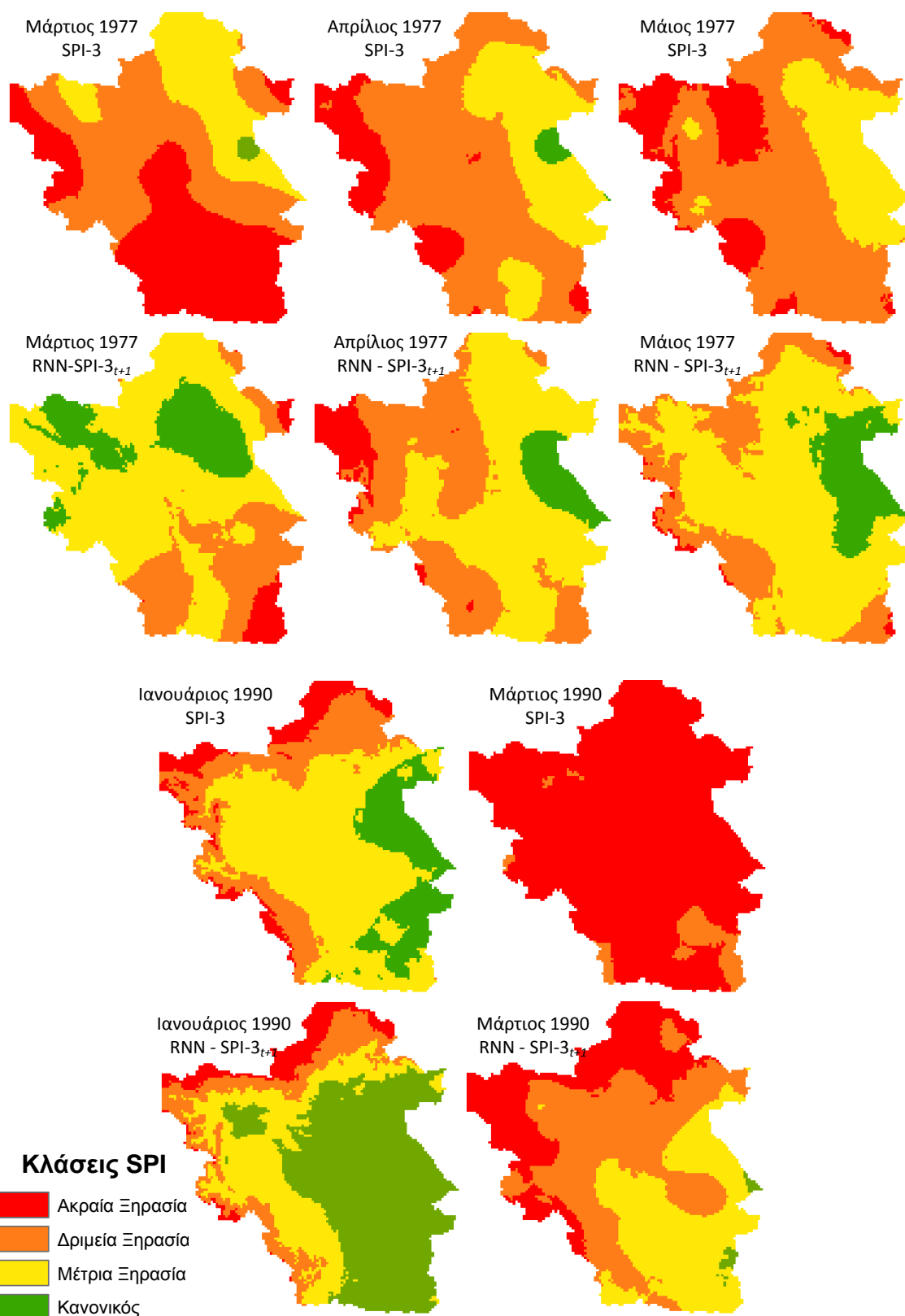
	Eff		R		RMSE		MAE	
	Pers.	RNN	Pers.	RNN	Pers.	RNN	Pers.	RNN
Μαρ-77	-2.33	-0.64	0.47	0.65	1.16	0.81	0.18	0.71
Απρ-77	-0.01	0.36	0.59	0.76	0.56	0.45	0.74	0.33
Μαι-77	0.48	0.15	0.72	0.73	0.44	0.57	0.14	0.63
Ιαν-90	0.25	0.52	0.89	0.90	0.77	0.61	0.39	0.23
Μαρ-90	-0.52	-0.21	0.59	0.71	1.01	0.91	0.94	0.06

Πίνακας 9.3. Στατιστικά χαρακτηριστικά των μηνών του SPI-3 επιλέχθηκαν για θεματική απεικόνιση των προγνώσεων της υβριδικής μεθόδου RNN στους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.

Μήνας	Αριθμός Σταθμών Ανάπτυξης με $SPI \leq -1$	Μέση Δριμύτητα SPI Σταθμών Ανάπτυξης	Τυπική απόκλιση SPI Σταθμών Ανάπτυξης	Αριθμός Σταθμών Πιστοποίησης με $SPI \leq -1$	Μέση Δριμύτητα SPI Σταθμών Πιστοποίησης	Τυπική απόκλιση SPI Σταθμών Πιστοποίησης
Παρατηρούμενο SPI-3μηνών, SPI-3						
Μαρ-77	44	-1.87	0.64	16	-1.57	0.56
Απρ-77	45	-1.74	0.57	14	-1.54	0.65
Μαϊ-77	42	-1.78	0.62	15	-1.75	0.66
Ιαν-90	36	-1.50	0.89	11	-1.34	0.67
Μαρ-90	45	-2.43	0.83	18	-2.15	0.69
Πρόγνωση με τη μέθοδο RNN του SPI-3μηνών, $SPI-3_{t+1}$						
Μαρ-77	30	-1.26	0.67	10	-0.99	0.54
Απρ-77	39	-1.52	0.58	11	-1.20	0.64
Μαϊ-77	34	-1.41	0.55	11	-1.22	0.66
Ιαν-90	29	-1.21	0.87	9	-0.92	0.79
Μαρ-90	37	-1.81	0.94	12	-1.52	0.68

9.2.2. Αξιολόγηση προγνώσεων SPI-6μηνών

Η υβριδική χωροχρονική μέθοδος RNN με βάση το δείκτη κρίσιμης επιτυχίας CSI μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αξιόπιστες και επιχειρησιακές προγνώσεις του SPI-6 μέχρι και δύο μήνες μπροστά ($SPI-6_{t+2}$).



Σχήμα 9.2. Σύγκριση παραγόμενων ψηφιακών χαρτών του SPI-3 που δημιουργήθηκαν με το σύστημα πρόγνωσης και παρακολούθησης της ξηρασίας.

Πίνακας 9.4. Χαρακτηριστικά ψηφιακών χαρτών παρατηρημένων γεγονότων ξηρασίας και προγνώσεων με τη μέθοδο RNN του δείκτη ξηρασίας SPI-3.

	Μαρ-77	Απρ-77	Μαϊ-77	Ιαν-90	Μαρ-90
Στατιστικά χαρακτηριστικά παρατηρούμενων ψηφιακών χαρτών					
Μέγιστη δριμύτητα SPI	-2.91	-2.50	-2.80	-2.90	-3.30
Ελάχιστη δριμύτητα SPI	-0.70	-0.60	-1.00	-0.5	-1.50
Μέση δριμύτητα SPI	-1.81	-1.62	-1.70	-1.32	-2.43
Τυπική απόκλιση SPI	0.43	0.31	0.31	0.42	0.26
Χωρικά χαρακτηριστικά παρατηρούμενων ψηφιακών χαρτών					
Έκταση με ακραία ξηρασία (%)	38.93	13.31	19.60	9.15	94.23
Έκταση με δριμεία ξηρασία (%)	38.71	57.15	57.78	22.11	5.77
Έκταση με μέτρια ξηρασία (%)	21.62	27.96	22.61	52.39	0.00
Έκταση χωρίς ξηρασία (%)	0.74	1.57	0.00	16.35	0.00
Συνολική έκταση με ξηρασία (%)	99.26	98.43	100.00	83.65	100.00
Στατιστικά χαρακτηριστικά προγνωστικών ψηφιακών χαρτών					
Μέγιστη δριμύτητα SPI	-2.80	-2.30	-2.40	-3.50	-3.50
Ελάχιστη δριμύτητα SPI	-0.50	-0.50	-0.70	0.40	-0.70
Μέση δριμύτητα SPI	-1.27	-1.42	-1.30	-1.02	-1.69
Τυπική απόκλιση SPI	0.36	0.32	0.28	0.60	0.44
Χωρικά χαρακτηριστικά προγνωστικών ψηφιακών χαρτών					
Έκταση με ακραία ξηρασία (%)	3.98	6.44	1.45	7.24	26.40
Έκταση με δριμεία ξηρασία (%)	23.02	36.58	24.18	15.62	40.50
Έκταση με μέτρια ξηρασία (%)	55.39	50.09	60.76	26.97	32.27
Έκταση χωρίς ξηρασία (%)	17.61	6.90	13.60	50.17	0.83
Συνολική έκταση με ξηρασία (%)	82.39	93.10	86.40	49.83	99.17

Τα αποτελέσματα των στατιστικών κριτηρίων (Eff, r, RMSE και MAE) της υβριδικής μεθόδου RNN και του μοντέλου εμμονής ως χωρικές μέθοδοι πρόγνωσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 9.5 για όλη την περίοδο της ανάλυσης των 48 σταθμών ανάπτυξης και 18 σταθμών χωρικής πιστοποίησης. Τα ποσοτικά χωρικά στατιστικά κριτήρια των δύο μεθόδων πρόγνωσης αξιολογήθηκαν και ποιοτικά σε μηνιαία κλίμακα. Έτσι υπολογίστηκε το ποσοστό του αριθμού των μηνών που μία από τις δύο μεθόδους υπερτερεί από την άλλη με βάση το εξεταζόμενο στατιστικό κριτήριο. Για παράδειγμα, για τον βαθμό απόδοσης Eff, η RNN υπερτερεί χωρικά 380 φορές και 417 από τη μέθοδο Persistence για βήματα πρόγνωσης t+1 και t+2, αντίστοιχα δηλαδή στο 81% και 89% του συνόλου των 470 μηνών χωρικής ανάλυσης στους σταθμούς ανάπτυξης για τα δύο πρώτα χρονικά βήματα πρόγνωσης. Παραπλήσια είναι η απόδοση της μεθόδου RNN και για τα άλλα στατιστικά κριτήρια (R, RMSE και MAE) στους σταθμούς ανάπτυξης και χωρικής πιστοποίησης (Πίνακας 9.5).

Ιστορικά ακραία και δριμύ γεγονότα ξηρασίας επιλέχθηκαν για τη θεματική απεικόνιση του SPI-6. Ο Πίνακας 9.6 παρουσιάζει τα στατιστικά αποτελέσματα των μεθόδων πρόγνωσης για χωρική παρεμβολή των επιλεγμένων μηνών του SPI-6 για χρονικό βήμα πρόγνωσης ενός και δύο μηνών μπροστά. Στα τρία επεισόδια ξηρασίας η μέθοδος RNN παρουσιάζεται χωρικά καλύτερη από την Persistence στους σταθμούς ανάπτυξης (Πίνακας 9.6). Έτσι η χωρική μέθοδος SKIm_R εφαρμόστηκε στις προγνώσεις της RNN μεθόδου για την δημιουργία ψηφιακών προγνωστικών χαρτών ξηρασίας με μέγεθος φατνίου 1-km. Ο Πίνακας 9.7 παρουσιάζει τα στατιστικά χαρακτηριστικά των μηνών του SPI-6 που επιλέχθηκαν για τη θεματική απεικόνιση της υβριδικής μεθόδου και παρατηρείται ότι γενικά οι προγνώσεις του SPI-6 εκτιμούν ικανοποιητικά τη δριμύτητα και τον αριθμό των σταθμών που πλήττονται από ξηρασία για χρονικό βήμα πρόγνωσης t+1. Για το χρονικό βήμα πρόγνωσης t+2 μία αναμενόμενη υποεκτίμηση της δριμύτητας εμφανίζεται (Πίνακας 9.7). Τα στατιστικά χαρακτηριστικά των προγνωστικών και παρατηρούμενων χαρτών ξηρασίας του SPI-6 παρουσιάζονται στον Πίνακα 9.8 και η χωρική κατανομή των χαρτών στο Σχήμα 9.3 από όπου αποδεικνύεται ότι η μέθοδος RNN εκτιμά πολύ ικανοποιητικά τη

δριμύτητα και την έκταση της υδρολογικής λεκάνης που πλήττονται από την ξηρασία για χρονικά βήματα πρόγνωσης έως δύο μήνες μπροστά.

Πίνακας 9.5. Στατιστικά κριτήρια εκτίμησης μεθόδων πρόγνωσης για χωρική παρεμβολή των προγνώσεων του SPI-6 στους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης της περιόδου Οκτ 1962 – Σεπ 2002.

	Eff		R		RMSE		MAE	
	Pers.	RNN	Pers.	RNN	Pers.	RNN	Pers.	RNN
Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+1 - Σταθμοί ανάπτυξης								
Μέση τιμή	0.19	0.63	0.84	0.88	0.49	0.36	0.32	0.25
Διάμεσος	0.55	0.74	0.88	0.90	0.42	0.33	0.26	0.20
Μέγιστη	0.98	0.97	0.99	0.98	1.79	1.06	1.63	1.02
Ελάχιστη	-8.14	-2.21	0.12	0.40	0.11	0.17	0.00	0.00
% χωρική υπεροχή	19.15	80.85	35.32	64.68	19.15	80.85	39.57	60.43
Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+1 - Σταθμοί χωρικής πιστοποίησης								
Μέση τιμή	0.13	0.58	0.85	0.88	0.48	0.36	0.41	0.27
Διάμεσος	0.54	0.71	0.89	0.90	0.41	0.33	0.32	0.20
Μέγιστη	0.99	0.96	0.99	0.99	1.82	1.16	2.28	1.49
Ελάχιστη	-9.03	-2.33	0.17	0.36	0.07	0.16	0.00	0.00
% χωρική υπεροχή	21.91	78.09	38.30	61.70	21.91	78.09	34.68	65.32
Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+2 - Σταθμοί ανάπτυξης								
Μέση τιμή	-0.59	0.32	0.70	0.78	0.72	0.49	0.49	0.34
Διάμεσος	-0.02	0.46	0.75	0.80	0.63	0.46	0.42	0.30
Μέγιστη	0.87	0.93	0.96	0.97	1.92	1.05	2.02	1.33
Ελάχιστη	-9.28	-3.03	-0.25	0.35	0.23	0.23	0.00	0.00
% χωρική υπεροχή	11.28	88.72	27.87	72.13	11.28	88.72	37.23	62.77
Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+2 - Σταθμοί χωρικής πιστοποίησης								
Μέση τιμή	-0.75	0.20	0.69	0.76	0.71	0.50	0.61	0.37
Διάμεσος	-0.07	0.42	0.75	0.79	0.65	0.47	0.49	0.32
Μέγιστη	0.93	0.93	0.98	0.98	2.11	1.30	3.64	2.01
Ελάχιστη	-20.62	-5.49	-0.18	-0.10	0.17	0.19	0.00	0.00
% χωρική υπεροχή	17.87	82.13	36.60	63.40	17.87	82.13	31.06	68.94

Πίνακας 9.6. Στατιστικά κριτήρια εκτίμησης μεθόδων πρόγνωσης για χωρική παρεμβολή των επιλεγμένων γεγονότων ξηρασίας του SPI-6 στους σταθμούς ανάπτυξης.

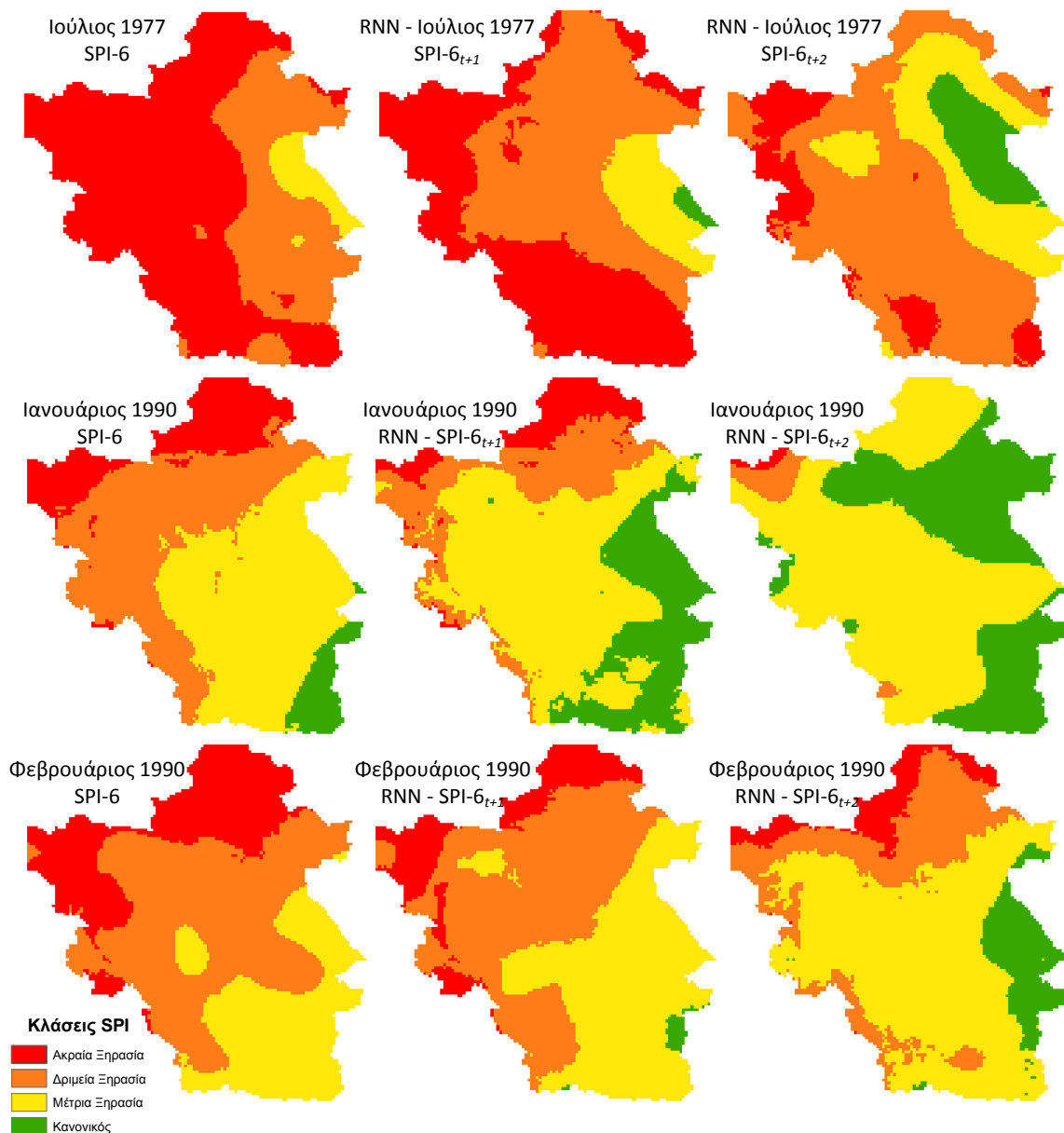
	Eff		R		RMSE		MAE	
	Pers.	RNN	Pers.	RNN	Pers.	RNN	Pers.	RNN
Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+1								
Ιουλ-77	0.54	0.57	0.79	0.81	0.43	0.40	0.86	0.01
Ιαν-90	-0.23	0.74	0.90	0.92	0.91	0.42	0.65	0.44
Φεβ-90	0.80	0.81	0.91	0.92	0.34	0.33	0.36	0.18
Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+2								
Ιουλ-77	-1.66	-0.19	0.15	0.72	1.00	0.67	0.97	0.16
Ιαν-90	-1.24	0.16	0.69	0.77	1.23	0.75	0.87	0.93
Φεβ-90	-1.02	0.41	0.81	0.81	1.08	0.58	1.01	0.60

Πίνακας 9.7. Στατιστικά χαρακτηριστικά των μηνών του SPI-6 επιλέχθηκαν για θεματική απεικόνιση των προγνώσεων της υβριδικής μεθόδου RNN στους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.

Μήνας	Αριθμός Σταθμών Ανάπτυξης με $SPI \leq -1$	Μέση Δριμύτητα SPI Σταθμών Ανάπτυξης	Τυπική απόκλιση SPI Σταθμών Ανάπτυξης	Αριθμός Σταθμών Πιστοποίησης με $SPI \leq -1$	Μέση Δριμύτητα SPI Σταθμών Πιστοποίησης	Τυπική απόκλιση SPI Σταθμών Πιστοποίησης
Παρατηρούμενο SPI-6μηνών, SPI-6						
Ιουλ-77	46	-2.16	0.62	17	-2.00	0.69
Ιαν-90	40	-1.62	0.83	15	-1.43	0.65
Φεβ-90	44	-1.75	0.77	14	-1.50	0.59
Πρόγνωση με τη μέθοδο RNN του SPI-6μηνών, $SPI-6_{t+1}$						
Ιουλ-77	46	-2.00	0.57	17	-1.85	0.63
Ιαν-90	33	-1.36	0.80	12	-1.21	0.86
Φεβ-90	39	-1.64	0.81	15	-1.51	0.65
Πρόγνωση με τη μέθοδο RNN του SPI-6μηνών, $SPI-6_{t+2}$						
Ιουλ-77	43	-1.66	0.59	16	-1.56	0.58
Ιαν-90	29	-1.09	0.74	13	-0.97	0.58
Φεβ-90	35	-1.42	0.79	11	-1.17	0.62

Πίνακας 9.8. Στατιστικά και χωρικά χαρακτηριστικά ψηφιακών χαρτών παρατηρημένων γεγονότων ξηρασίας και προγνώσεων με τη μέθοδο RNN του δείκτη ξηρασίας SPI-6.

	Obs SPI-6	RNN $SPI-6_{t+1}$	RNN $SPI-6_{t+2}$
Ιούλιος 1977			
Μέγιστη δριμύτητα SPI	-3.00	-2.70	-2.50
Ελάχιστη δριμύτητα SPI	-1.11	-0.80	-0.46
Μέση δριμύτητα SPI	-2.05	-1.90	-1.56
Τυπική απόκλιση SPI	0.35	0.35	0.40
Έκταση με ακραία ξηρασία (%)	64.65	43.66	12.50
Έκταση με δριμεία ξηρασία (%)	30.65	44.90	55.09
Έκταση με μέτρια ξηρασία (%)	4.70	10.42	22.87
Έκταση χωρίς ξηρασία (%)	0.00	1.02	9.53
Συνολική έκταση με ξηρασία (%)	100.00	98.98	90.47
Ιανουάριος 1990			
Μέγιστη δριμύτητα SPI	-3.00	-2.90	-2.3
Ελάχιστη δριμύτητα SPI	-0.70	-0.40	-0.21
Μέση δριμύτητα SPI	-1.52	-1.30	-1.02
Τυπική απόκλιση SPI	0.39	0.43	0.26
Έκταση με ακραία ξηρασία (%)	15.40	8.76	0.64
Έκταση με δριμεία ξηρασία (%)	36.16	19.75	3.03
Έκταση με μέτρια ξηρασία (%)	43.24	50.13	60.89
Έκταση χωρίς ξηρασία (%)	5.20	21.36	35.44
Συνολική έκταση με ξηρασία (%)	94.80	78.64	64.56
Φεβρουάριος 1990			
Μέγιστη δριμύτητα SPI	-3.00	-2.80	-2.70
Ελάχιστη δριμύτητα SPI	-1.00	-0.80	-0.70
Μέση δριμύτητα SPI	-1.68	-1.54	-1.40
Τυπική απόκλιση SPI	0.36	0.34	0.36
Έκταση με ακραία ξηρασία (%)	25.70	13.22	7.63
Έκταση με δριμεία ξηρασία (%)	47.09	45.21	24.70
Έκταση με μέτρια ξηρασία (%)	27.22	40.58	57.41
Έκταση χωρίς ξηρασία (%)	0.00	0.99	10.26
Συνολική έκταση με ξηρασία (%)	100.00	99.01	89.74



Σχήμα 9.3. Σύγκριση παραγόμενων ψηφιακών χαρτών του SPI-6 που δημιουργήθηκαν με το σύστημα πρόγνωσης και παρακολούθησης της ξηρασίας.

9.2.3. Αξιολόγηση προγνώσεων SPI-9μηνών

Η υβριδική χωροχρονική μέθοδος RNN μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αξιόπιστες και επιχειρησιακές προγνώσεις του SPI-9 μέχρι και τρεις μήνες μπροστά (SPI-9_{t+3}). Τα αποτελέσματα των στατιστικών κριτηρίων (Eff, r, RMSE και MAE) της υβριδικής μεθόδου RNN και του μοντέλου εμμονής (Persistence) ως χωρικές μέθοδοι πρόγνωσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 9.9 για όλη την περίοδο της ανάλυσης των 48 σταθμών ανάπτυξης και 18 σταθμών χωρικής πιστοποίησης. Τα ποσοτικά χωρικά στατιστικά κριτήρια των δύο μεθόδων πρόγνωσης αξιολογήθηκαν και ποιοτικά σε μηνιαία κλίμακα. Έτσι υπολογίστηκε το ποσοστό του αριθμού των μηνών που μία από τις δύο μεθόδους υπερτερεί από την άλλη με βάση το εξεταζόμενο στατιστικό κριτήριο. Για παράδειγμα, για τον βαθμό απόδοσης Eff, η RNN υπερτερεί χωρικά 372, 384 και 396 φορές από τη μέθοδο Persistence για βήματα πρόγνωσης t+1, t+2, και t+3, αντίστοιχα, του συνόλου των 470 μηνών χωρικής ανάλυσης στους σταθμούς ανάπτυξης. Παραπλήσια είναι η απόδοση της μεθόδου RNN και για τα άλλα στατιστικά κριτήρια (R, RMSE και MAE) στους σταθμούς ανάπτυξης και χωρικής πιστοποίησης (Πίνακας 9.9).

Πίνακας 9.9. Στατιστικά κριτήρια εκτίμησης μεθόδων πρόγνωσης για χωρική παρεμβολή των προγνώσεων του SPI-9 στους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης της περιόδου Οκτ 1962 – Σεπ 2002.

	Eff		R		RMSE		MAE	
	Pers.	RNN	Pers.	RNN	Pers.	RNN	Pers.	RNN
Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+1 - Σταθμοί ανάπτυξης								
Μέση τιμή	0.51	0.78	0.91	0.93	0.39	0.28	0.24	0.18
Διάμεσος	0.73	0.84	0.93	0.94	0.34	0.25	0.18	0.15
Μέγιστη	0.99	0.98	0.99	0.99	1.22	0.83	1.42	1.02
Ελάχιστη	-4.37	-1.18	0.42	0.65	0.10	0.12	0.00	0.00
% χωρική υπεροχή	20.85	79.15	39.15	60.85	20.85	79.15	37.87	62.13
Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+1 - Σταθμοί χωρικής πιστοποίησης								
Μέση τιμή	0.74	0.90	0.92	0.38	0.28	0.33	0.21	0.74
Διάμεσος	0.83	0.94	0.94	0.34	0.26	0.27	0.17	0.83
Μέγιστη	0.97	1.00	0.99	1.18	0.82	1.92	1.03	0.97
Ελάχιστη	-1.70	0.09	0.50	0.05	0.10	0.00	0.00	-1.70
% χωρική υπεροχή	25.96	74.04	41.91	58.09	25.96	74.04	32.55	67.45
Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+2 - Σταθμοί ανάπτυξης								
Μέση τιμή	-0.02	0.56	0.81	0.86	0.56	0.39	0.35	0.25
Διάμεσος	0.37	0.66	0.85	0.88	0.51	0.36	0.28	0.20
Μέγιστη	0.93	0.95	0.98	0.98	1.74	1.03	1.46	1.52
Ελάχιστη	-7.17	-2.68	0.11	0.52	0.15	0.21	0.00	0.00
% χωρική υπεροχή	18.30	81.70	37.02	62.98	18.30	81.70	38.09	61.91
Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+2 - Σταθμοί χωρικής πιστοποίησης								
Μέση τιμή	-0.75	0.20	0.69	0.76	0.71	0.50	0.61	0.37
Διάμεσος	-0.07	0.42	0.75	0.79	0.65	0.47	0.49	0.32
Μέγιστη	0.93	0.93	0.98	0.98	2.11	1.30	3.64	2.01
Ελάχιστη	-20.62	-5.49	-0.18	-0.10	0.17	0.19	0.00	0.00
% χωρική υπεροχή	20.21	79.79	38.51	61.49	20.21	79.79	34.47	65.53
Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+3 - Σταθμοί ανάπτυξης								
Μέση τιμή	-0.50	0.38	0.72	0.79	0.69	0.47	0.45	0.31
Διάμεσος	0.13	0.52	0.76	0.81	0.62	0.44	0.36	0.26
Μέγιστη	0.91	0.94	0.98	0.97	2.16	1.23	2.02	1.27
Ελάχιστη	-13.06	-3.37	-0.05	0.45	0.20	0.20	0.00	0.00
% χωρική υπεροχή	15.74	84.26	32.98	67.02	15.74	84.26	34.04	65.96
Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+3 - Σταθμοί χωρικής πιστοποίησης								
Μέση τιμή	-0.74	0.27	0.70	0.78	0.69	0.47	0.61	0.35
Διάμεσος	-0.06	0.48	0.75	0.81	0.62	0.44	0.53	0.28
Μέγιστη	0.93	0.92	0.97	0.97	2.25	1.15	2.47	1.41
Ελάχιστη	-17.26	-5.77	-0.21	0.11	0.15	0.19	0.00	0.00
% χωρική υπεροχή	14.89	85.11	31.91	68.09	14.89	85.11	31.28	68.72

Ιστορικά ακραία και δριμύ γεγονότα ξηρασίας επιλέχτηκαν για τη θεματική απεικόνιση του SPI-9. Ο Πίνακας 9.10 παρουσιάζει τα στατιστικά αποτελέσματα των μεθόδων πρόγνωσης για χωρική παρεμβολή των επιλεγμένων μηνών του SPI-9 για χρονικά βήματα πρόγνωσης έως τρεις (3) μήνες μπροστά. Στα τρία επιλεγμένα επεισόδια ξηρασίας η μέθοδος RNN παρουσιάζεται και πάλι χωρικά καλύτερη από την Persistence στους σταθμούς ανάπτυξης (Πίνακας 9.10). Έτσι η χωρική μέθοδος SKIm_R εφαρμόστηκε στις προγνώσεις της RNN μεθόδου για την δημιουργία ψηφιακών προγνωστικών χαρτών ξηρασίας με μέγεθος φατνίου 1-km. Ο Πίνακας 9.11 παρουσιάζει τα στατιστικά χαρακτηριστικά των μηνών του SPI-9 που επιλέχτηκαν για τη θεματική απεικόνιση της υβριδικής μεθόδου και παρατηρείται ότι γενικά οι προγνώσεις του SPI-9 εκτιμούν ικανοποιητικά τη δριμύτητα και τον αριθμό των σταθμών που πλήττονται από ξηρασία για χρονικά βήματα πρόγνωσης t+1 και t+2. Για το χρονικό βήμα πρόγνωσης t+3 μία αναμενόμενη υποεκτίμηση της δριμύτητας εμφανίζεται (Πίνακας 9.11). Τα στατιστικά χαρακτηριστικά των προγνωστικών και παρατηρούμενων χαρτών ξηρασίας του SPI-9

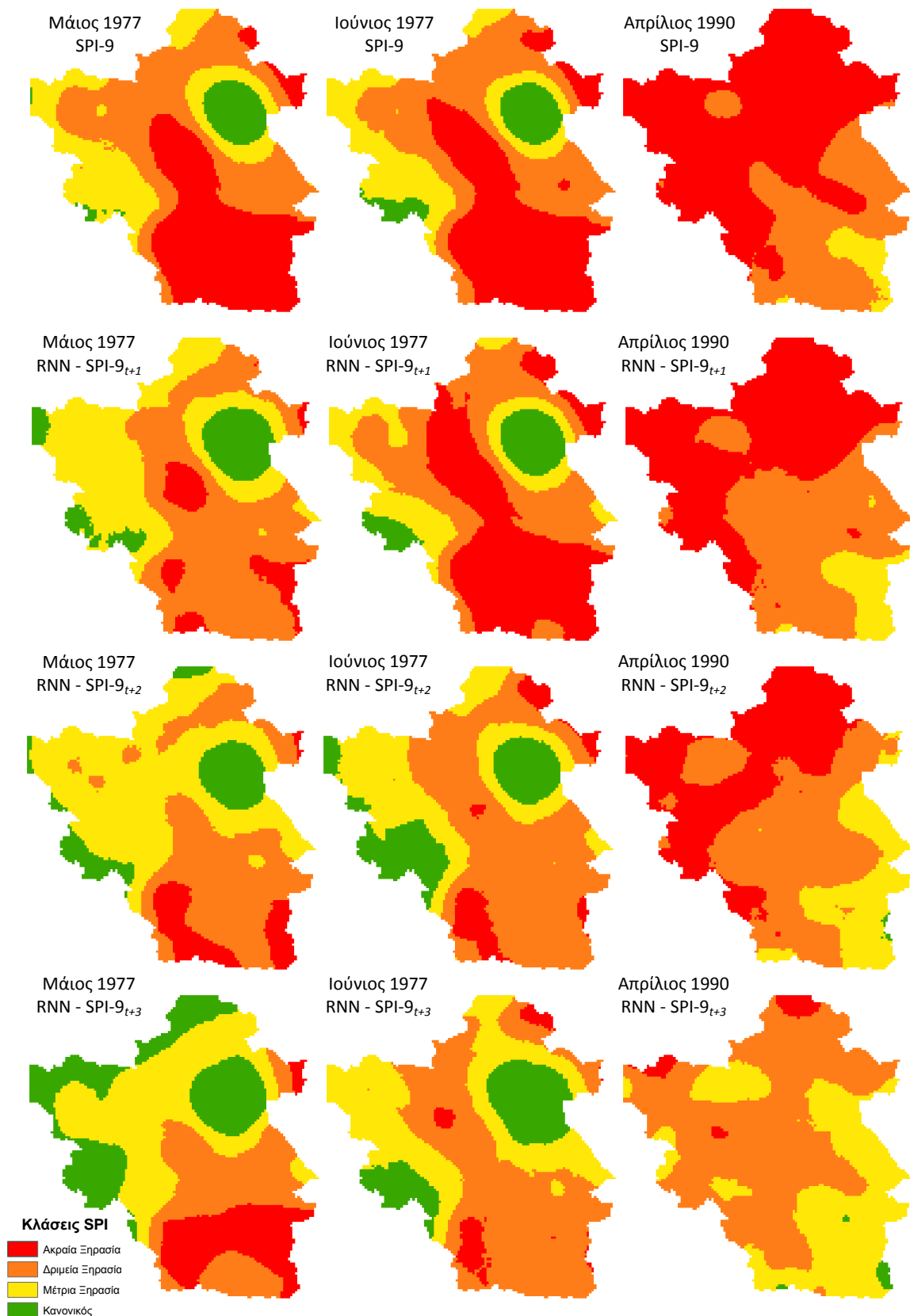
παρουσιάζονται στον Πίνακα 9.12 και η χωρική κατανομή των χαρτών στο Σχήμα 9.4 από όπου αποδεικνύεται ότι η μέθοδος RNN εκτιμά πολύ ικανοποιητικά τη δριμύτητα και την έκταση της υδρολογικής λεκάνης που πλήττονται από την ξηρασία για χρονικά βήματα πρόγνωσης έως δύο μήνες μπροστά και υποεκτιμά ελαφρώς τη δριμύτητα και την έκταση της ξηρασίας για χρονικό βήμα πρόγνωσης τρεις μήνες.

Πίνακας 9.10. Στατιστικά κριτήρια εκτίμησης μεθόδων πρόγνωσης για χωρική παρεμβολή των επιλεγμένων γεγονότων ξηρασίας του SPI-9 στους σταθμούς ανάπτυξης.

	Eff		R		RMSE		MAE	
	Pers.	RNN	Pers.	RNN	Pers.	RNN	Pers.	RNN
Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+1								
Μαϊ-77	0.56	0.79	0.92	0.95	0.47	0.32	0.09	0.02
Ιουν-77	0.96	0.95	0.98	0.98	0.15	0.17	0.08	0.04
Απρ-90	0.64	0.92	0.95	0.97	0.48	0.23	0.34	0.26
Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+2								
Μαϊ-77	0.17	0.66	0.84	0.90	0.64	0.41	0.09	0.04
Ιουν-77	0.52	0.69	0.88	0.92	0.52	0.42	0.17	0.01
Απρ-90	0.01	0.64	0.90	0.89	0.79	0.48	0.65	0.48
Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+3								
Μαϊ-77	-0.74	0.44	0.82	0.87	0.93	0.53	0.49	0.74
Ιουν-77	0.17	0.60	0.80	0.87	0.68	0.48	0.16	0.20
Απρ-90	-0.78	0.15	0.81	0.86	1.06	0.73	0.85	0.76

Πίνακας 9.11. Στατιστικά χαρακτηριστικά των μηνών του SPI-9 επιλέχθηκαν για θεματική απεικόνιση των προγνώσεων της υβριδικής μεθόδου RNN στους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.

Μήνας	Αριθμός Σταθμών Ανάπτυξης με SPI ≤ -1	Μέση Δριμύτητα SPI Σταθμών Ανάπτυξης	Τυπική απόκλιση SPI Σταθμών Ανάπτυξης	Αριθμός Σταθμών Πιστοποίησης με SPI ≤ -1	Μέση Δριμύτητα SPI Σταθμών Πιστοποίησης	Τυπική απόκλιση SPI Σταθμών Πιστοποίησης
Παρατηρούμενο SPI-9μηνών, SPI-9						
Μαϊ-77	42	-1.59	0.71	15	-1.41	0.64
Ιουν-77	40	-1.59	0.76	15	-1.45	0.77
Απρ-90	44	-2.17	0.80	16	-2.01	0.59
Πρόγνωση με τη μέθοδο RNN του SPI-9μηνών, SPI-9 _{t+1}						
Μαϊ-77	34	-1.37	0.66	11	-1.15	0.56
Ιουν-77	40	-1.60	0.77	15	-1.38	0.71
Απρ-90	43	-2.07	0.82	15	-1.79	0.76
Πρόγνωση με τη μέθοδο RNN του SPI-9μηνών, SPI-9 _{t+2}						
Μαϊ-77	30	-1.33	0.68	14	-1.12	0.56
Ιουν-77	28	-1.30	0.71	10	-1.14	0.64
Απρ-90	42	-1.89	0.82	16	-1.74	0.70
Πρόγνωση με τη μέθοδο RNN του SPI-9μηνών, SPI-9 _{t+3}						
Μαϊ-77	28	-1.22	0.77	8	-0.87	0.58
Ιουν-77	31	-1.31	0.75	14	-1.18	0.63
Απρ-90	38	-1.56	0.68	14	-1.30	0.63



Σχήμα 9.4. Σύγκριση παραγόμενων ψηφιακών χαρτών του SPI-9 που δημιουργήθηκαν με το σύστημα πρόγνωσης και παρακολούθησης της ξηρασίας.

Πίνακας 9.12. Στατιστικά και χωρικά χαρακτηριστικά ψηφιακών χαρτών παρατηρημένων γεγονότων ξηρασίας και προγνώσεων με τη μέθοδο RNN του δείκτη ξηρασίας SPI-9.

	Obs SPI-9	RNN SPI-9 _{t+1}	RNN SPI-9 _{t+2}	RNN SPI-9 _{t+3}
Μάιος 1977				
Μέγιστη δριμύτητα SPI	-2.70	-2.31	-2.31	-2.40
Ελάχιστη δριμύτητα SPI	0.40	0.60	0.10	0.60
Μέση δριμύτητα SPI	-1.68	-1.43	-1.41	-1.33
Τυπική απόκλιση SPI	0.50	0.44	0.40	0.53
Έκταση με ακραία ξηρασία (%)	34.47	8.10	8.90	15.63
Έκταση με δριμεία ξηρασία (%)	36.18	46.62	35.22	25.56
Έκταση με μέτρια ξηρασία (%)	23.02	34.18	44.77	34.04
Έκταση χωρίς ξηρασία (%)	6.33	11.10	11.10	24.77
Συνολική έκταση με ξηρασία (%)	93.67	88.90	88.90	75.23
Ιούνιος 1977				
Μέγιστη δριμύτητα SPI	-2.90	-2.81	-2.31	-2.31
Ελάχιστη δριμύτητα SPI	0.50	0.70	0.40	0.40
Μέση δριμύτητα SPI	-1.72	-1.71	-1.43	-1.40
Τυπική απόκλιση SPI	0.51	0.52	0.44	0.44
Έκταση με ακραία ξηρασία (%)	36.66	38.91	6.82	4.24
Έκταση με δριμεία ξηρασία (%)	36.50	34.85	50.97	47.68
Έκταση με μέτρια ξηρασία (%)	19.50	17.69	26.24	32.81
Έκταση χωρίς ξηρασία (%)	7.34	8.55	15.96	15.27
Συνολική έκταση με ξηρασία (%)	92.66	91.45	84.04	84.73
Απρίλιος 1990				
Μέγιστη δριμύτητα SPI	-3.30	-3.10	-3.00	-2.40
Ελάχιστη δριμύτητα SPI	-1.30	-1.08	-0.90	-0.90
Μέση δριμύτητα SPI	-2.10	-2.01	-1.81	-1.51
Τυπική απόκλιση SPI	0.39	0.40	0.38	0.23
Έκταση με ακραία ξηρασία (%)	64.32	50.00	37.98	2.65
Έκταση με δριμεία ξηρασία (%)	31.23	42.04	43.98	60.14
Έκταση με μέτρια ξηρασία (%)	4.45	7.96	17.86	36.46
Έκταση χωρίς ξηρασία (%)	0.00	0.00	0.18	0.75
Συνολική έκταση με ξηρασία (%)	100.00	100.00	99.82	99.25

9.2.4. Αξιολόγηση προγνώσεων SPI-12μηνών

Η υβριδική χωροχρονική μέθοδος RNN μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αξιόπιστες και επιχειρησιακές προγνώσεις του SPI-12 μέχρι και τέσσερις μήνες μπροστά (SPI-12_{t+4}). Τα αποτελέσματα των στατιστικών κριτηρίων (Eff, r, RMSE και MAE) της υβριδικής μεθόδου RNN και του μοντέλου εμμονής (Persistence model) ως χωρικές μέθοδοι πρόγνωσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 9.13 για όλη την περίοδο της ανάλυσης των 48 σταθμών ανάπτυξης. Τα ποσοτικά χωρικά στατιστικά κριτήρια των δύο μεθόδων πρόγνωσης αξιολογήθηκαν και ποιοτικά σε μηνιαία κλίμακα. Έτσι υπολογίστηκε το ποσοστό του αριθμού των μηνών που μία από τις δύο μεθόδους υπερτερεί από την άλλη με βάση το εξεταζόμενο στατιστικό κριτήριο. Για παράδειγμα, για τον βαθμό απόδοσης Eff, η RNN υπερτερεί χωρικά 345, 378, 394 και 406 φορές από τη μέθοδο Persistence για βήματα πρόγνωσης t+1, t+2, t+3, και t+4, αντίστοιχα, του συνόλου των 470 μηνών χωρικής ανάλυσης στους σταθμούς ανάπτυξης. Παραπλήσια είναι η απόδοση της μεθόδου RNN και για τα άλλα στατιστικά κριτήρια (R, RMSE και MAE) στους σταθμούς ανάπτυξης (Πίνακας 9.13).

