

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΙΧΘΥΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ**  
**ΥΔΑΤΙΝΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

«Η χρήση των Νευρωνικών Δικτύων στην ανάλυση χρονοσειρών  
της βροχόπτωσης του βροχομετρικού σταθμού Νεστορίου»



**ΚΟΤΟΠΟΥΛΗ ΜΑΡΙΝΑ**

**Βόλος 2007**

Η χρήση των Νευρωνικών Δικτύων στην ανάλυση χρονοσειρών της  
βροχόπτωσης του βροχομετρικού σταθμού Νεστορίου

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:

1. Γεώργιος Δήμος, Αναπληρωτής καθηγητής. Π.Θ., Επιβλέπων
2. Άρης Ψιλοβίκος, Λέκτορας, Π.Θ., Μέλος
3. Μάριος Σαπουντζής, Λέκτορας, Π.Θ., Μέλος

**Αφιερώνεται,  
στην οικογένειά μου &  
στο σύντροφο της ζωής μου  
Αλέξανδρο,  
με πολύ αγάπη.....**

## Ευχαριστίες:

Πριν από την συνοπτική αναφορά στους στόχους και το περιεχόμενο της παρούσης διατριβής, θεωρώ καθήκον μου να ευχαριστήσω εκείνα τα πρόσωπα που το καθένα από τη θέση του συνείσφερε κατά τον δικό του βαθμό στη επιτυχή ολοκλήρωση του πονήματος. Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλονται ασφαλώς στον υπεύθυνο καθηγητή μου, κ. Γεώργιο Δήμο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε κατά την ανάθεση της παρούσης εργασίας αλλά και για την αμέριστη συμπαράστασή του, για τις επικοδομητικές και πάντα εύστοχες παρατηρήσεις του και για τις συζητήσεις μας οι οποίες οδήγησαν σε ιδέες και καθόρισαν το περιεχόμενο του συγγράμματος. Ευχαριστίες απευθύνω στο δεύτερο μέλος της εξεταστικής επιτροπής κ. Άρη Ψιλοβίκο για την συνεχή και συστηματική παρακολούθηση του ερευνητικού μου έργου, για την κατανόηση και την βοήθειά του να ξεπερνώ δυσκολίες και αδιέξοδα, καθώς επίσης ευχαριστώ και το τρίτο μέλος της επιτροπής τον κ. Μάριο Σαπουντζή για τις συμβουλές και την, με τον δικό του τρόπο, συμπαράστασή του. Τέλος θα αποδώσω θερμές ευχαριστίες στους υπεύθυνους της Νομαρχιακής Αυτοδιοίκησης Καστοριάς που παράλες τις ισχύουσες απαγορευτικές διατάξεις, μου εμπιστεύτηκαν το περιεχόμενο της υδρολογικής μελέτης η οποία αποτέλεσε το θεμέλιο της παρούσης διατριβής. Θα ήταν παράλειψη να μην αναφερθεί στο σημείο αυτό η συνεχής ηθική και ψυχολογική υποστήριξη που μου προσέφερε η οικογένειά μου και ιδιαίτερα ο σύζυγός μου Αλέξανδρος, στον οποίο αφιερώνεται το παρόν πόνημα.

Καστοριά Ιανουάριος 2007

Κοτοπούλη Μαρίνα

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσης διατριβής αποτελεί η παρουσίαση της ανάλυσης μιας χρονικής ακολουθίας παρατηρήσεων ενός μετεωρολογικού φαινομένου με κύρια επιδίωξη την διασαφήνιση κάποιου υπολογιστικού μοντέλου πρόβλεψης των μελλοντικών τιμών του. Στην ορολογία των παρατηρησιακών επιστημών ανάλογοι τύποι δεδομένων χαρακτηρίζονται σαν χρονοσειρές και εμφανίζονται συχνότατα σε κάθε περίπτωση που η υπό μελέτη μεταβλητή παρουσιάζει χαοτικό χαρακτήρα ως προς εξαρτώσες του περιβάλλοντός της ή όταν δεν είναι εύκολο να καθοριστούν προσδιορισμένες σχέσεις μεταξύ όλων των παραγόντων που την καθορίζουν.

Η διαδικασία ανάλυσης χρονοσειρών αποτέλεσε αντικείμενο που αναπτύχθηκε στη στατιστική από τις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα με τις εργασίες του Yule και των καθορισμό των AR και MA μοντέλων. Η βασική θεώρηση που χαρακτήριζε την ανάλυση χρονοσειρών και την δημιουργία μοντέλων περιγραφής τους αποτελεί την αποδόμησή της σε αιτιοκρατικά και στοχαστικά τμήματα που αποτελούν με το ευθύ τους άθροισμα την συνολική τιμή της χρονικής ακολουθίας. Η ανάλυση βασίζεται στην παραδοχή πως οι μελλοντικές τιμές εξαρτώνται από τις παρατηρούμενες. Ο καθορισμός της μορφής ανάλογων μοντέλων αποτελεί διαδικασία πολλαπλών δοκιμών για τον καθορισμό τη βέλτιστης περιόδου επαναφοράς της χρονοσειράς και τον καθορισμό του βαθμού αυτοσυσχέτισής της.

Στην μετεωρολογία οι χρονοσειρές αποτελούν κοινότατο τύπο δεδομένων καθώς το σύνολο των μακροσκοπικών μεταβλητών που αφορούν τον υετό και τις κλιματικές παραμέτρους παρατηρούνται και καταγράφονται με την μορφή διαδοχικών μετρήσεων μιας χρονικής ακολουθίας. Η ανάπτυξη

μοντέλων περιγραφής ανάλογων χρονοσειρών για τον λόγο αυτό είναι ουσιώδης στο βαθμό που μπορούν να προβλέψουν με ανάλογη αξιοπιστία μελλοντικά αναμενόμενες τιμές. Στην παρούσα εργασία γίνεται προσπάθεια να περιγραφεί η διαδικασία ανάπτυξης ενός μοντέλου ανάλυσης χρονοσειράς με χρήση μιας εντελώς διαφορετικής μεθόδου που βασίζεται σε δομές Νευρωνικών δικτύων. Υπάρχουν πολλοί λόγοι που συνηγορούν στη μοντελοποίηση δυναμικών – χαοτικών συστημάτων δια της χρήσης δομών Νευρωνικών Δικτύων. Ο πιο σημαντικός από αυτούς είναι η εμφάνιση χαοτικών χαρακτηριστικών στα βιολογικά Νευρωνικά Δίκτυα που ως μη γραμμικά συστήματα παρουσιάζουν σαφώς τέτοια χαρακτηριστικά. Επειδή γενικά η μελέτη της συμπεριφοράς αυτών των δομών χαρακτηρίζεται από υψηλό βαθμό πολυπλοκότητας, κατασκευάζουμε τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα , μοντέλα τα οποία χαρακτηρίζονται από την ίδια συμπεριφορά και τα οποία λόγω της σημαντικής απλότητας που τα χαρακτηρίζει να μπορούν να μελετηθούν πιο εύκολα. Τα τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα, ως μη γραμμικά συστήματα χαρακτηρίζονται και αυτά από την ύπαρξη χαοτικών ιδιοτήτων, η συστηματική μελέτη των οποίων παρουσιάζει και αυτή μεγάλο ενδιαφέρον. Επιπλέον περιγράφονται οι βασικοί τύποι ανάλογων μοντέλων και οι αρχές λειτουργίας τους καθώς και μια σχετική εφαρμογή ανάλυσης μιας χρονοσειράς που προέρχεται από τις παρατηρήσεις υψών βροχής προερχόμενα από τον ένα εκ των πέντε σταθμών παρατηρήσεων, του σταθμού Νεστορίου.

Έχοντας λοιπόν σαν βάση τις δομές των τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων εκείνο που χρειαζόμασταν ήταν χρονοσειρές αξιόπιστες, έγκυρες και μακράς χρονικής διάρκειας. Οι χρονοσειρές αυτές προέρχονται από την υδρολογική μελέτη που πραγματοποιήθηκε το 2004 στον νομό Καστοριάς και

η οποία σκοπό είχε να εκτιμήσει υδρολογικά χαρακτηριστικά της διαίτας του Ποταμού Αλιάκμονα στην θέση Νεστόριο του νομού Καστοριάς προκειμένου να υποστηριχθεί ο υδραυλικός σχεδιασμός φράγματος – ταμιευτήρα πολλαπλού σκοπού (άρδευση και Υ/Η παραγωγή). Η συγκεκριμένη υδρολογική μελέτη στηρίχθηκε σε σχετικές μελέτες που προηγήθηκαν και συγκεκριμένα στις δύο μελέτες της ΔΕΗ /ΔΑΥΕ. Οι ανωτέρω μελέτες είναι ευρύτερου περιεχομένου αλλά καταπιάνονται σε κάποια έκταση με την λεκάνη του Νεστορίου. Ο ικανός όγκος υδρολογικής πληροφορίας που έχει συγκεντρωθεί καθιστά δυνατή την εκπόνηση μια πληρέστερης υδρολογικής μελέτης. Ιδιαίτερη σημασία προς τούτο έχει, η από το 1982 εγκατάσταση σταθμηγράφου στον υδρομετρικό σταθμό της ΔΕΗ στο Νεστόριο ο οποίος στα 22 χρόνια που πέρασαν -μέχρι την υλοποίηση της μελέτης- έχει καταγράψει σημαντικό αριθμό πλημμυρικών περιστατικών.

Σκόπιμο είναι στο σημείο αυτό να γίνει αναφορά στη δομή του συγγράμματος που ακολουθεί. Αποτελείται από έξι κεφάλαια εκ των οποίων τα δύο πρώτα αναφέρονται στην επιστήμη της υδρολογίας και σε όλα τα στοιχεία, συστήματα, μοντέλα αλλά και μεθόδους ανάλυσης υδρολογικών δεδομένων, που μπορεί αυτή να περιλάβει. Ακολουθεί μια απλή αναφορά στα στοιχεία στατιστικής ανάλυσης που χρησιμοποιούνται για επεξεργασία δεδομένων χρονοσειρών. Σύμφωνα με τα στοιχεία της προαναφερθείσας μελέτης γίνεται μια προσπάθεια περιγραφής της περιοχής έρευνας καθώς και της λεκάνης απορροής του φράγματος Νεστορίου. Για την γνωριμία με τα τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα, γίνεται μια σύντομη ιστορική αναδρομή που αφορά την ανάπτυξη και εξέλιξη των τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων καθώς και τις εφαρμογές αυτών. Περιγράφεται η λειτουργία τους, ο τρόπος με τον οποίο αυτά



εκπαιδεύονται καθώς επίσης γίνεται και μια σύντομη γνωριμία με τα πιο δημοφιλή μοντέλα και των αρχών λειτουργίας τους. Με μια σχετική εφαρμογή ανάλυσης μιας χρονοσειράς που προέρχεται από τις παρατηρήσεις υψών βροχής προερχόμενα από τον ένα εκ των πέντε σταθμών παρατηρήσεων, του σταθμού Νεστορίου, καθώς επίσης την πρόβλεψη του τελικού μοντέλου και την περιγραφή της τελικής τοπολογίας αυτού, ολοκληρώνεται η παρούσα διατριβή.

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1	Γραφική απεικόνιση του υδρολογικού κύκλου
Εικόνα 1.2	Διαγραμματική απεικόνιση του υδρολογικού κύκλου
Εικόνα 2.1	Γενική αναπαράσταση υδρολογικού μοντέλου
Εικόνα 2.2	Διακριτοποίηση της λεκάνης απορροής σε κατανεμημένο υδρολογικό μοντέλο
Εικόνα 2.3	Σχηματική αναπαράσταση του μοντέλου MIKE – SHE
Εικόνα 2.4	Διάγραμμα ροής του μοντέλου SLURP
Εικόνα 2.5	Φυσική αναπαράσταση των τριών δεξαμενών του μοντέλου SLURP
Εικόνα 2.6	Αθροιστικές καμπύλες ύψους βροχής
Εικόνα 2.7	Διπλή αθροιστική καμπύλη
Εικόνα 2.8	Εκτίμηση του ύψους βροχής τον Οκτώβριο του 1938 στο Κιλκίς από το χάρτη των ισόβροχων του μήνα αυτού που χαράχθηκε με βάση τις παρατηρήσεις πολλών άλλων σταθμών της Κεντρικής Μακεδονίας
Εικόνα 2.9	Χάραξη των πολυγώνων του Thiessen και των ισόβροχων καμπυλών για την εκτίμηση της μέσης βροχόπτωσης της περιοχής Α, για την χρονική περίοδο από 2 - 5/2/1976
Εικόνα 2.10	Διάγραμμα που δείχνει την αναλογία ανάμεσα στο μέσο ύψος βροχής, που πέφτει σε μια περιοχή σε σχέση με το μέγιστο, που παρατηρήθηκε σε έκταση 25km <sup>2</sup> , για διάφορες διάρκειες βροχής
Εικόνα 2.11	Χάρτης απεικόνισης της λεκάνης της περιοχής μελέτης
Εικόνα 2.12	Μέσο μηνιαίο ύψος βροχής σταθμού Πεύκου
Εικόνα 2.13	Χρονική μεταβολή ετήσιων βροχοπτώσεων σταθμού Πεύκου
Εικόνα 2.14	Μέσο μηνιαίο ύψος βροχής σταθμού Πληκατίου
Εικόνα 2.15	Χρονική μεταβολή ετήσιων βροχοπτώσεων σταθμού Πληκατίου
Εικόνα 2.16	Μέσο μηνιαίο ύψος βροχής σταθμού Νεστορίου
Εικόνα 2.17	Χρονική μεταβολή ετήσιων βροχοπτώσεων σταθμού Νεστορίου
Εικόνα 2.18	Μέσο μηνιαίο ύψος βροχής σταθμού Δαμασκηιάς
Εικόνα 2.19	Χρονική μεταβολή ετήσιων βροχοπτώσεων σταθμού Δαμασκηιάς
Εικόνα 2.20	Μέσο μηνιαίο ύψος βροχής σταθμού Άργους Ορεστικού
Εικόνα 2.21	Χρονική μεταβολή ετήσιων βροχοπτώσεων σταθμού Άργους Ορεστικού
Εικόνα 2.22	Μέσο μηνιαίο ύψος βροχής σταθμού Πενταλόφου
Εικόνα 2.23	Χρονική μεταβολή ετήσιων βροχοπτώσεων σταθμού Πενταλόφου
Εικόνα 2.24	Ετήσιες διακυμάνσεις υετού
Εικόνα 2.25	Μέσες μηνιαίες διακυμάνσεις υετού
Εικόνα 2.26	Γεωδαιτικά υψόμετρα σταθμών και μέσα υπερετήσια ύψη βροχής
Εικόνα 2.27	Ευθεία γραμμικής παλινδρόμησης υψομέτρου – μέσου υπερετήσιου ύψους βροχής
Εικόνα 2.28	Συντελεστές συσχέτισης μηνιαίων βροχοπτώσεων σταθμών
Εικόνα 2.29	Ομβροθερμικό διάγραμμα σταθμού Καστοριάς
Εικόνα 2.30	Ομβροθερμικό διάγραμμα σταθμού Κρασιάς
Εικόνα 2.31	Ομβροθερμικό διάγραμμα σταθμού Φλώρινας
Εικόνα 2.32	Τυπικό σχήμα ενός Βιολογικού Νευρωνικού Δικτύου
Εικόνα 2.33	Είσοδοι και έξοδοι ενός τεχνητού νευρώνα
Εικόνα 2.34	Πολυεπίπεδη δομή feedforward νευρωνικού δικτύου με δύο κρυφά επίπεδα (hidden layers), κάθε ένα εκ των οποίων περιέχει τρεις κρυφούς νευρώνες
Εικόνα 2.35	Όπως και στο σχήμα 5.4
Εικόνα 2.36	Τυπικές συναρτήσεις ενεργοποίησης τεχνητών νευρώνων
Εικόνα 2.37	Delay Block
Εικόνα 2.38	Integrator Block
Εικόνα 2.39	Recurrent Network
Εικόνα 2.40	Διαδικασία εκπαίδευσης τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου
Εικόνα 2.41	Γραφική απεικόνιση των τιμών της χρονοσειράς των υψών βροχής
Εικόνα 2.42	Διαδικασία εκπαίδευσης του τελικού δικτύου
Εικόνα 2.43	Πραγματικές και προβλεπόμενες τιμές της χρονοσειράς των υψών βροχής για το τελικό μοντέλο του νευρωνικού δικτύου

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1	Απογραφή κατ'εκτίμηση των ποσοτήτων των διαφόρων μορφών του νερού της γης (Chow et al., 1988)
Πίνακας 2.1	Ιστορικά Ακραία γεγονότα βροχής που παρατηρήθηκαν στην Ελλάδα
Πίνακας 2.2	Χαρακτηριστικά των βροχομετρικών σταθμών
Πίνακας 2.3	Τυπικά σφάλματα των παραμέτρων των κατανομών
Πίνακας 2.4	Μηνιαία ύψη βροχής βροχομετρικού σταθμού Πεύκου
Πίνακας 2.5	Μηνιαία ύψη βροχής βροχομετρικού σταθμού Πληκατίου
Πίνακας 2.6	Μηνιαία ύψη βροχής βροχομετρικού σταθμού Νεστορίου
Πίνακας 2.7	Μηνιαία ύψη βροχής βροχομετρικού σταθμού Δαμασκηνιάς
Πίνακας 2.8	Μηνιαία ύψη βροχής βροχομετρικού σταθμού Άργους Ορεστικού
Πίνακας 2.9	Μηνιαία ύψη βροχής βροχομετρικού σταθμού Πενταλόφου
Πίνακας 2.10	Συγκεντρωτικός πίνακας Ετησίων υψών βροχής για την χρονική περίοδο 1962-2003 για όλους τους σταθμούς μελέτης
Πίνακας 2.11	Συγκεντρωτικός πίνακας Μέσων Μηνιαίων υψών βροχής για τους μήνες Οκτ.- Σεπ. για όλους τους σταθμούς μελέτης
Πίνακας 2.12	Μέσα ετήσια ύψη βροχής και γεωδαιτικά υψόμετρα των σταθμών μελέτης
Πίνακας 2.13	Συντελεστές συσχέτισης μέσω μηνιαίων βροχοπτώσεων σταθμών
Πίνακας 2.14	Μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες και βροχοπτώσεις για τον σταθμό Καστοριάς
Πίνακας 2.15	Μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες και βροχοπτώσεις για τον σταθμό Κρανιάς
Πίνακας 2.16	Μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες και βροχοπτώσεις για τον σταθμό Φλώρινας
Πίνακας 2.17	Μηνιαία ύψη βροχής βροχομετρικού σταθμού Νεστορίου

**ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

<b>1:</b>	<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>14</b>
<b>1.1</b>	Περίγραμμα της υδρολογίας.....	<b>14</b>
<b>1.2</b>	Ιστορική εξέλιξη της υδρολογίας.....	<b>16</b>
<b>1.3</b>	Ο υδρολογικός κύκλος.....	<b>20</b>
<b>1.4</b>	Εκτίμηση του νερού της γης.....	<b>24</b>
<b>1.5</b>	Επιφανειακοί υδατικοί πόροι της Ελλάδας.....	<b>25</b>
<b>1.5.1</b>	Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα .....	<b>25</b>
<b>1.5.2</b>	Υδάτινα ρεύματα.....	<b>26</b>
<b>1.5.3</b>	Φυσικές και τεχνητές λίμνες.....	<b>28</b>
<b>2.:</b>	<b>ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ .....</b>	<b>30</b>
<b>2.1</b>	Εισαγωγή .....	<b>30</b>
<b>2.2</b>	Ταξινόμηση και επιλογή των υδρολογικών μοντέλων.....	<b>32</b>
<b>2.3</b>	Περιγραφή υδρολογικών μοντέλων.....	<b>36</b>
<b>2.4</b>	Σχηματική αναπαράσταση του υδρολογικού μοντέλου MIKE-SHE .....	<b>37</b>
<b>2.5</b>	Έλεγχος, διευθέτηση και συμπλήρωση βροχομετρικών παρατηρήσεων.....	<b>39</b>
<b>2.5.1</b>	Χρονικές προσαρμογές .....	<b>40</b>
<b>2.5.2</b>	Αθροιστικές καμπύλες βροχών.....	<b>41</b>
<b>2.5.3</b>	Συμπλήρωση παρατηρήσεων που λείπουν.....	<b>44</b>
<b>2.6.</b>	Ανάλυση των βροχομετρικών δεδομένων.....	<b>47</b>
<b>2.6.1.</b>	Μέση βροχόπτωση περιοχής.....	<b>47</b>
<b>2.6.1.1</b>	Μέθοδος του αριθμητικού μέσου όρου.....	<b>47</b>
<b>2.6.1.2</b>	Η μέθοδος των πολυγώνων του Thiessen.....	<b>48</b>
<b>2.6.1.3</b>	Τροποποιημένη μέθοδος των πολυγώνων του Thiessen.....	<b>49</b>
<b>2.6.1.4</b>	Η μέθοδος των ισοβρόχων καμπυλών.....	<b>51</b>
<b>2.6.1.5</b>	Μέθοδος βροχοβαθμίδας.....	<b>52</b>
<b>2.6.1.6</b>	Μέθοδος Kriging.....	<b>53</b>
<b>2.6.1.7</b>	Εφαρμογή.....	<b>54</b>

2.6.2	Σχέσεις ύψους βροχής, έντασης και διάρκειας.....	56
2.6.3	Μετάθεση και μεγιστοποίηση βροχών.....	59
2.6.4	Ακραία γεγονότα βροχής.....	62
2.6.5	<b>ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ .....</b>	<b>66</b>
2.6.5.1	Κατανομές πιθανοτήτων .....	66
2.6.5.2	Κανονική κατανομή.....	66
2.6.5.3	Λογαριθμική κατανομή.....	67
2.6.5.4	Εκτίμηση των παραμέτρων των κατανομών.....	68
2.6.5.5	Έλεγχος καταλληλότητας των κατανομών.....	69
2.7.	<b>ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΈΡΕΥΝΑΣ &amp; ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ</b>	<b>72</b>
	<b>ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΝΕΣΤΟΡΙΟΥ.....</b>	
2.7.1	Γεωγραφική και υδρολογική χωροθέτηση.....	72
2.7.2	Στοιχεία υδρολογικής λεκάνης απορροής.....	72
2.7.3	Βροχοπτώσεις.....	76
2.7.3.1	Βροχομετρικό δίκτυο.....	76
2.7.3.2	Μηνιαία ύψη βροχής- Επεξεργασία.....	79
2.7.4	Ορισμοί και στατιστικές παράμετροι.....	80
2.8	Πίνακες μηνιαίων υψών βροχής και επεξεργασία ανά σταθμό..	86
2.8.1	Βροχοπτώσεις και υψόμετρα.....	102
2.8.2	Συσχετίσεις μέσω μηνιαίων υψών βροχής.....	104
2.8.3	Θερμοκρασία, σχετική υγρασία αέρος.....	105
2.9	<b>ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥΣ ΣΤΑ</b>	<b>108</b>
	<b>ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΈΡΕΥΝΑΣ.....</b>	
2.9.1.	Εφαρμογές των Νευρωνικών Δικτύων.....	108
2.10	Σύντομη ιστορική αναδρομή.....	111
2.11	Εισαγωγή στα Νευρωνικά Δίκτυα.....	116
2.12	Συνοπτική θεωρία Νευρωνικών Δικτύων.....	119
2.13	Αναδρομικά Νευρωνικά Δίκτυα .....	129
2.14	Κατηγορίες ΤΝΔ.....	132
2.15	Εκπαίδευση των ΤΝΔ.....	133
2.16	Ικανότητα γενίκευσης .....	138
2.17	Έλεγχος απόδοσης των ΤΝΔ.....	139
2.18	Δημοφιλή μοντέλα ΤΝΔ.....	140

2.18.1	Perceptron .....	140
2.18.2	Adaline (Adaptive linear neurone).....	142
2.18.3	Brain state in a box.....	142
2.18.4	Hamming Network (Ha).....	143
2.18.5	ΤΝΔ βασισόμενα στις εργασίες του Kohonen.....	143
2.19	Εφαρμογή ΤΝΔ στις χρονοσειρές των υδρολογικών δεδομένων του σταθμού στο Νεστόριο.....	145
2.20	Τελικό μοντέλο.....	147
2.20.1	Περιγραφή της τελικής τοπολογίας του μοντέλου.....	147
3.:	<b>ΣΥΖΗΤΗΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b> .....	150
4.:	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	154
5.:	<b>ABSTRACT</b> .....	175
6.:	<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ</b> .....	

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1. Περίγραμμα της υδρολογίας

Ένας ορισμός της υδρολογίας που φτάνει τα όρια της γενικής σχεδόν αναφέρεται από τον Chow (1964) και μπορεί πιστά να αποδοθεί με τα παρακάτω: *«Υδρολογία είναι η επιστήμη του γήινου νερού και περιλαμβάνει την εμφάνιση και κατανομή του, τις χημικές και φυσικές ιδιότητες του και την αλληλεπίδρασή του με το περιβάλλον. Με απλά δηλαδή λόγια, σύμφωνα με τον παραπάνω ορισμό, αντικείμενο της υδρολογίας είναι η συμπεριφορά του οπουδήποτε της γης νερού».*

Με τον παραπάνω ορισμό, η υδρολογία είναι μια πολύ ευρεία επιστήμη και όπως είναι επόμενο, δανείζεται πολλά στοιχεία από άλλους κλάδους επιστημών τα οποία ενσωματώνει σε δικές της ολοκληρωμένες διαδικασίες, για τη διερεύνηση υδρολογικών προβλημάτων. Μερικές από τις επιστήμες αυτές, που χρησιμοποιούνται βοηθητικά στην υδρολογική έρευνα περιλαμβάνουν τη φυσική, τα μαθηματικά, τη χημεία, τη γεωλογία, τη μετεωρολογία, τη στατιστική, τη μηχανική των ρευστών, την οικολογία κ.ά. Γενικά όμως η υδρολογία μπορεί να διακριθεί σε τρεις βασικούς τομείς που παρουσιάζουν κάποια αυτονομία. Οι τομείς αυτοί είναι: (1) Η υδρομετεωρολογία, που έχει σαν αντικείμενο τη μελέτη των επιπτώσεων των μετεωρολογικών φαινομένων στις υδρολογικές διαδικασίες, (2) Η υδρογεωλογία, που ασχολείται με τα υπόγεια νερά και (3) Η ποταμολογία, με αντικείμενο τη μελέτη της συμπεριφοράς και της δίκαιας των επιφανειακών υδάτινων ρευμάτων. Ακόμη, σαν δορυφόροι τομείς με ενδιαφέρον, μπορούν να θεωρηθούν η λιμνολογία, που ασχολείται με την υδρολογία των λιμνών και η κρυολογία, που μελετάει το χιόνι και τον πάγο.

Η υδρολογία είναι ένας συνδυασμός θεωρητικής και εφαρμοσμένης

επιστήμης. Ο εφαρμοσμένος τομέας της, έχει σαν σκοπό τη διερεύνηση σχέσεων με πρακτική εφαρμογή. Για το λόγο αυτό, πολλές φορές χρησιμοποιείται ο όρος εφαρμοσμένη υδρολογία ή τεχνική υδρολογία για να τονίσει ακριβώς τον εφαρμοσμένο χαρακτήρα της. Μέσα στο πλαίσιο αυτό, οι Linsley et al (1949) θεωρούν ότι για τη σωστή υδρολογική διερεύνηση οποιασδήποτε περιοχής, είναι απαραίτητες οι παρακάτω τρεις προϋποθέσεις: (1) Μέτρηση, καταγραφή και ταξινόμηση των παρατηρήσεων υδρολογικών παραμέτρων, (2) Χρήση των παρατηρήσεων αυτών για διαμόρφωση βασικών υδρολογικών θεωριών ή την επέκταση ήδη υφισταμένων και (3) Εφαρμογή των δεδομένων και των θεωριών αυτών για την επίλυση διαφόρων υδρολογικών προβλημάτων. Η παραπάνω τοποθέτηση αποδείχτηκε πολύ επιτυχημένη και αποτελεί την κατευθυντήρια γραμμή κάθε εφαρμοσμένης υδρολογικής ανάλυσης.

Λόγω της φύσης των υδρολογικών προβλημάτων, οποιαδήποτε θεωρία, όσο τέλεια και αν φαίνεται, είναι νεκρό γράμμα αν δε διερευνάται ή δεν επαληθεύεται από πραγματικές παρατηρήσεις, το ίδιο δε ισχύει και για την αντίστροφη περίπτωση. Αυτό ίσως είναι μια μοναδική ιδιομορφία της υδρολογίας, να μη βασίζεται δηλαδή σε κανόνες από τους πριν διαμορφωμένους, αλλά να διερευνά ξεχωριστά για κάθε συγκεκριμένη περίπτωση ανάλυσης.



## 1.2. Ιστορική εξέλιξη της υδρολογίας

Η ιστορία της εξέλιξης της επιστήμης της υδρολογίας, όπως και πολλών άλλων επιστημών, έχει σχεδόν απόλυτα παραμεληθεί. Ελάχιστοι επιστήμονες ασχολήθηκαν με το θέμα αυτό στα σοβαρά, ο κατάλογος των οποίων σχεδόν εξαντλείται με τους Meinzer (1942), Adams (1954), Chow (1964), Biswas (1969), Παπαζαφειρίου (1980) και Chow et al. (1988). Αυτό πιθανώς οφείλεται στη σημερινή τάση για μελέτη των σύγχρονων και μόνο θεωριών και εξελίξεων μιας επιστήμης, αγνοώντας εντελώς τις διαδικασίες και τα στάδια μέσα από τα οποία οι θεωρίες αυτές έφτασαν στο σημερινό τους επίπεδο. Η μελέτη της ιστορίας, της σχετικής με οποιαδήποτε επιστήμη, δεν βοηθάει μόνο στην καλύτερη κατανόηση του σημερινού επιπέδου εξέλιξης της αλλά ακόμη μπορεί να οδηγήσει και στη χάραξη των ορίων μέχρι τα οποία μπορεί να φθάσει η γνώση γύρω από συγκεκριμένα θέματα της επιστήμης αυτής.

Πότε όμως και που άρχισε η επιστήμη της υδρολογίας; Από την αρχή ο άνθρωπος κατανόησε ότι το νερό είναι απαραίτητο για την επιβίωση του και έτσι δεν προκαλεί έκπληξη το γεγονός ότι δείγματα από τους αρχαιότερους πολιτισμούς βρέθηκαν κατά μήκος ποταμών, όπως των Τίγρη και Ευφράτη στη Μεσοποταμία, του Νείλου στην Αίγυπτο, του Ινδού στην Ινδία και του Κίτρινου ποταμού στην Κίνα. Ενδείξεις ύπαρξης οργάνων παρατήρησης υδρολογικών παραμέτρων ανάγονται στην προ του 3000 π.Χ. εποχή. Πράγματι, ερείπια ενός αιγυπτιακού μνημείου, που σήμερα βρίσκονται στο Μουσείο του Παλέρμο στη Σικελία, ανήκουν στο αρχαιότερο γνωστό νειλόμετρο, που τοποθετείται στην εποχή του 3500 με 3000 π.Χ. Ήταν δε τα νειλόμετρα συσκευές με τις οποίες παρακολουθούσαν οι αρχαίοι Αιγύπτιοι τις διακυμάνσεις της στάθμης του ποταμού Νείλου. Τα όργανα αυτά, που ήταν τοποθετημένα κατά κανόνα σε

ναούς, χρησιμοποιούνταν για προειδοποίηση από επικείμενες πλημμύρες. Ο Διόδωρος αναφέρει ότι ο πληθυσμός προειδοποιούνταν με ηχητικά όργανα για τον κίνδυνο επικείμενης πλημμύρας από το νειλόμετρο της Μέμφιδας.

Χωρίς αμφιβολία, η ανάπτυξη της υδρολογίας του υπόγειου νερού στους αρχαίους χρόνους άρχισε με την επινόηση των κανάτ. Το κανάτ ήταν ένα τεχνητό υπόγειο κανάλι που μετέφερε νερό σε μακρινές αποστάσεις από πηγές ή υπόγεια υδροφόρα στρώματα. Η συνηθισμένη διαδικασία για τον εντοπισμό ενός υδροφόρου στρώματος ήταν η διάνοιξη ενός αριθμού δοκιμαστικών πηγαδιών. Αν με τα φρεάτια αυτά εντοπιζόταν ένα ικανοποιητικό στρώμα, ακολουθούσε η διάνοιξη ενός κανονικού πηγαδιού. Στη συνέχεια, ένα νέο πηγάδι ανοιγόταν σε απόσταση από το πρώτο ίση περίπου με το βάθος του και τα δύο πηγάδια ενώνονταν με ένα υπόγειο κανάλι. Η διαδικασία αυτή συνεχιζόταν μέχρι να φθάσει το κανάλι στον τόπο προορισμού του νερού. Κατασκευή συστημάτων με κανάτ αναφέρεται από το 715 π.Χ. στην Αρμενία και κατόπιν στην Περσία, στην Αίγυπτο και στην Ινδία. Πολλά τέτοια συστήματα Κανάτ (CANAT) υπάρχουν και στον Ελλάδικό χώρο και έχουν μελετηθεί από τον Βαβλιάκη (1989)

Ο 18ος αιώνας χαρακτηρίζεται από την ανακάλυψη του σωλήνα του Pitot από τον Henry de Pitot (1695-1771) που κατέστησε δυνατή τη μέτρηση ταχυτήτων σε διάφορα βάθη, από τη χρησιμοποίηση της εξίσωσης του Chezy (1718-1798) για τον υπολογισμό της ροής διωρύγων και της αντίστοιχης αλλά πιο πολύπλοκης εξίσωσης του Du Buat (1738-1809). Ο Άγγλος Dobson ήταν ο πρώτος που άρχισε συστηματικές υδρολογικές παρατηρήσεις μετρώντας για τέσσερα συνεχή χρόνια (1772-1775) βροχή, εξάτμιση και θερμοκρασία σε ένα λόφο με γρασίδι στο Liverpool σε υψόμετρο 24 μέτρων πάνω από την

επιφάνεια της θάλασσας. Αργότερα ο Dalton, βασισμένος στις παρατηρήσεις του Dobson, διατύπωσε τη γνωστή και χρήσιμη ακόμη και σήμερα θεωρία του για την εξάτμιση. Την ίδια εποχή εμφανίζονται εργασίες από τους Antonio Vallisnieri σχετικά με την προέλευση των πηγών, William Herberden για τη μεταβολή της βροχόπτωσης σε σχέση με το υψόμετρο, Antonio Mario Lorgna για τη μέτρηση της παροχής ρευμάτων, James Jurin για τη μέτρηση της βροχόπτωσης κ.ά.

Η ανάπτυξη της υδρολογίας τον 19<sup>ο</sup> αιώνα επιταχύνεται σημαντικά. Μια από τις πρώτες αναλύσεις δεδομένων παροχής ρευμάτων έγινε από τον Heirich Berghaus (1797-1884) στη Γερμανία και αφορούσε ανάλυση παροχών του Ρήνου στο Emmerich, για το διάστημα 1770-1835 και στην Cologne, για το διάστημα 1782-1835, του Έλβα κοντά στο Magdeburg, για το διάστημα 1728-1835 και του Oder, κοντά στο Kustrin, για το διάστημα 1778-1835. Την ίδια εποχή συστηματοποιούνται οι υδρομετρήσεις ποταμών σε πολλές χώρες και εντείνεται η προσπάθεια για τη διατύπωση μιας σχέσης παροχής με παγκόσμια εφαρμογή. Στα πλαίσια αυτά εντάσσεται και η πειραματική δουλειά των Darcy (1803-1858), Bazin (1829-1917), Ganguillet (1818-1894) και Kutter (1818-1888), που είχε σαν αποτέλεσμα τη διατύπωση ισάριθμων σχέσεων. Τέλος, ο Robert Manning (1816-1897) διατύπωσε τη δική του σχέση, που μέχρι σήμερα βρίσκει μεγάλη εφαρμογή. Όσον αφορά την εκτίμηση της απορροής ενός ρεύματος, η και σήμερα εφαρμοζόμενη ορθολογική σχέση (rational formula) που συνδέει την απορροή με την ένταση της βροχής, την έκταση της υδρολογικής λεκάνης και ένα συντελεστή απορροής, θεμελιώθηκε από τον Ιρλανδό Tomas James Mulvane (1822-1892). Ο αιώνας αυτός βέβαια έγινε υδρολογικά γνωστός από τις εργασίες του Darcy, που αποτελούν θεμέλιο

της υδρολογίας των υπόγειων υδάτων. Ο γνωστός σήμερα νόμος του Darcy έχει την ίδια αξία για την κίνηση των υγρών σε πορώδη μέσα με αυτή του νόμου του Ohm στον ηλεκτρισμό. Ο Γάλλος Dupuit (1804-1888) εφάρμοσε τη θεωρία του Darcy για τον υπολογισμό της ροής σε πηγάδια. Στο ίδιο πεδίο σημαντική είναι η προσφορά του Αυστριακού Forchheimer (1852-1933) που εισήγαγε πολύπλοκη μαθηματική ανάλυση για τη λύση προβλημάτων υπόγειας ροής, του οποίου όμως οι περισσότερες δημοσιεύσεις εμφανίστηκαν τον 20<sup>ο</sup> αιώνα.

Τον 20<sup>ο</sup> αιώνα αναπτύχθηκαν εμπειρικές σχέσεις για την επίλυση υδρολογικών προβλημάτων. Οι σχέσεις αυτές διερευνήθηκαν με τη βοήθεια δεδομένων που αποκτήθηκαν από μετρήσεις. Έτσι, οι Green και Ampt (1911) ανέπτυξαν ένα μοντέλο για τη διήθηση, ο Hazen (1914) εισήγαγε την ανάλυση συχνότητας πλημμυρών και αποθηκευμένου όγκου νερού ταμιευτήρων, ο Richards(1931) διαμόρφωσε τη βασική εξίσωση ακόρεστης ροής, ο Sherman(1932) εισήγαγε τη μέθοδο του μοναδιαίου υδρογραφήματος για το μετασχηματισμό της απορροϊκής βροχής σε άμεση απορροή, ο Horton ανέπτυξε μια θεωρία διήθησης (1933) και περιέγραψε ιεραρχικά το υδρογραφικό δίκτυο μιας λεκάνης (1945), ο Gumbel πρότεινε μια κατανομή για την ανάλυση ακραίων συμβάντων (1941) και ο Hurst (1951) διατύπωσε το φαινόμενο της εμμονής.

Σήμερα βρισκόμαστε στην αρχή του 21ου αιώνα. Η ανάπτυξη της υδρολογίας σε όλους τους τομείς της είναι πολύπλευρη και πολύπλοκη και η έμφαση που δίνεται είναι τόσο στη θεωρητική διερεύνηση όσο και στις εφαρμογές. Η παραπάνω ανάπτυξη σε συνδυασμό με την αλματώδη ανάπτυξη των υπολογιστών και την οργάνωση εκτεταμένων και σύγχρονων δικτύων

μέτρησης υδρολογικών μεταβλητών έχει σαν στόχο τον όσο δυνατόν πιο ασφαλή και οικονομικό σχεδιασμό των κάθε φύσης και μορφής υδραυλικών έργων.

### 1.3. Ο Υδρολογικός κύκλος

Ο υδρολογικός κύκλος είναι ένας περιγραφικός όρος που αναφέρεται στη γενική κυκλοφορία του νερού από τους ωκεανούς και θάλασσες στην ατμόσφαιρα, μετά πάνω στην γη και κατόπιν πάλι πίσω στις θάλασσες. Ο κύκλος αυτός γραφικά σε μια απλοποιημένη μορφή (φαίνεται στην Εικόνα 1.1) και δείχνει ότι μπορεί να χωριστεί σε τρεις βασικές φάσεις: 1) Εξάτμιση, 2) Κατακρημνίσματα και 3) Απορροή επιφανειακή και υπόγεια. Ακόμη, μπορεί να παρατηρηθεί ότι σε κάποιο στάδιο σε καθεμιά από τις παραπάνω φάσεις μπορεί να παρατηρηθεί : α) Μεταφορά νερού, β) Προσωρινή αποθήκευση και γ) Μεταβολή της κατάστασης του νερού. Η μεταβολή της ποσότητας του νερού που αναφέρεται σε κάθε στάδιο της φάσης μπορεί να εκτιμηθεί με μια εξίσωση υδρολογικού ισοζυγίου που στη γενική της μορφή είναι:

$$\Delta S = I - O$$

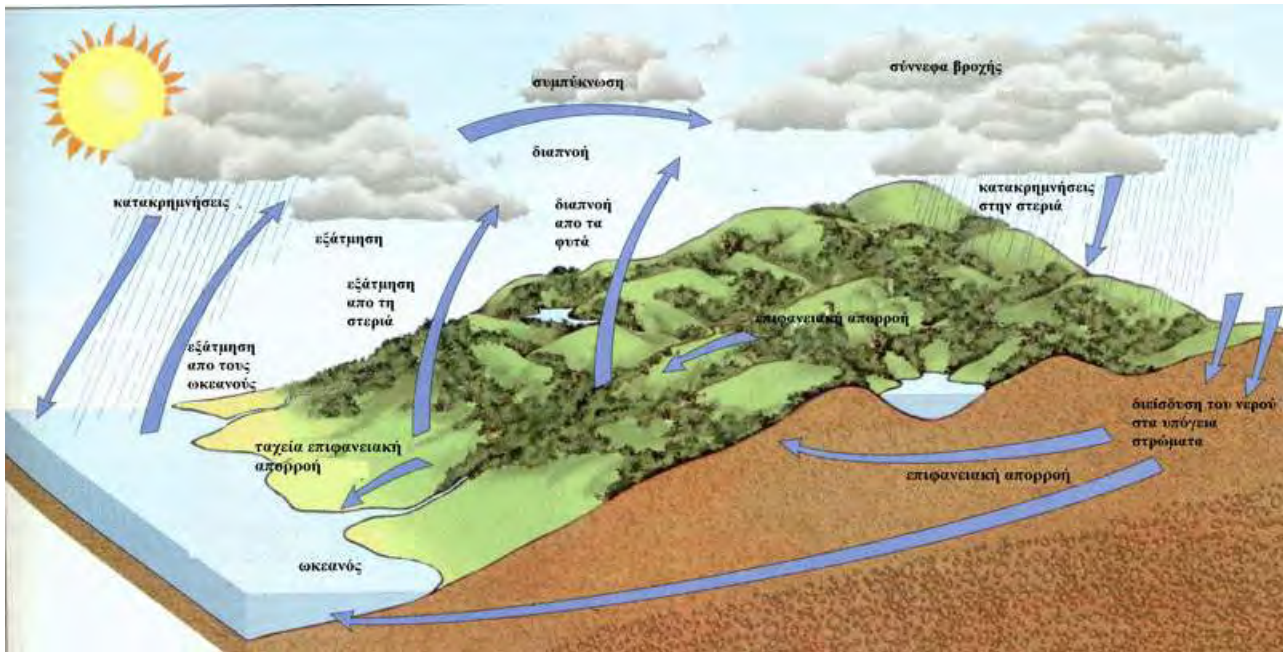
Όπου: I είναι η εισροή του νερού σε μία δεδομένη περιοχή κατά την διάρκεια ορισμένου χρόνου t, O είναι η εκροή του νερού από την περιοχή στον ίδιο χρόνο t και  $\Delta S$  είναι η μεταβολή του όγκου του νερού στην ίδια περιοχή και στον ίδιο χρόνο t.

Ο υδρολογικός κύκλος φαίνεται να μην έχει ούτε αρχή ούτε τέλος, καθώς νερό εξατμίζεται από τη στεριά και τις θάλασσες για να γίνει μέρος της ατμόσφαιρας.

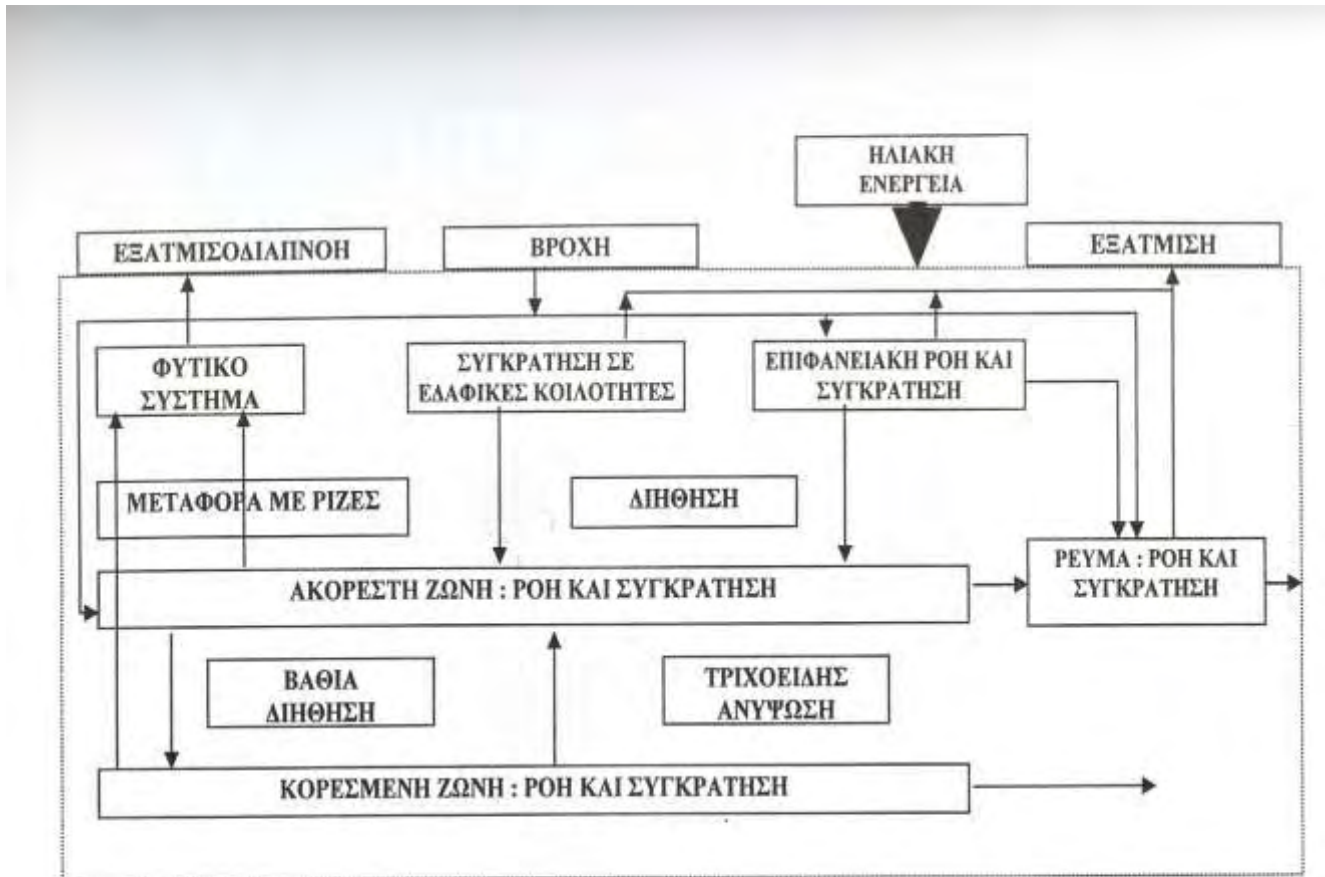
Το εξατμιζόμενο νερό ανυψώνεται, μεταφέρεται και προσωρινά αποθηκεύεται στην ατμόσφαιρα μέχρι να ξαναπέσει στη γη. Το νερό που

πέφτει στη γη μπορεί να συγκρατηθεί από τη φυτοκόμη ή να χρησιμοποιηθεί σαν διαπνοή από τα φυτά, μπορεί να απορρεύσει επιφανειακά ή να διηθηθεί βαθιά στο έδαφος. Το νερό της διαπνοής και μέρος από το νερό της επιφανειακής απορροής μπορεί να ξαναγουρίσει με την εξάτμιση πίσω στην ατμόσφαιρα ή να διηθηθεί πιο βαθιά και να αποθηκευθεί σαν υπόγειο νερό και στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί πάλι από τα φυτά ή να εμφανισθεί σαν πηγή ή να φθάσει στις κοίτες των υδάτινων ρευμάτων και τις λίμνες, κινούμενο υπόγεια και τελικά πάλι να εξατμισθεί για να συμπληρωθεί ο κύκλος.