Πίνακας 9.13. Στατιστικά κριτήρια εκτίμησης μεθόδων πρόγνωσης για χωρική παρεμβολή των προγνώσεων του SPI-12 στους σταθμούς της περιόδου Οκτ 1962 – Σεπ 2002.

	Eff		R		RMSE		MAE	
	Pers.	RNN	Pers.	RNN	Pers.	RNN	Pers.	RNN
Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+1 - Σταθμοί ανάπτυξης								
Μέση τιμή	0.68	0.86	0.94	0.96	0.31	0.22	0.18	0.14
Διάμεσος	0.83	0.90	0.96	0.96	0.27	0.20	0.14	0.11
Μέγιστη	0.99	0.99	1.00	1.00	1.04	0.63	0.97	0.80
Ελάχιστη	-2.31	-0.38	0.43	0.59	0.04	0.10	0.00	0.00
% χωρική υπεροχή	26.60	73.40	40.00	60.00	26.60	73.40	40.64	59.36
Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+2 - Σταθμοί ανάπτυξης								
Μέση τιμή	0.34	0.73	0.87	0.91	0.46	0.31	0.28	0.20
Διάμεσος	0.62	0.79	0.91	0.92	0.41	0.29	0.22	0.17
Μέγιστη	0.99	0.98	0.99	0.99	1.34	0.77	1.12	0.97
Ελάχιστη	-6.15	-1.66	0.08	0.62	0.08	0.11	0.00	0.00
% χωρική υπεροχή	19.57	80.43	36.17	63.83	19.57	80.43	38.72	61.28
Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+3 - Σταθμοί ανάπτυξης								
Μέση τιμή	0.00	0.60	0.81	0.87	0.57	0.38	0.36	0.26
Διάμεσος	0.37	0.69	0.84	0.88	0.52	0.36	0.32	0.20
Μέγιστη	0.96	0.97	0.99	0.98	1.81	0.86	1.58	1.48
Ελάχιστη	-10.02	-0.99	0.12	0.52	0.16	0.16	0.00	0.00
% χωρική υπεροχή	16.17	83.83	32.13	67.87	16.17	83.83	39.15	60.85
Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+4 - Σταθμοί ανάπτυξης								
Μέση τιμή	-0.40	0.47	0.74	0.82	0.67	0.44	0.45	0.29
Διάμεσος	0.13	0.57	0.78	0.84	0.60	0.42	0.37	0.25
Μέγιστη	0.95	0.93	0.98	0.97	2.14	1.04	1.74	1.66
Ελάχιστη	-20.62	-0.96	0.05	0.37	0.20	0.21	0.00	0.00
% χωρική υπεροχή	13.62	86.38	26.38	73.62	13.62	86.38	34.47	65.53

Ιστορικά ακραία και δριμύ γεγονότα ξηρασίας επιλέχθηκαν για τη θεματική απεικόνιση του SPI-12. Ο Πίνακας 9.14 παρουσιάζει τα στατιστικά αποτελέσματα των μεθόδων πρόγνωσης για χωρική παρεμβολή των επιλεγμένων μηνών του SPI-12 για χρονικά βήματα πρόγνωσης έως τέσσερις (4) μήνες μπροστά στους 48 σταθμούς ανάπτυξης. Στα επιλεγμένα επεισόδια ξηρασίας η μέθοδος RNN παρουσιάζεται και πάλι χωρικά καλύτερη από την Persistence στους σταθμούς ανάπτυξης (Πίνακας 9.14). Έτσι η χωρική μέθοδος SKIm_R εφαρμόστηκε στις προγνώσεις της RNN μεθόδου για την δημιουργία ψηφιακών προγνωστικών χαρτών ξηρασίας με μέγεθος φατνίου 1-km. Ο Πίνακας 9.15 παρουσιάζει τα στατιστικά χαρακτηριστικά των μηνών του SPI-12 που επιλέχθηκαν για τη θεματική απεικόνιση της υβριδικής μεθόδου και παρατηρείται ότι γενικά οι προγνώσεις του SPI-12 εκτιμούν ικανοποιητικά τη δριμύτητα και τον αριθμό των σταθμών που πλήττονται από ξηρασία για χρονικά βήματα πρόγνωσης t+1, t+2 και t+3. Για το χρονικό βήμα πρόγνωσης t+4 μία αναμενόμενη υποεκτίμηση της δριμύτητας εμφανίζεται (Πίνακας 9.15). Τα στατιστικά χαρακτηριστικά των προγνωστικών και παρατηρούμενων χαρτών ξηρασίας του SPI-12 παρουσιάζονται στον Πίνακα 9.16 και η χωρική κατανομή των χαρτών στο Σχήμα 9.5 από όπου αποδεικνύεται ότι η μέθοδος RNN εκτιμά πολύ ικανοποιητικά τη δριμύτητα και την έκταση της υδρολογικής λεκάνης που πλήττονται από την ξηρασία για χρονικά βήματα πρόγνωσης έως τρεις μήνες μπροστά και υποεκτιμά ελαφρώς τη δριμύτητα και την έκταση της ξηρασίας για χρονικό βήμα πρόγνωσης τέσσερις μήνες.

Πίνακας 9.14. Στατιστικά κριτήρια εκτίμησης μεθόδων πρόγνωσης για χωρική παρεμβολή των επιλεγμένων γεγονότων ξηρασίας του SPI-12 στους σταθμούς ανάπτυξης.

	Eff		R		RMSE		MAE	
	Pers.	RNN	Pers.	RNN	Pers.	RNN	Pers.	RNN
Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+1								
Σεπ-77	0.89	0.94	0.97	0.97	0.26	0.20	0.09	0.23
Οκτ-77	0.85	0.89	0.96	0.96	0.28	0.24	0.25	0.36
Νοε-77	0.83	0.87	0.96	0.96	0.33	0.28	0.40	0.20
Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+2								
Σεπ-77	0.82	0.88	0.91	0.95	0.34	0.28	0.02	0.07
Οκτ-77	0.92	0.91	0.96	0.96	0.20	0.21	0.16	0.00
Νοε-77	0.62	0.71	0.95	0.91	0.48	0.42	0.66	0.39
Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+3								
Σεπ-77	0.67	0.78	0.86	0.92	0.46	0.37	0.06	0.29
Οκτ-77	0.71	0.72	0.90	0.91	0.39	0.39	0.27	0.25
Νοε-77	0.79	0.79	0.93	0.93	0.36	0.36	0.56	0.49
Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+4								
Σεπ-77	0.59	0.62	0.84	0.89	0.51	0.49	0.28	0.44
Οκτ-77	0.42	0.65	0.85	0.88	0.54	0.42	0.31	0.05
Νοε-77	0.38	0.61	0.86	0.89	0.61	0.49	0.67	0.36

Πίνακας 9.15. Στατιστικά χαρακτηριστικά των μηνών του SPI-12 επιλέχτηκαν για θεματική απεικόνιση των προγνώσεων της υβριδικής μεθόδου RNN στους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.

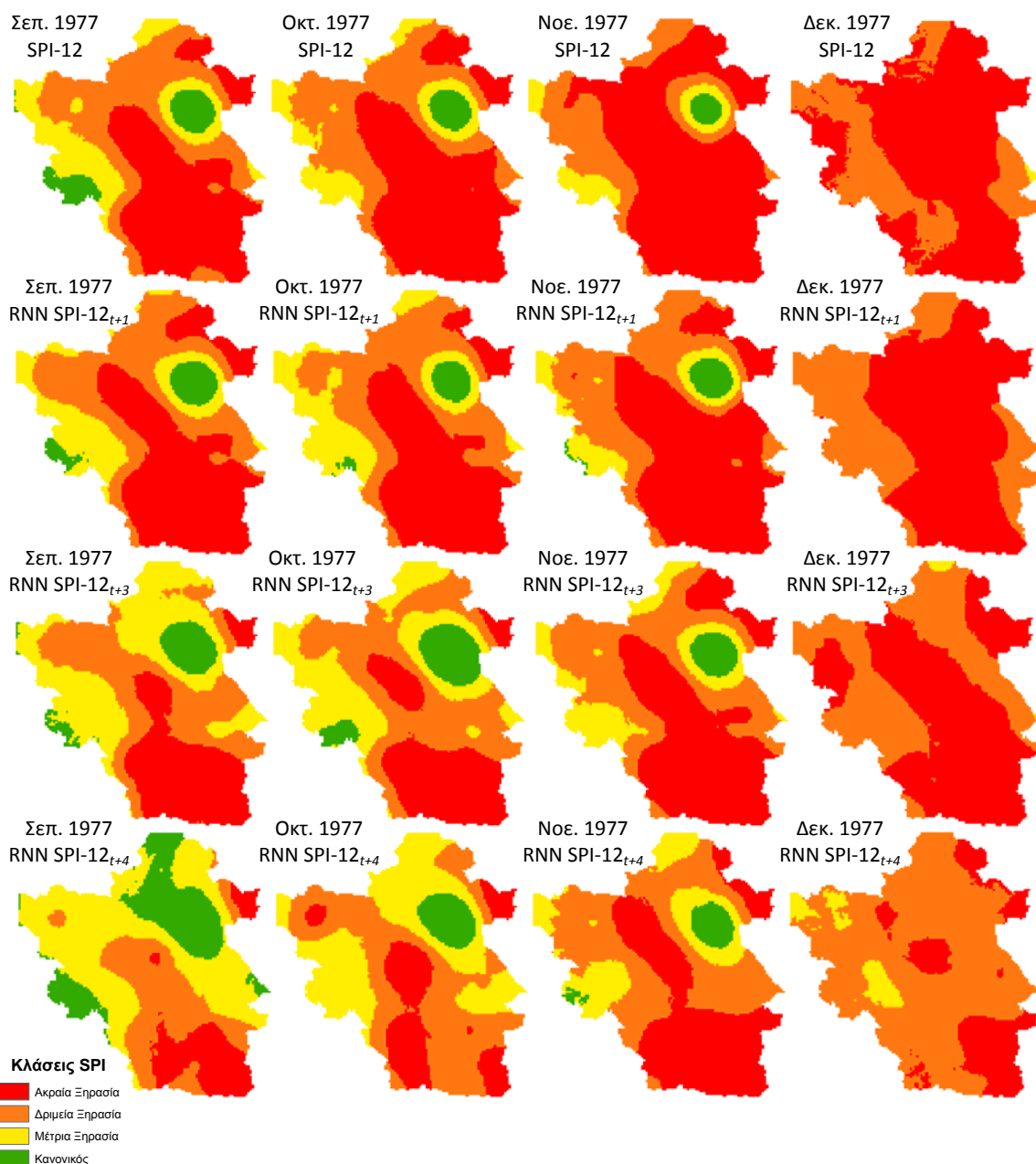
Μήνας	Αριθμός Σταθμών Ανάπτυξης με $SPI \leq -1$	Μέση Δριμύτητα SPI Σταθμών Ανάπτυξης	Τυπική απόκλιση SPI Σταθμών Ανάπτυξης	Αριθμός Σταθμών Πιστοποίησης με $SPI \leq -1$	Μέση Δριμύτητα SPI Σταθμών Πιστοποίησης	Τυπική απόκλιση SPI Σταθμών Πιστοποίησης
Παρατηρούμενο SPI-12 μηνών, SPI-12						
Σεπ-77	36	-1.62	0.80	16	-1.49	0.74
Οκτ-77	44	-1.79	0.72	16	-1.69	0.76
Νοε-77	45	-2.02	0.79	17	-1.88	0.76
Δεκ-77	47	-2.00	0.50	17	-2.01	0.63
Πρόγνωση με τη μέθοδο RNN του SPI-12 μηνών, SPI-12 _{t+1}						
Σεπ-77	36	-1.67	0.75	16	-1.55	0.74
Οκτ-77	42	-1.71	0.78	16	-1.62	0.73
Νοε-77	43	-1.85	0.80	17	-1.76	0.71
Δεκ-77	47	-1.92	0.46	17	-1.87	0.59
Πρόγνωση με τη μέθοδο RNN του SPI-12 μηνών, SPI-12 _{t+2}						
Σεπ-77	36	-1.51	0.75	12	-1.31	0.74
Οκτ-77	45	-1.71	0.70	14	-1.55	0.77
Νοε-77	44	-1.90	0.75	16	-1.79	0.66
Δεκ-77	46	-1.93	0.54	17	-1.80	0.60
Πρόγνωση με τη μέθοδο RNN του SPI-12 μηνών, SPI-12 _{t+3}						
Σεπ-77	33	-1.41	0.71	11	-1.12	0.73
Οκτ-77	37	-1.54	0.71	13	-1.45	0.75
Νοε-77	43	-1.79	0.74	17	-1.67	0.77
Δεκ-77	46	-1.72	0.51	16	-1.65	0.58
Πρόγνωση με τη μέθοδο RNN του SPI-12 μηνών, SPI-12 _{t+4}						
Σεπ-77	32	-1.28	0.78	10	-1.25	0.91
Οκτ-77	39	-1.55	0.71	11	-1.28	0.74
Νοε-77	40	-1.69	0.72	13	-1.52	0.82
Δεκ-77	46	-1.74	0.49	15	-1.63	0.62

Πίνακας 9.16. Στατιστικά και χωρικά χαρακτηριστικά ψηφιακών χαρτών παρατηρημένων γεγονότων ξηρασίας και προγνώσεων με τη μέθοδο RNN του δείκτη ξηρασίας SPI-12.

	Obs SPI-12	RNN SPI- 12 _{t+1}	RNN SPI- 12 _{t+2}	RNN SPI- 12 _{t+3}	RNN SPI- 12 _{t+4}
Σεπτέμβριος 1977					
Μέγιστη δριμύτητα SPI	-3.10	-3.01	-2.90	-2.80	-3.00
Ελάχιστη δριμύτητα SPI	0.20	0.20	0.20	0.60	0.30
Μέση δριμύτητα SPI	-1.77	-1.81	-1.60	-1.57	-1.35
Τυπική απόκλιση SPI	0.51	0.51	0.48	0.49	0.47
Έκταση με ακραία ξηρασία (%)	41.31	43.83	27.09	26.05	13.90
Έκταση με δριμεία ξηρασία (%)	33.62	33.39	31.63	26.83	24.27
Έκταση με μέτρια ξηρασία (%)	18.16	17.33	34.39	27.39	42.31
Έκταση χωρίς ξηρασία (%)	6.91	5.46	6.90	19.73	19.52
Συνολική έκταση με ξηρασία (%)	93.09	94.54	93.10	80.27	80.48
Οκτώβριος 1977					
Μέγιστη δριμύτητα SPI	-3.10	-3.20	-2.90	-2.90	-3.10
Ελάχιστη δριμύτητα SPI	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20
Μέση δριμύτητα SPI	-1.90	-1.82	-1.82	-1.67	-1.57
Τυπική απόκλιση SPI	0.47	0.49	0.46	0.49	0.43
Έκταση με ακραία ξηρασία (%)	49.60	42.22	44.73	26.05	18.39
Έκταση με δριμεία ξηρασία (%)	33.09	34.73	35.30	37.51	40.57
Έκταση με μέτρια ξηρασία (%)	12.93	19.45	15.89	27.39	35.19
Έκταση χωρίς ξηρασία (%)	4.38	3.60	4.09	9.05	5.85
Συνολική έκταση με ξηρασία (%)	95.62	96.40	95.91	90.95	94.15
Νοέμβριος 1977					
Μέγιστη δριμύτητα SPI	-3.50	-3.40	-3.10	-3.00	-3.00
Ελάχιστη δριμύτητα SPI	-0.10	0.30	0.10	0.10	-0.10
Μέση δριμύτητα SPI	-2.18	-2.05	-1.97	-1.84	-1.79
Τυπική απόκλιση SPI	0.52	0.54	0.46	0.46	0.46
Έκταση με ακραία ξηρασία (%)	67.42	54.69	49.83	44.73	37.35
Έκταση με δριμεία ξηρασία (%)	23.18	32.35	34.85	35.30	40.96
Έκταση με μέτρια ξηρασία (%)	7.47	9.30	11.32	15.89	17.38
Έκταση χωρίς ξηρασία (%)	1.92	3.66	4.00	4.09	4.31
Συνολική έκταση με ξηρασία (%)	98.08	96.34	96.00	95.91	95.69
Δεκέμβριος 1977					
Μέγιστη δριμύτητα SPI	-2.80	-2.50	-2.80	-2.60	-2.50
Ελάχιστη δριμύτητα SPI	-1.30	-1.40	-1.30	-1.30	-1.30
Μέση δριμύτητα SPI	-2.06	-2.01	-2.00	-1.93	-1.79
Τυπική απόκλιση SPI	0.19	0.19	0.24	0.24	0.20
Έκταση με ακραία ξηρασία (%)	68.87	64.50	58.51	52.28	19.70
Έκταση με δριμεία ξηρασία (%)	30.82	35.47	40.85	43.87	74.72
Έκταση με μέτρια ξηρασία (%)	0.31	0.03	0.64	3.84	5.58
Έκταση χωρίς ξηρασία (%)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Συνολική έκταση με ξηρασία (%)	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

9.2.5. Αξιολόγηση προγνώσεων SPI-24μηνών

Η υβριδική χωροχρονική μέθοδος RNN μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αξιόπιστες και επιχειρησιακές προγνώσεις του SPI-24 μέχρι και έξι μήνες μπροστά (SPI-24_{t+6}). Τα αποτελέσματα των στατιστικών κριτηρίων (Eff, r, RMSE και MAE) της υβριδικής μεθόδου RNN και του μοντέλου εμμονής ως χωρικές μέθοδοι πρόγνωσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 9.17 για όλη την περίοδο της ανάλυσης των 48 σταθμών ανάπτυξης.



Σχήμα 9.5. Σύγκριση παραγόμενων και προγνωστικών ψηφιακών χαρτών του SPI-12 που δημιουργήθηκαν με το σύστημα πρόγνωσης και παρακολούθησης της ξηρασίας για χρονικά βήματα πρόγνωσης $t+1$, $t+3$ και $t+4$.

Τα ποσοτικά χωρικά στατιστικά κριτήρια των δύο μεθόδων πρόγνωσης αξιολογήθηκαν και ποιοτικά σε μηνιαία κλίμακα. Έτσι υπολογίστηκε το ποσοστό του αριθμού των μηνών που μία από τις δύο μεθόδους υπερτερεί από την άλλη με βάση το εξεταζόμενο στατιστικό κριτήριο. Για παράδειγμα, για τον βαθμό απόδοσης Eff, η RNN υπερτερεί χωρικά 295, 331, 365, 379, 392 και 389 φορές από τη μέθοδο Persistence για βήματα πρόγνωσης $t+1$, $t+2$, $t+3$, $t+4$, $t+5$, και $t+6$, αντίστοιχα, του συνόλου των 461 μηνών χωρικής ανάλυσης στους σταθμούς ανάπτυξης. Παραπλήσια είναι η απόδοση της μεθόδου RNN και για τα άλλα στατιστικά κριτήρια (R, RMSE και MAE) στους σταθμούς ανάπτυξης (Πίνακας 9.17).

Πίνακας 9.17. Στατιστικά κριτήρια εκτίμησης μεθόδων πρόγνωσης για χωρική παρεμβολή των προγνώσεων του SPI-24 στους σταθμούς ανάπτυξης της περιόδου Οκτ 1962 – Σεπ 2002.

	Eff		R		RMSE		MAE	
	Pers.	RNN	Pers.	RNN	Pers.	RNN	Pers.	RNN
Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+1 - Σταθμοί ανάπτυξης								
Μέση τιμή	0.86	0.92	0.97	0.97	0.21	0.17	0.11	0.09
Διάμεσος	0.93	0.94	0.98	0.98	0.18	0.16	0.08	0.07
Μέγιστη	1.00	0.99	1.00	1.00	0.78	0.49	0.76	0.67
Ελάχιστη	-2.02	-0.22	0.78	0.86	0.04	0.08	0.00	0.00
% χωρική υπεροχή	36.01	63.99	57.92	42.08	36.01	63.99	42.08	57.92
Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+2 - Σταθμοί ανάπτυξης								
Μέση τιμή	0.71	0.84	0.94	0.95	0.31	0.25	0.17	0.14
Διάμεσος	0.83	0.88	0.96	0.96	0.29	0.24	0.13	0.11
Μέγιστη	0.99	0.98	1.00	0.99	1.06	0.60	0.93	0.84
Ελάχιστη	-4.58	-0.81	0.70	0.75	0.04	0.11	0.00	0.00
% χωρική υπεροχή	28.20	71.80	51.63	48.37	28.20	71.80	41.00	59.00
Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+3 - Σταθμοί ανάπτυξης								
Μέση τιμή	0.57	0.78	0.91	0.92	0.39	0.30	0.23	0.17
Διάμεσος	0.73	0.82	0.93	0.93	0.36	0.28	0.18	0.13
Μέγιστη	1.00	0.98	1.00	0.99	1.05	0.64	1.29	1.01
Ελάχιστη	-3.10	-0.50	0.66	0.76	0.00	0.14	0.00	0.00
% χωρική υπεροχή	20.82	79.18	44.03	55.97	20.82	79.18	39.48	60.52
Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+4 - Σταθμοί ανάπτυξης								
Μέση τιμή	0.41	0.72	0.88	0.92	0.46	0.32	0.29	0.20
Διάμεσος	0.62	0.75	0.90	0.93	0.42	0.30	0.24	0.17
Μέγιστη	0.97	0.97	0.99	0.99	1.44	0.68	1.46	1.21
Ελάχιστη	-3.75	-0.60	0.49	0.76	0.11	0.16	0.00	0.00
% χωρική υπεροχή	17.78	82.22	38.66	61.34	17.78	82.22	38.10	61.90
Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+5 - Σταθμοί ανάπτυξης								
Μέση τιμή	0.24	0.66	0.85	0.88	0.52	0.37	0.34	0.26
Διάμεσος	0.50	0.71	0.87	0.89	0.47	0.36	0.28	0.21
Μέγιστη	0.96	0.95	0.98	0.98	1.43	0.75	1.57	1.39
Ελάχιστη	-6.98	-0.91	0.49	0.68	0.13	0.19	0.00	0.00
% χωρική υπεροχή	14.97	85.03	33.62	66.38	14.97	85.03	37.09	62.91
Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+6 - Σταθμοί ανάπτυξης								
Μέση τιμή	0.09	0.60	0.82	0.86	0.57	0.40	0.39	0.27
Διάμεσος	0.39	0.66	0.84	0.86	0.52	0.38	0.35	0.22
Μέγιστη	0.94	0.94	0.98	0.98	1.61	0.88	1.81	1.67
Ελάχιστη	-9.23	-1.32	0.43	0.58	0.18	0.22	0.00	0.00
% χωρική υπεροχή	15.62	84.38	31.45	68.55	15.62	84.38	36.88	63.12

Ιστορικά ακραία και δριμύ γεγονότα ξηρασίας επιλέχθηκαν για τη θεματική απεικόνιση του SPI-24. Ο Πίνακας 9.18 παρουσιάζει τα στατιστικά αποτελέσματα των μεθόδων πρόγνωσης για χωρική παρεμβολή των επιλεγμένων μηνών του SPI-24 για χρονικά βήματα πρόγνωσης έως έξι (6) μήνες μπροστά στους 48 σταθμούς ανάπτυξης. Στα επιλεγμένα επεισόδια ξηρασίας η μέθοδος RNN παρουσιάζεται και πάλι χωρικά καλύτερη από την Persistence στους σταθμούς ανάπτυξης (Πίνακας 9.18). Έτσι η χωρική μέθοδος SKIm_R εφαρμόστηκε στις προγνώσεις της RNN μεθόδου για την δημιουργία ψηφιακών προγνωστικών χαρτών ξηρασίας με μέγεθος φατνίου 1-km. Ο Πίνακας 9.19 παρουσιάζει τα στατιστικά χαρακτηριστικά των μηνών του SPI-24 που επιλέχθηκαν για τη θεματική απεικόνιση της υβριδικής μεθόδου και παρατηρείται ότι γενικά οι προγνώσεις του SPI-24 εκτιμούν ικανοποιητικά τη δριμύτητα και τον αριθμό των σταθμών που πλήττονται από ξηρασία για τα έξι χρονικά βήματα πρόγνωσης. Μία αναμενόμενη υποεκτίμηση της δριμύτητας εμφανίζεται σε μεγάλα χρονικά διαστήματα πρόγνωσης (Πίνακας 9.18). Τα στατιστικά χαρακτηριστικά των προγνωστικών και παρατηρούμενων χαρτών ξηρασίας του SPI-24 παρουσιάζονται στον Πίνακα 9.19 και η χωρική

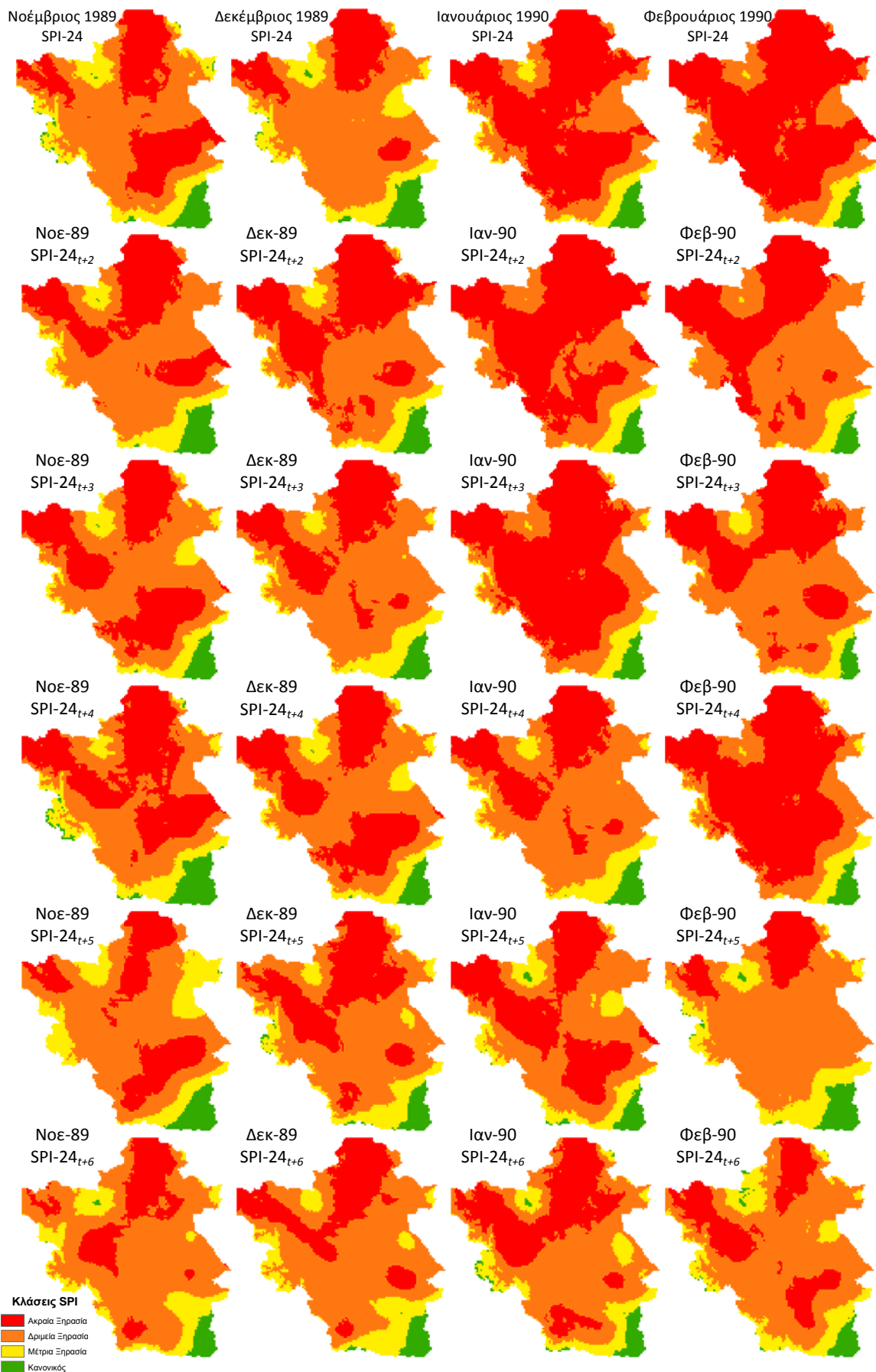
κατανομή των χαρτών στο Σχήμα 9.6 από όπου αποδεικνύεται ότι η μέθοδος RNN εκτιμά πολύ ικανοποιητικά τη δριμύτητα και την έκταση της υδρολογικής λεκάνης που πλήττονται από την ξηρασία για χρονικά βήματα πρόγνωσης έως πέντε μήνες μπροστά και υποεκτιμά ελαφρώς τη δριμύτητα της ξηρασίας για χρονικό βήμα πρόγνωσης έξι μηνών.

Πίνακας 9.18. Στατιστικά κριτήρια εκτίμησης μεθόδων πρόγνωσης για χωρική παρεμβολή των επιλεγμένων γεγονότων ξηρασίας του SPI-24 στους σταθμούς ανάπτυξης.

	Eff		R		RMSE		MAE	
	Pers.	RNN	Pers.	RNN	Pers.	RNN	Pers.	RNN
Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+1								
Νοε-89	0.89	0.92	0.99	0.98	0.26	0.22	0.46	0.23
Δεκ-89	0.93	0.95	0.96	0.97	0.21	0.18	0.02	0.03
Ιαν-90	0.83	0.94	0.98	0.98	0.33	0.20	0.40	0.25
Φεβ-90	0.95	0.95	0.99	0.98	0.17	0.16	0.24	0.19
Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+2								
Νοε-89	0.67	0.74	0.96	0.95	0.44	0.39	0.61	0.38
Δεκ-89	0.84	0.87	0.95	0.95	0.32	0.29	0.44	0.22
Ιαν-90	0.75	0.85	0.93	0.95	0.40	0.31	0.38	0.30
Φεβ-90	0.66	0.80	0.96	0.96	0.45	0.35	0.64	0.36
Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+3								
Νοε-89	0.61	0.79	0.96	0.95	0.48	0.35	0.65	0.40
Δεκ-89	0.64	0.77	0.93	0.93	0.47	0.38	0.59	0.36
Ιαν-90	0.44	0.73	0.90	0.91	0.60	0.42	0.84	0.30
Φεβ-90	0.58	0.79	0.91	0.95	0.51	0.35	0.62	0.12
Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+4								
Νοε-89	0.49	0.79	0.95	0.95	0.55	0.35	0.65	0.40
Δεκ-89	0.60	0.77	0.93	0.93	0.49	0.38	0.63	0.36
Ιαν-90	0.10	0.73	0.88	0.91	0.76	0.42	0.99	0.30
Φεβ-90	0.17	0.79	0.88	0.95	0.71	0.35	1.08	0.12
Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+5								
Νοε-89	0.03	0.49	0.89	0.86	0.78	0.57	1.03	0.54
Δεκ-89	-0.24	0.54	0.87	0.88	0.86	0.53	1.23	0.67
Ιαν-90	-0.14	0.35	0.83	0.83	0.80	0.61	1.26	0.98
Φεβ-90	0.29	0.55	0.87	0.90	0.64	0.51	0.91	0.46
Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+6								
Νοε-89	-0.31	0.48	0.88	0.85	0.89	0.56	1.27	0.69
Δεκ-89	-0.61	0.46	0.82	0.87	0.96	0.56	1.41	0.90
Ιαν-90	-0.26	0.39	0.83	0.87	0.85	0.59	1.37	0.76
Φεβ-90	0.54	0.63	0.82	0.85	0.50	0.45	0.75	0.12

Πίνακας 9.19. Στατιστικά χαρακτηριστικά των μηνών του SPI-24 επιλέχθηκαν για θεματική απεικόνιση των προγνώσεων της υβριδικής μεθόδου RNN στους σταθμούς ανάπτυξης και πιστοποίησης.

Μήνας	Αριθμός Σταθμών Ανάπτυξης με $SPI \leq -1$	Μέση Δριμύτητα SPI Σταθμών Ανάπτυξης	Τυπική απόκλιση SPI Σταθμών Ανάπτυξης	Αριθμός Σταθμών Πιστοποίησης με $SPI \leq -1$	Μέση Δριμύτητα SPI Σταθμών Πιστοποίησης	Τυπική απόκλιση SPI Σταθμών Πιστοποίησης
Παρατηρούμενο SPI-24μηνών, SPI-24						
Νοε-89	42	-1.64	0.78	15	-1.73	0.80
Δεκ-89	42	-1.61	0.79	15	-1.65	0.77
Ιαν-90	43	-1.90	0.81	17	-1.90	0.72
Φεβ-90	44	-2.01	0.79	17	-2.01	0.67
Πρόγνωση με τη μέθοδο RNN του SPI-24μηνών, SPI-24 _{t+1}						
Νοε-89	44	-1.94	0.81	17	-1.94	0.69
Δεκ-89	44	-1.98	0.76	17	-1.94	0.61
Ιαν-90	44	-2.06	0.76	17	-2.03	0.70
Φεβ-90	44	-2.01	0.69	17	-2.03	0.65
Πρόγνωση με τη μέθοδο RNN του SPI-24μηνών, SPI-24 _{t+2}						
Νοε-89	44	-1.75	0.79	17	-1.80	0.68
Δεκ-89	44	-1.86	0.77	17	-1.81	0.68
Ιαν-90	44	-1.96	0.77	17	-1.97	0.64
Φεβ-90	42	-1.91	0.73	17	-1.85	0.68
Πρόγνωση με τη μέθοδο RNN του SPI-24μηνών, SPI-24 _{t+3}						
Νοε-89	43	-1.77	0.76	16	-1.86	0.70
Δεκ-89	42	-1.75	0.78	17	-1.72	0.62
Ιαν-90	44	-1.93	0.74	16	-1.90	0.73
Φεβ-90	43	-1.85	0.73	17	-1.77	0.61
Πρόγνωση με τη μέθοδο RNN του SPI-24μηνών, SPI-24 _{t+4}						
Νοε-89	41	-1.65	0.82	14	-1.57	0.89
Δεκ-89	43	-1.77	0.76	16	-1.86	0.70
Ιαν-90	42	-1.75	0.78	17	-1.72	0.62
Φεβ-90	44	-1.93	0.74	16	-1.90	0.73
Πρόγνωση με τη μέθοδο RNN του SPI-24μηνών, SPI-24 _{t+5}						
Νοε-89	40	-1.64	0.73	16	-1.66	0.64
Δεκ-89	41	-1.68	0.79	14	-1.70	0.80
Ιαν-90	42	-1.76	0.77	16	-1.87	0.79
Φεβ-90	41	-1.59	0.71	15	-1.60	0.80
Πρόγνωση με τη μέθοδο RNN του SPI-24μηνών, SPI-24 _{t+6}						
Νοε-89	42	-1.63	0.71	16	-1.58	0.68
Δεκ-89	43	-1.68	0.72	15	-1.70	0.70
Ιαν-90	42	-1.69	0.79	15	-1.76	0.81
Φεβ-90	41	-1.64	0.72	15	-1.70	0.68



Σχήμα 9.6. Σύγκριση παρατηρημένων και προγνωστικών ψηφιακών χαρτών του SPI-24 για χρονικά βήματα πρόγνωσης t+2, t+3, t+4, t+5 και t+6.

Πίνακας 9.20. Στατιστικά και χωρικά χαρακτηριστικά ψηφιακών χαρτών παρατηρημένων γεγονότων ξηρασίας και προγνώσεων με τη μέθοδο RNN του δείκτη ξηρασίας SPI-24.

	Obs SPI-24	SPI- 24 _{t+1}	SPI- 24 _{t+2}	SPI- 24 _{t+3}	SPI- 24 _{t+4}	SPI- 24 _{t+5}	SPI- 24 _{t+6}
Νοέμβριος 1989							
Μέγιστη δριμύτητα SPI	-2.60	-2.90	-2.70	-2.60	-2.70	-2.60	-2.50
Ελάχιστη δριμύτητα SPI	0.50	0.50	0.20	0.30	0.70	0.30	-0.10
Μέση δριμύτητα SPI	-1.75	-2.00	-1.80	-1.81	-1.78	-1.69	-1.69
Τυπική απόκλιση SPI	0.43	0.46	0.44	0.40	0.49	0.41	0.33
Έκταση με ακραία ξηρασία (%)	31.38	67.46	32.60	38.36	40.89	24.60	19.80
Έκταση με δριμεία ξηρασία (%)	49.50	23.00	51.59	46.84	39.66	52.73	61.83
Έκταση με μέτρια ξηρασία (%)	14.66	6.19	10.87	11.45	12.69	18.02	15.41
Έκταση χωρίς ξηρασία (%)	4.46	3.35	4.94	3.35	6.75	4.64	2.97
Συνολική έκταση με ξηρασία (%)	95.54	96.65	95.06	96.65	93.25	95.36	97.03
Δεκέμβριος 1989							
Μέγιστη δριμύτητα SPI	-2.70	-2.80	-2.80	-2.80	-2.60	-2.70	-2.50
Ελάχιστη δριμύτητα SPI	0.50	-0.10	0.30	0.10	0.30	0.20	-0.20
Μέση δριμύτητα SPI	-1.67	-1.99	-1.89	-1.79	-1.81	-1.77	-1.72
Τυπική απόκλιση SPI	0.45	0.39	0.44	0.40	0.41	0.40	0.36
Έκταση με ακραία ξηρασία (%)	20.26	57.31	43.51	29.67	38.36	32.85	25.75
Έκταση με δριμεία ξηρασία (%)	57.96	35.67	44.44	55.64	46.84	50.76	56.05
Έκταση με μέτρια ξηρασία (%)	16.18	4.35	8.30	11.09	11.45	12.72	14.84
Έκταση χωρίς ξηρασία (%)	5.59	2.67	3.76	3.60	3.35	3.67	3.35
Συνολική έκταση με ξηρασία (%)	94.41	97.33	96.24	96.40	96.65	96.33	96.65
Ιανουάριος 1990							
Μέγιστη δριμύτητα SPI	-2.80	-2.90	-2.80	-2.70	-2.80	-2.70	-2.70
Ελάχιστη δριμύτητα SPI	0.50	-0.40	0.00	0.20	0.10	0.20	0.20
Μέση δριμύτητα SPI	-1.95	-2.05	-1.99	-1.99	-1.84	-1.82	-1.79
Τυπική απόκλιση SPI	0.44	0.36	0.40	0.41	0.40	0.41	0.40
Έκταση με ακραία ξηρασία (%)	61.32	65.31	62.16	66.06	29.67	39.95	33.71
Έκταση με δριμεία ξηρασία (%)	28.45	29.43	29.87	24.73	55.64	44.64	48.99
Έκταση με μέτρια ξηρασία (%)	6.77	3.67	4.91	6.34	11.09	12.30	13.74
Έκταση χωρίς ξηρασία (%)	3.46	1.59	3.05	2.87	3.60	3.11	3.57
Συνολική έκταση με ξηρασία (%)	96.54	98.41	96.95	97.13	96.40	96.89	96.43
Φεβρουάριος 1990							
Μέγιστη δριμύτητα SPI	-2.80	-2.80	-2.80	-2.80	-2.70	-2.60	-2.50
Ελάχιστη δριμύτητα SPI	0.10	-0.50	-0.40	-0.10	0.20	0.10	0.20
Μέση δριμύτητα SPI	-2.04	-2.03	-1.90	-1.89	-1.99	-1.63	-1.70
Τυπική απόκλιση SPI	0.41	0.34	0.36	0.35	0.41	0.39	0.35
Έκταση με ακραία ξηρασία (%)	71.63	66.15	41.20	40.91	66.06	14.41	23.02
Έκταση με δριμεία ξηρασία (%)	21.87	28.50	51.38	51.10	24.73	63.81	58.32
Έκταση με μέτρια ξηρασία (%)	3.78	4.24	4.99	5.92	6.34	16.25	15.52
Έκταση χωρίς ξηρασία (%)	2.72	1.11	2.43	2.07	2.87	5.53	3.14
Συνολική έκταση με ξηρασία (%)	97.28	98.89	97.57	97.93	97.13	94.47	96.86

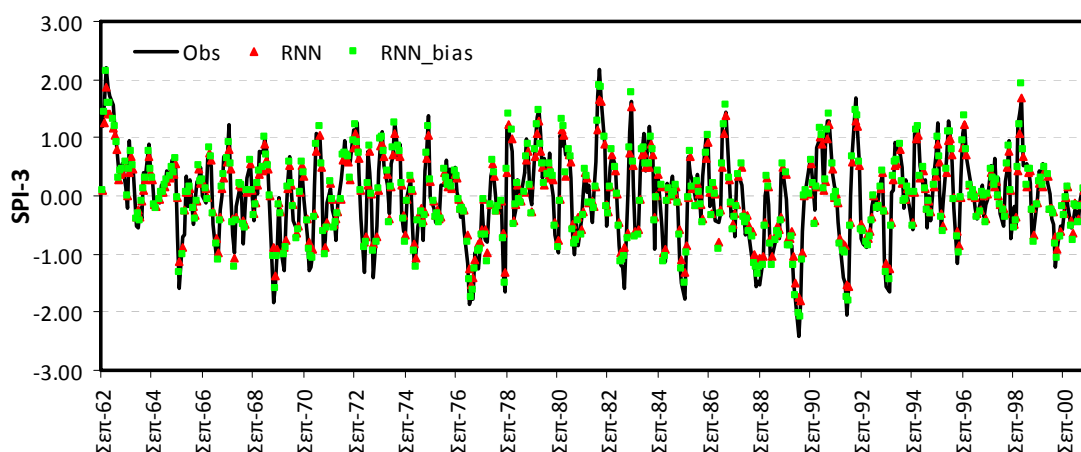
9.3. Εκτίμηση επιφανειακών τιμών SPI υδρολογικής λεκάνης Πηνειού ποταμού

Το σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης της ξηρασίας εφαρμόστηκε και για την εκτίμηση των επιφανειακών τιμών του SPI της υδρολογικής λεκάνης του Πηνειού ποταμού Θεσσαλίας. Ο υπολογισμός των επιφανειακών τιμών της υδρολογικής λεκάνης έγινε για τη μέση τιμή των κατανεμημένων (raster) τιμών του SPI με μέγεθος φαντίου 1-km τόσο για τις παρατηρούμενες τιμές του

SPI όσο και για τα χρονικά βήματα πρόγνωσης του SPI που μπορούν να χρησιμοποιηθούν επιχειρησιακά. Η αξιολόγηση των προγνώσεων της υβριδικής μεθόδου RNN για το δείκτη ξηρασίας SPI υπολογισμένο σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες έγινε με τη χρήση στατιστικών κριτηρίων για όλη την περίοδο των προγνώσεων καθώς και με τη σύγκριση της με τη μέθοδο του επίμονου προβλέπτη (Persistence model). Τα στατιστικά κριτήρια που επιλέχθηκαν για την αξιολόγηση των επιφανειακών τιμών του SPI είναι ο βαθμός απόδοσης Nash-Sutcliffe efficiency (Eff), ο συντελεστής συσχέτισης (r), το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE) το μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE) και τα ποιοτικά κριτήρια ανίχνευσης επεισοδίων ξηρασίας.

9.3.1. Εκτίμηση επιφανειακών τιμών SPI-3μηνών

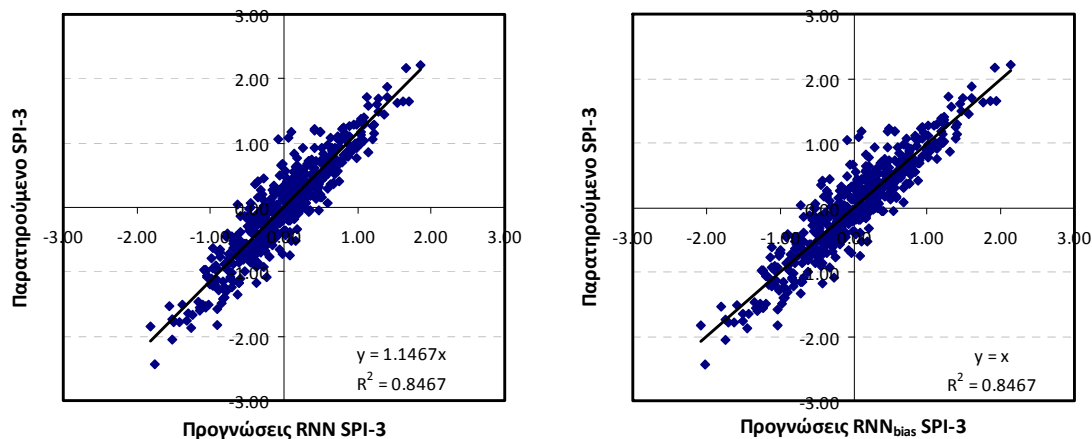
Το Σχήμα 9.7 παρουσιάζει τις παραγόμενες χρονοσειρές επιφανειακών τιμών του SPI-3 που προέκυψαν από τη μέση τιμή των ψηφιακών χαρτών με μέγεθος φατνίου 1-km στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού. Προσεκτική μελέτη του παρακάτω σχήματος επιβεβαιώνει τις περιόδους ξηρασίας που αναγνωρίστηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια και παλιότερες μελέτες [Loukas and Vasiliades, 2004; Loukas et al., 2008; Vasiliades and Loukas, 2009; Vasiliades et al., 2010] αλλά η δριμύτητα της ξηρασίας εμφανίζεται πιο ήπια αφού μόνο δύο ακραία επεισόδια (μήνες) ξηρασίας ($SPI \leq -2$) αναγνωρίζονται στην υδρολογική λεκάνη (Πίνακας 9.21). Οι προγνώσεις της μεθόδου RNN δείχνουν ότι υποεκτιμούν τις τιμές του SPI-3 για όλο το εύρος των παρατηρούμενων επιφανειακών τιμών. Μάλιστα, όλα τα επεισόδια ξηρασίας κατατάσσονται ως δριμύ ή μέτρια (Πίνακας 9.21). Για το λόγο, αυτό η υποεκτίμηση των RNN προγνώσεων διορθώθηκαν με τις παρατηρούμενες τιμές χρησιμοποιώντας γραμμική παλινδρόμηση (bias correction method) για την περίοδο της ανάπτυξης (350 από τις 470 τιμές). Οι προγνώσεις της RNN_{bias} μεθόδου παρουσιάζονται στο Σχήμα 9.7 για χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$ και το Σχήμα 9.8 δείχνει τα διαγράμματα διασποράς των προγνωστικών μεθόδων RNN και RNN_{bias} . Ο Πίνακας 9.21 παρουσιάζει τους μήνες της υδρολογικής λεκάνης που πλήττονται από ξηρασία ενώ τα στατιστικά και ποιοτικά κριτήρια των μεθόδων πρόγνωσης (RNN και RNN_{bias}) αποδεικνύουν ότι η μέθοδος RNN_{bias} προβλέπει καλύτερα τις επιφανειακές τιμές του SPI-3 στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για επιχειρησιακή πρόγνωση του SPI-3 ενός μήνα μπροστά, αφού ο δείκτης κρίσιμης επιτυχίας CSI είναι μεγαλύτερος από 0.5 (Πίνακας 9.22).



Σχήμα 9.7. Πρόγνωση επιφανειακών τιμών SPI-3 υδρολογικής λεκάνης Πηνειού ποταμού για χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+1$ με τις μεθόδους RNN και RNN_{bias} .

Πίνακας 9.21. Συνολικοί μήνες ξηρασίας για διάφορες κλάσεις του SPI-3 στην υδρολογική λεκάνη Πηνειού ποταμού και μήνες ξηρασίας ως ποσοστό των συνολικών 470 μηνών.

	Ακραία δριμύτητα	Δριμεία δριμύτητα	Μέτρια δριμύτητα	Συνολική δριμύτητα
Παρατηρούμενοι μήνες ξηρασίας	2 0.43%	18 3.83%	28 5.96%	48 10.21%
RNN μήνες ξηρασίας RNN	0 0.00%	5 1.06%	20 4.26%	25 5.32%
RNN μήνες ξηρασίας RNN _{bias}	2 0.43%	7 1.49%	32 6.81%	41 8.72%



Σχήμα 9.8. Διαγράμματα διασποράς επιφανειακών τιμών SPI-3 υδρολογικής λεκάνης Πηνειού ποταμού για χρονικό βήμα πρόγνωσης t+1 με τις μεθόδους RNN και RNN_{bias}.

Πίνακας 9.22. Στατιστικά ποσοτικά και ποιοτικά αποτελέσματα επιφανειακών τιμών πρόγνωσης SPI-3_{t+1} υδρολογικής λεκάνης Πηνειού ποταμού

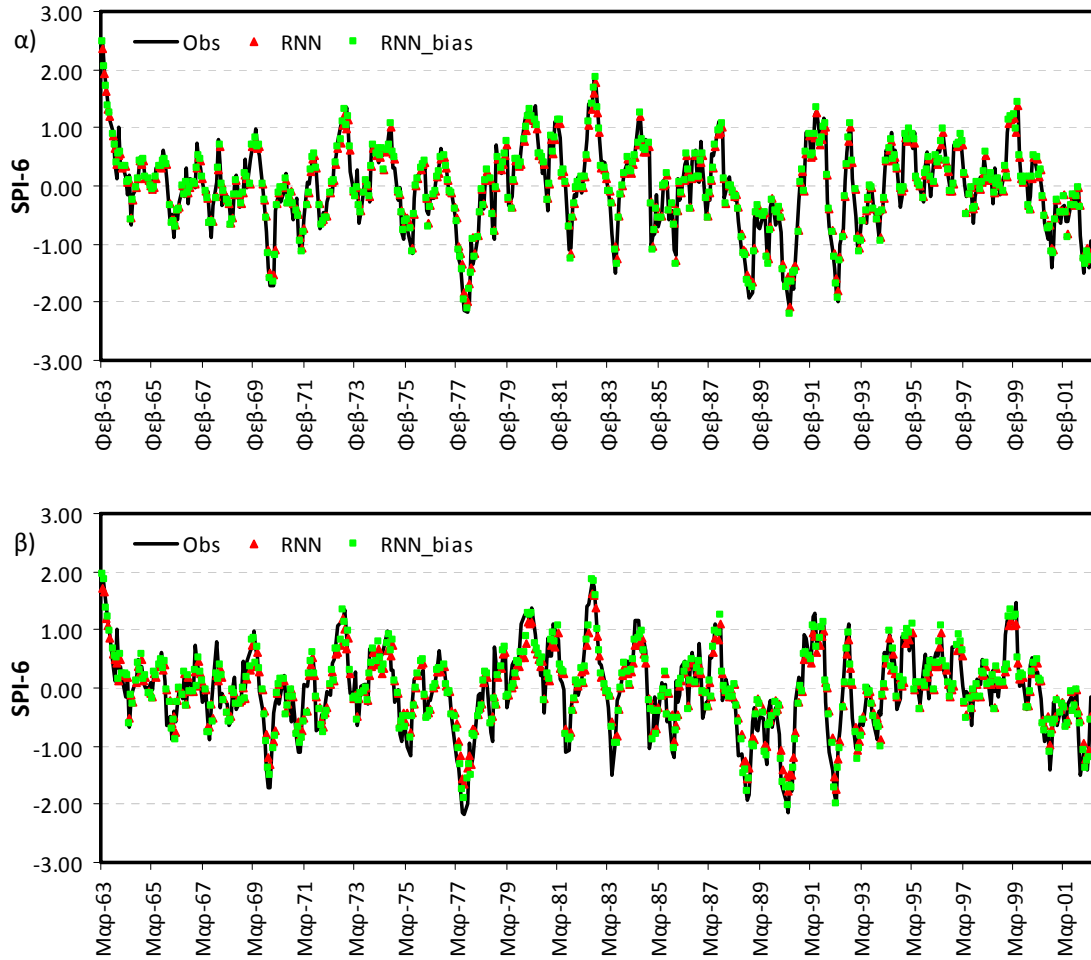
Μέθοδος	RNN	RNN _{bias}	Persistence
<i>Ποσοτικά στατιστικά κριτήρια</i>			
Βαθμός απόδοσης, Eff	0.83	0.85	0.37
Συντελεστής συσχέτισης, R	0.92	0.92	0.68
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα, RMSE	0.32	0.30	0.62
Μέσο απόλυτο σφάλμα, MAE	0.25	0.24	0.48
<i>Ποιοτικά κριτήρια αξιολόγησης συμβάντων ξηρασίας (SPI<-1)</i>			
Επιτυχίες, A	22	30	25
Λανθασμένοι Συναγερμοί, C	3	11	22
Αστοχίες, B	26	18	23
Σωστά μη επεισόδια ξηρασίας, D	419	411	400
Ακρίβεια πρόγνωσης, Accuracy	0.94	0.94	0.90
Bias score	0.52	0.85	0.98
Πιθανότητα ανίχνευσης επεισοδίων ξηρασίας, POD	0.46	0.63	0.52
Αναλογία λανθασμένων συναγερμών, FAR	0.12	0.27	0.47
Πιθανότητα λανθασμένης ανίχνευσης, POFD	0.01	0.03	0.05
Δείκτης Κρίσιμης Επιτυχίας, CSI	0.43	0.51	0.36
Hanssen and Kuipers discriminant, HK	0.45	0.60	0.47
Odds ratio, OR	118.18	62.27	19.76

9.3.2. Εκτίμηση επιφανειακών τιμών SPI-6μηνών

Το Σχήμα 9.9 παρουσιάζει τις παραγόμενες χρονοσειρές επιφανειακών τιμών του SPI-6 που προέκυψαν από τη μέση τιμή των ψηφιακών χαρτών με μέγεθος φατνίου 1-km στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού για χρονικά βήματα πρόγνωσης έως δύο μήνες μπροστά. Προσεκτική μελέτη του παρακάτω σχήματος επιβεβαιώνει τις περιόδους ξηρασίας που αναγνωρίστηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια και παλιότερες μελέτες [Loukas and Vasiliades, 2004; Loukas et al., 2008; Vasiliades and Loukas, 2009; Vasiliades et al., 2010] αλλά η δριμύτητα της ξηρασίας εμφανίζεται πιο ήπια αφού μόνο τρία ακραία επεισόδια (μήνες) ξηρασίας ($SPI \leq -2$) αναγνωρίζονται στην υδρολογική λεκάνη (Πίνακας 9.23). Οι προγνώσεις της μεθόδου RNN δείχνουν ότι υποεκτιμούν μόνο τις ακραίες τιμές του SPI-6. Μάλιστα, η κατανομή των κλάσεων του SPI-6 είναι παραπλήσια της παρατηρούμενης κατανομής (Πίνακας 9.23). Οι επιφανειακές προγνώσεις της RNN μεθόδου διορθώθηκαν με τις παρατηρούμενες τιμές χρησιμοποιώντας γραμμική παλινδρόμηση (bias correction method) για την περίοδο της ανάπτυξης (350 από τις 470 τιμές). Οι προγνώσεις της RNN_{bias} μεθόδου παρουσιάζονται στο Σχήμα 9.9 για χρονικά βήματα πρόγνωσης $t+1$ και $t+2$ και το Σχήμα 9.10 δείχνει τα διαγράμματα διασποράς των προγνωστικών μεθόδων RNN και RNN_{bias} . Ο Πίνακας 9.23 παρουσιάζει τους μήνες της υδρολογικής λεκάνης που πλήττονται από ξηρασία ενώ τα στατιστικά και ποιοτικά κριτήρια των μεθόδων πρόγνωσης (RNN και RNN_{bias}) αποδεικνύουν ότι η μέθοδος RNN_{bias} δεν βελτιώνει καθόλου την πρόγνωση των επιφανειακών τιμών του SPI-6 στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού για χρονικό βήμα πρόγνωσης ενός μήνα μπροστά. Διαφορετικά είναι τα αποτελέσματα για χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+2$. Οι προγνώσεις της μεθόδου RNN_{t+2} δείχνουν ότι υποεκτιμούν τις τιμές του SPI-6 για όλο το εύρος των παρατηρούμενων επιφανειακών τιμών. Μάλιστα, όλα τα επεισόδια ξηρασίας κατατάσσονται ως δριμύ ή μέτρια (Πίνακας 9.23). Οι επιφανειακές προγνώσεις της RNN μεθόδου διορθώθηκαν και πάλι με τις παρατηρούμενες τιμές χρησιμοποιώντας γραμμική παλινδρόμηση (bias correction method) για την περίοδο της ανάπτυξης (350 από τις 470 τιμές). Η εφαρμογή της διόρθωσης της υποεκτίμησης βελτιώνει την επιφανειακή πρόγνωση του $SPI-6_{t+2}$ και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για επιχειρησιακή πρόγνωση του SPI-6 μέχρι δύο μήνες μπροστά, αφού ο δείκτης κρίσιμης επιτυχίας CSI είναι μεγαλύτερος από 0.5 αλλά αυξάνει το ποσοστό των λανθασμένων συναγερμών (Πίνακας 9.24). Από τα παραπάνω αποδεικνύεται ότι και οι δύο μέθοδοι RNN και RNN_{bias} μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης της ξηρασίας για επιφανειακές προγνώσεις του SPI-6 μέχρι και δύο μήνες μπροστά.

Πίνακας 9.23. Συνολικοί μήνες ξηρασίας για διάφορες κλάσεις του SPI-6 στην υδρολογική λεκάνη Πηνειού ποταμού και μήνες ξηρασίας ως ποσοστό των συνολικών 470 μηνών.

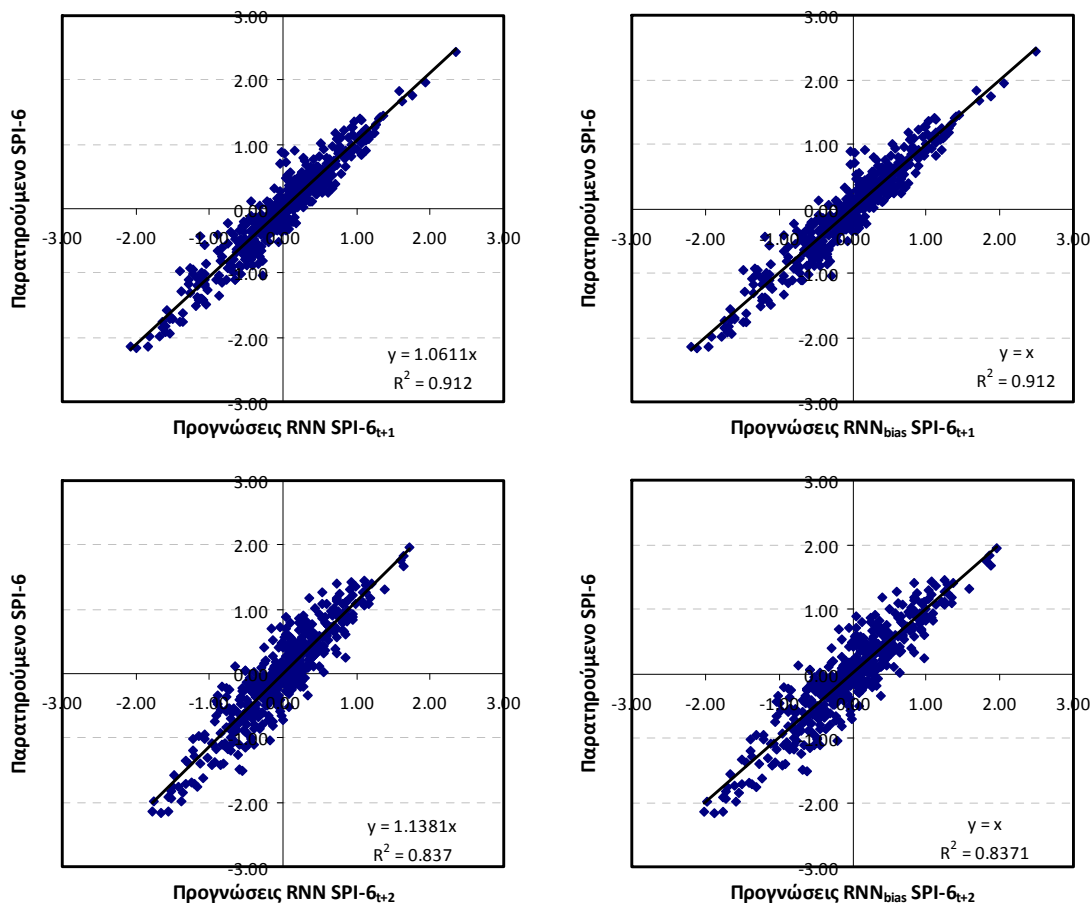
	Ακραία δριμύτητα	Δριμεία δριμύτητα	Μέτρια δριμύτητα	Συνολική δριμύτητα
Παρατηρούμενοι μήνες ξηρασίας	3 0.64%	15 3.19%	31 6.60%	49 10.43%
RNN_{t+1} μήνες ξηρασίας	1 0.21%	13 2.77%	32 6.81%	46 9.79%
$RNN_{bias_{t+1}}$ μήνες ξηρασίας	2 0.43%	12 2.55%	32 6.81%	46 9.79%
RNN_{t+2} μήνες ξηρασίας	0 0.00%	8 1.70%	19 4.04%	27 5.74%
$RNN_{bias_{t+2}}$ μήνες ξηρασίας	1 0.21%	13 2.77%	23 4.89%	37 7.87%



Σχήμα 9.9. Πρόγνωση επιφανειακών τιμών SPI-6 υδρολογικής λεκάνης Πηνειού ποταμού με τις μεθόδους RNN και RNN_{bias} για α) χρονικό βήμα πρόγνωσης t+1 και β) χρονικό βήμα πρόγνωσης t+2.

Πίνακας 9.24. Στατιστικά ποσοτικά και ποιοτικά αποτελέσματα επιφανειακών τιμών πρόγνωσης SPI-6 υδρολογικής λεκάνης Πηνειού ποταμού

	RNN t+1	RNN _{bias} t+1	Persistence	RNN t+2	RNN _{bias} t+2	Persistence
<i>Ποσοτικά στατιστικά κριτήρια</i>						
Eff	0.91	0.91	0.67	0.82	0.84	0.32
R	0.95	0.95	0.84	0.91	0.91	0.67
RMSE	0.22	0.22	0.43	0.31	0.30	0.61
MAE	0.17	0.17	0.32	0.24	0.23	0.49
<i>Ποιοτικά κριτήρια αξιολόγησης συμβάντων ξηρασίας (SPI≤-1)</i>						
A	39	39	33	25	30	21
C	7	7	16	2	7	28
B	10	10	16	24	19	28
D	414	414	405	419	414	393
Accuracy	0.96	0.96	0.93	0.94	0.94	0.88
Bias score	0.94	0.94	1.00	0.55	0.76	1.00
POD	0.80	0.80	0.67	0.51	0.61	0.43
FAR	0.15	0.15	0.33	0.07	0.19	0.57
POFD	0.02	0.02	0.04	0.00	0.02	0.07
CSI	0.70	0.70	0.51	0.49	0.54	0.27
HK	0.78	0.78	0.64	0.51	0.60	0.36
OR	230.66	230.66	52.21	218.23	93.38	10.53



Σχήμα 9.10. Διαγράμματα διασποράς επιφανειακών τιμών SPI-6 υδρολογικής λεκάνης Πηνειού ποταμού για χρονικά βήματα πρόγνωσης $t+1$ και $t+2$ με τις μεθόδους RNN και RNN_{bias}.

9.3.3. Εκτίμηση επιφανειακών τιμών SPI-9μητών

Το Σχήμα 9.11 παρουσιάζει τις παραγόμενες χρονοσειρές επιφανειακών τιμών του SPI-9 που προέκυψαν από τη μέση τιμή των ψηφιακών χαρτών με μέγεθος φατνίου 1-km στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού για χρονικά βήματα πρόγνωσης έως τρεις μήνες μπροστά. Προσεκτική μελέτη του παρακάτω σχήματος επιβεβαιώνει τις περιόδους ξηρασίας που αναγνωρίστηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια και παλιότερες μελέτες [Loukas and Vasiliades, 2004; Loukas et al., 2008; Vasiliades and Loukas, 2009; Vasiliades et al., 2010] αλλά η δριμύτητα της ξηρασίας εμφανίζεται πιο ήπια αφού μόνο τέσσερα ακραία επεισόδια (μήνες) ξηρασίας ($SPI \leq -2$) αναγνωρίζονται στην υδρολογική λεκάνη (Πίνακας 9.25). Οι προγνώσεις της μεθόδου RNN δείχνουν ότι υποεκτιμούν μόνο τις ακραίες τιμές του SPI-9. Μάλιστα, η κατανομή των κλάσεων του SPI-9 είναι παραπλήσια της παρατηρούμενης κατανομής (Πίνακας 9.25). Οι επιφανειακές προγνώσεις της RNN μεθόδου διορθώθηκαν με τις παρατηρούμενες τιμές χρησιμοποιώντας γραμμική παλινδρόμηση (bias correction method) για την περίοδο της ανάπτυξης (350 από τις 470 τιμές). Οι προγνώσεις της RNN_{bias} μεθόδου παρουσιάζονται στο Σχήμα 9.11 για χρονικά βήματα πρόγνωσης $t+1$, $t+2$ και $t+3$, ενώ το Σχήμα 9.12 δείχνει τα διαγράμματα διασποράς των προγνωστικών μεθόδων RNN και RNN_{bias}. Ο Πίνακας 9.25 παρουσιάζει τους μήνες της υδρολογικής λεκάνης που πλήττονται από ξηρασία ενώ τα στατιστικά και ποιοτικά κριτήρια των μεθόδων πρόγνωσης (RNN και RNN_{bias}) του Πίνακα 9.26 αποδεικνύουν ότι η μέθοδος RNN_{bias} βελτιώνει την πρόγνωση των επιφανειακών τιμών του SPI-9 στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού για χρονικά βήματα πρόγνωσης έως τρεις μπροστά. Η εφαρμογή της διόρθωσης της μεροληψίας (bias correction method) βελτιώνει την επιφανειακή πρόγνωση του SPI-9 και μπορεί να

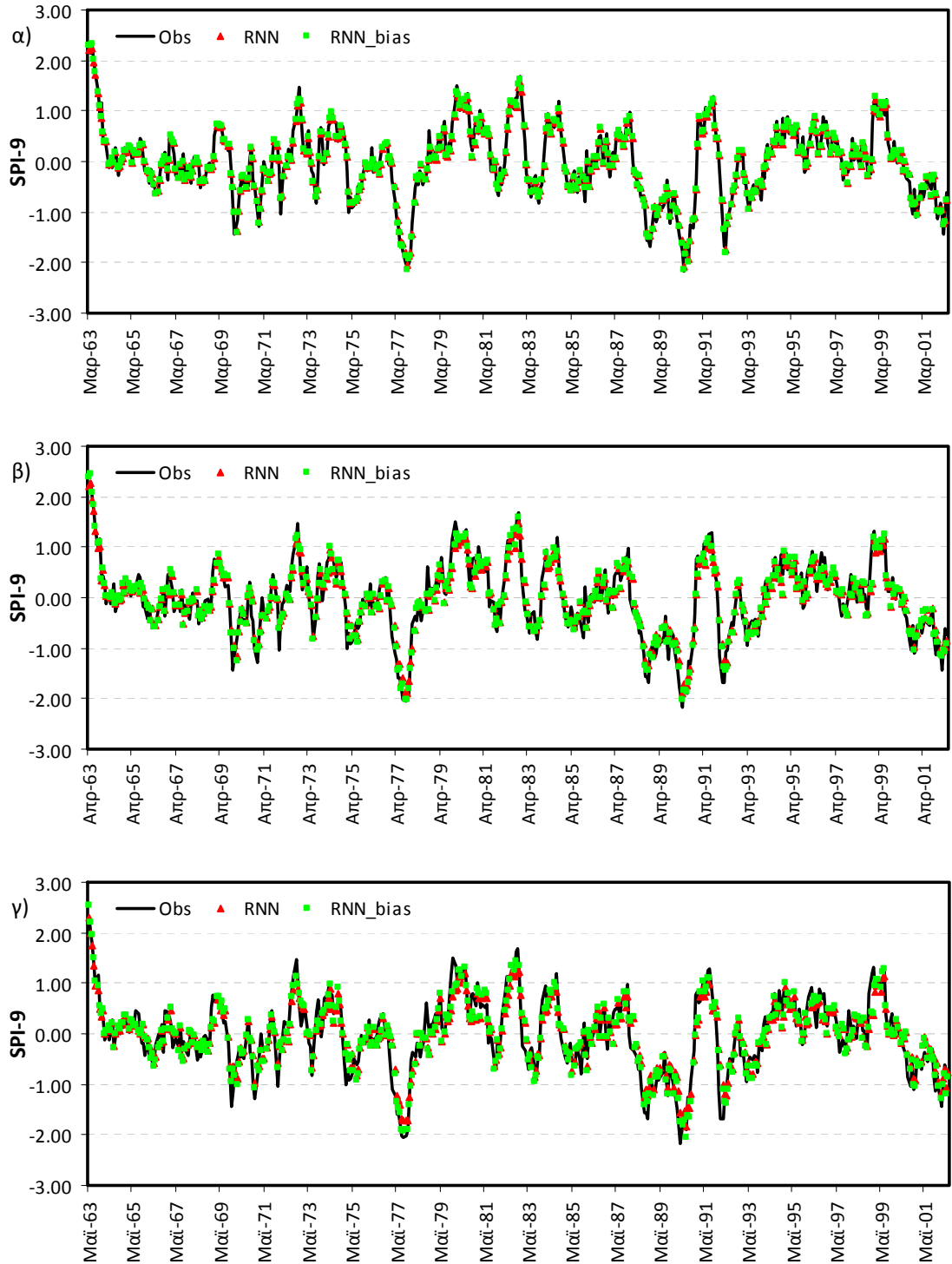
χρησιμοποιηθεί για επιχειρησιακή πρόγνωση του SPI-9 μέχρι τρεις μήνες μπροστά, αφού ο δείκτης κρίσιμης επιτυχίας CSI είναι μεγαλύτερος από 0.5 αλλά αυξάνει το ποσοστό των λανθασμένων συναγερμών (Πίνακας 9.26). Από τα παραπάνω αποδεικνύεται ότι και οι δύο μέθοδοι RNN και RNN_{bias} μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης της ξηρασίας για επιφανειακές προγνώσεις του SPI-9 μέχρι και τρεις μπροστά στην υπό εξέταση υδρολογική λεκάνη.

Πίνακας 9.25. Συνολικοί μήνες ξηρασίας για διάφορες κλάσεις του SPI-9 στην υδρολογική λεκάνη Πηνειού ποταμού και μήνες ξηρασίας ως ποσοστό των συνολικών 470 μηνών.

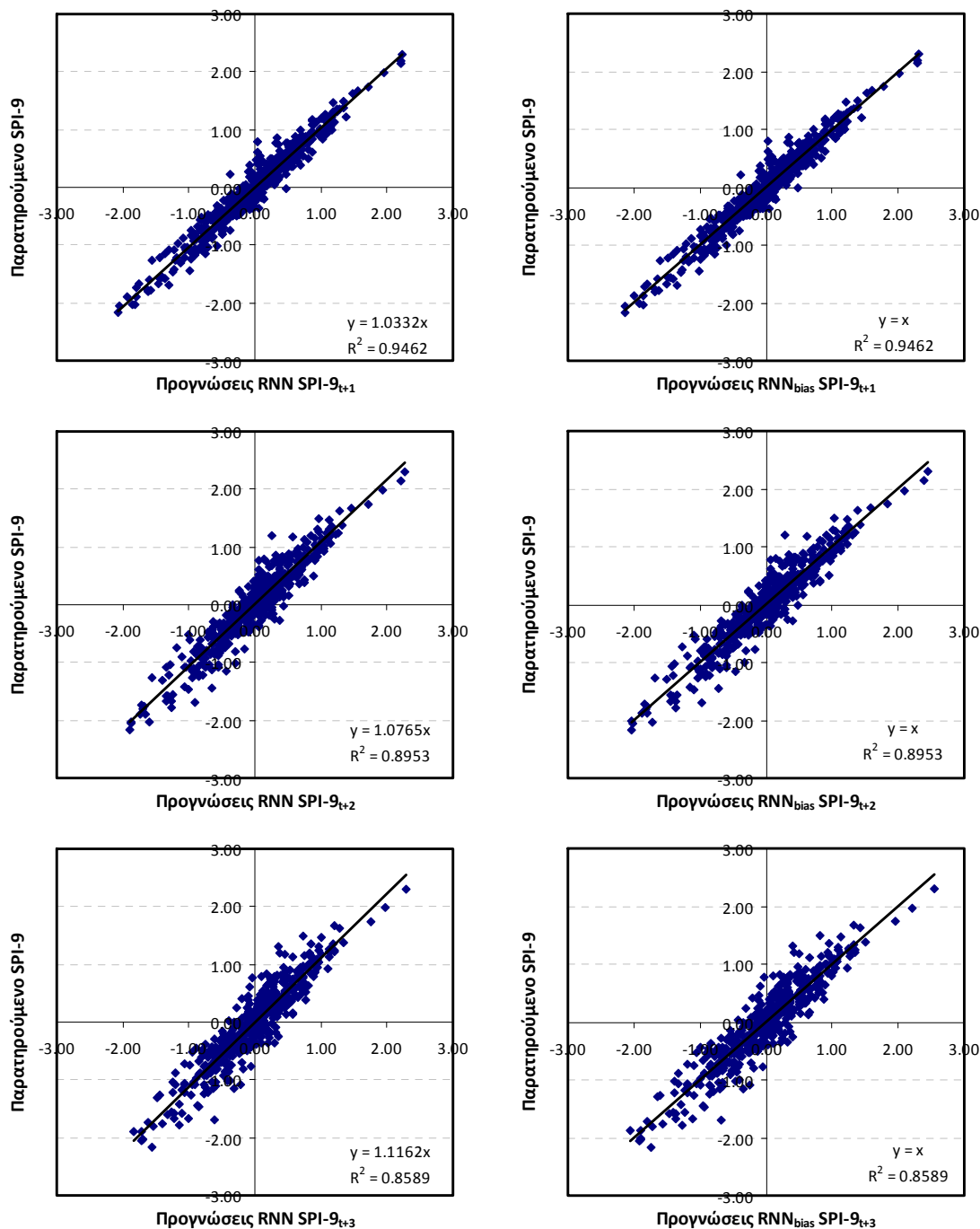
	Ακραία δριμύτητα	Δριμεία δριμύτητα	Μέτρια δριμύτητα	Συνολική δριμύτητα
Παρατηρούμενοι μήνες ξηρασίας	4 0.85%	13 2.77%	28 5.96%	45 9.57%
RNN _{t+1} μήνες ξηρασίας	2 0.43%	11 2.34%	20 4.26%	33 7.02%
RNN _{bias_t+1} μήνες ξηρασίας	3 0.64%	11 2.34%	22 4.68%	36 7.66%
RNN _{t+2} μήνες ξηρασίας	0 0.00%	10 2.13%	18 3.83%	28 5.96%
RNN _{bias_t+2} μήνες ξηρασίας	3 0.64%	8 1.70%	22 4.68%	33 7.02%
RNN _{t+3} μήνες ξηρασίας	0 0.00%	8 1.70%	19 4.04%	27 5.74%
RNN _{bias_t+3} μήνες ξηρασίας	1 0.21%	10 2.13%	24 5.11%	35 7.45%

Πίνακας 9.26. Στατιστικά ποσοτικά και ποιοτικά αποτελέσματα επιφανειακών τιμών πρόγνωσης SPI-9 υδρολογικής λεκάνης Πηνειού ποταμού.

	RNN t+1	RNN _{bias} t+1	Pers.	RNN t+2	RNN _{bias} t+2	Pers.	RNN t+3	RNN _{bias} t+3	Pers.
<i>Ποσοτικά στατιστικά κριτήρια</i>									
Eff	0.95	0.95	0.80	0.89	0.90	0.57	0.85	0.86	0.36
R	0.97	0.97	0.90	0.95	0.95	0.79	0.93	0.93	0.69
RMSE	0.17	0.17	0.33	0.24	0.24	0.48	0.28	0.27	0.58
MAE	0.14	0.13	0.26	0.19	0.18	0.37	0.22	0.21	0.44
<i>Ποιοτικά κριτήρια αξιολόγησης συμβάντων ξηρασίας (SPI<-1)</i>									
A	31	33	31	25	28	25	25	30	23
C	2	3	14	3	5	20	2	5	22
B	14	12	14	20	17	20	20	15	22
D	423	422	411	422	420	405	423	420	403
Accuracy	0.97	0.97	0.94	0.95	0.95	0.91	0.95	0.96	0.91
Bias score	0.73	0.80	1.00	0.62	0.73	1.00	0.60	0.78	1.00
POD	0.69	0.73	0.69	0.56	0.62	0.56	0.56	0.67	0.51
FAR	0.06	0.08	0.31	0.11	0.15	0.44	0.07	0.14	0.49
POFD	0.00	0.01	0.03	0.01	0.01	0.05	0.00	0.01	0.05
CSI	0.66	0.69	0.53	0.52	0.56	0.38	0.53	0.60	0.34
HK	0.68	0.73	0.66	0.55	0.61	0.51	0.55	0.65	0.46
OR	468.32	386.83	65.01	175.83	138.35	25.31	264.38	168.00	19.15



Σχήμα 9.11. Πρόγνωση επιφανειακών τιμών SPI-9 υδρολογικής λεκάνης Πηνειού ποταμού με τις μεθόδους RNN και RNN_{bias} για χρονικό βήμα πρόγνωσης α) t+1, β) t+2 και γ) t+3.



Σχήμα 9.12. Διαγράμματα διασποράς επιφανειακών τιμών SPI-9 υδρολογικής λεκάνης Πηνειού ποταμού για χρονικά βήματα πρόγνωσης $t+1$, $t+2$ και $t+3$ με τις μεθόδους RNN και RNN_{bias}.

9.3.4. Εκτίμηση επιφανειακών τιμών SPI-12μηνών

Το Σχήμα 9.13 παρουσιάζει τις παραγόμενες χρονοσειρές επιφανειακών τιμών του SPI-12 που προέκυψαν από τη μέση τιμή των ψηφιακών χαρτών με μέγεθος φατνίου 1-km στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού για χρονικά βήματα πρόγνωσης έως τέσσερις μήνες μπροστά. Προσεκτική μελέτη του παρακάτω σχήματος επιβεβαιώνει τις περιόδους ξηρασίας που αναγνωρίστηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια και παλιότερες μελέτες [Loukas and Vasiliades, 2004; Loukas et al., 2008; Vasiliades and Loukas, 2009; Vasiliades et al., 2010] αλλά η δραμύτητα της ξηρασίας εμφανίζεται πιο ήπια αφού ένα μόνο ακραίο επεισόδιο (μήνας) ξηρασίας ($SPI \leq -2$) αναγνωρίζεται στην

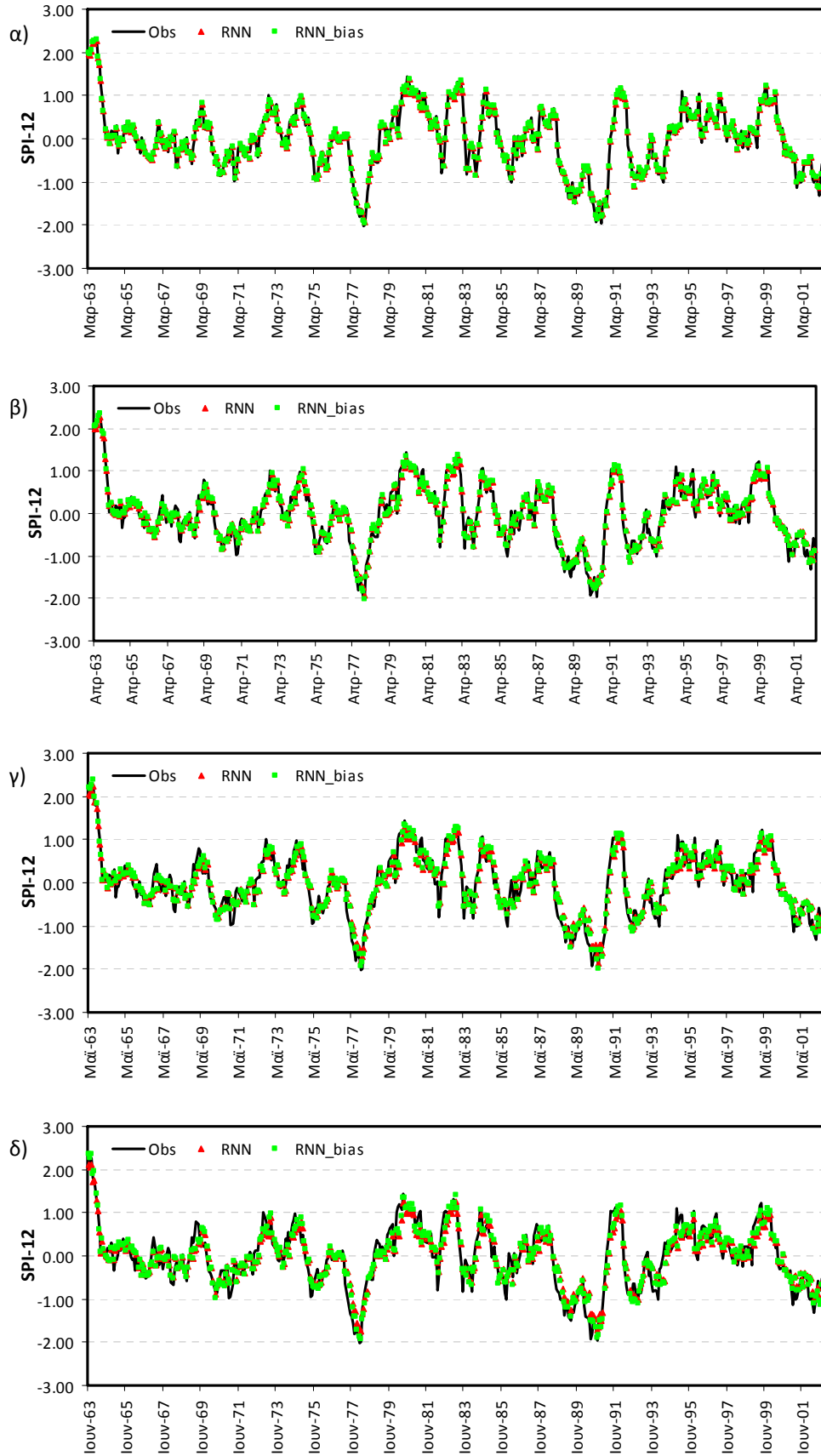
υδρολογική λεκάνη (Πίνακας 9.27). Οι προγνώσεις της μεθόδου RNN δείχνουν ότι υποεκτιμούν μόνο τις ακραίες τιμές του SPI-12 για χρονικά βήματα πρόγνωσης μεγαλύτερα από ένα μήνα. Μάλιστα, η κατανομή των κλάσεων του SPI-12 είναι παραπλήσιες της παρατηρούμενης κατανομής (Πίνακας 9.27). Οι επιφανειακές προγνώσεις της RNN μεθόδου διορθώθηκαν με τις παρατηρούμενες τιμές χρησιμοποιώντας γραμμική παλινδρόμηση (bias correction method) για την περίοδο της ανάπτυξης (350 από τις 470 τιμές). Οι προγνώσεις της RNN_{bias} μεθόδου παρουσιάζονται στο Σχήμα 9.13 για χρονικά βήματα πρόγνωσης t+1, t+2, t+3, t+4, και το Σχήμα 9.14 δείχνει τα διαγράμματα διασποράς των προγνωστικών μεθόδων RNN και RNN_{bias}. Ο Πίνακας 9.27 παρουσιάζει τους μήνες της υδρολογικής λεκάνης που πλήττονται από ξηρασία ενώ τα στατιστικά και ποιοτικά κριτήρια των μεθόδων πρόγνωσης (RNN και RNN_{bias}) του Πίνακα 9.28 αποδεικνύουν ότι η μέθοδος RNN_{bias} βελτιώνει την πρόγνωση των επιφανειακών τιμών του SPI-12 στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού για χρονικά βήματα πρόγνωσης έως τέσσερις μήνες μπροστά. Έτσι, η μέθοδος της διόρθωσης της μεροληψίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για επιχειρησιακή πρόγνωση του SPI-12 μέχρι τέσσερις μήνες μπροστά, αφού ο δείκτης κρίσιμης επιτυχίας CSI είναι μεγαλύτερος από 0.5 αλλά αυξάνει το ποσοστό των λανθασμένων συναγερμών (Πίνακας 9.28). Από τα παραπάνω αποδεικνύεται ότι και οι δύο μέθοδοι RNN και RNN_{bias} μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης της ξηρασίας για επιφανειακές προγνώσεις του SPI-12 στην υπό εξέταση υδρολογική λεκάνη.