Σε παγκόσμια κλίμακα, ο όγκος του νερού που περιλαμβάνει κάθε φάση του υδρολογικού κύκλου είναι σχεδόν σταθερός. Όταν όμως αναφερόμαστε σε μια περιορισμένη εδαφική έκταση, όπως είναι η υδρολογική λεκάνη ενός υδάτινου ρεύματος, οι ποσότητες του νερού κάθε φάσης δεν είναι σταθερές αλλά μεταβάλλονται ανάμεσα σε πολύ ευρεία όρια. Οι φάσεις που αναφέρονται στην καθορισμένη έκταση μιας υδρολογικής λεκάνης απαρτίζουν τον κύκλο απορροής της λεκάνης αυτής. Απλοποιημένες απεικονίσεις του κύκλου απορροής δίνονται στο Εικόνα 1.1, ενώ το Εικόνα 1.2 δίνει τον κύκλο αυτό με διαγραμματική μορφή.



Εικόνα 1.1 . Γραφική απεικόνιση του Υδρολογικού κύκλου



Εικόνα 1.2 . Διαγραμματική απεικόνιση του υδρολογικού κύκλου



#### 1.4. Εκτίμηση του νερού της γης

Είναι χρήσιμο να έχουμε μια ιδέα για την τάξη μεγέθους των μορφών του νερού του υδρολογικού κύκλου. Ο Πίνακας 1.1 περιέχει μια απογραφή κατ' εκτίμηση των διαφόρων μορφών του νερού της γης (Chow et al., 1988) και τα ποσοστά ( %) της συνολικής ποσότητας του γήινου νερού και του γλυκού νερού που περιέχει κάθε μία από τις παραπάνω μορφές.

**Πίνακας 1.1.** Απογραφή κατ' εκτίμηση των ποσοτήτων των διαφόρων μορφών του νερού της γης (Chow et al., 1988)

Μορφή	Όγκος (km <sup>2</sup> )	Ποσοστό (%) του συνολικού νερού	Ποσοστό (%) του γλυκού νερού
<b>Ωκεανοί &amp; θάλασσες</b>	1.338.000.000	96,5	
<b>Υπόγεια νερά</b>			
Γλυκό	10.530.000	0,76	30,1
Αλμυρό	12.870.000	0,93	
<b>Εδαφική υγρασία</b>	16.500	0,0012	0,05
<b>Πολικοί παγετώνες</b>	24.023.500	1,7	68,6
<b>Άλλοι πάγοι και χιόνια</b>	340.600	0,025	1,0
<b>Λίμνες</b>			
Γλυκού νερού	91.000	0,007	0,26
Αλμυρού νερού	85.400	0,006	
Έλη	11.470	0,0008	0,03
<b>Ποτάμια</b>	2.120	0,0002	0,006
<b>Βιολογικό νερό</b>	1.120	0,0001	0,003
<b>Νερό ατμόσφαιρας</b>	12.900	0,001	0,04
<b>ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΝΕΡΟ</b>	1.385.984.610	100	
<b>ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΓΛΥΚΟ ΝΕΡΟ</b>	35.029.210	2,5	100

## 1.5. Επιφανειακοί υδατικοί πόροι της Ελλάδας

### 1.5.1. Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα

Τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα αποτελούν την πηγή τροφοδοσίας των υδατικών πόρων. Το ύψος, η χωρική και χρονική κατανομή τους παρουσιάζουν πολύ έντονες διακυμάνσεις πάνω από την ελληνική επικράτεια. Σε πολύ γενικές γραμμές, τα δυτικά διαμερίσματα της χώρας έχουν σχεδόν διπλάσιο ύψος βροχής από ότι τα ανατολικά (600-800mm έναντι 370-420 mm αντίστοιχα). Στον κύριο ορεινό όγκο της Πίνδου, που διασχίζει τον κορμό της Ελλάδας από βορρά προς νότο, παρατηρούνται τα μέγιστα ετήσια ύψη (1000-1200 mm ή και παραπάνω). Αυτό οφείλεται στη θέση του σε σχέση με τα κύρια βροχοφόρα συστήματα που κινούνται με κατεύθυνση δύση-ανατολή. Κάτι ανάλογο παρατηρείται, αν και σε κάπως μικρότερο βαθμό, στα ορεινά διαμερίσματα κατά μήκος των βορείων συνόρων της χώρας. Στα νησιά, το ετήσιο ύψος βροχής διαμορφώνεται ανάλογα με τη χωρική κατανομή τους. Τα νησιά του Ιονίου πελάγους δέχονται σημαντικές βροχοπτώσεις, που είναι ανάλογες αυτών των δυτικών πεδινών διαμερισμάτων. Τα νησιά του κεντρικού και νότιου Αιγαίου δέχονται τη μικρότερη βροχόπτωση, η οποία υπολείπεται αρκετά αυτής που δέχονται τα ανατολικά ηπειρωτικά διαμερίσματα. Τα νησιά του ανατολικού Αιγαίου δέχονται μεγαλύτερη βροχόπτωση, με το ετήσιο ύψος να κυμαίνεται γύρω στα 450 mm. Στην Κρήτη παρουσιάζεται μεγάλη χωρική ανισοκατανομή, με τη μικρότερη ετήσια βροχόπτωση να παρατηρείται στις νότιες παράλιες περιοχές ( $\approx 300$  mm) και τη μεγαλύτερη στα ορεινά, όπου καταγράφονται ετήσια ύψη της τάξης των 1100 mm.

Η χρονική κατανομή των βροχών παρουσιάζει επίσης μεγάλες

διακυμάνσεις. Κατά κανόνα, ο κύριος όγκος των βροχών παρατηρείται την περίοδο από τα μέσα του φθινοπώρου μέχρι τα μέσα της άνοιξης, με το μέγιστο ύψος βροχών να εμφανίζεται το χειμώνα. Κατά το υπόλοιπο διάστημα οι βροχές είναι λίγες, με σχεδόν απόλυτη ανομβρία κατά το θέρος. Η κατανομή αυτή είναι χαρακτηριστική κυρίως του νότιου τμήματος της χώρας και των νησιών του Αιγαίου. Στη βόρεια χώρα, η κατανομή είναι σημαντικά διαφοροποιημένη όπου φθινόπωρο, χειμώνας και άνοιξη παρουσιάζουν σχεδόν ισοκατανομή του ύψους των βροχών, με ελαφρά υπεροχή το χειμώνα, ενώ διάσπαρτες βροχές παρατηρούνται και κατά τη διάρκεια του θέρους.

Στους ορεινούς όγκους της ηπειρωτικής χώρας παρατηρείται σημαντικό ύψος χιονόπτωσης. Λόγω της έκτασης και της χωρικής κατανομής των όγκων αυτών, η τήξη του χιονιού συμβάλλει ουσιαστικά στην αύξηση της απορροής, που κυρίως εμφανίζεται την άνοιξη.

### **1.5.2. Υδάτινα ρεύματα**

Η παροχή των υδάτινων ρευμάτων διαμορφώνεται από τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα που πέφτουν στις λεκάνες απορροής και η διακύμανση της ακολουθεί σε γενικές γραμμές τη χρονική κατανομή και την ένταση τους. Κάτω από τις ελληνικές συνθήκες, ο μεγαλύτερος όγκος των απορροών προέρχεται από πρόσφατες βροχές (άμεση απορροή), ενώ μικρό μόνο μέρος αντιπροσωπεύει η βασική απορροή. Λόγω της φύσης της, η άμεση απορροή έχει μικρή διάρκεια και παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις. Η βασική απορροή έχει μεγάλη χρονική διάρκεια και είναι σχετικά σταθερή. Με εξαίρεση τους μεγάλους ποταμούς, τα υδάτινα ρεύματα της Ελλάδας χαρακτηρίζονται σαν εφήμερα ή ενδιάμεσα. Γενικά, οι μέγιστες απορροές παρατηρούνται το χειμώνα και οφείλονται στο συνδυασμό των βροχών της

εποχής αυτής και την υψηλή υγρασιακή κατάσταση των λεκανών απορροής που διαμορφώνεται από τις βροχές του φθινοπώρου. Αυξημένες παροχές, παρατηρούνται σε ορισμένα υδάτινα ρεύματα και κατά την άνοιξη που, κατά μεγάλο μέρος, είναι αποτέλεσμα της τήξης του χιονιού.

Η διάταξη των υδάτινων ρευμάτων στον ελληνικό χώρο διαμορφώθηκε από το ανάγλυφο. Τα μεγαλύτερα ποτάμια διασχίζουν τη βόρεια χώρα με κατεύθυνση από βορρά προς νότο. Ο Έβρος, ο Νέστος, ο Στρυμόνας και ο Αξιός έχουν λεκάνες απορροής που το μεγαλύτερο μέρος τους είναι έξω από την ελληνική επικράτεια και κατά προσέγγιση, αντιπροσωπεύουν το 25% των επιφανειακών υδατικών μας πόρων. Το μόνο ποτάμι της βόρειας Ελλάδας που η λεκάνη απορροής του βρίσκεται ολόκληρη σε ελληνικό έδαφος είναι ο Αλιάκμονας. Το μεγαλύτερο ελληνικό ποτάμι που τροφοδοτείται κυρίως από το ανατολικό τμήμα του ορεινού όγκου της Πίνδου είναι ο Αχελώος. Στα δυτικά του όγκου αυτού, υπάρχει ένας αριθμός μικρότερων αλλά σημαντικών ποταμών που εκβάλλουν στο Ιόνιο. Τη Θεσσαλία διασχίζει ο Πηνειός. Τη Στερεά Ελλάδα διασχίζει ο Σπερχειός. Την Πελοπόννησο διασχίζει ένας αριθμός μικρότερων ποταμών, οι σημαντικότεροι από τους οποίους βρίσκονται στο δυτικό της τμήμα. Πέρα από τους ποταμούς που αναφέρθηκαν, υπάρχει πλήθος μικρών υδάτινων ρευμάτων τα οποία συνήθως απολήγουν στη θάλασσα, ενώ κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η ελάχιστη ως μηδενική παροχή κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών.

### 1.5.3 Φυσικές και τεχνητές λίμνες

Μικρός σχετικά είναι ο αριθμός των φυσικών λιμνών που είναι κατεσπαρμένες στον ελληνικό χώρο και αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στο τοπογραφικό ανάγλυφο, το οποίο δεν ευνοεί τη δημιουργία εκτεταμένων σε μέγεθος κλειστών υδρολογικών λεκανών. Αν εξαιρεθεί το λιμναίο σύστημα των Πρεσπών, το οποίο μόνο κατά ένα μέρος ανήκει στην Ελλάδα, οι Ελληνικές λίμνες έχουν περιορισμένη σχετικά επιφάνεια. Οι λίμνες δέχτηκαν από πολύ νωρίς την επέμβαση του ανθρώπου, που αποσκοπούσε στην αύξηση της γεωργικής γης με μερική ή ολική αποξήρανση τους ή τη χρήση του νερού τους για αρδευτικούς σκοπούς, με αποτέλεσμα τη συρρίκνωση του όγκου και της επιφάνειάς τους. Κάτω από τις σημερινές συνθήκες, οι φυσικές λίμνες που απέμειναν θα πρέπει να αποκλειστούν σχεδόν στο σύνολο τους σαν πηγές απόληψης νερού.

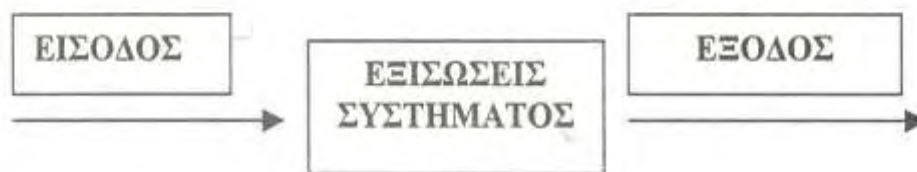
Λίμνες όμως έχουν δημιουργηθεί και με τεχνητό τρόπο πάνω στα ποτάμια συστήματα της χώρας, που είναι ενταγμένες σε ένα πλαίσιο αντιπλημμυρικής προστασίας, παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας και άρδευσης. Το πρώτο μεγάλο έργο αυτής της μορφής που ολοκληρώθηκε στις αρχές της 10ετίας του 1930, είναι η τεχνητή λίμνη Κερκίνη, που δημιουργήθηκε μετά από την εκτροπή του Στρυμόνα για την αντιπλημμυρική προστασία της πεδιάδας των Σερρών και την παράλληλη άρδευση της. Η λίμνη αυτή έχει εξελιχθεί σε ένα από τους πλουσιότερους υδροβιότοπους της χώρας. Κατασκευή φραγμάτων σε μεγάλη έκταση, για τη δημιουργία ταμιευτήρων, για την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας και για άρδευση, άρχισε από τη 10ετία του 1950 και βρίσκεται σε εξέλιξη μέχρι σήμερα. Σειρά ταμιευτήρων έχει δημιουργηθεί κυρίως στα ποτάμια συστήματα του Αχελώου, του

Αλιάκμονα και του Νέστου. Μετά την εξάντληση των δυνατοτήτων των μεγάλων ποταμών, η διαδικασία αυτή προβλέπεται να συνεχιστεί για τη δημιουργία ταμιευτήρων σε μικρότερα ρεύματα, γιατί αποτελεί το κύριο μέσο ανακατανομής του νερού από την περίοδο των μεγάλων παροχών στις περιόδους ζήτησης, οι οποίες δεν ταυτίζονται χρονικά.

## 2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

### 2.1. Εισαγωγή

Η σωστή αξιοποίηση και η ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων προϋποθέτουν την ποσοτική εκτίμηση των διαφόρων φάσεων του υδρολογικού κύκλου, που οδηγεί στην αξιόπιστη αναπαράσταση των σχέσεων βροχής-απορροής. Η διερεύνηση των σχέσεων βροχής-απορροής γίνεται με την εφαρμογή των υδρολογικών μοντέλων. Τα μοντέλα αυτά είναι ένα σύνολο μαθηματικών εξισώσεων που αναπαριστούν τις διάφορες φάσεις του υδρολογικού κύκλου, σε συνδυασμό με ορισμένες λογικές προτάσεις που εκφράζουν τις σχέσεις μεταξύ των φάσεων. Τα υδρολογικά μοντέλα είναι κυρίως μοντέλα προσομοίωσης και πρόγνωσης υδρολογικών μεταβλητών, που αποτελούν τις εισόδους ή εξόδους υδατικών συστημάτων, αλλά και της συμπεριφοράς των ιδίων των υδατικών συστημάτων, είτε είναι φυσικά (π.χ. υδρολογική λεκάνη ποταμού) ή τεχνητά (π.χ. υδροηλεκτρικό έργο ή φράγμα). Η γενική αναπαράσταση ενός υδρολογικού μοντέλου φαίνεται στο Εικόνα 2.1.



**Εικόνα 2.1.** Γενική αναπαράσταση υδρολογικού μοντέλου.

όπου:

**Είσοδος** είναι οι κλιματικές μεταβλητές (βροχόπτωση, θερμοκρασία, σχετική υγρασία, ταχύτητα ανέμου, ηλιακή ακτινοβολία κ.λ.π.),

**Εξισώσεις συστήματος**, είναι σύνολο μαθηματικών εξισώσεων που αναπαριστούν τις φυσικές διαδικασίες μετατροπής της βροχής σε απορροή (συγκράτηση από τη φυτοκάλυψη, εξατμισοδιαπνοή, διήθηση, επιφανειακή απορροή, ενδορροή, εδαφική υγρασία, βασική απορροή, λιώσιμο χιονιού κ.λ.π.). Τα τελευταία χρόνια, το αυξημένο ενδιαφέρον για τη ρύπανση των επιφανειακών και των υπόγειων νερών, οδήγησε στην εισαγωγή στα υδρολογικά μοντέλα, αλγορίθμων προσομοίωσης χημικών διαδικασιών.

**Έξοδος** είναι η απορροή.

Η εφαρμογή των υδρολογικών μοντέλων ενδείκνυται κυρίως στις περιπτώσεις ποταμών για την εκτίμηση της απορροής και την απόκτηση δεδομένων παροχής τους, με τη βοήθεια δεδομένων βροχόπτωσης και άλλων μετεωρολογικών στοιχείων. Η σημασία τους και μόνο από την παραπάνω δυνατότητα τους φαίνεται πολύ μεγάλη, εξαιτίας του γεγονότος ότι σε πολλά ποτάμια της Ελλάδας δεν υπάρχουν εγκατεστημένοι υδρομετρικοί σταθμοί και τα δεδομένα παροχών είναι ελάχιστα. Αντίθετα το δίκτυο των μετεωρολογικών σταθμών είναι αρκετά πυκνό και οι μετρήσεις των μετεωρολογικών μεταβλητών καλύπτουν αρκετά μεγάλα χρονικά διαστήματα. Ειδικότερα, η διαστασιολόγηση των ταμιευτήρων βασίζεται σε αξιόπιστες παρατηρήσεις απορροής αρκετών ετών.



## 2.2. Ταξινόμηση και επιλογή των υδρολογικών μοντέλων

Τα υδρολογικά μοντέλα ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο προσεγγίζουν τον υδρολογικό κύκλο και με την παραδοχή, όσον αφορά τη φύση των διεργασιών του υδρολογικού συστήματος ταξινομούνται σε διάφορες κατηγορίες. Ο πιο συνηθισμένος διαχωρισμός των υδρολογικών μοντέλων (Clarke, 1973 : Παπαμιχαήλ, 1991) είναι σε μοντέλα προσομοίωσης συμβάντος (event simulation models) και σε μοντέλα συνεχούς προσομοίωσης (sequentials models). Τα μοντέλα που ανήκουν σε οποιαδήποτε από τις προηγούμενες δύο κύριες κατηγορίες, διακρίνονται επιπλέον, σε ενιαία (lumped) και κατανεμημένα (discrete). Οι παραπάνω διακρίσεις περιγράφονται ως εξής

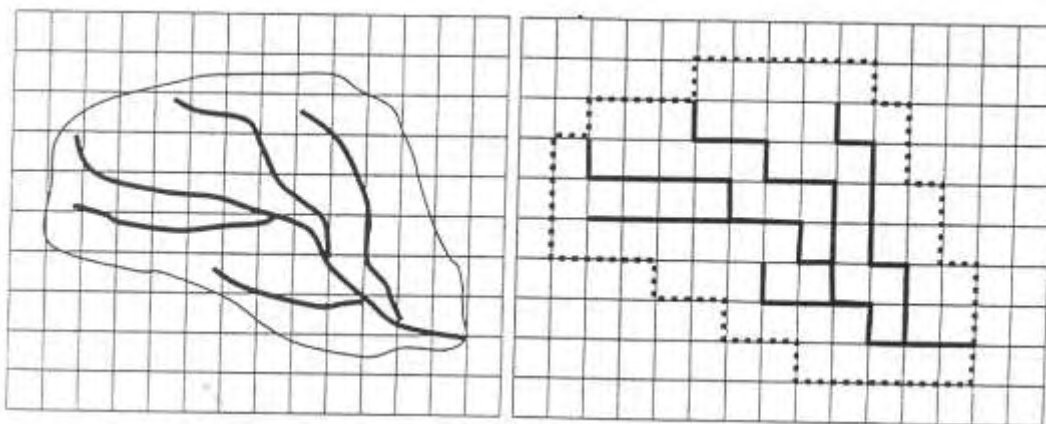
- **Μοντέλα προσομοίωσης συμβάντος (event simulation models):** Τα μοντέλα αυτά περιλαμβάνουν σαν είσοδο ένα μεμονωμένο επεισόδιο βροχής και έξοδο το αντίστοιχο υδρογράφημα πλημμύρας. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα μοντέλα HEC-1 (Hydrological Engineering Center) (Feldman, 1981 : HEC-1, 1990 : Παπαμιχαήλ κ.ά., 1995), TK-20 (U.S Soil Conservation Service Model) (SCS, 1973), ILLUDAS (ILLinois Urban DrainAge Simulator) (Terstriep and Stall, 1974), DR3M (Distributed Routing Rainfall – Runoff Model) (Alley and Smith, 1982)κ.λ.π.

- **Μοντέλα συνεχούς προσομοίωσης (sequentials models).** Τα μοντέλα αυτά περιλαμβάνουν σαν είσοδο, μία ή περισσότερες χρονικές σειρές παρατηρήσεων, μιας ή περισσότερων μετεωρολογικών μεταβλητών και σαν έξοδο το υδρογράφημα της αντίστοιχης χρονικής περιόδου. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα μοντέλα SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural

Basins) (Arnold et al., 1990), SLURP (Simple Lumped Reservoir Parametric model) (Kite, 1974,1978,1989,1991 : Γεωργίου, 1996 : Παπαμιχαήλ και Γεωργίου, 1997), SHE (System Hydrologique Europeen) (Abbott et al., 1986a, 1986b : Bathurst, 1986a, 1986b : Jain et al., 1992 : Lohani et al., 1993 : Refsgaard, 1992), SWM-IV (Stanford Watershed Model- IV) (Crawford and Linsley, 1966 : Παπαδόπουλος, 1986) και άλλα.

-Τα **ενιαία μοντέλα (lumped models)** βασίζονται στην υπόθεση της ομοιόμορφης κατανομής, στην επιφάνεια της λεκάνης απορροής, των μεγεθών εισόδου (βροχή κ.λ.π.) και εξόδου (απορροή), δηλαδή δεν παίρνουν υπόψη τις διαφορές των μεταβλητών στο χώρο, αλλά δέχονται μια μέση τιμή τους.

-Τα **κατανεμημένα μοντέλα (discrete models)** σε αντίθεση με τα ενιαία, βασίζονται στην υπόθεση της χωρικής κατανομής των μεγεθών εισόδου και εξόδου, στη λεκάνη απορροής. Τα μοντέλα αυτά περιλαμβάνουν το διαχωρισμό της λεκάνης σε τμήματα με ανομοιόμορφα τοπογραφικά ή άλλα χαρακτηριστικά ή σε διακριτοποίηση της λεκάνης όπως φαίνεται στο Εικόνα 2.2.



**Εικόνα 2.2.** Διακριτοποίηση της λεκάνης απορροής σε κατανεμημένο υδρολογικό μοντέλο

Τα μοντέλα συνεχούς προσομοίωσης μπορούν να ταξινομηθούν με βάση δύο κριτήρια: (α) **Το κριτήριο που βασίζεται στο είδος των εξισώσεων.** Με βάση το κριτήριο αυτό τα μοντέλα ταξινομούνται σε φυσικά ή φυσικής βάσης (physically-based), παραμετρικά ή εννοιολογικά (conceptual) και μοντέλα μαύρου κουτιού (black-box) και (β) **Το κριτήριο που βασίζεται στο αν παίρνεται υπόψη η τυχαιότητα των φαινομένων.** Με βάση το κριτήριο αυτό τα μοντέλα ταξινομούνται σε προσδιοριστικά και στοχαστικά. Στη συνέχεια γίνεται περιγραφή των προσδιοριστικών μοντέλων τα οποία χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση των σχέσεων βροχής-απορροής. Τα στοχαστικά μοντέλα και ειδικότερα αυτά του μαύρου κουτιού (SARIMA μοντέλα) χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία συνθετικών σειρών απορροής (Box and Jenkins, 1976 : Παπαμιχαήλ και Παπαζαφειρίου, 1987,1990 : Παπαμιχαήλ, 1991 : Paramichail and Papazafiriou, 1992: Παπαμιχαήλ, 1993 : Hipel and McLeod, 1994 : Παπαμιχαήλ και Γεωργίου, 1995: Γεωργίου, 1996 : Παπαμιχαήλ και Γεωργίου, 1996 : Γεωργίου και Παπαμιχαήλ, 2000).

Τα **προσδιοριστικά φυσικά μοντέλα** βασίζονται στις εξισώσεις της φυσικής, δηλαδή στις εξισώσεις συνέχειας και ποσότητας κίνησης. Τα μοντέλα αυτά έχουν ένα σύνολο περίπλοκων μαθηματικών εξισώσεων και συνήθως περιλαμβάνουν ένα μεγάλο αριθμό παραμέτρων. Επίσης απαιτούνται πολλά δεδομένα εισόδου που συνήθως δεν είναι διαθέσιμα. Τέτοια μοντέλα έχουν εφαρμοσθεί μόνο σε μικρές πειραματικές λεκάνες απορροής, για τις οποίες υπάρχουν τα δεδομένα εισόδου όπως το μοντέλο SHE (System Hydrologique European) (Abbott et al., 1986a, 1986b : Bathurst, 1986a, 1986b : Jain et al., 1992 : Lohani et al., 1993 : Refsgaard et al., 1992) και το μοντέλο MIKE-SHE

που αποτελεί την ηλεκτρονική μορφή του SHE (Abbott et al., 1986a, 1986b : Sabramanian, 1997 : Singh et al., 1999).

Τα **προσδιοριστικά παραμετρικά μοντέλα** προσομοιώνουν τη σχέση βροχής -απορροής βασιζόμενα σε ένα σύνολο απλουστευμένων παραδοχών του φυσικού συστήματος. Τα μοντέλα αυτά είναι πολύ διαδεδομένα και περιλαμβάνουν παραμέτρους οι οποίες καθορίζονται από τη διαδικασία **ρύθμισης (calibration)** του μοντέλου. Η διαδικασία ρύθμισης ενός μοντέλου, είναι ένας αλγόριθμος που συνίσταται στην αλλαγή των τιμών των παραμέτρων, έτσι ώστε οι διαφορές μεταξύ των προσομοιωμένων και των μετρημένων παροχών να είναι όσο το δυνατόν μικρότερες. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα μοντέλα SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins) (Arnold et al., 1990), SLURP (Simple Lumped Reservoir Parametric model) (Kite, 1974,1978,1989,1991), SWM-IV (Stanford Watershed Model-IV) (Crawford and Linsley, 1966 : Παπαδόπουλος, 1986) και άλλα.

Τα **προσδιοριστικά μοντέλα "μαύρου κουτιού"**, βασίζονται σε απλές μαθηματικές εξισώσεις οι οποίες προσομοιώνουν ικανοποιητικά το υδρογράφημα της μετρημένης παροχής. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα μοντέλα του μοναδιαίου υδρογραφήματος και των συνθετικών μοναδιαίων.

Η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου γίνεται με βάση τρία κυρίως κριτήρια: (α) Την ποσότητα και την ποιότητα των διατιθέμενων στοιχείων εισόδου της υδρολογικής λεκάνης, (β) Τα διατιθέμενα τεχνολογικά και οικονομικά μέσα καθώς επίσης και την εμπειρία του ερευνητή και (γ) Το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα από πλευράς ακρίβειας. Για παράδειγμα, η έλλειψη ικανοποιητικών στοιχείων εισόδου για μια υδρολογική λεκάνη

(στοιχεία εδάφους, φυτοκάλυψης, εξάτμισης κ.λ.π.) μας οδηγεί στη χρήση απλών μοντέλων βροχής-απορροής (π.χ. μοναδιαίο υδρογράφημα).

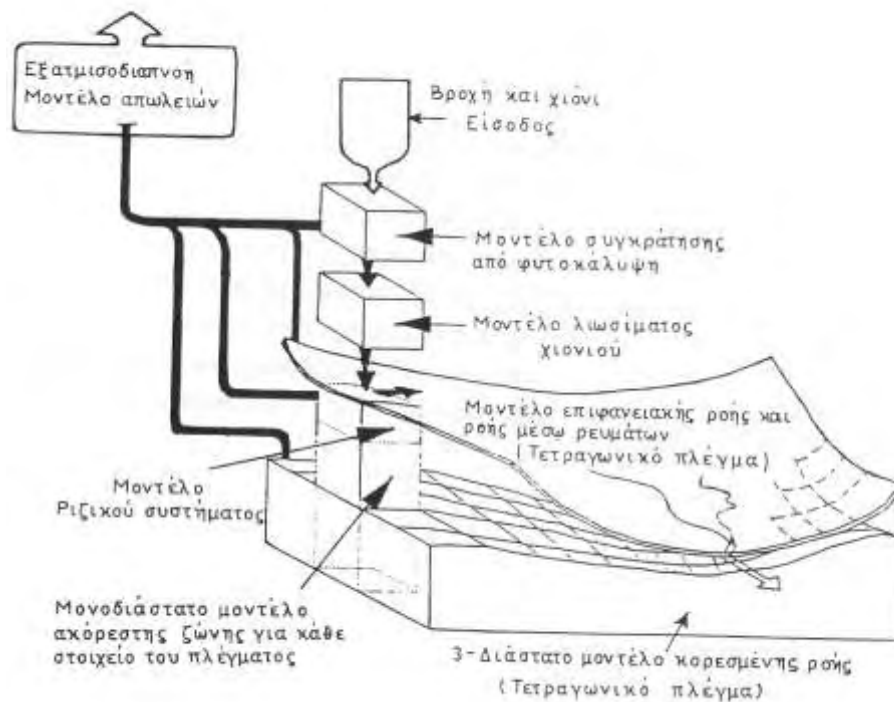
Εξαιτίας του γεγονότος ότι υπάρχει πληθώρα υδρολογικών μοντέλων τα οποία διατίθενται, από τα πιο απλά μέχρι τα πιο σύνθετα, έχει πολύ μεγάλη σημασία η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου με βάση τα παραπάνω κριτήρια. Τα απλά μοντέλα δε χρειάζονται πολλά στοιχεία, κοστίζουν λιγότερο, έχουν όμως επισφαλή αποτελέσματα. Από την άλλη πλευρά, τα σύνθετα μοντέλα είναι πιο δυναμικά, καλύπτουν με μεγαλύτερη επάρκεια χωρικά και χρονικά το φυσικό φαινόμενο, έχουν πολλές μεταβλητές και πολλές περιοριστικές διατάξεις και είναι φυσικά πιο δαπανηρά. Επομένως η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου πρέπει να στηρίζεται στα παραπάνω τρία κριτήρια.

### **2.3. Περιγραφή υδρολογικών μοντέλων**

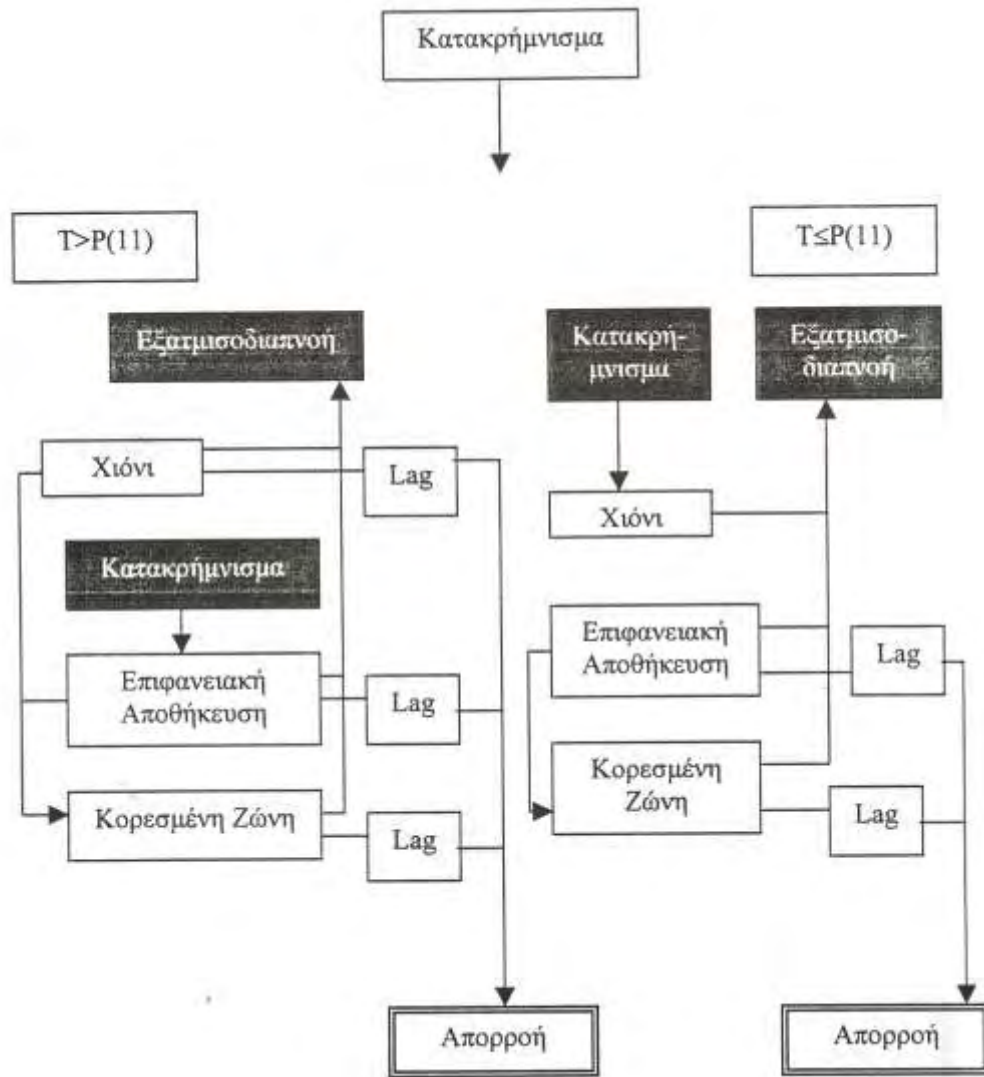
Στη συνέχεια δίνεται η σχηματική αναπαράσταση του μοντέλου MIKE-SHE (Εικόνα 2.3) και του προσδιοριστικού, ενιαίου παραμετρικού μοντέλου, συνεχούς προσομοίωσης SLURP (Εικόνα 2.4 & 2.5) (Simple Lumped Reservoir Parametric model) (Kite, 1974,1978,1989,1991 : Γεωργίου, 1996 : Παπαμιχαήλ και Γεωργίου, 1997), περιγραφή του μοντέλου προσομοίωσης συμβάντος HEC-1 (Feldman, 1981 : HEC-1, 1990 : Παπαμιχαήλ κ.ά., 1995 : Γεωργίου, 1996) και αναλυτική περιγραφή του μηνιαίου μοντέλου βροχής-απορροής των Thornwaite and Mather (Thornwaite and Mather, 1957 : Alley, 1984: Steenhuis and Van Der Molen, 1986 : Μπαλαφούτης, 1988 : Καραμούζης κ.ά., 2000α, 2000β : Ψιλοβίκος και Ζαρκάδας, 2006).

## 2.4. Σχηματική αναπαράσταση του υδρολογικού μοντέλου MIKE-SHE

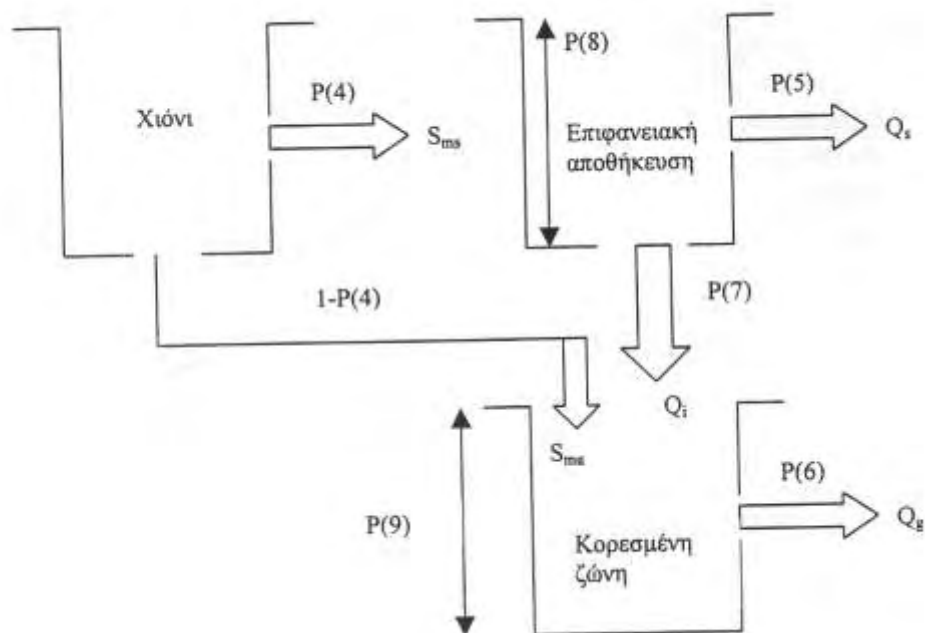
Το υδρολογικό μοντέλο MIKE-SHE (Abbott et al., 1986a, 1986b : Bathurst, 1986a, 1986b : Jain et al., 1992 : Refsgaard et al., 1992 : Lohani et al., 1993 : Refsgaard et al., 1995 : Subramanian, 1997 : Singh et al., 1999) είναι η ηλεκτρονική μορφή του μοντέλου SHE (Abbott et al., 1986a, 1986b : Bathurst, 1986a, 1986b : Jain et al., 1992 : Lohani et al., 1993 : Refsgaard et al., 1992) και είναι ένα καταμεμημένο μοντέλο φυσικής βάσης που προσομοιώνει όλες τις κύριες φάσεις του υδρολογικού κύκλου. Οι φάσεις που προσομοιώνονται δίνονται στο Εικόνα 2.3, όπου φαίνεται η σχηματική αναπαράσταση του μοντέλου MIKE-SHE.



Εικόνα 2.3. Σχηματική αναπαράσταση του μοντέλου MIKE – SHE



Εικόνα 2.4. Διάγραμμα ροής του μοντέλου SLURP



Εικόνα 2.5. Φυσική αναπαράσταση των τριών δεξαμενών του μοντέλου SLURP

## 2.5. Έλεγχος, διευθέτηση και συμπλήρωση βροχομετρικών παρατηρήσεων

Πριν προχωρήσει ο υδρολόγος στην ανάλυση, η ποιότητα και η πληρότητα των παρατηρήσεων πρέπει πρώτα να ελεγχθεί. Για τις περισσότερες περιπτώσεις υδρολογικής ανάλυσης χρειάζονται πλήρεις σειρές δεδομένων που όμως πάντοτε δεν είναι διαθέσιμες. Η ομοιογένεια των παρατηρήσεων επηρεάζεται από τον παρατηρητή, τη θέση και τον προσανατολισμό των οργάνων δημιουργώντας έτσι την ανάγκη συχνού ελέγχου τους. Τα δεδομένα πολλές φορές περικλείουν σφάλματα που οφείλονται στη μη σωστή παρατήρηση και απαιτούν λεπτομερή έλεγχο και προσαρμογή. Τέλος, συχνά εμφανίζονται κενά στις παρατηρήσεις που πρέπει να συμπληρωθούν. Πριν λοιπόν οι βροχομετρικές παρατηρήσεις υποστούν παραπέρα ανάλυση



πρέπει να υποβληθούν σε μια σειρά ελέγχων και προσαρμογών, για την εξασφάλιση αξιοπιστίας, πληρότητας και κατάλληλης για υδρολογική ανάλυση διαμόρφωσης.

### 2.5.1 Χρονικές προσαρμογές

Ο χρόνος που γίνονται οι βροχομετρικές παρατηρήσεις δεν είναι ο ίδιος σε κάθε περίπτωση. Αν το γεγονός αυτό αγνοηθεί μπορεί να οδηγήσει σε σφάλματα ανάλυσης. Έτσι όταν χρησιμοποιούνται ημερήσια ύψη βροχής ή ύψη βροχής συγκεκριμένων καταιγίδων, ο χρόνος έναρξης και λήξης του φαινομένου και ο χρόνος παρατήρησης της βροχής πρέπει να σημειώνονται με ακρίβεια. Οι περισσότερες παρατηρήσεις αναφέρονται στο ύψος βροχής του 24ωρου που προηγήθηκε από το χρόνο παρατήρησης. Η ώρα παρατήρησης στην Ελλάδα έχει επικρατήσει να είναι η 8<sup>η</sup> πρωινή κάθε ημέρας. Αν τώρα για παράδειγμα, έπεσε μια σημαντική βροχή που είχε διάρκεια 2 ωρών από τις 7 μέχρι τις 9 π.μ. μιας ημέρας, η ποσότητα της βροχής αυτής θα καταχωρηθεί σε δύο διαδοχικές ημέρες. Αν στο δελτίο παρατήρησης δεν σημειωθεί αυτό το γεγονός, κατά την ανάλυση η βροχή αυτή θα θεωρηθεί ότι έπεσε σε 48 ώρες, με αποτέλεσμα να οδηγήσει σε εσφαλμένα συμπεράσματα.

Γενικά έχει παρατηρηθεί ότι για τον υπολογισμό ενός κάποιου μέγιστου ύψους βροχής διάρκειας 24 ωρών, το ύψος που αναγράφεται στις παρατηρήσεις πρέπει να πολλαπλασιασθεί με τον παράγοντα 1,13, που όμως και αυτός δεν μπορεί να εφαρμόζεται για κάθε βροχή. Μια χρήσιμη σχέση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν υπάρχουν σαφείς ενδείξεις ότι η χρήση του παράγοντα 1,13 δεν είναι ενδεδειγμένη, είναι η ακόλουθη:

$$P_{24} = P_m + 0.5P_\alpha \quad (2.1)$$

όπου:  $P_{24}$  είναι το 24ωρο ύψος βροχής,  $P_m$  είναι το μέγιστο ύψος βροχής 24ωρης

διάρκειας όπως αναφέρεται στους πίνακες των κλιματολογικών παρατηρήσεων και  $P_{\alpha}$  είναι το ύψος βροχής του προηγούμενου ή του επόμενου 24ωρου, το οποίο είναι μεγαλύτερο.

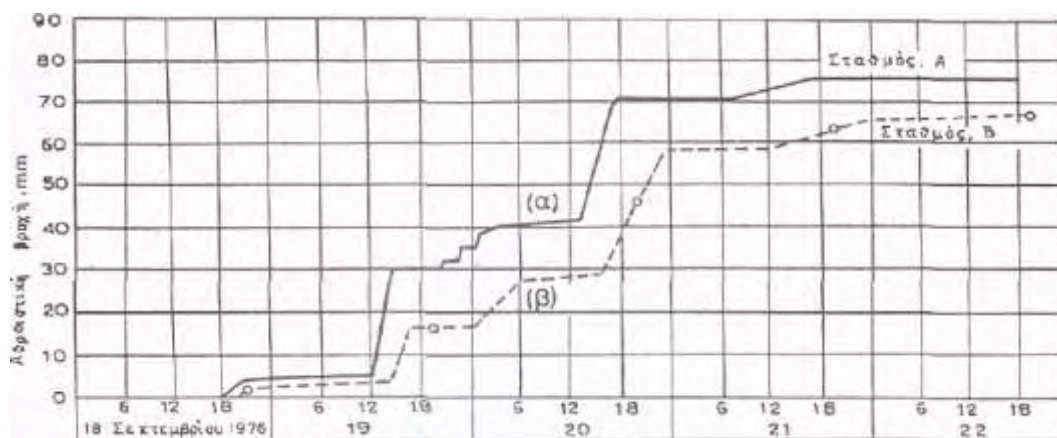
### **2.5.2. Αθροιστικές καμπύλες βροχών**

Ορισμένες χρονικές περίοδοι κατά τη διάρκεια μιας βροχής ενδιαφέρουν από υδρολογική άποψη πολύ περισσότερο από ότι άλλες, γι' αυτό είναι σημαντικό να γίνεται διαχωρισμός και να χρησιμοποιούνται μόνο οι περίοδοι αυτές. Για την επισήμανση των περιόδων που πρέπει να χρησιμοποιηθούν στην παραπέρα ανάλυση και την απόκτηση του μέγιστου των χρήσιμων στοιχείων από μία σειρά δεδομένων, κατασκευάζονται οι αθροιστικές καμπύλες βροχής, παράδειγμα των οποίων δίνεται στο Εικόνα 2.6.

Οι αθροιστικές καμπύλες αποτελούν τη βάση για την ανάλυση της ραγδαιότητας των βροχών. Ύψη βροχής για καθορισμένη διάρκεια (π.χ. 1, 6, 24 ώρες) που υπολογίζονται από τις αθροιστικές καμπύλες, χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των καμπυλών ύψους -έντασης-διάρκειας, για τις οποίες θα γίνει λόγος παρακάτω.

Οι αθροιστικές καμπύλες είναι ταυτόσημες με τις καμπύλες που δίνουν οι βροχογράφοι. Η καμπύλη (α) που δίνεται στο Εικόνα 2.6 προέρχεται από απ' ευθείας μεταφορά των εγγραφών βροχογράφου. Η καμπύλη (β) σχεδιάστηκε τεχνητά και αφορά το σταθμό Β γειτονικό του σταθμού Α, για τον οποίο υπάρχουν μόνο ημερήσιες παρατηρήσεις. Ιστορικές παρατηρήσεις έχουν δείξει ότι η διακύμανση της βροχής στους σταθμούς Α και Β είναι παρόμοια και με βάση το γεγονός αυτό η καμπύλη (β) σχεδιάστηκε με οδηγό τα ημερήσια ύψη βροχής του σταθμού Β και τη διακύμανση της καμπύλης (α) που προέρχεται από το βροχογράφο. Έτσι προκύπτει ότι αθροιστικές καμπύλες μπορεί να

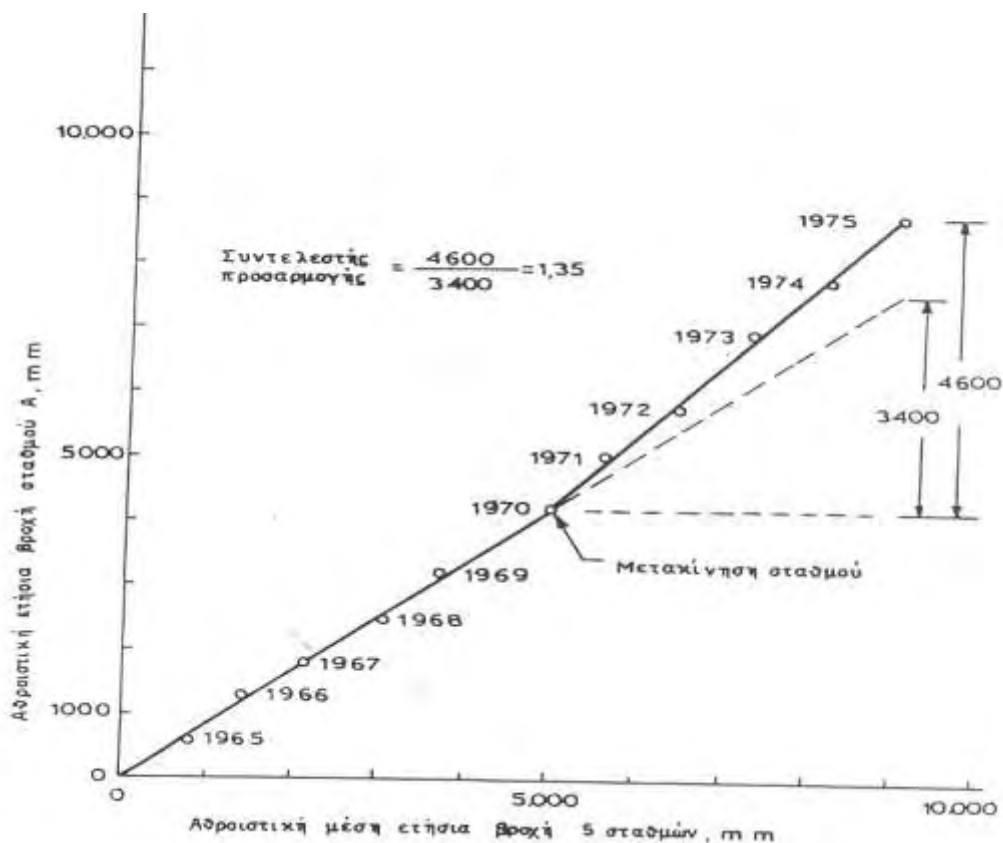
χρησιμοποιηθούν σαν οδηγοί για, την κατασκευή αθροιστικών καμπυλών άλλων σταθμών, που έχουν παρατηρήσεις ανά μεγάλα χρονικά διαστήματα, όταν τα χαρακτηριστικά της βροχής είναι διαπιστωμένο ότι είναι παρόμοια σε όλους αυτούς τους σταθμούς.