Πίνακας 9.27. Συνολικοί μήνες ξηρασίας για διάφορες κλάσεις του SPI-12 στην υδρολογική λεκάνη Πηνειού ποταμού και μήνες ξηρασίας ως ποσοστό των συνολικών 470 μηνών.

	Ακραία δριμύτητα	Δριμεία δριμύτητα	Μέτρια δριμύτητα	Συνολική δριμύτητα
Παρατηρούμενοι μήνες ξηρασίας	1 0.21%	12 2.55%	27 5.74%	40 8.51%
RNN _{t+1} μήνες ξηρασίας	1 0.21%	12 2.55%	23 4.89%	36 7.66%
RNN _{bias_t+1} μήνες ξηρασίας	1 0.21%	14 2.98%	21 4.47%	36 7.66%
RNN _{t+2} μήνες ξηρασίας	0 0.00%	12 2.55%	23 4.89%	35 7.45%
RNN _{bias_t+2} μήνες ξηρασίας	1 0.21%	12 2.55%	22 4.68%	35 7.45%
RNN _{t+3} μήνες ξηρασίας	0 0.00%	7 1.49%	22 4.68%	29 6.17%
RNN _{bias_t+3} μήνες ξηρασίας	1 0.21%	13 2.77%	21 4.47%	35 7.45%
RNN _{t+4} μήνες ξηρασίας	0 0.00%	6 1.28%	19 4.04%	25 5.32%
RNN _{bias_t+4} μήνες ξηρασίας	0 0.00%	8 1.70%	27 5.74%	35 7.45%

9.3.5. Εκτίμηση επιφανειακών τιμών SPI-24μηνών

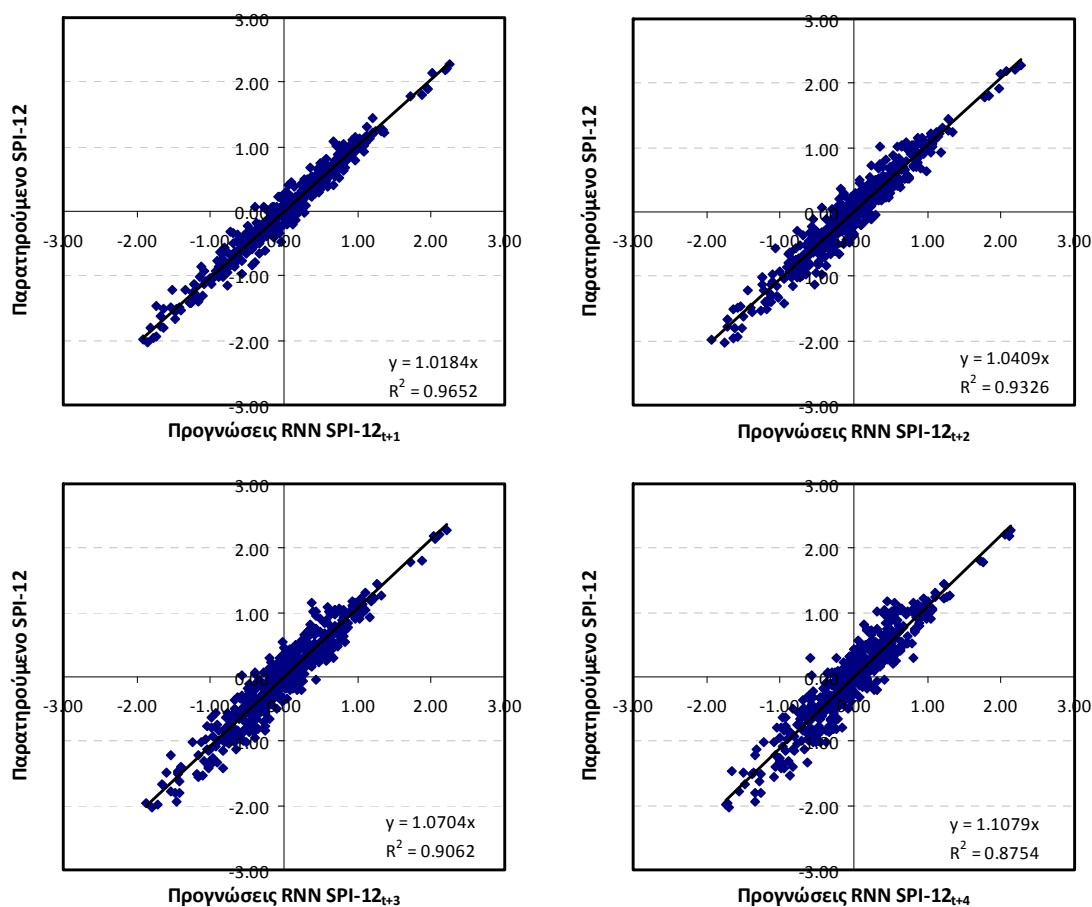
Το Σχήμα 9.15 παρουσιάζει τις παραγόμενες χρονοσειρές επιφανειακών τιμών του SPI-24 που προέκυψαν από τη μέση τιμή των ψηφιακών χαρτών με μέγεθος φατνίου 1-km στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού για χρονικά βήματα πρόγνωσης έως έξι μήνες μπροστά. Προσεκτική μελέτη του παρακάτω σχήματος επιβεβαιώνει τις περιόδους ξηρασίας που αναγνωρίστηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια και παλιότερες μελέτες [Loukas and Vasiliades, 2004; Loukas et al., 2008; Vasiliades and Loukas, 2009a; Vasiliades et al., 2010] αλλά η δριμύτητα της ξηρασίας εμφανίζεται πιο ήπια αφού μόνο τρία ακραία επεισόδια (μήνες) ξηρασίας (SPI≤-2) αναγνωρίζονται στην υδρολογική λεκάνη (Πίνακας 9.29).



Σχήμα 9.13. Πρόγνωση επιφανειακών τιμών SPI-12 υδρολογικής λεκάνης Πηνειού ποταμού με τις μεθόδους RNN και RNN_{bias} για χρονικό βήμα πρόγνωσης α) t+1, β) t+2, γ) t+3 και δ) t+4.

Πίνακας 9.28. Στατιστικά ποσοτικά και ποιοτικά αποτελέσματα επιφανειακών τιμών πρόγνωσης SPI-12 υδρολογικής λεκάνης Πηνειού ποταμού.

	RNN t+1	RNN bias t+1	Pers.	RNN t+2	RNN bias t+2	Pers.	RNN t+3	RNN bias t+3	Pers.	RNN t+4	RNN bias t+4	Pers.
<i>Ποσοτικά στατιστικά κριτήρια πρόγνωσης</i>												
Eff	0.96	0.97	0.86	0.93	0.93	0.71	0.90	0.91	0.55	0.87	0.88	0.37
R	0.98	0.98	0.93	0.97	0.97	0.86	0.95	0.95	0.78	0.94	0.94	0.69
RMSE	0.14	0.14	0.27	0.19	0.19	0.39	0.23	0.22	0.48	0.26	0.25	0.57
MAE	0.11	0.11	0.20	0.15	0.15	0.31	0.18	0.18	0.37	0.21	0.20	0.45
<i>Ποιοτικά κριτήρια αξιολόγησης συμβάντων ξηρασίας (SPI<sub>S-1</sub>)</i>												
A	33	33	33	32	32	30	27	30	26	23	28	23
C	2	2	7	3	3	10	2	5	14	2	7	17
B	7	7	7	8	8	10	13	10	14	17	12	17
D	428	428	423	427	427	420	428	425	416	428	423	413
Accuracy	0.98	0.98	0.97	0.98	0.98	0.96	0.97	0.97	0.94	0.96	0.96	0.93
Bias	0.88	0.88	1.00	0.88	0.88	1.00	0.73	0.88	1.00	0.63	0.88	1.00
POD	0.83	0.83	0.83	0.80	0.80	0.75	0.68	0.75	0.65	0.58	0.70	0.58
FAR	0.06	0.06	0.18	0.09	0.09	0.25	0.07	0.14	0.35	0.08	0.20	0.43
POFD	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.02	0.00	0.01	0.03	0.00	0.02	0.04
CSI	0.79	0.79	0.70	0.74	0.74	0.60	0.64	0.67	0.48	0.55	0.60	0.40
HK	0.82	0.82	0.81	0.79	0.79	0.73	0.67	0.74	0.62	0.57	0.68	0.54
OR	1009	1009	285	569	569	126	444	255	55	290	141	33

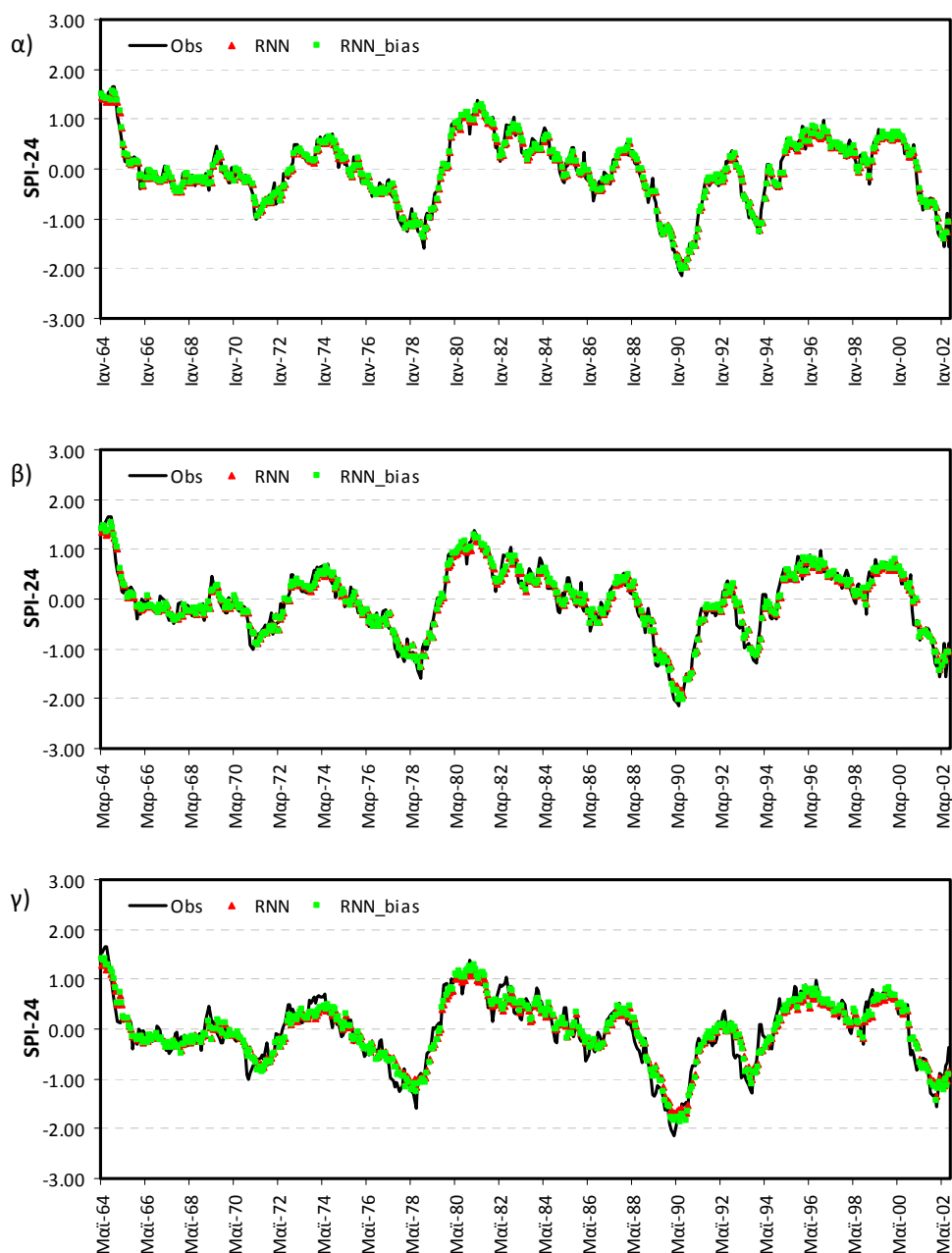


Σχήμα 9.14. Διαγράμματα διασποράς επιφανειακών τιμών SPI-12 υδρολογικής λεκάνης Πηνειού ποταμού για χρονικά βήματα πρόγνωσης t+1, t+2, t+3 και t+4 με τη μέθοδο RNN.

Οι προγνώσεις της μεθόδου RNN δείχνουν ότι υποεκτιμούν μόνο τις ακραίες τιμές του SPI-24 για μεγάλα χρονικά διαστήματα πρόγνωσης. Μάλιστα, η κατανομή των κλάσεων του SPI-24 είναι παραπλήσιες με την κατανομή των παρατηρούμενων τιμών (Πίνακας 9.29). Οι επιφανειακές προγνώσεις της RNN μεθόδου διορθώθηκαν με τις παρατηρούμενες τιμές χρησιμοποιώντας γραμμική παλινδρόμηση (bias correction method) για την περίοδο της ανάπτυξης (341 από τις 461 τιμές). Οι προγνώσεις της RNN_{bias} μεθόδου παρουσιάζονται στο Σχήμα 9.15 για χρονικά βήματα πρόγνωσης t+2, t+4 και t+6, ενώ το Σχήμα 9.16 δείχνει τα διαγράμματα διασποράς των προγνωστικών μεθόδων RNN και RNN_{bias} για όλα τα χρονικά βήματα πρόγνωσης. Ο Πίνακας 9.29 παρουσιάζει τους μήνες της υδρολογικής λεκάνης που πλήττονται από ξηρασία ενώ τα στατιστικά και ποιοτικά κριτήρια των μεθόδων πρόγνωσης (RNN και RNN_{bias}) του Πίνακα 9.30 αποδεικνύουν ότι η μέθοδος RNN_{bias} βελτιώνει την πρόγνωση των επιφανειακών τιμών του SPI-24 στην υδρολογική λεκάνη του Πηγείου ποταμού για χρονικά βήματα πρόγνωσης έως έξι μήνες μπροστά. Έτσι, η μέθοδος της διόρθωσης της μεροληψίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για επιχειρησιακή πρόγνωση του SPI-24 μέχρι έξι μήνες μπροστά, αφού ο δείκτης κρίσιμης επιτυχίας CSI είναι μεγαλύτερος από 0.5 αλλά προσοχή πρέπει να δοθεί στον μεγάλο αριθμό των λανθασμένων συναγερμών (Πίνακας 9.30). Από τα παραπάνω αποδεικνύεται ότι και οι δύο μέθοδοι RNN και RNN_{bias} μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης της ξηρασίας για επιφανειακές προγνώσεις του SPI-24 στην υπό εξέταση υδρολογική λεκάνη.

Πίνακας 9.29. Συνολικοί μήνες ξηρασίας για διάφορες κλάσεις του SPI-24 στην υδρολογική λεκάνη Πηγείου ποταμού και μήνες ξηρασίας ως ποσοστό των συνολικών 461 μηνών.

	Ακραία δριμύτητα	Δριμεία δριμύτητα	Μέτρια δριμύτητα	Συνολική δριμύτητα
Παρατηρούμενοι μήνες ξηρασίας	3 0.65%	10 2.17%	34 7.38%	47 10.20%
RNN _{t+1} μήνες ξηρασίας	2 0.43%	9 1.95%	33 7.16%	44 9.54%
RNN _{bias_t+1} μήνες ξηρασίας	2 0.43%	11 2.39%	31 6.72%	44 9.54%
RNN _{t+2} μήνες ξηρασίας	1 0.22%	10 2.17%	35 7.59%	46 9.98%
RNN _{bias_t+2} μήνες ξηρασίας	1 0.22%	11 2.39%	36 7.81%	48 10.41%
RNN _{t+3} μήνες ξηρασίας	0 0.00%	10 2.17%	35 7.59%	45 9.76%
RNN _{bias_t+3} μήνες ξηρασίας	2 0.43%	10 2.17%	37 8.03%	49 10.63%
RNN _{t+4} μήνες ξηρασίας	0 0.00%	10 2.17%	36 7.81%	46 9.98%
RNN _{bias_t+4} μήνες ξηρασίας	2 0.43%	10 2.17%	38 8.24%	50 10.85%
RNN _{t+5} μήνες ξηρασίας	0 0.00%	9 1.95%	29 6.29%	38 8.24%
RNN _{bias_t+5} μήνες ξηρασίας	0 0.00%	11 2.39%	33 7.16%	44 9.54%
RNN _{t+6} μήνες ξηρασίας	0 0.00%	10 2.17%	21 4.56%	31 6.72%
RNN _{bias_t+6} μήνες ξηρασίας	0 0.00%	12 2.60%	30 6.51%	42 9.11%



Σχήμα 9.15. Πρόγνωση επιφανειακών τιμών SPI-24 υδρολογικής λεκάνης Πηνειού ποταμού με τις μεθόδους RNN και RNN_{bias} για χρονικό βήμα πρόγνωσης α) t+2, β) t+4, και γ) t+6.

9.4. Συμπεράσματα συστήματος έγκαιρης προειδοποίησης ξηρασίας

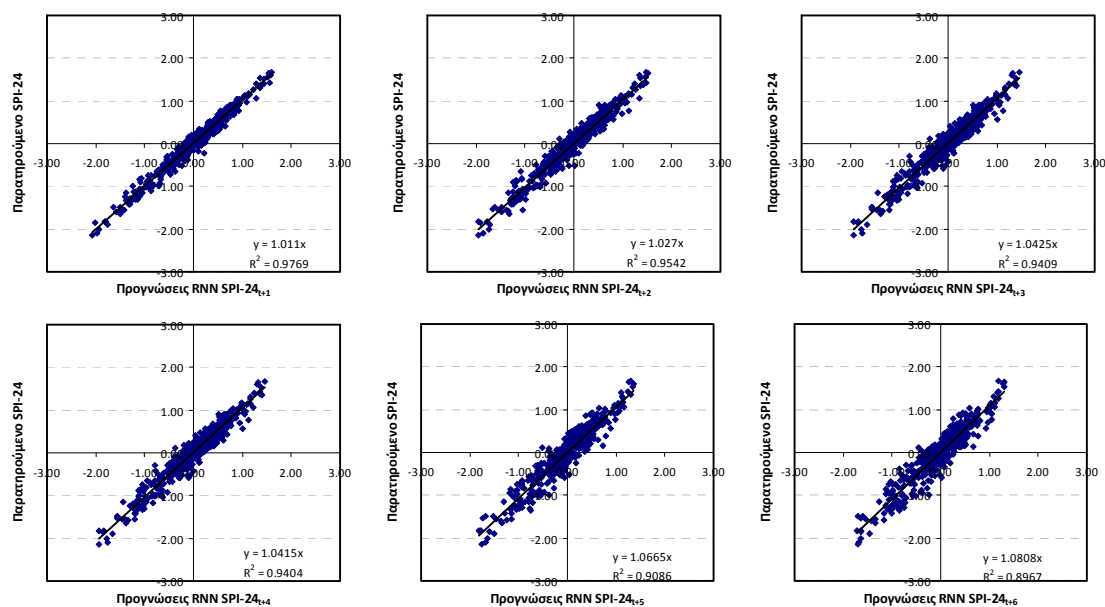
Η μεθοδολογία χωροχρονικής πρόγνωσης συνδέθηκε με την καλύτερη μεθοδολογία χωρικής παρεμβολής για τη δημιουργία ψηφιακών χαρτών διαστάσεως 1-km του δείκτη SPI για χρονικές κλίμακες 3-month, 6-month, 9-month, 12-month και 24-month. Το υβριδικό σύστημα (χωροχρονική πρόγνωση και χωρική παρεμβολή) έγκαιρης προειδοποίησης αξιολογήθηκε τόσο για την εκτίμηση της επιφανειακών τιμών των προγνώσεων του SPI όσο και με τη σύγκριση των παραγόμενων ψηφιακών προγνωστικών χαρτών ξηρασίας.

Πίνακας 9.30. Στατιστικά ποσοτικά και ποιοτικά αποτελέσματα επιφανειακών τιμών πρόγνωσης SPI-24 υδρολογικής λεκάνης Πηνειού ποταμού.

	RNN t+1	RNN _{bias} t+1	Pers.	RNN t+2	RNN _{bias} t+2	Pers.	RNN t+3	RNN _{bias} t+3	Pers.
<i>Ποσοτικά στατιστικά κριτήρια</i>									
Eff	0.98	0.98	0.93	0.95	0.95	0.85	0.94	0.94	0.78
R	0.99	0.99	0.96	0.98	0.98	0.93	0.97	0.97	0.89
RMSE	0.11	0.10	0.18	0.15	0.15	0.27	0.17	0.17	0.32
MAE	0.08	0.08	0.14	0.12	0.12	0.21	0.14	0.14	0.25
<i>Ποιοτικά κριτήρια αξιολόγησης συμβάντων ξηρασίας (SPI<-1)</i>									
A	40	40	40	38	41	36	39	42	34
C	4	4	7	7	7	11	6	7	13
B	7	7	7	10	7	12	10	7	15
D	410	410	407	406	406	402	406	405	399
Accuracy	0.98	0.98	0.97	0.96	0.97	0.95	0.97	0.97	0.94
Bias score	0.94	0.94	1.00	0.94	1.00	0.98	0.92	1.00	0.96
POD	0.85	0.85	0.85	0.79	0.85	0.75	0.80	0.86	0.69
FAR	0.09	0.09	0.15	0.16	0.15	0.23	0.13	0.14	0.28
POFD	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.01	0.02	0.03
CSI	0.78	0.78	0.74	0.69	0.75	0.61	0.71	0.75	0.55
HK	0.84	0.84	0.83	0.77	0.84	0.72	0.78	0.84	0.66
OR	586	586	332	220	340	110	264	347	70
	RNN t+4	RNN _{bias} t+4	Pers.	RNN t+5	RNN _{bias} t+5	Pers.	RNN t+6	RNN _{bias} t+6	Pers.
<i>Ποσοτικά στατιστικά κριτήρια</i>									
Eff	0.94	0.94	0.69	0.91	0.91	0.60	0.89	0.90	0.52
R	0.97	0.97	0.85	0.95	0.95	0.81	0.95	0.95	0.77
RMSE	0.17	0.17	0.38	0.21	0.21	0.43	0.22	0.22	0.47
MAE	0.14	0.14	0.30	0.17	0.17	0.33	0.18	0.17	0.36
<i>Ποιοτικά κριτήρια αξιολόγησης συμβάντων ξηρασίας (SPI<-1)</i>									
A	39	42	31	30	35	26	25	32	24
C	7	8	16	8	9	21	6	10	23
B	10	7	18	17	12	21	22	15	23
D	405	404	396	406	405	393	408	404	391
Accuracy	0.96	0.97	0.93	0.95	0.95	0.91	0.94	0.95	0.90
Bias score	0.94	1.02	0.96	0.81	0.94	1.00	0.66	0.89	1.00
POD	0.80	0.86	0.63	0.64	0.74	0.55	0.53	0.68	0.51
FAR	0.15	0.16	0.34	0.21	0.20	0.45	0.19	0.24	0.49
POFD	0.02	0.02	0.04	0.02	0.02	0.05	0.01	0.02	0.06
CSI	0.70	0.74	0.48	0.55	0.63	0.38	0.47	0.56	0.34
HK	0.78	0.84	0.59	0.62	0.72	0.50	0.52	0.66	0.46
OR	226	303	43	90	131	23	77	86	18

Ιστορικά ακραία και δριμύ γεγονότα ξηρασίας επιλέχτηκαν για τη θεματική απεικόνιση των παραγόμενων ψηφιακών χαρτών πρόγνωσης. Η σύγκριση των προγνωστικών χαρτών έγινε με τους αντίστοιχους χάρτες των παρατηρημένων τιμών του SPI που προέκυψαν από τη μέθοδο βέλτιστης παρεμβολής simple kriging με μεταβαλλόμενα τοπικά μέσα και με μοντέλο παλινδρόμησης (SKIm_R). Ποσοτικά και ποιοτικά στατιστικά κριτήρια ελέγχου της πρόγνωσης για βραχυπρόθεσμες και μεσοπρόθεσμες δράσεις εκτιμήθηκαν για την αξιολόγηση της προτεινόμενης υβριδικής μεθοδολογίας (χωροχρονική πρόγνωση και χωρική παρεμβολή προγνώσεων) στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού Θεσσαλίας. Τα γενικά αποτελέσματα που προκύπτουν είναι ότι το καταναμημένο ψηφιακό υβριδικό σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης της ξηρασίας προσομοιώνει ικανοποιητικά και την χωρική έκταση και την δριμύτητα της ξηρασίας για τα αναγνωρισμένα χρονικά διαστήματα πρόγνωσης του SPI

και κλίμακες υπολογισμού 3-, 6-, 9-, 12-, και 24-μηνών. Μία μικρή όμως υποεκτίμηση της δριμύτητας και της έκτασης εμφανίζεται όσο μεγαλώνει το χρονικό βήμα πρόγνωσης.



Σχήμα 9.16. Διαγράμματα διασποράς επιφανειακών τιμών SPI-24 υδρολογικής λεκάνης Πηνειού ποταμού για χρονικά βήματα πρόγνωσης t+1, t+2, t+3, t+4, t+5 και t+6 με τη μέθοδο RNN.

Η σύγκριση του υβριδικού συστήματος στην εκτίμηση των επιφανειακών τιμών των προγνώσεων του SPI με τις παρατηρημένες επιφανειακές τιμές SPI της υδρολογικής λεκάνης του Πηνειού ποταμού δείχνει και πάλι την αξιοπιστία των αναγνωρισμένων χρονικών βημάτων πρόγνωσης του SPI. Μία μικρή όμως υποεκτίμηση των παρατηρούμενων επιφανειακών τιμών του SPI παρατηρείται για μεγάλα χρονικά βήματα πρόγνωσης. Για το λόγο αυτό οι επιφανειακές τιμές των προγνώσεων του SPI διορθώθηκαν με γραμμική παλινδρόμηση για την αποκατάσταση της μεροληψίας των προγνώσεων (bias correction method). Η εφαρμογή της τεχνικής αυτής κατορθώνει να δώσει αξιόπιστες και αμερόληπτες επιφανειακές προγνώσεις του SPI. Έτσι το υβριδικό σύστημα πρόγνωσης της ξηρασίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιχειρησιακά για επιφανειακές προγνώσεις του SPI-3 ενός μήνα μπροστά, του SPI-6 δύο μήνες μπροστά, του SPI-9 τρεις μήνες μπροστά, του SPI-12 τέσσερις μήνες μπροστά και του SPI-24 έξι μήνες μπροστά. Όπως δείχνει ο δείκτης κρίσιμης επιτυχίας CSI των προγνώσεων μπορεί Ένα επίσης σημαντικό συμπέρασμα που προέκυψε από την εφαρμογή συστήματος πρόγνωσης και παρακολούθησης στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού είναι ότι για την εκτίμηση των επιφανειακών τιμών SPI της λεκάνης πρέπει πρώτα να ακολουθείται ο υπολογισμός του SPI σημειακά και μετά να εκτιμούνται οι επιφανειακές τιμές της υδρολογικής λεκάνης ως μέση τιμή των παραγόμενων ψηφιακών χαρτών. Η διαδικασία υπολογισμού της επιφανειακής βροχόπτωσης πρώτα και μετά υπολογισμό του SPI ανά λεκάνη απορροής πρέπει να αποφεύγεται αφού δημιουργεί περισσότερα γεγονότα ξηρασίας από τα παρατηρούμενα (είναι στη λογική σχεδίασης του SPI που προσαρμόζεται στην κανονική κατανομή) και αγνοεί την περιοχική εξάπλωση (areal extent) της ξηρασίας που είναι ένα βασικό χαρακτηριστικό της.

10. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ**10.1. Γενικά συμπεράσματα διατριβής**

Στην παρούσα διατριβή παρουσιάζεται μια ολοκληρωμένη προσέγγιση της χωροχρονικής πρόγνωσης και προσομοίωσης της ξηρασίας. Η όλη προσέγγιση έγινε από την οπτική γωνία της επιχειρησιακής εφαρμογής που προϋποθέτει εύλογο υπολογιστικό φόρτο και αξιόπιστες χωρικές και χρονικές προσομοιώσεις και προγνώσεις της ξηρασίας. Για το λόγο αυτό, το σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης και παρακολούθησης της ξηρασίας βασίστηκε στον μετεωρολογικό δείκτη ξηρασίας SPI που υπολογίστηκε σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες και χρειάζεται μόνο μηνιαία δεδομένα βροχόπτωσης. Αυτή η ιδιαιτερότητα υπολογισμού του δείκτη SPI τον καθιστά πολύ ευέλικτο για επιχειρησιακές εφαρμογές προγραμμάτων ξηρασίας, αφού μπορεί να διακρίνει τύπους ξηρασίας (μετεωρολογική, γεωργική, υδρολογική και ξηρασία υδατικών συστημάτων) αρκεί να προσδιοριστεί η χρονική κλίμακα υπολογισμού του δείκτη αυτού για τον αντίστοιχο τύπο ξηρασίας. Η εφαρμογή του SPI για αναγνώριση υδρολογικής ξηρασίας και ξηρασίας υδατικών συστημάτων αποδεικνύει ότι μπορούν οι μετεωρολογικοί δείκτες που υπολογίζονται σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες να αναγνωρίσουν και άλλους τύπους ξηρασίας εκτός της μετεωρολογικής. Έτσι, στην παρούσα διατριβή, ο δείκτης SPI υπολογισμένος για χρονικές κλίμακες 3-μηνών, 6-μηνών, 9-μηνών, 12-μηνών και 24-μηνών επιλέχτηκε για την χωροχρονική ανάλυση, προσομοίωση και πρόγνωση ξηρασίας στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού.

Η εφαρμογή των οκτώ (8) χωρικών μεθόδων παρεμβολής του δείκτη ξηρασίας SPI αξιολογεί το χωρικό και χρονικό σφάλμα της κάθε μεθόδου σε σχέση με τις άλλες χωρικές μεθοδολογίες. Η χωροχρονική εφαρμογή των χωρικών μεθόδων στο SPI έδωσε παραπλήσια αποτελέσματα για τους σταθμούς ανάπτυξης και σταθμούς πιστοποίησης. Η μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής simple kriging με μεταβαλλόμενα τοπικά μέσα και με μοντέλο παλινδρόμησης SKIm_R προσομοιώνει καλύτερα την χωρική κατανομή του δείκτη ξηρασίας SPI από τις άλλες επτά χωρικές μεθόδους στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού. Τα αποτελέσματα των σταθμών ανάπτυξης με την τεχνική cross-validation έδειξαν τη σαφή υπεροχή της χωρικής μεθόδου SKIm_R για χωροχρονική εφαρμογή στην υδρολογική λεκάνη. Η εφαρμογή των χωρικών μεθόδων για χωροχρονική προσομοίωση του δείκτη ξηρασίας SPI στους σταθμούς πιστοποίησης έδειξε ότι αν και όλες οι μέθοδοι παρουσιάζουν παραπλήσια ποσοτικά και ποιοτικά στατιστικά χαρακτηριστικά, διαπιστώνεται μία ελαφριά υπεροχή της μεθόδου SKIm_R. Ιστορικά γεγονότα ξηρασίας επιλέχτηκαν για την θεματική απεικόνιση του δείκτη ξηρασίας SPI για αντιπροσωπευτικές χρονικές κλίμακες υπολογισμού στην υδρολογική λεκάνη. Οι παραγόμενοι ψηφιακοί χάρτες με μέγεθος φατνίου 1-km που υπολογίστηκαν με τις χωρικές μεθόδους παρουσιάζουν παραπλήσιες επιφανειακές τιμές (μέση τιμή των ψηφιακών χαρτών) αλλά διαφορετική χωρική κατανομή. Η χωρική κατανομή των γεγονότων ξηρασίας είναι αρκετά διαφορετική για τις μεθόδους KED, TP και IDW και παρόμοια για τις άλλες πέντε μεθόδους με διαφορετική όμως δριμύτητα και έκταση ανά κλάση του δείκτη SPI. Το γενικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι οι χωρικές μεθοδολογίες μπορούν να εφαρμοστούν για χωροχρονική προσομοίωση του δείκτη ξηρασίας σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες αλλά πρέπει να δοθεί προσοχή στην επιλογή της χωρικής μεθόδου αφού το χωρικό σφάλμα που παρατηρείται είναι μεγάλο και μεταβάλλεται με το χρονικό βήμα εφαρμογής. Τα αποτελέσματα της χρονικής εφαρμογής των χωρικών μεθόδων στους σταθμούς πιστοποίησης δείχνουν ότι οι μέθοδοι αυτές προσομοιώνουν αρκετά ικανοποιητικά τη χρονική εξέλιξη του δείκτη ξηρασίας SPI αλλά με μεγάλο χρονικό και χωρικό σφάλμα. Η μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής simple

kriging με μεταβαλλόμενα τοπικά μέσα και με μοντέλο παλινδρόμησης SKIm_R προσομοιώνει την χωρική κατανομή του δείκτη ξηρασίας SPI πολύ ικανοποιητικά στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού.

Σημαντική βαρύτητα δόθηκε στη χωροχρονική βραχυπρόθεσμη (1-2 μήνες μπροστά) και μεσοπρόθεσμη πρόγνωση (3-6 μήνες μπροστά) του SPI, ώστε οι αντίστοιχες δραστηριότητες και δράσεις να μπορούν να υλοποιηθούν και να αντιμετωπιστούν οι επιπτώσεις που δημιουργεί η ξηρασία. Η εφαρμογή του υβριδικού χωροχρονικού μοντέλου πρόγνωσης του SPI που συνδυάζει τις χρονικές προγνώσεις του γενικευμένου επαναληπτικού χρονικού μοντέλου (Recursive Artificial Neural Networks, RANN) με ένα χωρικό μοντέλο που στηρίζεται σε αναδρομικά νευρωνικά δίκτυα τύπου Elman (Recurrent Neural Networks, RNN) δείχνει ότι όσο αυξάνει η κλίμακα υπολογισμού του SPI τόσο αυξάνει και η ικανότητα των χωροχρονικών αναδρομικών νευρωνικών δικτύων στην πρόγνωση επεισοδίων ξηρασίας. Αυτό οφείλεται στο ότι το σήμα (χρονοσειρά) του SPI γίνεται πιο ομαλό και δεν παρουσιάζει απότομες αλλαγές κατάστασης (π.χ. μετάβαση από ξηρές σε υγρές καταστάσεις σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα). Επίσης, η συσχέτιση των χρόνων υστέρησης μεγαλώνει για το χρονικό βήμα πρόγνωσης όσο αυξάνει η κλίμακα υπολογισμού του SPI που διευκολύνει την πρόγνωση του δείκτη αυτού. Έτσι, η υβριδική χωροχρονική μέθοδος RNN με βάση το δείκτη κρίσιμης επιτυχίας CSI μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αξιόπιστες και επιχειρησιακές προγνώσεις του SPI-3 μέχρι ένα μήνα μπροστά ($SPI-3_{t+1}$), του SPI-6 μέχρι δύο μήνες μπροστά ($SPI-6_{t+2}$), του SPI-9 μέχρι τρεις μήνες μπροστά ($SPI-9_{t+3}$), του SPI-12 μέχρι τέσσερις μήνες μπροστά ($SPI-12_{t+4}$), και του SPI-24 μέχρι έξι μήνες μπροστά ($SPI-24_{t+6}$).

Η αυτοματοποιημένη διαδικασία, που αναπτύχθηκε στην παρούσα διατριβή, επιτρέπει στον χρήστη να εκτιμήσει το χωρικό σφάλμα και να επιλέξει τη χωρική μεθοδολογία που δίνει τα καλύτερα στατιστικά κριτήρια. Το αυτοματοποιημένο σύστημα περιέχει απλές μη γεωστατιστικές μεθόδους (μέθοδοι αντίστροφης απόστασης IDW, και πολυγώνων Thiessen TP) γεωστατιστικές μεθόδους (μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής Ordinary kriging OK, Simple kriging SK) και συνδυαστικές μεθόδους που ενσωματώνουν δευτερογενείς πληροφορίες γεωγραφικού αναγλύφου και γεωγραφικών συντεταγμένων (Kriging with External Drift KED, Ordinary kriging με μοντέλο παλινδρόμησης RK, Simple kriging με μεταβαλλόμενα τοπικά μέσα και με μοντέλο παλινδρόμησης με υψόμετρο SKIm, Simple kriging με μεταβαλλόμενα τοπικά μέσα και μοντέλο παλινδρόμησης με υψόμετρο και χωρικές συντεταγμένες SKIm_R). Δίνεται, επίσης, η δυνατότητα υπολογισμού επιφανειακών (ή περιοχικών) τιμών του SPI ανά υδρολογική λεκάνη (ή υπολεκάνη) που παρέχεται από τον χρήστη. Επίσης, η δημιουργία των ψηφιακών (raster) χαρτών δίνει τη δυνατότητα για επιπλέον χωρική ανάλυση στα πιο συνηθισμένα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών και εξαγωγή χωρικών και στατιστικών χαρακτηριστικών, όπως η παρακολούθηση της χωρικής και χρονικής εξάπλωσης της ξηρασίας, ο υπολογισμός της δριμύτητας της ξηρασίας ανά κλάση του SPI καθώς και της κρίσιμης έκτασης που πλήττεται από ξηρασία. Το σύστημα μπορεί να εφαρμοστεί και ως σύστημα παρακολούθησης του SPI αλλά και ως σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης με τη χρήση των προγνώσεων του υβριδικής χωροχρονικής μεθοδολογίας. Η εφαρμογή του συστήματος έγκαιρης προειδοποίησης της ξηρασίας στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού δίνει αξιόπιστες μεσοπρόθεσμες προγνώσεις των χαρακτηριστικών της ξηρασίας (δριμύτητα, διάρκεια και έκταση) για μεγαλύτερες κλίμακες υπολογισμού του SPI (SPI-9, SPI-12, SPI-24), ενώ για μικρότερες κλίμακες του SPI (SPI-3, SPI-6) αξιόπιστες προγνώσεις υπάρχουν μόνο για βραχυπρόθεσμα διαστήματα πρόγνωσης.

10.2. Ειδικά συμπεράσματα

Ειδικότερα, η μελέτη έδειξε τα παρακάτω ειδικά συμπεράσματα ως προς την τεχνική ανάπτυξης της μεθοδολογίας:

- Ο μετεωρολογικός δείκτης SPI μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε επιχειρησιακά προγράμματα παρακολούθησης της ξηρασίας, αφού μπορεί να αναγνωρίσει διάφορους τύπους ξηρασίας λόγω της πολλαπλής κλίμακας υπολογισμού του.
- Η στοχαστική προσομοίωση της μηνιαίας βροχόπτωσης και ο έλεγχος των διάμεσων τιμών των παραμέτρων των συνθετικών χρονοσειρών του δείκτη SPI δείχνει ότι τα δεδομένα της βροχόπτωσης είναι αρκετά για αξιόπιστες εκτιμήσεις του SPI και την προσαρμογή των παραμέτρων στις βέλτιστες τιμές τους.
- Το χωρικό σφάλμα μιας χωρικής μεταβλητής, όπως είναι το SPI, πρέπει πάντοτε να υπολογίζεται και να ελαχιστοποιείται τουλάχιστον με την τεχνική της διασταυρωμένης επιβεβαίωσης των προβλέψεων (cross-validation ή jack-knifing) με τη χρήση πολλών μεθόδων χωρικής παρεμβολής.
- Η εφαρμογή των χωρικών μεθόδων για χρονική εκτίμηση χρονοσειρών SPI σε ανεξάρτητους σταθμούς πιστοποίησης πρέπει να αποφεύγεται λόγω της συσσώρευσης του χωρικού και χρονικού σφάλματος προσομοίωσης
- Για την εκτίμηση των επιφανειακών τιμών SPI μιας υδρολογικής λεκάνης πρέπει πρώτα να υπολογίζεται το SPI σημειακά και μετά να εκτιμούνται οι επιφανειακές τιμές της υδρολογικής λεκάνης ως μέση τιμή των παραγόμενων ψηφιακών χαρτών. Η διαδικασία υπολογισμού της επιφανειακής βροχόπτωσης πρώτα και μετά υπολογισμό του SPI ανά λεκάνη απορροής πρέπει να αποφεύγεται αφού δημιουργεί περισσότερα γεγονότα ξηρασίας από τα παρατηρούμενα και αγνοεί την περιοχική εξάπλωση (areal extent) της ξηρασίας που είναι ένα βασικό χαρακτηριστικό της.
- Το μη παραμετρικό Gamma test είναι ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο σε προβλήματα πρόγνωσης και παλινδρόμησης, αφού υπολογίζει το μέσο τετραγωνισμένο σφάλμα (MSE) μιας υποτιθέμενης ομαλής συνάρτησης με ορισμένες πρώτες και δεύτερες παραγώγους. Η τιμή αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κριτήριο ελέγχου γενίκευσης μίας μεθόδου της μηχανικής μάθησης. Στα πλεονεκτήματα του εντάσσονται, επίσης, ο ανεξάρτητος υπολογισμός του βέλτιστου μητρώου εισόδου για προβλήματα πρόγνωσης (ή παλινδρόμησης) που δεν σχετίζεται με την μέθοδο πρόγνωσης που εφαρμόστηκε και ο προσδιορισμός του αριθμού των δεδομένων για αξιόπιστες και σταθερές προγνώσεις. Τέλος, το Gamma test αποτελεί από μόνο του ένα κριτήριο διακοπής της εκπαίδευσης ενός μη παραμετρικού μοντέλου, όπως είναι τα νευρωνικά δίκτυα. Έτσι αποφεύγεται η χρήση τριών σετ δεδομένων για τη γενίκευση των νευρωνικών δικτύων (σετ εκπαίδευσης, σετ ελέγχου και σετ πιστοποίησης) αλλά μόνο δύο σετ (ένα εκπαίδευσης και ένα πιστοποίησης) όταν τα δεδομένα είναι περιορισμένα.
- Η τεχνική της Bayesian regularization εμφανίζει ελαφρώς καλύτερες ικανότητες γενίκευσης από την τεχνική της τεχνικής της γρήγορης διακοπής για την εκπαίδευση των τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Ο συνδυασμός της Bayesian regularization με την τεχνική του εμφωλιάσματος (bagging) αποτελεί μία αξιόπιστη λύση για την εκπαίδευση και γενίκευση των τεχνητών νευρωνικών δικτύων.
- Οι μέθοδοι Quasi-Newton αποτελούν μία γρήγορη και αξιόπιστη λύση εκπαίδευσης νευρωνικών δικτύων. Ο συνδυασμός των τεχνικών γενίκευσης και η ένδειξη του μέσου τετραγωνισμένου σφάλματος από το Gamma test εξασφαλίζουν την ολική σύγκλιση των αλγορίθμων Quasi-Newton.

- Η σύγκριση των δύο χρονικών μεθοδολογιών πρόγνωσης δείχνει ότι η επαναληπτική μέθοδος πρόγνωσης πολλαπλών χρονικών βημάτων πρόγνωσης είναι καλύτερη από την ευθεία πρόγνωση πολλαπλών χρονικών βημάτων. Επισημαίνεται ότι αυτό το συμπέρασμα προκύπτει από την παρούσα εφαρμογή. Πάντως, και οι δύο μεθοδολογίες πρέπει να ακολουθούνται για τη διαπίστωση της πιο αποτελεσματικής τεχνικής πρόγνωσης.
- Σε προβλήματα πρόγνωσης ακραίων φαινομένων (ξηρασία, πλημμύρες) πρέπει πάντα να υπολογίζεται ο πίνακας ποιοτικής αξιολόγησης της εξεταζόμενης μεταβλητής (contingency table). Η εφαρμογή των ποσοτικών στατιστικών κριτηρίων (Eff, RMSE, MAE) πρόγνωσης δείχνει ότι για όλα τα χρονικά βήματα πρόγνωσης η πρόγνωση βελτιώνεται. Για αξιόπιστες όμως και επιχειρησιακές εφαρμογές των μεθόδων πρόγνωσης, ποιοτικά κριτήρια που στηρίζονται στον πίνακα αξιολόγησης πρόγνωσης επεισοδίων της μεταβλητής (π.χ. SPI, ξηρές περίοδοι, πλημμύρες) πρέπει να υπολογίζονται. Η παρούσα διατριβή επιλέγει τελικά το δείκτη κρίσιμης επιτυχίας CSI ως κριτήριο για αξιόπιστες και επιχειρησιακές εφαρμογές πρόγνωσης.
- Η ιδέα του προσδιοριστικού ορίου πρόγνωσης, που είναι απλά το χρονικό σημείο πρόγνωσης (lead time) μετά το οποίο οι προγνώσεις είναι πιθανόν να είναι λανθασμένες παρά σωστές, παρέχει πληροφορίες σχετικά με τη μεθοδολογία πρόγνωσης που ακολουθείται και δίνει οδηγίες για το πότε πιθανοθεωρητική (probabilistic) προσέγγιση πρέπει να ακολουθείται και πότε προσδιοριστική (deterministic).
- Για τη μελέτη ακραίων φαινομένων οι σωστές μη-επιτυχίες πρόγνωσης του ποιοτικού πίνακα αξιολόγησης των αποτελεσμάτων πρόγνωσης πρέπει να αγνοούνται.
- Η μέθοδος διόρθωσης της μεροληψίας των επιφανειακών τιμών πρόγνωσης της εξεταζόμενης μεταβλητής πρέπει να εξετάζεται, και να εφαρμόζεται, αν απαιτείται για αξιόπιστες και επιχειρησιακές προγνώσεις ιδίως για μεσοπρόθεσμα διαστήματα πρόγνωσης.
- Τέλος, το υβριδικό χωροχρονικό μοντέλο πρόβλεψης ξηρασίας για να λειτουργήσει επιχειρησιακά προϋποθέτει την άμεση συλλογή δεδομένων βροχόπτωσης και γρήγορους υπολογισμούς ώστε να δώσουν μία γρήγορη πρόγνωση. Είναι επίσης αυτονόητο ότι το σύστημα θα λειτουργεί αυτόματα (on line application) ώστε να χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση της ξηρασίας και την έγκαιρη προειδοποίηση των επερχόμενων ξηρασιών με τη χρήση του δείκτη SPI.

10.3. Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Για την επιτυχημένη ικανοποιητική κάλυψη ενός τόσο διευρυμένου αντικειμένου, η έρευνα στράφηκε προς πολλαπλές κατευθύνσεις, που δεν ήταν δυνατό να διερευνηθούν στην πλήρη λεπτομέρειά τους. Ωστόσο, η παρούσα προσέγγιση συντέλεσε στο να αποκτηθεί μια ολοκληρωμένη εικόνα του προβλήματος, για αρκετές συνιστώσες του οποίου μπορούν να εντοπιστούν σημεία για περαιτέρω διερεύνηση. Ενδεικτικά παρακάτω αναφέρονται οι τεχνικές και οι γενικές συνιστώσες:

- Η σύγκριση της χρονικής μεθοδολογίας πρόγνωσης με άλλες μεθόδους της μηχανικής μάθησης.
- Η εφαρμογή ενός χωροχρονικού μοντέλου πρόγνωσης που ενσωματώνει ταυτόχρονα χρονικές και χωρικές προγνώσεις.
- Η σύγκριση των χωρικών αναδρομικών νευρωνικών δικτύων τύπου Elman με άλλα αναδρομικά νευρωνικά δίκτυα.

- Η εφαρμογή της χωροχρονικής μεθοδολογίας ανά περιοχική ομάδα σταθμών βροχόπτωσης χρησιμοποιώντας γραμμικές και μη-γραμμικές τεχνικές ομαδοποίησης και συστοίχισης.
- Η εφαρμογή της θεωρίας των δυναμικών συστημάτων και της χαοτικής συμπεριφοράς των χρονοσειρών του SPI.
- Η ενσωμάτωση και άλλων δεικτών παρακολούθησης υδρομετεωρολογικών και υδρολογικών παραμέτρων στο αυτοματοποιημένο σύστημα παρακολούθησης της ξηρασίας.
- Η ανάπτυξη χωροχρονικών μοντέλων πρόγνωσης για άλλους δείκτες ξηρασίας και η ενσωμάτωσή τους στο σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης της ξηρασίας.
- Η βελτιστοποίηση των βροχομετρικού δικτύου της περιοχής μελέτης για αξιόπιστες και επιχειρησιακές χωροχρονικές προγνώσεις ξηρασίας.
- Εύρεση της αβεβαιότητας της χωροχρονικής πρόγνωσης με χρήση στοχαστικά παραγόμενων χρονοσειρών βροχόπτωσης.
- Η πιθανοθεωρητική (probabilistic) προσέγγιση και ανάλυση της ξηρασίας και η σύγκριση της με τις προσδιοριστικές μεθόδους.
- Η εκτίμηση της επικινδυνότητας (risk assessment) των χαρακτηριστικών της ξηρασίας (δριμύτητα, διάρκεια και έκταση) για εύρεση της περιόδου επαναφοράς των ακραίων τιμών που θα βοηθήσει στο σχεδιασμό υδροτεχνικών έργων και στις δράσεις αντιμετώπισης της ξηρασίας.
- Ο καθορισμός δράσεων στην περιοχή μελέτης και η κατάρτιση σχεδίων διαχείρισης και αντιμετώπισης της ξηρασίας.
- Η εφαρμογή του συστήματος παρακολούθησης, πρόγνωσης και ελέγχου της ξηρασίας για βραχυπρόθεσμες και μεσοπρόθεσμες δράσεις και εφαρμογές για μεγαλύτερη κλίμακα εφαρμογής, π.χ. σε ολόκληρο τον Ελλαδικό χώρο, με στόχο ένα εθνικό ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης της ξηρασίας. Σημειώνεται ότι για την εφαρμογή του συστήματος έγκαιρης προειδοποίησης της ξηρασίας σε άλλη περιοχή μελέτης ή σε μεγαλύτερη κλίμακα, πρέπει να εξεταστεί από την αρχή ώστε να διαπιστωθεί η αξιοπιστία του.
- Η επιχειρησιακή εφαρμογή του όλου συστήματος στην περιοχή μελέτης με τη χρήση των βροχομετρικών στοιχείων της Εθνικής Τράπεζας Υδρολογικής και Μετεωρολογικής Πληροφορίας (ΕΤΥΜΠ) σε πραγματικό χρόνο και τη δημοσίευση των προγνωστικών και παρατηρούμενων ψηφιακών χαρτών ξηρασίας στο διαδικτυακό Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφορίας της ΕΤΥΜΠ.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abebe, A., and G. Foerch, 2008. Stochastic simulation of the severity of hydrological drought, *Water and Environment Journal*, 22(1), 2-10.
- Abraham, A., 2004. Meta learning evolutionary artificial neural networks, *Neurocomputing*, 56, 1-38.
- Abrahart, R.J., 2003. Neural network rainfall-runoff forecasting based on continuous resampling, *Journal of Hydroinformatics*, 5(1), 51-61.
- Abrahart, R.J., L.M. See, and D.P. Solomatine, (eds.) 2008. *Practical Hydroinformatics: Computational Intelligence and Technological Developments in Water Applications*, Springer-Verlag, Berlin.
- Abrahart, R.J., P.E. Kneale, and L.M. See, (eds.) 2004. *Neural Networks for Hydrological Modeling*, Taylor and Francis Group plc, London, UK.
- Adya, M., and F. Collopy, 1998. How effective are neural networks at forecasting and prediction? A review and evaluation, *Journal of Forecasting*, 17, 481-495
- Aha, D., and R., Bankert, 1997, Cloud classification using error-correcting output codes, *Artificial Intelligence Applications: Natural Resources, Agriculture, and Environmental Science*, 11(1), 13-28.
- Aha, D., D. Kibler, and M. Albert, 1991. Instance-based learning algorithms, *Machine Learning*, 6, 37-66.
- Ahmadi, A., D. Han, M. Karamouz and R. Remesan, 2009. Input data selection for solar radiation estimation, *Hydrological Processes*, 23, 2754-2764.
- Ahmed, S. and G. de Marsily, 1987. Comparison of geostatistical methods for estimating transmissivity using data on transmissivity and specific capacity, *Water Resources Research*, 23(9), 1727-1737.
- Akhtari, R., S. Morid, M.H. Mahdian and V. Smakhtin, 2009. Assessment of areal interpolation methods for spatial analysis of SPI and EDI drought indices, *International Journal of Climatology*, 29(1), 135-145.
- Al-Baali, M. 1998b. Numerical Experience with a Class of Self-Scaling Quasi-Newton Algorithms, *Journal of Optimization Theory and Applications*, 96(3), 533-553.
- Al-Baali, M., 1993. Variational quasi-Newton methods for unconstrained optimization, *Journal of Optimization Theory and Applications*, 77(1), 127-143.
- Al-Baali, M., 1998a. Global and superlinear convergence of a restricted class of self-scaling methods with inexact line searches, for convex functions, *Computational Optimization and Applications*, 9(2), 191-203.
- Alijani, B., M. Ghohroudi, and N. Arabi, 2008. Developing a climate model for Iran using GIS, *Theoretical and Applied Climatology*, 92, 103-112.
- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, 1998. *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements*, FAO Irrigation and drainage paper 56, FAO, Rome, Italy.
- Alley, W.M., 1984. The Palmer Drought Severity Index: Limitations and assumptions, *J. Clim. App. Meteor.*, 23, 1100-1109.
- Alpsan, D., M. Towsey, O. Ozdamar, A.C. Tsoi, and D.N. Ghista, 1995. Efficiency of modified backpropagation and optimisation methods on a real-world medical problem, *Neural Networks* 8(6), 945-962.

- American Meteorological Society, (AMS), 1997. Meteorological drought - Policy statement, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78, 847-849.
- American Meteorological Society, (AMS), 2004. Statement on meteorological drought, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85, 771-773.
- Anagnostopoulou, Chr., P. Maheras, Th. Karacostas, and M. Vafiadis, 2003. Spatial and temporal analysis of dry spells in Greece, *Theoretical and Applied Climatology*, 74(1-2), 77-91.
- Anttil, F., and N. Lauzon, 2004. Generalisation for neural networks through data sampling and training procedures, with applications to streamflow predictions, *Hydrology and Earth System Sciences*, 8(5), 940-958.
- Anttil, F., C. Michel, C. Perrin, and V. Adreassian, 2004. A soil moisture index as an auxiliary ANN input for stream flow forecasting, *Journal of Hydrology*, 286, 155-167.
- Andréassian, V., C. Perrin, and C. Michel, 2004. Impact of imperfect potential evapotranspiration knowledge on the efficiency and parameters of watershed models, *Journal of Hydrology*, 286, 19-35.
- Andrei, N., 2007. Scaled memoryless BFGS preconditioned conjugate gradient algorithm for unconstrained optimization, *Optimization Methods and Software*, 22, 561-571.
- Antonopoulos, V.Z., D.M. Papamichail, and K.A. Mitsiou, 2001. Statistical and trend analysis of water quality data for the Strymon River in Greece, *Hydrology and Earth System Sciences*, 5(4), 679-691.
- Apaydin, H., F.K. Sonmez, Y.E. Yildirim, 2004. Spatial interpolation techniques for climate data in the GAP region in Turkey, *Climate Research*, 28, 31-40.
- Araghinejad, S., D.H. Burn, and M. Karamouz, 2006. Long-lead probabilistic forecasting of streamflow using ocean-atmospheric and hydrological predictors, *Water Resources Research*, W03431, doi: 10.1029/2004WR003853.
- Armstrong, J.S., 1984. Forecasting by extrapolation: conclusions from 25 years of research, *Interfaces*, 14, 52-66.
- Armstrong, M., 1998. *Basic Linear Geostatistics*. Springer, Berlin.
- Arnaud, P., C. Bouvier, L. Cisneros, and R. Dominguez, 2002. Influence of rainfall spatial variability on flood prediction, *Journal of Hydrology*, 260, 216-230.
- ASCE Task Committee on Application of Artificial Neural Networks in Hydrology, 2000a. Artificial neural networks in hydrology. I: Preliminary concepts, *Journal of Hydrologic Engineering*, 5(2), 115-123.
- ASCE Task Committee on Application of Artificial Neural Networks in Hydrology, 2000b. Artificial neural networks in hydrology. II: Hydrologic applications, *Journal of Hydrologic Engineering*, 5(2), 124-137.
- Ashraf, M., J.C. Loftis, and K.G. Hubbard, 1997. Application of geostatistics to evaluate partial weather station networks, *Agricultural and Forest Meteorology*, 84, 255-271.
- Aussem, A., F. Murtagh, and M. Sarazin, 1994. Dynamical recurrent neural networks and pattern recognition methods for time series prediction: application to seeing and temperature forecasting in the context of ESO's VLT astronomical weather station, *Vistas in Astronomy*, 38, 357-374.
- Bacanli, U.G., M. Firat, and F. Dikbas, 2009. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System for drought forecasting, *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, 23, 1143-1154, doi: 10.1007/s00477-008-0288-5.
- Barron, A.R., 1994. A comment on "Neural networks: A review from a statistical perspective", *Statistical Science*, 9(1), 33-35.
- Basist, A., G.D. Bell, and V. Meentemeyer, 1994. Statistical relationships between topography and precipitation patterns, *Journal of Climate*, 7(9), 1305-1315.
- Battiti, R., 1992. First- and second-order methods for learning: Between steepest descent and Newton's method, *Neural Computation*, 4, 141-166.

- Battiti, R., and M. Masulli, 1990. BFGS optimization for faster automated supervised learning, *International Neural Network Conference*, 2, 757-760.
- Bechini, L., G. Ducco, M. Donatelli, and A. Stein, 2000. Modelling, interpolation and stochastic simulation in space and time of global solar radiation, *Agric. Ecosyst. Environ.*, 81, 29-42.
- Beersma, J.J., and T.A. Buishand, 2004. Joint probability of precipitation and discharge deficits in the Netherlands, *Water Resources Research*, 40, W12508, doi:10.1029/2004WR003265.
- Beguéría S., Vicente-Serrano S.M., Angulo M. 2010. A multi-scalar global drought data set: the SPEIbase. *Bulletin of the American Meteorological Society*, DOI: 10.1175/2010BAMS2988.1.
- Benichou, P., and O. Lebreton, 1987. Prise en compte de la topographie pour la cartographie des champs pluviométriques statistiques, *La Météorologie*, 19, 23-34.
- Bergman, K.H., H. Sabol, and D. Miskus, 1988. Experimental indices for monitoring global drought conditions. *Proc. 13th Annual Climate Diagnostics Workshop*, Cambridge, U.S. Dept. of Commerce, 190-197.
- Bertolotto, M., S. Di Martino, F. Ferrucci, and T. Kechadi, 2007. Towards a framework for mining and analysing spatio-temporal datasets, *Int. J. Geogr. Inf. Sci.*, 21(8), 895-906.
- Bhalme, H.N., and D.A. Mooley, 1980. Large scale droughts/floods and monsoon circulation, *Mon. Weath. Rev.*, 108, 1197-1211.
- Biau, G., E. Zorita, H. Von Storch, and H. Wackernagel, 1999. Estimation of precipitation by kriging in the EOF space of the sea level pressure field, *Journal of Climate*, 2, 1070-1084.
- Bishop, C.M., 1995. *Neural Networks for Pattern Recognition*, Oxford University Press.
- Blenkinsop, S., and H.J. Fowler, 2007. Changes in drought characteristics for Europe projected by the PRUDENCE regional climate models, *International Journal of Climatology*, 27(12), 1595-1610.
- Bobee, B., and F. Ashkar, 1991. *The Gamma Family and Derived Distributions Applied in Hydrology*, Water Resources Publications, 203 pp.
- Bonacci, O., 1993. Hydrological identification of drought, *Hydrological Processes*, 7, 249-262.
- Bordi, I., and A. Sutera, 2001. Fifty years of precipitation: Some spatially remote teleconnections, *Water Resources Management*, 15, 247-280.
- Bordi, I., K. Fraedrich, M. Petitta, and A. Sutera, 2005. Methods for predicting drought occurrences. *Proc. of the 6th International Conference of the European Water Resources Association*, Menton, France, 7-10 September 2005, 12 pp.
- Bordi, I., S. Frigio, P. Parenti, A. Speranza, and A. Sutera, 2001. The analysis of the Standardized Precipitation Index in the Mediterranean area: regional patterns, *Annali di Geofisica*, 44(5-6), 979-993.
- Boucher, A., K.C. Seto, and A. Journel, 2006. A novel method for mapping land cover changes: incorporating time and space with geostatistics. *IEEE Geosci. Remote*, 44(11), 3427-3435.
- Bowden, G.J., G.C. Dandy, and H.R. Maier, 2005. Input determination for neural network models in water resources applications. Part 1 - background and methodology, *Journal of Hydrology*, 301, 75-92.
- Box, G.E.P., and D.R. Cox, 1964. An analysis of transformation, *Journal of the Royal Statistical Society. Series B*, 26(2), 211-252.
- Box, G.E.P., G.M. Jenkins, and G.C. Reinsel, 2008. *Time Series Analysis: Forecasting and Control*, 4th Edition, John Wiley & Sons.
- Breiman, L., 1996. Bagging predictors, *Mach. Learn.*, 24, 123-140.
- Breiman, L., 2001. Using iterated bagging to debias regressions, *Mach. Learn.*, 45, 262-277.
- Broyden, C.G., J.E. Dennis, and J.J. Moré, 1973. On the local and superlinear convergence of quasi-Newton methods, *J.I.M.A.*, 12, 223-246.

- Brunetti, M., M. Maugeri, T. Nanni, and A. Navarra, 2002. Droughts and extreme events in regional daily Italian precipitation series, *International Journal of Climatology*, 22, 543-558.
- Brutsaert, W., 1972. Moisture availability as it relates to droughts. Proc. 2nd International Symposium in Hydrology: Floods and Droughts, Colorado.
- Burrough, P.A., and R.A., McDonnell, 1998. Principles of Geographical Information Systems, Oxford University Press, Oxford.
- Byrd, R., D. Liu, and J. Nocedal, 1992. On the behavior of Broyden's class of quasi-Newton methods, *SIAM Journal of Optimization*, 6, 1025-1039.
- Byun, H.R., and D.A. Wilhite, 1996. Daily quantification of drought severity and duration, *Journal of Climate*, 5, 1181-1201.
- Byun, H.-R., and D.A. Wilhite, 1999. Objective quantification of drought severity and duration, *Journal of Climate*, 12(9), 2747-2756.
- Cancelliere A., and A.J. Salas, 2004. Drought length properties for periodic-stochastic hydrologic data, *Water Resources Research*, 40(2), W02503.
- Cancelliere, A., G. Di Mauro, B. Bonaccorso, and G. Rossi, 2007. Drought forecasting using the standardized precipitation index, *Water Resources Management*, 21, 801-819.
- Carrera-Hernandez, J.J., and S.J. Gaskin, 2007. Spatiotemporal analysis of daily precipitation and temperature in the Basin of Mexico, *Journal of Hydrology*, 336, 231-249.
- Changnon, S.A., and W.E. Easterling, 1989. Measuring drought impacts: the Illinois case, *Water Resour. Bull.*, 25, 27-42.
- Chatfield, C., 2004. *The Analysis of Time Series*. Chapman & Hall, Boca Raton.
- Chen, K., L. Xu, and H. Chi, 1999. Improved learning algorithms for mixture of experts in multiclass classification, *Neural Networks*, 12, 1229-1252.
- Cheng, T., and J.Q. Wang, 2006. Applications of spatio-temporal data mining and knowledge for forest fire, *ISPRS Technical Commission VII Mid Term Symposium 2006*, Enschede, 148-153.
- Chiew, F.H.A., T.C. Piechota, J.A. Dracup, and T.A. McMahon, 1998. El Nino Southern Oscillation and Australian rainfall, streamflow and drought: Links and potential for forecasting, *Journal of Hydrology*, 204(1-4), 138-149.
- Chiles, J.P., and P. Delfiner, 1999. *Geostatistics. Modeling Spatial Uncertainty*, Wiley Series in Probability and Statistics, John Wiley and Sons, New York.
- Choi, K.M., H.L. Yu, and M.L. Wilson, 2007. Spatiotemporal statistical analysis of influenza mortality risk in the state of California during the period 1997-2001, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 22, 15-25.
- Christakos, G., 1990. A Bayesian/maximum-entropy view to the spatial estimation problem, *Mathematical Geology*, 22(7), 763-776.
- Christakos, G., 1992. *Random Field Models In Earth Sciences*, Dover, Mineola.
- Christakos, G., 2000. *Modern Spatiotemporal Geostatistics*, Oxford University Press, New York.
- Christakos, G., P. Bogaert, and M.L. Serre 2002. *Advanced Functions Of Temporal GIS*. Springer-Verlag, New York.
- Christodoulaki, S., A. Loukas, L. Vasiliades, and N.R. Dalezios, 2003. Water balance modeling using digital GIS data. *International Symposium on GIS and Remote Sensing: Environmental Applications*, 7-9 November 2003, Volos, Greece, 249-260.
- Christodoulaki, S., A. Loukas, L. Vasiliades, and N.R. Dalezios, 2004. Analysis of water balances and demands in Heraklion watersheds, Crete. *E-Proceedings, 7th International Conference of Protection and Restoration of the Environment*, Mykonos, 28 June - 2 July 2004, 9pp.

- Chung, C.-H., and J.D. Salas, 2000. Drought occurrence probabilities and risks of dependent hydrologic processes, *Journal of Hydrologic Engineering*, 5(3), 259-268.
- Chuzhanova, N.A., A.J. Jones, and S. Margetts, 1998. Feature selection for genetic sequence classification, *Bioinformatics* 14(2), 139-143.
- Cordery, I., and M. McCall, 2000. A model for forecasting drought from teleconnections, *Water Resources Research*, 36(3), 763-768.
- Corte-Real, J., B., Qian, and H. Xu, 1998. Regional climate change in Portugal: Precipitation variability Associated with large-scale atmospheric circulation, *International Journal of Climatology*, 18, 619-635.
- Coulbaly, P., F. Anctil, and B. Bobée, 1999. Hydrological Forecasting with artificial neural networks: the state of the art, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 26(3), 293 - 304.
- Crespo, J.L., and E. Mora, 1993. Drought estimation with neural networks, *Advances in Engineering Software*, 18(3), 167-170.
- Cressie, N., 1991. *Statistics For Spatial Data*, New York, Wiley.
- Cutore, P., G. Di Mauro, and A. Cancelliere, 2009. Forecasting palmer index using neural networks and climatic indexes, *Journal of Hydrologic Engineering*, 14(6), 588-595.
- Cybenko, G., 1989. Approximation by superpositions of a sigmoidal function, *Math. Control Syst. Sign.*, 2, 303-314.
- Daly, C., R.P. Neilson, and D.L. Phillips, 1994. A statistical topographic model for mapping climatological precipitation over mountainous terrain, *Journal of Applied Meteorology*, 33, 140-158.
- Daly, C., W.P. Gibson, G.H. Taylor, G.L. Johnson, and P. Pasteris, 2002. A knowledge-based approach to the statistical mapping of climate, *Climate Research*, 22, 99-113.
- Davidon, W.C., 1959. *Variable Metric Methods For Minimization*, Technical Report ANL5990 (revised), Argonne National Lab Report, Argonne.
- Dawson, C.W., and R.L. Wilby, 2001. Hydrological modeling using artificial neural networks, *Progress in Physical Geography*, 25(1), 80-108.
- Dawson, C.W., R.J. Abraham, and L.M. See, 2007. HydroTest: a web-based toolbox of evaluation metrics for the standardised assessment of hydrological forecasts, *Environmental Modelling & Software*, 22, 1034-1052.
- De Gooijer, J.G., R.J. Hyndman, 2006. 25 years of time series forecasting, *International Journal of Forecasting*, 22, 443-473.
- de Martonne, E., 1926. Une nouvelle fonction climatologique. L'indice d'aridité, *La Météorologie*, 449-458.
- Demuth, S. and K. Stahl, 2001. *Assessment of Regional Impact of Droughts in Europe (ARIDE)*. Final Report to the European Union, Institute of Hydrology, University of Freiburg, Germany.
- Demyanov, V., S. Soltani, M. Kanevski, S. Canu, M. Maignan, E. Savelieva, V. Timonin and V. Pisarenko, 2001. Wavelet analysis residual kriging vs. neural network residual kriging, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 15(1), 18-32.
- Dennis, J.E. Jr., and J.J. More, 1977. Quasi-newton methods, motivation and theory, *S.I.A.M.*, 19(46-89).
- Dennis, J.E. Jr., and R.B. Schnabel, 1996. *Numerical Methods for Unconstrained Optimization and Nonlinear Equations*, S.I.A.M Publications.
- Denton, J.W., and M.S. Hung, 1996. A comparison of nonlinear methods for supervised learning in multilayer feed forward neural nets, *Eu. J. Ope. Res.* 93, 358-368.
- Deutsch, C.V., and A.G. Journel, 1998. *GSLIB: Geostatistical Software and User's Guide*, second edition, Oxford University Press, New York.

- Deutsch, S.J., and J.A. Ramos, 1986. Space-time modeling of vector hydrologic sequences, *Water Resources Bulletin*, 22(6), 967 - 980.
- Diggle, P.J., and P.J. Ribeiro, 2007. *Model-based Geostatistics*, Springer Series in Statistics, Springer.
- Diodato, N., 2005. The influence of topographic co-variables on the spatial variability of precipitation over small regions of complex terrain, *International Journal of Climatology*, 25, 351-363.
- Dobesch, H., P. Dumolard, and I. Dyras (eds.). 2007. *Spatial Interpolation for Climate Data: The Use of GIS in Climatology and Meteorology*, ISTE-Geographical Information Systems Series.
- Dracup, J.A., K.S. Lee, and E.G. Paulson, 1980a. On the definition of droughts, *Water Resources Research*, 16(2), 297-302.
- Dracup, J.A., K.S. Lee, and E.G. Paulson, 1980b. On the statistical characteristics of drought events, *Water Resources Research*, 16(2), 289-294.
- Drogue, G., J. Humbert, J. Deraisme, N. Mahr, and N. Freslon, 2002. A statistical-topographic model using an omnidirectional parameterization of the relief for mapping orographic rainfall, *International Journal of Climatology* 22, 599-613.
- Duan, Q., S. Sorooshian, and V. Gupta, 1992. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models, *Water Resources Research*, 28(4), 1015-1031.
- Dubrovsky, M., M.D. Svoboda, M. Trnka, M.J. Hayes, D.A. Wilhite, Z. Zalud, and P. Hlavinka, 2010. Application of relative drought indices in assessing climate-change impacts on drought conditions in Czechia, *Theoretical and Applied Climatology*, 96(1-2), 155-171.
- Dunham, M.H., 2003. *Data Mining: Introductory and Advanced Topics*, Prentice Hall.
- Durdu, O.F., 2010. Application of linear stochastic models for drought forecasting in the Buyuk Menderes river basin, western Turkey, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, doi: 10.1007/s00477-010-0366-3 (published online first).
- Edossa, D.C., M.S. Babel, and A. Das Gupta, 2010. Drought analysis in the Awash River basin, Ethiopia. *Water Resources Management*, 24(7), 1441-1460, doi: 10.1007/s11269-009-9508-0.
- Edwards, D.C., and T.B. McKee, 1997. Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple scales, *Atmospheric Science Paper*, 634, 1-30.
- Efron, B., 1979. Bootstrap methods: another look at the jackknife, *Annals of Statistics*, 7, 1-26.
- Efron, B., and R.J. Tibshirani, 1993. *An Introduction to the Bootstrap*, Chapman and Hall, London.
- Elfatih, A., B. Eltahir, and P.J. Yeh, 1999. On the asymmetric response of aquifer water level to floods and droughts in Illinois, *Water Resources Research*, 35, 1199-1217.
- Elman, J.L., 1990. Finding structure in time, *Cognitive Science*, 14, 179-211.
- Engeland, K., and L. Gottschalk, 2002. Bayesian estimation of parameters in a regional hydrological model, *Hydrology and Earth Systems Sciences*, 6(5), 883-898.
- Engeland, K., C.-Y. Xu, and L. Gottschalk, 2005. Assessing uncertainties in a conceptual water balance model using Bayesian methodology, *Hydrological Sciences Journal*, 50(1), 45-63.
- Evans, D., and A.J. Jones, 2002. A proof of the gamma test, *Proc. Roy. Soc. Series A* 458(2027), 2759-2799.
- Evans, D., and A.J. Jones, 2008. Non-parametric estimation of residual moments and covariance, *Proc. Roy. Soc. Series A*, 464(2099), 2831-2846.
- Fahlman, S.E., 1988. Fast learning variations on backpropagation: An empirical study, in D.S. Touretzky, G. Hinton and T. Sejnowski (eds). *Proc. 1988 Connectionist Models Summer School*, 38-51.
- Fausett, L., 1994. *Fundamentals of Neural Networks*. Prentice Hall, New York.
- Fayad, H., 2001. Application of neural networks and genetic algorithms for solving conjunctive water use problems, Ph.D. Dissertation, Utah State University, 152 p.

- Fernandez, B., and J.D. Salas, 1999. Return period and risk of hydrologic events. I: Mathematical formulation, *Journal of Hydrologic Engineering*, 4(4), 297-307.
- Fernandez, C., J.A. Vega, T. Fonturbel, and E. Jimenez, 2009. Streamflow drought time series forecasting: a case study in a small watershed in North West Spain, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 23, 1063-1070.
- Filliben, J.J., 1975. The probability plot correlation coefficient test for normality, *Technometrics*, 17(1), 111-117.
- Fiorillo, F., and F.M. Guadagno, 2010. Karst spring discharges analysis in relation to drought periods, using the SPI. *Water Resources Management*, 24(9), 1867-1884, doi: 10.1007/s11269-009-9528-9.
- Fletcher, R., 2000. *Practical Methods of Optimization*, John Wiley and Sons, New York, 2nd edition.
- Fletcher, R., and M.J.D. Powell, 1963. A rapidly convergence descent method for minimization, *Computing Journal*, 6, 163-168.
- Flood, I., and N. Kartam, 1994. Neural networks in civil engineering. I: Principles and understanding, *J. Comp. Civil Eng.* 8 (2), 131-148.
- Fotheringham, A.S., C. Brunson, and M. Charlton, 2002. *Geographically Weighted Regression: The Analysis of Spatially Varying Relationships*, Wiley, Chichester.
- Frick, D. M., D. Bode, and J.D. Salas, 1990. Effect of drought on urban water supplies. I: Drought analysis, *Journal of Hydrologic Engineering*, 116(6), 733-753.
- Friedman, J.H., J.L., Bentley, and R.A. Finkel, 1979. An algorithm for finding best matches in logarithmic expected time, *ACM Transactions on Mathematical Software*, 3(3), 209-226.
- Funahashi, K., 1989. On the approximate realization of continuous mappings by neural networks, *Neural Networks*, 2, 183-192.
- Gardner, E.S., 2006. Exponential smoothing: the state of the art-part II, *International Journal Forecast* 22, 637-666.
- Garen, D.C., 1992. Revised Surface-Water Supply Index for the western United States, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 119, 437-454.
- Gibbs, W.J., and J.V. Maher, 1967. Rainfall deciles as drought indicators. Bureau of Meteorology Bulletin No. 48, Commonwealth of Australia, Melbourne.
- Gill, P., W. Murray, and M.H. Wright, 1981. *Practical Optimization*, Academic Press.
- Goldberg, D.E., 1989. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley Publishing Company.
- Golden, R.M., 1996. *Mathematical Methods for Neural Network Analysis and Design*, M.I.T. Press, Cambridge.
- Gonzalez, J., and J.B. Valdes, 2004. The mean frequency of recurrence of in-time-multidimensional events for drought analyses, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4, 17-28.
- Goodale, C.L., J.D. Alber, and S.V. Ollinger, 1998. Mapping monthly precipitation, temperature and solar radiation for Ireland with polynomial regression and digital elevation model, *Climate Research* 10, 35-49.
- Goodridge, C.L., L.M. Pecora, T.L. Carroll, and F.J. Rachford, 2001. Detecting functional relationships between simultaneous time series, *Physical Review E*, 64, 026221.
- Goovaerts, P., 1997. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford University Press, New York.
- Goovaerts, P., 1999. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. *Geoderma*, 89, 1-46.
- Goovaerts, P., 2000. Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall, *Journal of Hydrology*, 228, 113-129.
- Govindaraju, R.S., and A.R., Rao, (eds.) 2000. *Artificial Neural Networks In Hydrology*, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.

- Grayson, R., and G. Bloschl, 2000. *Spatial Patterns in Catchment Hydrology: Observations and Modelling*, Cambridge University Press.
- Grippo, L., F. Lampariello, and S. Lucidi, 1986. A nonmonotone line search technique for Newton's method, *S.I.A.M. Journal of Numerical Analysis*, 23, 707-716.
- Guan, H., J.L. Wilson, and O. Makhnin, 2005. Geostatistical mapping of mountain precipitation incorporating auto-searched effects of terrain and climatic characteristics, *Journal of Hydrometeorology*, 6(6), 1018-1031.
- Guttman, N.B., 1998. Comparing the Palmer Drought Index and the Standardized Precipitation Index, *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 113-121.
- Guttman, N.B., 1999. Accepting the standardized precipitation index: a calculation algorithm, *Journal of the American Water Resources Association*, 35(2), 311-322.
- Gyalistras, D., 2003. Development and validation of a high-resolution monthly gridded temperature and precipitation data set for Switzerland (1951-2000), *Climate Research*, 25(55-83).
- Hagan, M.T., H.B. Demuth, and M.H. Beale, 1996. *Neural Network Design*, MA: PWS Publishing, Boston.
- Hamzacebi, C., D. Akay, and F. Kutay, 2009. Comparison of direct and iterative artificial neural network forecast approaches in multi-periodic time series forecasting, *Expert Systems with Applications*, 36, 3839-3844.
- Han, D., T. Kwong, and S. Li, 2007. Uncertainties in real-time flood forecasting with neural networks, *Hydrological Processes*, 21 (2), 223-228.
- Hanson, R.T., M.W. Newhouse, and M.D. Dettinger, 2004. A methodology to assess relations between climatic variability and variations in hydrologic time series in the southwestern United States, *Journal of Hydrology*, 287, 252-269.
- Hayes, M., 1999. Drought indices, National drought Mitigation Center, 11p.
- Hayes, M.J., M.D. Svoboda, D.A. Wilhite, and O.V. Vanyarkho, 1999. Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80(3), 429-438.
- Haykin, S., 1999. *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. Macmillan College Publishing Company, New York.
- Heim, R.R. Jr., 2002. A review of twentieth-century drought indices used in the United States, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(8), 1149-1165.
- Helsel, D.R., and R.M. Hirsch, 2002. *Statistical Methods in Water Resources*, Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey, Book 4, Hydrologic Analysis and Interpretation, U.S.G.S., 524 p.
- Hengl, T., G.B.M. Heuvelink, and A. Stein, 2004. A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging, *Geoderma*, 120, 75-93.
- Henriques, A.G., and M.J.J. Santos, 1999. Regional drought distribution model, *Physics and Chemistry of the Earth, Part-B*, 24(1-2), 19-22.
- Hershfield, D.M., D.L. Brakensiek, and G.H. Comer, 1972. Some measures of agricultural drought. *Proc. 2nd International Symposium in Hydrology: Floods and Droughts*, Colorado.
- Hevesi, J.A., A.L. Flint, and J.D. Istok, 1992. Precipitation estimation in mountainous terrain using multivariate geostatistics, Part I: structural analysis. *Journal of Applied Meteorology*, 31(661-676).
- Hewson, T., 2007. The concept of 'Deterministic limit'. 3rd Intl. Verification Methods Workshop, 31 January-2 February 2007, Reading, UK.
- Hill, T., L. Marquez, M. O'Connor, and W. Remus, 1994. Artificial neural networks for forecasting and decision making. *International Journal of Forecasting*, 10, 5-15.
- Hipel, K., and A.I. McLeod, 1994. *Time Series Modeling of Water Resources and Environmental Systems*, Elsevier, Amsterdam.

- Hirsh, R.M., J.R. Slack, and R.A. Smith, 1982. Techniques of trend analysis for monthly water quality data, *Water Resources Resources*, 18, 107-121.
- Hisdal, H., and L.M. Tallaksen, 2003. Estimation of regional meteorological and hydrological drought characteristics: a case study for Denmark, *Journal of Hydrology*, 281, 230-247.
- Hoerling, M., and A. Kumar, 2003. The perfect ocean for drought, *Science*, 299, 691-694.
- Holland, J.H., 1975. *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control and Artificial Intelligence*, University of Michigan Press, Ann Arbor.
- Holland, J.H., 1992. *Adaptation In Natural And Artificial Systems*, M.I.T. Press.
- Hornik, K., M. Stinchcombe and H. White, 1989. Multilayer feed forward networks are universal approximators, *Neural Networks*, 2, 359-366.
- Hutchinson, M.F., 1995. Interpolation of mean rainfall using thin plate smoothing splines, *International Journal of Geographical Information Systems*, 9, 385-403.
- Hutchinson, M.F., 1998a. Interpolation of rainfall data with thin plate smoothing splines: Part I: Two dimensional smoothing of data with short range correlation, *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 2(2), 139-151.
- Hutchinson, M.F., 1998b. Interpolation of rainfall data with thin plate smoothing splines: Part II: Analysis of Topographic Dependence, *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 2(2), 152-167.
- Iglesias, A., A. Cancelliere, D. Gabiña, A. López-Francos, M. Moneo, G. Rossi, (Εκδ.), 2007a. Οδηγίες Διαχείρισης της Ξηρασίας, Ευρωπαϊκή Ένωση - Γραφείο Συνεργασίας Ευρωπαϊκής Βοήθειας Ευρω-Μεσογειακό Περιφερειακό Πρόγραμμα για Τοπική Διαχείριση Υδάτων (MEDAWater) Μεσογειακή Ετοιμότητα και Σχεδιασμός Περιορισμού της Ξηρασίας (MEDROPLAN), 78 σελ.
- Iglesias, A., M. Moneo, and A. Lopez-Francos, (eds.), 2007b. Drought management guidelines technical annex Zaragoza: CIHEAM-IAMZ/EC MEDA Water (Options Méditerranéennes : Série B. Etudes et Recherches; n. 58). ISBN 2-85352-359-4.
- Intergovernmental Panel on Climate Change, (IPCC), 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. In *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. (eds). Cambridge University Press, Cambridge, New York, 996 p.
- Isaaks, E.H., and R.M. Srivastava, 1989. *An Introduction to Applied Geostatistics*. Oxford University Press, New York.
- Ishikawa, T., Y. Tsukui, and M. Matsunami, 1996. Optimization of electromagnetic devices using artificial neural network with quasi-Newton algorithm, *IEEE Trans. Magnetics*, 32(3), 1226-1229.
- Jain, A., and A.M. Kumar, 2007. Hybrid neural network models for hydrologic time series forecasting, *Appl. Soft Comput.*, 7, 585-592.
- Jakeman, A.J., and G.M. Hornberger, 1993. How much complexity is warranted in a rainfall-runoff model?, *Water Resources Research*, 29(8), 2637-2649.
- Jeong, D., and Y.O. Kim, 2005. Rainfall-runoff models using artificial neural networks for ensemble streamflow prediction, *Hydrological Processes*, 19(19), 3819-3835.
- Jia, Y., and T.B. Culver, 2006. Bootstrapped artificial neural networks for synthetic flow generation with a small data sample, *Journal of Hydrology*, 331, 580-590.
- Jolliffe, I.T., and D.B. Stephenson, 2003. *Forecast Verification, A Practitioner's Guide in Atmospheric Science*, Wiley and Sons Ltd, 240 p.
- Jones, A.J. 2004. New tools in non-linear modeling and prediction, *Computational Management Science*, 1(2), 109-149.

- Jones, A.J., D. Evans and S. E. Kemp, 2007. A Note on the Gamma test Analysis of Noisy Input/Output data and Noisy Time Series, *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 229(1), 1-8.
- Journel, A.G., and C.J. Huijbregts, 1978. *Mining Geostatistics*. Academic Press, London.
- Journel A.G., and P.C. Kyriakidis, 2004. *Evaluation of Mineral Reserves: A Simulation Approach*, Oxford University Press, Applied Geostatistics Series, 216p.
- Kalamaras, N., H. Michalopoulou, and H.R. Byun, 2010. Detection of drought events in Greece using daily precipitation, *Hydrology Research*, 41(2), 126-133, doi:10.2166/nh.2010.001.
- Kalapanidas E. and N. Avouris, 2001. Short-term air quality prediction using a case-based classifier, *Journal of Environmental Modelling and Software*, 16(3), 263-272.
- Kanevski M., and M. Maignan, 2004. *Analysis and modelling of spatial environmental data*, EPFL Press, Marcel Dekker Inc., Italy.
- Kanevski, M., R. Parkin, A. Pozdnukhov, V. Timonin, M. Maignan, V. Demyanov, and S. Canu, 2004. Environmental data mining and modeling based on machine learning algorithms and geostatistics, *Environmental Modelling and Software*, 19(845-855).
- Kanevski M., A., Pozdnoukhov, and V. Timonin, 2009. *Machine Learning For Spatial Environmental Data: Theory, Applications And Software*, EPFL Press, CRC Press.
- Karaca, F., A. Nikov, and O. Alagha, 2006. NN-AirPol: A neural-networks-based method for air pollution evaluation and control, *International Journal of Environmental Pollution*, 28(3-4), 310-325.
- Karamouz, M., S. Torabi, and S. Araghinejad, 2007. Case Study of Monthly Regional Rainfall Evaluation by Spatiotemporal Geostatistical Method, *Journal of Hydrologic Engineering*, 12(1), 97-108.
- Karl, T., F. Quinlan, and D.S. Ezell, 1987. Drought termination and amelioration: Its climatological probability, *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 26(1198-1209).
- Karl, T.R., 1986. The sensitivity of the Palmer Drought Severity Index and Palmer's Z-index to their calibration coefficients including potential evapotranspiration, *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 25, 77-86.
- Kashefipour, S.M., B. Lin, and R. A. Falconer, 2005. Neural networks for predicting seawater bacterial levels, *Water Management*, 158(3), 111-118.
- Kedem, B., 1993. *Time-series Analysis by Higher Order Crossings*, IEEE Press, New York.
- Kendel, D.R., J.A. Dracup, 1992. On the generation of drought events using an alternating renewal-reward model, *Stochastic Hydrology*, 6(1), 55-68.
- Kennel, M. B., R. Brown, and H.D.I. Abarbanel, 1992. Determining embedding dimension for phase-space reconstruction using a geometrical construction, *Physical Review A*, 45(6), 3403-3411.
- Keyantash, J., and J.A. Dracup, 2002. The quantification of drought: An evaluation of drought indices, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 83(8), 1167-1180.
- Keyantash, J.A., and J.A. Dracup, 2004. An aggregate drought index: Assessing drought severity based on fluctuations in the hydrologic cycle and surface water storage, *Water Resources Research*, 40, W09304, doi:10.1029/2003WR002610.
- Kim, T.W., J.B. Valdes, and J. Aparicio, 2002. Frequency and spatial characteristics of droughts in the Conchos River Basin, Mexico, *Water International*, 27(3), 420-430.
- Kim, T., and J.B. Valdes, 2003. Nonlinear model for drought forecasting based on a conjunction of wavelet transforms and neural networks, *Journal of Hydrologic Engineering*, 8(6), 319-328.
- Kirkpatrick, S., C.D. Gelatti, and M. P. Vecchi, 1983. Optimization by simulated annealing, *Science*, 220, 671-680.
- Kitanidis, P.K., 1997. *Introduction to Geostatistics: Applications in Hydrogeology*, Cambridge University Press, Cambridge.