**Εικόνα 2.6.** Αθροιστικές καμπύλες ύψους βροχής

Πέρα από αυτές τις απλές αθροιστικές καμπύλες, για τον έλεγχο της συνέπειας των βροχομετρικών δεδομένων χρησιμοποιούνται οι **διπλές αθροιστικές καμπύλες**. Σημαντικές αλλαγές του σχετικού μεγέθους των παρατηρήσεων μπορεί να προκύψουν από αντικατάσταση του παρατηρητή, αλλαγή της θέσης του οργάνου, τον τρόπο παρατήρησης και τη μεταβολή του άμεσου περιβάλλοντος του οργάνου από την ανάπτυξη δένδρων και θάμνων, την κατασκευή κτισμάτων κ.λ.π. Η διόρθωση του σφάλματος των παρατηρήσεων που οφείλεται στα παραπάνω αίτια γίνεται με ανάλυση των ιστορικών παρατηρήσεων του σταθμού και σύγκριση της συμπεριφοράς του, σε σχέση με γειτονικούς σταθμούς, με τη διαδικασία της διπλής αθροιστικής καμπύλης. Ένα παράδειγμα αυτής της διαδικασίας δίνεται στο Εικόνα 2.7. Εκεί ο σταθμός Α μετακινήθηκε το 1970 σε άλλη θέση, απαλλαγμένη από κάθε εμπόδιο και προστατευμένη από τον αέρα, με αποτέλεσμα το βροχόμετρο να πιάνει περισσότερη βροχή. Οι παρατηρήσεις των προηγούμενων ετών, που λόγω κακής θέσης του οργάνου

ήταν μικρότερες από τις πραγματικές, πρέπει να διορθωθούν. Για να γίνει αυτό τα ετήσια ύψη βροχής του σταθμού Α συγκρίνονται αθροιστικά με το μέσο όρο των αντίστοιχων υψών βροχής από πέντε γειτονικούς σταθμούς. Η καμπύλη που προκύπτει παρουσιάζει ένα σπάσιμο το 1970 που δείχνει ότι οι παρατηρήσεις των προηγούμενων του 1970 ετών πρέπει να πολλαπλασιασθούν με το συντελεστή 1,35 για να προσαρμοσθούν στη νέα κατάσταση. Πρέπει να τονισθεί ότι κατά την εφαρμογή της μεθόδου αυτής η αλλαγή κλίσης της καμπύλης πρέπει να εδραιώνεται με τουλάχιστον πέντε χρόνων παρατηρήσεις.



Εικόνα 2.7. Διπλή αθροιστική καμπύλη

### 2.5.3. Συμπλήρωση παρατηρήσεων που λείπουν

Όταν λείπουν βροχομετρικές παρατηρήσεις για μια ορισμένη χρονική περίοδο, αυτές θα μπορούσαν να συμπληρωθούν με τη βοήθεια παρατηρήσεων τριών άλλων σταθμών, που βρίσκονται σε γειτονικές τοποθεσίες και κατά προσέγγιση απέχουν το ίδιο από το σταθμό με τις ελλιπείς παρατηρήσεις. Αν οι μακρόχρονες παρατηρήσεις των τριών αυτών σταθμών παρουσιάζουν διαφορές μικρότερες του 10% από τη βροχή στον υπό συμπλήρωση σταθμό, οι ελλείπουσες παρατηρήσεις μπορεί να υπολογισθούν παίρνοντας απλώς τον αριθμητικό μέσο όρο του ύψους βροχής στους τρεις γειτονικούς σταθμούς. Αν οι διαφορές είναι μεγαλύτερες τότε χρησιμοποιείται η μέθοδος των **κανονικών αναλογιών** που εκφράζεται από τη σχέση:

$$P_4 = \frac{1}{3} \left[ \frac{N_4 P_1}{N_1} + \frac{N_4 P_2}{N_2} + \frac{N_4 P_3}{N_3} \right] \quad (2.2)$$

όπου:  $P_4$  είναι το εκτιμώμενο ύψος βροχής, στο σταθμό που λείπουν οι παρατηρήσεις, μιας ορισμένης χρονικής περιόδου,  $P_1, P_2, P_3$  είναι τα ύψη βροχής της περιόδου αυτής που καταγράφηκαν στους τρεις γειτονικούς σταθμούς και  $N_1, N_2, N_3, N_4$  είναι η κανονική (μέση) βροχόπτωση σε καθένα από τους τέσσερις σταθμούς όπως υπολογίζεται από παρατηρήσεις μακράς σειράς ετών.

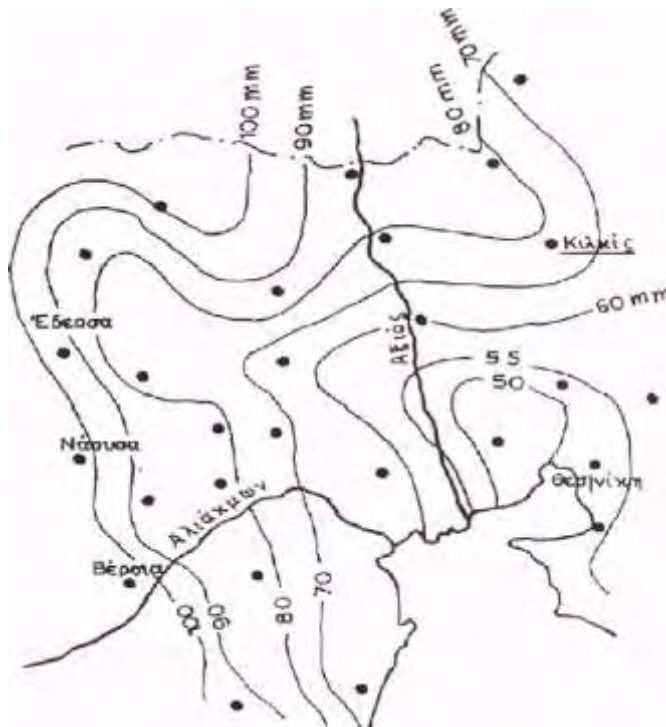
Η παραπάνω διαδικασία είναι επιτυχής μόνο όταν υπάρχει ισχυρή συσχέτιση ανάμεσα στη βροχή των σταθμών που χρησιμοποιούνται. Υπάρχουν περιπτώσεις, που υπάρχει καλύτερη συσχέτιση προς ένα σταθμό, παρά προς το μέσο όρο τριών, αν π.χ. οι δύο από αυτούς βρίσκονται πολύ μακριά. Ακόμη ο τρόπος αυτός δεν δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα αν

πρόκειται για τοπικές ανοδικές βροχές. Σε περιπτώσεις σαν τις παραπάνω, όπου υπάρχουν ισχυρές ενδείξεις ότι η μέθοδος αυτή δεν θα δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα, μπορεί να χαραχθούν οι ισόβροχες καμπύλες με βάση τις παρατηρήσεις όλων των άλλων σταθμών της περιοχής και να υπολογισθεί το ύψος βροχής του σταθμού που του λείπουν οι παρατηρήσεις με απλή παρεμβολή. Αν π.χ. λείπουν οι παρατηρήσεις του Οκτωβρίου 1939 στο Κιλκίς, από το χάρτη των ισόβροχων της περιοχής της Κεντρικής Μακεδονίας, που έγινε με βάση τις παρατηρήσεις πολλών άλλων σταθμών, και δίνεται στο Εικόνα 2.8, η βροχόπτωση για το σταθμό του Κιλκίς υπολογίζεται ίση με 76 mm

Η συμπλήρωση παρατηρήσεων που λείπουν μπορεί να γίνει και με την εφαρμογή της πολλαπλής ή απλής γραμμικής παλινδρόμησης, με την προϋπόθεση ότι η γραμμική συσχέτιση μεταξύ των παρατηρήσεων του σταθμού που λείπουν παρατηρήσεις και αυτών των γειτονικών σταθμών είναι ιδιαίτερα ισχυρή (συντελεστής γραμμικής συσχέτισης  $r > 0,70$ ). Για την περίπτωση πολλαπλής γραμμικής συσχέτισης με τρεις γειτονικούς σταθμούς, συσχετίζοντας τα ύψη βροχής των χρονικών περιόδων που λείπουν παρατηρήσεις, για τα κοινά έτη μετρήσεων των τεσσάρων σταθμών προκύπτει η σχέση:

$$P_4 = a + b_1P_1 + b_2P_2 + b_3P_3 \quad (2.3)$$

όπου:  $a$  είναι ο σταθερός όρος και  $b_1, b_2, b_3$  είναι οι συντελεστές που προκύπτουν την εφαρμογή της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων, ενώ τα  $P_1$ ,  $P_2$  και  $P_3$  είναι τα ίδια με αυτά της σχέσης (2.2)



**Εικόνα 2.8.** Εκτίμηση του ύψους βροχής τον Οκτώβριο του 1938 στο Κιλκίς από το χάρτη των ισόβροχων του μήνα αυτού που χαράχθηκε με βάση τις παρατηρήσεις πολλών άλλων σταθμών της Κεντρικής Μακεδονίας.

Όταν υπάρχει καλύτερη συσχέτιση προς ένα γειτονικό σταθμό τότε η σχέση (2.3) γίνεται απλή γραμμική και παίρνει τη μορφή:

$$P_4 = a + b_1 P_1 \quad (2.4)$$

όπου  $a$  ο σταθερός όρος και  $b$  είναι ο συντελεστής που προκύπτει με την εφαρμογή της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων από τα ύψη βροχής της χρονικής περιόδου που λείπουν παρατηρήσεις, των κοινών ετών μετρήσεων των δύο σταθμών.

## 2.6. Ανάλυση των βροχομετρικών δεδομένων

Τη φάση του ελέγχου, της διευθέτησης και της συμπλήρωσης των παρατηρήσεων ακολουθεί η φάση της ανάλυσης τους. Ανάλυση δεδομένων γίνεται με πολλούς τρόπους, ανάλογα με το είδος των διατιθέμενων παρατηρήσεων και το σκοπό για τον οποίο γίνεται. Στη συνέχεια δίνονται διάφοροι τρόποι ανάλυσης που είναι χρήσιμοι από υδρολογική σκοπιά.

### 2.6.1. Μέση βροχόπτωση περιοχής

Η μέτρηση βροχής που κάνει ένα βροχόμετρο αφορά το σημείο που είναι εγκατεστημένο. Τον υδρολόγο όμως, στις περισσότερες περιπτώσεις, ενδιαφέρει όχι τόσο το ύψος της βροχής σε κάποιο σταθμό αλλά το ύψος βροχής που έπεσε σε μια ολόκληρη περιοχή. Πρέπει λοιπόν οι παρατηρήσεις των σταθμών να τροποποιηθούν έτσι που να δίνουν το μέσο ύψος και αν είναι δυνατόν την κατανομή της βροχής πάνω στην περιοχή. Αυτό μπορεί να γίνει με μια από τις παρακάτω μεθόδους:

#### 2.6.1.1. Μέθοδος του αριθμητικού μέσου όρου

Με τη μέθοδο αυτή αθροίζονται τα ύψη βροχής, που παρατηρήθηκαν σε όλους τους σταθμούς μιας περιοχής και το άθροισμα αυτό διαιρείται με τον αριθμό των σταθμών. Από τα παραπάνω φαίνεται ότι ο τρόπος αυτός δίνει ένα κάποιο μέσο ύψος βροχής της περιοχής και καθόλου την κατανομή της. Αν  $n$  είναι ο αριθμός των σταθμών και  $p_1, \dots, p_n$  είναι τα ύψη βροχής, που μετρήθηκαν σε καθένα σταθμό, στη διάρκεια μιας συγκεκριμένης χρονικής περιόδου, το μέσο ύψος βροχής ( $p_m$ ) που αντιστοιχεί στην περιοχή για τη συγκεκριμένη περίοδο μπορεί να βρεθεί με τη σχέση:

$$p_m = \frac{p_1 + p_2 + \dots + p_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i \quad (2.5)$$



Η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο όταν η περιοχή είναι σχετικά ομοιόμορφη και υπάρχει πυκνό δίκτυο βροχομετρικών σταθμών. Δεν πρέπει να εφαρμόζεται όταν το ανάγλυφο της περιοχής είναι πολύ ανώμαλο και οι σταθμοί λιγостоί και όχι συμμετρικά κατανομημένοι.

#### **2.6.1.2. Η μέθοδος των πολυγώνων του Thiessen**

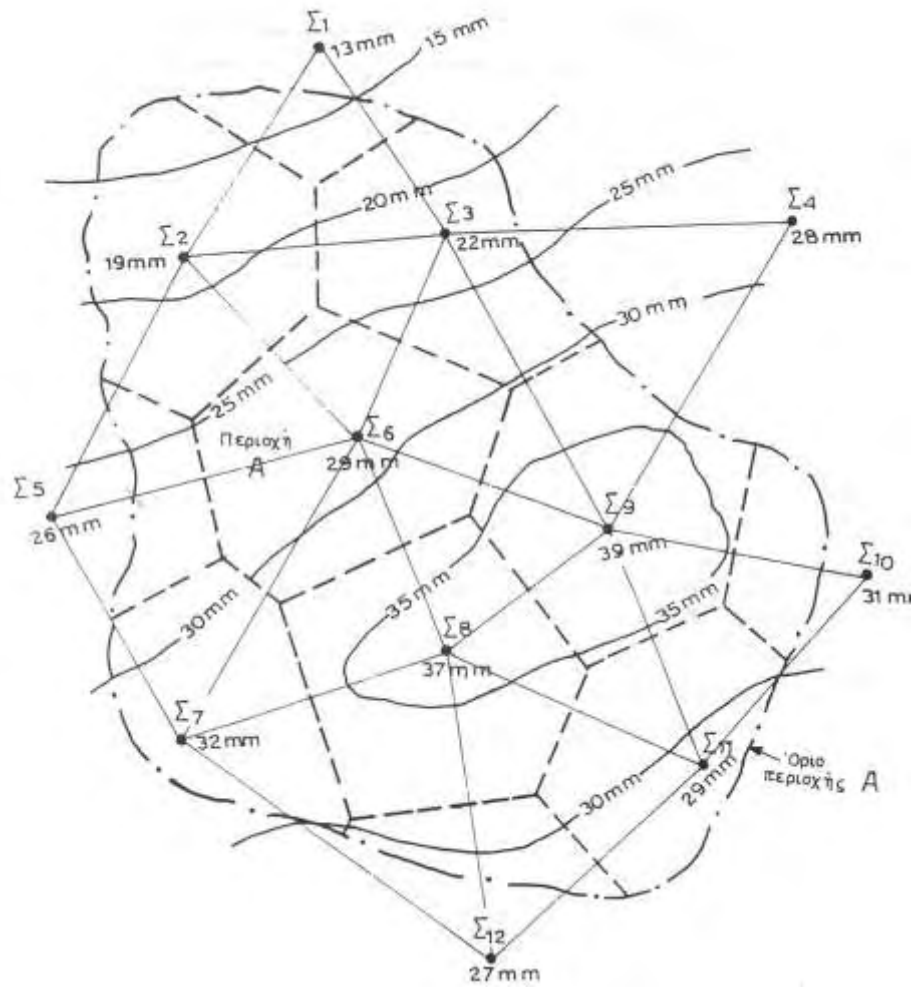
Η μέθοδος αυτή πλεονεκτεί γενικά του αριθμητικού μέσου όρου στο ότι το ύψος, βροχής που παρατηρείται σε κάθε σταθμό σταθμίζεται με μια αντιπροσωπευτική έκταση. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η παρακάτω: Οι βροχομετρικοί σταθμοί μιας περιοχής τοποθετούνται πάνω στο χάρτη και ενώνονται μεταξύ τους με ευθείες γραμμές. Στα μέσα των γραμμών αυτών χαράζονται άλλες κάθετες γραμμές που συναντιούνται μεταξύ τους και σχηματίζουν πολύγωνα γύρω από κάθε σταθμό. Το ύψος βροχής που μετρήθηκε σε κάθε σταθμό θεωρείται ότι είναι το ύψος που έπεσε στο πολύγωνο που τον περιβάλλει. Για να βρεθεί το μέσο ύψος βροχής μιας περιοχής, το ύψος βροχής κάθε σταθμού πολλαπλασιάζεται με το εμβαδόν του πολυγώνου που τον περιβάλλει, τα γινόμενα αυτά αθροίζονται και το άθροισμα διαιρείται με το συνολικό εμβαδόν της έκτασης. Ένα παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου αυτής φαίνεται στο Εικόνα 2.9. Αν  $p_1, \dots, p_n$  είναι τα ύψη βροχής που παρατηρήθηκαν σε καθένα από τους  $n$  σταθμούς που είναι μέσα ή και γύρω στην περίμετρο μιας περιοχής,  $a_1, a_2, \dots, a_n$  είναι τα εμβαδά των πολυγώνων που περιβάλλουν αντίστοιχα τους σταθμούς μέσα στα όρια της περιοχής και  $A$  είναι το εμβαδόν ολόκληρης της περιοχής, το μέσο ύψος βροχής της περιοχής  $p_m$  μπορεί να βρεθεί με τη σχέση:

$$p_m = \frac{p_1 a_1 + p_2 a_2 + \dots + p_n a_n}{A} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n p_i a_i \quad (2.6)$$

Με τη μέθοδο αυτή, όπως αναφέρθηκε παραπάνω μπορεί να χρησιμοποιηθούν και σταθμοί που βρίσκονται γύρω από την περιοχή κάνοντας έτσι πιο αντιπροσωπευτικό το τελικό αποτέλεσμα. Η μέθοδος στηρίζεται στην παραδοχή ότι το ύψος βροχής μεταβάλλεται γραμμικά από σταθμό σε σταθμό και έτσι δεν επιτρέπει στον αναλυτή να χρησιμοποιήσει την επιδεξιότητα του για την εκτίμηση της επίδρασης του ανάγλυφου του εδάφους κ.λ.π.

### 2.6.1.3 Τροποποιημένη μέθοδος των πολυγώνων του Thiessen

Η επίδραση του ανάγλυφου του εδάφους στην εκτίμηση της μέσης βροχόπτωσης μιας περιοχής εισάγεται με τη χρησιμοποίηση της τροποποιημένης μεθόδου Thiessen (Wilson, 1990), η οποία παίρνει υπόψη το υψόμετρο της περιοχής και εφαρμόζεται εύκολα. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή ενώνονται τα σημεία που βρίσκονται οι σταθμοί, όπως ακριβώς και στη μέθοδο Thiessen, αλλά αντί να χαραχθούν οι μεσοκάθετοι, στις πλευρές των σχηματιζόμενων τριγώνων, χαράσσεται ένα νέο τρίγωνο που έχει σαν κορυφές τα σημεία εκείνα των ευθειών, που ενώνουν δύο σταθμούς, που αντιπροσωπεύουν το μέσο υψόμετρο μεταξύ των δύο σταθμών. Οι διχοτόμοι των γωνιών του νέου τριγώνου συναντιούνται μεταξύ τους και σχηματίζουν πολύγωνα γύρω από κάθε σταθμό. Το ύψος βροχής που μετρήθηκε σε κάθε σταθμό θεωρείται ότι είναι το ύψος που έπεσε στο πολύγωνο που τον περιβάλλει. Στη συνέχεια για να βρεθεί το μέσο ύψος βροχής χρησιμοποιείται η σχέση (2.6) της μεθόδου των πολυγώνων του Thiessen.



**Εικόνα 2.9.** Χάραξη των πολυγώνων του **Thiessen** και των ισόβροχων καμπυλών για την εκτίμηση της μέσης βροχόπτωσης της περιοχής Α, για τη χρονική περίοδο από 2-5/2/1976.

#### 2.6.1.4. Η μέθοδος των ισόβροχων καμπυλών

Η μέθοδος των ισόβροχων καμπυλών είναι η πιο πλήρης και αντικειμενική για την εκτίμηση της μέσης βροχόπτωσης μιας περιοχής γιατί παίρνει υπόψη την τοπογραφία της περιοχής, τα χαρακτηριστικά της βροχής και άλλα στοιχεία που βοηθούν στη σωστή εκτίμηση. Η εφαρμογή της μεθόδου γίνεται με τον ακόλουθο τρόπο: Πρώτα παίρνεται ένας χάρτης της περιοχής στον οποίο φαίνεται η τοπογραφική της διαμόρφωση και τοποθετούνται οι θέσεις των βροχομετρικών σταθμών. Μετά, στη θέση κάθε σταθμού τοποθετούνται τα ύψη βροχής που παρατηρήθηκαν κατά τη διάρκεια συγκεκριμένης χρονικής περιόδου της οποίας επιχειρείται η ανάλυση. Στη συνέχεια χαράσσονται οι ισόβροχες καμπύλες που είναι καμπύλες που ενώνουν σημεία ίσου ύψους βροχής. Κατά τη χάραξη τους, όπως και παραπάνω αναφέρθηκε εκτός από τα ύψη βροχής των σταθμών παίρνονται υπόψη τα χαρακτηριστικά της βροχής, η τοπογραφική διαμόρφωση, η τυχόν ύπαρξη σχέσεων ανάμεσα στο ύψος βροχής και τα υψόμετρα και κάθε άλλο στοιχείο που μπορεί να φανεί χρήσιμο στην διαμόρφωση σωστής γνώμης. Ακόμη, στη διαδικασία χρησιμοποιούνται και σταθμοί εκτός της περιοχής. Για τον υπολογισμό της μέσης βροχόπτωσης της περιοχής βρίσκονται τα εμβαδά των ζωνών που περικλείονται ανάμεσα σε διαδοχικές ισόβροχες, τα εμβαδά αυτά πολλαπλασιάζονται με το μέσο όρο του ύψους βροχής των ισόβροχων που τα περικλείουν, τα γινόμενα που προκύπτουν προσθέτονται και το άθροισμα αυτό διαιρείται με το εμβαδόν ολόκληρης της περιοχής. Ένα παράδειγμα χάραξης ισόβροχων δίνεται επίσης στο Εικόνα 2.8. Αν  $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$  είναι το ύψος βροχής των  $n$  ισόβροχων καμπυλών που χαράχθηκαν σε μια περιοχή, για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο,  $\alpha_{1,2}, \alpha_{2,3}, \dots, \alpha_{n-1,n}$  είναι τα εμβαδά των ζωνών ανάμεσα σε διαδοχικές ισόβροχες,  $(\rho_1+\rho_2)/2, (\rho_2+\rho_3)/2, \dots, (\rho_{n-1}+\rho_n)/2$  είναι τα μέσα ύψη βροχής που αντιστοιχούν σε κάθε

ζώνη και  $A$  είναι το εμβαδόν ολόκληρης της περιοχής, η μέση βροχόπτωση ( $p_m$ ) που πέφτει στην περιοχή, στη συγκεκριμένη χρονική περίοδο μπορεί να εκφρασθεί με τη σχέση:

$$p_m = \frac{(p_1 + p_2)a_{1,2} + (p_2 + p_3)a_{2,3} + \dots + (p_{n-1} + p_n)a_{n-1,n}}{2A} = \frac{1}{2A} \sum_{i=1}^n (p_i + p_{i+1})a_{i,i+1} \quad (2.7)$$

Γενικά η μέθοδος αυτή εκτός από τη μέση βροχόπτωση δίνει και την κατανομή της στην περιοχή και επιτρέπει το χωρισμό της περιοχής σε τμήματα που συμβάλλουν ανάλογα στην απορροή.

#### 2.6.1.5. Μέθοδος βροχοβαθμίδας

Η υψομετρική μέθοδος ή μέθοδος της βροχοβαθμίδας βασίζεται στην παρατήρηση ότι το ύψος βροχής αυξάνει με την αύξηση του υψόμετρου και χρησιμοποιεί τη βροχοβαθμίδα που είναι όρος που περιγράφει την αύξηση του ετήσιου βροχομετρικού ύψους ανά 100 m αύξηση του υψόμετρου. Η μέθοδος 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.

Η μέθοδος της βροχοβαθμίδας μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για τη συμπλήρωση παρατηρήσεων όσο και για την εύρεση της μέσης βροχόπτωσης μιας λεκάνης, με αναγωγή στο μέσο υψόμετρο της λεκάνης. Η διαδικασία της βροχοβαθμίδας πρέπει να χρησιμοποιείται με μεγάλη προσοχή και τα μεγέθη να αναφέρονται σε μεγάλο χρονικό βήμα (π.χ. έτος) και στη συνέχεια με μεθόδους επιμερισμού να γίνεται εκτίμηση μεγεθών μικρότερων χρονικών βημάτων (π.χ. μήνας).

### 2.6.1.6. Μέθοδος Kriging

Για την ορθότερη κατάστρωση μαθηματικών μοντέλων εκτίμησης του υδατικού ισοζυγίου είναι απαραίτητη η γνώση της κατανομής της βροχόπτωσης σε κάθε κόμβο του κάρναβου διακριτοποίησης. Πρακτικά αυτό είναι αδύνατο να καλυφθεί από μετρήσεις λόγω της απαίτησης μεγάλου αριθμού σταθμών για την πληρέστερη περιγραφή της κατανομής της βροχόπτωσης. Καθότι όμως η μεταβολή της βροχόπτωσης στο χώρο δεν είναι τυχαία οι εκτιμήσεις των τιμών της στους κόμβους όπου δεν υπάρχουν μετρήσεις γίνεται με μεθόδους παρεμβολής μεταξύ των οποίων είναι η απλή (simple) και η γενική (universal) μέθοδος Kriging και η Co- Kriging (Krajewski, 1987 : Creutin et al., 1988 : Παπαμιχαήλ και Μεταξά, 1993 : Papamichail and Metaxa, 1996 : Papamichail and Alexiou, 1998).

Οι σημειακές εκτιμήσεις που μπορεί να αναφέρονται σε ετήσια, σε εποχιακά, σε μηνιαία ή ημερήσια ή και σε ύψη βροχής διαφόρων χρονικών διαστημάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια για την εκτίμηση της μέσης βροχόπτωσης με μια από τις παραπάνω μεθόδους. Οι παραπάνω μέθοδοι Kriging μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίσης και για τη βέλτιστη επιλογή των θέσεων των βρόχομετρικών σταθμών (Παπαμιχαήλ και Μεταξά, 1993 : Papamichail and Metaxa, 1996).

### **2.6.1.7. Εφαρμογή**

Με την εφαρμογή της μεθόδου της βροχοβαθμίδας και χρησιμοποιώντας τις ετήσιες βροχοπτώσεις της περιόδου των υδρολογικών ετών (1975-76 μέχρι 1995-96) και τα υψόμετρα των σταθμών Ταξιάρχη, Αρναίας, Μεγάλης Παναγιάς, Πλανών, Ορμύλιας και Αγίου Μαμά Χαλκιδικής να βρεθεί η γραμμική σχέση που συσχετίζει το υψόμετρο κάθε σταθμού με το μέσο ετήσιο ύψος βροχής. Στη συνέχεια, με την εφαρμογή της διαδικασίας επιμερισμού και χρησιμοποιώντας τα μηνιαία ύψη βροχής του σταθμού του Ταξιάρχη, να βρεθούν τα μηνιαία ύψη βροχής, κάθε υδρολογικού έτους που αντιστοιχούν στο μέσο υψόμετρο (611,6 m) της λεκάνης του Βατόνια (Ολυνθίου) Χαλκιδικής.

### **Διερεύνηση**

Από την εξέταση των μέσων όρων των ετήσιων βροχοπτώσεων, των κοινών υδρολογικών ετών παρατηρήσεων (1975-76 μέχρι 1995-96), των σταθμών Ταξιάρχη (Υψόμετρο 860 mm) , Αρναίας (Υψόμετρο 585 mm), Μεγάλης Παναγιάς (Υψόμετρο 440 m), Πλανών (Υψόμετρο 115 m), Ορμύλιας (Υψόμετρο 40 mm) και Αγίου Μάμα (Υψόμετρο 20 mm), που είναι αντίστοιχα 745,84 mm, 635,07 mm, 596,14 mm, 505,81 mm, 440,45 mm και 412,31 mm προκύπτει ότι ο σταθμός του Ταξιάρχη με υψόμετρο 860 mm δέχεται τη μεγαλύτερη βροχόπτωση από τους υπόλοιπους σταθμούς, οι οποίοι και έχουν μικρότερο υψόμετρο. Επίσης παρατηρείται ότι όσο αυξάνει το υψόμετρο του σταθμού αυξάνει και το ύψος βροχής. Τα παραπάνω οδήγησαν στο σκεπτικό υιοθέτησης βροχοβαθμίδας για την εύρεση της μέσης βροχόπτωσης της λεκάνης του Βατόνια (Ολυνθίου). Η συσχέτιση αφορά την εύρεση της γραμμικής σχέσης που συσχετίζει το υψόμετρο του σταθμού με το μέσο ετήσιο

ύψος βροχής (Σχήμα 2.10) και για την περίπτωση αυτή η σχέση που βρέθηκε είναι η εξής:

$$y=0,3669x +429,97 \quad R^2 =0,9765 \quad (2.8)$$

όπου:  $y$  = ετήσιο ύψος βροχής σε mm και  $x$  = υψόμετρο του σταθμού σε m.

Σύμφωνα με τη σχέση (2.8), για κάθε αύξηση του υψομέτρου κατά 100 m το ετήσιο ύψος βροχής αυξάνεται κατά 36,69mm.

Για την εκτίμηση της μέσης βροχόπτωσης της λεκάνης του Βατόνια χρησιμοποιούνται τα δεδομένα του σταθμού του Ταξιάρχη, της περιόδου των υδρολογικών ετών 1974-75 μέχρι 1997-98 γιατί είναι και ο μόνος σταθμός ο οποίος βρίσκεται εντός της λεκάνης. Η εκτίμηση των μηνιαίων υψών βροχής που αντιστοιχούν στο μέσο υψόμετρο (611,6 m) της λεκάνης του Βατόνια, για κάθε υδρολογικό έτος, γίνεται με τις σχέσεις:

$$P_k = P_{T(k)} - \frac{248,4 * 36,69}{100} \quad (2.9)$$

και

$$P_i^k = \frac{P_k * P_{T(i)}^k}{P_{T(k)}} \quad (2.10)$$

όπου :  $P_{T(k)}$  = ετήσιο ύψος βροχής στο σταθμό του Ταξιάρχη, κατά το έτος  $k$ , σε mm,  $P_k$  = ετήσιο ύψος βροχής στη λεκάνη του Βατόνια, κατά το έτος  $k$ , σε mm,  $P_i^k$  = μηνιαίο ύψος βροχής, κατά το μήνα  $i$  και το έτος  $k$ , στη λεκάνη του Βατόνια, σε mm,  $P_{T(i)}^k$  = μηνιαίο ύψος βροχής, κατά το μήνα  $i$  και το έτος  $k$ , στο σταθμό του Ταξιάρχη, σε mm, 36,69 = βροχοβαθμίδα που υπολογίστηκε με τη σχέση (2.8) και 248,4 = διαφορά ανάμεσα στο υψόμετρο του σταθμού του Ταξιάρχη και του μέσου υψομέτρου της λεκάνης του Βατόνια (860 - 611,6).



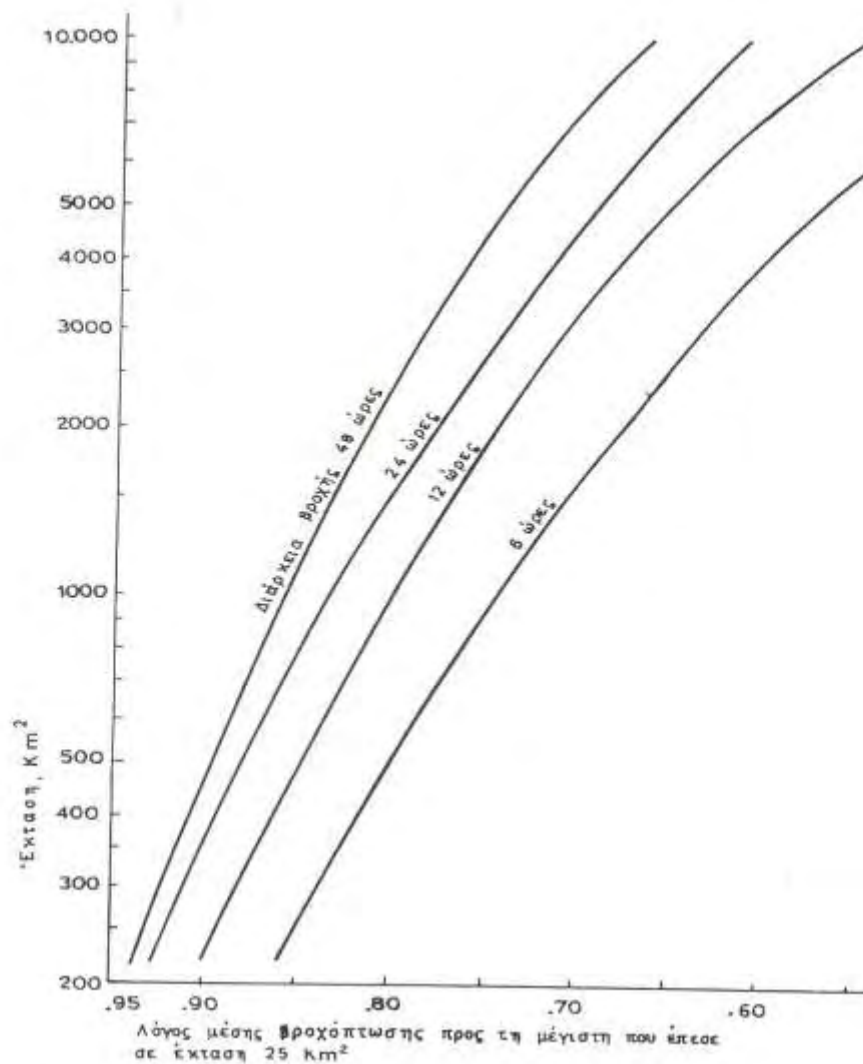
Με την εφαρμογή των σχέσεων (2.9) και (2.10) υπολογίζονται οι μέσες μηνιαίες βροχοπτώσεις που αντιστοιχούν στο μέσο υψόμετρο της λεκάνης του Βατόνια.

### **2.6.2. Σχέσεις ύψους βροχής, έντασης και διάρκειας**

Από υδρολογική άποψη είναι σημαντικό να μπορεί κανείς να υπολογίσει τη μέση βροχόπτωση μιας περιοχής όταν είναι δεδομένο μόνο το μέγιστο ύψος βροχής που έπεσε σε κάποιο σημείο της περιοχής. Τέτοιες σχέσεις μπορεί να διερευνηθούν με βάση μεμονωμένες βροχοπτώσεις ή με βάση τη γεωγραφία. Τιμές που βασίζονται σε μεμονωμένες βροχοπτώσεις είναι χρήσιμες για την εκτίμηση της πιθανής μέγιστης βροχόπτωσης που θα πέσει σε μια περιοχή ενώ τιμές που βασίζονται στη γεωγραφία είναι χρήσιμες για ανάλυση συχνότητας. Οι Hershfield και Wilson, (1960) ανέλυσαν πάνω από 70 μεμονωμένες βροχές στην περιοχή των μεσοδυτικών πολιτειών των ΗΠΑ και κατέληξαν σε συγκεκριμένες αναλογίες ανάμεσα στη μέση βροχόπτωση που πέφτει σε μία περιοχή και του μέγιστου ύψους βροχής που έπεσε σε μια έκταση της τάξης των 25 km<sup>2</sup> μέσα στην περιοχή αυτή, σε συνδυασμό με τη διάρκεια της βροχής. Με βάση τα στοιχεία αυτά έγινε το διάγραμμα που φαίνεται στο Εικόνα 2.10. Σχέσεις της μορφής αυτής πρέπει να διερευνώνται για κάθε γεωγραφικό διαμέρισμα, σε περίπτωση όμως που αυτό δεν είναι δυνατό από έλλειψη παρατηρήσεων, το διάγραμμα της Εικόνας 2.10 μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν υποκατάστατο, έχοντας κατά νου ότι η χρήση του μόνο κατά προσέγγιση τιμές μπορεί να δώσει.

Πέρα από τα διαγράμματα ύψους βροχής- έντασης- διάρκειας, κατά καιρούς έχουν ερευνηθεί διάφορες εμπειρικές σχέσεις ανάμεσα στο μέσο ύψος βροχής και την έκταση, σαν συνάρτηση της μέγιστης βροχόπτωσης που

παρατηρήθηκε σε κάποιο σταθμό που βρίσκεται μέσα στην έκταση που μας ενδιαφέρει. Δειγματοληπτικά, μερικές από τις σχέσεις αυτές δίνονται παρακάτω με την υπόμνηση ότι η εφαρμογή τους πρέπει να γίνεται με μεγάλη προσοχή και αφού πρώτα με διάφορους τρόπους ελεγχθεί η προσαρμοστικότητα τους στην περιοχή που θα εφαρμοσθούν.



**Εικόνα 2.10.** Διάγραμμα που δείχνει την αναλογία ανάμεσα στο μέσο ύψος βροχής, που πέφτει σε μια περιοχή σε σχέση με το μέγιστο, που παρατηρήθηκε σε έκταση 25 km<sup>2</sup>, για διάφορες διάρκειες βροχής.

**Σχέση του Horton:**

$$P_a = P_m e^{-0.00625\sqrt{A}} \quad (2.11)$$

Όπου:  $P_a$  είναι η μέση βροχόπτωση της περιοχής σε mm,  $P_m$  είναι η μέγιστη βροχόπτωση που παρατηρήθηκε σε σταθμό της περιοχής σε mm και  $A$  είναι η έκταση της περιοχής σε  $\text{km}^2$ . Η σχέση κατά τον Horton ισχύει για περιοχές με έκταση από 50 μέχρι 50.000  $\text{km}^2$ .

**Σχέση του Chow:**

$$P_a = P_m + a_1 A^{1/2} + a_2 A^1 + a_3 A^{3/2} + \dots \quad (2.12)$$

όπου: οι συντελεστές  $a_1, a_2, \dots$  υπολογίζονται με βάση δεδομένα της περιοχής στην οποία πρόκειται να εφαρμοσθεί. Η σχέση κατά τον Chow, πρέπει να εφαρμόζεται για περιοχές με έκταση μεγαλύτερη από 750  $\text{km}^2$ .

**Σχέση των Huff - Stout:**

$$P_a = P_m - bA^{1/2} \quad (2.13)$$

Διερευνήθηκε για περιοχές με έκταση από 15 μέχρι 700  $\text{km}^2$ . Κατά τους Huff and Stout, για έκταση 15  $\text{km}^2$  ο συντελεστής  $b$  παίρνει την τιμή  $b = 0,044$  ή  $b = 0,0024 P_m$  και για έκταση 700  $\text{km}^2$  την τιμή  $b = 0,016$  ή  $b = 0,0012 P_m$ . Η σχέση αυτή αν κρίνουμε από τις τιμές του  $b$  που δίνονται σαν συνάρτηση της  $P_m$ , πρέπει να εφαρμόζεται με πολύ μεγάλη προσοχή.

### 2.6.3. Μετάθεση και μεγιστοποίηση βροχών

Κατά την ανάλυση της συχνότητας πλημμύρων υδάτινων ρευμάτων, πολλές φορές όταν για μια υδρολογική λεκάνη δεν υπάρχουν επαρκή βροχομετρικά δεδομένα, χρησιμοποιούνται παρατηρήσεις από γειτονικούς σταθμούς. Η χρησιμοποίηση στοιχείων που μαζεύτηκαν σε μια θέση για υδρολογική ανάλυση σε κάποια άλλη θέση λέγεται **μετάθεση**.

Μεταθέσεις βροχών από μέρος σε μέρος δε μπορεί να γίνονται ανεξέλεγκτα και απεριόριστα. Η δυνατότητα μετάθεσης καθορίζεται από την τοπογραφική διαμόρφωση της περιοχής και το κλίμα. Αν μια περιοχή είναι σχετικά ελεύθερη από σημαντικές τοπογραφικές ανωμαλίες και το κλίμα της είναι σχετικά ομοιόμορφο, τα χαρακτηριστικά μιας βροχής μπορεί να μεταφερθούν σε άλλη θέση μέσα στη γενική περιοχή. Μετάθεση πρέπει κατά κανόνα να αποφεύγεται σε ορεινές περιοχές όπου η επίδραση του ανάγλυφου του εδάφους είναι πολύ δύσκολο να εκτιμηθεί. Σε γενικές γραμμές τα χαρακτηριστικά των βροχών που εμφανίζονται σε συγκεκριμένες θέσεις, τα χαρακτηριστικά των ανέμων που επικρατούν και οι ακραίες θερμοκρασίες που αντιστοιχούν στο σημείο δρόσου στην επιφάνεια του εδάφους, είναι χρήσιμα στοιχεία για τον καθορισμό των ορίων μέσα στα οποία επιτρέπεται να γίνει η μετάθεση.

Κατά τη σχεδίαση μεγάλων υδραυλικών έργων, για λόγους ασφαλείας, πολλές φορές πρέπει να χρησιμοποιούνται ακραίες τιμές βροχοπτώσεων που έχουν περίοδο επανάληψης μερικές εκατοντάδες χρόνια. Στις περιπτώσεις αυτές είναι από τα πράγματα αδύνατο να υπάρχουν παρατηρήσεις για τόσο μεγάλα χρονικά διαστήματα και πρέπει να βρεθεί κάποιος τρόπος για τον προσδιορισμό του πιθανού ακραίου ύψους βροχής με βάση διαθέσιμα

στοιχεία. Η διαδικασία αυτή λέγεται **μεγιστοποίηση**. Μία διαδικασία μεγιστοποίησης είναι η εκτίμηση της πιθανής μέγιστης βροχόπτωσης P.M.P. (Probable maximum precipitation) (Hershfield, 1961 : Linsley et al., 1988 : Wilson, 1990) που χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις σχεδιασμού υδραυλικών έργων αντιπλημμυρικής προστασίας για την εξασφάλιση της μέγιστης δυνατής ασφάλειας.

Η εκτίμηση της πιθανής μέγιστης βροχόπτωσης μπορεί να γίνει με την προσαρμογή μιας κατανομής ακραίων τιμών στις ετήσιες μέγιστες τιμές βροχόπτωσης δεδομένης διάρκειας και εφαρμογή της σχέσης:

$$H_T = \bar{H} + sK_T \quad (2.14)$$

όπου:  $H_T$  η βροχόπτωση περιόδου επαναφοράς  $T$ ,  $\bar{H}$  η μέση βροχόπτωση των ετήσιων μέγιστων τιμών της,  $S$  η τυπική τους απόκλιση και  $K_T$  παράγοντας συχνότητας που εξαρτάται από την περίοδο επαναφοράς  $T$ . Ο παράγοντας  $K_T$  αυξάνει με την αύξηση του  $T$  και τελικά παίρνει μια μέγιστη τιμή την  $K_m$  οπότε η σχέση (2.14) παίρνει τη μορφή:

$$H_{PMP} = \bar{H} + sK_m \quad (2.15)$$

όπου:  $H_{PMP}$  το ύψος βροχής της μέγιστης πιθανής βροχόπτωσης και  $K_m$  παίρνεται ίσο με 15 (Hershfield, 1961) για μέγιστες 24-ώρες διάρκειες.

Η μετάθεση και η μεγιστοποίηση των βροχοπτώσεων χρειάζεται την κατανόηση των διαδικασιών που επιδρούν πάνω στα κατακρημνίσματα. Όπως αναλυτικά αναφέρθηκε στα προηγούμενα, τα κατακρημνίσματα δημιουργούνται σαν αποτέλεσμα ανύψωσης του υγρού αέρα. Η ποσότητα και ο ρυθμός πτώσης τους εξαρτάται από την ποσότητα της υγρασίας που περιέχεται στον αέρα και την ταχύτητα ανύψωσης του. Η ατμοσφαιρική υγρασία μπορεί να μετρηθεί και ανάλογα με το μέγεθος της να συνδεθεί με μια

περίοδο επανάληψης.

Η υγρασία που περιέχει μια κατακόρυφη ατμοσφαιρική στήλη μπορεί να εκτιμηθεί με την εξίσωση:

$$W_p = \int_0^p \frac{q}{\rho g} dp \quad (2.16)$$

όπου:  $q$  η είναι η ειδική υγρασία του αέρα,  $\rho$  είναι η πυκνότητα του νερού,  $g$  είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας και  $p$  είναι η πίεση στο κάτω άκρο της στήλης. Η ποσότητα αυτή της υγρασίας αναφέρεται σαν αποτελεσματικό βροχοποιήσιμο νερό, αν και αναγνωρίζεται ότι δεν υπάρχει καμία φυσική διαδικασία που μπορεί να απομακρύνει όλη την υγρασία από τον αέρα, Έχει υπολογισθεί ότι μια στήλη που εκτείνεται από την επιφάνεια της θάλασσας προς τα πάνω και είναι κορεσμένη με υγρασία περιέχει το ισοδύναμο 50 mm, νερού, όταν η θερμοκρασία στην επιφάνεια της θάλασσας είναι 19,5°C. Ορισμένες βροχές που ξεπερνούν το ύψος αυτό δείχνουν ότι η στήλη εφοδιάζεται συνέχεια κατά τη διάρκεια της βροχής με καινούργια υγρασία σαν συνέπεια της πνοής του αέρα. Η ποσότητα της υγρασίας αυτής κυμαίνεται ανάλογα με τη γεωγραφική θέση, την εποχή και το υψόμετρο και οι διακυμάνσεις αυτές πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όταν επιχειρείται μετάθεση και μεγιστοποίηση.

Από νωρίς παρατηρήθηκε ότι υπάρχει ισχυρή συσχέτιση ανάμεσα στο σημείο δρόσου και την περιεχόμενη στην ατμόσφαιρα υγρασία πάνω από τη θέση μέτρησης. Έτσι το σημείο δρόσου χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της υγρασίας της ατμόσφαιρας και ειδικότερα η μέγιστη τιμή του που επικρατεί για ένα 24ωρο διάστημα αναγόμενο σε σταθερή πίεση 1000 mbar. Η επιλογή αυτή έγινε γιατί παρατηρήθηκε ότι το μεγαλύτερο μέρος μιας βροχής έχει την

τάση να πέφτει μέσα στο διάστημα αυτό. Στους υπολογισμούς χρησιμοποιούνται και τα σημεία δρόσου του αέρα που εφοδιάζει το σύστημα με υγρασία. Η πιθανή μέγιστη βροχόπτωση μιας περιοχής μπορεί να υπολογιστεί με βάση το ύψος του νερού που έπεσε σε μια βροχή πολλαπλασιασμένο με το λόγο του αποτελεσματικού βροχοποιήσιμου νερού προς αυτό που παρατηρήθηκε κατά τη βροχή (και υπολογίστηκε με βάση το σημείο δρόσου). Τροποποιήσεις της μέγιστης βροχόπτωσης που υπολογίστηκε με τον τρόπο αυτό πρέπει να γίνονται παίρνοντας υπόψη τη γεωγραφική θέση (π.χ. απόσταση από την πηγή που εφοδιάζει τον αέρα με υγρασία) και το υψόμετρο.

Το μέγιστο ύψος βροχής επηρεάζεται ακόμη και από τα χαρακτηριστικά του μηχανισμού ανύψωσης της αέριας μάζας. Σε αντίθεση με την ατμοσφαιρική υγρασία, η επίδραση του μηχανισμού αυτού στη διαμόρφωση των χαρακτηριστικών της βροχής είναι πάρα πολύ δύσκολο να εκτιμηθεί. Εκτίμηση της αποτελεσματικότητας του μηχανισμού ανύψωσης και κατά συνέπεια ανάλογη προσαρμογή του ύψους βροχής, μπορεί να γίνει μόνο όταν η ανύψωση είναι καθαρά ορογραφική ή καθαρά ανοδική.

#### **2.6.4. Ακραία γεγονότα βροχής**

Πέρα από τη μεγιστοποίηση των βροχών και την εκτίμηση της μέγιστης πιθανής βροχόπτωσης ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα ιστορικά ακραία γεγονότα βροχής, που συνοδεύονται και από μεγάλες καταστροφές.

Ο Paulhus (1965) χρησιμοποιώντας μέγιστα τροπικών καταιγίδων διάφορων διαρκειών από όλο τον κόσμο βρήκε ότι αν η μεταβολή του ύψους βροχής σε σχέση με τη διάρκεια της, σχεδιασθεί σε διαγράμματα όπου οι κλίμακες είναι λογαριθμικές, τότε στα παγκόσμια μέγιστα βροχομετρικά ύψη

προσαρμόζεται μια ευθεία γραμμή της μορφής:

$$h = 425t^{0.47} \quad (2.17)$$

όπου: h είναι το ύψος βροχής σε mm και t είναι η διάρκεια της βροχής σε ώρες.

Παρόμοια ανάλυση έγινε από το Ινστιτούτο Υδρολογίας της Αγγλίας [Institute of Hydrology (1968)] χρησιμοποιώντας μέγιστα ύψη βροχής από την Αγγλία και βρήκε ότι στα μέγιστα βροχομετρικά ύψη της Αγγλίας προσαρμόζεται σε λογαριθμική κλίμακα μια ευθεία γραμμή της μορφής:

$$h = 96t^{0.43} \quad (2.18)$$

όπου: h είναι το ύψος βροχής σε mm και t είναι η διάρκεια της βροχής σε ώρες.

Στον Πίνακα 2.1 δίνονται μερικά από τα ιστορικά ακραία γεγονότα βροχής που παρατηρήθηκαν στην Ελλάδα και συνοδεύονταν από καταστροφές [Τσακίρης (1995), Οικονόμου κ. άλ. (1995), Πιστρίκας και Γαλερίδης (1995), Καραμούζης κ. άλ.(2000)].



Πίνακας 2.1. Ιστορικά ακραία γεγονότα βροχής στην Ελλάδα

Περιοχή	Χρονολογία	Ύψος	Παρατηρήσεις
1. Βιάννος Ηρακλείου	Δεκ. 1958	100mm/2ώρες	Καταστροφές & πνιγμοί στην Βιάννο
2. Αθήνα	Νοεμ. 1961	114mm/8ώρες	30 πνιγμοί στην Αθήνα
3. Πήλιο	Νοεμ. 1987	800 mm/24 ώρες	Καταστροφές στο Αν. Πήλιο
4. Κυκλάδες	Δεκ. 1989	111 mm/12 ώρες	Πλημμύρες στις Κυκλάδες
5. Λεωνίδιο	Νοεμ. 1990	220 mm/24 ώρες	Πλημμύρες στο Λεωνίδιο
6. Αθήνα	21-22 Οκτ.1994	140 mm/12 ώρες	Πλημμύρες στην Αθήνα
7. Κάσος	22-23 Οκτ.1994	250 mm/12 ώρες	Καταστροφές στην Κάσο
8. Καρδίτσα	22-23 Οκτ. 1994	230 mm/24 ώρες	Πλημμύρες στην Καρδίτσα
9. Καρδίτσα	22-23 Οκτ. 1994	287 mm/48 ώρες	Πλημμύρες στην Καρδίτσα
10. Μ.Παναγιά Χαλκιδικής	7-8 Οκτ. 2000	103,5 mm/3 ώρες	Καταστροφές στη Μ.Παναγιά Χαλκιδικής
11. Μ.Παναγιά Χαλκιδικής	7-8 Οκτ. 2000	162,9 mm/6 ώρες	Καταστροφές στη Μ.Παναγιά Χαλκιδικής
12. Μ.Παναγιά Χαλκιδικής	7-8 Οκτ. 2000	206,9 mm/12 ώρες	Καταστροφές στη Μ.Παναγιά Χαλκιδικής

<b>13.</b> Μ.Παναγιά Χαλκιδικής	7-8 Οκτ. 2000	239,6 mm/24 ώρες	Καταστροφές στη Μ.Παναγιά Χαλκιδικής
------------------------------------	------------------	---------------------	---

## 2.6.5 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

### 2.6.5.1 Κατανομές Πιθανοτήτων

Από την πληθώρα των θεωρητικών κατανομών το ενδιαφέρον στο Κεφάλαιο αυτό επικεντρώνεται σ' αυτές που έχουν άμεση σχέση με την υδρολογία. Η μελέτη και η κατανόηση μερικών από τις θεωρητικές κατανομές είναι απαραίτητη με σκοπό την προσαρμογή τους στις εμπειρικές κατανομές, που παίρνονται από τα ιστορικά δεδομένα. Η προϋπόθεση φυσικά είναι ότι τα μελλοντικά δεδομένα θα έχουν τις ίδιες ή παρόμοιες ιδιότητες με το δείγμα των ιστορικών δεδομένων. Πρέπει να τονισθεί ότι κάθε θεωρητική κατανομή δεν είναι ακριβής αναπαράσταση, αλλά μόνο μια περιγραφή των φυσικών διαδικασιών, που προσεγγίζει τα φαινόμενα και έχει αποδειχθεί χρήσιμη στην περιγραφή των παρατηρούμενων ιστορικών δεδομένων.

Οι κατανομές οι οποίες εξετάζονται είναι η κανονική κατανομή και η λογαριθμοκανονική κατανομή. Μια σύντομη περιγραφή των κατανομών αυτών δίνεται παρακάτω.

### 2.6.5.2 Κανονική κατανομή

Η κανονική κατανομή, που είναι γνωστή και σαν κατανομή Gauss, είναι μια συμμετρική κωδωνοειδής καμπύλη της οποίας τα όρια εκτείνονται από  $x = -\infty$  μέχρι  $x = +\infty$

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας μιας τυχαίας συνεχούς μεταβλητής, που ακολουθεί κανονική κατανομή δίνεται από τη σχέση:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.19)$$

Οι παράμετροι της κατανομής, που είναι ο μέσος όρος ( $\mu$ ) και η τυπική απόκλιση ( $\sigma$ ) αντικαθίστανται από τις αντίστοιχες παραμέτρους που υπολογίζονται από το δείγμα των δεδομένων.

Η πιθανότητα ότι η τιμή του  $x$  θα είναι μικρότερη ή ίση από μια δοσμένη τιμή  $x_1$ , δίνεται από τη σχέση:

$$P(x \leq x_1) = \int_{-\infty}^{x_1} f(x) d(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x_1} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (2.20)$$

Με ένα απλό μετασχηματισμό η κανονική κατανομή μπορεί να γραφεί σαν μια παραμετρική συνάρτηση. Έτσι, αν  $z=(x-\mu)/\sigma$ ,  $dx=\sigma dz$  και η σχέση (2.20) γίνεται:

$$P\left[\frac{(x-\mu)}{\sigma} \leq z_1\right] = f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{z_1} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad (2.21)$$

Η μεταβλητή  $z$  ονομάζεται τυπική μεταβλητή, είναι κανονικά κατανομημένη με μέσο όρο μηδέν και τυπική απόκλιση μονάδα. Με τον παραπάνω μετασχηματισμό, η κανονική κατανομή μετατρέπεται στην τυπική κανονική κατανομή, όπου οι τιμές της παίρνονται από Πίνακες που υπάρχουν σε όλα τα βιβλία Στατιστικής.

### 3.1.2. Λογαριθμοκανονική κατανομή

Πολλές υδρολογικές μεταβλητές δείχνουν μια δεξιά ασυμμετρία, η οποία σε ορισμένες περιπτώσεις οφείλεται στο γεγονός ότι έχουν τιμές μεγαλύτερες από το μηδέν ή σε άλλες περιπτώσεις στο ότι έχουν τιμές με ένα κατώτερο όριο, ενώ το ανώτερο όριο των τιμών τους είναι απεριόριστο. Στις περιπτώσεις αυτές οι μεταβλητές δεν ακολουθούν την κανονική κατανομή αλλά είναι δυνατόν οι λογάριθμοί τους να την ακολουθούν. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας στην περίπτωση της λογαριθμοκανονικής κατανομής είναι:

$$f(y) = \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(y-\mu_y)^2}{2\sigma_y^2}} \quad (2.22)$$

όπου:  $y=\ln x$  ή  $y=\log x$ . Ο μέσος όρος ( $\mu_y$ ) και η τυπική απόκλιση ( $\sigma_y$ ) υπολογίζονται από το δείγμα.

### 3.1.3. Εκτίμηση των παραμέτρων των κατανομών

Οι παράμετροι των συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας υπολογίζονται από το δείγμα των δεδομένων συνήθως με τη μέθοδο της μέγιστης πιθανότητας (maximum likelihood method) και τη μέθοδο των ροπών (method of moments). Λεπτομέρειες για τις μεθόδους αυτές μπορούν να αναζητηθούν στα βιβλία των Kite (1988), Bobee and Ashkar (1991) και αλλού. Στη συνέχεια γίνεται μια αποστασιακή περιγραφή της μεθόδου μέγιστης πιθανότητας.

Η συνάρτηση  $L$  (Likelihood) χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των παραμέτρων και ο κανόνας για την απόκτηση της είναι:

Ο εκτιμητής μέγιστης πιθανότητας του  $\theta$  είναι η τιμή  $\hat{\theta}$  που θα κάνει την συνάρτηση πιθανότητας  $L$  μέγιστη, Η συνάρτηση  $L$  εξαρτάται από την παράμετρο  $\theta$  και την μεταβλητή  $x_i$ :

$$L = f(x_i, \theta) \quad (2.23)$$

Για τη συνθήκη μεγιστοποίησης τίθεται η πρώτη παράγωγος της  $L$ , ως προς  $\theta$  ίση με μηδέν και η εξίσωση που προκύπτει λύνεται ως προς  $\theta$ :

$$\frac{\partial(\ln L)}{\partial \theta} = \frac{\partial \left[ \sum_{i=1}^n \ln f(x_i, \theta) \right]}{\partial \theta} = 0 \quad (2.24)$$

Από την εξίσωση (2.24) για  $m$  παραμέτρους  $\theta$  προκύπτουν  $m$  εξισώσεις που λύνονται για να δώσουν  $m$  εκτιμητές παραμέτρων  $\hat{\theta}$ . Οι ιδιότητες του εκτιμητή

$\hat{\theta}$  έχουν μελετηθεί πολύ (Kite, 1988 : Bobee and Ashkar, 1991) και έχει βρεθεί ότι οι τιμές του ακολουθούν κανονική κατανομή (για μεγάλα δείγματα) και οι μέσοι όροι τους είναι ασυμπτωτικά ίσοι με τις τιμές της αληθινής παραμέτρου  $\theta$ , δηλαδή δεν υπάρχει απόκλιση (bias), γεγονός που συνηγορεί στην ευρεία αποδοχή της μεθόδου της μέγιστης πιθανότητας.

### 3.1.4. Έλεγχος καταλληλότητας των κατανομών

Όλες οι στατιστικές αναλύσεις των υδρολογικών δεδομένων εξαρτώνται από την επιτυχία της προσαρμογής της συνάρτησης πιθανότητας στην εμπειρική κατανομή του παρατηρούμενου δείγματος. Το πρόβλημα είναι πόσο καλά προσαρμόζεται η θεωρητική συνάρτηση πιθανότητας στην εμπειρική κατανομή. Με άλλα λόγια, πρέπει να εκλέγεται η προσαρμογή της θεωρητικής κατανομής στην εμπειρική κατανομή με διάφορους στατιστικούς ελέγχους μεταξύ των οποίων ο κύρια χρησιμοποιούμενος είναι ο έλεγχος  $\chi^2$  (Haan, 1977 : Bobee and Ashkar, 1991 : Μήτσιου κ. άλ., 1999). Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι υπάρχουν και άλλοι έλεγχοι καταλληλότητας των θεωρητικών κατανομών μεταξύ των οποίων είναι και αυτός των Kolmogorov - Smirnov (K – S test) που μπορούν να αναζητηθούν σε όλα τα βιβλία της Στατιστικής.

#### Έλεγχος $\chi^2$

Απαραίτητες προϋποθέσεις για την εφαρμογή του ελέγχου  $\chi$  είναι:

- α) Όλοι οι όροι ενός δείγματος πρέπει να είναι ανεξάρτητοι και
- β) Οι διαφορές ανάμεσα στις μικρές παρατηρούμενες και αναμενόμενες συχνότητες, στο τέλος της κατανομής, έχουν μεγάλη επίδραση στην τιμή του  $\chi$  και για το λόγο αυτό είναι απαραίτητο να μελετώνται μαζί δύο ή περισσότερες κλάσεις, σε κάθε άκρο της κατανομής. Συνήθως μία κλάση δεν πρέπει να έχει λιγότερες από 5 αναμενόμενες συχνότητες.

Αν υποτεθεί ότι υπάρχει ένα συγκεκριμένο δείγμα μιας ομάδας πιθανών συμβάντων  $E_1, E_2, \dots, E_k$ , που πραγματοποιούνται με συχνότητες  $e_1, e_2, \dots, e_k$  τότε οι συχνότητες  $O_1, O_2, \dots, O_k$  ονομάζονται παρατηρούμενες συχνότητες, ενώ οι συχνότητες  $e_1, e_2, \dots, e_k$  ονομάζονται θεωρητικές ή προσδοκώμενες ή αναμενόμενες συχνότητες. Στην πράξη, ενδιαφέρει αν οι παρατηρούμενες συχνότητες διαφέρουν σημαντικά από τις αναμενόμενες συχνότητες. Ένα μέτρο της διαφοράς αυτής δίνεται από το στατιστικό κριτήριο  $\chi^2$  που εκφράζεται από τη σχέση:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \left[ \frac{(O_i - e_i)^2}{e_i} \right] \quad (2.25)$$

Όπου

$$\sum_{i=1}^k O_i = \sum_{i=1}^k e_i = n \quad (2.26)$$

Αν  $\chi^2 = 0$ , τότε οι παρατηρούμενες και οι αναμενόμενες συχνότητες ταυτίζονται, ενώ αν  $\chi^2 > 0$ , διαφέρουν.

Η κατανομή δειγματοληψίας του  $\chi^2$  προσεγγίζεται πολύ καλά από την  $\chi^2$  κατανομή με  $(k-1)$  βαθμούς ελευθερίας, υπό τον όρο ότι οι αναμενόμενες συχνότητες μπορούν να υπολογισθούν χωρίς να είναι αναγκαία η εκτίμηση παραμέτρων του πληθυσμού από το δείγμα. Όταν ο όρος αυτός δεν ικανοποιείται οι βαθμοί ελευθερίας είναι  $(k-h-1)$  όπου το  $h$  είναι ο αριθμός των παραμέτρων του πληθυσμού που εκτιμώνται από το δείγμα και είναι απαραίτητες για τον υπολογισμό των αναμενόμενων συχνοτήτων. Πρακτικά οι αναμενόμενες συχνότητες υπολογίζονται με βάση την μηδενική υπόθεση  $H_0$ : η θεωρητική συνάρτηση της κατανομής που επιλέγεται προσαρμόζεται στην εμπειρική κατανομή. Αν η υπολογισμένη με τη σχέση

(2.25) τιμή του  $\chi^2$  είναι μεγαλύτερη από μια προεπιλεγμένη κρίσιμη τιμή, για επίπεδο σημαντικότητας ( $\alpha=0,05$ ) αποφασίζεται ότι οι παρατηρούμενες συχνότητες διαφέρουν σημαντικά από τις αναμενόμενες συχνότητες και απορρίπτεται η υπόθεση  $H_0$ , ενώ σε αντίθετη περίπτωση γίνεται αποδεκτή ή τουλάχιστον δεν απορρίπτεται.



## **2.7 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ & ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΝΕΣΤΟΡΙΟΥ**

### **2.7.1 Γεωγραφική και υδρολογική χωροθέτηση**

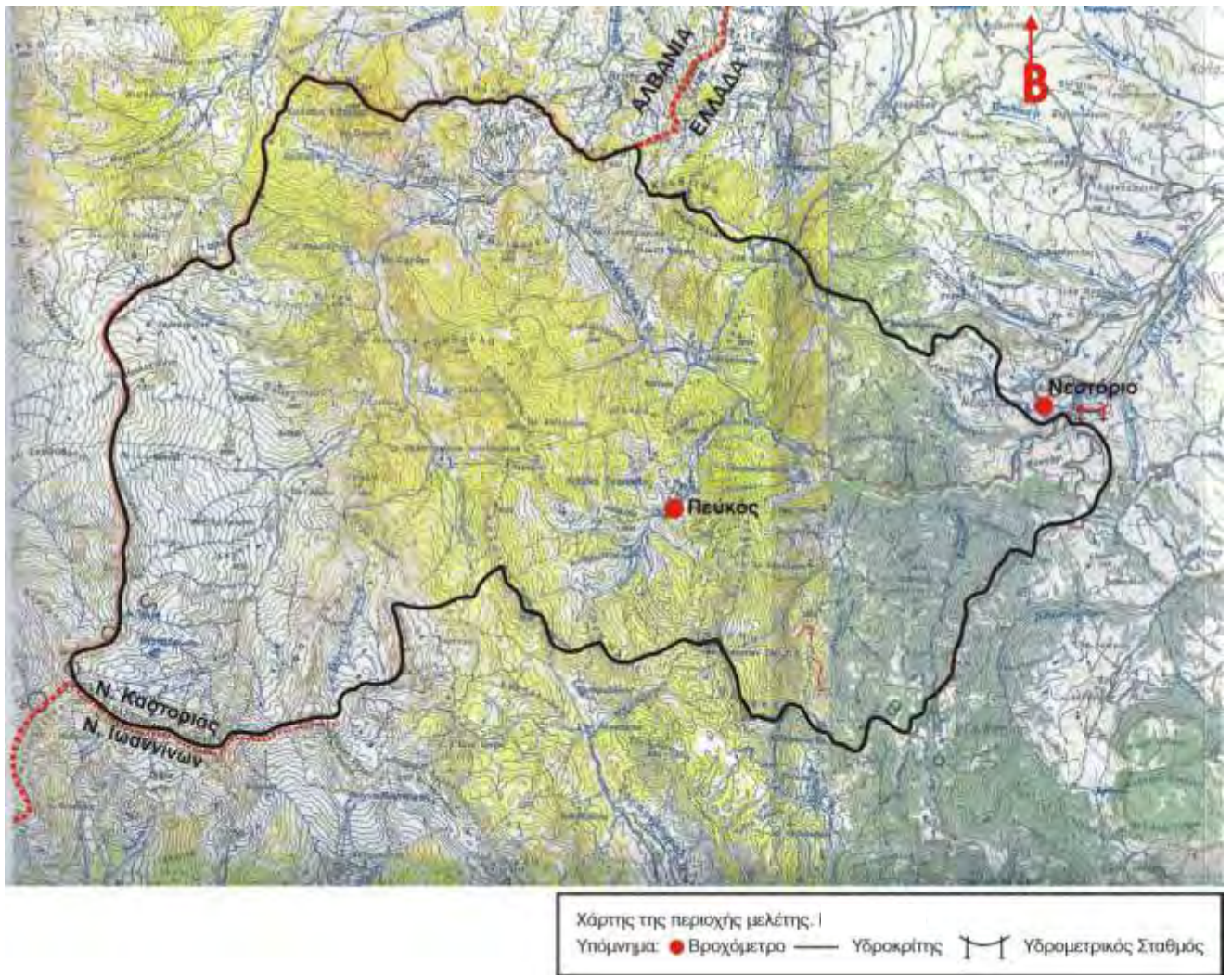
Η λεκάνη απορροής του ποταμού Αλιάκμονα στην θέση Νεστόριο του Νομού Καστοριάς, είναι υπολεκάνη του Δυτικού κλάδου του ποταμού και βρίσκεται στο δυτικότερο άκρο της Μακεδονίας, στην ανατολική ομβροπλευρά του όρους Γράμμου και σε γεωγραφική θέση του κέντρου βάρους της 20΄ 53΄Α.Μ & 40΄25΄Β.Π. περίπου. Έχει σχήμα τραπεζοειδές, με την μεγάλη βάση στο δυτικό άκρο της, κατά μήκος των Ελληνοαλβανικών συνόρων, την μικρή δε βάση στο ανατολικό άκρο της, νοτίως του Νεστορίου όπου και το στόμιο της λεκάνης. Η κύρια μισγάγγεια διατρέχει την λεκάνη απορροής με δύο κύριες κατευθύνσεις. Αρχικά ΒΒΑ, παράλληλα σχεδόν προς τον δυτικό υδροκρίτη και σε μία απόσταση ολίγων χιλιομέτρων από αυτόν. Πλησιάζοντας στο βόρειο όριο της λεκάνης, στρέφεται απότομα σε ΝΑ, παράλληλα προς τον βόρειο υδροκρίτη και σε απόσταση πάλι ολίγων χιλιομέτρων από αυτόν.

### **2.7.2. Στοιχεία υδρολογικής λεκάνης απορροής**

Το στόμιο της λεκάνης είναι σε υψόμετρο περίπου 780 m. Στη θέση αυτή υπάρχει υδρομετρικός σταθμός της ΔΕΗ, εξοπλισμένος με σταθμήμετρα, σταθμηγράφο και μόνιμη εγκατάσταση για την μέτρηση της παροχής. Από το σημείο αυτό ξεκινά ο υδροκρίτης ο οποίος διανύμενος με φορά δεξιόστροφη, ανεβαίνει προς Νότο, το Βόιον όρος μέχρι το υψόμετρο (+1500) περίπου παρά την Νέα Κοτύλη, ακολουθώντας περίπου το ίχνος της οδού που την συνδέει με το Νεστόριο. Από εκεί στρέφεται προς Δυσμάς και περνά από τα υψώματα Πύργος (+1758), Τούμπα (+1644) και Κορυφή Μπαρίκου (+1632). Από το σημείο αυτό, συνεχίζοντας την προς Δυσμάς πορεία του, ο υδροκρίτης

ανεβαίνει σε ακόμα μεγαλύτερα υψόμετρα (Σουφλίκας +2146, Περήφανο +2442), μέχρι να συναντήσει την κορυφογραμμή του Γράμμου στο +2520 που είναι και το μεγαλύτερο υψόμετρο της λεκάνης. Συνεχίζοντας με προσανατολισμό Βόρειο, ο υδροκρίτης ακολουθεί τα σύνορα σε υψόμετρα πάνω από +2100, μέχρι την Κορυφή Μπουλογιάννη (+2251). Από εκεί αλλάζει διεύθυνση σε ΒΑ μέχρι τα Καλύβια Κατσάρα (+1495) όπου στρέφεται προς τα ανατολικά, συνέχεια πάνω στη συνοριακή γραμμή. Στο ύψωμα Χελώνα (+1423) ο υδροκρίτης στρεφόμενος προς τα ΝΑ εγκαταλείπει τη συνοριακή γραμμή και περνώντας από τα υψώματα Αλεβίτσα (+1585), Αμμούδα (+1546), Καλλιθέα (+1200) και Δίδυμο (+1120), κατηφορίζει προς το στόμιο της λεκάνης.

Η συνολική λεκάνη που φαίνεται στο χάρτη (Εικόνα 2.11) έχει έκταση 255,3 km<sup>2</sup> και μέσο υψόμετρο 1398 m. Το υδρογραφικό δίκτυο είναι πολύ αναπτυγμένο, 6<sup>ης</sup> τάξεως και πυκνό σε όλη την λεκάνη. Το μήκος του κύριου κλάδου είναι περίπου 41,9 km από το στόμιο της λεκάνης μέχρι το απώτατο σημείο του υδροκρίτη. Η μέση κλίση του κυρίως ρεύματος (μετρημένη ανάμεσα στο 10% και στο 85% του μήκους του) είναι σχετικά ήπια, ίση προς 22,3 m/km.



**Εικόνα 2.11** Χάρτης απεικόνισης της συνολικής λεκάνης απορροής

Όπως προκύπτει από τον εδαφολογικό χάρτη της περιοχής κλίμακας 1:50000 που έχει εκδωθεί από την Δασική Υπηρεσία του υπουργείου Γεωργίας (Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων ), το μεγαλύτερο μέρος της λεκάνης (72,2%) καλύπτεται από προϊόντα αποσάθρωσης τριτογενών αποθέσεων, με υφή πηλώδη έως αργιλοπηλώδη (ΓΓΔΦΠ & ΕΘΙΑΓΕ, 1995). Τα εδάφη αυτά είναι ως επί το πλείστον βαθιά, εξαπλώνονται δε στο σύνολο της λεκάνης, με εξαίρεση το νότιο τμήμα του δυτικότερου άκρου της. Εκεί, επικρατέστερη είναι η παρουσία εδαφών από αποσάθρωση μικτού φλύσχη (22,3%) με υφή πηλώδη έως αργιλώδη (ΓΓΔΦΠ & ΕΘΙΑΓΕ, 1995). Τα εδάφη αυτά είναι στην πλειοψηφία τους βαθιά. Με μικρότερο ποσοστό συνολικής κάλυψης (3,5%),

στην ίδια νοτιοδυτική άκρη της λεκάνης, βρίσκονται εδάφη από αποσάθρωση σκληρών ασβεστόλιθων, κατά το μεγαλύτερο μέρος του αβαθή έως γυμνός βράχος. Η υφή των εδαφών αυτών είναι αργιλοπηλώδης έως αργιλώδης. Επίσης, εδάφη από αποσάθρωση περιδοτίτων με υφή πηλώδη καλύπτουν ένα μικρό τμήμα (1,7%) στο νοτιότερο άκρο της δυτικής λεκάνης, στην κοιλάδα του ρεύματος Στάνης Λάμπρου.

Η λεκάνη παρουσιάζει πλούσια δασική βλάστηση με εξαίρεση κυρίως τον ορεινό όγκο του Γράμμου στα δυτικά, όπου η βλάστηση είναι πολύ αραιή. Βασικά, διακρίνονται τρεις οικολογικές περιοχές σύμφωνα με την αναγνώριση της Δασικής Υπηρεσίας. Στο ανατολικότερο άκρο της λεκάνης, εκατέρωθεν της κύριας κοίτης, αναπτύσσεται η ζώνη της φυλλοβόλου δρυός καλύπτοντας το 15,3% της λεκάνης. Από αυτό το ποσοστό μόνο στο 5,1% η ανθρωπογενής επίδραση χαρακτηρίζεται ασθενής. Το 1,8% καλλιεργείται, το δε υπόλοιπο –και μεγαλύτερο μέρος- της ζώνης αυτής (8,4%) χαρακτηρίζεται από έντονη ανθρωπογενή επίδραση. Η δεύτερη οικολογική περιοχή είναι η ζώνη της ελάτης και καταλαμβάνει το μεγαλύτερο και κεντρικότερο τμήμα της λεκάνης (76,8%). Σ' αυτήν διακρίνονται διαπλάσεις Ελάτης (19,3%), Οξιάς (34,4%) και Μαύρης Πεύκης (23,1%). Στην περιοχή αυτή το μεγαλύτερο (35,8% του συνόλου) έχει απλώς ασθενή ανθρωπογενή επίδραση. Έντονη ανθρωπογενής επίδραση χαρακτηρίζει το 21,6% τα δε 19,3% του συνόλου είναι χορτολίβαδα. Τέλος, η Τρίτη και μικρότερη (7,9%) οικολογική περιοχή είναι η ψευδαλπική ζώνη, αποτελούμενη από λιβάδια. Η ζώνη αυτή είναι περιορισμένη κατά μήκος του υδροκρίτη στο νοτιοδυτικότερο άκρο της λεκάνης, που είναι και η ζώνη των μεγαλύτερων υψομέτρων. Στο σύνολο της ζώνης αυτής, η ανθρωπογενής επίδραση είναι ασθενής.

### 2.7.3. Βροχοπτώσεις

#### 2.7.3.1. Βροχομετρικό δίκτυο

Στην ευρύτερη περιοχή μελέτης το βροχομετρικό δίκτυο είναι επαρκές, γεγονός που επέτρεψε τόσο το υπολογισμό των όμβριων καμπυλών της λεκάνης και των πιθανών μεγίστων βροχοπτώσεων (Probable Maximum Precipitation, PMP), όσο και τον υπολογισμό μηνιαίας χρονοσειράς της επιφανειακής βροχόπτωσης που δέχεται η λεκάνη. Πληροφορίες περί των σταθμών που συγκροτούν το βροχομετρικό δίκτυο, αναφορικά με την περίοδο λειτουργίας τους, το είδος των οργάνων, το υψόμετρο τοποθέτησής τους και τέλος, τον Φορέα κτήσης δίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.

**Πίνακας 2.2** Χαρακτηριστικά των βροχομετρικών σταθμών

Όνομα/θέση σταθμού	Είδος οργάνου	Περίοδος λειτουργίας	Υψόμετρο (m)	Φορέας
Πεύκος	Βγ	1965 – 1978	980	ΔΕΗ
	ΟΒΧμ	1978 – σήμερα		
Νεστόριο	Βγ	1951 – 1996	850	ΙΔΕ
Νεστόριο	Βγ	1995 – σήμερα	792	ΔΕΗ
Δαμασκηιά	Βγ	1962 – σήμερα	990	ΔΕΗ
Μεσοποταμία	Βγ	1962 – σήμερα	695	ΔΕΗ
Άργος Ορεστικό	Βγ	1962 – 1994	650	ΔΕΗ
Πληκάτι	Βγ	1971 – σήμερα	1250	ΔΕΗ
	Βμ	1995 – σήμερα		
Δροσοπηγή	Βγ	1980 - σήμερα	1055	ΔΕΗ

Όπου:

Βγ→ βροχογράφος

ΟΒΧμ→ ομβροχιονόμετρο

Βμ→βροχόμετρο

Από τους παραπάνω σταθμούς άλλοι χρησιμοποιήθηκαν κατ'εξοχήν στην παρούσα εργασία και άλλοι απλώς βοηθητικά. Οι παράγοντες που καθόρισαν σε ποια έκταση χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία των σταθμών θα αναλυθούν παρακάτω για κάθε έναν από αυτούς.

Ο **σταθμός του Πεύκου** για όσο διάστημα λειτούργησε το καταγραφικό όργανο υπήρξε βασικός διότι ευρίσκεται στο κέντρο της λεκάνης, σε θέση απολύτως αντιπροσωπευτική. Από την μετατροπή του σε ολοκληρωτικό το 1978 και μετά, χρησίμευσε μόνο για την εκτίμηση μηνιαίων μεγεθών κατακρήμνισης. Από το 1997/98 και εντεύθεν, ο σταθμός εμφανίζει προβληματική λειτουργία και τα στοιχεία του δεν κρίνονται κατάλληλα να χρησιμοποιηθούν.

Ο **σταθμός του Νεστορίου** (ΙΔΕ) ήταν τοποθετημένος ακριβώς στην έξοδο της λεκάνης, σε θέση πολύ αντιπροσωπευτική. Το πρόβλημα με τον σταθμό αυτόν είναι ότι σήμερα δεν ανευρίσκονται οι ταινίες με τις καταγραφές καταιγίδων εκτός από λίγες εξαιρέσεις. Υπάρχουν όμως για σειρά ετών καταχωρημένα τα αποτελέσματα της ανάγνωσης αυτών των ταινιών, είτε υπό μορφή ημερήσιου ύψους βροχής, είτε υπό τη μορφή τρισημερήσεων αναγνώσεων (08:00 – 14:00 – 20:00). Αν και η έναρξη του σταθμού τοποθετείται το 1951, τα βροχομετρικά δεδομένα του μέχρι το 1969 υπάρχουν σήμερα μόνο σε μηνιαία μορφή που δεν επιτρέπει την ανάλυση καταιγίδων. Λίγο πριν τη παύση διαθεσιμότητας των στοιχείων του Νεστορίου του ΙΔΕ, αρχίζει η λειτουργία του βροχογράφου του Νεστορίου της ΔΕΗ, η οποία συνεχίζεται μέχρι και σήμερα. Και αυτός ο σταθμός, όπως και ο ομώνυμός του, του ΙΔΕ (Ίδρυμα Δασικών Ερευνών), υπήρξε βασικός για τους υπολογισμούς. Οι δύο σταθμοί, σε συνδυασμό με τον Πεύκο στην αρχή (μέχρι το 1978) και το

Πληκάτι στη συνέχεια, έδωσαν τη δυνατότητα υπολογισμού επιφανειακών βροχοπτώσεων.

Ο **σταθμός στο Πληκάτι** ευρίσκεται μεν στην γειτονική λεκάνη του Σαρανταπόρου, αλλά σε πολύ μικρή απόσταση (περίπου 5 km) από τον υδροκρίτη της υπό μελέτη λεκάνης του Αλιάκμονα, προς τα ΝΔ αυτής. Μάλιστα δε, η θέση του σταθμού είναι αντιπροσωπευτική της ανατολικής ομβροπλευράς του Γράμμου, η οποία δεσπόζει και στη λεκάνη του Νεστορίου. Λόγω της σχεδόν αντιδιαμετρικής θέσης που κατέχουν το Πληκάτι και το Νεστόριο, ως προς την υπό μελέτη λεκάνη απορροής, ο συνδυασμός τους είναι πολύ ικανοποιητικός για τον υπολογισμό των επιφανειακών βροχοπτώσεων της λεκάνης.

Ο **σταθμός στη Δαμασκηιά** τη ΔΕΗ ευρίσκεται εκτός λεκάνης Νεστορίου, περίπου 11 km στα ΝΑ. Αν και η απόσταση μειώνει την αντιπροσωπευτικότητα του σταθμού αυτού, η θέση του στην μείζονα λεκάνη του Αλιάκμονα και η διαπιστωμένη συγγένεια των καταγραφών του με αυτές του Νεστορίου, λόγω του ότι ευρίσκονται στη βροχομετρικά ίδια ευρύτερη περιοχή, τον καθιστούν ιδιαίτερος χρήσιμο. Ο σταθμός της Δαμασκηιάς χρησιμοποιήθηκε συμβουλευτικά στην ανάλυση των καταιγίδων, σε αρκετές δε περιπτώσεις έδωσε τη χρονική κατανομή όταν οι λοιποί βροχογράφοι λειτουργούσαν ως βροχόμετρα.

Οι **σταθμοί στη Μεσοποταμία και στο Άργος Ορεστικό** ευρίσκονται σε ακόμα μεγαλύτερη απόσταση, προς τα ΒΑ της λεκάνης Νεστορίου. Επειδή όμως ανήκουν στη μείζονα λεκάνη του Αλιάκμονα και οι βροχοπτώσεις που δέχονται συμφωνούν αρκετά καλά με το Νεστόριο και της Δαμασκηιάς, οι δύο αυτοί σταθμοί χρησιμοποιήθηκαν για τη χρονική κατανομή των καταιγίδων

όταν συνέβαινε οι βασικοί σταθμοί να διαθέτουν μόνο ημερήσιες πληροφορίες.

Τέλος, ο **σταθμός τη Δροσοπηγής** της λεκάνης Σαρανταπόρου, χρησιμοποιήθηκε βοηθητικά προς τον βασικό σταθμό του Πληκατίου με τον οποίο παρουσιάζει καλή συμφωνία.

### 2.7.3.2. Μηνιαία ύψη βροχής – Επεξεργασία

Ως μηνιαίο ύψος βροχής ορίζεται η άθροιση των ημερήσιων υψών βροχής. Συλλέχθηκαν, επεξεργάστηκαν και παρουσιάζονται στους πίνακες 2.4 έως 2.9 τα μέσα μηνιαία ύψη βροχής για τους υδρολογικούς σταθμούς:

<b>Αργος Ορεστικό</b>	(1969 έως 1988 – 19 έτη)
<b>Δαμασκηιά</b>	(1964 έως 1995 – 31 έτη)
<b>Νεστόριο</b>	(1963 έως 2003 – 40 έτη)
<b>Πεντάλοφος</b>	(1972 έως 1991 – 19 έτη)
<b>Πεύκο</b>	(1962 έως 1997 – 35 έτη)
<b>Πληκάτι</b>	(1971 έως 2003 – 32 έτη)

Στους πίνακες που παρατίθενται γίνεται η επεξεργασία των μηνιαίων βροχοπτώσεων. Σύμφωνα με αυτή στο τέλος κάθε πίνακα παρατίθενται τα στατιστικά μέτρα θέσεων και διασπορών των μηνιαίων στατιστικών δειγμάτων ενώ υπολογίζονται το ετήσιο ύψος βροχής και η μέση υπερετήσια βροχόπτωση του σταθμού.

Μαζί με τους πίνακες δίνονται και οι εικόνες 2.12 έως 2.23. Συγκεκριμένα κάθε πίνακας συνοδεύεται από δύο διαγράμματα τα οποία απεικονίζουν τα μέσα μηνιαία ύψη βροχοπτώσεων του σταθμού και την μεταβολή των ετήσιων τιμών τους.

Στα διαγράμματα 2.24 και 2.25 παρουσιάζονται οι μέσες ετήσιες μηνιαίες διακυμάνσεις του υετού για όλο τους υδρολογικούς σταθμούς.



Για την καλύτερη κατανόηση των πινάκων θα προηγηθούν κάποιοι στατιστικοί ορισμοί και μέτρα θέσης.

#### 2.7.4 Ορισμοί και στατιστικές παράμετροι

Οι ιστορικές πραγματοποιήσεις (μετρήσεις) μιας υδρολογικής μεταβλητής  $x$  αποτελούν το δείγμα της μεταβλητής, που είναι ένα μέρος του πληθυσμού της, δηλαδή του συνόλου των πιθανών τιμών της, στη συγκεκριμένη θέση. Η πιθανολογική θεώρηση του δείγματος απαιτεί την κατάταξη των τιμών της μεταβλητής κατά τάξη μεγέθους σε φθίνουσα σειρά (από την μεγαλύτερη τιμή στη μικρότερη) ή αντίστροφα, σε αύξουσα σειρά. Οι σειρές μπορεί να είναι διακεκριμένες (discrete) ή συνεχείς (continuous). Η διαφορά της μεγαλύτερης από τη μικρότερη τιμή δίνει μια ιδέα για τον αριθμό των κλάσεων, που πρέπει να χωριστεί το δείγμα. Συνήθως πρέπει να υπάρχουν τουλάχιστον 5 κλάσεις.

Αν  $n$  είναι ο συνολικός αριθμός των τιμών του δείγματος και  $m$  είναι ο αριθμός των πραγματοποιήσεων της μεταβλητής στην  $i$  κλάση ( $i=1,2,\dots,k$ ), όπου  $k$  είναι ο αριθμός των κλάσεων, τότε η σχετική συχνότητα ή πιθανότητα της μεταβλητής για την κλάση αυτή είναι:

$$p_i = \frac{m}{n} \quad (2.27)$$

Η σχεδίαση των πιθανοτήτων (κατακόρυφος άξονας) για όλες τις κλάσεις τιμών της μεταβλητής (οριζόντιος άξονας) δίνει το ιστόγραμμα της κατανομής πιθανοτήτων, του οποίου το εμβαδόν πρέπει να ισούται με τη μονάδα. Για να γίνει αυτό πρέπει να διορθωθούν όλες οι τιμές  $p_i$  διαιρώντας τις με το εύρος των κλάσεων. Το ιστόγραμμα είναι η εμπειρική καμπύλη κατανομής πιθανοτήτων και με τη βοήθεια του ιστογράμματος γίνεται η επιλογή της θεωρητικής κατανομής  $p(x)$ , ανάλογα με το ποια προσαρμόζεται

καλύτερα. Ο σχεδιασμός των αθροιστικών πιθανοτήτων:  $\sum_{i=1}^k p_i$ , για κάθε κλάση  $k$ , δίνει την εμπειρική αθροιστική καμπύλη πιθανοτήτων, στην οποία εφαρμόζεται η αντίστοιχη θεωρητική :  $F(x)=P(x \leq x')$ , όπου:  $x'$  είναι συγκεκριμένη τιμή της μεταβλητής  $x$ .

Ο υπολογισμός των παραμέτρων της κατανομής πιθανοτήτων γίνεται από τις στατιστικές παραμέτρους του ιστορικού δείγματος, που υπολογίζονται από τις στατιστικές ροπές, που για ένα δείγμα τιμών  $x_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ ) ορίζονται ως εξής:  $r$  - τάξης ροπή από την αρχή:

$$J_r = \sum_{i=1}^n p_i x_i^r \quad (2.28)$$

$r$  - τάξης κεντρική ροπή:

$$\mu_r = \sum_{i=1}^n p_i (x_i - \mu)^r \quad (2.29)$$

όπου:  $p_i$  είναι η πιθανότητα που αντιστοιχεί στο  $x_i$  από την κατανομή πιθανοτήτων και  $\mu$  είναι μια κεντρική τιμή του δείγματος.

Η στατιστική ανάλυση των υδρολογικών μεταβλητών αρχίζει με την εκτίμηση των αριθμητικών περιγραφικών μέτρων, που υπολογίζονται από το δείγμα και βοηθούν στη δημιουργία εικόνας για την κατανομή του πληθυσμού (Haan, 1977 : Helsel and Hirsch, 1992 : Παπαμιχαήλ, 1992).

Η εκτίμηση των μέτρων αυτών είναι το πρώτο βήμα μιας στατιστικής ανάλυσης και δίνει τις τιμές όλων των χρήσιμων μέτρων θέσης, διασποράς και μορφής του δείγματος κάθε μεταβλητής, τα οποία είναι οι εκτιμητές των αντίστοιχων τιμών του πληθυσμού της. Ο μέσος όρος, ο γεωμετρικός μέσος, ο διάμεσος και ο πιθανότερος μέσος είναι τα περισσότερα χρησιμοποιούμενα μέτρα θέσης. Τα κλασικά μέτρα διασποράς είναι η μεταβλητότητα, η τυπική

απόκλιση και ο συντελεστής μεταβλητότητας. Τέλος, σαν μέτρα μορφής χρησιμοποιούνται ο συντελεστής ασυμμετρίας και ο συντελεστής κύρτωσης. Στη συνέχεια περιγράφονται τα αριθμητικά μέτρα και το τυπικό σφάλμα.

### **Μέτρα Θέσης**

**Μέσος όρος (Average)** Ο αριθμητικός μέσος όρος (arithmetic mean) του πληθυσμού  $\mu$  υπολογίζεται από τη σχέση (2.28) με  $r = 1$  και με την υπόθεση ότι όλες οι τιμές του έχουν την πιθανότητα  $p_i = 1/n$ . Για την περίπτωση δείγματος, ο μέσος όρος ( $\bar{x}$ ) δίνεται από τη σχέση:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.30)$$

και ο γεωμετρικός μέσος όρος ( $x_g$ ) δίνεται από τη σχέση:

$$\bar{x}_g = (x_1 * x_2 * \dots * x_n)^{1/n} \quad (2.31)$$

**Διάμεσος (Median)**. Είναι η τιμή που αντιστοιχεί στο 50% της κατανομής πιθανοτήτων. Σε πολύ ασύμμετρες κατανομές, ο μέσος όρος είναι αποπροσανατολιστικός, ενώ ο διάμεσος αποτελεί καλύτερο μέτρο της κεντρικής τάσης επειδή δίνει την πληροφορία ότι οι τιμές οι μεγαλύτερες ή οι μικρότερες από τη διάμεσο έχουν την ίδια πιθανότητα ( $p=0,5$ ) να εμφανισθούν.

**Πιθανότερος μέσος ή επικρατούσα τιμή (Mode)**. Ο πιθανότερος μέσος ή επικρατούσα τιμή σε διακριτές μεταβλητές ορίζεται σαν η τιμή που εμφανίζεται πιο συχνά, ενώ σε συνεχείς μεταβλητές είναι η μέγιστη τιμή της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας. Ο πιθανότερος μέσος είναι σημαντικός σε περιπτώσεις κατανομών ακραίων γεγονότων όπως είναι οι πλημμύρες, οι ξηρασίες κ.λ.π..

**Μεταβλητότητα (Variance)**. Η μεταβλητότητα ή διασπορά ορίζεται σαν η δεύτερη κεντρική ροπή γύρω από το μέσο όρο και συμβολίζεται με  $\sigma^2$  όταν αναφέρεται σε πληθυσμό και με  $s^2$  όταν αναφέρεται σε δείγμα. Η εκτίμηση της μεταβλητότητας του δείγματος δίνεται από τη σχέση:

$$s^2 = \frac{1}{n} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (2.32)$$

Για μικρά δείγματα ( $n < 30$ ) γίνεται διόρθωση πολλαπλασιάζοντας με  $n/(n-1)$ .

**Τυπική απόκλιση (Standard deviation)**. Η θετική τετραγωνική ρίζα της μεταβλητότητας είναι γνωστή σαν τυπική απόκλιση (Standard deviation) και δίνεται από τη σχέση:

$$s = +\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.33)$$

Για μικρά δείγματα γίνεται διόρθωση πολλαπλασιάζοντας με  $\sqrt{\frac{n}{n-1}}$

**Συντελεστής Μεταβλητότητας (Coefficient of variation)**. Ο συντελεστής μεταβλητότητας είναι μια αδιάστατη παράμετρος διασποράς που ορίζεται σαν ο λόγος της τυπικής απόκλισης προς το μέσο όρο και εκτιμάται με τη σχέση:

$$C_v = \frac{s}{\bar{x}} \quad (2.34)$$

## Μέτρα Μορφής

**Συντελεστής ασυμμετρίας (Skewness coefficient)** Εκφράζει την ασυμμετρία της κατανομής (θετική για αιχμή δεξιά του μέσου όρου, αρνητική, για αριστερά και μηδέν, για συμμετρική κατανομή), ορίζεται σαν το πηλίκο της τρίτης ( $r = 3$ ) κεντρικής ροπής προς τον κύβο της τυπικής απόκλισης και

εκτιμάται με τη σχέση:

$$C_s = \frac{1}{ns^3} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3 \quad (2.35)$$

Για μικρά δείγματα ( $n < 30$ ) γίνεται διόρθωση πολλαπλασιάζοντας  $n^2/(n-1)(n-2)$ .

**Συντελεστής κύρτωσης (Kurtosis coefficient)**. Εκφράζει την κυρτότητα της αιχμής της κατανομής, ορίζεται σαν το πηλίκο της τέταρτης ( $r = 4$ ) κεντρικής ροπής προς την τέταρτη δύναμη της τυπικής απόκλισης και εκτιμάται με τη σχέση:

$$k = \frac{1}{ns^4} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4 \quad (2.36)$$

Για μικρά δείγματα ( $n < 30$ ) γίνεται διόρθωση πολλαπλασιάζοντας με :

$$n^3/(n-1)(n-2)(n-3).$$

**Τυπικό σφάλμα (Standard error)**. Ένα από τα σημαντικότερα εργαλεία στη στατιστική ανάλυση είναι το **κεντρικό οριακό θεώρημα** σύμφωνα με το οποίο η μέση τιμή η ανεξάρτητων κανονικών μεταβλητών, με τον ίδιο μέσο όρο  $\mu$  και μεταβλητότητα  $\sigma^2$ , ακολουθεί επίσης κανονική κατανομή, με μέσο όρο  $\mu$  και μεταβλητότητα  $\sigma^2/n$ . Επομένως, αν η τυχαία μεταβλητή  $x$  κατανέμεται κανονικά, ο μέσος όρος ενός τυχαίου δείγματος  $\bar{x}$ , κατανέμεται επίσης κανονικά και έχει μέσο όρο, το μέσο όρο της  $x$  και μεταβλητότητα τη μεταβλητότητα της  $x$  διαιρεμένη με το μέγεθος του δείγματος.

Το στατιστικό  $s/n$  λέγεται **τυπικό σφάλμα**. Ο Πίνακας 2.3 δίνει τα τυπικά σφάλματα για διάφορες παραμέτρους των κατανομών.