- Kline, D.M., 2004. Methods for multi-step time series forecasting with neural networks. In G. P. Zhang (Ed.), *Neural Networks for Business Forecasting*. Hershey PA: Information Science Publishing, 226-250.
- Knight, C.G., H. Chang, M.P. Staneva and D. Kostov, 2001. A simplified basin model for simulating runoff: The Struma River GIS, *Professional Geographer*, 53(4), 533-545.
- Kohonen, T., 1990, *Self Organisation and Associative Memory*, 3rd edition, Springer-Verlag.
- Kolodner, J., 1993, *Case-Based Reasoning*, Morgan Kaufmann, San Mateo, California, USA.
- Kothavala, Z., 1999. The duration and severity of drought over eastern Australia simulated by a coupled ocean-atmosphere GCM with a transient increase in CO₂, *Envir. Model. Soft.*, 14, 243-252.
- Kuczera, G., and E. Parent, 1998. Monte Carlo assessment of parameter uncertainty in conceptual catchment models: The Metropolis algorithm, *Journal of Hydrology*, 211, 69-85.
- Kyriakidis, P. C., and A.G. Journel, 1999. Geostatistics space-time models: A review, *Math. Geol.*, 31(6), 651-684.
- Kyriakidis, P.C., and A.G. Journel, 2001a. Stochastic modeling of atmospheric pollution: a spatial time-series framework, Part I: methodology, *Atmos. Environ.* 35, 2331-2337.
- Kyriakidis, P.C., and A.G. Journel, 2001b. Stochastic modeling of atmospheric pollution: a spatial time-series framework, Part II: application to monitoring monthly sulfate deposition over Europe, *Atmos. Environ.*, 35, 2339-2348.
- Lachtermacher, G., and J.D. Fuller, 1995. Backpropagation in time-series forecasting, *Journal of Forecasting*, 14, 381-393.
- Lana, X., and A. Burgueno, 1998. Spatial and temporal characterization of annual extreme droughts in Catalonia (Northern Spain), *International Journal of Climatology*, 18, 93-110.
- Lana, X., C. Serra, and A. Burgueno, 2001. Patterns of monthly rainfall shortage and excess in terms of the standardized precipitation index for Catalonia (NE Spain), *International Journal of Climatology*, 21(13), 1669-1691.
- Lane, W.L., 1979. *Applied stochastic techniques (LAST computer package)*, user manual, Division of Planning Technical services, Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.
- Leake, D., (1996). *Case-Based Reasoning: Experiences, Lessons, and Future Directions*. AAAI Press, Menlo Park, C.A.
- Lee, S.J., and E.A. Wentz, 2008. Applying Bayesian maximum entropy to extrapolating local-scale water consumption in Maricopa County, Arizona, *Water Resources Research* W01401. doi:10.1029/2007WR006101.
- Lee, S.-J., E.A. Wentz, and P. Gober, 2010. Space-time forecasting using soft geostatistics: a case study in forecasting municipal water demand for Phoenix, Arizona, *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, 24, 283-295.
- Lee, S.J., E.A. Wentz, and P. Gober, 2010. Space-time forecasting using soft geostatistics: a case study in forecasting municipal water demand for Phoenix, Arizona, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 24, 283-295.
- Lee, S.J., R. Balling, and P. Gober, 2008. Bayesian maximum entropy mapping and soft data problem in urban climate research, *Ann. Assoc. Am. Geogr.* 98(2), 309-322.
- Legates, D.R., and G.J. McCabe, 1999. Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation, *Water Resources Research*, 35, 233-241.
- Lekkas, G.P., M.N. Avouris, and L.G. Viras, 1994, *Case-Based Reasoning in Environmental Monitoring Applications*, *Applied Artificial Intelligence*, 8(3), 359-376.
- Li, J. and A.D. Heap, 2008. A Review of Spatial Interpolation Methods for Environmental Scientists, *Geoscience Australia, Record 2008/23*, 137 p.

- Li, S.J., and Y.X. Liu, 2006. An improved approach to nonlinear dynamical system identification using PID neural networks, *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*, 7(2), 177-182.
- Li, Z., and M.H. Dunham, 2003. STIFF: A forecasting framework for spatio-temporal data, *Mining Multimedia and Complex Data*, Springer-Verlag, Berlin, 183-198 p.
- Lightbody, G., and G.W. Irwin, 1996. Multi-layer perceptron based modelling of nonlinear systems, *Fuzzy Sets and Systems* 79, 93-112.
- Likas, A., and A. Stafylopatis, 2000. Training the random neural network using quasi-Newton methods. *European J. Operational Research*, 126, 331-339.
- Livada, I., and V.D. Assimakopoulos, 2007. Spatial and temporal analysis of drought in Greece using the Standardized Precipitation Index (SPI), *Theoretical and Applied Climatology*, 89(3-4), 143-153, doi: 10.1007/s00704-005-0227-z.
- Livieris, I.E., and P. Pintelas, 2008. A survey on algorithms for training artificial neural networks, Technical Report 0801, Department of Mathematics, University of Patras.
- Lloyd, C.D., 2005. Assessing the effect of integrating elevation data into the estimation of monthly precipitation in Great Britain, *Journal of Hydrology*, 308, 128-150.
- Lloyd-Hughes, B., and M.A. Saunders, 2002. A drought climatology for Europe, *International Journal of Climatology*, 22, 1571-1592.
- Loaiciga, H.A., and R.B. Leipnik, 1996. Stochastic renewal model of low flow stream sequences. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, 10(1), 65-85.
- Lohani, V. K., and G.V. Loganathan, 1997. An early warning system for drought management using the Palmer Drought Index, *Journal of the American Water Resources Association*, 33(6), 1375-1386.
- Lohani, V.K., G.V. Loganathan, and S. Mostaghimi, 1998. Long-term analysis and short-term forecasting of dry spells by the Palmer drought severity index, *Nordic Hydrology*, 29(1), 21-40.
- López-Moreno, J.I., S.M. Vicente-Serrano, S. Beguería, J.M. García-Ruiz, M.M. Portela, and A.B. Almeida, 2009. Dam effects on droughts magnitude and duration in a transboundary basin: The Lower River Tagus, Spain and Portugal, *Water Resources Research*, 45, W02405, doi:10.1029/2008WR007198.
- Lorenzo-Lacruz, J., S.M. Vicente-Serrano, J.I. López-Moreno, S. Beguería, J.M. García-Ruiz, J.M. Cuadrat, 2010. The impact of droughts and water management on various hydrological systems in the headwaters of the Tagus River (central Spain), *Journal of Hydrology*, 386(1-4), 13-26.
- Loukas, A., 2010, Surface water quantity and quality assessment in Pinios River, Thessaly, Greece. *Desalination*, 250, 266-273.
- Loukas, A., L. Vasiliades, and N.R. Dalezios, 2002a. Hydroclimatic variability of regional droughts in Greece using the Palmer moisture anomaly index, *Nordic Hydrology*, 33(5), 425-442.
- Loukas, A., L. Vasiliades, M. Spiliotopoulos, D. Bampzelis, C. Domenikiotis, and N.R. Dalezios, 2002b. An assessment of regional droughts in Greece using two meteorological drought indices. *Proceedings of the 6th Hellenic Conference in Meteorology, Climatology & Atmospheric Physics*, 25-28 September 2002, Ioannina, Greece, 708-716.
- Loukas, A., L. Vasiliades and N.R. Dalezios, 2003. Intercomparison of meteorological drought indices for drought assessment and monitoring in Greece. *Proceedings of the 8th International Conference on Environmental Science and Technology*, 8-10 September 2003, Lemnos, Greece, 484-491.
- Loukas, A., and L. Vasiliades, 2004. Probabilistic analysis of drought spatiotemporal characteristics in Thessaly Region, Greece, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4(5-6), 719-731.
- Loukas, A., and L. Vasiliades, 2007. Water balance modelling using NDVI-derived actual evapotranspiration. *E-Proceedings, 32nd IAHR Congress*, 2-7 July 2007, Venezia, Italy, 10p.
- Loukas, A., N. Mylopoulos, and L. Vasiliades, 2007a. A modeling system for the evaluation of water resources management strategies in Thessaly, Greece, *Water Resources Management*, 21(10), 1673-1702.

- Loukas, A., L. Vasiliades, and J. Tzabiras, 2007b. Evaluation of climate change on drought impulses in Thessaly, Greece, *European Water Journal*, 17-18(1), 17-28.
- Loukas, A., L. Vasiliades, and J. Tzabiras, 2008a. Climate change effects on drought severity. *Adv. Geosci.*, 17, 23-29.
- Loukas, A., K. Kokkinos, L. Vasiliades, and A. Liakopoulos, 2008b. The migration of the UTHBAL hydrologic model into OpenMI, *Proceedings of iEMSs 2008: International Congress on Environmental Modelling and Software, Integrating Sciences and Information Technology for Environmental Assessment and Decision Making*, 4th Biennial Meeting of iEMSs, Barcelona, July 6-10, 2008, 1102-1109.
- Loukas, A., G. Patsonas, and L. Vasiliades, 2009. Evaluation of the future operation of the restored lake Karla reservoir under climate change, 7th International Conference of EWRA "Water Resources Conservancy and Risk Reduction under Climatic Instability", Limassol, Cyprus, 25-27 June 2009.
- MacEachren, A.M., M. Wachowicz, R. Edsall, D. Haug, and R. Masters, 1999. Constructing knowledge from multivariate spatio-temporal data: Integrating geographic visualization (GVis) with knowledge discovery in databases (KDD), *International Journal of Geographical Information Science*, 13(4), 311-334.
- MacKay, D.J.C., 1992a. A practical Bayesian framework for backpropagation networks, *Neural Computation*, 4(3), 448-472.
- MacKay, D.J.C., 1992b. Bayesian interpolation, *Neural Computation*, 4(3), 415-447.
- Magyari-Sáska, Zs., 2007. ArcGIS software module for calculating the S.P.I. value. *Geographia Technica*, Issue No. 4(2-2007).
- Maheepala, S. and C.J.C. Perera, 1996. Monthly hydrologic data generation by disaggregation, *Journal of Hydrology*, 178, 277-291.
- Maier, H.R., and G.C. Dandy, 1996. Neural network models for forecasting multivariate time series, *Neural Network World*, 6(5), 747-771.
- Maier, H.R., and G.C. Dandy, 2000. Neural networks for the prediction and forecasting of water resources variables: a review of modelling issues and applications, *Environmental Modelling and Software*, 15(1), 101-124.
- Maier, H.R., and G.C. Dandy, 2001. Neural network based modelling of environmental variables: a systematic approach. *Mathematical and Computer Modelling*, 33, 669-682.
- Makridakis, S., S., Wheelwright, and R.J. Hyndman, 1998. *Forecasting: Methods And Applications*. 3rd Edition, John Wiley & Sons.
- Mardikis, M., D. Kalivas, and V. Kollias, 2005. Comparison of interpolation methods for the prediction of reference evapotranspiration - An Application in Greece, *Water Resources Management*, 19(3), 251-278.
- Marquinez, J., J. Lastra, and P. Garcia, 2003. Estimation models for precipitation in mountainous regions: the use of GIS and multivariate analysis, *Journal of Hydrology*, 270, 1-11.
- Martinez-Cob, A., 1996. Multivariate geostatistical analysis of evapotranspiration and precipitation in mountainous terrain, *Journal of Hydrology*, 174 (1-2), 19-35.
- Mavromatis, T., 2007. Drought index evaluation for assessing future wheat production in Greece, *Int. J. Climatol.*, 27(7), 911-924.
- McKee, T.B., N.J. Doesken, and J. Kleist, 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales, *Preprints*, 8th Conference on Applied Climatology, Anaheim, CA, American Meteorological Society, 179-184.
- McKee, T.B., N.J. Doesken, and J. Kleist, 1995. Drought monitoring with multiple time scales, *Preprints*, 9th Conference on Applied Climatology, Dallas, TX, American Meteorological Society, 233-236.
- McKeown, J., D. Meegan, and D. Sprevak, 1990. *An Introduction to Unconstrained Optimization*, Adam Hilger, 1990.

- McLoone, S.F., and G.W. Irwin, 1995. Fast gradient based off-line training of multilayer perceptrons, in: K.J. Hunt, G.W. Irwin and K. Warwick (eds), *Neural Network Engineering in Dynamic Control Systems*, 179-200 p., Springer.
- McLoone, S.F., and G.W. Irwin, 1997. Fast parallel off-line training of multilayer perceptrons, *IEEE Trans. on Neural Networks*, 8(3), 646-653.
- McLoone, S.F., and G.W. Irwin, 1999. A Variable Memory Quasi-Newton Training Algorithm, *Neural Processing Letters*, 9, 77-89.
- Mejia, J. M. and J. Rouselle, 1976. Disaggregation models in hydrology revisited. *Water Resources Research*, 12(2), 185-186.
- Mendel, J.M. and R.W. McLaren, 1970. *Adaptive, Learning and Pattern Recognition Systems: Theory and Applications*, Academic Press, New York.
- Mendicino, G., A. Senatore, and P. Versace, 2008. A Groundwater Resource Index (GRI) for drought monitoring and forecasting in a mediterranean climate, *Journal of Hydrology*, 357, 282-302.
- Mennis, J., and D.J. Peuquet, 2000. A conceptual framework for incorporating cognitive principles into geographical database presentation. *International Journal of Geographical Information Science*, 14(6), 501-520.
- Merz, B., and A. Bardossy, 1998. Effects of spatial variability on the rainfall runoff process in a small loess catchment, *Journal of Hydrology*, 212-213, 304-317.
- Merz, R., and G. Blöschl, 2004. Regionalisation of catchment model parameters, *Journal of Hydrology* 287, 95-123.
- Metropolis, M., A. Rosenbluth, M. Rosenbluth, A. Teller, and E. Teller, 1953. Equation of state calculations by fast computing machines, *Journal of Chemical Physics*, 21, 1087-1092.
- Michalewicz, Z., 1996. *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, 3rd Edition, Springer, 1996.
- Mimikou, M.A., Y.S. Kouvopoulos, and P.S. Hadjissawa, 1993. An analysis of multiyear droughts in Greece, *International Journal of Water Resources Development*, 9(3), 281-291.
- Miras-Avalos, J.M., A. Paz-Gonzalez, E. Vidal-Vazquez, and P. Sande-Fouz, 2007. Mapping monthly rainfall data in Galicia (NW Spain) using inverse distances and geostatistical methods, *Adv. Geosci.*, 10, 51-57.
- Mishra, A. K., and V.R. Desai, 2005a. Spatial and temporal drought analysis in the Kansabati river basin, India, *International Journal of River Basin Management*, 3(1), 31-41.
- Mishra, A. K., and V.R. Desai, 2005b. Drought forecasting using stochastic models, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 19, 326-339.
- Mishra, A.K., and V.R. Desai, 2006. Drought forecasting using feed-forward recursive neural network, *Ecological Modelling*, 198, 127-138.
- Mishra, A.K., V.R. Desai, and V.P. Singh, 2007. Drought forecasting using a hybrid stochastic and neural network model, *Journal of Hydrologic Engineering*, 12(6), 626-638.
- Mitchell, T.M., 1997. *Machine Learning*. McGraw-Hill, Singapore.
- Modarres, R., 2007. Streamflow drought time series forecasting, *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, 21(3), 223-233, doi: 10.1007/s00477-006-0058-1.
- Moghaddamia, A., M. Ghafari Gousheh, J. Piri, S. Amin, and D. Han, 2009. Evaporation estimation using artificial neural networks and adaptive neuro-fuzzy inference system techniques, *Advances in Water Resources*, 32(1), 88-97.
- Møller, M.F., 1990. A scaled conjugate gradient algorithm for fast supervised learning, *Neural Networks*, 6, 525-533.
- Moral, F.J., 2010. Comparison of different geostatistical approaches to map climate variables: application to precipitation, *International Journal of Climatology*, 30, 620-631.

- Moreira, E.E., A.A. Paulo, L.S. Pereira, and J.T. Mexia, 2006. Analysis of SPI drought class transitions using loglinear models, *Journal of Hydrologic Engineering*, 331, 349-359.
- Morid, S., V. Smakhtin, and K. Bagherzadeh, 2007. Drought forecasting using artificial neural networks and time series of drought indices, *International Journal of Climatology*, 27, 2103-2111.
- Mouser, P.J., W.C. Hession, D.M. Rizzo, and N.J. Gotelli, 2005. Hydrology and geostatistics of a Vermont, USA kettlehole peatland, *Journal of Hydrologic Engineering*, 301(20), 250-266.
- Moye, A.L., A.S. Kapadia, I.M. Cech, and R.J. Hardy, 1988. The theory of run with application to drought prediction, *Journal of Hydrologic Engineering*, 103, 127-137.
- Nalbantis, I., and G. Tsakiris, 2009. Assessment of hydrological drought revisited, *Water Resour. Manag.*, 23, 881-897.
- Nalder, I.A., and R.W. Wein, 1998. Spatial interpolation of climatic normals: test of a new method in the Canadian boreal forest, *Agricultural and Forest Meteorology*, 92, 211-225.
- Naoum, S., and I. Tsanis, 2004. Orographic precipitation modelling with multiple linear regression, *Journal of Hydrologic Engineering*, 9(2), 79-102.
- Narasimhan, B., and R. Srinivasan, 2005. Development and evaluation of Soil Moisture Deficit Index (SMDI) and Evapotranspiration Deficit Index (ETDI) for agricultural drought monitoring, *Agricultural and Forest Meteorology*, 133, 69-88.
- Nash, J.E. and J.V. Sutcliffe, 1970. River flow forecasting through conceptual models, Part-1 A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290.
- Nawi, N.M., M.R. Ransing, and R.S. Ransing, 2006. An improved learning algorithm based on the Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS) method for back propagation neural networks, in *Proceedings - ISDA 2006: Sixth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications Volume 1*, Article number 4021427, 152-157.
- Nguyen, D., and B. Widrow, 1990. Improving the learning speed of 2layer neural network by choosing initial values of adaptive weights, *Biological Cybernetics*, 59, 71-113.
- Nicklow, J., et al., (ASCE Task Committee on Evolutionary Computation in Environmental and Water Resources Engineering) 2010. State of the Art for Genetic Algorithms and Beyond in Water Resources Planning and Management, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136(4), 412-432.
- Ninyerola, M., X. Pons, and J.M. Roure, 2000. A methodological approach of climatological modelling of air temperature and precipitation through GIS techniques, *International Journal of Climatology*, 20 (14), 1823-1841.
- Nocedal, J., 1992. Theory of algorithms for unconstrained optimization, *Acta Numerica*, 1, 199-242.
- Nocedal, J., and Y. Yuan, 1993. Analysis of a self-scaling quasi-Newton method, *Mathematical Programming*, 61, 19-37.
- Nocedal, J., and S.J. Wright, 2006. *Numerical Optimization*, 2nd Edition, Springer, New York.
- Oladipo, E.O., 1985. A comparative performance analysis of three meteorological drought indices, *International Journal of Climatology*, 5, 655-664.
- Oren, S.S. 1972. Self-scaling variable metric algorithms for unconstrained minimization, Ph.D. Thesis, Stanford University, California, USA.
- Oren, S.S., and D.G. Luenberger, 1974. Self-scaling variable metric (SSVM) algorithms, Part I: Criteria and sufficient conditions for scaling a class of algorithms, *Management Science*, 20, 845-862.
- Oudin, L., F. Hervieu, C. Michel, C. Perrin, V. Andréassian, F. Anctil, and C. Loumagne, 2005. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? - Part 2 - Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modeling, *Journal of Hydrology*, 303(1-4), 290-306.

- Palmer, W.C., 1965. Meteorological drought, Research Paper No 45, U.S. Weather Bureau, Washington, D.C., 58 p.
- Palmer, W.C., 1968. Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: The new crop moisture index, *Weatherwise*, 21, 156-161.
- Pandey, R.P. and K.S. Ramasastri, 2001. Relationship between the common climatic parameters and average drought frequency, *Hydrological Processes*, 15, 1019-1032.
- Pannatier, Y., 1996. *Variowin: Software for Spatial Statistics. Analysis in 2D*, Springer, New York.
- Panofsky, H.A., and W.G. Brie, 1958. *Some Applications of Statistics to Meteorology*, Pennsylvania State University, University Park, 224 p.
- Panu, U.S., E.T. Unny, and R.K. Ragade, 1978. A feature prediction model in synthetic hydrology based on concepts of pattern recognition. *Water Resources Research*, 14(2), 335-344.
- Panu, U.S., and T.C. Sharma, 2002. Challenges in drought research: some perspectives and future directions, *Hydrological Science Journal*, 47(S).
- Pardalos, P.M., H.E. Romeijn, and H. Tuy, 2000. Recent developments and trends in global optimization, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 124, 209-228.
- Pardo-Iguzquiza, E., 1998. Comparison of geostatistical methods for estimating the areal average climatological rainfall mean using data on precipitation and topography, *International Journal of Climatology*, 18, 1031-1047.
- Paulo, A.A, E. Ferreira, C. Coelho, and L.S. Pereira, 2005. Drought class transition analysis through Markov and Loglinear models, an approach to early warning, *Agricultural Water Management*, 77, 59-81.
- Paulo, A.A., and L.S. Pereira, 2007. Prediction of SPI drought class transitions using Markov chains, *Water Resources Management*, 21, 1813-1827.
- Paulo, A.A., and L.S. Pereira, 2008. Stochastic Prediction of Drought Class Transitions, *Water Resources Management*, 22, 1277-1296.
- Pebesma, E.J., K. de Jong, and D. Briggs, 2007. Interactive visualization of uncertain spatial and spatio-temporal data under different scenarios: an air quality example, *International Journal of Geographical Information Science*, 21(5), 515-527.
- Peng, C.C., and G.D. Magoulas, 2007. Adaptive Self-scaling Non-monotone BFGS Training Algorithm for Recurrent Neural Networks. In: de Sá, J.M., Alexandre, L.A., Duch, W., Mandic, D.P. (eds.) *ICANN 2007*. LNCS, vol. 4668, Springer, Heidelberg, 259-268.
- Peng, C.C., and G.D. Magoulas, 2009. Nonmonotone Learning of Recurrent Neural Networks in Symbolic Sequence Processing Applications. In: D. Palmer-Brown et al. (Eds.): *EANN 2009*, CCIS 43, Springer, Heidelberg, 325-335.
- Perrin, C., C. Michel, and V. Andreassian, 2001. Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments, *Journal of Hydrology*, 242, 275-301.
- Peters, E., H.A.J. van Lanen, P.J.J.F. Torfs, and G. Bier, 2005. Drought in groundwater-drought distribution and performance indicators, *Journal of Hydrology*, 306, 302-317.
- Peuquet, D.J., 2001. Making space for time: issues in space-time representation. *Geoinformatica* 5(1), 11-32.
- Peuquet, D.J., 2002. *Representations Of Space And Time*. Guilford, New York.
- Peuquet, D.J., 2005. Theme section on advances in spatio-temporal analysis and representation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 60(1), 1-2.
- Pfeifer, P.E., and S.J. Deutsch, 1990. A starima model-building procedure with application to description and regional forecasting, *Journal of Forecasting*, 9(1), 50-59.

- Phillips, D.L., J. Dolph, and D.G. Marks, 1992. A comparison of geostatistical procedures for spatial analysis of precipitation in mountainous terrain, *Agricultural and Forest Meteorology*, 58, 119-141.
- Phillips, D. L., and D. Marks, 1996. Spatial uncertainty analysis: Propagation of interpolation errors in spatially distributed models, *Ecological Modelling Journal*, 91, 213-229.
- Phua, P.K.H., and D. Ming, 2003. Parallel nonlinear optimization techniques for training neural networks, *IEEE Transactions on Neural Networks*, 14(6), 1460-1468.
- Piechota, T.C., and J.A. Dracup, 1996. Drought and regional hydrologic variation in the United States: associations with the El Nino-Southern Oscillation, *Water Resources Research*, 32(5), 1359-1373.
- Pitman, W.V., 1973. A mathematical model for generating monthly river flows from meteorological data in South Africa, Report 2/73, Hydrological Research Unit, University of the Witwatersrand, Johannesburg.
- Plagianakos, V.P., G.D. Magoulas, and M.N. Vrahatis, 2002. Deterministic nonmonotone strategies for effective training of multi-layer perceptrons, *IEEE Transactions on Neural Networks*, 13(6), 1268-1284.
- Porter, J. W. and B.J. Pink, 1991. A method of synthetic fragments for disaggregation in stochastic data generation. *Hydrology and Water Resources Symposium*, Institution of Engineers, Australia, 187-191.
- Porto, V.W., D.B. Fogel, and L.J. Fogel, 1995. Alternative Neural Network Training Methods, *IEEE Transactions on Neural Networks*, 10(3), 16-22.
- Powell, M.J.D., 1971. On the convergence of the variable metric algorithm, *Mathematical Programming*, 7, 21-36, 1971.
- Powell, M.J.D., 1972. *Numerical Methods for Nonlinear Equations*, Academic Press, London, F.A. Lootsma edition.
- Powell, M.J.D., 1976. Some global convergence properties of a variable metric algorithm for minimization without exact line searches. In the *Proceedings of the SIAMAMS*, edited by W. Cottle and C. Lemke, volume IX, SIAM Publications, 53-72.
- Press, W.H., S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling, and B.P. Flannery, 2007. *Numerical Recipes, The Art of Scientific Computing*, 3rd Edition, Cambridge University Press, 1256 p.
- Prudhomme, C., and W.R. Duncan, 1999. Mapping extreme rainfall in a mountainous region using geostatistical techniques: a case study in Scotland, *International Journal of Climatology*, 19(12), 1337-1356.
- Quinlan, J.R., 1992. Learning with continuous classes. *Proceedings of the fifth Australian Joint Conference on AI*, World Scientific, Singapore, 343-348 p.
- Quiring, S.M., 2009. Monitoring drought: An evaluation of meteorological drought indices. *Geography Compass*, 3(1), 64-88.
- Quiring, S.M, and T.N. Papakryiakou, 2003. An evaluation of agricultural drought indices for the Canadian prairies, *Agricultural and Forest Meteorology*, 118, 49-62.
- Rao, A.R., and G. Padmanabhan, 1984. Analysis and modelling of Palmers Drought Index series, *Journal of Hydrology*, 68, 211-229.
- Rao, A.R., and T.L. Voeller, 1997. Development and testing of drought indicators. *Water Resources Management*, 11(2), 119-136.
- Redmond, K.T., 2002. The depiction of drought, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83, 1143-1147.
- Reeves, C.R. (ed.), 1993. *Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems*, Wiley, New York.
- Remesan, R., M.A. Shamim and D. Han, 2008. Model data selection using gamma test for daily solar radiation estimation, *Hydrological Processes*, 22, 4301-4309.

- Remesan, R., M.A. Shamim, D. Han, and J. Mathew, 2009. Runoff prediction using an integrated hybrid modelling scheme, *Journal of Hydrology*, 372, 48-60.
- Richard, Y., N. Fauchereau, I. Pocard, M. Rouault, and S. Trzaska, 2001. 20th century droughts in southern Africa: Spatial and temporal variability, teleconnections with oceanic and atmospheric conditions, *International Journal of Climatology*, 21, 873-885.
- Ripley, B.D., 1994. Neural networks and related methods of classification, *Journal of the Royal Statistical Society B*, 56(3), 409-456.
- Rosenblatt, F., 1958. The Perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain, *Psychological Review*, 65, 386-408.
- Rossi, G., and A. Cancelliere, 2003. At site and regional drought identification by REDIM model. In: *Tools for Drought Mitigation in Mediterranean Regions*, Water Science and Technology Library, 44, 37-54, Kluwer Academic Publishers, Netherlands.
- Rouault, M., and Y., Richard, 2003. Intensity and spatial extension of drought in South Africa at different time scales, *Water SA*, 29(4), 489-500.
- Rumelhart, D.E., and J.L. McClelland, 1986. *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructures of Cognition*, MA: MIT Press, Cambridge.
- Rumelhart, D.E., G.E. Hinton, and R.J. Williams, 1986a. Learning internal representations by error propagation. *Parallel Distributed Processing*, 1, 318-362.
- Rumelhart, D.E., G.E. Hinton, and R.J. Williams, 1986b. Learning representation of backpropagation errors, *Nature (London)*, 323, 533-536.
- Saarinen, S., R. Bramley, and G. Cybenko, 1992. *Automatic Differentiation of Algorithms: Theory, Implementation and Application*, SIAM, Philadelphia.
- Salas, J.D., 1993. Analysis and Modeling of Hydrologic Time Series, in *Handbook of Hydrology*, edited by D. R. Maidment, McGraw-Hill, Inc., New York, Chap. 19, 19.1-19.72 p.
- Salas, J.D., J.W. Delleur, V.M. Yevjevich, and W.L. Lane, 1980. *Applied modelling of hydrologic time series*, Water Resources Publications, Littleton, Colorado.
- Salas, J.D., and J.T.B. Obeysekera, 1982. ARMA model identification of hydrologic time series, *Water Resources Research*, 18(4), 1011-1021.
- Saldariaga, J., and V. Yevjevich, 1970. Application of run-lengths to hydrologic series, *Hydrological Paper*, Colorado State Univ., Fort Collins, Colorado.
- Schaefer, T.J., 1990. The Critical Success Index as an indicator of warning skill, *Weather Forecasting*, 5(4), 570-575.
- Schuermans, J.M. and M.F.P. Bierkens, 2007. Effect of spatial distribution of daily rainfall on interior catchment response of a distributed hydrological model, *Hydrology and Earth System Sciences* 11, 677-693.
- Schwefel, H.P., 1995. *Evolution and Optimum Seeking*, John Willey.
- See, L., D. Solomatine, R. Abrahart, and E. Toth, 2007. Hydroinformatics: Computational intelligence and technological developments in water science applications, Editorial, *Hydrological Sciences Journal*, 52(3), 391-396.
- Semadeni-Davies, A., 1997. Monthly snowmelt modelling for large-scale climate change studies using the degree day approach, *Ecol. Model.*, 101, 303-323.
- Sen, Z., 1976. Wet and dry periods of annual flow series. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE* 106(HY1), 99-115.
- Sen, Z., 1977. Run sums of annual flow series, *Journal of Hydrology*, 35, 311-324.
- Sen, Z., 1980. Statistical analysis of hydrologic droughts, *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 106(1), 99-115.

- Sen, Z., 1990. Critical drought analysis by second order Markov chain, *Journal of Hydrology* 120, 183-202.
- Sen, Z., 1998. Probabilistic formulation of spatio-temporal pattern. *Theoretical and Applied Climatology*, 61, 197-206.
- Sen, Z., and A. Oztopal, 2001. Genetic algorithms for the classification and prediction of precipitation occurrence, *Hydrological Sciences*, 46(2), 255-268.
- Serre, M.L., G. Christakos, H. Li, and C.T. Miller, 2003a. A BME solution of the inverse problem for saturated groundwater flow, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 17, 354-369.
- Serre, M.L., A. Kolovos, G. Christakos, and K. Modis, 2003b. An application of the holistochastic human exposure methodology to naturally occurring arsenic in Bangladesh drinking water, *Risk Analysis*, 23(3), 515-528.
- Setiono, R., and L.C.K. Hui, 1995. Use of a quasi-Newton in a feedforward neural network construction algorithm, *IEEE Transactions on Neural Networks*, 6(1), 273-277.
- Shafer, B.A., and L.E. Dezman, 1982. Development of a Surface Water Supply Index (SWSI) to assess the severity of drought conditions in snowpack runoff areas. *Proceedings 13th Conference of the 50th Annual Western Snow Conference*, 164-175.
- Shamseldin, A.Y., A.E. Nasr, and K.M. O'Connor, 2002. Comparison of different forms of Multi-layer Feed-Forward Neural Network method used for river flow forecasting, *Hydrology and Earth System Sciences*, 6(4), 671-684.
- Shanno, D.F., 1978. Conjugate gradient methods with inexact line searches, *Mathematics of Operations Research*, 3, 244-256.
- Shepherd, A. J., 1997. *Second-Order Methods for Neural Networks*, New York, Springer.
- Shin, H.S., and J.D. Salas, 2000. Regional drought analysis based on neural networks, *Journal of Hydrologic Engineering*, 5(2), 145-155.
- Shukla, S., and A.W. Wood, 2008. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought, *Geophysical Research Letters*, 35, L02405, doi:10.1029/2007GL032487.
- Sidiropoulos, P., A. Loukas, N. Mylopoulos, and L. Vasilides, 2009. Integrated OpenMI modelling and management of lake Karla aquifer under climate change. *EGU General Assembly*, 19-24 April 2009, Vienna, Austria, *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 11.
- Sims, A.P., D.S. Niyogi, and S. Raman, 2002. Adopting drought indices for estimating soil moisture: A North Carolina case study, *Geophysical Research Letters*, 29(8), 1183, doi:10.1029/2001GL013343.
- Singh, C.V, 1999. Principal Components of Monsoon rainfall in Normal, Flood and Drought years over India, *International Journal of Climatology*, 19, 639-652.
- Sirdas, S., and Z. Sen, 2003. Spatio-temporal drought analysis in the Trakya region, Turkey, *Hydrological Sciences Journal*, 48(5), 809-820.
- Skøien, J.O., G. Blosch, and A.W. Western, 2003. Characteristic space scales and timescales in hydrology, *Water Resources Research*, 39, 1304, doi:10.1029/2002WR001736.
- Smakhtin, V.U., 2001. Low flow hydrology: A review, *Journal of Hydrology*, 240(147-186).
- Smakhtin, V.U., and D.A. Hughes, 2004. Review, Automated Estimation and Analyses of Drought Indices in South Asia, *IWMI Working Paper No 83, Drought Series Paper No. 1*. Colombo, Sri Lanka, 24 pp.
- Smakhtin, V.U., and D.A. Hughes, 2007. Automated estimation and analyses of meteorological drought characteristics from monthly rainfall data, *Environmental Modelling and Software*, 22, 880-890.
- Smith, R.B., 1979. *The Influence of Mountains on the Atmosphere*, *Advances in Geophysics*, 21, 87-230. Academic Press.
- Smith, S., and L. Lasdon, 1992. Solving Large Sparse Nonlinear Programs Using GRG, *ORSA Journal on Computing*, 4(1), 3-15.

- Snedecor, G.W., and W.G. Cochran, 1980. *Statistical Methods*, Iowa State University Press, Iowa, 7th edition.
- Solomatine, D.P., and Y. Xue, 2004. M5 model trees compared to neural networks: application to flood forecasting in the upper reach of the Huai River in China, *ASCE Journal of Hydrologic Engineering*, 9(6), 491-501.
- Solomatine, D.P., and M.B. Siek, 2006. Modular learning models in forecasting natural phenomena, *Neural Networks Journal*, 19(2), 215-224.
- Solomatine, D.P., M. Maskey, and D.L. Shrestha, 2008. Instance-based learning compared to other data-driven methods in hydrologic forecasting, *Hydrological Processes*, 22(2), 275 -287.
- Sönmez, F.K., A.U. Kömüscü, A. Erkan, and E. Turgu, 2005. An analysis of spatial and temporal dimension of drought vulnerability in Turkey using the Standardized Precipitation Index, *Natural Hazards*, 35(2), 243-264.
- Sorensen, P.H., M. Norgaard, O. Ravn, and N.K. Poulsen, 1999. Implementation of neural network based non-linear predictive control, *Neurocomputing*, 28, 37-51.
- Sperduti, A., and A. Starita, 1997. Supervised neural networks for the classification of structures, *IEEE Transactions on Neural Networks*, 8(3), 714-735.
- Spiliotopoulos M., A. Marinaki, and H. Michalopoulou, 2006. Drought estimation for Crete island, Greece. In *Proceedings of International Conference on: Information Systems in Sustainable Agriculture, Agroenvironment and Food Technology*, N.R. Dalezios, S. Tzortzios and N. Samaras (Editors), Volos, Greece, 20-23 September (ISBN 960-8029-42-2), 823-829.
- Srikanthan, R., and T.A. McMahon, 1985. Stochastic generation of rainfall and evaporation data, *AWRC Technical Paper No.84.*, 301.
- Srikanthan, R., and T.A. McMahon, 2001. Stochastic generation of annual, monthly and daily climate data: A review, *Hydrology and Earth System Sciences*, 5, 653-670.
- Srinivasan, D., A.C. Liew, and C.S. Chang, 1994. A neural network short-term load forecaster, *Electric Power Systems Research*, 28, 227-234.
- Srivastav, R.K., K.P. Sudheer, and I. Chaubey, 2007. A simplified approach to quantifying predictive and parametric uncertainty in artificial neural network hydrologic models, *Water Resources Research* 43, W10407.
- Stefansson, A., N. Koncar, and A.J. Jones, 1997. A note on the gamma test. *Neural Computing and Applications*, 5(3), 131-133.
- Steinemann, A.C., 2003. Drought indicators and triggers: a stochastic approach to evaluation, *Journal of American Water Resources Association*, 39(5), 1217-1233.
- Stephenson, D.B., 2000. Use of the "odds ratio" for diagnosing forecast skill, *Weather Forecasting*, 15, 221-232.
- Sun, W., and Y. Yuan, 2006. *Optimization Theory and Methods*, Springer, New York.
- Svoboda, M., D. LeCompte, M. Hayes, R. Heim, K. Gleason, J. Angel, B. Rippey, R. Tinker, M. Palecki, D. Stooksbury, D. Miskus, and S. Stephens, 2002. The drought monitor, *Bulletin of American Meteorological Society*, 83, 1181-1190.
- Swetnam, T.W., C.D. Allen, and J.L. Betancourt, 1999. Applied historical ecology: using the past to manage for the future. *Ecological Applications*, 9(4), 1189-1206.
- Szalai, S., C. S. Szinell, and J. Zoboki, 2000. Drought monitoring in Hungary, In: *Early warning systems for drought preparedness and drought management*, World Meteorological Organization, Lisboa, 182-199.
- Szep, I.J., J. Mika, and Z. Dunkel, 2005. Palmer Drought Severity Index (PDSI) as soil moisture indicator: physical interpretation, statistical behaviour and relation to global climate, *Phys. Chem. Earth*, 30, 231-243.

- Tadesse, T., D.A. Wilhite, S.K. Harms, M.J. Hayes, and S. Goddard, 2004. Drought monitoring using data mining techniques: A case study for Nebraska, USA, *Natural Hazards*, 33, 1-21.
- Tallaksen, L.M., and H.A.J. (eds.) van Lanen, 2004. *Hydrological Drought - Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater*, Developments in Water Sciences 48, Elsevier B.V., The Netherlands.
- Tamura, S.I., and M. Tateishi, 1997. Capabilities of a four-layered feedforward neural network: Four layers versus three, *IEEE Transactions on Neural Networks*, 8(2), 251-265.
- Tate, E.L., and A. Gustard, 2000. Drought definition: A hydrological perspective, In: *Drought and Drought Mitigation in Europe*, edited by J.V. Voght., and F. Somma, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 23-48.
- Thiessen, A.H., 1911. Precipitation averages for large areas, *Monthly Weather Review*, 39, 1082-1084.
- Thom, H.C.S., 1958. A note on the gamma distribution, *Monthly Weather Review*, 86, 117-122.
- Thorntwaite, C.W., and J.R. Mather, 1955. The water balance. Publication in *Climatology*, Laboratory of Climatology, 8, 1-104.
- Thyer, M.A., G. Kuczera, and Q.J. Wang, 2002. Quantifying parameter uncertainty in stochastic models using the Box-Cox transformation, *Journal of Hydrology*, 265, 246-257.
- Thyer, M.A., A.J. Frost, and G.A. Kuczera, 2006. Parameter estimation and model identification for stochastic models of annual hydrological data: Is the observed record long enough?, *Journal of Hydrology*, 330, 313-328.
- Tiwari, M.K., and C. Chatterjee, 2010. Uncertainty assessment and ensemble flood forecasting using bootstrap based artificial neural networks (BANNs), *Journal of Hydrology*, 382, 20-33.
- Tsakiris, G., and H. Vangelis, 2004. Towards a drought watch system based on spatial SPI, *Water Resour. Manag.*, 18, 1-12.
- Tsakiris, G., and H. Vangelis, 2005. Establishing a Drought Index incorporating evapotranspiration, *European Water*, 9-10, 1-9.
- Tsakiris, G., D. Pangalou, and H. Vangelis, 2007. Regional drought assessment based on the Reconnaissance Drought Index (RDI), *Water Resources Management*, 21(5), 821-833.
- Tsui, A.P.M., and A.J. Jones, 1999. Periodic response to external stimulation of a chaotic neural network with delayed feedback, *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 9(4), 713-722.
- Tsui, A.P.M., A.J. Jones, and A.G. de Oliveira, 2002. The construction of smooth models using irregular embeddings determined by a gamma test analysis, *Neural Computing & Applications*, 10(4), 318-329.
- Tzabiras, J., A. Loukas, and L. Vasiliades, 2010. Spatiotemporal statistical downscaling method with uncertainty for climate change impact assessment on droughts. EGU General Assembly 2010, 2-7 May 2010, Vienna, Austria, *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 12, EGU2010-14100.
- United Nations Environment Program, *Mediterranean Action Plan*, 2005. *Mediterranean Strategy for Sustainable Development: A Framework for Environmental Sustainability and Shared Prosperity*, UNEP-MAP, 68 p.
- U.S.D.A. Soil Conservation Service, 1972. *National Engineering Handbook*. Sec. 4, Washington, D.C.
- Van Der Smagt, P., 1994. Minimisation methods for training feedforward neural networks, *Neural Networks*, 7(1), 1-11.
- Van Rooy, M.P., 1965. A rainfall anomaly index independent of time and space, *Notos*, 14, 43-48.
- Vandewiele, G.L., C.-Y. Xu, and N-L. Win, 1992. Methodology and comparative study of monthly water balance models in Belgium, China and Burma, *Journal of Hydrology*, 134, 315-347.
- Vandewiele, G.L., and N.L. Win, 1998. Monthly water balance models for 55 basins in 10 Countries, *Hydrological Sciences Journal*, 43(5), 687-699.

- Vasilas N., E. Kalapanidas, N. Avouris, and S. Perantonis, 2001. Intelligent techniques for spatio-temporal data analysis in environmental applications, *Machine Learning and Its Applications, Lecture Notes in Artificial Intelligence (LNAI)*, 2049, Springer-Verlag, 318-324.
- Vasiliades, L., and A. Loukas, 2005. Spatiotemporal monthly precipitation mapping for Pinios River Basin, Greece. 2nd EGU General Assembly, 24-29 April 2005, Vienna, Austria. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 7, 2005.
- Vasiliades, L., and A. Loukas, 2006. Hydrological drought evaluation with the use of meteorological drought indices. 3rd EGU General Assembly, 2-7 April 2006, Vienna, Austria. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 8, 2006.
- Vasiliades, L., and A. Loukas, 2007. Evaluation of drought forecasting models in Pinios river basin, Greece. EGU 9th Plinius Conference on Mediterranean Storms, 10-13 September 2007, Varenna, Italy.
- Vasiliades, L., and A. Loukas, 2008. Meteorological drought forecasting models. EGU General Assembly 2008, 13-18 April 2008, Vienna, Austria. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 10.
- Vasiliades, L., and A. Loukas, 2009a. Hydrological response to meteorological drought using the Palmer drought indices in Thessaly, Greece, *Desalination Journal*, 237, 3-21.
- Vasiliades, L., and A. Loukas, 2009b. Precipitation spatial interpolation methods assessment in Pinios river basin, Greece. Proc. 11th International Conference on Environmental Science and Technology, Chania, Crete, 3-5 September 2009, Vol. A., 1523-1530.
- Vasiliades, L., and A. Loukas, 2009c. Spatiotemporal drought monitoring for Pinios river basin, Greece. EGU General Assembly 2009, 19-24 April 2009, Vienna, Austria. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 11, EGU2009-13835.
- Vasiliades, L., A. Loukas, and G. Patsonas, 2009. Evaluation of a statistical downscaling procedure for the estimation of climate change impacts on droughts, *Natural Hazards and Earth Systems Sciences*, 9, 879-894.
- Vasiliades, L., and A. Loukas, 2010a. Spatiotemporal drought forecasting using nonlinear models. EGU General Assembly 2010, 2-7 May 2010, Vienna, Austria, *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 12, EGU2010-14321.
- Vasiliades, L., and A. Loukas, 2010b. A hybrid spatiotemporal drought forecasting model for operational use. EGU 12th Plinius Conference on Mediterranean Storms, 1-4 September 2010, Corfu, Greece, *Plinius Conference Abstracts*, Vol. 12, Plinius12-50.
- Vasiliades, L., A. Loukas, and N. Liberis, 2010. A water balance derived drought index for Pinios river basin, Greece, *Water Resources Management*, doi: 10.1007/s11269-010-9665-1 (in press).
- Vicente-Serrano, S.M., and S. Begueria, 2003. Estimating extreme dryspell risk in the middle Ebro valley (Northeastern Spain): A comparative analysis of partial duration series with a general Pareto distribution and annual maxima series with a Gumbel distribution, *Int. J. Climatol.*, 23, 1103-1118.
- Vicente-Serrano, S.M., M.A. Saz-Sánchez, and J.M. Cuadrat, 2003. Comparative analysis of interpolation methods in the middle Ebro Valley (Spain): application to annual precipitation and temperature, *Climate Research*, 24, 161-180.
- Vicente-Serrano, S.M., J.C. Gonzalez-Hidalgo, M. de Luis, and J. Raventos, 2004. Drought patterns in the Mediterranean area: the Valencia region (eastern Spain), *Climate Research*, 26, 5-15.
- Vicente-Serrano, S.M., and J.I. Lopez-Moreno, 2005. Hydrological response to different time scales of climatological drought: an evaluation of the Standardized Precipitation Index in a mountainous Mediterranean basin, *Hydrology and Earth System Sciences*, 9, 523-533.
- Vicente-Serrano, S.M., S. Beguería, and J.I. López-Moreno, 2010a. A Multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index - SPEI, *Journal of Climate*, 23(7), 1696-1718, doi: 10.1175/2009JCLI2909.1.

- Vicente-Serrano S.M., S. Beguería, J.I. López-Moreno, M. Angulo, and A. El Kenawy, 2010b. A global 0.5° gridded dataset (1901-2006) of a multiscalar drought index considering the joint effects of precipitation and temperature, *Journal of Hydrometeorology*, doi: 10.1175/2010JHM1224.1.
- von Storch, H., and F.W. Zwiers, 1999. *Statistical Analysis in Climate Research*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Vyas, V.M., and G. Christakos, 1997. Spatiotemporal analysis and mapping of sulfate deposition data eastern U.S.A., *Atmos. Environ.*, 31(21), 3623-3633.
- Wackernagel, H., 2003. *Multivariate Geostatistics, An Introduction with Applications*, 3rd Edition. Springer, Berlin.
- Wang, Q.J., and R.J. Nathan, 2007. A method for coupling daily and monthly time scales in stochastic generation of rainfall series, *Journal of Hydrology*, 346(3-4), 122-130.
- Wang, Y., and I.H. Witten, 1997. Induction of model trees for predicting continuous classes, In the Proceedings of the poster papers of the European Conference on Machine Learning, University of Economics, Faculty of Informatics and Statistics, Prague.
- Ward, D., S.R. Phinn, and A.T. Murray, 2000. Monitoring growth in rapidly urbanizing areas using remotely sensed data, *Professional Geographer*, 52(3), 371-386.
- Webb, A.R., D. Lowe, and M.D. Bedworth, 1988. A comparison of nonlinear optimization strategies for feed-forward adaptive layered networks, Royal Signals and Radar Establishment, Memorandum 4157, Controller HMSO, London.
- Webster, R., and M.A. Oliver, 2007. *Geostatistics for Environmental Scientists*, Wiley, Chichester.
- Wei, W.W.S., 1990. *Time Series Analysis*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., New York.
- Weigend, A.S., B.A. Huberman, and D.E. Rumelhart, 1992. Predicting sunspots and exchange rates with connectionist networks, In M. Casdagli & S. Eubank (eds.), *Nonlinear modelling and forecasting*, Redwood City, CA: Addison-Wesley.
- Weiss, M., F. Flörke, L. Menzel, and J. Alcamo, 2007. Model-based scenarios of Mediterranean droughts, *Adv. Geosci.*, 12, 145-151.
- Weisse, A.K., and P. Bois, 2001. Topographic effects on statistical characteristics of heavy rainfall and mapping in the French Alps, *J. Appl. Meteorol.*, 40(4), 720-740.
- White, D.H., and J.J. Walcott, 2009. The role of seasonal indices in monitoring and assessing agricultural and other droughts: a review, *Crop & Pasture Science*, 60, 599-616.
- Wilhite, D.A., 2000. Drought as a natural hazard: Concepts and definitions, in *Drought: A Global Assessment*, edited by Wilhite, D.A., Routledge, 3-18.
- Wilhite, D.A., and M.H. Glantz, 1985. Understanding the drought phenomenon: The role of definitions, *Water Inter.*, 10(3), 111-120.
- Wilhite, D.A., and M. Buchanan-Smith, 2005. *Drought as Hazard: Understanding the Natural and Social Context*, In: D.A. Wilhite (Editor), *Drought and Water Crises*, Taylor and Francis Group, New York.
- Wilhite, D.A., M.D. Svoboda, and M.J. Hayes, 2007. Understanding the complex impacts of drought: a key to enhancing drought mitigation and preparedness, *Water Resources Management*, 21, 763-774.
- Wilkinson, J.H., 1965. *The Algebraic Eigenvalue Problem*, Oxford University Press, London.
- Wilks, D.S., 2005. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, 2nd Edition, Elsevier, 627.
- Witten, I.H., and E. Frank, 2000. *Data mining*, Los Altos, CA: Morgan Kaufmann Publishers.
- Wolpert, D.H., 1992. Stacked generalization, *Neural Networks*, 5(2), 241-259.
- World Meteorological Organization (WMO), 1975. *Drought and Agriculture*, World Meteorological Organization, Technical Note No 138, 392, Geneva, Switzerland.

- World Meteorological Organization (WMO), 1986. Intercomparison of Models of Snowmelt Runoff, Operational Hydrology No. 23 (WMO No. 646), Geneva, Switzerland.
- World Meteorological Organization (WMO), 2000. Early Warning Systems for Drought Preparedness and Drought Management, Lisboa.
- Wotling, G., Ch. Bouvier, J. Danloux, and J.M. Fritsch, 2000. Regionalization of extreme precipitation distribution using the principal components of the topographical environment, *Journal of Hydrology*, 233, 86-101.
- Wu, H, M.J. Hayes, A. Weis, and Q. Hu, 2001. An Evaluation of the Standardized Precipitation Index, the China-Z Index and the statistical Z-Score, *International Journal of Climatology*, 21, 745-758.
- Wu, H., M.J. Hayes, D.A. Wilhite, and M.D. Svoboda, 2005. The effect of data length on the standardized precipitation index calculation, *International Journal of Climatology*, 25, 505-520.
- Wu, H., M.D. Svoboda, M.J. Hayes, D.A. Wilhite, and F. Wen, 2007. Appropriate application of the Standardized Precipitation Index in arid locations and dry seasons *International Journal of Climatology*, 27, 65-79.
- Xiaodong, J., R. Olea, and Y. Yun-Sheng, 1996. Semivariogram modeling by weighted least squares, *Computers & Geosciences*, 22(4), 387-397.
- Xu, C.-Y., and V.P. Singh, 1998. A review on monthly water balance models for water resources investigations, *Water Resources Management*, 12(1), 20-50.
- Yevjevich, V., 1967. An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts, *Hydrology Paper no. 23*, Colorado State University Publication, Fort Collins, Colorado, USA.
- Yin, H.X., and D.L. Du, 2007. The global convergence of self-scaling BFGS algorithm with nonmonotone line search for unconstrained nonconvex optimization problems, *Acta Mathematica Sinica*, 23(7), 1233-1240.
- Yonaba, H., F. Anctil, and V. Fortin, 2010. Comparing Sigmoid Transfer Functions for Neural Network Multistep Ahead Streamflow Forecasting, *Journal of Hydrologic Engineering*, 15(4), 275-283.
- Yurekli, K, K. Kurunc, and F. Ozturk, 2005. Application of linear stochastic models to monthly flow data of Kelkit Stream, *Ecol Model*, 183, 67-75.
- Zhang, X., 1994. Time series analysis and prediction by neural networks, *Optimization Methods and Software*, 4, 151-170.
- Zhang, G., B.E. Patuwo, and M.Y. Hu, 1998. Forecasting with artificial neural networks: The state of the art, *International Journal of Forecasting*, 14, 35-62.
- Zhang, G.P., and M. Qi, 2005. Neural network forecasting for seasonal and trend time series, *European Journal of Operational Research*, 160, 501-514.
- Zhang, X., and R. Srinivasan, 2009. GIS-based spatial precipitation estimation: A comparison of geostatistical approaches, *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*, 45(4), 894-906.
- Zhang, X.F., J.C.H. Eijkeren, and A.W. Heemink, 1995. On the weighted least squares method for fitting a semivariogram model, *Computers & Geosciences*, 21(4), 605-608.
- Αναγνωστοπούλου, Χ., 2003. Συμβολή στη μελέτη της ξηρασίας στον Ελληνικό χώρο, Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 219 σελ.
- Βασιλειάδης, Λ., 2005. Διερεύνηση της σχέσης μετεωρολογικής και υδρολογικής ξηρασίας, Ημερίδα ΥΔΡΟΜΕΔΩΝ, 9 Ιουλίου 2005, Πάτρα.
- Βασιλειάδης, Λ., και Α. Λουκάς, 2006. Χωροχρονική κατανομή μηνιαίας υετόπτωσης στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού. 10^ο Πανελλήνιο Επιστημονικό Συνέδριο, Ελληνική Υδροτεχνική Ένωση, 13-16 Δεκεμβρίου 2006, Ξάνθη, 39-46.

- ΕΥΔΕ Αχελώου και ΕΝVECO, 1995. Συνολική Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων της εκτροπής Αχελώου, ΥΠΕΧΩΔΕ, Αθήνα.
- Ευστρατιάδης, Α., Α. Κουκουβίνος, Δ. Κουτσογιάννης, και Ν. Μαμάσης, 2002. Υδρολογική μελέτη, Διερεύνηση των δυνατοτήτων διαχείρισης και προστασίας της ποιότητας της Λίμνης Πλαστήρα, Τεύχος 2, 70 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Μάρτιος 2002.
- Ζαραγκότας, Χ., Α. Λουκάς, Λ. Βασιλειάδης, και Π. Μήτσιου, 2007. Χωρική και χρονική πιθανοθεωρητική ανάλυση ξηρασίας στη Θεσσαλία. 5ο Συνέδριο Γεωργικής Μηχανικής "Η Συμβολή των Γεωργικών Μηχανικών σε μια Ανταγωνιστική Γεωργία", Λάρισα, 18-20 Οκτωβρίου 2007, 550-557.
- Καμπράγκου, Ε., 2006. Ολοκληρωμένη διαχείριση των υδατικών πόρων, Εφαρμογή του πίνακα ισορροπημένης στοχοθεσίας στη Λεκάνη Απορροής του Νέστου, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, ΑΠΘ.
- Κουτσογιάννης, Δ., 1997. Στατιστική Υδρολογία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα, 311 σελ.
- Κουτσογιάννης, Δ., Α. Ανδρεαδάκης, Α. Μαυροδήμου κ.ά., 2008. Εθνικό Πρόγραμμα Διαχείρισης και Προστασίας των Υδατικών Πόρων, *Υποστήριξη της κατάρτισης Εθνικού Προγράμματος Διαχείρισης και Προστασίας των Υδατικών Πόρων*, 748 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Λουκάς, Α., Λ. Βασιλειάδης, & Ν. Μπαστρογιάννης, 2003. Υδρολογική προσομοίωση υδατικού ισοζυγίου λεκάνης απορροής Γερμασόγειας, Κύπρος. Πρακτικά Ημερίδας «Μελέτες και Έρευνες Υδατικών Πόρων στον Κυπριακό Χώρο», Λευκωσία, Κύπρος, 20 Ιουνίου 2003, 83-114.
- Μαμάσης, Ν., και Δ. Κουτσογιάννης, 2007. Φυσικές, κοινωνικές και τεχνολογικές πτυχές της ξηρασίας - Το παράδειγμα της Αθήνας. Φυσικές και Τεχνολογικές Καταστροφές στην Ευρώπη και την Ελλάδα, επιμέλεια Κ. Σαπουντζάκη, Gutenberg, Αθήνα, 61-88.
- Μαρίνος, Π., Μ. Θάνος, Β. Περγλέρος, και Μ. Καββαδάς, 1995. Υδατικό δυναμικό θεσσαλικής πεδιάδας - Επιπτώσεις από την υπερεκμετάλλευση του, Πρακτικά 3^{ου} Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, Ηράκλειο Κρήτης.
- Μαχαίρας, Π., 1992. Αίτια και μετεωρολογικά χαρακτηριστικά της ξηρασίας στον ελληνικό χώρο, Πρακτικά Συμποσίου «Λειψυδρία και Πλημμύρες», Γεωτεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Θεσσαλονίκη 17-18 Μαρτίου 1992, 159-169.
- Παπαμιχαήλ, Δ., 2001. Τεχνική Υδρολογία Επιφανειακών Υδάτων, Εκδόσεις Γιαχούδη-Γιαπούλη, 394 σελ.
- Σπηλιωτόπουλος, Μ., και Χ. Μιχαλοπούλου, 2000. Συμβολή στη μελέτη της ξηρασίας στο Αιγαίο πέλαγος. Πρακτικά 5^{ου} Πανελληνίου Επιστημονικού Συνεδρίου Μετεωρολογίας, Κλιματολογίας και Φυσικής της Ατμόσφαιρας, Σεπτέμβριος 2000, Θεσσαλονίκη, 305-312.
- Σπηλιωτόπουλος, Μ., Ε. Κοντού, και Χ. Μιχαλοπούλου, 2002. Συμβολή στη μελέτη της ξηρασίας στην Ελλάδα. Πρακτικά 6^{ου} Πανελληνίου Επιστημονικού Συνεδρίου Μετεωρολογίας, Κλιματολογίας και Φυσικής της Ατμόσφαιρας, 25-28 Σεπτεμβρίου 2002, Εκδότης: Β.Δ. Κατσούλης, Ιωάννινα, 422-429.
- Τσακίρης, Γ., 1995. Υδατικοί πόροι: Ι Τεχνική Υδρολογία, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.
- ΥΒΕΤ, 1996. Σχέδιο προγράμματος διαχείρισης των υδατικών πόρων της χώρας. Ταξινόμηση ποσοτικών και ποιοτικών παραμέτρων των υδατικών πόρων με βάσει τις αποδελτιωμένες μελέτες του ΥΒΕΤ, με χρήση συστημάτων γεωγραφικής πληροφορίας, Τομέας υδατικών πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 339 σελίδες, Υπουργείο Ανάπτυξης, Αθήνα, Νοέμβριος 1996.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι'

I. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: ΧΡΟΝΙΚΗ ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΞΗΡΑΣΙΑΣ

I.1. Χρονική πρόγνωση SPI-3μηνών

I.1.1. Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+2, SPI-3_{t+2}

Πίνακας I.1. Στατιστικά αποτελέσματα πρόγνωσης SPI-3_{t+2} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης

Κριτήριο	DANN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Eff	0.33	0.34	0.30	0.35	0.33	0.29	-0.27	-0.29	-0.26
R	0.58	0.58	0.55	0.59	0.58	0.54	0.37	0.35	0.37
RMSE	0.84	0.77	0.85	0.83	0.78	0.85	1.16	1.08	1.14
MAE	0.65	0.59	0.66	0.64	0.59	0.66	0.90	0.82	0.88
SS _{MSE}	0.47	0.49	0.44	0.49	0.48	0.44	Μοντέλο Αναφοράς		

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

Πίνακας I.2. Ποιοτικός πίνακας αξιολόγησης πρόγνωσης συμβάντων ξηρασίας του SPI-3_{t+2} (SPI≤-1).

	Παρατηρούμενα συμβάντα ξηρασίας Περίοδος εκπαίδευσης		Παρατηρούμενα συμβάντα ξηρασίας Χρονική πιστοποίηση		Παρατηρούμενα συμβάντα ξηρασίας Χωροχρονική πιστοποίηση	
DANN	A=371 B=2292	C=218 D=13919	A=80 B=715	C=60 D=4905	A=130 B=1206	C=117 D=7007
RANN	A=464 B=2199	C=245 D=13892	A=97 B=698	C=49 D=4916	A=169 B=1167	C=134 D=6990
Persistence	A=917 B=1746	C=1727 D=12410	A=245 B=550	C=506 D=4459	A=454 B=882	C=860 D=6264

Πίνακας I.3. Στατιστικά αποτελέσματα ποιοτικής πρόγνωσης SPI-3_{t+2} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης

Κριτήριο	Εκπαίδευση	DANN		Persistence		
		Χρονική Πιστοποίηση	Χωροχρονική Πιστοποίηση	Χρονική Πιστοποίηση	Χωροχρονική Πιστοποίηση	
Accuracy	0.85	0.87	0.84	0.79	0.82	0.79
Bias	0.22	0.18	0.18	0.99	0.94	0.98
POD	0.14	0.10	0.10	0.34	0.31	0.34
FAR	0.37	0.43	0.47	0.65	0.67	0.65
POFD	0.02	0.01	0.02	0.12	0.10	0.12
CSI	0.13	0.09	0.09	0.21	0.19	0.21
HK	0.12	0.09	0.08	0.22	0.21	0.22
OR	10.34	9.15	6.46	3.77	3.93	3.75

1.2. Χρονική πρόγνωση SPI-6μηνών

1.2.1. Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+2, SPI-6_{t+2}

Πίνακας 1.4. Στατιστικά αποτελέσματα πρόγνωσης SPI-6_{t+2} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1962 – Σεπ. 2002)

Κριτήριο	DANN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Eff	0.63	0.57	0.61	0.64	0.57	0.62	0.39	0.29	0.39
R	0.80	0.76	0.78	0.80	0.76	0.79	0.70	0.65	0.70
RMSE	0.63	0.60	0.63	0.62	0.57	0.62	0.80	0.74	0.78
MAE	0.48	0.45	0.48	0.48	0.43	0.47	0.62	0.56	0.60
SS _{MSE}	0.40	0.38	0.37	0.41	0.40	0.37	Μοντέλο Αναφοράς		

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

Πίνακας 1.5. Ποιοτικός πίνακας αξιολόγησης πρόγνωσης συμβάντων ξηρασίας του SPI-6_{t+2} (SPI≤-1).

Πίνακας πρόγνωσης επεισοδίων ξηρασίας	DANN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
A (επιτυχίες)	1331	245	540	1288	264	559	1488	304	663
C (λανθασμένοι συναγερμοί)	536	170	296	522	172	274	1216	364	617
B (αστοχίες)	1444	377	745	1487	358	726	1287	318	622
D σωστά μη επεισόδια ξηρασίας	13489	4968	6879	13503	4966	6901	12809	4774	6558

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

Πίνακας 1.6. Στατιστικά αποτελέσματα ποιοτικής πρόγνωσης SPI-6_{t+2} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης

Κριτήριο	DANN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Accuracy	0.88	0.91	0.88	0.88	0.91	0.88	0.85	0.88	0.85
Bias	0.67	0.67	0.65	0.65	0.70	0.65	0.97	1.07	1.00
POD	0.48	0.39	0.42	0.46	0.42	0.44	0.54	0.49	0.52
FAR	0.29	0.41	0.35	0.29	0.39	0.33	0.45	0.54	0.48
POFD	0.04	0.03	0.04	0.04	0.03	0.04	0.09	0.07	0.09
CSI	0.40	0.31	0.34	0.39	0.33	0.36	0.37	0.31	0.35
HK	0.44	0.36	0.38	0.43	0.39	0.40	0.45	0.42	0.43
OR	23.20	18.99	16.85	22.41	21.29	19.39	12.18	12.54	11.33

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

1.2.2. Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+3, SPI-6_{t+3}

Πίνακας 1.7. Στατιστικά αποτελέσματα πρόγνωσης SPI-6_{t+3} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1962 - Σεπ. 2002)

Κριτήριο	DANN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Eff	0.49	0.41	0.46	0.53	0.44	0.47	0.14	-0.06	0.10
R	0.70	0.65	0.68	0.73	0.67	0.69	0.57	0.47	0.55
RMSE	0.74	0.70	0.74	0.71	0.69	0.73	0.96	0.95	0.96
MAE	0.57	0.54	0.57	0.55	0.52	0.57	0.75	0.72	0.74
SS _{MSE}	0.41	0.45	0.40	0.45	0.47	0.42	Μοντέλο Αναφοράς		

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

Πίνακας 1.8. Ποιοτικός πίνακας αξιολόγησης πρόγνωσης συμβάντων ξηρασίας του SPI-6_{t+3} (SPI≤-1).

Πίνακας πρόγνωσης επεισοδίων ξηρασίας	DANN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
A (επιτυχίες)	813	188	355	877	201	387	1119	239	512
C (λανθασμένοι συναγερμοί)	381	112	198	386	119	221	1508	396	734
B (αστοχίες)	1801	526	911	1737	513	879	1495	475	754
D σωστά μη επεισόδια ξηρασίας	13805	4934	6996	13800	4927	6973	12678	4650	6460

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

Πίνακας 1.9. Στατιστικά αποτελέσματα ποιοτικής πρόγνωσης SPI-6_{t+3} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης

Κριτήριο	DANN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Accuracy	0.87	0.89	0.87	0.87	0.89	0.87	0.82	0.85	0.82
Bias	0.46	0.42	0.44	0.48	0.45	0.48	1.00	0.89	0.98
POD	0.31	0.26	0.28	0.34	0.28	0.31	0.43	0.33	0.40
FAR	0.32	0.37	0.36	0.31	0.37	0.36	0.57	0.62	0.59
POFD	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03	0.11	0.08	0.10
CSI	0.27	0.23	0.24	0.29	0.24	0.26	0.27	0.22	0.26
HK	0.28	0.24	0.25	0.31	0.26	0.27	0.32	0.26	0.30
OR	16.36	15.75	13.77	18.05	16.22	13.89	6.29	5.91	5.98

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

1.3. Χρονική πρόγνωση SPI-9μηνών

1.3.1. Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+2, SPI-9_{t+2}

Πίνακας 1.10. Στατιστικά αποτελέσματα πρόγνωσης SPI-9_{t+2} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1962 – Σεπ. 2002)

Κριτήριο	DANN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Eff	0.77	0.73	0.75	0.77	0.73	0.75	0.60	0.61	0.61
R	0.88	0.86	0.87	0.88	0.86	0.87	0.80	0.81	0.81
RMSE	0.50	0.45	0.50	0.49	0.45	0.50	0.65	0.54	0.63
MAE	0.38	0.33	0.38	0.38	0.34	0.37	0.49	0.41	0.47
SS _{MSE}	0.41	0.31	0.37	0.43	0.31	0.37	Μοντέλο Αναφοράς		

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

Πίνακας 1.11. Ποιοτικός πίνακας αξιολόγησης πρόγνωσης συμβάντων ξηρασίας του SPI-9_{t+2} (SPI≤-1).

Πίνακας πρόγνωσης επεισοδίων ξηρασίας	DANN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
A (επιτυχίες)	1707	339	792	1691	326	772	1820	344	838
C (λανθασμένοι συναγερμοί)	509	170	281	517	160	264	953	303	516
B (αστοχίες)	1119	272	563	1135	285	583	1006	267	517
D σωστά μη επεισόδια ξηρασίας	13465	4979	6824	13457	4989	6841	13021	4846	6589

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

Πίνακας 1.12. Στατιστικά αποτελέσματα ποιοτικής πρόγνωσης SPI-9_{t+2} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης

Κριτήριο	DANN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Accuracy	0.90	0.92	0.90	0.90	0.92	0.90	0.88	0.90	0.88
Bias	0.78	0.83	0.79	0.78	0.80	0.76	0.98	1.06	1.00
POD	0.60	0.55	0.58	0.60	0.53	0.57	0.64	0.56	0.62
FAR	0.23	0.33	0.26	0.23	0.33	0.25	0.34	0.47	0.38
POFD	0.04	0.03	0.04	0.04	0.03	0.04	0.07	0.06	0.07
TS-CSI	0.51	0.43	0.48	0.51	0.42	0.48	0.48	0.38	0.45
HK	0.57	0.52	0.54	0.56	0.50	0.53	0.58	0.50	0.55
OR	40.35	36.50	34.16	38.78	35.67	34.31	24.72	20.61	20.70

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

1.3.2. Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+3, SPI-9_{t+3}

Πίνακας 1.13. Στατιστικά αποτελέσματα πρόγνωσης SPI-9_{t+3} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1962 - Σεπ. 2002)

Κριτήριο	DANN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Eff	0.65	0.63	0.64	0.67	0.63	0.64	0.39	0.47	0.41
R	0.81	0.79	0.80	0.82	0.80	0.80	0.70	0.74	0.71
RMSE	0.61	0.52	0.60	0.59	0.52	0.60	0.80	0.62	0.77
MAE	0.46	0.39	0.46	0.45	0.39	0.46	0.61	0.47	0.58
SS _{MSE}	0.43	0.30	0.39	0.45	0.31	0.39	Μοντέλο Αναφοράς		

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

Πίνακας 1.14. Ποιοτικός πίνακας αξιολόγησης πρόγνωσης συμβάντων ξηρασίας του SPI-9_{t+3} (SPI≤-1).

Πίνακας πρόγνωσης επεισοδίων ξηρασίας	DANN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
A (επιτυχίες)	1386	264	630	1390	292	637	1586	312	724
C (λανθασμένοι συναγερμοί)	570	144	291	516	143	291	1187	335	630
B (αστοχίες)	1461	338	727	1457	310	720	1261	290	633
D σωστά μη επεισόδια ξηρασίας	13383	5014	6812	13437	5015	6812	12766	4823	6473

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

Πίνακας 1.15. Στατιστικά αποτελέσματα ποιοτικής πρόγνωσης SPI-9_{t+3} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης

Κριτήριο	DANN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Accuracy	0.88	0.92	0.88	0.88	0.92	0.88	0.85	0.89	0.85
Bias	0.69	0.68	0.68	0.67	0.72	0.68	0.97	1.07	1.00
POD	0.49	0.44	0.46	0.49	0.49	0.47	0.56	0.52	0.53
FAR	0.29	0.35	0.32	0.27	0.33	0.31	0.43	0.52	0.47
POFD	0.04	0.03	0.04	0.04	0.03	0.04	0.09	0.06	0.09
CSI	0.41	0.35	0.38	0.41	0.39	0.39	0.39	0.33	0.36
HK	0.45	0.41	0.42	0.45	0.46	0.43	0.47	0.45	0.44
OR	22.27	27.20	20.29	24.84	33.03	20.71	13.53	15.49	11.75

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

I.3.3. Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+4, SPI-9_{t+4}

Πίνακας I.16. Στατιστικά αποτελέσματα πρόγνωσης SPI-9_{t+4} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1962 – Σεπ. 2002)

Κριτήριο	DANN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Eff	0.54	0.51	0.52	0.57	0.52	0.52	0.17	0.29	0.19
R	0.74	0.72	0.72	0.75	0.73	0.72	0.60	0.65	0.60
RMSE	0.69	0.60	0.69	0.67	0.59	0.68	0.93	0.72	0.89
MAE	0.53	0.45	0.53	0.52	0.45	0.53	0.71	0.55	0.68
SS _{MSE}	0.44	0.31	0.41	0.48	0.33	0.41	Μοντέλο Αναφοράς		

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

Πίνακας I.17. Ποιοτικός πίνακας αξιολόγησης πρόγνωσης συμβάντων ξηρασίας του SPI-9_{t+4} (SPI≤-1).

Πίνακας πρόγνωσης επεισοδίων ξηρασίας	DANN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
A (επιτυχίες)	1065	202	463	1116	230	484	1370	257	621
C (λανθασμένοι συναγερμοί)	531	129	259	493	136	270	1403	390	733
B (αστοχίες)	1795	388	894	1744	360	873	1490	333	736
D σωστά μη επεισόδια ξηρασίας	13409	5041	6844	13447	5034	6833	12537	4780	6370

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

Πίνακας I.18. Στατιστικά αποτελέσματα ποιοτικής πρόγνωσης SPI-9_{t+4} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης

Κριτήριο	DANN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Accuracy	0.86	0.91	0.86	0.87	0.91	0.86	0.83	0.87	0.83
Bias	0.56	0.56	0.53	0.56	0.62	0.56	0.97	1.10	1.00
POD	0.37	0.34	0.34	0.39	0.39	0.36	0.48	0.44	0.46
FAR	0.33	0.39	0.36	0.31	0.37	0.36	0.51	0.60	0.54
POFD	0.04	0.02	0.04	0.04	0.03	0.04	0.10	0.08	0.10
CSI	0.31	0.28	0.29	0.33	0.32	0.30	0.32	0.26	0.30
HK	0.33	0.32	0.30	0.35	0.36	0.32	0.38	0.36	0.35
OR	14.98	20.34	13.69	17.45	23.65	14.03	8.22	9.46	7.33

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

1.4. Χρονική πρόγνωση SPI-12μηνών

1.4.1. Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+2, SPI-12_{t+2}

Πίνακας 1.19. Στατιστικά αποτελέσματα πρόγνωσης SPI-12_{t+2} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1962 - Σεπ. 2002)

Κριτήριο	DANN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Eff	0.85	0.81	0.83	0.85	0.83	0.84	0.74	0.74	0.74
R	0.92	0.90	0.91	0.92	0.91	0.91	0.87	0.87	0.87
RMSE	0.40	0.38	0.41	0.40	0.37	0.41	0.53	0.46	0.51
MAE	0.30	0.28	0.31	0.30	0.28	0.30	0.39	0.34	0.38
SS _{MSE}	0.42	0.30	0.34	0.43	0.34	0.36	Μοντέλο Αναφοράς		

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

Πίνακας 1.20. Ποιοτικός πίνακας αξιολόγησης πρόγνωσης συμβάντων ξηρασίας του SPI-12_{t+2} (SPI≤-1).

Πίνακας πρόγνωσης επεισοδίων ξηρασίας	DANN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
A (επιτυχίες)	1894	406	906	1896	399	918	1937	484	957
C (λανθασμένοι συναγερμοί)	494	137	253	495	140	262	790	261	406
B (αστοχίες)	880	311	459	878	318	447	837	233	408
D σωστά μη επεισόδια ξηρασίας	13532	4906	6842	13531	4903	6833	13236	4782	6689

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

Πίνακας 1.21. Στατιστικά αποτελέσματα ποιοτικής πρόγνωσης SPI-12_{t+2} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης

Κριτήριο	DANN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Accuracy	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.90	0.91	0.90
Bias	0.86	0.76	0.85	0.86	0.75	0.86	0.98	1.04	1.00
POD	0.68	0.57	0.66	0.68	0.56	0.67	0.70	0.68	0.70
FAR	0.21	0.25	0.22	0.21	0.26	0.22	0.29	0.35	0.30
POFD	0.04	0.03	0.04	0.04	0.03	0.04	0.06	0.05	0.06
CSI	0.58	0.48	0.56	0.58	0.47	0.56	0.54	0.49	0.54
HK	0.65	0.54	0.63	0.65	0.53	0.64	0.64	0.62	0.64
OR	58.96	46.75	53.38	59.03	43.94	53.56	38.77	38.06	38.64

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

1.4.2. Χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+3$, SPI-12 $_{t+3}$

Πίνακας 1.22. Στατιστικά αποτελέσματα πρόγνωσης SPI-12 $_{t+3}$ για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1962 - Σεπ. 2002)

Κριτήριο	DANN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Eff	0.77	0.74	0.74	0.78	0.75	0.75	0.59	0.62	0.60
R	0.88	0.86	0.86	0.88	0.87	0.87	0.80	0.81	0.80
RMSE	0.49	0.45	0.50	0.49	0.44	0.50	0.66	0.55	0.63
MAE	0.38	0.34	0.38	0.37	0.33	0.38	0.49	0.41	0.48
SS _{MSE}	0.44	0.31	0.36	0.46	0.35	0.37	Μοντέλο Αναφοράς		

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

Πίνακας 1.23. Ποιοτικός πίνακας αξιολόγησης πρόγνωσης συμβάντων ξηρασίας του SPI-12 $_{t+3}$ (SPI \leq -1).

Πίνακας πρόγνωσης επεισοδίων ξηρασίας	DANN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
A (επιτυχίες)	1642	358	776	1671	356	813	1747	446	842
C (λανθασμένοι συναγερμοί)	551	160	304	545	130	309	980	299	521
B (αστοχίες)	1146	361	590	1117	363	553	1041	273	524
D σωστά μη επεισόδια ξηρασίας	13461	4881	6790	13467	4911	6785	13032	4742	6573

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

Πίνακας 1.24. Στατιστικά αποτελέσματα ποιοτικής πρόγνωσης SPI-12 $_{t+3}$ για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης

Κριτήριο	DANN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Accuracy	0.90	0.91	0.89	0.90	0.91	0.90	0.88	0.90	0.88
Bias	0.79	0.72	0.79	0.79	0.68	0.82	0.98	1.04	1.00
POD	0.59	0.50	0.57	0.60	0.50	0.60	0.63	0.62	0.62
FAR	0.25	0.31	0.28	0.25	0.27	0.28	0.36	0.40	0.38
POFD	0.04	0.03	0.04	0.04	0.03	0.04	0.07	0.06	0.07
CSI	0.49	0.41	0.46	0.50	0.42	0.49	0.46	0.44	0.45
HK	0.55	0.47	0.53	0.56	0.47	0.55	0.56	0.56	0.54
OR	35.00	30.25	29.38	36.97	37.05	32.28	22.32	25.91	20.27

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

1.4.3. Χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+4$, SPI-12 $_{t+4}$

Πίνακας 1.25. Στατιστικά αποτελέσματα πρόγνωσης SPI-12 $_{t+4}$ για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1962 - Σεπ. 2002)

Κριτήριο	DANN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Eff	0.68	0.65	0.65	0.70	0.68	0.65	0.42	0.48	0.43
R	0.83	0.81	0.80	0.84	0.82	0.81	0.72	0.75	0.72
RMSE	0.58	0.52	0.59	0.56	0.50	0.59	0.78	0.63	0.75
MAE	0.44	0.39	0.45	0.43	0.37	0.45	0.58	0.49	0.57
SS _{MSE}	0.45	0.32	0.37	0.48	0.38	0.38	Μοντέλο Αναφοράς		

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

Πίνακας 1.26. Ποιοτικός πίνακας αξιολόγησης πρόγνωσης συμβάντων ξηρασίας του SPI-12 $_{t+4}$ (SPI \leq -1).

Πίνακας πρόγνωσης επεισοδίων ξηρασίας	DANN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
A (επιτυχίες)	1403	265	654	1434	284	688	1550	378	743
C (λανθασμένοι συναγερμοί)	573	178	332	587	146	342	1177	367	620
B (αστοχίες)	1401	444	712	1370	425	678	1254	331	623
D σωστά μη επεισόδια ξηρασίας	13423	4873	6762	13409	4905	6752	12819	4684	6474

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

Πίνακας 1.27. Στατιστικά αποτελέσματα ποιοτικής πρόγνωσης SPI-12 $_{t+4}$ για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης

Κριτήριο	DANN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Accuracy	0.88	0.89	0.88	0.88	0.90	0.88	0.86	0.88	0.85
Bias	0.70	0.62	0.72	0.72	0.61	0.75	0.97	1.05	1.00
POD	0.50	0.37	0.48	0.51	0.40	0.50	0.55	0.53	0.54
FAR	0.29	0.40	0.34	0.29	0.34	0.33	0.43	0.49	0.45
POFD	0.04	0.04	0.05	0.04	0.03	0.05	0.08	0.07	0.09
CSI	0.42	0.30	0.39	0.42	0.33	0.40	0.39	0.35	0.37
HK	0.46	0.34	0.43	0.47	0.37	0.46	0.47	0.46	0.46
OR	23.46	16.34	18.71	23.91	22.45	20.03	13.46	14.58	12.45

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

I.4.4. Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+5, SPI-12_{t+5}

Πίνακας I.28. Στατιστικά αποτελέσματα πρόγνωσης SPI-12_{t+5} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1962 - Σεπ. 2002)

Κριτήριο	DANN			RANN			Persistence Model		
	1 ⁿ	2 ⁿ	3 ⁿ	1 ⁿ	2 ⁿ	3 ⁿ	1 ⁿ	2 ⁿ	3 ⁿ
Eff	0.60	0.58	0.55	0.63	0.60	0.56	0.26	0.37	0.27
R	0.78	0.76	0.75	0.79	0.78	0.75	0.64	0.69	0.64
RMSE	0.64	0.57	0.66	0.62	0.55	0.66	0.88	0.70	0.85
MAE	0.50	0.43	0.51	0.48	0.41	0.50	0.66	0.54	0.65
SS _{MSE}	0.46	0.32	0.39	0.50	0.37	0.40	Μοντέλο Αναφοράς		

1ⁿ = περίοδος ανάπτυξης, 2ⁿ = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3ⁿ = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

Πίνακας I.29. Ποιοτικός πίνακας αξιολόγησης πρόγνωσης συμβάντων ξηρασίας του SPI-12_{t+5} (SPI≤-1).

Πίνακας πρόγνωσης επεισοδίων ξηρασίας	DANN			RANN			Persistence Model		
	1 ⁿ	2 ⁿ	3 ⁿ	1 ⁿ	2 ⁿ	3 ⁿ	1 ⁿ	2 ⁿ	3 ⁿ
A (επιτυχίες)	1181	199	525	1253	217	548	1413	315	668
C (λανθασμένοι συναγερμοί)	551	186	317	586	163	314	1314	430	695
B (αστοχίες)	1646	492	842	1574	474	819	1414	376	699
D σωστά μη επεισόδια ξηρασίας	13422	4883	6776	13387	4906	6779	12659	4639	6398

1ⁿ = περίοδος ανάπτυξης, 2ⁿ = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3ⁿ = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

Πίνακας I.30. Στατιστικά αποτελέσματα ποιοτικής πρόγνωσης SPI-12_{t+5} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης

Κριτήριο	DANN			RANN			Persistence Model		
	1 ⁿ	2 ⁿ	3 ⁿ	1 ⁿ	2 ⁿ	3 ⁿ	1 ⁿ	2 ⁿ	3 ⁿ
Accuracy	0.87	0.88	0.86	0.87	0.89	0.87	0.84	0.86	0.84
Bias	0.61	0.56	0.62	0.65	0.55	0.63	0.96	1.08	1.00
POD	0.42	0.29	0.38	0.44	0.31	0.40	0.50	0.46	0.49
FAR	0.32	0.48	0.38	0.32	0.43	0.36	0.48	0.58	0.51
POFD	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.09	0.08	0.10
CSI	0.35	0.23	0.31	0.37	0.25	0.33	0.34	0.28	0.32
HK	0.38	0.25	0.34	0.40	0.28	0.36	0.41	0.37	0.39
OR	17.48	10.62	13.33	18.19	13.78	14.45	9.63	9.04	8.80

1ⁿ = περίοδος ανάπτυξης, 2ⁿ = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3ⁿ = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

1.5. Χρονική πρόγνωση SPI-24μηνών

1.5.1. Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+2, SPI-24_{t+2}

Πίνακας 1.31. Στατιστικά αποτελέσματα πρόγνωσης SPI-24_{t+2} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1962 - Σεπ. 2002)

Κριτήριο	DANN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Eff	0.90	0.88	0.89	0.90	0.89	0.89	0.88	0.85	0.87
R	0.95	0.94	0.94	0.95	0.94	0.94	0.94	0.93	0.94
RMSE	0.32	0.32	0.33	0.31	0.31	0.33	0.35	0.36	0.36
MAE	0.24	0.23	0.25	0.23	0.22	0.24	0.26	0.26	0.26
SS _{MSE}	0.18	0.20	0.14	0.20	0.26	0.16	Μοντέλο Αναφοράς		

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

Πίνακας 1.32. Ποιοτικός πίνακας αξιολόγησης πρόγνωσης συμβάντων ξηρασίας του SPI-24_{t+2} (SPI≤-1).