Πίνακας 2.3. Τυπικά σφάλματα των παραμέτρων των κατανομών

Παράμετρος	Τυπικό φάσμα
Μέσος όρος	$\frac{s}{\sqrt{n}}$
Τυπική από κλιση	$\frac{s}{\sqrt{2n}}$
Συντελεστής μεταβλητότητας	$\frac{C_v \sqrt{1 + 2C_v^2}}{\sqrt{2n}}$
Συντελεστής ασυμετρίας	$\sqrt{\frac{6n(n-1)}{(n+1)(n+2)(n+3)}}$

## **2.8. Πίνακες μηνιαίων υψών βροχής και επεξεργασία ανά σταθμό**

Παρακάτω ακολουθούν οι πίνακες των βροχομετρικών δεδομένων για τους προαναφερθέντες σταθμούς στην ευρύτερη περιοχή της λεκάνης απορροής.

**Πίνακας 2.4**  
**ΦΟΡΕΑΣ: ΔΕΗ**

**ΜΗΝΙΑΙΑ ΥΨΗ ΒΡΟΧΗΣ ΒΡΟΧΟΜΕΤΡΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΠΕΥΚΟΥ**

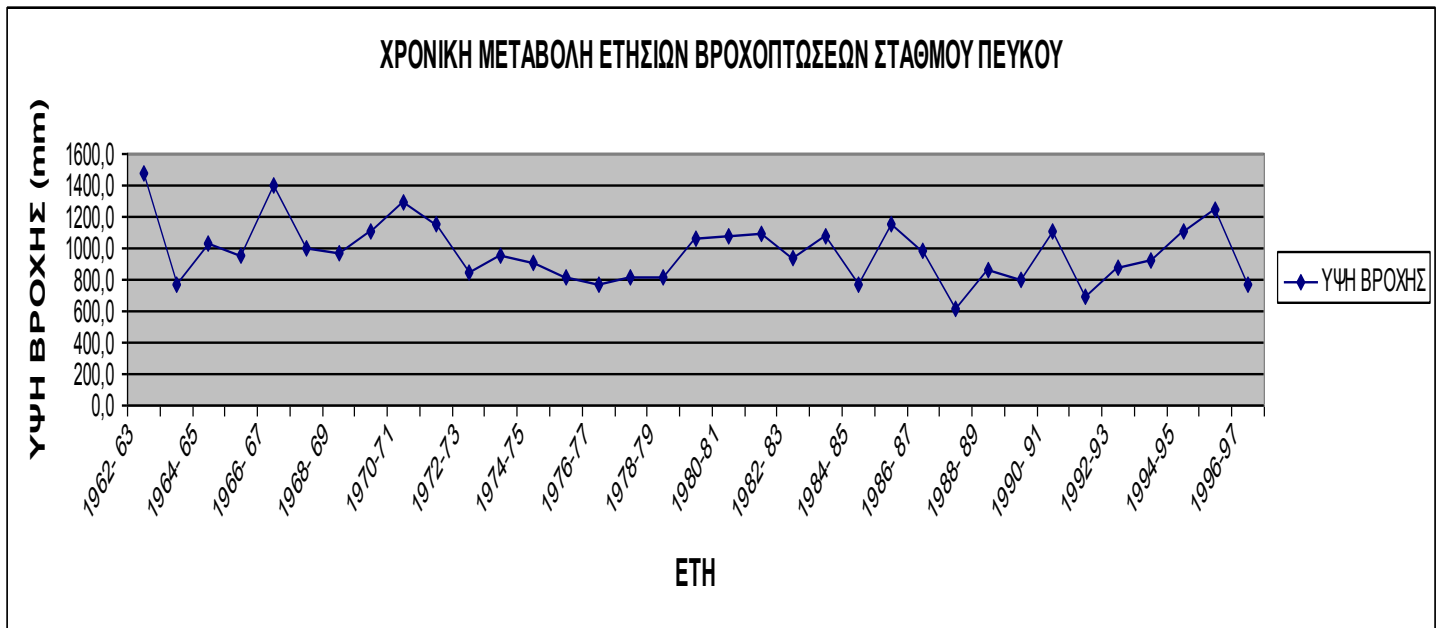
**ΥΨΟΜΕΤΡΟ = 980 m**

Υδρ. Έτος	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΕΤΟΣ
1962- 63	166,0	300,0	180,0	122,0	233,0	151,0	95,0	151,0	33,5	25,4	6,0	12,2	1475,1
1963- 64	133,0	72,5	203,0	49,0	25,6	85,5	9,5	12,5	94,0	54,4	16,3	15,0	770,3
1964- 65	66,5	240,0	207,0	75,3	135,0	97,1	151,0	39,6	24,1	0,0	1,8	0,0	1037,4
1965- 66	0,0	127,0	90,0	197,0	15,3	185,0	70,4	83,4	134,0	7,8	10,6	41,0	961,5
1966- 67	269,0	235,0	152,0	113,0	88,0	44,8	106,0	113,0	28,4	124,0	60,1	73,8	1407,1
1967- 68	45,0	81,9	262,0	126,0	94,5	108,0	19,9	158,0	51,8	0,0	2,6	51,6	1001,3
1968- 69	56,2	63,3	204,0	114,0	157,0	191,0	33,9	19,6	9,9	14,0	33,4	75,0	971,3
1969- 70	0,0	77,5	281,0	149,0	174,0	130,0	43,0	85,8	30,0	89,5	10,9	34,8	1105,5
1970-71	179,0	58,5	166,0	284,0	87,8	180,0	48,0	43,2	20,9	84,3	36,2	99,3	1287,2
1971-72	54,9	101,0	100,0	132,0	187,0	91,0	156,0	86,0	30,1	117,0	51,6	45,1	1151,7
1972-73	175,0	27,2	19,5	51,1	166,0	165,0	20,4	37,0	26,4	52,6	31,1	73,6	844,9
1973-74	93,9	69,9	134,0	88,3	166,0	71,0	152,0	56,0	34,7	7,8	35,9	41,8	951,3
1974-75	191,0	154,0	11,1	18,0	50,2	77,8	119,0	103,0	70,4	43,9	43,6	18,4	900,4
1975-76	127,0	95,4	78,6	40,5	86,0	55,8	93,6	49,7	63,6	51,2	42,2	27,1	810,7
1976-77	84,2	172,0	74,8	73,3	85,1	24,4	50,2	17,9	31,8	3,6	59,6	85,3	762,2
1977-78	49,2	171,0	60,0	101,0	55,0	77,0	141,0	39,0	28,0	4,0	17,0	68,0	810,2
1978-79	157,0	68,0	40,5	45,5	81,0	35,4	167,0	106,0	45,5	50,6	15,2	5,1	816,8
1979-80	15,2	314,0	106,0	228,0	10,1	81,0	60,7	111,0	35,4	30,4	45,5	20,2	1057,5
1980-81	182,0	202,0	116,0	223,0	101,0	35,4	40,5	50,6	25,3	20,2	40,5	45,5	1082,0
1981- 82	132,0	86,0	137,0	70,8	101,0	75,9	81,0	111,0	40,5	40,5	157,0	60,7	1093,4
1982- 83	127,0	30,4	202,0	65,8	132,0	15,2	81,0	10,1	50,6	152,0	50,6	25,3	942,0
1983 -84	45,5	162,0	152,0	111,0	177,0	137,0	152,0	25,3	15,2	10,1	70,8	15,2	1073,1
1984- 85	5,1	70,8	50,6	81,0	157,0	96,0	172,0	96,1	20,2	20,2	0,0	0,0	769,0
1985- 86	10,1	116,0	81,0	137,0	319,0	127,0	20,2	243,0	60,7	15,2	10,1	10,1	1149,4
1986- 87	25,3	106,0	30,4	374,0	20,2	81,0	132,0	20,2	25,3	0,0	65,8	101,0	981,2
1987-88	40,5	111,0	65,8	50,6	75,9	81,0	30,4	25,3	25,3	55,7	20,2	29,9	611,6
1988- 89	25,3	152,0	157,0	15,2	75,9	91,1	70,8	75,9	50,6	96,1	20,2	30,4	860,5
1989-90	116,0	106,0	101,0	35,4	5,1	5,1	75,9	106,0	25,3	10,1	86,0	121,0	792,9
1990- 91	45,5	121,0	248,0	45,5	91,1	111,0	187,0	101,0	60,7	0,0	60,7	35,4	1106,9
1991-92	10,1	161,9	30,4	40,5	20,2	5,1	177,1	91,1	55,7	91,1	10,1	0,0	693,3
1992-93	177,1	40,5	161,9	70,8	70,8	111,3	55,7	81,0	45,5	0,0	10,1	50,6	875,3
1993-94	45,5	192,3	187,2	86,0	131,6	70,8	60,7	70,8	30,4	10,1	15,2	20,2	920,8
1994-95	111,3	60,7	101,2	197,3	86,0	70,8	111,3	86,0	60,7	10,1	151,8	60,7	1107,9
1995-96	50,6	485,8	96,1	40,5	182,2	106,3	60,7	55,7	25,3	65,8	30,4	50,6	1250,0
1996-97	126,5	126,5	172,0	40,5	40,5	75,9	86,0	50,6	30,4	10,1	10,1	0,0	769,1
<b>Μέση τιμή</b>	<b>89,6</b>	<b>136,0</b>	<b>127,0</b>	<b>105,0</b>	<b>105,0</b>	<b>89,9</b>	<b>89,5</b>	<b>74,6</b>	<b>41,1</b>	<b>39,1</b>	<b>38,0</b>	<b>41,3</b>	<b>977,2</b>
<b>MAX</b>	<b>269,00</b>	<b>485,80</b>	<b>281,00</b>	<b>374,00</b>	<b>319,00</b>	<b>191,00</b>	<b>187,00</b>	<b>243,00</b>	<b>134,00</b>	<b>152,00</b>	<b>157,00</b>	<b>121,00</b>	<b>1407,10</b>
<b>MIN</b>	<b>0,00</b>	<b>27,20</b>	<b>11,10</b>	<b>15,20</b>	<b>5,10</b>	<b>5,10</b>	<b>19,90</b>	<b>10,10</b>	<b>9,90</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>611,60</b>
<b>Stand.Dev.</b>	<b>69,73</b>	<b>90,12</b>	<b>70,71</b>	<b>82,44</b>	<b>66,99</b>	<b>49,21</b>	<b>51,38</b>	<b>47,01</b>	<b>23,14</b>	<b>42,03</b>	<b>37,02</b>	<b>31,23</b>	<b>181,20</b>
<b>Variance</b>	<b>4862,14</b>	<b>8121,25</b>	<b>4999,41</b>	<b>6796,65</b>	<b>4487,46</b>	<b>2421,22</b>	<b>2639,96</b>	<b>2210,23</b>	<b>535,23</b>	<b>1766,27</b>	<b>1370,52</b>	<b>975,04</b>	<b>32834,56</b>
<b>Κύρτωση</b>	<b>-0,25</b>	<b>7,27</b>	<b>-0,29</b>	<b>2,47</b>	<b>1,99</b>	<b>-0,11</b>	<b>-1,06</b>	<b>4,01</b>	<b>7,74</b>	<b>0,30</b>	<b>4,02</b>	<b>-0,13</b>	<b>-0,11</b>





Εικόνα 2.12 : Μέσο μηνιαίο ύψος βροχής σταθμού Πεύκου



Εικόνα 2.13 : Χρονική μεταβολή ετήσιων βροχοπτώσεων σταθμού Πεύκου

**Πίνακας 2.5**  
**ΦΟΡΕΑΣ: ΔΕΗ**

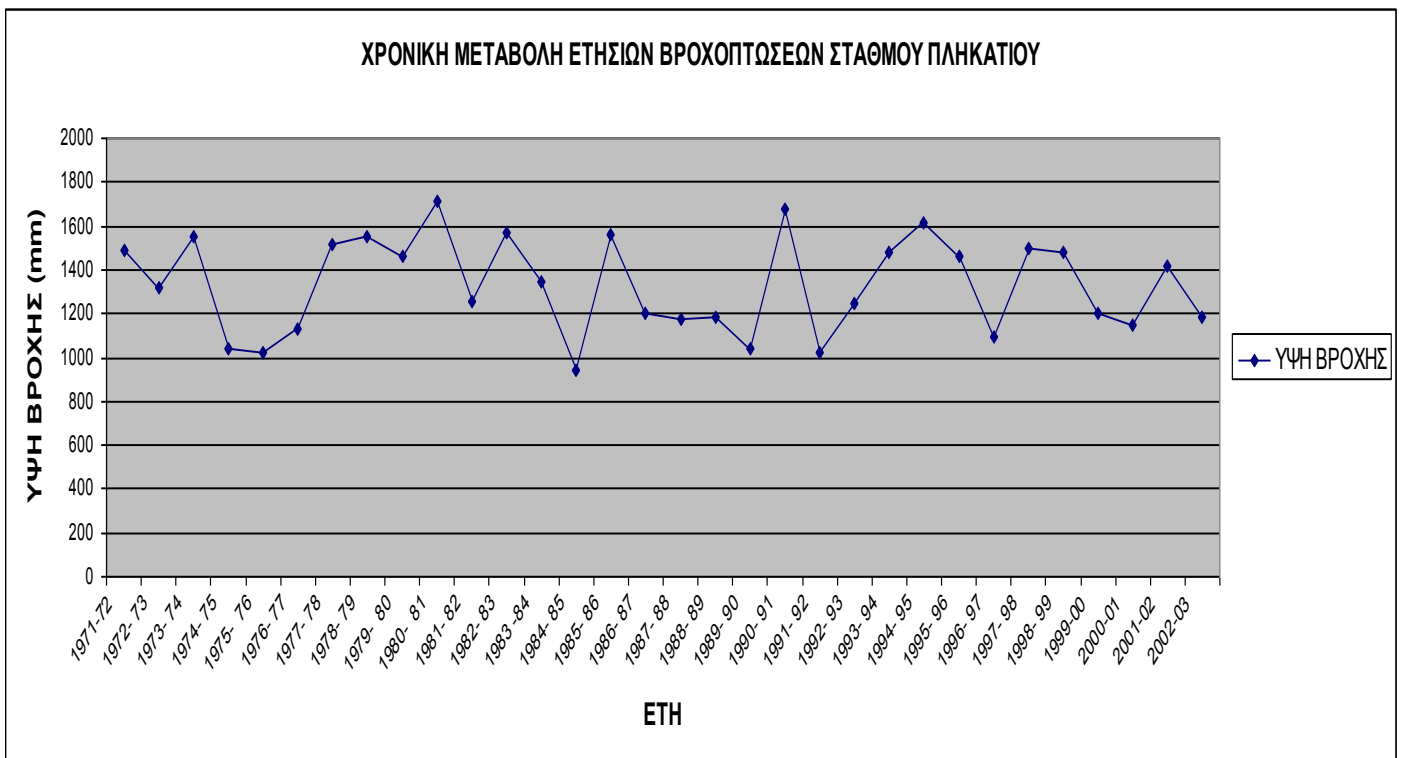
**ΜΗΝΙΑΙΑ ΎΨΗ ΒΡΟΧΗΣ ΒΡΟΧΟΜΕΤΡΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΠΛΗΚΑΤΙΟΥ**

**ΥΨΟΜΕΤΡΟ =1.250 m**

Υδρ. Έτος	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΕΤΟΣ
1972- 73	62,20	165,40	116,80	221,00	162,00	89,90	204,20	119,30	34,00	107,40	83,90	118,40	<b>1484,5</b>
1973- 74	254,80	80,70	30,40	166,40	222,30	192,80	69,20	56,00	87,70	25,20	39,20	92,40	<b>1317,1</b>
1974- 75	92,40	105,40	368,60	82,00	154,50	89,50	211,00	140,30	57,40	39,70	49,70	163,10	<b>1553,6</b>
1975- 76	282,20	213,40	28,40	21,70	67,20	97,30	71,90	84,70	80,80	37,10	51,20	1,50	<b>1037,4</b>
1976- 77	155,80	123,70	85,10	60,60	19,30	73,30	138,90	66,50	124,60	52,50	62,60	56,40	<b>1019,3</b>
1977- 78	95,90	231,20	260,10	118,90	103,50	44,70	41,90	60,50	32,40	2,40	61,60	79,80	<b>1132,9</b>
1978- 79	39,90	263,00	91,00	230,40	182,40	145,60	206,50	115,40	52,90	2,00	0,00	185,30	<b>1514,4</b>
1979- 80	73,30	121,70	212,70	357,60	142,60	82,60	213,00	102,10	104,00	18,50	84,90	39,40	<b>1552,4</b>
1980- 81	123,50	268,90	146,20	237,40	52,70	164,50	68,90	210,80	64,00	37,50	44,00	42,00	<b>1460,4</b>
1981- 82	238,50	203,20	329,90	169,00	164,40	136,00	89,00	154,00	61,00	2,00	103,10	66,00	<b>1716,1</b>
1982- 83	195,00	89,00	396,30	73,40	69,00	63,60	154,30	71,20	52,10	23,00	23,20	46,00	<b>1256,1</b>
1983 -84	168,00	205,00	272,40	41,20	215,00	96,30	66,00	79,00	197,80	107,50	26,00	91,60	<b>1565,8</b>
1984- 85	61,90	181,00	126,30	259,90	226,20	200,10	133,00	50,90	14,50	1,00	43,00	48,50	<b>1346,3</b>
1985- 86	20,20	122,40	34,90	262,90	79,50	197,10	114,30	71,20	15,50	5,00	4,00	15,10	<b>942,1</b>
1986- 87	55,00	328,00	49,00	219,50	268,90	133,20	69,00	223,00	109,00	30,00	62,00	14,00	<b>1560,6</b>
1987- 88	74,00	40,00	107,10	303,70	125,00	199,70	60,80	116,40	30,00	93,00	39,00	12,00	<b>1200,7</b>
1988- 89	205,00	231,90	100,00	73,00	179,10	200,00	78,50	7,70	39,00	12,00	19,00	31,00	<b>1176,2</b>
1989- 90	69,00	259,80	154,50	2,10	61,70	119,70	110,00	100,40	127,00	99,40	36,00	42,00	<b>1181,6</b>
1990- 91	200,90	249,00	118,00	5,00	51,00	6,00	152,30	130,30	30,00	19,00	50,50	32,30	<b>1044,3</b>
1991- 92	116,60	171,10	406,50	20,20	233,50	46,50	192,90	160,50	30,70	115,60	145,70	38,00	<b>1677,8</b>
1992- 93	64,90	257,90	29,30	20,00	29,40	51,70	289,20	104,90	55,60	53,60	6,00	59,70	<b>1022,2</b>
1993- 94	323,50	153,20	200,00	47,80	59,50	113,30	86,50	137,10	40,00	9,50	36,00	43,60	<b>1250,0</b>
1994- 95	54,40	256,80	358,90	172,50	162,90	31,40	143,30	56,10	83,40	90,00	49,70	24,40	<b>1483,8</b>
1995- 96	89,20	113,10	253,50	193,90	122,10	254,90	114,90	166,80	13,70	67,80	121,50	107,00	<b>1618,4</b>
1996- 97	0,00	196,80	279,90	65,80	226,00	179,20	94,20	87,30	87,70	41,00	17,90	187,90	<b>1463,7</b>
1997- 98	98,50	254,30	263,80	51,00	42,00	117,20	132,90	32,10	28,90	29,20	46,70	0,20	<b>1096,8</b>
1998- 99	209,40	102,80	254,80	73,70	99,70	63,80	111,80	173,90	136,90	12,80	58,60	197,20	<b>1495,4</b>
1999-00	139,70	263,60	178,50	109,10	207,20	180,60	119,80	28,70	42,10	145,00	6,10	56,80	<b>1477,2</b>
2000-01	35,10	219,20	341,40	102,80	197,70	115,90	64,60	48,30	24,10	31,90	8,10	15,70	<b>1204,8</b>
2001-02	75,30	153,80	85,20	162,00	84,30	56,80	230,70	57,40	47,00	48,20	87,40	58,70	<b>1146,8</b>
2002-03	21,50	139,70	153,80	50,90	54,00	114,00	204,10	109,50	25,20	137,50	110,60	300,70	<b>1421,5</b>
<b>Μέση τιμή</b>	<b>130,00</b>	<b>36,20</b>	<b>258,90</b>	<b>226,70</b>	<b>131,00</b>	<b>22,20</b>	<b>82,60</b>	<b>45,10</b>	<b>99,50</b>	<b>18,10</b>	<b>49,50</b>	<b>87,80</b>	<b>1187,6</b>
<b>MAX</b>	<b>120,0</b>	<b>181,0</b>	<b>190,0</b>	<b>131,0</b>	<b>131,0</b>	<b>115,0</b>	<b>129,0</b>	<b>99,0</b>	<b>63,4</b>	<b>47,3</b>	<b>50,8</b>	<b>73,6</b>	<b>1331,5</b>
<b>MIN</b>	<b>323,50</b>	<b>328,00</b>	<b>406,50</b>	<b>357,60</b>	<b>268,90</b>	<b>254,90</b>	<b>289,20</b>	<b>223,00</b>	<b>197,80</b>	<b>145,00</b>	<b>145,70</b>	<b>300,70</b>	<b>1716,10</b>
<b>Stand.Dev.</b>	<b>0,00</b>	<b>36,20</b>	<b>28,40</b>	<b>2,10</b>	<b>19,30</b>	<b>6,00</b>	<b>41,90</b>	<b>7,70</b>	<b>13,70</b>	<b>1,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,20</b>	<b>942,1</b>
<b>Variance</b>	<b>82,12</b>	<b>73,90</b>	<b>116,19</b>	<b>96,83</b>	<b>70,87</b>	<b>62,51</b>	<b>61,58</b>	<b>52,66</b>	<b>42,82</b>	<b>42,25</b>	<b>35,59</b>	<b>67,89</b>	<b>218,62</b>
<b>Κύρτωση</b>	<b>6742,88</b>	<b>5460,97</b>	<b>13500,08</b>	<b>9375,60</b>	<b>5022,18</b>	<b>3907,34</b>	<b>3792,44</b>	<b>2772,74</b>	<b>1833,96</b>	<b>1785,10</b>	<b>1266,64</b>	<b>4608,66</b>	<b>47793,50</b>
	<b>-0,09</b>	<b>-0,78</b>	<b>-1,07</b>	<b>-0,73</b>	<b>-1,21</b>	<b>-0,69</b>	<b>-0,15</b>	<b>-0,14</b>	<b>1,63</b>	<b>-0,26</b>	<b>0,51</b>	<b>2,98</b>	<b>-1,23</b>



Εικόνα 2.14 : Μέσο μηνιαίο ύψος βροχής σταθμού Πληκατίου



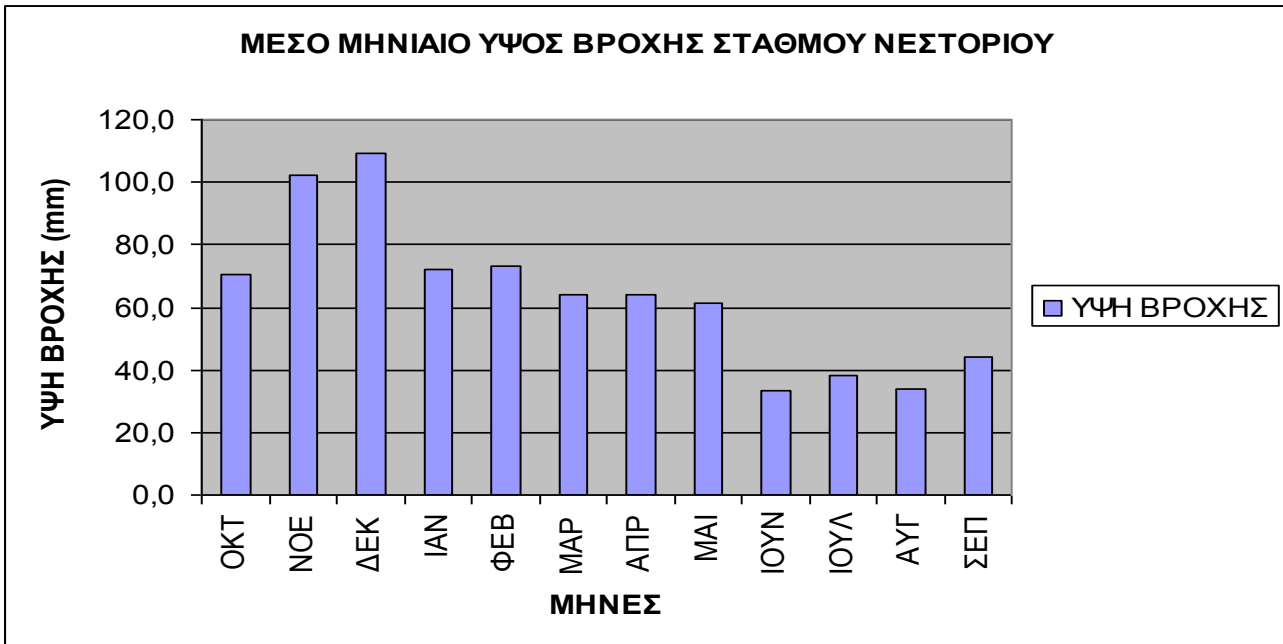
Εικόνα 2.15 : Χρονική μεταβολή ετήσιων βροχοπτώσεων σταθμού Πληκατίου

**Πίνακας 2.6**  
**ΦΟΡΕΑΣ: ΔΕΗ & ΙΔΕ**

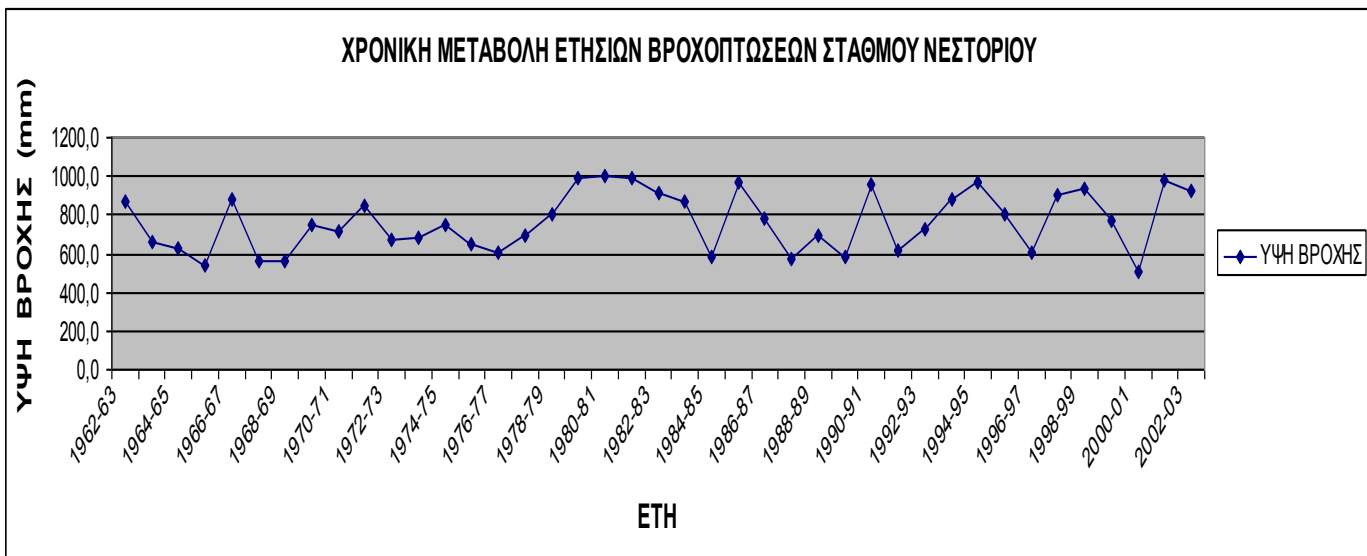
**ΜΗΝΙΑΙΑ ΥΨΗ ΒΡΟΧΗΣ ΒΡΟΧΟΜΕΤΡΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΝΕΣΤΟΡΙΟΥ**

**ΥΨΟΜΕΤΡΟ =850 & 792 m**

Υδρ. Έτος	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΕΤΟΣ
1962-63	91,0	114,0	58,0	75,0	122,0	96,0	62,0	107,0	60,0	42,0	22,0	22,0	871,0
1963-64	131,0	53,0	134,0	23,0	24,0	48,0	17,0	88,0	63,0	42,0	12,0	31,0	666,0
1964-65	34,0	164,0	118,0	56,0	80,0	58,0	60,0	28,0	9,0	14,0	7,0	4,0	632,0
1965-66	2,0	70,0	96,0	83,0	39,0	62,0	38,0	23,0	25,0	9,0	15,0	82,0	544,0
1966-67	76,0	216,0	130,0	97,0	19,0	25,0	40,0	58,0	27,0	117,0	29,0	46,0	880,0
1967-68	44,0	57,0	135,0	26,0	26,0	44,0	24,0	87,0	46,0	0,0	30,0	38,0	557,0
1968-69	40,0	41,0	80,0	108,0	73,0	78,0	34,0	15,0	2,0	9,0	15,0	62,0	557,0
1969-70	3,0	49,0	246,0	77,0	80,0	82,0	63,0	47,0	37,0	44,0	5,0	16,0	749,0
1970-71	11,0	31,0	81,0	71,0	64,0	115,0	37,0	31,0	57,0	67,0	36,0	110,0	711,0
1971-72	38,0	76,0	78,0	125,0	72,0	54,0	118,0	45,0	8,0	121,0	90,0	27,0	852,0
1972-73	172,0	0,0	5,0	34,0	97,0	108,0	14,0	30,0	36,0	95,0	19,0	61,0	671,0
1973-74	73,0	50,0	74,0	58,0	130,0	41,0	101,0	32,0	40,0	28,0	17,0	41,0	685,0
1974-75	115,0	114,0	47,0	14,0	79,0	80,0	51,0	83,0	103,0	34,0	19,0	12,0	751,0
1975-76	92,0	59,0	71,0	28,4	67,0	35,5	68,0	68,5	83,5	22,6	43,2	13,5	652,2
1976-77	43,8	98,3	122,0	43,7	62,1	12,3	28,8	32,6	38,9	0,0	63,2	57,0	602,7
1977-78	21,2	105,0	61,8	104,0	47,2	75,9	117,0	41,5	17,8	2,5	7,0	88,4	689,3
1978-79	78,6	41,7	110,0	168,0	69,6	34,5	125,0	86,4	35,6	3,3	41,8	7,3	801,8
1979-80	107,0	269,0	126,0	92,4	43,6	81,1	44,2	116,0	39,9	2,7	30,7	33,0	985,6
1980-81	181,0	111,0	156,0	107,0	66,0	41,1	69,5	58,9	6,9	23,3	103,0	76,5	1000,2
1981-82	130,0	98,6	152,0	25,8	50,2	107,0	151,0	77,4	10,6	14,5	104,0	71,8	992,9
1982-83	96,3	138,0	117,0	35,5	63,0	50,5	27,3	112,0	104,0	54,1	39,5	79,0	916,2
1983-84	37,2	109,0	231,0	97,6	132,0	70,2	95,5	15,6	17,5	1,1	34,5	25,8	867,0
1984-85	20,0	62,0	47,0	124,0	40,5	75,5	116,0	73,5	6,0	5,0	0,0	10,0	579,5
1985-86	47,0	198,0	40,0	94,0	171,0	54,5	36,5	171,0	101,0	30,0	9,0	13,0	965,0
1986-87	66,0	84,0	60,7	131,0	97,0	149,0	47,5	44,0	16,5	34,0	30,5	22,0	782,2
1987-88	126,0	112,0	49,0	42,5	48,0	60,0	48,0	14,1	26,0	4,0	9,6	36,4	575,6
1988-89	46,0	152,0	108,0	1,8	59,0	46,0	15,5	87,0	15,5	117,0	27,5	18,5	693,8
1989-90	97,0	100,5	116,0	0,3	25,5	6,0	55,0	95,0	10,0	17,5	40,0	22,0	584,8
1990-91	36,5	144,0	184,5	38,0	136,5	34,0	176,0	85,0	13,0	38,5	53,0	24,0	963,0
1991-92	34,0	118,0	30,0	19,5	5,5	15,0	128,5	74,0	87,0	83,5	1,5	21,0	617,5
1992-93	131,0	49,5	105,0	89,0	70,0	95,0	44,0	41,0	40,0	0,0	46,0	21,0	731,5
1993-94	61,0	188,0	88,0	126,0	159,0	33,0	77,0	26,0	8,0	89,0	15,0	8,0	878,0
1994-95	84,0	63,0	103,0	167,0	58,5	107,5	39,0	89,0	13,0	81,0	122,0	45,5	972,5
1995-96	0,0	82,5	164,0	65,0	105,0	89,0	28,0	68,0	13,0	57,0	33,0	100,0	804,5
1996-97	77,3	85,5	149,1	48,3	27,6	57,4	83,2	7,3	18,2	20,6	24,8	5,9	605,2
1997-98	200,8	86,8	118,1	38,2	72,3	43,5	27,3	131,6	24,5	10,6	27,0	116,9	897,6
1998-99	75,7	224,3	98,4	87,1	117,2	120,2	44,9	8,9	14,3	76,8	23,3	43,3	934,4
1999-00	37,0	215,9	120,0	52,7	126,1	68,6	21,6	78,5	18,1	11,2	5,4	16,2	771,3
2000-01	58,4	46,5	31,3	102,7	43,5	10,0	76,0	21,4	16,8	45,3	27,4	30,4	509,7
2001-02	14,8	59,2	153,6	31,5	31,5	137,8	118,3	65,2	36,0	87,2	46,1	197,2	978,4
2002-03	70,1	26,7	291,2	158,1	110,0	21,1	60,4	44,7	34,2	3,6	55,7	53,6	929,4
<b>Μέση τιμή</b>	<b>70,7</b>	<b>102,0</b>	<b>109,0</b>	<b>72,3</b>	<b>73,4</b>	<b>64,0</b>	<b>64,1</b>	<b>61,2</b>	<b>33,6</b>	<b>38,0</b>	<b>33,7</b>	<b>44,1</b>	<b>766,0</b>
<b>MAX</b>	<b>200,80</b>	<b>269,00</b>	<b>291,20</b>	<b>168,00</b>	<b>171,00</b>	<b>149,00</b>	<b>176,00</b>	<b>171,00</b>	<b>104,00</b>	<b>121,00</b>	<b>122,00</b>	<b>197,20</b>	<b>1000,20</b>
<b>MIN</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>5,00</b>	<b>0,30</b>	<b>5,50</b>	<b>6,00</b>	<b>14,00</b>	<b>7,30</b>	<b>6,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>5,90</b>	<b>509,70</b>
Stand.Dev.	49,12	60,97	60,37	48,38	40,71	37,20	42,64	37,99	29,70	36,93	30,43	40,36	152,13
Variance	2412,66	3717,94	3644,39	2340,38	1657,29	1384,09	1817,93	1443,50	882,35	1363,90	926,14	1629,15	23143,16
Κύρτωση	0,35	0,72	1,73	-0,87	-0,31	-0,30	-0,35	0,65	1,19	-0,44	1,42	5,73	-1,36



Εικόνα 2.16 : Μέσο μηνιαίο ύψος βροχής σταθμού Νεστορίου



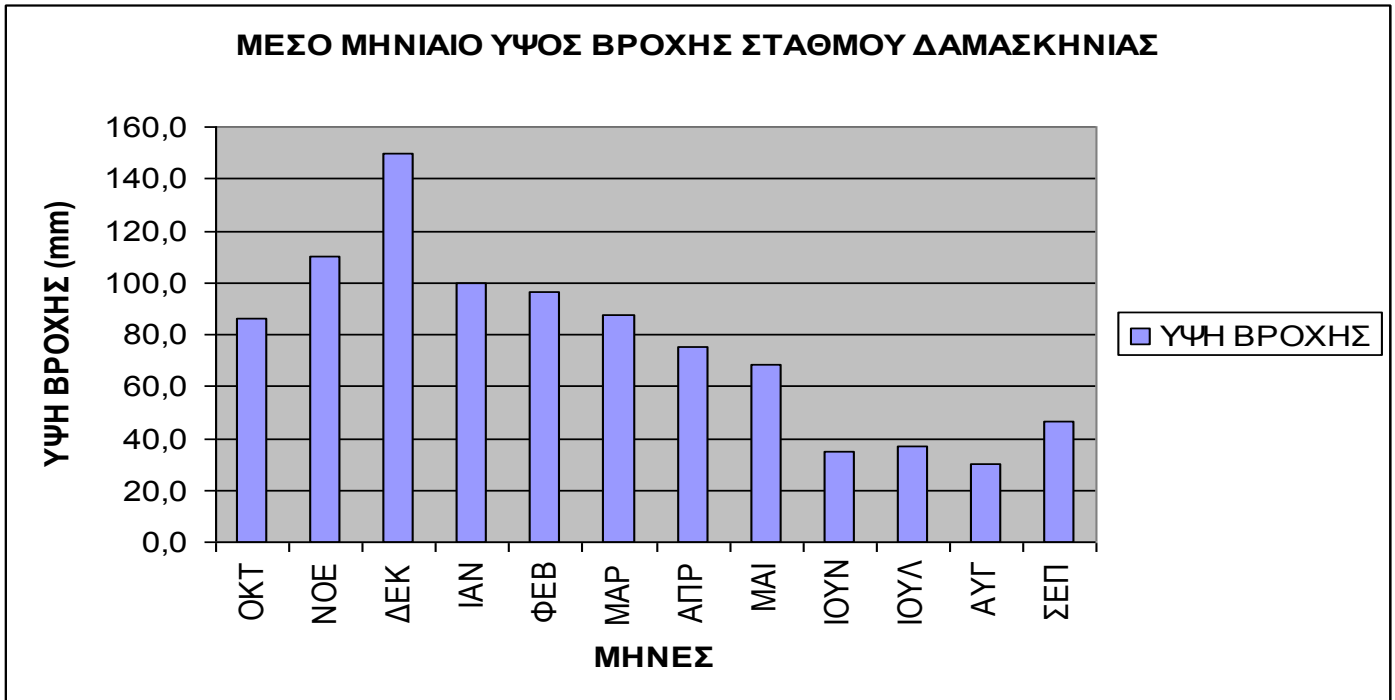
Εικόνα 2.17 : Χρονική μεταβολή ετήσιων βροχοπτώσεων σταθμού Νεστορίου

Πίνακας 2.7  
ΦΟΡΕΑΣ: ΔΕΗ

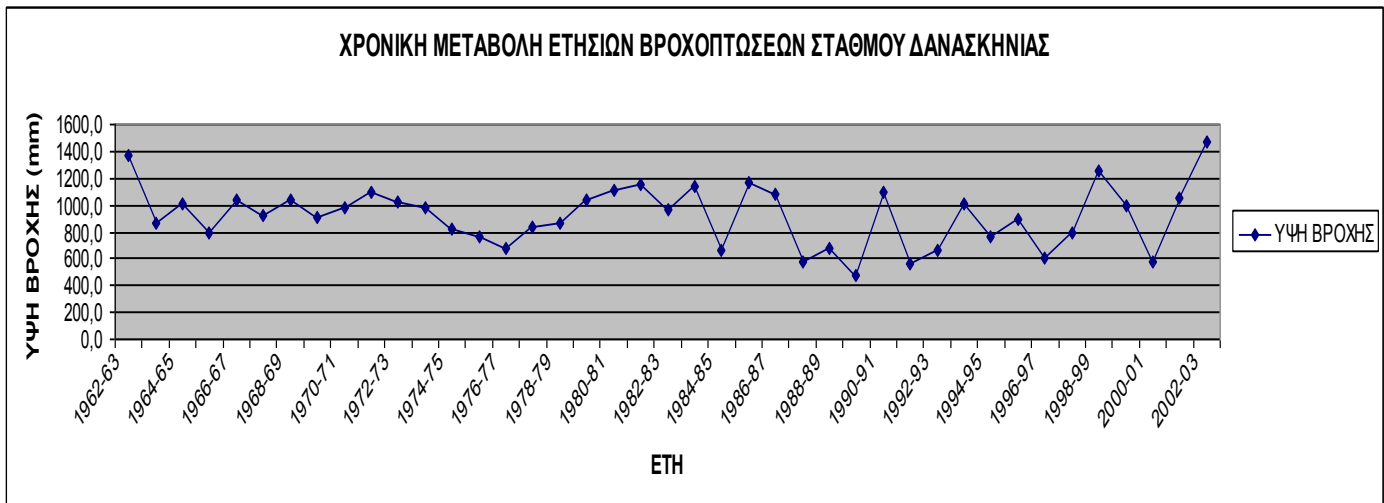
## ΜΗΝΙΑΙΑ ΥΨΗ ΒΡΟΧΗΣ ΒΡΟΧΟΜΕΤΡΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΔΑΜΑΣΚΗΝΙΑΣ

ΥΨΟΜΕΤΡΟ =990 m

Υδρ. Έτος	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΕΤΟΣ
1962-63	136,0	199,0	294,0	165,0	196,0	76,4	78,6	117,0	37,1	25,1	26,4	14,1	1364,7
1963-64	192,0	18,7	124,0	40,0	61,8	131,0	16,6	89,5	86,2	75,7	5,3	30,6	871,4
1964-65	66,6	261,0	140,0	72,5	196,0	61,0	119,0	31,9	25,3	25,3	8,7	5,2	1012,5
1965-66	6,2	92,2	85,9	195,0	26,9	135,0	44,8	47,2	63,2	12,0	12,9	72,7	794,0
1966-67	70,8	210,0	164,0	112,0	31,7	35,5	82,2	116,0	30,6	126,0	7,7	53,9	1040,4
1967-68	53,6	30,8	205,0	124,0	106,0	70,0	61,5	105,0	79,3	1,6	32,0	58,1	926,9
1968-69	46,7	66,2	271,0	119,0	116,0	199,0	40,7	13,9	29,7	7,2	24,1	104,0	1037,5
1969-70	3,4	41,7	276,0	106,0	123,0	134,0	37,2	71,5	33,8	39,5	3,5	36,8	906,4
1970-71	150,0	20,1	91,5	150,0	99,9	158,0	60,8	28,0	20,2	69,8	23,5	111,0	982,8
1971-72	41,9	70,8	105,0	203,0	132,0	107,0	145,0	45,7	18,3	119,0	66,7	41,4	1095,8
1972-73	204,0	19,3	34,7	112,0	120,0	163,0	17,1	40,6	38,2	79,2	54,9	137,0	1020,0
1973-74	75,9	66,8	236,0	94,6	132,0	70,4	137,0	41,6	25,6	27,5	10,9	55,4	973,7
1974-75	120,0	139,0	39,1	70,5	85,9	73,6	42,7	67,8	85,3	24,3	44,1	25,5	817,8
1975-76	98,5	82,2	73,1	29,0	106,0	61,4	71,4	122,0	45,6	29,5	31,6	15,3	765,6
1976-77	55,7	135,0	134,0	78,5	24,9	23,1	39,4	28,4	27,8	1,9	67,3	65,6	681,6
1977-78	29,1	144,0	89,0	164,0	69,8	75,9	127,0	31,1	32,0	0,3	0,0	79,0	841,2
1978-79	128,0	45,0	101,0	143,0	87,6	46,7	129,0	81,7	32,1	16,0	31,3	25,8	867,2
1979-80	111,0	261,0	103,0	125,0	34,0	132,0	35,9	139,0	49,0	16,7	14,2	17,8	1038,6
1980-81	193,0	86,8	201,0	193,0	127,0	36,1	69,4	38,0	22,0	27,5	64,2	50,5	1108,5
1981-82	162,0	158,0	177,0	36,4	110,0	123,0	152,0	72,2	5,4	22,2	56,4	72,1	1146,7
1982-83	175,0	150,0	130,0	40,8	81,2	52,1	28,3	48,1	104,0	88,0	28,0	47,0	972,5
1983-84	43,9	97,2	332,0	113,0	228,0	127,0	108,0	26,8	19,6	0,0	25,6	19,5	1140,6
1984-85	38,4	50,2	56,0	162,0	45,9	117,0	101,0	49,3	20,0	9,3	1,0	14,1	664,2
1985-86	52,2	221,0	41,9	70,7	317,0	103,0	30,0	162,0	67,9	38,8	41,7	19,2	1165,4
1986-87	70,2	88,5	78,4	263,0	102,0	248,0	42,0	57,2	38,9	57,2	30,2	0,2	1075,8
1987-88	130,0	104,0	50,0	45,1	65,6	40,6	54,6	22,2	24,3	0,0	13,1	20,8	570,3
1988-89	46,2	180,0	119,0	7,4	55,7	38,8	16,7	69,4	50,7	75,3	12,6	8,5	680,3
1989-90	77,5	81,3	67,9	3,5	10,8	16,5	54,9	95,1	14,1	7,2	35,4	15,6	479,8
1990-91	36,5	85,2	319,0	33,6	145,0	63,3	162,0	88,4	13,0	61,2	60,1	29,2	1096,5
1991-92	43,3	96,6	36,2	33,7	7,7	19,0	143,0	76,6	55,4	27,5	4,8	17,2	561,0
1992-93	85,6	60,4	101,0	77,5	53,6	85,7	58,5	76,2	23,1	0,0	23,0	18,3	662,9
1993-94	75,0	216,0	91,5	103,0	261,0	24,8	84,2	50,0	10,9	38,0	31,0	26,0	1011,4
1994-95	76,9	70,8	107,0	74,5	46,3	73,5	53,3	90,1	4,8	62,2	58,4	52,0	769,8
1995-96	0,5	68,7	209,0	101,0	120,0	145,0	46,2	55,3	2,4	56,2	26,5	60,7	891,5
1996-97	78,4	72,1	105,4	79,1	34,9	82,6	74,5	14,7	19,3	9,5	22,4	11,3	604,2
1997-98	141,1	102,1	104,5	40,9	75,7	37,9	24,5	137,5	12,0	8,5	22,4	83,8	790,9
1998-99	64,4	245,5	262,8	81,1	60,8	180,4	163,1	41,6	9,1	83,4	30,2	37,3	1259,7
1999-00	37,6	212,4	235,9	172,4	48,1	38,6	65,5	60,6	22,6	26,4	45,0	31,9	997,0
2000-01	95,9	83,9	34,6	93,7	48,6	22,0	78,0	37,5	9,6	29,2	26,9	12,9	572,8
2001-02	33,7	52,9	211,0	16,6	26,6	124,5	121,9	90,8	53,4	22,5	46,7	255,2	1055,8
2002-03	194,7	14,2	521,4	133,5	134,6	31,5	56,5	115,4	69,7	67,0	60,6	66,7	1465,8
<b>Μέση τιμή</b>	<b>86,4</b>	<b>110,0</b>	<b>150,0</b>	<b>99,5</b>	<b>96,5</b>	<b>87,4</b>	<b>75,0</b>	<b>68,1</b>	<b>34,9</b>	<b>36,9</b>	<b>30,0</b>	<b>46,8</b>	<b>921,5</b>
<b>MAX</b>	<b>204,00</b>	<b>261,00</b>	<b>521,40</b>	<b>263,00</b>	<b>317,00</b>	<b>248,00</b>	<b>163,10</b>	<b>162,00</b>	<b>104,00</b>	<b>119,00</b>	<b>67,30</b>	<b>255,20</b>	<b>1465,80</b>
<b>MIN</b>	<b>0,50</b>	<b>14,20</b>	<b>34,60</b>	<b>3,50</b>	<b>7,70</b>	<b>16,50</b>	<b>16,70</b>	<b>14,70</b>	<b>2,40</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,20</b>	<b>479,80</b>
<b>Stand.Dev.</b>	<b>53,94</b>	<b>64,74</b>	<b>107,59</b>	<b>61,85</b>	<b>69,87</b>	<b>54,46</b>	<b>45,81</b>	<b>36,73</b>	<b>24,47</b>	<b>30,79</b>	<b>19,70</b>	<b>47,96</b>	<b>237,00</b>
<b>Variance</b>	<b>2909,92</b>	<b>4190,97</b>	<b>11575,66</b>	<b>3824,87</b>	<b>4882,24</b>	<b>2965,50</b>	<b>2098,78</b>	<b>1348,95</b>	<b>598,67</b>	<b>948,22</b>	<b>388,09</b>	<b>2300,41</b>	<b>56166,75</b>
<b>Κύρτωση</b>	<b>-0,30</b>	<b>-0,06</b>	<b>3,86</b>	<b>0,41</b>	<b>2,94</b>	<b>1,38</b>	<b>-1,08</b>	<b>0,25</b>	<b>1,31</b>	<b>0,19</b>	<b>-0,93</b>	<b>11,86</b>	<b>-0,52</b>



Εικόνα 2.18 : Μέσο μηνιαίο ύψος βροχής σταθμού Δαμασκηνιάς

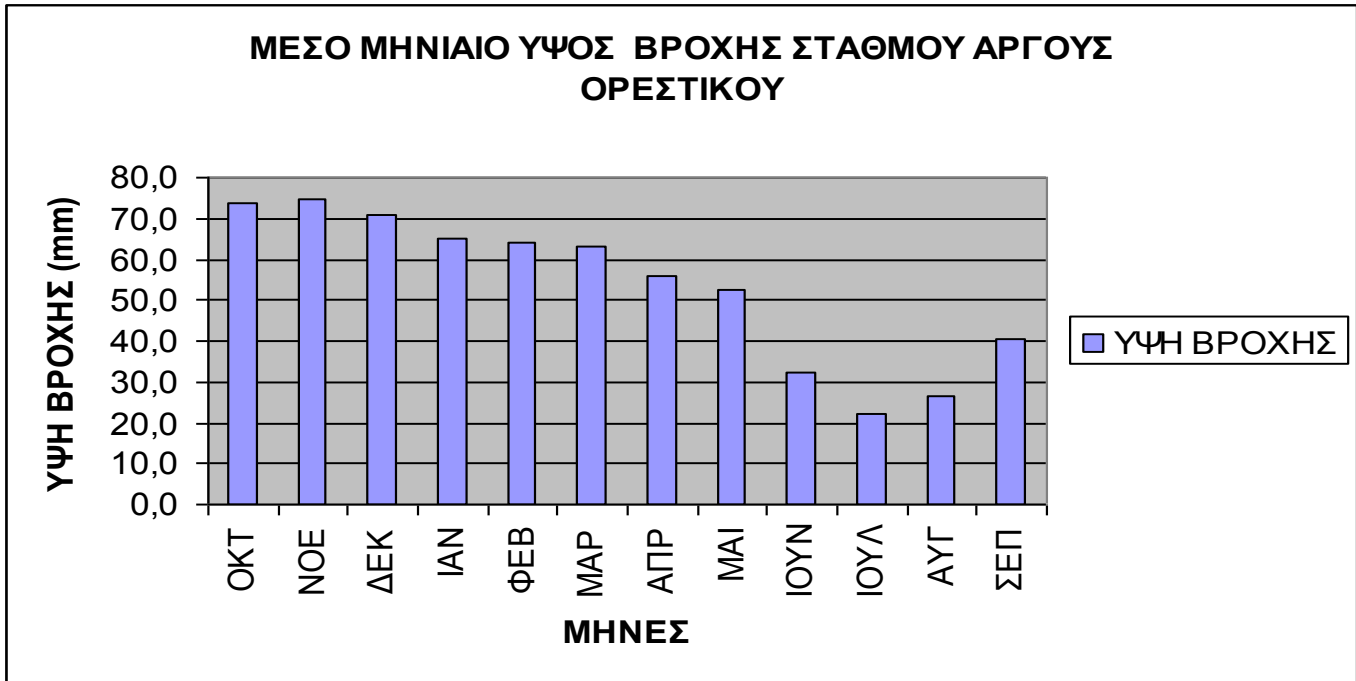


Εικόνα 2.19 : Χρονική μεταβολή ετήσιων βροχοπτώσεων σταθμού Δαμασκηνιάς

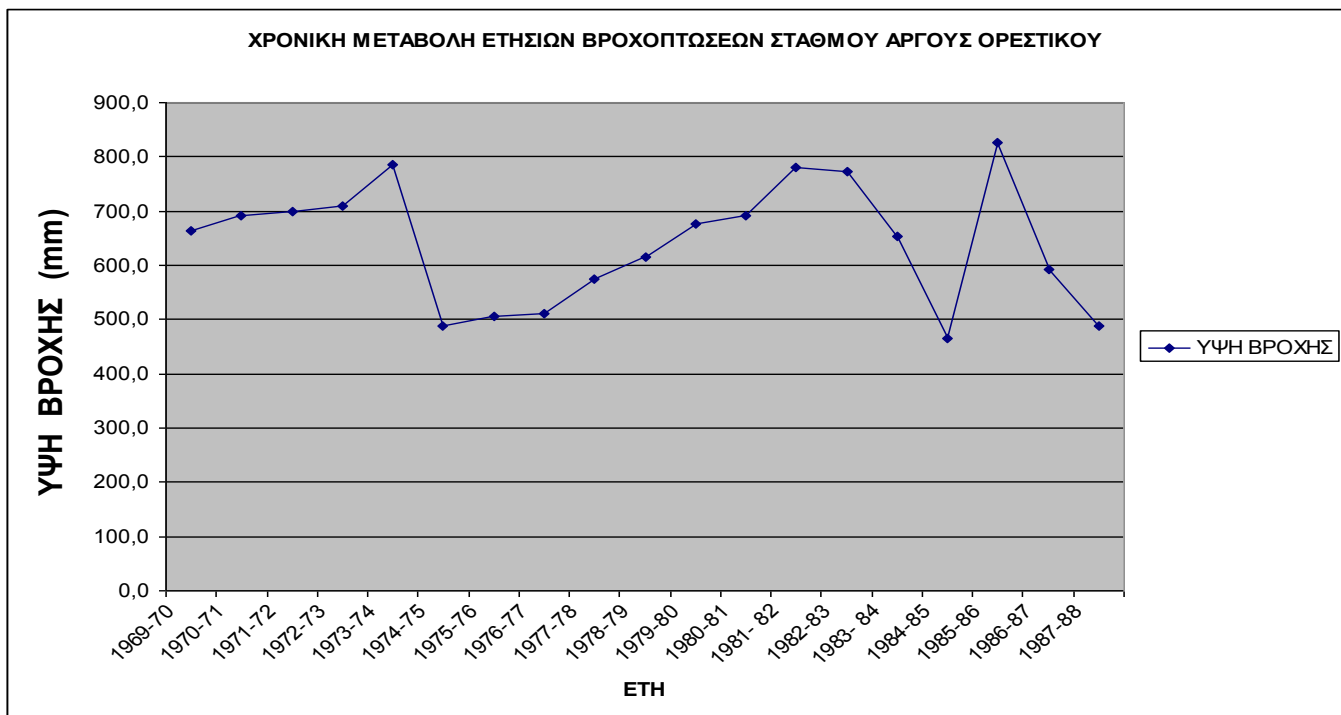
**Πίνακας 2.8 ΜΗΝΙΑΙΑ ΥΨΗ ΒΡΟΧΗΣ(mm) ΒΡΟΧΟΜΕΤΡΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΑΡΓΟΥΣ ΟΡΕΣΤΙΚΟΥ**  
**ΦΟΡΕΑΣ: ΔΕΗ** **ΥΨΟΜΕΤΡΟ =650 m**

Υδρ. Έτος	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΕΤΟΣ
1969-70	0,0	27,5	233,5	66,7	84,2	77,2	37,4	55,6	17,0	46,9	4,9	12,9	<b>663,8</b>
1970-71	77,8	10,7	60,0	94,4	48,4	108,9	30,6	33,4	31,2	48,0	13,6	135,5	<b>692,5</b>
1971-72	24,9	40,7	62,0	114,3	80,3	76,4	111,7	33,7	2,0	74,6	27,9	50,4	<b>698,9</b>
1972-73	195,3	9,0	3,7	62,5	106,1	123,1	7,5	26,4	43,2	29,3	27,5	75,9	<b>709,5</b>
1973-74	81,8	53,9	135,2	76,4	134,7	66,7	102,8	36,8	17,2	9,9	14,0	55,8	<b>785,2</b>
1974-75	57,3	105,1	9,8	0,0	40,5	65,3	34,2	50,7	61,7	39,3	4,6	20,1	<b>488,6</b>
1975-76	71,5	46,7	43,8	18,6	39,6	34,9	49,2	79,7	47,6	12,0	46,6	16,0	<b>506,2</b>
1976-77	64,0	79,0	51,2	56,4	33,3	17,0	35,1	26,3	24,3	0,2	48,9	76,4	<b>512,1</b>
1977-78	28,8	107,4	51,1	107,9	43,4	40,7	99,4	24,0	5,8	1,8	0,0	61,3	<b>573,6</b>
1978-79	82,3	29,7	76,2	115,5	56,7	30,5	88,8	68,3	11,4	2,9	27,1	26,3	<b>615,7</b>
1979-80	85,1	167,7	55,5	100,1	8,4	57,7	22,0	110,4	29,7	2,7	9,0	27,5	<b>675,8</b>
1980-81	140,2	66,8	119,1	63,1	61,7	39,0	54,3	55,5	22,7	7,3	45,0	16,5	<b>691,2</b>
1981- 82	120,3	67,0	102,0	15,2	52,1	48,2	120,6	45,2	5,2	12,7	116,6	74,5	<b>779,6</b>
1982-83	125,0	116,0	86,6	7,0	29,3	49,4	15,7	67,4	98,1	75,6	42,5	60,2	<b>772,8</b>
1983- 84	33,4	89,6	110,8	66,1	127,9	89,0	65,2	15,1	11,9	1,1	23,6	18,9	<b>652,6</b>
1984-85	28,5	59,7	36,6	84,7	19,4	64,4	66,4	87,4	2,3	7,3	0,0	8,2	<b>464,9</b>
1985-86	24,4	184,2	24,0	60,5	157,9	58,2	12,5	93,3	131,9	33,6	37,7	8,6	<b>826,8</b>
1986-87	38,6	61,5	46,3	93,6	62,1	120,5	64,2	60,6	17,3	13,5	13,0	0,2	<b>591,4</b>
1987-88	1246,0	92,3	38,9	37,3	28,2	35,3	42,6	28,3	29,0	1,3	5,1	24,7	<b>487,6</b>
<b>Μέση τιμή</b>	<b>73,9</b>	<b>74,6</b>	<b>70,9</b>	<b>65,3</b>	<b>63,9</b>	<b>63,3</b>	<b>55,8</b>	<b>52,5</b>	<b>32,1</b>	<b>22,1</b>	<b>26,7</b>	<b>40,5</b>	<b>641,5</b>
<b>MAX</b>	<b>195,3</b>	<b>184,2</b>	<b>233,5</b>	<b>115,5</b>	<b>157,9</b>	<b>123,1</b>	<b>120,6</b>	<b>110,4</b>	<b>131,9</b>	<b>75,6</b>	<b>116,6</b>	<b>135,5</b>	<b>826,8</b>
<b>MIN</b>	<b>0,0</b>	<b>9,0</b>	<b>3,7</b>	<b>0,0</b>	<b>8,4</b>	<b>17,0</b>	<b>7,5</b>	<b>15,1</b>	<b>2,0</b>	<b>0,2</b>	<b>0,0</b>	<b>0,2</b>	<b>464,9</b>
<b>Stand.Dev.</b>	<b>49,7</b>	<b>47,5</b>	<b>53,2</b>	<b>36,0</b>	<b>41,4</b>	<b>30,1</b>	<b>34,8</b>	<b>26,6</b>	<b>33,7</b>	<b>24,4</b>	<b>27,3</b>	<b>34,9</b>	<b>112,3</b>
<b>Variance</b>	<b>2467,5</b>	<b>2254,6</b>	<b>2829,7</b>	<b>1297,2</b>	<b>1715,2</b>	<b>908,8</b>	<b>1213,4</b>	<b>706,5</b>	<b>1135,3</b>	<b>597,0</b>	<b>743,2</b>	<b>1219,9</b>	<b>12620,6</b>
<b>Κύρτωση</b>	<b>0,37</b>	<b>0,57</b>	<b>3,88</b>	<b>-0,82</b>	<b>0,16</b>	<b>-0,19</b>	<b>-0,89</b>	<b>-0,41</b>	<b>3,79</b>	<b>0,33</b>	<b>5,95</b>	<b>1,46</b>	<b>-1,12</b>





Εικόνα 2.20 : Μέσο μηνιαίο ύψος βροχής σταθμού Άργους Ορεστικού



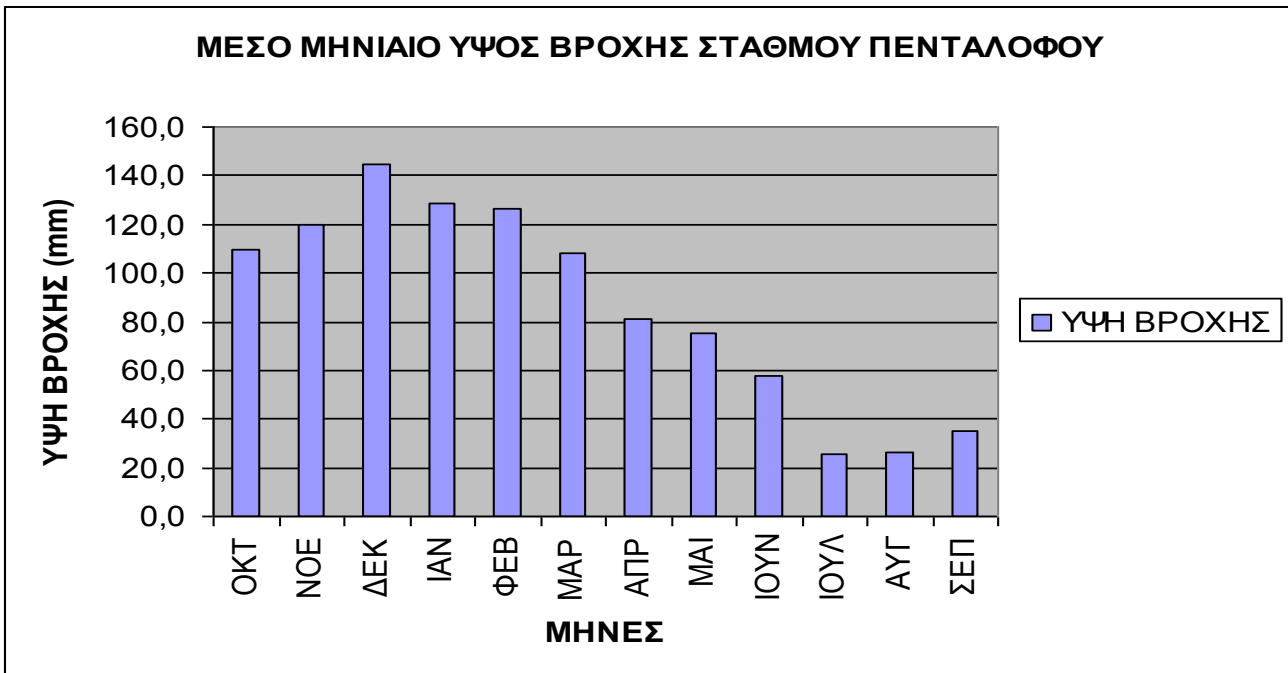
Εικόνα 2.21 : Χρονική μεταβολή ετήσιων βροχοπτώσεων σταθμού Άργους Ορεστικού

**Πίνακας 2.9**  
**ΦΟΡΕΑΣ: ΥΠΔΕ**

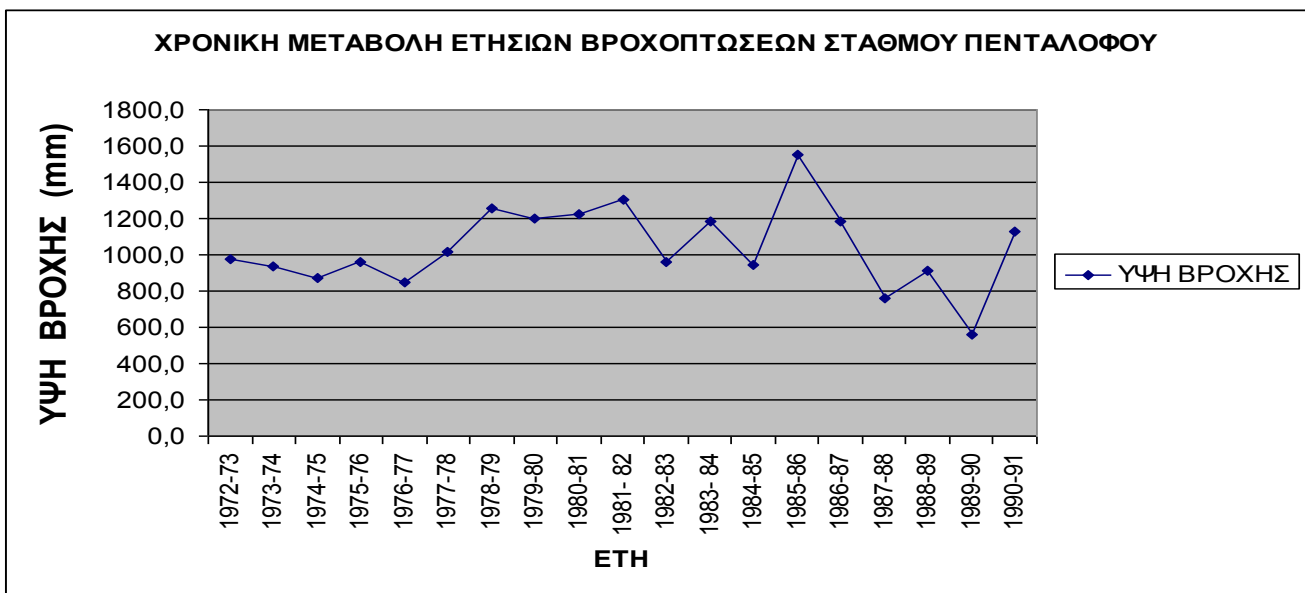
**ΜΗΝΙΑΙΑ ΥΨΗ ΒΡΟΧΗΣ(mm) ΒΡΟΧΟΜΕΤΡΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΠΕΝΤΑΛΟΦΟΥ**

**ΥΨΟΜΕΤΡΟ =1050 m**

Υδρ. Έτος	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΕΤΟΣ
1972-73	229,2	14,6	9,8	111,8	125,7	181,8	24,0	43,3	73,5	82,8	42,9	39,0	<b>978,4</b>
1973-74	115,2	32,4	247,0	74,3	168,1	80,5	118,8	44,9	17,7	2,0	5,1	31,4	<b>937,4</b>
1974-75	135,2	136,2	42,3	38,2	92,9	84,3	44,4	104,6	47,0	64,6	61,3	17,5	<b>868,5</b>
1975-76	89,3	94,1	93,6	102,6	150,4	85,6	96,0	74,7	78,7	34,5	32,1	24,8	<b>956,4</b>
1976-77	69,6	124,7	212,2	183,8	42,0	24,4	39,9	21,7	18,8	10,7	27,9	68,4	<b>844,1</b>
1977-78	50,0	49,5	120,6	220,8	161,2	109,0	128,5	37,1	20,1	0,0	1,0	114,7	<b>1012,5</b>
1978-79	143,9	45,7	194,7	249,3	106,6	71,7	135,5	125,1	66,2	20,3	26,4	68,2	<b>1254,3</b>
1979-80	103,0	271,9	112,5	236,0	68,4	162,4	46,2	128,0	37,9	0,5	16,7	15,2	<b>1198,7</b>
1980-81	184,1	120,3	227,8	209,1	185,5	61,0	59,0	60,2	12,5	1,0	65,5	37,5	<b>1223,5</b>
1981- 82	179,7	182,7	249,0	42,0	138,0	131,0	134,5	91,3	44,0	12,0	43,1	53,0	<b>1300,3</b>
1982-83	113,2	138,6	147,3	51,8	101,2	42,3	31,6	63,3	117,6	77,2	14,7	57,5	<b>956,3</b>
1983- 84	43,6	105,9	235,8	143,9	211,2	159,6	134,1	6,0	81,5	0,5	48,9	15,1	<b>1186,1</b>
1984-85	10,4	78,0	136,8	246,2	52,8	153,0	139,2	61,2	36,1	19,0	0,0	15,0	<b>947,7</b>
1985-86	56,4	295,0	44,8	130,5	337,2	166,9	22,6	204,9	254,0	21,7	7,0	8,4	<b>1549,4</b>
1986-87	177,4	93,6	45,0	282,7	129,0	285,8	48,6	51,5	37,5	16,3	19,6	0,0	<b>1187,0</b>
1987-88	171,9	122,2	44,2	59,8	114,5	90,9	63,1	19,9	44,2	4,0	1,7	23,6	<b>760,0</b>
1988-89	49,4	241,6	176,8	8,5	67,3	78,9	28,3	92,6	39,4	93,2	15,8	16,8	<b>908,6</b>
1989-90	79,8	13,5	132,5	1,0	29,0	23,6	77,6	112,1	7,6	3,8	47,7	30,5	<b>558,7</b>
1990-91	78,6	119,8	280,0	55,8	122,1	66,3	168,7	89,9	57,5	25,8	26,5	35,4	<b>1126,4</b>
<b>Μέση τιμή</b>	<b>109,5</b>	<b>120,0</b>	<b>144,9</b>	<b>128,8</b>	<b>126,5</b>	<b>108,4</b>	<b>81,1</b>	<b>75,4</b>	<b>57,5</b>	<b>25,8</b>	<b>26,5</b>	<b>35,4</b>	<b>1039,7</b>
<b>MAX</b>	<b>229,2</b>	<b>295,0</b>	<b>280,0</b>	<b>282,7</b>	<b>337,2</b>	<b>285,8</b>	<b>168,7</b>	<b>204,9</b>	<b>254,0</b>	<b>93,2</b>	<b>65,5</b>	<b>114,7</b>	<b>1549,4</b>
<b>MIN</b>	<b>10,4</b>	<b>13,5</b>	<b>9,8</b>	<b>1,0</b>	<b>29,0</b>	<b>23,6</b>	<b>22,6</b>	<b>6,0</b>	<b>7,6</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>558,7</b>
<b>Stand.Dev.</b>	<b>59,3</b>	<b>80,6</b>	<b>83,7</b>	<b>90,7</b>	<b>70,7</b>	<b>64,7</b>	<b>48,1</b>	<b>47,4</b>	<b>55,1</b>	<b>30,5</b>	<b>20,4</b>	<b>27,3</b>	<b>225,5</b>
<b>Variance</b>	<b>3512,8</b>	<b>6499,9</b>	<b>7005,1</b>	<b>8231,1</b>	<b>4999,0</b>	<b>4186,5</b>	<b>2312,4</b>	<b>2242,4</b>	<b>3034,2</b>	<b>928,0</b>	<b>414,7</b>	<b>747,0</b>	<b>50841,4</b>
<b>Κύρτωση</b>	<b>-0,73</b>	<b>0,24</b>	<b>-1,27</b>	<b>-1,38</b>	<b>3,37</b>	<b>1,67</b>	<b>-1,45</b>	<b>1,73</b>	<b>9,27</b>	<b>0,30</b>	<b>-0,84</b>	<b>2,7</b>	<b>0,62</b>



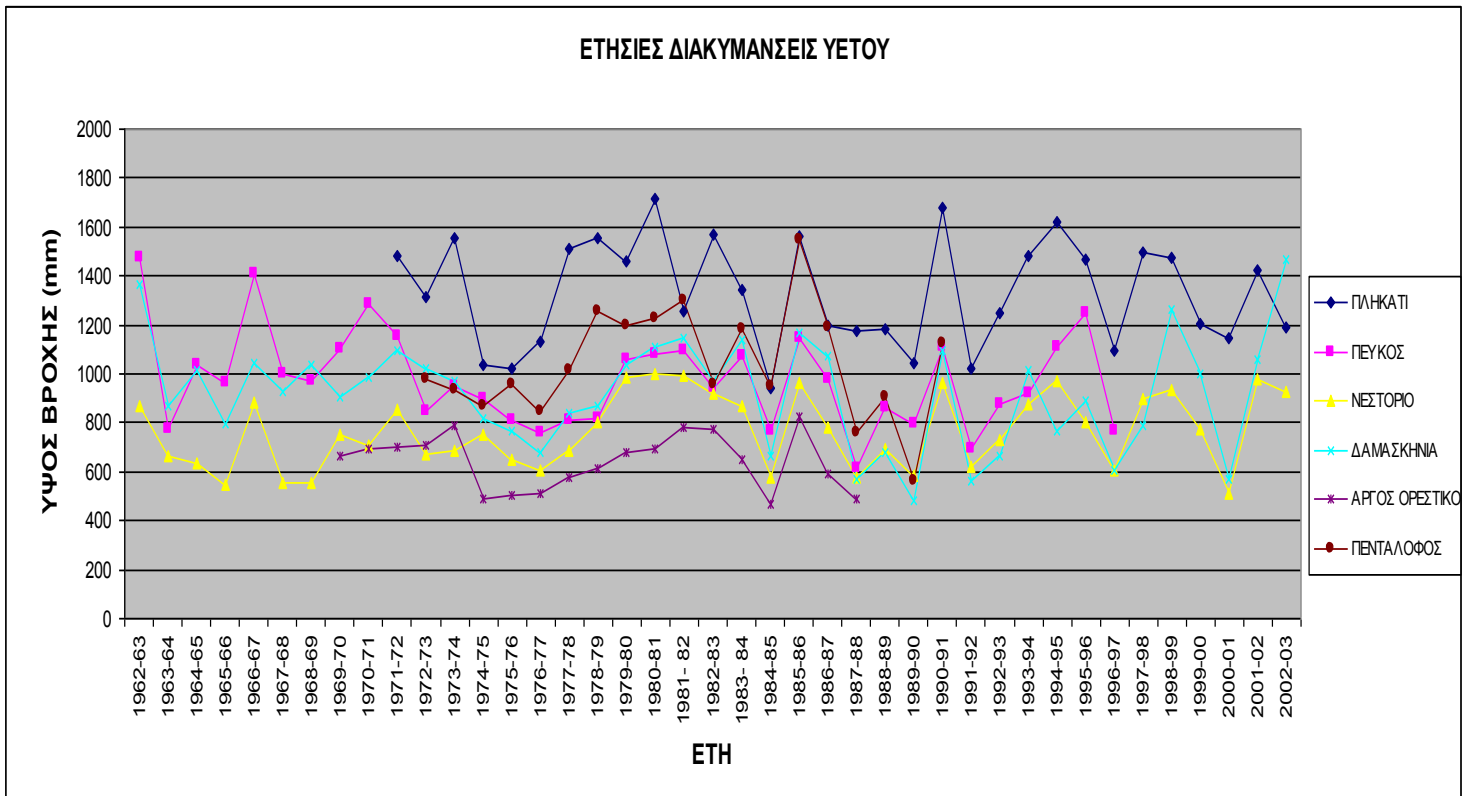
Εικόνα 2.22 : Μέσο μηνιαίο ύψος βροχής σταθμού Πενταλόφου



Εικόνα 2.23: Χρονική μεταβολή ετήσιων βροχοπτώσεων σταθμού Πενταλόφου

**Πίνακας 2.10** Συγκεντρωτικός πίνακας Ετησίων υψών βροχής για την χρονική περίοδο 1962-2003 για όλους τους σταθμούς μελέτης

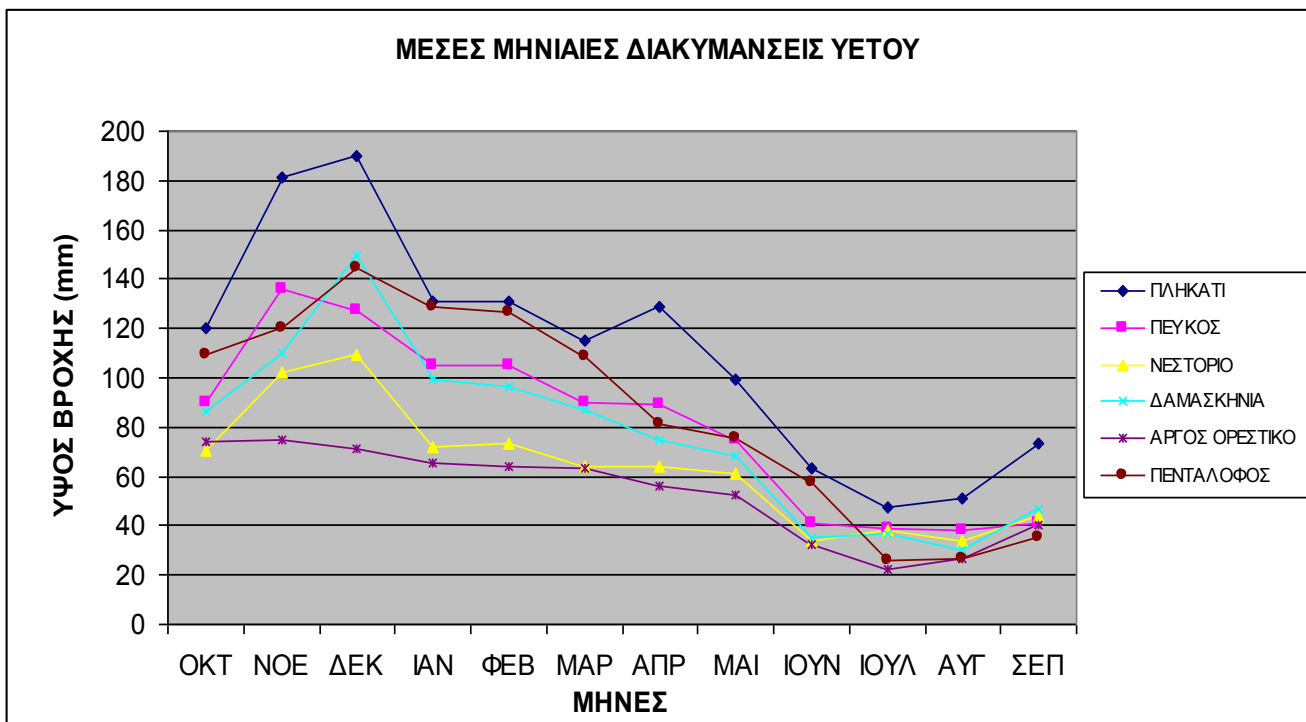
1962-63		<b>1475,1</b>	<b>871,0</b>	<b>1364,7</b>		
1963-64		<b>770,3</b>	<b>666,0</b>	<b>871,4</b>		
1964-65		<b>1037,4</b>	<b>632,0</b>	<b>1012,5</b>		
1965-66		<b>961,5</b>	<b>544,0</b>	<b>794,0</b>		
1966-67		<b>1407,1</b>	<b>880,0</b>	<b>1040,4</b>		
1967-68		<b>1001,3</b>	<b>557,0</b>	<b>926,9</b>		
1968-69		<b>971,3</b>	<b>557,0</b>	<b>1037,5</b>		
1969-70		<b>1105,5</b>	<b>749,0</b>	<b>906,4</b>	<b>663,8</b>	
1970-71		<b>1287,2</b>	<b>711,0</b>	<b>982,8</b>	<b>692,5</b>	
1971-72	<b>1484,5</b>	<b>1151,7</b>	<b>852,0</b>	<b>1095,8</b>	<b>698,9</b>	
1972-73	<b>1317,1</b>	<b>844,9</b>	<b>671,0</b>	<b>1020,0</b>	<b>709,5</b>	<b>978,4</b>
1973-74	<b>1553,6</b>	<b>951,3</b>	<b>685,0</b>	<b>973,7</b>	<b>785,2</b>	<b>937,4</b>
1974-75	<b>1037,4</b>	<b>900,4</b>	<b>751,0</b>	<b>817,8</b>	<b>488,6</b>	<b>868,5</b>
1975-76	<b>1019,3</b>	<b>810,7</b>	<b>652,2</b>	<b>765,6</b>	<b>506,2</b>	<b>956,4</b>
1976-77	<b>1132,9</b>	<b>762,2</b>	<b>602,7</b>	<b>681,6</b>	<b>512,1</b>	<b>844,1</b>
1977-78	<b>1514,4</b>	<b>810,2</b>	<b>689,3</b>	<b>841,2</b>	<b>573,6</b>	<b>1012,5</b>
1978-79	<b>1552,4</b>	<b>816,8</b>	<b>801,8</b>	<b>867,2</b>	<b>615,7</b>	<b>1254,3</b>
1979-80	<b>1460,4</b>	<b>1057,5</b>	<b>985,6</b>	<b>1038,6</b>	<b>675,8</b>	<b>1198,7</b>
1980-81	<b>1716,1</b>	<b>1082,0</b>	<b>1000,2</b>	<b>1108,5</b>	<b>691,2</b>	<b>1223,5</b>
1981- 82	<b>1256,1</b>	<b>1093,4</b>	<b>992,9</b>	<b>1146,7</b>	<b>779,6</b>	<b>1300,3</b>
1982-83	<b>1565,8</b>	<b>942,0</b>	<b>916,2</b>	<b>972,5</b>	<b>772,8</b>	<b>956,3</b>
1983- 84	<b>1346,3</b>	<b>1073,1</b>	<b>867,0</b>	<b>1140,6</b>	<b>652,6</b>	<b>1186,1</b>
1984-85	<b>942,1</b>	<b>769,0</b>	<b>579,5</b>	<b>664,2</b>	<b>464,9</b>	<b>947,7</b>
1985-86	<b>1560,6</b>	<b>1149,4</b>	<b>965,0</b>	<b>1165,4</b>	<b>826,8</b>	<b>1549,4</b>
1986-87	<b>1200,7</b>	<b>981,2</b>	<b>782,2</b>	<b>1075,8</b>	<b>591,4</b>	<b>1187,0</b>
1987-88	<b>1176,2</b>	<b>611,6</b>	<b>575,6</b>	<b>570,3</b>	<b>487,6</b>	<b>760,0</b>
1988-89	<b>1181,6</b>	<b>860,5</b>	<b>693,8</b>	<b>680,3</b>		<b>908,6</b>
1989-90	<b>1044,3</b>	<b>792,9</b>	<b>584,8</b>	<b>479,8</b>		<b>558,7</b>
1990-91	<b>1677,8</b>	<b>1106,9</b>	<b>963,0</b>	<b>1096,5</b>		<b>1126,4</b>
1991-92	<b>1022,2</b>	<b>693,3</b>	<b>617,5</b>	<b>561,0</b>		
1992-93	<b>1250,0</b>	<b>875,3</b>	<b>731,5</b>	<b>662,9</b>		
1993-94	<b>1483,8</b>	<b>920,8</b>	<b>878,0</b>	<b>1011,4</b>		
1994-95	<b>1618,4</b>	<b>1107,9</b>	<b>972,5</b>	<b>769,8</b>		
1995-96	<b>1463,7</b>	<b>1250,0</b>	<b>804,5</b>	<b>891,5</b>		
1996-97	<b>1096,8</b>	<b>769,1</b>	<b>605,2</b>	<b>604,2</b>		
1997-98	<b>1495,4</b>		<b>897,6</b>	<b>790,9</b>		
1998-99	<b>1477,2</b>		<b>934,4</b>	<b>1259,7</b>		
1999-00	<b>1204,8</b>		<b>771,3</b>	<b>997,0</b>		
2000-01	<b>1146,8</b>		<b>509,7</b>	<b>572,8</b>		
2001-02	<b>1421,5</b>		<b>978,4</b>	<b>1055,8</b>		
2002-03	<b>1187,6</b>		<b>929,4</b>	<b>1465,8</b>		



**Εικόνα 2.24 :** Ετήσιες διακυμάνσεις υετού

**Πίνακας 2.1** Συγκεντρωτικός πίνακας Μέσων Μηνιαίων υψών βροχής για τους μήνες Οκτ.- Σεπ. για όλους τους σταθμούς μελέτης

ΥΨΗ ΒΡΟΧΗΣ						
ΟΚΤ	120	89,6	70,7	86,4	73,9	109,5
ΝΟΕ	181	136,0	102,0	110,0	74,6	120,0
ΔΕΚ	190	127,0	109,0	150,0	70,9	144,9
ΙΑΝ	131	105,0	72,3	99,5	65,3	128,8
ΦΕΒ	131	105,0	73,4	96,5	63,9	126,5
ΜΑΡ	115	89,9	64,0	87,4	63,3	108,4
ΑΠΡ	129	89,5	64,1	75,0	55,8	81,1
ΜΑΙ	99	74,6	61,2	68,1	52,5	75,4
ΙΟΥΝ	63,4	41,1	33,6	34,9	32,1	57,5
ΙΟΥΛ	47,3	39,1	38,0	36,9	22,1	25,8
ΑΥΓ	50,8	38,0	33,7	30,0	26,7	26,5
ΣΕΠ	73,6	41,3	44,1	46,8	40,5	35,4



**Εικόνα 2.25** : Μέσες μηνιαίες διακυμάνσεις υετού

### 2.8.1 Βροχοπτώσεις και υψόμετρα

Στην γενική περίπτωση η αύξηση του γεωδαιτικού υψόμετρου συνεπάγεται την αύξηση του ετήσιου ύψους βροχής, χωρίς αυτό να επιβεβαιώνεται πάντα, λόγω τοπικών γεωγραφικών και κλιματολογικών συνθηκών. Συνήθως γίνεται η παραδοχή γραμμικής συσχέτισης μεταξύ των δύο αυτών παραμέτρων που εκφράζεται από την παρακάτω σχέση:

$$h = a \cdot Z + b$$

Όπου: a,b: παράμετροι μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων

Z : υψόμετρο σταθμών (m)

h : μέσο υπερετήσιο ύψο βροχής σταθμών (mm)

Με βάση των στοιχείων του πίνακα 2.12 προέκυψε η Εικόνα 2.26 όπου παρουσιάζονται τα γεωδαιτικά υψόμετρα των σταθμών και τα μέσα υπερετήσια ύψη βροχής τους. Για την περιοχή έρευνας διερευνήθηκε η σχέση που συνδέει τις δύο αυτές παραμέτρους και βρέθηκε ότι υπάρχει ισχυρή γραμμική συσχέτιση, με συντελεστή συσχέτισης 0,94. Αξίζει να σημειωθεί τα υπερετήσια ύψη βροχής αναφέρονται σε κοινή χρονική βάση.

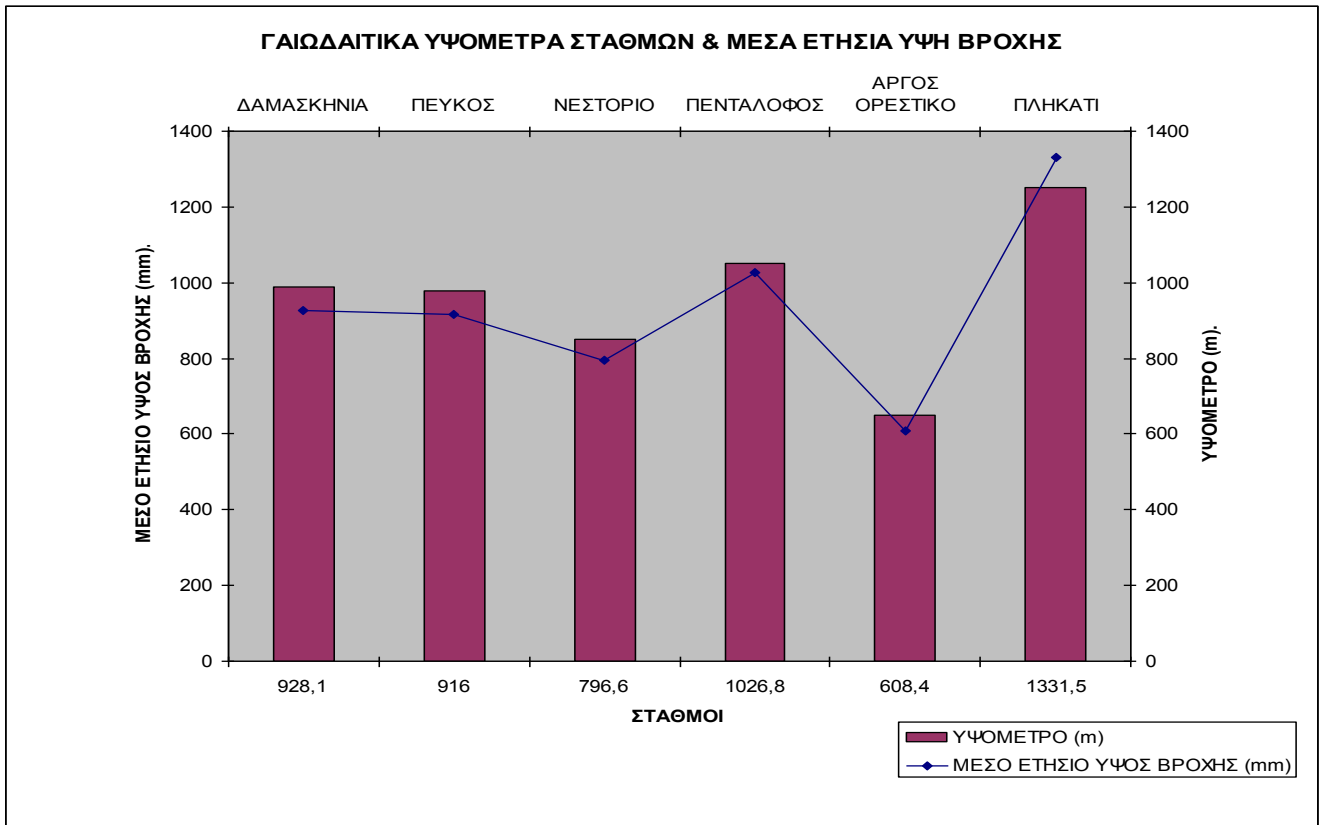
Η εξίσωση της ευθείας που προέκυψε από την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων δίνεται από την σχέση:

$$h = 1.0596 \cdot Z - 26.88$$

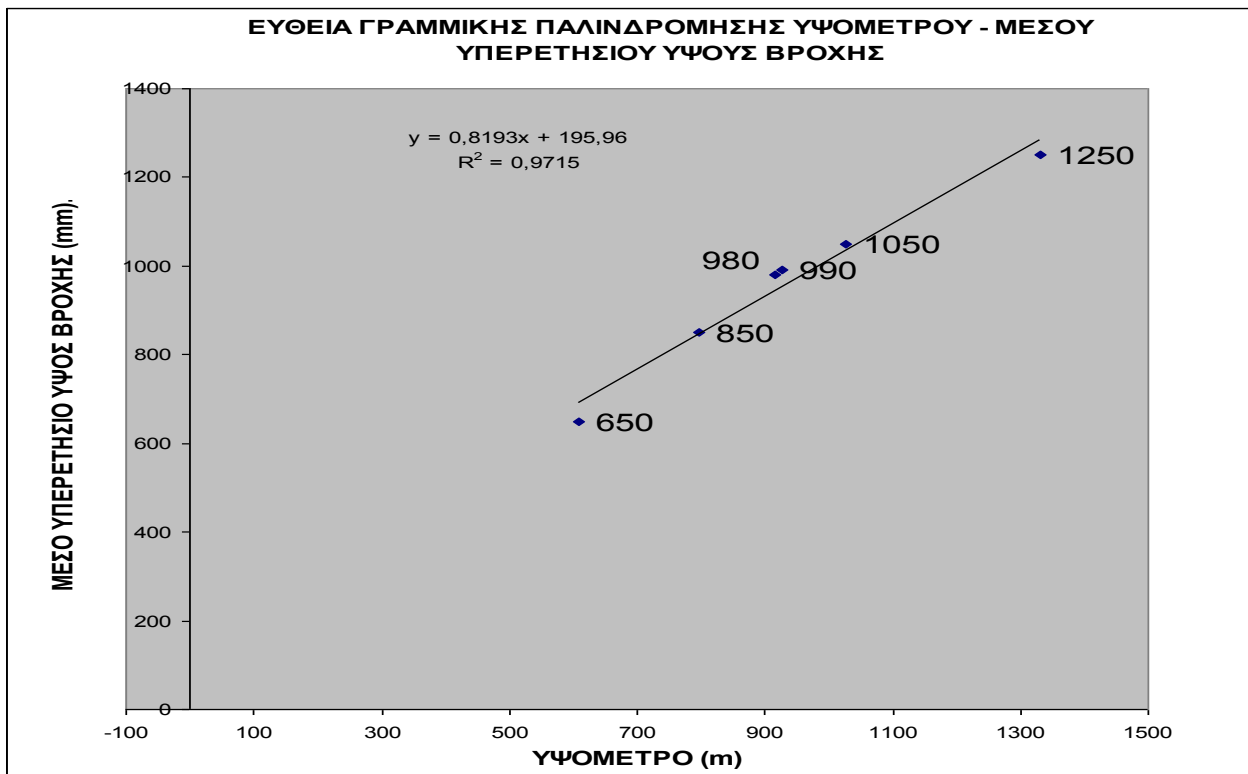
Ενώ στην Εικόνα 2.27 παρουσιάζεται η ευθεία της γραμμικής παλινδρόμησης.

**Πίνακας 2.12.** Μέσα ετήσια ύψη βροχής και γεωδαιτικά υψόμετρα των σταθμών μελέτης

ΣΤΑΘΜΟΣ	ΔΑΜΑΣΚΗΝΙΑ	ΠΕΥΚΟΣ	ΝΕΣΤΟΡΙΟ	ΠΕΝΤΑΛΟΦΟΣ	ΑΡΓΟΣ ΟΡΕΣΤΙΚΟ	ΠΛΗΚΑΤΙ
ΥΨΟΜΕΤΡΟ (m)	990	980	850	1050	650	1250
ΜΕΣΟ ΕΤΗΣΙΟ ΥΨΟΣ ΒΡΟΧΗΣ (mm)	928,1	916	796,6	1026,8	608,4	1331,5



Εικόνα 2.26 : Γεωδαιτικά υψόμετρα σταθμών και μέσα υπερετήσια ύψη βροχής



Εικόνα 2.27: Ευθεία γραμμικής παλινδρόμησης υψομέρου – μέσου υπερετήσιου ύψους βροχής

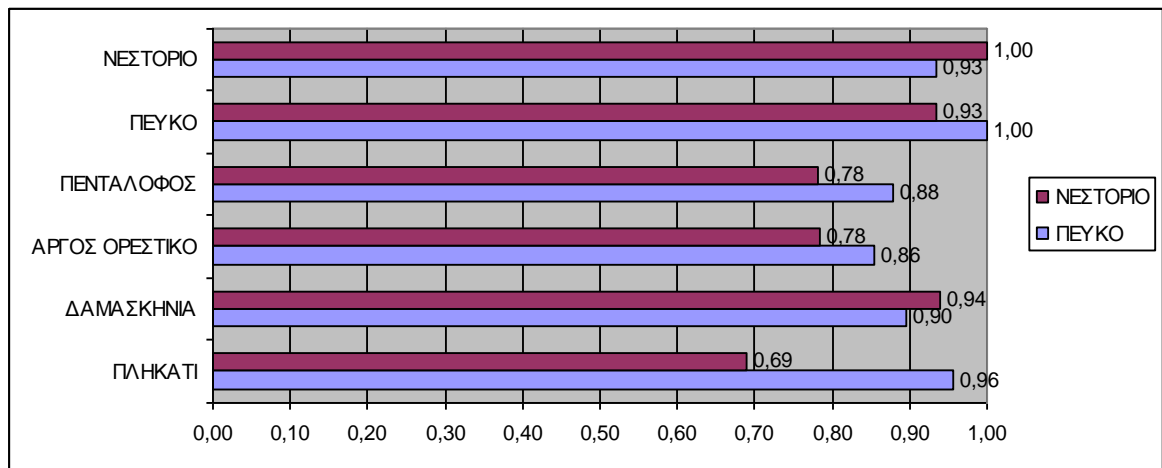


### 2.8.2. Συσχετίσεις μέσω μηνιαίων υψών βροχής

Για την περιοχή έρευνας έγιναν οι συσχετίσεις όλων των σταθμών σε σχέση με τους σταθμούς του Πεύκου και του Νεστορίου. Στον πίνακα φαίνονται οι συντελεστές συσχέτισης μεταξύ των σταθμών. Όπως παρουσιάζεται και από τον πίνακα φαίνεται ότι οι συσχετίσεις των σταθμών κυμαίνονται από 0.69 έως 0.94, οι οποίοι θεωρούνται πολύ ικανοποιητικοί.