Πίνακας πρόγνωσης επεισοδίων ξηρασίας	DANN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
A (επιτυχίες)	2243	636	1029	2266	641	1025	2296	624	1035
C (λανθασμένοι συναγερμοί)	416	115	220	386	114	223	572	139	282
B (αστοχίες)	634	158	305	611	153	309	581	170	299
D σωστά μη επεισόδια ξηρασίας	13075	4851	6744	13105	4852	6741	12919	4827	6682

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

Πίνακας 1.33. Στατιστικά αποτελέσματα ποιοτικής πρόγνωσης SPI-24_{t+2} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης

Κριτήριο	DANN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Accuracy	0.94	0.95	0.94	0.94	0.95	0.94	0.93	0.95	0.93
Bias	0.92	0.95	0.94	0.92	0.95	0.94	1.00	0.96	0.99
POD	0.78	0.80	0.77	0.79	0.81	0.77	0.80	0.79	0.78
FAR	0.16	0.15	0.18	0.15	0.15	0.18	0.20	0.18	0.21
POFD	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03	0.04	0.03	0.04
CSI	0.68	0.70	0.66	0.69	0.71	0.66	0.67	0.67	0.64
HK	0.75	0.78	0.74	0.76	0.78	0.74	0.76	0.76	0.74
OR	111.20	169.80	103.42	125.91	178.31	100.27	89.25	127.47	82.02

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

1.5.2. Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+3, SPI-24_{t+3}

Πίνακας 1.34. Στατιστικά αποτελέσματα πρόγνωσης SPI-24_{t+3} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1962 - Σεπ. 2002)

Κριτήριο	DANN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Eff	0.85	0.83	0.83	0.86	0.85	0.84	0.82	0.79	0.80
R	0.92	0.91	0.91	0.93	0.92	0.92	0.91	0.89	0.90
RMSE	0.39	0.39	0.40	0.37	0.36	0.40	0.43	0.43	0.44
MAE	0.29	0.29	0.30	0.28	0.27	0.30	0.32	0.32	0.33
SS _{MSE}	0.20	0.21	0.17	0.25	0.29	0.18	Μοντέλο Αναφοράς		

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

Πίνακας 1.35. Ποιοτικός πίνακας αξιολόγησης πρόγνωσης συμβάντων ξηρασίας του SPI-24_{t+3} (SPI≤-1).

Πίνακας πρόγνωσης επεισοδίων ξηρασίας	DANN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
A (επιτυχίες)	2042	587	922	2127	613	945	2157	588	952
C (λανθασμένοι συναγερμοί)	455	127	261	482	123	278	711	175	365
B (αστοχίες)	839	225	422	754	199	399	724	224	392
D σωστά μη επεισόδια ξηρασίας	13032	4821	6693	13005	4825	6676	12776	4773	6589

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

Πίνακας 1.36. Στατιστικά αποτελέσματα ποιοτικής πρόγνωσης SPI-24_{t+3} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης

Κριτήριο	DANN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Accuracy	0.92	0.94	0.92	0.92	0.94	0.92	0.91	0.93	0.91
Bias	0.87	0.88	0.88	0.91	0.91	0.91	1.00	0.94	0.98
POD	0.71	0.72	0.69	0.74	0.75	0.70	0.75	0.72	0.71
FAR	0.18	0.18	0.22	0.18	0.17	0.23	0.25	0.23	0.28
POFD	0.03	0.03	0.04	0.04	0.02	0.04	0.05	0.04	0.05
CSI	0.61	0.63	0.57	0.63	0.66	0.58	0.60	0.60	0.56
HK	0.68	0.70	0.65	0.70	0.73	0.66	0.70	0.69	0.66
OR	69.71	99.04	56.03	76.11	120.84	56.88	53.53	71.60	43.84

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

1.5.3. Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+4, SPI-24_{t+4}

Πίνακας 1.37. Στατιστικά αποτελέσματα πρόγνωσης SPI-24_{t+4} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1962 – Σεπ. 2002)

Κριτήριο	DANN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Eff	0.80	0.78	0.77	0.81	0.80	0.78	0.74	0.71	0.72
R	0.89	0.88	0.88	0.90	0.90	0.88	0.87	0.85	0.86
RMSE	0.45	0.44	0.47	0.43	0.42	0.46	0.51	0.51	0.52
MAE	0.34	0.33	0.36	0.33	0.31	0.36	0.38	0.38	0.40
SS _{MSE}	0.22	0.25	0.20	0.27	0.33	0.21	Μοντέλο Αναφοράς		

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

Πίνακας 1.38. Ποιοτικός πίνακας αξιολόγησης πρόγνωσης συμβάντων ξηρασίας του SPI-24_{t+4} (SPI≤-1).

Πίνακας πρόγνωσης επεισοδίων ξηρασίας	DANN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
A (επιτυχίες)	1943	532	834	1972	544	863	2019	538	877
C (λανθασμένοι συναγερμοί)	545	159	320	503	158	316	849	225	440
B (αστοχίες)	941	289	514	912	277	485	865	283	471
D σωστά μη επεισόδια ξηρασίας	12939	4780	6630	12981	4781	6634	12635	4714	6510

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

Πίνακας 1.39. Στατιστικά αποτελέσματα ποιοτικής πρόγνωσης SPI-24_{t+4} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης

Κριτήριο	DANN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Accuracy	0.91	0.92	0.90	0.91	0.92	0.90	0.90	0.91	0.89
Bias	0.86	0.84	0.86	0.86	0.86	0.87	0.99	0.93	0.98
POD	0.67	0.65	0.62	0.68	0.66	0.64	0.70	0.66	0.65
FAR	0.22	0.23	0.28	0.20	0.23	0.27	0.30	0.29	0.33
POFD	0.04	0.03	0.05	0.04	0.03	0.05	0.06	0.05	0.06
CSI	0.57	0.54	0.50	0.58	0.56	0.52	0.54	0.51	0.49
HK	0.63	0.62	0.57	0.65	0.63	0.59	0.64	0.61	0.59
OR	49.02	55.34	33.62	55.80	59.43	37.36	34.74	39.83	27.55

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

1.5.4. Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+5, SPI-24_{t+5}

Πίνακας 1.40. Στατιστικά αποτελέσματα πρόγνωσης SPI-24_{t+5} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1962 – Σεπ. 2002)

Κριτήριο	DANN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Eff	0.76	0.72	0.72	0.78	0.77	0.73	0.68	0.63	0.64
R	0.87	0.85	0.85	0.88	0.88	0.85	0.84	0.82	0.82
RMSE	0.49	0.49	0.52	0.47	0.45	0.52	0.57	0.57	0.59
MAE	0.38	0.37	0.40	0.36	0.34	0.39	0.43	0.42	0.45
SS _{MSE}	0.25	0.25	0.23	0.31	0.38	0.24	Μοντέλο Αναφοράς		

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

Πίνακας 1.41. Ποιοτικός πίνακας αξιολόγησης πρόγνωσης συμβάντων ξηρασίας του SPI-24_{t+5} (SPI≤-1).

Πίνακας πρόγνωσης επεισοδίων ξηρασίας	DANN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
A (επιτυχίες)	1779	469	773	1853	500	789	1910	492	809
C (λανθασμένοι συναγερμοί)	561	191	351	520	173	340	958	271	508
B (αστοχίες)	1111	354	578	1037	323	562	980	331	542
D σωστά μη επεισόδια ξηρασίας	12917	4746	6596	12958	4764	6607	12520	4666	6439

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

Πίνακας 1.42. Στατιστικά αποτελέσματα ποιοτικής πρόγνωσης SPI-24_{t+5} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης

Κριτήριο	DANN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Accuracy	0.90	0.91	0.89	0.90	0.91	0.89	0.88	0.90	0.87
Bias	0.81	0.80	0.83	0.82	0.82	0.84	0.99	0.93	0.97
POD	0.62	0.57	0.57	0.64	0.61	0.58	0.66	0.60	0.60
FAR	0.24	0.29	0.31	0.22	0.26	0.30	0.33	0.36	0.39
POFD	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04	0.05	0.07	0.05	0.07
CSI	0.52	0.46	0.45	0.54	0.50	0.47	0.50	0.45	0.44
HK	0.57	0.53	0.52	0.60	0.57	0.54	0.59	0.54	0.53
OR	36.87	32.92	25.13	44.53	42.63	27.28	25.47	25.59	18.92

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

1.5.5. Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+6, SPI-24_{t+6}

Πίνακας 1.43. Στατιστικά αποτελέσματα πρόγνωσης SPI-24_{t+5} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1962 - Σεπ. 2002)

Κριτήριο	DANN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Eff	0.72	0.68	0.67	0.74	0.73	0.67	0.61	0.57	0.56
R	0.85	0.82	0.82	0.86	0.85	0.82	0.81	0.78	0.78
RMSE	0.53	0.53	0.56	0.50	0.49	0.56	0.62	0.62	0.65
MAE	0.41	0.40	0.43	0.39	0.37	0.43	0.48	0.46	0.50
SS _{MSE}	0.29	0.26	0.26	0.35	0.37	0.26	Μοντέλο Αναφοράς		

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

Πίνακας 1.44. Ποιοτικός πίνακας αξιολόγησης πρόγνωσης συμβάντων ξηρασίας του SPI-24_{t+5} (SPI≤-1).

Πίνακας πρόγνωσης επεισοδίων ξηρασίας	DANN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
A (επιτυχίες)	1652	399	715	1730	449	732	1803	445	756
C (λανθασμένοι συναγερμοί)	601	203	342	548	192	362	1065	318	561
B (αστοχίες)	1244	421	638	1166	371	621	1093	375	597
D σωστά μη επεισόδια ξηρασίας	12871	4737	6603	12924	4748	6583	12407	4622	6384

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

Πίνακας 1.45. Στατιστικά αποτελέσματα ποιοτικής πρόγνωσης SPI-24_{t+5} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης

Κριτήριο	DANN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Accuracy	0.89	0.89	0.88	0.90	0.90	0.88	0.87	0.88	0.86
Bias	0.78	0.73	0.78	0.79	0.78	0.81	0.99	0.93	0.97
POD	0.57	0.49	0.53	0.60	0.55	0.54	0.62	0.54	0.56
FAR	0.27	0.34	0.32	0.24	0.30	0.33	0.37	0.42	0.43
POFD	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04	0.05	0.08	0.06	0.08
CSI	0.47	0.39	0.42	0.50	0.44	0.43	0.46	0.39	0.39
HK	0.53	0.45	0.48	0.56	0.51	0.49	0.54	0.48	0.48
OR	28.44	22.12	21.64	34.99	29.93	21.44	19.22	17.25	14.41

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ°

ΙΙ. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ: ΧΩΡΟΧΡΟΝΙΚΗ ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΞΗΡΑΣΙΑΣ

ΙΙ.1. Χωροχρονική πρόγνωση SPI-3μηνών

ΙΙ.1.1. Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+2, SPI-3_{t+2}

Πίνακας ΙΙ.1. Στατιστικά αποτελέσματα χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-3_{t+2} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης

Κριτήριο	RNN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Eff	0.53	0.50	0.49	0.35	0.33	0.29	-0.27	-0.29	-0.26
R	0.73	0.70	0.70	0.59	0.58	0.54	0.37	0.35	0.37
RMSE	0.71	0.67	0.73	0.83	0.78	0.85	1.16	1.08	1.14
MAE	0.55	0.52	0.56	0.64	0.59	0.66	0.90	0.82	0.88
SS _{MSE}	0.63	0.61	0.59	0.49	0.48	0.44	Μοντέλο Αναφοράς		

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

Πίνακας ΙΙ.2. Στατιστικά αποτελέσματα ποιοτικής χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-3_{t+2} συμβάντων ξηρασίας (SPI≤-1) για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης

Στοιχεία	RNN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
A	911	246	405	464	97	169	917	245	454
C	418	108	194	245	49	134	1727	506	860
B	1752	549	931	2199	698	1167	1746	550	882
D	13719	4857	6930	13892	4916	6990	12410	4459	6264
Κριτήριο	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Accuracy	0.87	0.89	0.87	0.85	0.87	0.85	0.79	0.82	0.79
Bias	0.50	0.45	0.45	0.27	0.18	0.23	0.99	0.94	0.98
POD	0.34	0.31	0.30	0.17	0.12	0.13	0.34	0.31	0.34
FAR	0.31	0.31	0.32	0.35	0.34	0.44	0.65	0.67	0.65
POFD	0.03	0.02	0.03	0.02	0.01	0.02	0.12	0.10	0.12
CSI	0.30	0.27	0.26	0.16	0.11	0.11	0.21	0.19	0.21
HK	0.31	0.29	0.28	0.16	0.11	0.11	0.22	0.21	0.22
OR	17.07	20.15	15.54	11.96	13.94	7.55	3.77	3.93	3.75

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης
 A=επιτυχίες, B=αστοχίες, C=Λανθασμένοι συναγερμοί, και D=σωστά μη επεισόδια ξηρασίας

II.2. Χωροχρονική πρόγνωση SPI-6μηνών

II.2.1. Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+2, SPI-6_{t+2}

Πίνακας II.3. Στατιστικά αποτελέσματα πρόγνωσης SPI-6_{t+2} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1962 - Σεπ. 2002)

Κριτήριο	RNN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Eff	0.74	0.69	0.72	0.64	0.57	0.62	0.39	0.29	0.39
R	0.86	0.83	0.85	0.80	0.76	0.79	0.70	0.65	0.70
RMSE	0.52	0.49	0.52	0.62	0.57	0.62	0.80	0.74	0.78
MAE	0.40	0.37	0.40	0.48	0.43	0.47	0.62	0.56	0.60
SS _{MSE}	0.58	0.56	0.55	0.41	0.40	0.37	Μοντέλο Αναφοράς		

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

Πίνακας II.4. Στατιστικά αποτελέσματα ποιοτικής χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-6_{t+2} συμβάντων ξηρασίας (SPI≤-1) για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης

Στοιχεία	RNN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
A	1626	343	705	1288	264	559	1488	304	663
C	499	170	271	522	172	274	1216	364	617
B	1149	279	580	1487	358	726	1287	318	622
D	13526	4968	6904	13503	4966	6901	12809	4774	6558
Κριτήριο	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Accuracy	0.90	0.92	0.90	0.88	0.91	0.88	0.85	0.88	0.85
Bias	0.77	0.82	0.76	0.65	0.70	0.65	0.97	1.07	1.00
POD	0.59	0.55	0.55	0.46	0.42	0.44	0.54	0.49	0.52
FAR	0.23	0.33	0.28	0.29	0.39	0.33	0.45	0.54	0.48
POFD	0.04	0.03	0.04	0.04	0.03	0.04	0.09	0.07	0.09
CSI	0.50	0.43	0.45	0.39	0.33	0.36	0.37	0.31	0.35
HK	0.55	0.52	0.51	0.43	0.39	0.40	0.45	0.42	0.43
OR	38.36	35.93	30.97	22.41	21.29	19.39	12.18	12.54	11.33

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης
A=επιτυχίες, B=αστοχίες, C=Λανθασμένοι συναγερμοί, και D=σωστά μη επεισόδια ξηρασίας

II.2.2. Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+3, SPI-6_{t+3}

Πίνακας II.5. Στατιστικά αποτελέσματα χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-6_{t+3} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1962 - Σεπ. 2002)

Κριτήριο	RNN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Eff	0.66	0.58	0.63	0.48	0.40	0.45	0.11	-0.06	0.09
R	0.81	0.77	0.79	0.69	0.64	0.67	0.56	0.49	0.55
RMSE	0.60	0.59	0.62	0.74	0.67	0.74	0.96	0.90	0.95
MAE	0.47	0.46	0.48	0.57	0.51	0.57	0.76	0.69	0.74
SS _{MSE}	0.61	0.56	0.57	0.42	0.43	0.40	Μοντέλο Αναφοράς		

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

Πίνακας II.6. Στατιστικά αποτελέσματα ποιοτικής χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-6_{t+3} συμβάντων ξηρασίας (SPI≤-1) για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης

Στοιχεία	RNN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
A	1285	220	538	896	147	366	1187	222	524
C	500	132	258	461	98	227	1517	446	756
B	1507	387	747	1896	460	919	1605	385	761
D	13508	5021	6917	13547	5055	6948	12491	4707	6419
Κριτήριο	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Accuracy	0.88	0.91	0.88	0.87	0.89	0.87	0.81	0.86	0.82
Bias	0.64	0.58	0.62	0.48	0.45	0.48	0.97	1.10	1.00
POD	0.46	0.36	0.42	0.34	0.28	0.31	0.43	0.37	0.41
FAR	0.28	0.38	0.32	0.31	0.37	0.36	0.56	0.67	0.59
POFD	0.04	0.03	0.04	0.03	0.02	0.03	0.11	0.09	0.11
CSI	0.39	0.30	0.35	0.29	0.24	0.26	0.28	0.21	0.26
HK	0.42	0.34	0.38	0.31	0.26	0.27	0.32	0.28	0.30
OR	23.04	21.62	19.31	18.05	16.22	13.89	6.09	6.09	5.85

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης
A=επιτυχίες, B=αποτυχίες, C=Λανθασμένοι συναγερμοί, και D=σωστά μη επεισόδια ξηρασίας

II.3. Χωροχρονική πρόγνωση SPI-9μηνών

II.3.1. Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+2, SPI-9_{t+2}

Πίνακας II.7. Στατιστικά αποτελέσματα πρόγνωσης SPI-9_{t+2} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1962 - Σεπ. 2002)

Κριτήριο	RNN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Eff	0.84	0.80	0.82	0.77	0.73	0.75	0.60	0.61	0.61
R	0.92	0.89	0.91	0.88	0.86	0.87	0.80	0.81	0.81
RMSE	0.42	0.39	0.42	0.49	0.45	0.50	0.65	0.54	0.63
MAE	0.32	0.29	0.32	0.38	0.34	0.37	0.49	0.41	0.47
SS _{MSE}	0.59	0.48	0.55	0.43	0.31	0.37	Μοντέλο Αναφοράς		

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

Πίνακας II.8. Στατιστικά αποτελέσματα ποιοτικής χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-9_{t+2} συμβάντων ξηρασίας (SPI≤-1) για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης

Στοιχεία	RNN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
A	1893	371	876	1691	326	772	1820	344	838
C	426	151	250	517	160	264	953	303	516
B	933	240	479	1135	285	583	1006	267	517
D	13548	4998	6855	13457	4989	6841	13021	4846	6589
Κριτήριο	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Accuracy	0.92	0.93	0.91	0.90	0.92	0.90	0.88	0.90	0.88
Bias	0.82	0.85	0.83	0.78	0.80	0.76	0.98	1.06	1.00
POD	0.67	0.61	0.65	0.60	0.53	0.57	0.64	0.56	0.62
FAR	0.18	0.29	0.22	0.23	0.33	0.25	0.34	0.47	0.38
POFD	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.04	0.07	0.06	0.07
CSI	0.58	0.49	0.55	0.51	0.42	0.48	0.48	0.38	0.45
HK	0.64	0.58	0.61	0.56	0.50	0.53	0.58	0.50	0.55
OR	64.53	51.17	50.15	38.78	35.67	34.31	24.72	20.61	20.70

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης
A=επιτυχίες, B=αστοχίες, C=Λανθασμένοι συναγερμοί, και D=σωστά μη επεισόδια ξηρασίας

II.3.2. Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+3, SPI-9_{t+3}

Πίνακας II.9. Στατιστικά αποτελέσματα χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-9_{t+3} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1962 – Σεπ. 2002)

Κριτήριο	RNN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Eff	0.77	0.72	0.75	0.67	0.63	0.64	0.39	0.47	0.41
R	0.88	0.85	0.87	0.82	0.80	0.80	0.70	0.74	0.71
RMSE	0.50	0.45	0.50	0.59	0.52	0.60	0.80	0.62	0.77
MAE	0.38	0.35	0.38	0.45	0.39	0.46	0.61	0.47	0.58
SS _{MSE}	0.61	0.47	0.58	0.45	0.31	0.39	Μοντέλο Αναφοράς		

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

Πίνακας II.10. Στατιστικά αποτελέσματα ποιοτικής χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-9_{t+3} συμβάντων ξηρασίας (SPI≤-1) για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης

Στοιχεία	RNN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
A	1716	338	790	1390	292	637	1586	312	724
C	483	161	274	516	143	291	1187	335	630
B	1131	264	567	1457	310	720	1261	290	633
D	13470	4997	6829	13437	5015	6812	12766	4823	6473
Κριτήριο	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Accuracy	0.90	0.93	0.90	0.88	0.92	0.88	0.85	0.89	0.85
Bias	0.77	0.83	0.78	0.67	0.72	0.68	0.97	1.07	1.00
POD	0.60	0.56	0.58	0.49	0.49	0.47	0.56	0.52	0.53
FAR	0.22	0.32	0.26	0.27	0.33	0.31	0.43	0.52	0.47
POFD	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.04	0.09	0.06	0.09
CSI	0.52	0.44	0.48	0.41	0.39	0.39	0.39	0.33	0.36
HK	0.57	0.53	0.54	0.45	0.46	0.43	0.47	0.45	0.44
OR	42.31	39.74	34.73	24.84	33.03	20.71	13.53	15.49	11.75

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης
A=επιτυχίες, B=αστοχίες, C=Λανθασμένοι συναγερμοί, και D=σωστά μη επεισόδια ξηρασίας

II.3.3. Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+4, SPI-9_{t+4}

Πίνακας II.11. Στατιστικά αποτελέσματα χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-9_{t+4} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1962 – Σεπ. 2002)

Κριτήριο	RNN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Eff	0.70	0.63	0.66	0.57	0.52	0.52	0.17	0.29	0.19
R	0.83	0.80	0.81	0.75	0.73	0.72	0.60	0.65	0.60
RMSE	0.56	0.52	0.57	0.67	0.59	0.68	0.93	0.72	0.89
MAE	0.44	0.40	0.44	0.52	0.45	0.53	0.71	0.55	0.68
SS _{MSE}	0.63	0.48	0.58	0.48	0.33	0.41	Μοντέλο Αναφοράς		

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

Πίνακας II.12. Στατιστικά αποτελέσματα ποιοτικής χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-9_{t+4} συμβάντων ξηρασίας (SPI≤-1) για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης

Στοιχεία	RNN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
A	1459	281	656	1116	230	484	1370	257	621
C	452	174	255	493	136	270	1403	390	733
B	1401	309	701	1744	360	873	1490	333	736
D	13488	4996	6848	13447	5034	6833	12537	4780	6370
Κριτήριο	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Accuracy	0.89	0.92	0.89	0.87	0.91	0.86	0.83	0.87	0.83
Bias	0.67	0.77	0.67	0.56	0.62	0.56	0.97	1.10	1.00
POD	0.51	0.48	0.48	0.39	0.39	0.36	0.48	0.44	0.46
FAR	0.24	0.38	0.28	0.31	0.37	0.36	0.51	0.60	0.54
POFD	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.04	0.10	0.08	0.10
CSI	0.44	0.37	0.41	0.33	0.32	0.30	0.32	0.26	0.30
HK	0.48	0.44	0.45	0.35	0.36	0.32	0.38	0.36	0.35
OR	31.08	26.11	25.13	17.45	23.65	14.03	8.22	9.46	7.33

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης
A=επιτυχίες, B=αποτυχίες, C=Λανθασμένοι συναγερμοί, και D=σωστά μη επεισόδια ξηρασίας

II.4. Χωροχρονική πρόγνωση SPI-12μηνών

II.4.1. Χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+2$, SPI-12 $_{t+2}$

Πίνακας II.13. Στατιστικά αποτελέσματα πρόγνωσης SPI-12 $_{t+2}$ για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1962 – Σεπ. 2002)

Κριτήριο	RNN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Eff	0.90	0.87	0.89	0.85	0.83	0.84	0.74	0.74	0.74
R	0.95	0.93	0.94	0.92	0.91	0.91	0.87	0.87	0.87
RMSE	0.33	0.32	0.34	0.40	0.37	0.41	0.53	0.46	0.51
MAE	0.25	0.24	0.26	0.30	0.28	0.30	0.39	0.34	0.38
SS _{MSE}	0.61	0.52	0.55	0.43	0.34	0.36	Μοντέλο Αναφοράς		

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

Πίνακας II.14. Στατιστικά αποτελέσματα ποιοτικής χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-12 $_{t+2}$ συμβάντων ξηρασίας (SPI \leq -1) για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης

Στοιχεία	RNN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
A	2105	483	1033	1896	399	918	1937	484	957
C	423	150	242	495	140	262	790	261	406
B	669	234	332	878	318	447	837	233	408
D	13603	4893	6853	13531	4903	6833	13236	4782	6689
Κριτήριο	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Accuracy	0.94	0.93	0.93	0.92	0.92	0.92	0.90	0.91	0.90
Bias	0.91	0.88	0.93	0.86	0.75	0.86	0.98	1.04	1.00
POD	0.76	0.67	0.76	0.68	0.56	0.67	0.70	0.68	0.70
FAR	0.17	0.24	0.19	0.21	0.26	0.22	0.29	0.35	0.30
POFD	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.04	0.06	0.05	0.06
CSI	0.66	0.56	0.64	0.58	0.47	0.56	0.54	0.49	0.54
HK	0.73	0.64	0.72	0.65	0.53	0.64	0.64	0.62	0.64
OR	101.19	67.33	88.11	59.03	43.94	53.56	38.77	38.06	38.64

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης
A=επιτυχίες, B=αστοχίες, C=Λανθασμένοι συναγερμοί, και D=σωστά μη επεισόδια ξηρασίας

II.4.2. Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+3, SPI-12_{t+3}

Πίνακας II.15. Στατιστικά αποτελέσματα χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-12_{t+3} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1962 – Σεπ. 2002)

Κριτήριο	RNN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Eff	0.85	0.82	0.83	0.78	0.75	0.75	0.59	0.62	0.60
R	0.92	0.91	0.91	0.88	0.87	0.87	0.80	0.81	0.80
RMSE	0.40	0.37	0.41	0.49	0.44	0.50	0.66	0.55	0.63
MAE	0.31	0.29	0.31	0.37	0.33	0.38	0.49	0.41	0.48
SS _{MSE}	0.62	0.53	0.57	0.46	0.35	0.37	Μοντέλο Αναφοράς		

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

Πίνακας II.16. Στατιστικά αποτελέσματα ποιοτικής χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-12_{t+3} συμβάντων ξηρασίας (SPI≤-1) για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης

Στοιχεία	RNN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
A	1955	422	920	1671	356	813	1747	446	842
C	489	132	247	545	130	309	980	299	521
B	833	297	446	1117	363	553	1041	273	524
D	13523	4909	6847	13467	4911	6785	13032	4742	6573
Κριτήριο	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Accuracy	0.92	0.93	0.92	0.90	0.91	0.90	0.88	0.90	0.88
Bias	0.88	0.77	0.85	0.79	0.68	0.82	0.98	1.04	1.00
POD	0.70	0.59	0.67	0.60	0.50	0.60	0.63	0.62	0.62
FAR	0.20	0.24	0.21	0.25	0.27	0.28	0.36	0.40	0.38
POFD	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.04	0.07	0.06	0.07
CSI	0.60	0.50	0.57	0.50	0.42	0.49	0.46	0.44	0.45
HK	0.67	0.56	0.64	0.56	0.47	0.55	0.56	0.56	0.54
OR	64.90	52.84	57.18	36.97	37.05	32.28	22.32	25.91	20.27

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης
A=επιτυχίες, B=αστοχίες, C=Λανθασμένοι συναγερμοί, και D=σωστά μη επεισόδια ξηρασίας

II.4.3. Χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+4$, SPI-12 $_{t+4}$

Πίνακας II.17. Στατιστικά αποτελέσματα χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-12 $_{t+4}$ για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1962 – Σεπ. 2002)

Κριτήριο	RNN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Eff	0.79	0.76	0.76	0.70	0.68	0.65	0.42	0.48	0.43
R	0.89	0.87	0.87	0.84	0.82	0.81	0.72	0.75	0.72
RMSE	0.47	0.43	0.49	0.56	0.50	0.59	0.78	0.63	0.75
MAE	0.36	0.33	0.37	0.43	0.37	0.45	0.58	0.49	0.57
SS _{MSE}	0.63	0.53	0.57	0.48	0.38	0.38	Μοντέλο Αναφοράς		

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

Πίνακας II.18. Στατιστικά αποτελέσματα ποιοτικής χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-12 $_{t+4}$ συμβάντων ξηρασίας (SPI \leq -1) για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης

Στοιχεία	RNN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
A	1775	355	765	1434	284	688	1550	378	743
C	546	157	284	587	146	342	1177	367	620
B	1029	354	601	1370	425	678	1254	331	623
D	13450	4894	6810	13409	4905	6752	12819	4684	6474
Κριτήριο	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Accuracy	0.91	0.91	0.90	0.88	0.90	0.88	0.86	0.88	0.85
Bias	0.83	0.72	0.77	0.72	0.61	0.75	0.97	1.05	1.00
POD	0.63	0.50	0.56	0.51	0.40	0.50	0.55	0.53	0.54
FAR	0.24	0.31	0.27	0.29	0.34	0.33	0.43	0.49	0.45
POFD	0.04	0.03	0.04	0.04	0.03	0.05	0.08	0.07	0.09
CSI	0.53	0.41	0.46	0.42	0.33	0.40	0.39	0.35	0.37
HK	0.59	0.47	0.52	0.47	0.37	0.46	0.47	0.46	0.46
OR	42.49	31.26	30.52	23.91	22.45	20.03	13.46	14.58	12.45

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης
A=επιτυχίες, B=αστοχίες, C=Λανθασμένοι συναγερμοί, και D=σωστά μη επεισόδια ξηρασίας

II.4.4. Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+5, SPI-12_{t+5}

Πίνακας II.19. Στατιστικά αποτελέσματα χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-12_{t+5} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1962 – Σεπ. 2002)

Κριτήριο	RNN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Eff	0.79	0.76	0.76	0.70	0.68	0.65	0.42	0.48	0.43
R	0.89	0.87	0.87	0.84	0.82	0.81	0.72	0.75	0.72
RMSE	0.47	0.43	0.49	0.56	0.50	0.59	0.78	0.63	0.75
MAE	0.36	0.33	0.37	0.43	0.37	0.45	0.58	0.49	0.57
SS _{MSE}	0.63	0.53	0.57	0.48	0.38	0.38	Μοντέλο Αναφοράς		

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

Πίνακας II.20. Στατιστικά αποτελέσματα ποιοτικής χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-12_{t+5} συμβάντων ξηρασίας (SPI≤-1) για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης

Στοιχεία	RNN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
A	1597	289	701	1253	217	548	1413	315	668
C	525	180	288	586	163	314	1314	430	695
B	1230	402	666	1574	474	819	1414	376	699
D	13448	4889	6805	13387	4906	6779	12659	4639	6398
Κριτήριο	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Accuracy	0.90	0.90	0.89	0.87	0.89	0.87	0.84	0.86	0.84
Bias	0.75	0.68	0.72	0.65	0.55	0.63	0.96	1.08	1.00
POD	0.56	0.42	0.51	0.44	0.31	0.40	0.50	0.46	0.49
FAR	0.25	0.38	0.29	0.32	0.43	0.36	0.48	0.58	0.51
POFD	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.09	0.08	0.10
CSI	0.48	0.33	0.42	0.37	0.25	0.33	0.34	0.28	0.32
HK	0.53	0.38	0.47	0.40	0.28	0.36	0.41	0.37	0.39
OR	33.26	19.53	24.87	18.19	13.78	14.45	9.63	9.04	8.80

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης
A=επιτυχίες, B=αστοχίες, C=Λανθασμένοι συναγερμοί, και D=σωστά μη επεισόδια ξηρασίας

II.5. Χωροχρονική πρόγνωση SPI-24μηνών

II.5.1. Χρονικό βήμα πρόγνωσης $t+2$, SPI-24 $_{t+2}$

Πίνακας II.21. Στατιστικά αποτελέσματα πρόγνωσης SPI-24 $_{t+2}$ για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1962 - Σεπ. 2002)

Κριτήριο	RNN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Eff	0.93	0.92	0.93	0.90	0.89	0.89	0.88	0.85	0.87
R	0.97	0.96	0.96	0.95	0.94	0.94	0.94	0.93	0.94
RMSE	0.26	0.26	0.27	0.31	0.31	0.33	0.35	0.36	0.36
MAE	0.20	0.19	0.20	0.23	0.22	0.24	0.26	0.26	0.26
SS _{MSE}	0.45	0.48	0.43	0.20	0.26	0.16	Μοντέλο Αναφοράς		

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

Πίνακας II.22. Στατιστικά αποτελέσματα ποιοτικής χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-24 $_{t+2}$ συμβάντων ξηρασίας (SPI \leq -1) για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης

Στοιχεία	RNN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
A	2391	663	1076	2266	641	1025	2296	624	1035
C	342	106	173	386	114	223	572	139	282
B	486	131	258	611	153	309	581	170	299
D	13149	4860	6791	13105	4852	6741	12919	4827	6682
Κριτήριο	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Accuracy	0.95	0.96	0.95	0.94	0.95	0.94	0.93	0.95	0.93
Bias	0.95	0.97	0.94	0.92	0.95	0.94	1.00	0.96	0.99
POD	0.83	0.84	0.81	0.79	0.81	0.77	0.80	0.79	0.78
FAR	0.13	0.14	0.14	0.15	0.15	0.18	0.20	0.18	0.21
POFD	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.04	0.03	0.04
CSI	0.74	0.74	0.71	0.69	0.71	0.66	0.67	0.67	0.64
HK	0.81	0.81	0.78	0.76	0.78	0.74	0.76	0.76	0.74
OR	189.15	232.05	163.71	125.91	178.31	100.27	89.25	127.47	82.02

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης
A=επιτυχίες, B=αστοχίες, C=Λανθασμένοι συναγερμοί, και D=σωστά μη επεισόδια ξηρασίας

II.5.2. Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+3, SPI-24_{t+3}

Πίνακας II.23. Στατιστικά αποτελέσματα χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-24_{t+3} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1962 - Σεπ. 2002)

Κριτήριο	RNN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Eff	0.90	0.90	0.89	0.86	0.85	0.84	0.82	0.79	0.80
R	0.95	0.95	0.94	0.93	0.92	0.92	0.91	0.89	0.90
RMSE	0.31	0.30	0.33	0.37	0.36	0.40	0.43	0.43	0.44
MAE	0.24	0.23	0.25	0.28	0.27	0.30	0.32	0.32	0.33
SS _{MSE}	0.48	0.52	0.44	0.25	0.29	0.18	Μοντέλο Αναφοράς		

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

Πίνακας II.24. Στατιστικά αποτελέσματα ποιοτικής χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-24_{t+3} συμβάντων ξηρασίας (SPI≤-1) για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης

Στοιχεία	RNN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
A	2256	652	1017	2127	613	945	2157	588	952
C	425	109	229	482	123	278	711	175	365
B	625	160	327	754	199	399	724	224	392
D	13062	4839	6725	13005	4825	6676	12776	4773	6589
Κριτήριο	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Accuracy	0.94	0.95	0.93	0.92	0.94	0.92	0.91	0.93	0.91
Bias	0.93	0.94	0.93	0.91	0.91	0.91	1.00	0.94	0.98
POD	0.78	0.80	0.76	0.74	0.75	0.70	0.75	0.72	0.71
FAR	0.16	0.14	0.18	0.18	0.17	0.23	0.25	0.23	0.28
POFD	0.03	0.02	0.03	0.04	0.02	0.04	0.05	0.04	0.05
CSI	0.68	0.71	0.65	0.63	0.66	0.58	0.60	0.60	0.56
HK	0.75	0.78	0.72	0.70	0.73	0.66	0.70	0.69	0.66
OR	110.94	180.91	91.33	76.11	120.84	56.88	53.53	71.60	43.84

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης
A=επιτυχίες, B=αστοχίες, C=Λανθασμένοι συναγερμοί, και D=σωστά μη επεισόδια ξηρασίας

II.5.3. Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+4, SPI-24_{t+4}

Πίνακας II.25. Στατιστικά αποτελέσματα χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-24_{t+4} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1962 – Σεπ. 2002)

Κριτήριο	RNN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Eff	0.87	0.86	0.85	0.81	0.80	0.78	0.74	0.71	0.72
R	0.93	0.93	0.92	0.90	0.90	0.88	0.87	0.85	0.86
RMSE	0.36	0.35	0.38	0.43	0.42	0.46	0.51	0.51	0.52
MAE	0.27	0.26	0.29	0.33	0.31	0.36	0.38	0.38	0.40
SS _{MSE}	0.50	0.53	0.47	0.27	0.33	0.21	Μοντέλο Αναφοράς		

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

Πίνακας II.26. Στατιστικά αποτελέσματα ποιοτικής χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-24_{t+4} συμβάντων ξηρασίας (SPI≤-1) για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης

Στοιχεία	RNN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
A	2138	616	929	1972	544	863	2019	538	877
C	465	140	272	503	158	316	849	225	440
B	746	205	419	912	277	485	865	283	471
D	13019	4799	6678	12981	4781	6634	12635	4714	6510
Κριτήριο	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Accuracy	0.93	0.94	0.92	0.91	0.92	0.90	0.90	0.91	0.89
Bias	0.90	0.92	0.89	0.86	0.86	0.87	0.99	0.93	0.98
POD	0.74	0.75	0.69	0.68	0.66	0.64	0.70	0.66	0.65
FAR	0.18	0.19	0.23	0.20	0.23	0.27	0.30	0.29	0.33
POFD	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.05	0.06	0.05	0.06
CSI	0.64	0.64	0.57	0.58	0.56	0.52	0.54	0.51	0.49
HK	0.71	0.72	0.65	0.65	0.63	0.59	0.64	0.61	0.59
OR	80.24	103.00	54.44	55.80	59.43	37.36	34.74	39.83	27.55

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης
A=επιτυχίες, B=αποτυχίες, C=Λανθασμένοι συναγερμοί, και D=σωστά μη επεισόδια ξηρασίας

II.5.4. Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+5, SPI-24_{t+5}

Πίνακας II.27. Στατιστικά αποτελέσματα χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-24_{t+5} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1962 – Σεπ. 2002)

Κριτήριο	RNN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Eff	0.85	0.84	0.82	0.78	0.77	0.73	0.68	0.63	0.64
R	0.92	0.92	0.90	0.88	0.88	0.85	0.84	0.82	0.82
RMSE	0.39	0.37	0.42	0.47	0.45	0.52	0.57	0.57	0.59
MAE	0.30	0.28	0.32	0.36	0.34	0.39	0.43	0.42	0.45
SS _{MSE}	0.54	0.58	0.49	0.31	0.38	0.24	Μοντέλο Αναφοράς		

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

Πίνακας II.28. Στατιστικά αποτελέσματα ποιοτικής χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-24_{t+5} συμβάντων ξηρασίας (SPI≤-1) για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης

Στοιχεία	RNN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
A	2066	574	887	1853	500	789	1910	492	809
C	483	145	263	520	173	340	958	271	508
B	824	249	464	1037	323	562	980	331	542
D	12995	4792	6684	12958	4764	6607	12520	4666	6439
Κριτήριο	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Accuracy	0.92	0.93	0.91	0.90	0.91	0.89	0.88	0.90	0.87
Bias	0.88	0.87	0.85	0.82	0.82	0.84	0.99	0.93	0.97
POD	0.71	0.70	0.66	0.64	0.61	0.58	0.66	0.60	0.60
FAR	0.19	0.20	0.23	0.22	0.26	0.30	0.33	0.36	0.39
POFD	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.05	0.07	0.05	0.07
CSI	0.61	0.59	0.55	0.54	0.50	0.47	0.50	0.45	0.44
HK	0.68	0.67	0.62	0.60	0.57	0.54	0.59	0.54	0.53
OR	67.46	76.18	48.58	44.53	42.63	27.28	25.47	25.59	18.92

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης
A=επιτυχίες, B=αστοχίες, C=Λανθασμένοι συναγερμοί, και D=σωστά μη επεισόδια ξηρασίας

II.5.5. Χρονικό βήμα πρόγνωσης t+6, SPI-24_{t+6}

Πίνακας II.29. Στατιστικά αποτελέσματα χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-24_{t+6} για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1962 – Σεπ. 2002)

Κριτήριο	RNN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Eff	0.83	0.81	0.79	0.74	0.73	0.67	0.61	0.57	0.56
R	0.91	0.90	0.89	0.86	0.85	0.82	0.81	0.78	0.78
RMSE	0.42	0.40	0.46	0.50	0.49	0.56	0.62	0.62	0.65
MAE	0.32	0.30	0.35	0.39	0.37	0.43	0.48	0.46	0.50
SS _{MSE}	0.56	0.57	0.51	0.35	0.37	0.26	Μοντέλο Αναφοράς		

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης

Πίνακας II.30. Στατιστικά αποτελέσματα ποιοτικής χωροχρονικής πρόγνωσης SPI-24_{t+6} συμβάντων ξηρασίας (SPI≤-1) για την περίοδο εκπαίδευσης (Οκτ. 1962 - Σεπ 1992), χρονικής πιστοποίησης (Οκτ. 1992 - Σεπ. 2002) και χωροχρονικής πιστοποίησης

Στοιχεία	RNN			RANN			Persistence Model		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
A	1955	531	811	1730	449	732	1803	445	756
C	509	167	281	548	192	362	1065	318	561
B	941	289	542	1166	371	621	1093	375	597
D	12963	4773	6664	12924	4748	6583	12407	4622	6384
Κριτήριο	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Accuracy	0.91	0.92	0.90	0.90	0.90	0.88	0.87	0.88	0.86
Bias	0.85	0.85	0.81	0.79	0.78	0.81	0.99	0.93	0.97
POD	0.68	0.65	0.60	0.60	0.55	0.54	0.62	0.54	0.56
FAR	0.21	0.24	0.26	0.24	0.30	0.33	0.37	0.42	0.43
POFD	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.05	0.08	0.06	0.08
CSI	0.57	0.54	0.50	0.50	0.44	0.43	0.46	0.39	0.39
HK	0.64	0.61	0.56	0.56	0.51	0.49	0.54	0.48	0.48
OR	52.91	52.51	35.49	34.99	29.93	21.44	19.22	17.25	14.41

1^η = περίοδος ανάπτυξης, 2^η = περίοδος χρονικής πιστοποίησης, 3^η = περίοδος χωροχρονικής πιστοποίησης
A=επιτυχίες, B=αποτυχίες, C=Λανθασμένοι συναγερμοί, και D=σωστά μη επεισόδια ξηρασίας