**Πίνακας 2.13** Συντελεστές συσχέτισης μέσω μηνιαίων βροχοπτώσεων σταθμών

ΣΤΑΘΜΟΙ	ΠΕΥΚΟ	ΝΕΣΤΟΡΙΟ
ΠΛΗΚΑΤΙ	0,96	0,69
ΔΑΜΑΣΚΗΝΙΑ	0,90	0,94
ΑΡΓΟΣ ΟΡΕΣΤΙΚΟ	0,86	0,78
ΠΕΝΤΑΛΟΦΟΣ	0,88	0,78
ΠΕΥΚΟ	1,00	0,93
ΝΕΣΤΟΡΙΟ	0,93	1,00



**Εικόνα 2.28:** Συντελεστές συσχέτισης μηνιαίων βροχοπτώσεων σταθμών

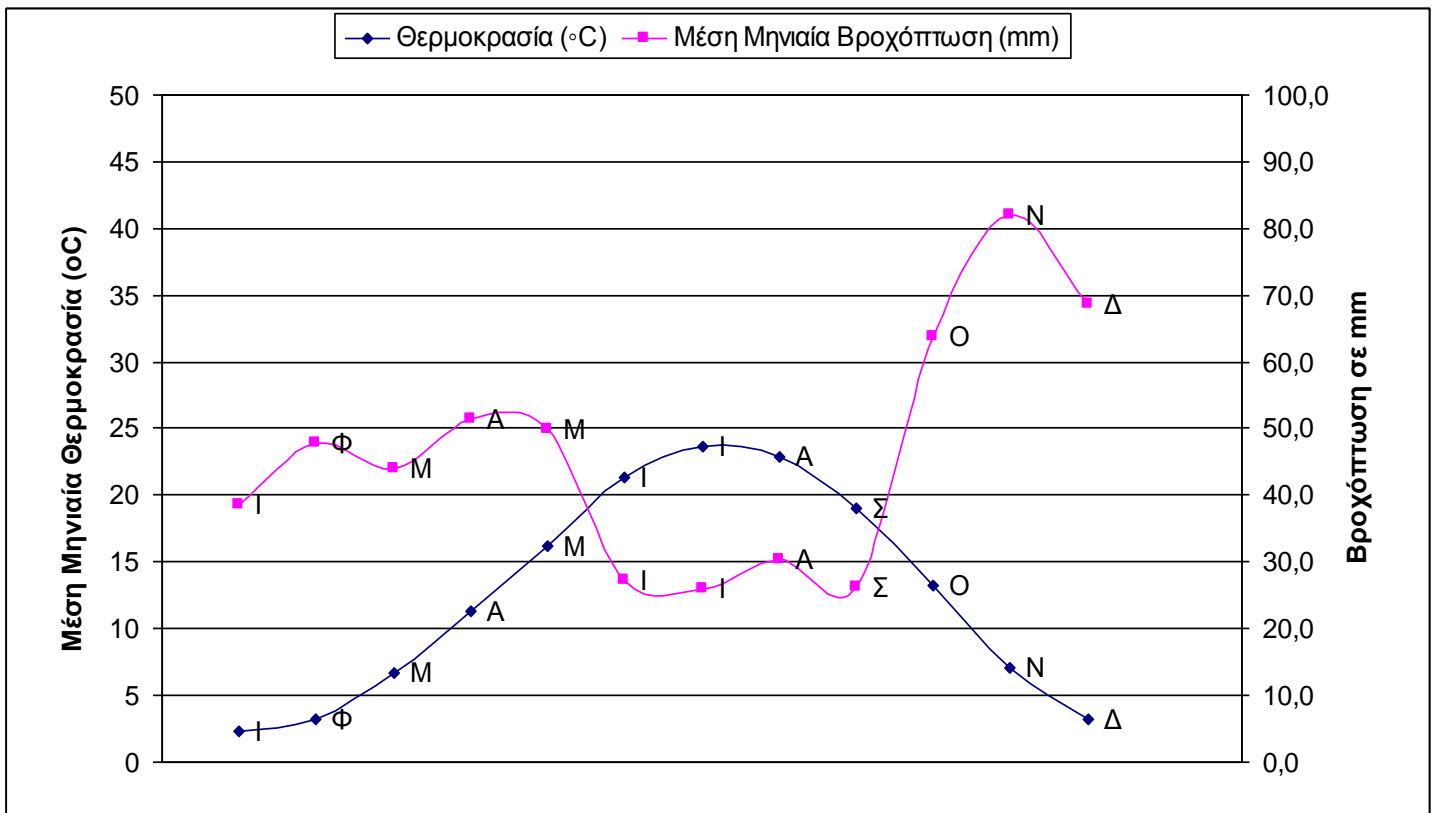
### 2.8.3 Θερμοκρασία, σχετική υγρασία αέρος

Στους πίνακες 2.14, 2.15 και 2.16 δίνονται οι μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες και βροχοπτώσεις της χρονικής περιόδου 1978 έως 1993 των υδρολογικών σταθμών Καστοριάς, Κρανιάς και Φλώρινας ενώ στις Εικόνες 2.29, 2.30 και 2.31 δίνονται τα αντίστοιχα ομβροθερμικά διαγράμματα.

Πίνακας 2.14. Μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες και βροχοπτώσεις για τον σταθμό Καστοριάς

#### ΚΑΣΤΟΡΙΑ

	Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ι	Ι	Α	Σ	Ο	Ν	Δ	ΜΟ
Θερμοκρασία (°C)	2,3	3,2	6,7	11,3	16,2	21,3	23,7	22,9	19	13,2	7,1	3,2	12,51
Μέση Μηνιαία Βροχόπτωση (mm)	38,6	47,9	43,9	51,3	50,0	27,2	25,9	30,3	26,1	63,7	81,9	68,7	46,3

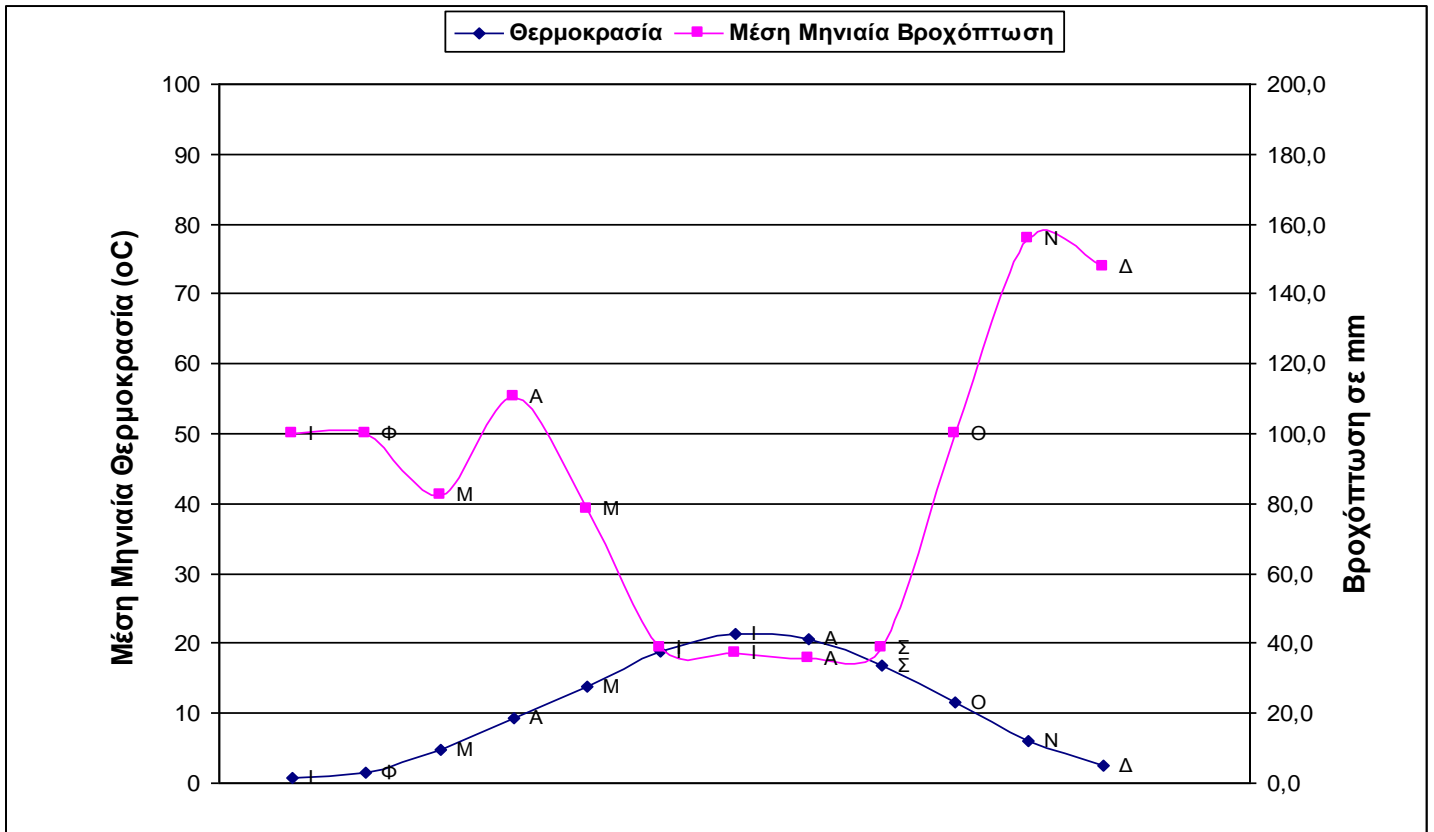


Εικόνα 2.29 : Ομβροθερμικό διάγραμμα σταθμού Καστοριάς

Πίνακας 2.15 Μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες και βροχοπτώσεις για τον σταθμό Κρανιάς

## ΚΡΑΝΙΑ

	Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ι	Ι	Α	Σ	Ο	Ν	Δ	ΜΟ
Θερμοκρασία	0,85	1,48	4,84	9,28	13,86	18,86	21,4	20,7	17	11,49	6,09	2,55	10,69
Μέση Μηνιαία Βροχόπτωση (mm)	100,1	99,9	82,2	110,7	78,3	38,6	37,4	35,8	38,9	99,8	155,9	147,7	85,4

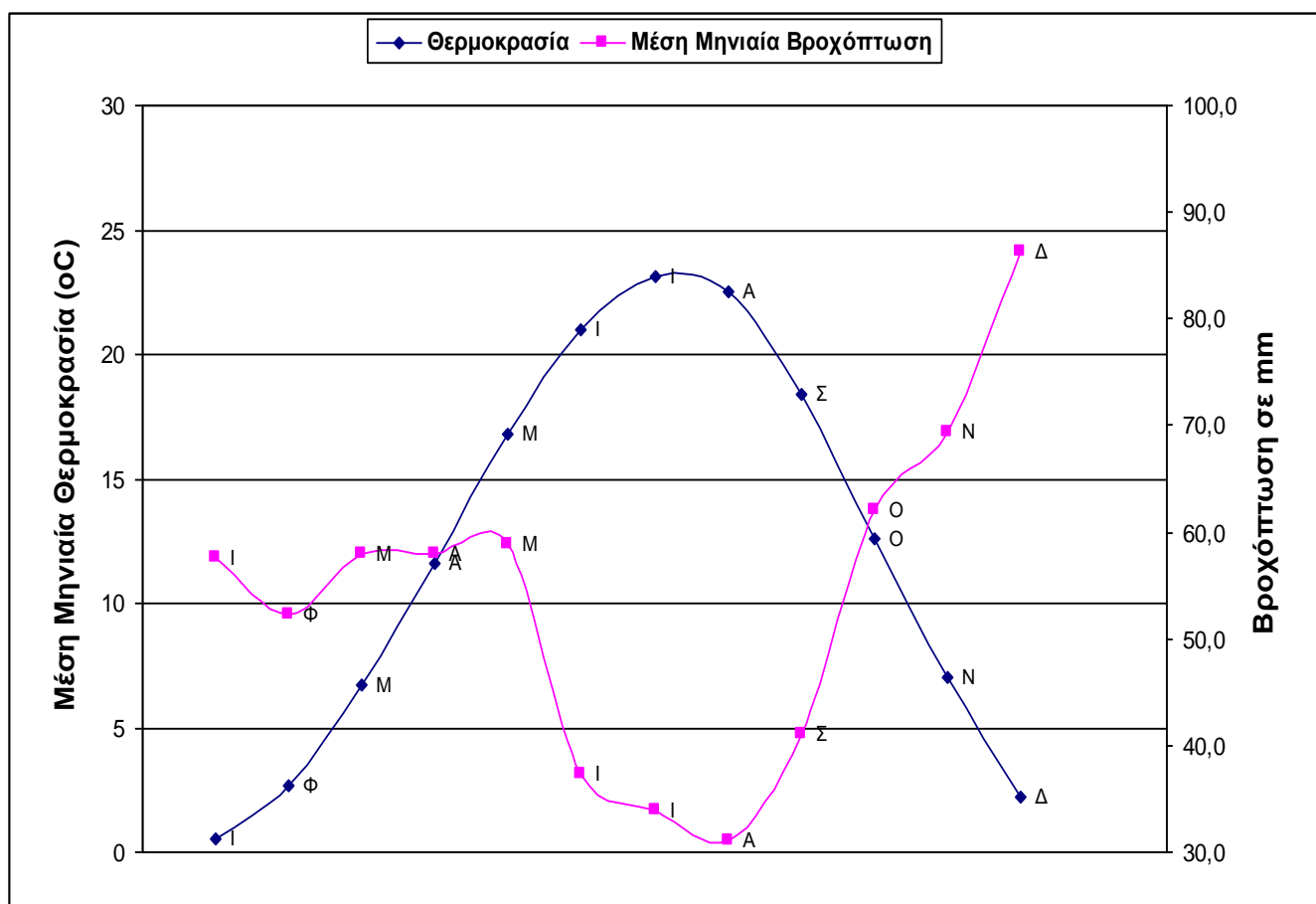


Εικόνα 2.30: Ομβροθερμικό διάγραμμα σταθμού Κρανιάς

Πίνακας 2.16. Μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες και βροχοπτώσεις για τον σταθμό Φλώρινας

## ΦΛΩΡΙΝΑ

	Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ι	Ι	Α	Σ	Ο	Ν	Δ	ΜΟ
Θερμοκρασία	0,5	2,7	6,7	11,6	16,8	21	23,1	22,5	18,4	12,6	7	2,2	12,09
Μέση Μηνιαία Βροχόπτωση (mm)	57,6	52,3	57,9	57,9	58,9	37,3	34,0	31,0	41,1	62,1	69,4	86,2	53,8



Εικόνα 2.31: Ομβροθερμικό διάγραμμα σταθμού Φλώρινας

## 2.9 ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥΣ ΣΤΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Μετά την ολοκλήρωση των πρώτων κεφαλαίων που διαπραγματεύονται την περιγραφή υδρολογικών μοντέλων και μια γενικής φύσεως θεώρηση των βασικών χαρακτηριστικών των μεθόδων για την ανάλυση των υδρολογικών δεδομένων, θα περάσουμε στην παρουσίαση μιας πολύ σημαντικής κατηγορίας μοντέλων προσομοίωσης, που είναι γνωστά ως νευρωνικά δίκτυα (neural networks).

### 2.9.1. Εφαρμογές των Νευρωνικών Δικτύων

Τα τεχνικά νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούνται είτε αυτόνομα είτε σε συνδυασμό με άλλες τεχνικές ως εναλλακτικός τρόπος επίλυσης πολλών προβλημάτων. Τέτοια προβλήματα είναι:

- Η βελτιστοποίηση διαδικασιών (optimisation)
- Η αναγνώριση προτύπων (pattern recognition)
- Η επεξεργασία σήματος (signal processing)
- Το προσαρμοστικό φιλτράρισμα (adaptive filtering)
- Η συμπίεση δεδομένων (data compression)
- Η αναγνώριση και επεξεργασία της ανθρώπινης φωνής
- Η επεξεργασία εικόνας

Επίσης, οι πιο γρήγοροι υπολογιστές και αλγόριθμοι έχουν κάνει δυνατή την χρήση νευρωνικών δικτύων στην επίλυση πολύπλοκων βιομηχανικών προβλημάτων, τα οποία απαιτούσαν πάρα πολλούς υπολογισμούς. Από την πρώτη τους εφαρμογή σε προσαρμοζόμενους εξισωτές καναλιών το 1984 μέχρι σήμερα έχουν εφαρμοστεί σε μεγάλη ποικιλία εφαρμογών όπως φαίνεται παρακάτω:

**Αεροπορία:** Υψηλής απόδοσης αυτόματοι πιλότοι αεροπλάνων, προσομοιωτές πτήσης, συστήματα αυτομάτου ελέγχου αεροπλάνων, συστήματα ανίχνευσης βλαβών.

**Αυτοκίνηση:** Αυτοκινούμενα συστήματα αυτόματης πλοήγησης.

**Τραπεζικές εφαρμογές:** Αναγνώστες επιταγών και άλλων παραστατικών, συστήματα αξιολόγησης αιτήσεων δανειοδότησης .

**Άμυνα:** Πλοήγηση όπλων, ανίχνευση στόχων, νέα είδη αισθητήρων, σόναρ, ραντάρ, ψηφιακή επεξεργασία σημάτων, συμπίεση δεδομένων, εξαγωγή χαρακτηριστικών, αναγνώριση σήματος / εικόνας.

**Ηλεκτρονική:** Πρόβλεψη ακολουθίας κωδίκων, μορφοποίηση ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, έλεγχος διεργασιών, διάγνωση βλαβών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, μηχανική όραση, σύνθεση φωνής.

**Οικονομία:** Οικονομική ανάλυση, πρόβλεψη τιμών συναλλάγματος.

**Κοινωνική ασφάλιση:** Αξιολόγηση εφαρμοζόμενης πολιτικής, βελτιστοποίηση παραγωγής.

**Βιομηχανία:** Βιομηχανικός έλεγχος διεργασιών, ανάλυση και σχεδίαση προϊόντων, συστήματα ποιοτικού ελέγχου, διάγνωση βλαβών διεργασιών και

μηχανών, ανάλυση σχεδιασμού χημικών προϊόντων, δυναμικό μοντελάρισμα συστημάτων χημικών διεργασιών, σχεδιασμός και διοίκηση.

**Ιατρική:** Ανάλυση καρκινικών κυττάρων, ανάλυση Ηλεκτροεγκεφαλογραφήματος και Ηλεκτροκαρδιογραφήματος, βελτιστοποίηση χρόνου νοσηλείας, μείωση νοσοκομειακού κόστους, βελτίωση ποιότητας νοσοκομείων.

**Γεωλογικές έρευνες:** Εντοπισμός πετρελαίου και φυσικού αερίου.

**Ρομποτική:** Έλεγχος τροχιάς και σύστημα όρασης ρομπότ.

**Επεξεργασία φωνής:** Αναγνώριση φωνής, συμπίεση φωνής, σύνθεση φωνής από κείμενο.

**Χρηματιστηριακές εφαρμογές:** Ανάλυση αγοράς, πρόβλεψη τιμών μετοχών.

**Τηλεπικοινωνίες:** Συμπίεση εικόνας και δεδομένων, αυτοματοποιημένες υπηρεσίες πληροφοριών, μετάφραση πραγματικού χρόνου, συστήματα επεξεργασίας πληρωμών.

**Μεταφορές:** Συστήματα διάγνωσης βλαβών φρένων, χρονοπρογραμματισμός οχημάτων, συστήματα δρομολόγησης.

Από το παραπάνω πλήθος εφαρμογών, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι τα νευρωνικά δίκτυα έχουν αναπτυχθεί ταχύτατα. Γι' αυτό το λόγο έχουν επενδυθεί πολλά χρήματα τόσο για την ανάπτυξη λογισμικού όσο και για την ανάπτυξη υλικού.

## 2.10. Σύντομη Ιστορική Αναδρομή

Η μοντέρνα περίοδος των νευρωνικών δικτύων λέγεται ότι άρχισε με την πρωτοποριακή δουλειά των McCulloch και Pitts (1943). Ο πρώτος ήταν ψυχίατρος και ο δεύτερος μεγαλοφυής μαθηματικός. Σύμφωνα με τον Rall (1990) η κλασική εργασία των McCulloch και Pitts έγινε μέσα σε μια κοινωνία που ασχολούνταν με τους νευρώνες στο πανεπιστήμιο του Σικάγο, για πάνω από 5 χρόνια. Αυτή η εργασία περιέγραφε το *λογικό λογισμό των νευρωνικών δικτύων*. Είναι αξιοσημείωτο το ότι ο von Neumann χρησιμοποίησε ιδεατά στοιχεία καθυστέρησης τα οποία είχαν υπολογιστεί από τα ιδεατά στοιχεία νευρώνων των McCulloch και Pitts, για την κατασκευή του EDVAC ( Electronic Discrete Variable Automatic Computer), ο οποίος κατάληξε στον ENIAC, τον πρώτο γενικού σκοπού υπολογιστή.

Η επόμενη μεγάλη ανάπτυξη πάνω στα νευρωνικά δίκτυα, ήρθε το 1949 με την έκδοση του βιβλίου του Hebb με τίτλο *“The Organization of Behavior”*, στο οποίο έγινε για πρώτη φορά μια ιδιαίτερη δήλωση ενός *«φυσιολογικού κανόνα μάθησης για συναπτικές τροποποιήσεις»*. Πιο συγκεκριμένα ο Hebb πρότεινε ότι *«η συνδετικότητα του εγκεφάλου συνεχώς αλλάζει καθώς ο οργανισμός μαθαίνει διάφορες εργασίες, και ότι οι νευρωνικοί συγκεντρωτές δημιουργούνται από τέτοιες αλλαγές»*. Επίσης πρότεινε το διάσημο *αίτημα μάθησης* σύμφωνα με το οποίο *«η αποτελεσματικότητα μιας σύναψης μεταβλητής ανάμεσα σε δύο νευρώνες αυξάνεται από την επαναλαμβανόμενη ενεργοποίηση του ενός νευρώνα από τον άλλο κατά μήκος της σύναψης»*.

Η αναφορά των Rochester , Holland , Habit και Duda (1956) είναι ίσως η πρώτη προσπάθεια για *χρήση υπολογιστή που χρησιμοποιεί την εξομοίωση*, για να ελεγχθεί μια καλά σχηματισμένη νευρωνική θεωρία βασισμένη στο



αίτημα μάθησης του Hebb. Η εξομοίωση έδειξε ότι χρειαζόταν να προστεθεί παρεμπόδιση ώστε η θεωρία να δουλέψει πραγματικά. Τον ίδιο χρόνο ο Uttley παρουσίασε την αποκαλούμενη “διαρρέουσα ολοκλήρωση” ή “νευρώνας φωτιάς” που αργότερα αναλύθηκε από τον Caianiello.

Το 1952 εκδόθηκε το βιβλίο του Ashby με τίτλο *“Design for a brain: The Origin of Adaptive Behavior”*, το οποίο ασχολήθηκε με την *βασική έννοια ότι η προσαρμοζόμενη συμπεριφορά δεν είναι έμφυτη αλλά μαθαίνεται*. Το 1954 ο Minsky έγραψε τη διδακτορική του διατριβή με τίτλο *“Theory of Neural-Analog Reinforcement Systems and Its Application to the Brain-Model Problem”* και το 1961 ο ίδιος έγραψε μια εργασία με τίτλο *“Steps Toward Artificial Intelligence”*. Επίσης το 1954 η ιδέα των *μη γραμμικών προσαρμοζόμενων φίλτρων* προτάθηκε από τον Gabor (πρωτοπόρος της θεωρίας επικοινωνιών και εφευρέτης του *ολογραφήματος*), ο οποίος υλοποίησε μια τέτοια μηχανή στην οποία η μάθηση επιτυγχανόταν με τροφοδότηση δειγμάτων στοχαστικών διαδικασιών στη μηχανή, μαζί με τη συνάρτηση-στόχο, την οποία ήταν αναμενόμενο να παράγει η μηχανή.

Ένα θέμα ιδιαίτερου ενδιαφέροντος για τα νευρωνικά δίκτυα είναι αυτό της *σχεδίασης ενός αξιόπιστου δικτύου με νευρώνες που μπορούν να θεωρηθούν σαν μη αξιόπιστα στοιχεία*. Αυτό το σημαντικό πρόβλημα λύθηκε από τον von Neumann (1956) χρησιμοποιώντας την ιδέα του πλεονασμού. 15 χρόνια μετά την έκδοση της εργασίας των McCulloch και Pitts, μια νέα προσέγγιση πάνω στο πρόβλημα της αναγνώρισης προτύπων έγινε από τον Rosenblatt (1958) στην εργασία του πάνω στο αισθητήριο (perceptron). Το ιδιαίτερο επίτευγμα του ήταν το αποκαλούμενο *θεώρημα σύγκλισης αισθητηρίου* (perceptron convergence theorem). Το 1960 οι Widrow και Hoff πρότειναν τον *αλγόριθμο*

ελάχιστου μέσου τετραγώνου (least mean-square-LMS) και τον χρησιμοποίησαν για να σχηματίσουν το *Adaline* (*adaptive linear element*). Η διαφορά ανάμεσα στο αισθητήριο και στο Adaline βρίσκεται στον τρόπο μάθησης. Ένα από τα από τα πρόσφατα εκπαιδευσιμα νευρωνικά δίκτυα με πολλαπλά στοιχεία είναι η δομή Madaline (Widrow). Κατά την διάρκεια της κλασικής περιόδου του perceptron ('60) πιστευόταν ότι τα νευρωνικά δίκτυα μπορούσαν να κάνουν τα πάντα. Αλλά τότε εκδόθηκε το βιβλίο των Minsky και Papert που με τη βοήθεια των μαθηματικών απέδειξε ότι υπάρχουν όρια πάνω στο τι μπορεί να υπολογιστεί από τα αισθητήρια. Ένα σημαντικό πρόβλημα πάνω στη σχεδίαση ενός πολύ-επίπεδου αισθητηρίου είναι το *πρόβλημα της ανάθεσης εμπιστοσύνης* (credit assignment problem), το οποίο βρήκε την λύση του μόλις την δεκαετία του 1980.

Κατά την δεκαετία του '70 λόγω των προβλημάτων εγκαταλείφθηκε το ενδιαφέρον πάνω στα νευρωνικά δίκτυα. Μια σημαντική ενέργεια την δεκαετία αυτή ήταν οι *χάρτες αυτό-οργάνωσης με ανταγωνιστική μάθηση*.

Το 1980 έγιναν πολλές εργασίες πάνω στην θεωρία αλλά και στον σχεδιασμό των νευρωνικών δικτύων. Ο Grossberg (1980) ανέπτυξε μια καινούργια αρχή αυτό-οργάνωσης που συνδυάζει φιλτράρισμα από “κάτω προς τα πάνω” και αντίθετη αύξηση σε μικρή μνήμη με από “πάνω προς τα κάτω” ταίριασμα προτύπων και σταθεροποίηση του κώδικα μάθησης. Δεδομένης μιας τέτοιας ικανότητας, και αν το πρότυπο εισόδου ταιριάζει με την ανάδραση μάθησης, λαμβάνει χώρα μία δυναμική κατάσταση που καλείται *adaptive resonance*. Αυτό το φαινόμενο δίνει την βάση για μια νέα κατηγορία νευρωνικών δικτύων γνωστά σαν *adaptive resonance theory (ART)*.

Το 1982 ο Hopfield χρησιμοποίησε την ιδέα μια συνάρτησης ενέργειας για

να φτιάξει ένα νέο τρόπο κατανόησης του υπολογισμού που γίνεται από τα δίκτυα με συμμετρικές συναπτικές συνδέσεις. Επιπλέον καθιέρωσε τον *ισομορφισμό* ανάμεσα σε τέτοια *περιοδικά δίκτυα* και σε ένα *Ising μοντέλο* που χρησιμοποιείται στην στατιστική. Αυτή η αναλογία άνοιξε τον δρόμο για ένα κατακλυσμό θεωριών για τα νευρωνικά δίκτυα. Αυτή η συγκεκριμένη τάξη νευρωνικών δικτύων με ανατροφοδότηση έτυχε ιδιαίτερης προσοχής κατά τη δεκαετία του '80 και με το χρόνο έγιναν γνωστά σαν δίκτυα Hopfield.

Το 1983 οι Cohen και Grossberg έδωσαν μια νέα αρχή για σχεδίαση μιας *διευθυνσιοδοτούμενης μνήμης* (content-addressable memory) που περιλαμβάνει την έκδοση συνεχούς χρόνου του δικτύου Hopfield σαν μια ιδιαίτερη περίπτωση. Μια ακόμα σημαντική ανάπτυξη το 1982 ήταν η έκδοση της εργασίας του Kohonen πάνω στους χάρτες αυτό-οργάνωσης, χρησιμοποιώντας *μιας ή δύο διαστάσεων δικτυωτές δομές*. Το 1983 οι Kirkpatrick, Gallat και Vecchi περιέγραψαν μια νέα διαδικασία που λέγεται *εξομοιωμένη ανόπτωση* (*Simulated Annealing*) για λύση προβλημάτων συνδυαστικής βελτιστοποίησης. Η εξομοιωμένη ανόπτωση χρησιμοποιείται στην στατιστική θερμοδυναμική και βασίζεται σε μια απλή τεχνική. Την ίδια χρονιά εκδόθηκε μια εργασία από τους Burto, Sutton και Anderson πάνω στην *ενισχυμένη μάθηση*, η οποία δημιούργησε μεγάλο ενδιαφέρον πάνω στην ενισχυμένη μάθηση και την εφαρμογή της. Το 1984 ο Braitenberg εξέδωσε ένα βιβλίο με τίτλο "*Vehicles: Experiments in Synthetic Psychology*" το οποίο περιγράφει διάφορες μηχανές με απλή εσωτερική αρχιτεκτονική, και το οποίο ενσωματώνει μερικές σημαντικές αρχές της αυτό-οργανούμενης απόδοσης. Το 1986 η ανάπτυξη του αλγορίθμου για πίσω διάδοση (back-propagation algorithm) παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από τον Rumelhart. Αυτός ο

αλγόριθμος έγινε πολύ δημοφιλής και έδωσε νέα ώθηση στις εφαρμογές των νευρωνικών δικτύων.

Το 1988 ο Linsker περιέγραψε μια νέα αρχή για την αυτό-οργάνωση σε ένα δίκτυο αισθητηρίων (perceptrons). Η αρχή αυτή σχεδιάστηκε ώστε να διατηρεί μέγιστη πληροφορία σχετικά με τα πρότυπα ενεργειών, που υπόκεινται σε περιορισμούς όπως συνοπτικές συνδέσεις και δυναμικές περιοχές σύναψης. Ο Linsker χρησιμοποίησε αφηρημένες έννοιες πάνω στη θεωρία πληροφοριών ώστε να σχηματίσει τη αρχή της διατήρησης μέγιστης πληροφορίας.

Επίσης το 1988 οι Broomhead και Lowe περιέγραψαν μία διαδικασία για το σχεδιασμό “προς τα εμπρός τροφοδότησης” (feedforward) δικτύων χρησιμοποιώντας *συναρτήσεις ακτινικής βάσης (Radial Basis Functions - RBF)*, που είναι μια παραλλαγή των πολυεπίπεδων αισθητηρίων. Το 1989 εκδόθηκε το βιβλίο του Mead με τίτλο “*VLSI and Neural Systems*”. Αυτό το βιβλίο δίνει μια ασυνήθιστη μίξη περιεχομένων από την νευροβιολογία και την τεχνολογία VLSI. Ίσως περισσότερο από κάθε άλλη έκδοση, η εργασία του Hopfield (1982) και το δίτομο βιβλίο των Rumelhart και McClelland (1986), να ήταν οι πιο σημαίνουσες εκδόσεις υπεύθυνες για την αναζωογόνηση του ενδιαφέροντος για τα νευρωνικά δίκτυα στην δεκαετία του ‘80.

Τα νευρωνικά δίκτυα έχουν σίγουρα διανύσει πολύ δρόμο από την εποχή των McCulloch και Pitts. Πραγματικά έχουν εγκαθιδρυθεί σαν ενδοπειθαρχικό αντικείμενο με βαθιές ρίζες στην επιστήμη των νευρώνων, στην ψυχολογία, στα μαθηματικά, στις φυσικές επιστήμες και στην μηχανική. *Δεν είναι αναγκαίο να πούμε ότι είναι εδώ για να μείνουν και θα συνεχίσουν να αναπτύσσονται σε θεωρία, σχεδιασμό και εφαρμογές.*

## 2.11. Εισαγωγή στα Νευρωνικά Δίκτυα

Τα νευρωνικά δίκτυα είναι δομές οι οποίες χαρακτηρίζονται από την δυνατότητα επίλυσης μιας μεγάλης κατηγορίας προβλημάτων που περιλαμβάνουν την δημιουργία μοντέλων για τα πάσης φύσεως δυναμικά συστήματα, το χαρακτηρισμό και την πρόβλεψη χρονοσειρών και την αναγνώριση προτύπων.

Υπάρχουν πολλοί λόγοι που συνηγορούν στη χρήση νευρωνικών δικτύων και οι πιο σημαντικοί από αυτούς είναι οι ακόλουθοι:

- Τα νευρωνικά δίκτυα χαρακτηρίζονται από **επιτυχή δυνατότητα περιγραφής ενός συστήματος σύμφωνα με τις αρχές της πολυωνυμικής προσέγγισης (polynomial approximation)**. Χρησιμοποιώντας αυτή την μεθοδολογία, μπορούμε να προσεγγίσουμε κάθε συνάρτηση με την βοήθεια ενός πολυωνύμου, οι συντελεστές του οποίου υπολογίζονται από την διαδικασία ελαχιστοποίησης του σφάλματος προσέγγισης (approximation error). Το βασικό μειονέκτημα αυτής της μεθόδου – καθώς και πολλών άλλων που στηρίζονται σε αυτή- είναι η εξαιρετική ευαισθησία της στην επιλογή των μονωνύμων βάσης (monomials), τους συντελεστές των οποίων επιθυμούμε να υπολογίσουμε. Τα νευρωνικά δίκτυα ωστόσο δεν υφίστανται αυτόν τον περιορισμό, καθώς οι συντελεστές του πολυωνύμου υπολογίζονται δυναμικά κατά την διάρκεια της εκπαίδευσής τους και υπό αυτή την έννοια είναι περισσότερο αποτελεσματικά όσον αφορά την μοντελοποίηση των μη γραμμικών συστημάτων, σε σχέση με την αυθεντική μέθοδο της πολυωνυμικής προσέγγισης.

- Η αποτελεσματική χρήση των νευρωνικών δικτύων όσον αφορά την

**πολυωνυμική προσέγγιση συναρτήσεων**, μπορεί να επιβεβαιωθεί μέσα από μία λεπτομερή βιβλιογραφική έρευνα η οποία θα αναδείξει και την **εξαιρετική χρησιμότητά τους πάνω σε αυτό το είδος της προσομοίωσης**. Ως παράδειγμα τέτοιου είδους εφαρμογής, αναφέρουμε την εργασία των Galland και White, οι οποίοι απέδειξαν πως ένα νευρωνικό δίκτυο με ένα κρυφό στρώμα και με συνάρτηση ενεργοποίησης αυτή του συνημιτόνου (cosine activation function) μπορεί να προσομοιώσει το ανάπτυγμα Fourier μιας οποιασδήποτε συνάρτησης (Galland & White, 1988). Ο Hornik και οι συνεργάτες του κάνοντας χρήση του θεωρήματος των Stone και Weierstrass απέδειξαν πως τα νευρωνικά δίκτυα Perceptrons πολλών επιπέδων (multilayer perceptrons) με οποιαδήποτε συνάρτηση ενεργοποίησης μπορούν πρακτικά να προσεγγίσουν οποιαδήποτε συνάρτηση με τον επιθυμητό σε κάθε περίπτωση βαθμό ακρίβειας (Hornik et al., 1989). Τέλος ο Hecht-Nielsen κατάφερε να χρησιμοποιήσει ένα δίκτυο Perceptron δύο επιπέδων, για να προσεγγίσει συναρτήσεις Lebesgue κάνοντας χρήση του θεωρήματος επαλληλίας του Kolmogorou (Kolmogorou superposition theorem ) (Hecht-Nielsen, 1987).

- Ένας δεύτερος λόγος που συνηγορεί στη χρήση των νευρωνικών δικτύων ως μοντέλα προσομοίωσης μη γραμμικών συστημάτων, είναι η **ιδιότητά τους ως δυναμικά συστήματα, να προσεγγίζουν την κατάσταση ελαχίστου σφάλματος κατά την διάρκεια της εκπαίδευσής τους, ακολουθώντας πολλούς διαφορετικούς τρόπους δυναμικής συμπεριφοράς**. Το γεγονός αυτό τα καθιστά ένα πολύτιμο εργαλείο για την μελέτη των μη γραμμικών συστημάτων, καθώς μπορούμε να τα χρησιμοποιήσουμε για να μελετήσουμε και να προσομοιώσουμε μια μεγάλη

ποικιλία δυναμικών συστημάτων, με διαφορετική γενικά συμπεριφορά το καθένα. Τέλος τα δίκτυα αυτού του είδους χαρακτηρίζονται όπως είναι γνωστό από την ιδιότητα της γενίκευσης (**generalization**), που συνίσταται στη δυνατότητα υπολογισμού εξόδου από το δίκτυο, ακόμη και εάν αυτή αντιστοιχεί σε κάποια είσοδο, η οποία δεν είναι γνωστή. Η διαδικασία υπολογισμού της εξόδου για την άγνωστη έξοδο, γίνεται, δια της εφαρμογής του μηχανισμού της παρεμβολής, χαρακτηριστικό ιδιαίτερα χρήσιμο σε περιπτώσεις χαοτικών δυναμικών συστημάτων με πεπερασμένο αριθμό δεδομένων.

- Η δεύτερη μεγάλη κατηγορία εφαρμογών των νευρωνικών δικτύων στο γνωστικό πεδίο των μη γραμμικών συστημάτων, χρησιμοποιεί τα δίκτυα αυτού του είδους, ως εργαλεία για την ανάλυση και τον χαρακτηρισμό των συστημάτων που παρουσιάζουν χαοτικό τρόπο εξέλιξης στον χρόνο. Η πιο κλασική από τις εφαρμογές αυτού του είδους, συνίσταται στην πρόβλεψη της τρέχουσας τιμής κάποιας χρονοσειράς, με βάση τις προγενέστερες τιμές, και δι της χρήσης δομών νευρωνικών δικτύων (Patterson et al., 1993 & Darffner, 1996). Σε άλλες πάλι περιπτώσεις τα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό χαρακτηριστικών παραμέτρων των χαοτικών συστημάτων, όπως είναι οι εκθέτες Lyapunov και πάσης φύσεως κλασματικές διαστάσεις που περιγράφουν ένα χαοτικό ελκυστή. Τέλος τα νευρωνικά δίκτυα βρίσκουν ευρεία εφαρμογή σε μια μεγάλη κατηγορία πρακτικών προβλημάτων που σχετίζονται με χαοτικά συστήματα, με κλασικό παράδειγμα τον έλεγχο και τον συγχρονισμό τους (Alsing et al., 1994 : Bakker et al., 1996 & Iplikci & Denizhan, 2003).

Από την άλλη πλευρά τα ίδια τα νευρωνικά δίκτυα ως μη γραμμικά

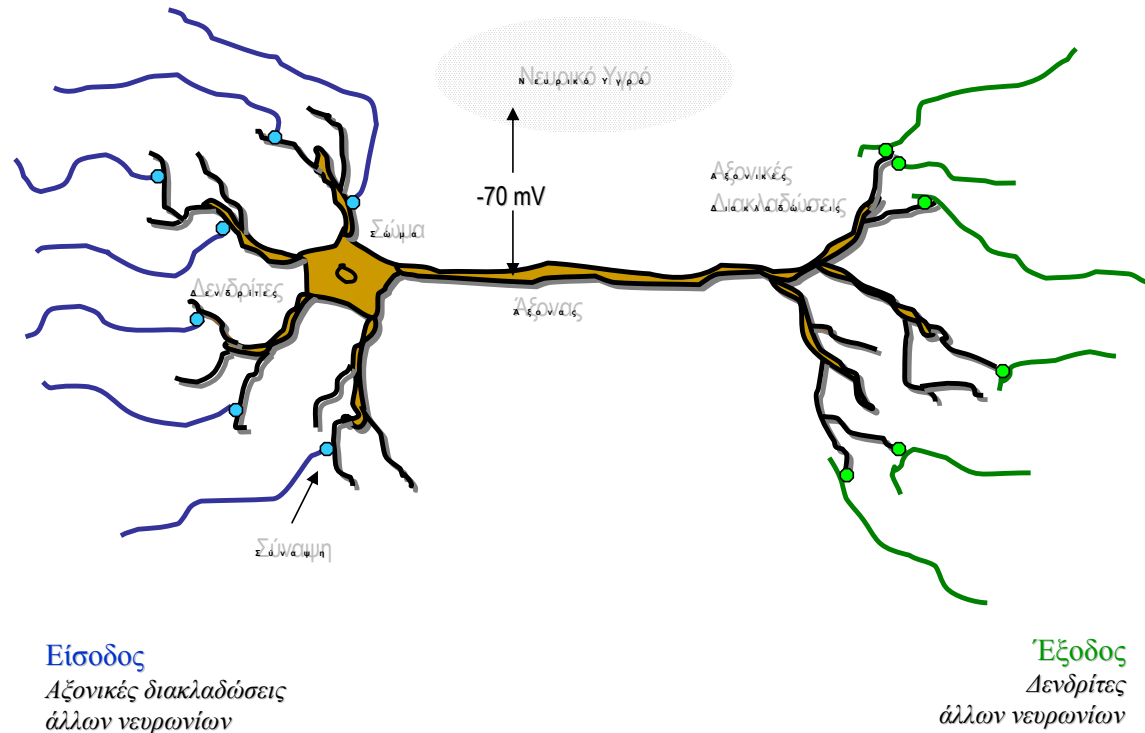
συστήματα, παρουσιάζουν και αυτά χαοτικά χαρακτηριστικά, η μελέτη των οποίων αποτελεί αντικείμενο συστηματικής ερευνητικής δραστηριότητας τα τελευταία χρόνια (Hendin et al., 1991 : Albers et al., 1998). Τυπική κατηγορία δικτύων τα οποία εμφανίζουν χαοτική συμπεριφορά, είναι τα **αναδρομικά δίκτυα (recurrent networks)** (Pasemann, 1993 & 1997), ενώ ανάλογα χαρακτηριστικά περιγράφουν και πολλούς άλλους τύπους νευρωνικών δικτύων. Η μελέτη των εν λόγω δικτύων από αυτή την οπτική γωνία, συνίσταται στην ταυτοποίηση και καταμέτρηση των δεικτών χαοτικής συμπεριφοράς, στη μελέτη του μηχανισμού μετάβασης αυτών των μοντέλων στη χαοτική περιοχή και γενικότερα, στην ανάλυση των χαοτικών τους χαρακτηριστικών.

## **2.12. Συνοπτική θεωρία νευρωνικών δικτύων**

Από την επιστήμη της Βιολογίας είναι γνωστό πως βασική μονάδα του ανθρώπινου εγκεφάλου είναι ένας ειδικός τύπος κυττάρου που ονομάζεται νευρώνας (neuron). Αυτό το κύτταρο θεωρείται ως βασικό στοιχείο επεξεργασίας της πληροφορίας και η κεντρική του λειτουργία συνίσταται στη λήψη της κατάλληλα διαμορφωμένης εισόδου (σε μορφή ηλεκτρικού παλμού) και στην εκπομπή της εξόδου του, διαδικασία η οποία λαμβάνει χώρα, όταν η συνολική είσοδος του νευρώνα ξεπεράσει κάποια οριακή τιμή που λέγεται τιμή κατωφλίου (threshold value). Αυτή η έξοδος που εκπέμπεται από τον κάθε νευρώνα διαβιβάζεται ως είσοδος στους γειτονικούς νευρώνες, δια μέσου ειδικών αγωγών επικοινωνίας οι οποίοι ονομάζονται συνάψεις (synapses). Επομένως οι νευρώνες που εμπεριέχονται στο ανθρώπινο σώμα, δεν λειτουργούν από μόνοι τους, αλλά συμμετέχουν σε μεγαλύτερες ομάδες νευρώνων οι οποίες είναι γνωστές με το όνομα νευρωνικά δίκτυα (neural



networks) (Haykin, 1994).



**Εικόνα 2.32** Τυπικό σχήμα ενός Βιολογικού Νευρωνικού Δικτύου

Αναλυτικά, τα τμήματα από τα οποία αποτελείται ένα νευρωνικό δίκτυο, είναι τα παρακάτω:

**Δενδρίτες:** Σημεία εισόδου ηλεκτρικών σημάτων.

**Άξονας:** Έξοδος ηλεκτρικών σημάτων.

Οι δενδρίτες κάθε νευρώνα συνδέονται με τους άξονες άλλων νευρώνων.

Τα σημεία σύνδεσης ονομάζονται **συνάψεις**.

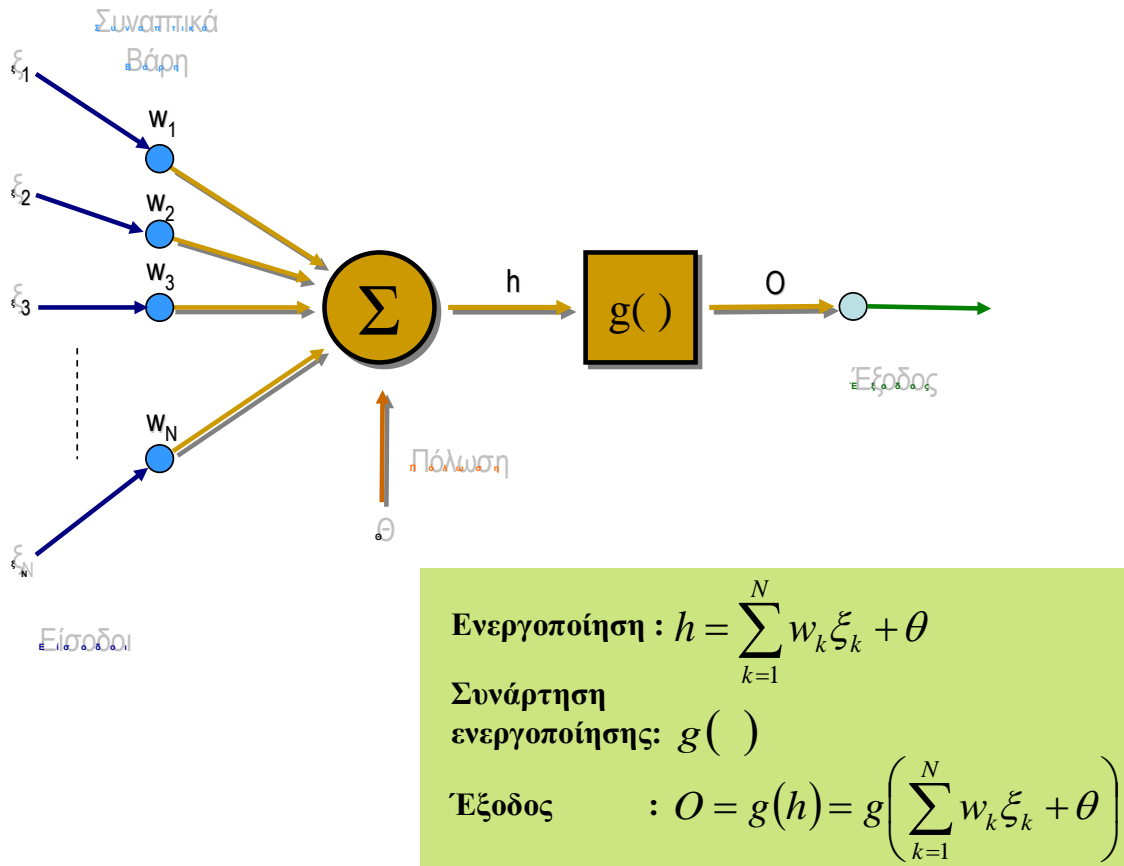
Η ταχύτητα μεταφοράς των ηλεκτρικών παλμών είναι από 10 μέχρι 100 m/sec.

Οι νευρώνες καταναλώνουν την περισσότερη ενέργεια από όλα τα κύτταρα του οργανισμού

Υπολογίζεται ότι ο ανθρώπινος εγκέφαλος καταναλώνει 20 Watt ισχύος.

Λόγω της εξαιρετικής σπουδαιότητας που παρουσιάζουν οι δομές

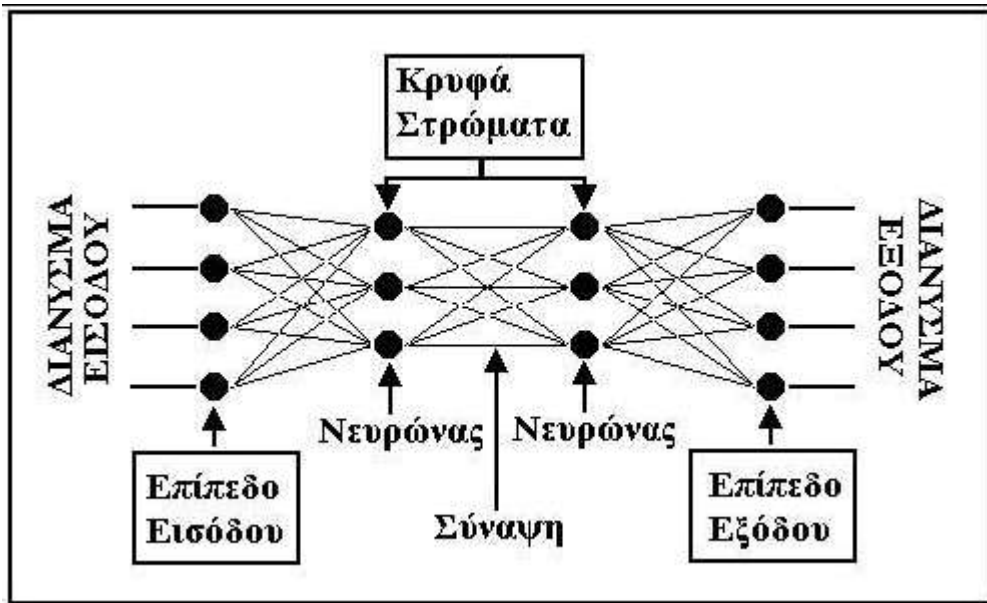
νευρωνικών δικτύων, έχουν αποτελέσει αντικείμενο εντατικής ερευνητικής δραστηριότητας κατά την διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών. Ωστόσο, λόγω της εξαιρετικής πολυπλοκότητας που τα χαρακτηρίζει και του υπερβολικά μεγάλου πλήθους των νευρώνων που περιλαμβάνονται στον ανθρώπινο εγκέφαλο, η μελέτη τους λαμβάνει χώρα δια της χρήσης ειδικών δομών οι οποίες προσομοιώνουν την λειτουργία των βιολογικών νευρωνικών δικτύων και οι οποίες ονομάζονται τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (artificial neural networks, ANNs). Η δομική μονάδα αυτών των δομών προσομοίωσης είναι αντίστοιχα ο τεχνητός νευρώνας, η βασική δομή του οποίου παρουσιάζεται στην Εικ. 2.33.



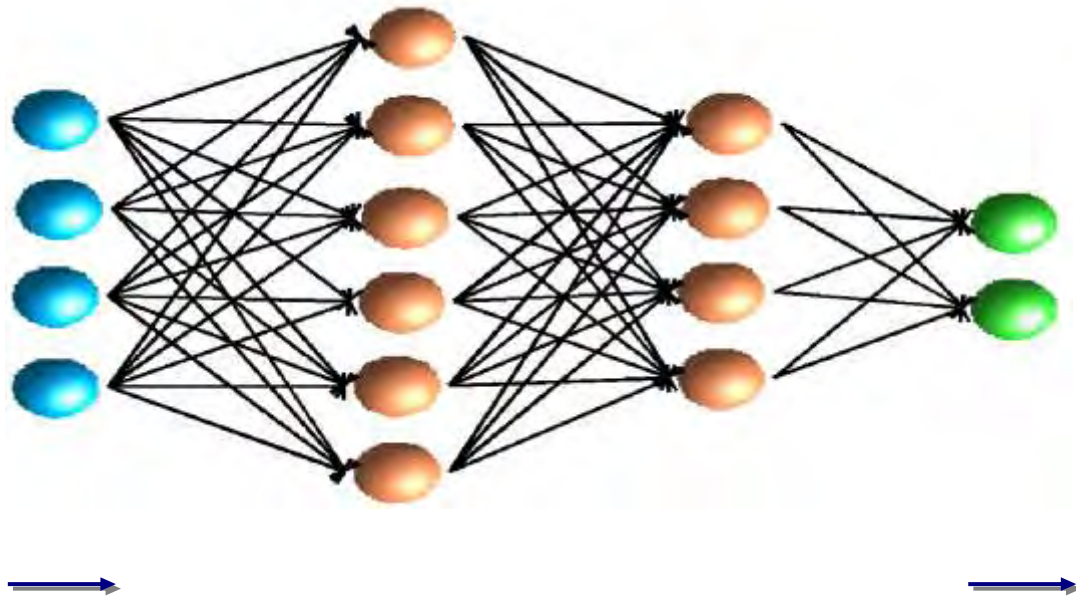
**Εικόνα 2.33.** Είσοδοι και έξοδος ενός τεχνητού νευρώνα

Από την εικόνα διαπιστώνουμε πως η βασική λειτουργία του τεχνητού νευρώνα περιλαμβάνει την λήψη  $N$  εισόδων, την επεξεργασία τους σύμφωνα με το μοντέλο που θα παρουσιάσουμε στην συνέχεια και στην απόδοση μίας και μοναδικής εξόδου. Σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις ο νευρώνας δεν λειτουργεί από μόνος του, αλλά συμμετέχει σε ένα μεγαλύτερο νευρωνικό δίκτυο και συνεργάζεται με άλλους νευρώνες. Αυτό σημαίνει πως οι  $N$  εισοδοί που διαβιβάζονται στο νευρώνα,  $\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_N$ , αποτελούν την έξοδο κάποιων άλλων νευρώνων, με την ανταλλαγή πληροφορίας ανάμεσα στους νευρώνες, να γίνεται δια του μηχανισμού των συνάψεων. Με τον ίδιο ακριβώς τρόπο, η τιμή που υπολογίζεται στην έξοδο του νευρώνα, αποτελεί τιμή εισόδου για άλλους νευρώνες οι οποίοι ευρίσκονται στην άμεση γειτονιά του. Στις πιο

συνηθισμένες περιπτώσεις τεχνητών νευρωνικών δικτύων, οι νευρώνες είναι οργανωμένοι σε επίπεδα, εκ των οποίων το πρώτο (που δέχεται την πληροφορία εισόδου) είναι γνωστό ως **επίπεδο εισόδου (input layer)**, το τελευταίο (που επιστρέφει την έξοδο του δικτύου στο εξωτερικό περιβάλλον) είναι γνωστό ως **επίπεδο εξόδου (output layer)**, ενώ υπάρχει και ένας αριθμός ενδιάμεσων στρωμάτων που ονομάζονται **κρυφά επίπεδα (hidden layers)**, και άγουν την πληροφορία που κινείται μέσα στο δίκτυο, από το επίπεδο εισόδου προς το επίπεδο εξόδου. Στις πιο πολλές περιπτώσεις, το πλήθος των νευρώνων που θα τοποθετηθούν στα επίπεδα εισόδου και εξόδου, καθορίζεται μονοσήμαντα από τη φύση και τη διαμόρφωση των δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν κατά την διάρκεια της εκπαίδευσης του δικτύου. Ωστόσο το πλήθος και η δομή των κρυφών στρωμάτων δεν υπαγορεύονται από κάποιους κανόνες, αλλά αποτελούν αντικείμενο πειραματικής μελέτης και εξαρτώνται άμεσα από την φύση του προβλήματος που θέλουμε να επιλύσουμε. Στην Εικόνα 2.34 παρουσιάζεται μία τυπική πολυεπίπεδη δομή νευρωνικού δικτύου, με συνάψεις των νευρώνων να κατευθύνονται από το επίπεδο εισόδου προς το επίπεδο εξόδου, χωρίς να επιστρέφουν προς τα πίσω. Τα δίκτυα αυτού του τύπου, ονομάζονται *feedforward neural networks*.



**Εικόνα 2.34:** Πολυεπίπεδη δομή feedforward νευρωνικού δικτύου με δύο κρυφά επίπεδα (hidden layers), κάθε ένα εκ των οποίων περιέχει τρεις κρυφούς νευρώνες



ΕΙΣΟΔΟΣ

**Επίπεδο**  
**Εισόδου**

**Κρυμμένο**  
**Επίπεδο**

**Κρυμμένο**  
**Επίπεδο**

ΈΞΟΔΟΣ

**Επίπεδο**  
**Εξόδου**

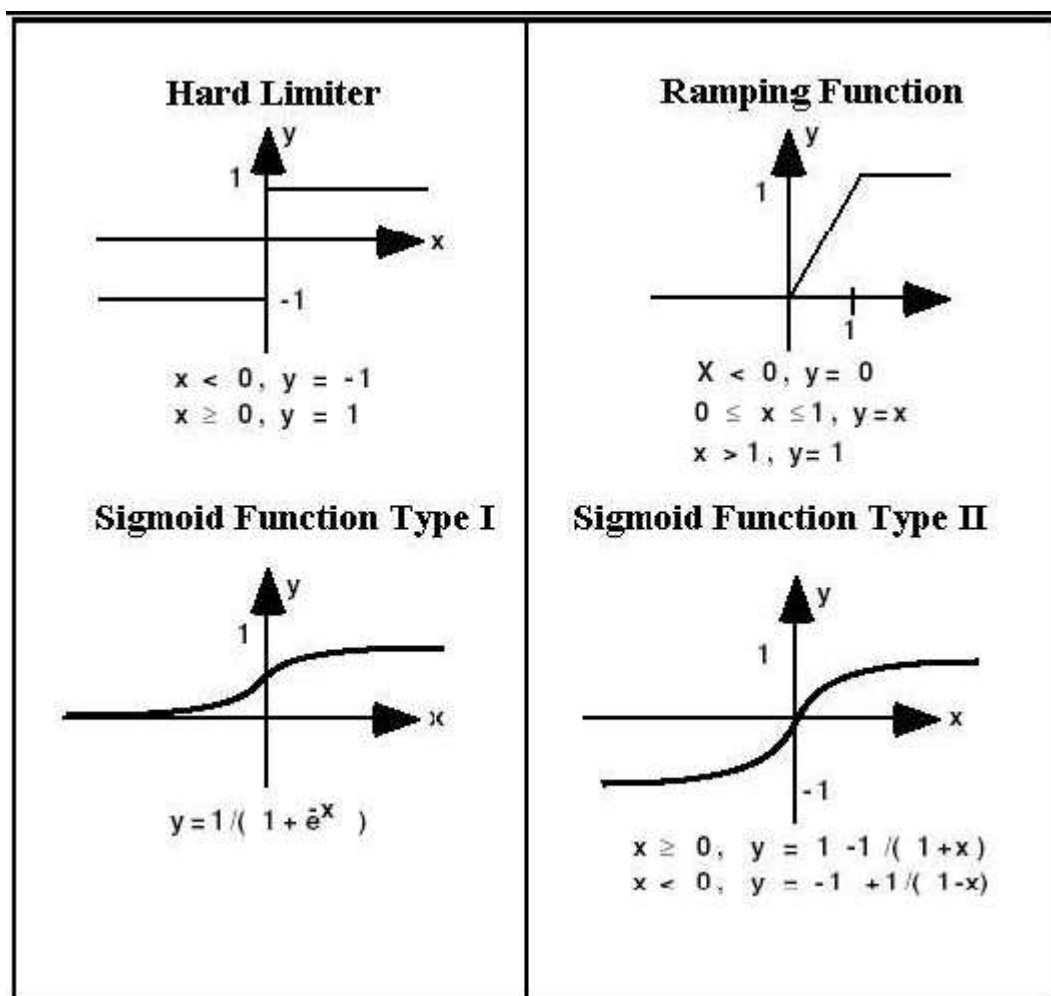
**Εικόνα 2.35:** Όπως και στο σχήμα 2.34. Στα δίκτυα αυτά οι νευρώνες δύο διαδοχικών επιπέδων συνδέονται με το συνηθισμένο τρόπο, που περιλαμβάνει τη συσχέτιση του κάθε νευρώνα του ενός επιπέδου, με όλους τους νευρώνες του άλλου επιπέδου (full connections)

Ας περάσουμε τώρα στην περιγραφή της λειτουργίας του απλού νευρώνα, όπως αυτή παρουσιάζεται στις Εικόνες 2.33 & 2.34. Όπως φαίνεται από τις εν λόγω εικόνες, στην γενική περίπτωση ο νευρώνας δέχεται  $N$  εισόδους και παράγει πάντοτε μία έξοδο. Θεωρώντας πως ο νευρώνας ανήκει σε κάποιο από τα ενδιάμεσα στρώματα του δικτύου, είναι προφανές πως αυτές οι εισοδοί προέρχονται από τους νευρώνες των προηγούμενων επιπέδων, οι οποίοι συνδέονται με αυτό τον νευρώνα δια μέσου των συνάψεων. Σε κάθε μία από τις  $N$  εισόδους  $x_i$  -ή ισοδύναμα, σε κάθε σύναψη- αντιστοιχεί ένα βάρος (weight)  $w_i$  που εκφράζει το ποσοστό κατά το οποίο η εν λόγω είσοδος συνεισφέρει στη ολική είσοδο του νευρώνα. Αυτό σημαίνει πως η συνολική είσοδος που διαβιβάζεται σε αυτό το νευρώνα, θα είναι ίση με το εσωτερικό

γινόμενο  $\bar{x}\bar{w} = \sum_{i=1}^N x_i w_i$  όπου  $\bar{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$  είναι το διάνυσμα των εισόδων και  $\bar{w} = \{w_1, w_2, \dots, w_N\}$  είναι το αντίστοιχο διάνυσμα των βαρών. Από αυτή την συνολική τιμή εισόδου, θα πρέπει στη συνέχεια να αφαιρέσουμε την τιμή το κατωφλίου (threshold value)  $\theta$ , η οποία σε πλήρη αναλογία με το βιολογικό νευρώνα, επιτρέπει την ενεργοποίησή του (δηλαδή την παραγωγή τη εξόδου από αυτόν), μόνο όταν η διαφορά  $y = \bar{x}\bar{w} - \theta$  είναι θετικός αριθμός. Τέλος, η πραγματική έξοδος του νευρώνα, προκύπτει διαβιβάζοντας την τιμή τη μεταβλητής  $y$  σε μία συνάρτηση ενεργοποίησης (activation function)  $u = u(y)$ , η οποία, ανάλογα με την εφαρμογή μας μπορεί να είναι γραμμική ή μη γραμμική. Επομένως, τελικά, η πραγματική έξοδος του νευρώνα σε συνάρτηση με τις τιμές των εισόδων και των βαρών των συνάψεων που συσχετίζονται με αυτόν, θα δίδεται από την σχέση

$$\text{Output} = u\left(\sum_{i=1}^N w_i x_i - \theta\right)$$

Όσον αφορά την συνάρτηση ενεργοποίησης,  $u(y)$ , αυτή μπορεί να επιλεγεί μέσα από μια μεγάλη οικογένεια συναρτήσεων, όπως είναι η συνάρτηση βήματος, η ταυτοτική συνάρτηση, η σιγμοειδής και η συνάρτηση της υπερβολικής εφαπτομένης. Από αυτές τις συναρτήσεις, εκείνη που χρησιμοποιείται στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, είναι η σιγμοειδής καμπύλη, της οποίας η έξοδος, ανάλογα με τον τύπο της συνάρτησης που έχει επιλεγεί, ανήκει στο διάστημα  $[0,1]$  ή στην περιοχή τιμών  $[-1,1]$ . Οι γραφικές παραστάσεις τυπικών συναρτήσεων ενεργοποίησης των τεχνητών νευρώνων, παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.36 (Anderson & McNeil, 1992)



Εικόνα 2.36: Τυπικές συναρτήσεις ενεργοποίησης τεχνητών νευρώνων

Ανακεφαλαιώνοντας λοιπόν θα μπορούσαμε -όσον αφορά το κεφάλαιο δομή και λειτουργία των τεχνικών νευρωνικών δικτύων- να συνοψίσουμε στα εξής:

Μερικά από τα κύρια χαρακτηριστικά των τεχνικών νευρωνικών δικτύων είναι:

- Παράλληλη επεξεργασία.
- Μνήμη που βρίσκεται σε συνύπαρξη με τις μονάδες επεξεργασίας.
- Ικανότητα εκμάθησης πολύπλοκων συναρτήσεων εισόδου – εξόδου.
- Ικανότητα προσαρμογής στην μορφολογία των δεδομένων.
- Απλή δομή των επιμέρους υπολογιστικών μονάδων (TN).



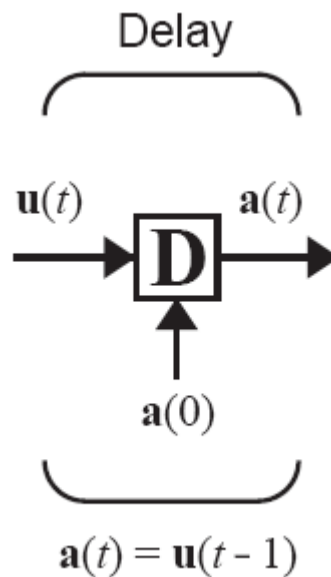
Ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο (ΤΝΔ) αποτελείται από **τεχνητούς νευρώνες (ΤΝ)** που αποτελούν τις βασικές μονάδες της **υπολογιστική μηχανής του**, και είναι οργανωμένοι σε επάλληλα στρώματα (επίπεδα, layers). Συνήθως υπάρχει ένα **επίπεδο εισόδου** (με ή χωρίς υπολογιστικές ικανότητες) όπου εισάγεται το **εκπαιδευτικό διάνυσμα εισόδου ή το διάνυσμα ελέγχου**, ένα ή περισσότερα **κρυφά επίπεδα** όπου γίνεται η (μη) γραμμική επεξεργασία των πληροφοριών και τέλος ένα **επίπεδο εξόδου** που, συνήθως, διαθέτει υπολογιστική ικανότητα και αποτελεί την έξοδο.

Ο αριθμός των ΤΝ σε ένα νευρωνικό δίκτυο μπορεί να κυμαίνεται από ένα έως μερικές χιλιάδες. Το τελικό μοντέλο αποτελεί μια δομή από στρώματα ΤΝ που το καθένα τροφοδοτεί το επόμενο αφού μετασχηματίσει κατάλληλα την είσοδο της πληροφορίας που δέχτηκε. Ο κάθε ΤΝ αντιστοιχείται με κάποιο **βάρος** που σταθμίζει την έξοδο που δέχεται και διαμορφώνει την έξοδο μετά τον μετασχηματισμό της εισόδου με κατάλληλα επιλεγμένη **συνάρτηση μεταφοράς**. Το συνολικό δίκτυο αποτελεί ουσιαστικά το τοπολογικό ισοδύναμο επάλληλων επιπέδων από ΤΝ ο καθένας από τους οποίους προωθεί την έξοδό του σε όλους τους ΤΝ του επόμενου επιπέδου. Η συνδεσμολογία καθώς και η συνάρτηση μεταφοράς που υλοποιεί κάθε ΤΝ μπορεί να ποικίλλει. Για την τελική διαμόρφωση του τελικού δικτύου, τέλος, εφαρμόζεται κάποιος **αλγόριθμος εκπαίδευσης** ο οποίος τροποποιεί τις τιμές των βαρών, έτσι ώστε το ΤΝΔ να υλοποιήσει την επιθυμητή αντιστοίχιση των διανυσμάτων εισόδου στα διανύσματα εξόδου. Όλα αυτά τα χαρακτηριστικά στοιχειοθετούν ένα μοντέλο ΤΝΔ που ανάλογα με την εφαρμογή για την οποία επιλέγεται διαφοροποιούνται. Μερικά γνωστά μοντέλα ΤΝΔ είναι του Hopfield, του Coonan, το BackPropagation (BP), το counterpropagation και το ART

(Ρίζος, 1996).

### 2.13. Αναδρομικά Νευρωνικά Δίκτυα (Recurrent Neural Network)

Πριν αναλύσουμε τα recurrent networks, είναι ανάγκη να συστήσουμε κάποια απλά κατασκευαστικά κομμάτια. Το πρώτο είναι το κομμάτι καθυστέρησης (Delay Block), το οποίο εικονίζεται στην Εικόνα 2.37.



**Εικόνα 2.37** Delay Block

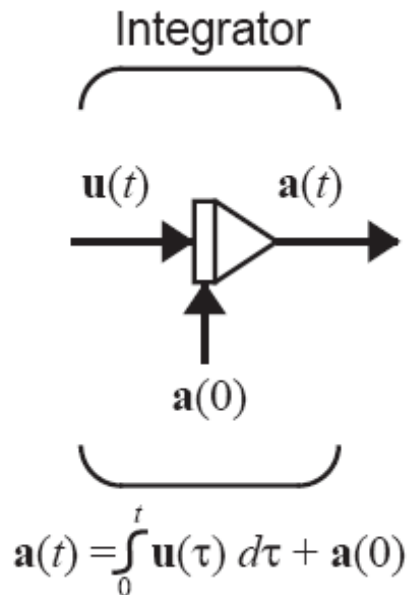
Η έξοδος καθυστέρησης  $a(t)$  υπολογίζεται από την είσοδο  $u(t)$  σύμφωνα με την

$$a(t) = u(t - 1) \quad (2.37)$$

Έτσι η έξοδος είναι η είσοδος καθυστερημένη ένα χρονικό βήμα. (Αυτό προϋποθέτει ότι ο χρόνος είναι εκσυγχρονισμένος σε διακριτά βήματα και παίρνει μόνο ακέραιες τιμές). Η συνάρτηση (2.37) απαιτεί η έξοδος αρχικά να είναι σε χρόνο  $t = 0$ . Αυτή η πρώτη συνθήκη φαίνεται στην Εικόνα 2.37 από το εισερχόμενο βέλος στην βάση του delay block.

Ένα άλλο σχετικό κατασκευαστικό κομμάτι, το οποίο χρησιμοποιείται για τα συνεχούς – χρόνου recurrent networks, είναι το ενοποιημένο (the integrator

block), το οποίο φαίνεται στην Εικόνα 2.38.



**Εικόνα 2.38.** Intergrator Block

Η ενοποιημένη έξοδος  $\mathbf{a}(t)$  υπολογίζεται από την είσοδο  $\mathbf{u}(t)$  σύμφωνα με την

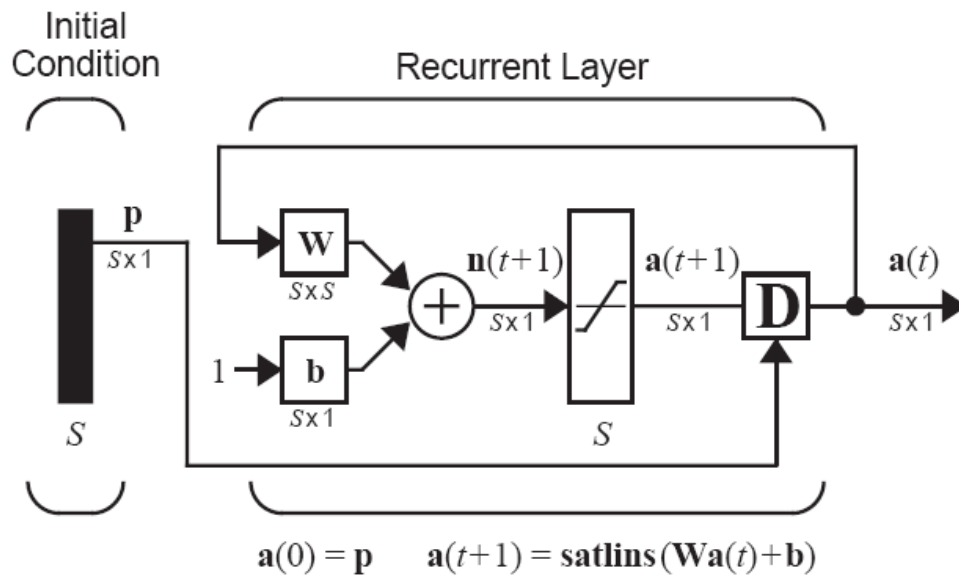
$$\mathbf{a}(t) = \int_0^t \mathbf{u}(\tau) d\tau + \mathbf{a}(0) \quad (2.38)$$

Η αρχική συνθήκη  $\mathbf{a}(0)$  εικονίζεται με το βέλος να εισέρχεται στην βάση του Intergrator Block.

Τώρα είμαστε έτοιμοι να γνωρίσουμε τα recurrent networks. Ένα από τα πιο γνωστά πεδία εφαρμογής της επιστήμης της νευροδυναμικής, είναι τα αναδρομικά δίκτυα (**recurrent neural network**). Γενικά μπορούμε να πούμε ότι το βασικό χαρακτηριστικό αυτών των δικτύων είναι η μεταβολή της κατάστασής τους σε συνάρτηση με τον χρόνο, η οποία ανάλογα με τις τιμές των παραμέτρων του προβλήματος μπορεί να είναι συγκλίνουσα, περιοδική ή χασοτική.

Συγκεκριμένα, ένα recurrent network, είναι ένα δίκτυο, με

ανατροφοδότηση. Κάποιες από τις εξόδους του είναι συνδεδεμένες με τις εισόδους του. Αυτό είναι το διαφοροποιό στοιχείο με τα δίκτυα που έχουμε μελετήσει μέχρι τώρα τα οποία είναι αυστηρώς εμπρός τροφοδοτούμενα με χωρίς προς τα πίσω συνδέσεις. Ένας τύπος διακριτού – χρόνου (discrete time) recurrent network απεικονίζεται στην Εικόνα 2.39.



**Εικόνα 2.39.** Recurrent Network

Στο ιδιαίτερο αυτό δίκτυο ο παράγοντας  $p$  τροφοδοτεί τις αρχικές συνθήκες ( $a(0) = p$ ). Στην συνέχεια μελλοντικές έξοδοι του δικτύου υπολογίζονται από προηγούμενες εξόδους:

$$a(1) = \text{satlins}(Wa(0) + b), a(2) = \text{satlins}(Wa(1) + b), \dots$$

Τα Recurrent Networks είναι εν δυνάμει πιο ισχυρά από τα εμπρός τροφοδοτούμενα δίκτυα και μπορούν να επιδείξουν προσωρινή συμπεριφορά.

## 2.14. Κατηγορίες ΤΝΔ.

Τα ΤΝΔ μπορούν να χωριστούν σε δύο γενικές κατηγορίες ανάλογα με τις εφαρμογές που χρησιμοποιούνται:

**Τα στατικά** όπως BP που η έξοδος του είναι κάποια συνάρτηση μόνο του τρέχοντος διανύσματος εισόδου.

**Τα δυναμικά** όπως είναι τα δίκτυα Hopfield που χρησιμοποιούνται στη δημιουργία μοντέλων διακριτοποίησης και ταξινόμησης.

Τα **στατικά ΤΝΔ** υλοποιούν συναρτήσεις της μορφής  $Y=f(X)$  όπου το  $X$  και  $Y$  είναι διανύσματα πολυδιάστατων χώρων με διαφορετική διάσταση ο καθένας. Τα στατικά ΤΝΔ μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην αναγνώριση προτύπων, προσέγγιση συναρτήσεων κλπ.

Στην περίπτωση της τρέχουσας εφαρμογής μας θα χρησιμοποιηθούν στατικά ΤΝΔ και τα χαρακτηριστικά του τελικού μοντέλου που προτείνεται και τα οποία διερευνώνται είναι:

- Η Διαδικασία Εκπαίδευσης. Σηματοδοτεί το σύνολο των ενεργειών που διαμορφώνουν την τελική κατανομή των βαρών στο δίκτυο και το καθιστούν ικανό για πρόβλεψη.
- Η τοπολογία του ΤΝΔ. Η έννοια της τοπολογίας συνδέεται με τον καθορισμό του πλήθους των νευρώνων του Δικτύου καθώς της διαδικασίας εκπαίδευσής του.
- Η ικανότητα γενίκευσης. Αφορά τον έλεγχο της εξόδου του μοντέλου ώστε να μπορεί να προσαρμοστεί ικανοποιητικά στο σύνολο των τιμών των δεδομένων εκπαίδευσης.

Μετά την περιγραφή της δομής και της μορφολογίας των τεχνητών νευρωνικών δικτύων, ας περάσουμε τώρα στην περιγραφή του τρόπου με τον

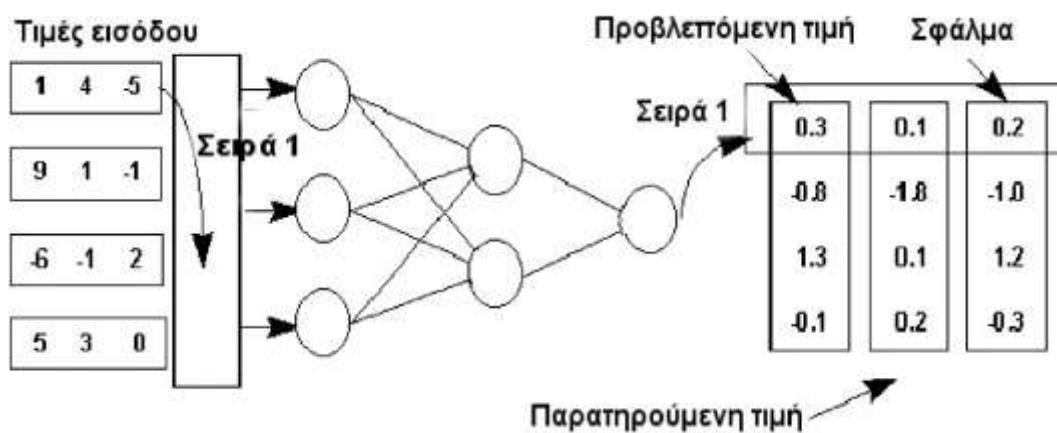
οποίο αυτά χρησιμοποιούνται. Είναι προφανές πως σε πλήρη αναλογία με τα βιολογικά νευρωνικά δίκτυα, ο λόγος δημιουργίας των τεχνητών νευρωνικών δικτύων, είναι η εκμάθηση συνόλων δεδομένων. Η διαδικασία εκείνη δια μέσου της οποίας λαμβάνει χώρα αφομοίωση αυτής της πληροφορίας, είναι γνωστή ως εκπαίδευση (training), και η επιτυχής πραγματοποίησή της προϋποθέτει την οργάνωση των δεδομένων προς εκμάθηση, σε κατάλληλα διαμορφωμένα σύνολα προτύπων (training sets). Υπάρχουν δύο διαφορετικά είδη εκπαίδευσης, η εκπαίδευση με εποπτεία (supervised learning) στην οποία οι έξοδοι του δικτύου είναι γνωστές εκ των προτέρων, και η εκπαίδευση χωρίς εποπτεία (unsupervised learning), στην οποία, η μόνη πληροφορία που διαθέτουμε είναι η πληροφορία εισόδου, η οποία και διαβιβάζεται στο δίκτυο. Σε μια πιο λεπτομερή περιγραφή, αυτοί οι δύο διαφορετικοί τύποι εκπαίδευσης, χαρακτηρίζονται από τον ακόλουθο τρόπο λειτουργίας.

### **2.15. Εκπαίδευση των ΤΝΔ.**

Αν θεωρήσουμε ότι τα διανύσματα εισόδου ανήκουν σε χώρο διάστασης  $d$  και αποτελούνται από  $d$  μεταβλητές κάθε μεταβλητή λαμβάνει  $N$  τιμές, τότε το πρόβλημα της εκπαίδευσης στοιχειοθετείται από  $N^d$  δυνατά διανύσματα εισόδου που οι συντεταγμένες τους λαμβάνουν  $N$  διακριτές τιμές. Μπορούμε να φανταστούμε ότι με την εκπαίδευση του τεχνητού νευρωνικού δικτύου ΤΝΔ σχηματίζονται υποθέσεις για το ποιόν της υποκειμενικής συναρτήσεως διανυσμάτων εισόδου / εξόδου. **Τα εκπαιδευτικά διανύσματα εισόδου είναι τα «στοιχεία» που βοηθούν στη διαμόρφωση της σωστής συναρτήσεως.** Η διαδικασία εκπαίδευσης ενός νευρωνικού μοντέλου μπορεί να περιγραφεί από τον εξής βηματικό αλγόριθμο:

1. Τυχαιοποίηση των βαρών όλων των κόμβων.
2. Εισαγωγή ενός διανύσματος στο επίπεδο εισόδου.
3. Υπολογισμός της εξόδου και σύγκριση με την αναμενόμενη έξοδο

Αν οι συνθήκες σύγκλησης δεν εκπληρώνονται, τότε αλλαγή των τιμών των βαρών και επανάληψη από το σημείο 2, αλλιώς τερματίζεται η διαδικασία.



Εικόνα 2.40 Διαδικασία εκπαίδευσης ενός τεχνητού νευρωνικού δικτύου

Υπάρχει μια πληθώρα αλγορίθμων οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την εκπαίδευση των ΤΝΔ. Στην πράξη η **εκπαίδευση κάποιου τεχνητού νευρωνικού δικτύου (ΤΝΔ) ισοδυναμεί με την ενδυνάμωση ή την αποδυνάμωση των τιμών των βαρών, σύμφωνα με τους κανόνες που ορίζει ο αλγόριθμος εκπαίδευσης, μέχρι αυτά να λάβουν τις κατάλληλες τιμές.**

Οι μεθοδολογίες εκπαίδευσης που διαχωρίζονται:

- Με εποπτεία από εξωτερική πηγή (supervised).
- Χωρίς εποπτεία (unsupervised).
- Με ανταγωνισμό των TN.

Στην εκπαίδευση **με εποπτεία (supervised learning)**, το σύνολο προτύπων, περιλαμβάνει τόσο τα πρότυπα εισόδου (input patterns) όσο και τα αντίστοιχα πρότυπα εξόδου (output patterns). Το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο προσπαθεί να κατασκευάσει μια σχέση (συνάρτηση) των διανυσμάτων (προτύπων) όσο το δυνατόν ακριβέστερη. Πιο συγκεκριμένα, κάποιος αλγόριθμος καθοδήγησης από εξωτερική πηγή ακολουθεί μια επαναληπτική διαδικασία βήμα προς βήμα σύμφωνα με την οποία τροποποιούνται οι τιμές των βαρών που συνδέουν τους τεχνικούς νευρώνες. Επομένως, η διαδικασία εκπαίδευσης συνίσταται στην ελαχιστοποίηση του συνολικού σφάλματος (global error) που αντιστοιχεί σε όλο το σύνολο προτύπων, διαδικασία, η οποία ανάγεται στην διαμόρφωση των βαρών των συνάψεων του δικτύου με τέτοιο τρόπο, ώστε όταν διαβιβάζουμε στο δίκτυο την σωστή είσοδο, να λάβει χώρα η αναπαραγωγή της σωστής εξόδου. Τυπικά παραδείγματα νευρωνικών δικτύων που εκπαιδεύονται με αυτό τον τρόπο, είναι τα δίκτυα που χρησιμοποιούν τον αλγόριθμο του back propagation και του counter propagation (Haykin, 1994)



Η επαναληπτική διαδικασία σταματάει όταν ελαχιστοποιηθεί κάποια συνάρτηση σφάλματος η οποία δίνει **το μέτρο της διαφοράς** της πραγματικής εξόδου από την επιθυμητή έξοδο του τεχνικού νευρωνικού δικτύου (ΤΝΔ). Το βασικό **μειονέκτημα** αυτής της μεθόδου είναι η πιθανότητα παγίδευσης του τεχνητού νευρωνικού δικτύου σε κάποιο τοπικό ελάχιστο στην επιφάνεια κατανομής του σφάλματος.

Από την άλλη πλευρά, στην εκπαίδευση **χωρίς εποπτεία** (unsupervised learning), η μοναδική πληροφορία που περιλαμβάνεται στο σύνολο προτύπων αφορά μόνο τα διανύσματα (πρότυπα) εισόδου και τίποτα περισσότερο. Στην περίπτωση αυτή τα διανύσματα ταξινομούνται σε κατηγορίες, ανάλογα με την σχετική ομοιότητά τους (αυτό-οργάνωση του τεχνικού νευρωνικού δικτύου). Πιο συγκεκριμένα, οι νευρώνες των κρυφών στρωμάτων θα πρέπει να διαμορφώσουν τα βάρη τους χωρίς την γνώση της παραμικρής πληροφορίας για την έξοδο του δικτύου ή με απλά λόγια κάποιος αλγόριθμος χωρίς εποπτεία πραγματοποιεί ψευδοτυχαίες μεταβολές των τιμών των βαρών. Από τις μεταβολές διατηρούνται μόνο αυτές που βελτιώνουν (ελαχιστοποιούν) την συνάρτηση σφάλματος. Η εφαρμογή κατάλληλης στρατηγικής για την επιλογή του μεγέθους των μεταβολών των τιμών των βαρών, οδηγεί στην εύρεση του ολικού ελάχιστου της συνάρτησης σφάλματος. Το σημαντικότερο **μειονέκτημα** αυτής της μεθόδου είναι ο μεγάλος χρόνος που απαιτείται για την εύρεση του ολικού ελαχίστου.

Τυπικά δίκτυα που λειτουργούν με τον τρόπο αυτό, είναι τα δίκτυα τύπου SOM(Self Organization Maps) (Freeman & Skapura, 1991), που επινοήθηκαν από τον Kohonen και χρησιμοποιούνται για την ομαδοποίηση των προτύπων εισόδου σε κατηγορίες προτύπων.

Κατά την εκπαίδευση **με ανταγωνισμό**, οι τεχνικοί νευρώνες (TN) συναγωνίζονται για το ποιος θα παραμείνει. Στην απλούστερη περίπτωση απομένει δραστηριοποιημένος μόνο ο τεχνικός νευρώνας (TN) που έχει την μεγαλύτερη δραστηριοποίηση ενώ οι υπόλοιποι τεχνικοί νευρώνες (TN) καταστέλλονται. Οι διάφορες μέθοδοι εκπαίδευσης μπορεί να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό, π.χ. το κρυφό επίπεδο κάποιου ΤΝΔ να εκπαιδευτεί από αλγόριθμο χωρίς εποπτεία και το επίπεδο εξόδου να εκπαιδευτεί από αλγόριθμο με εποπτεία.

Πρέπει να υπογραμμιστεί ότι επειδή απαιτούνται πολλοί επαναληπτικοί υπολογισμοί για την εκπαίδευση των τεχνικών νευρωνικών δικτύων, συνήθως αυτή πραγματοποιείται σε **νεκρό χρόνο (εκπαίδευση off line)**, πριν από την χρησιμοποίηση του τεχνικού νευρωνικού δικτύου για την λύση του προβλήματος εφαρμογής. Τέλος, το **μέγεθος** του τεχνικού νευρωνικού δικτύου είναι **ανάλογο με την πολυπλοκότητα του προβλήματος το οποίο καλείται να επιλύσει**, ενώ **ο αριθμός των εκπαιδευτικών διανυσμάτων πρέπει να είναι ανάλογος με τον αριθμό των βαρών**.

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας της εκπαίδευσης, ακολουθεί η διαδικασία της ανάκλησης προτύπων (recall procedure) κατά την οποία το εκπαιδευμένο νευρωνικό δίκτυο χρησιμοποιείται για την αναγνώριση προτύπων εισόδου. Εφόσον τα διαβιβαζόμενα πρότυπα προς αναγνώριση ανήκουν στο σύνολο προτύπων που χρησιμοποιήθηκε κατά την διάρκεια της εκπαίδευσης, η έξοδος του νευρωνικού δικτύου θα είναι ίση με  $y \pm \epsilon$  όπου  $y$  είναι η πραγματική έξοδος (desired output) του εν λόγω προτύπου, και  $\epsilon$  η τιμή του σφάλματος που σχετίζεται με την διαδικασία της εκπαίδευσης. Το δίκτυο ωστόσο έχει την δυνατότητα της γενίκευσης (generalization) αυτής της

ανάκλησης, διαδικασία η οποία συνίσταται στην δυνατότητα υπολογισμού της εξόδου, ακόμη και για εκείνα τα πρότυπα τα οποία δεν χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση του δικτύου. Στην περίπτωση αυτή ο υπολογισμός της εξόδου χρησιμοποιείται δια της χρήσης του μηχανισμού της παρεμβολής (interpolation)

### **2.16. Ικανότητα γενίκευσης.**

Ως **γενίκευση ορίζεται** η ικανότητα του τεχνικού νευρωνικού δικτύου να αποδίδει εξίσου καλά με διανύσματα τα οποία δεν έχει γνωρίσει κατά την διαδικασία εκπαίδευσης. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ικανότητα γενίκευσης ενός ΤΝΔ είναι:

- Ο αριθμός των εκπαιδευτικών διανυσμάτων και αν αυτά αναπαριστούν ικανοποιητικά τον υπερχώρο από τον οποίο προέρχονται. Γενικά όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των εκπαιδευτικών διανυσμάτων τόσο καλύτερη λύση μπορεί να βρεθεί.
- Η πολυπλοκότητα του προβλήματος
- Το μέγεθος του τεχνικού νευρωνικού δικτύου.

Αν διατίθεται **μεγάλος αριθμός** εκπαιδευτικών διανυσμάτων μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τεχνικό νευρωνικό δίκτυο σταθερού μεγέθους και εν συνεχεία να προσδιορίσουμε τον αριθμό των εκπαιδευτικών διανυσμάτων που πρέπει να χρησιμοποιηθούν για την βέλτιστη ικανότητα γενίκευσης. Αν διαθέτουμε **μικρό αριθμό** εκπαιδευτικών διανυσμάτων πρέπει να προσδιορίσουμε το μέγεθος του τεχνικού νευρωνικού δικτύου που βελτιστοποιεί την ικανότητα γενίκευσης.

## 2.17. Έλεγχος απόδοσης των ΤΝΔ

Ο έλεγχος της απόδοσης κάποιου τεχνικού νευρωνικού δικτύου μπορεί να γίνεται με κάποια **συνάρτηση σφάλματος**, είτε στο εκπαιδευτικό σύνολο διανυσμάτων, είτε σε «άγνωστο» σύνολο διανυσμάτων τα οποία δεν έχει δει προηγουμένως το τεχνικό νευρωνικό δίκτυο. Για την πιστοποίηση των αποτελεσμάτων εφαρμόζονται διάφορες **μέθοδοι όπως το «ανακάτωμα» των διανυσμάτων και ο τυχαίος διαχωρισμός των συνόλων εκπαίδευσης και ελέγχου**.

Αρκετό ενδιαφέρον για τον έλεγχο απόδοσης παρουσιάζουν η **«ανάκληση» (recall)** και η **ακρίβεια (precision)** ενός τεχνικού νευρωνικού δικτύου. Η **ανάκληση ορίζεται** ως ο λόγος του αριθμού των διανυσμάτων κάποιας κατηγορίας που ταξινομούνται σωστά από το τεχνικό νευρωνικό δίκτυο, ως προς τον πραγματικό αριθμό των διανυσμάτων που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία. Η **ακρίβεια ορίζεται** ως ο λόγος του αριθμού των διανυσμάτων κάποιας κατηγορίας που ταξινομούνται σωστά από το τεχνικό νευρωνικό δίκτυο, ως προς τον συνολικό αριθμό των διανυσμάτων που ταξινομούνται σε αυτή την κατηγορία (ορθά ή λανθασμένα). Για παράδειγμα, αν σε μια κατηγορία ανήκουν 50 διανύσματα και το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο ταξινομεί σωστά τα 40, τότε η ανάκληση είναι 40/50, ενώ εάν σε αυτή την κατηγορία ταξινομήσει πχ. 7 διανύσματα που ανήκαν σε άλλες κατηγορίες, τότε η ακρίβεια είναι 40/57.

## 2.18. Δημοφιλή Μοντέλα ΤΝΔ.

Το «Perceptron», το «Adaline», το «Brain State in a Box», το Hamming Network και τα ΤΝΔ βασισμένα στις εργασίες του Kohonen, Learning vector quantitation (LVQ) Counter propagation (CP) που παρουσιάζονται στην συνέχεια, είναι μερικά από τα πρώτα ΤΝΔ που αποτέλεσαν την ιστορική και επιστημονική βάση πάνω στην οποία στηρίχτηκαν οι έρευνες για την κατασκευή ΤΝΔ (Anderson, 1995 : Davalo & Naim, 1991 : Dayhoff, 1990).

### 2.18.1. Perceptron

Ο τύπος αυτός ΤΝΔ προτάθηκε από τον Rosenblatt στα μέσα της δεκαετίας του '50 για να εξηγήσει την αναγνώριση προτύπων από το οπτικό σύστημα και θεωρήθηκε ως ένα λειτουργικό μοντέλο του αμφιβληστροειδή. Πρόκειται για ένα πολύ απλό ΤΝΔ που η βασική του ιδέα είναι η **θεώρηση του αμφιβληστροειδή ως δισδιάστατης διάταξης φωτοαισθητηρίων**. Τα φωτοαισθητήρια συνδέονται πλήρως ή **τυχαία με αμετάβλητα βάρη  $w_{ji}$**  με ανιχνευτές χαρακτηριστικών (ΤΝ) που έχουν την ικανότητα να αναγνωρίζουν κάποια συγκεκριμένα πρότυπα. Για να δραστηριοποιηθεί κάποιος ΤΝ πρέπει το σταθμισμένο άθροισμα εισόδου:

$$NET_j = \sum_i w_{ji} * x_i \geq 0 \quad (2.39)$$

Ακόμη υπάρχει το επίπεδο εξόδου που αποτελείται από ΤΝ που λειτουργούν ως «ανιχνευτές προτύπων» (Perceptrons) και συνδέονται με **μεταβλητά βάρη** και με τυχαίο τρόπο με κάποιους από τους ανιχνευτές χαρακτηριστικών. Ως συνάρτηση μεταφοράς χρησιμοποιείται η **γραμμική συνάρτηση κατωφλίου**.

Η εκπαίδευση του Perceptron πραγματοποιείται με εποπτεία και με

μεταβολή των βαρών του επιπέδου εξόδου. Οι βασικοί κανόνες του αλγόριθμου εκπαίδευσης είναι:

- Τα βάρη δεν μεταβάλλονται αν η έξοδος λάβει την επιθυμητή τιμή.
- Αν η έξοδος είναι **0** ενώ θα έπρεπε να είναι **1**, τότε αυξάνονται τα βάρη που αντιστοιχούν σε ενεργές εξόδους ανιχνευτών χαρακτηριστικών (μεγαλύτερες από το κατώφλι).
- Αν η έξοδος είναι **1** ενώ θα έπρεπε να είναι **0**, τότε ελαττώνονται τα βάρη που αντιστοιχούν σε ενεργές εξόδους ανιχνευτών χαρακτηριστικών (μεγαλύτερες από το κατώφλι).

Το μέγεθος της μεταβολής των βαρών μπορεί να είναι:

- Σταθερό.
- Μεταβλητό και ανάλογο με την διαφορά του σταθμισμένου αθροίσματος εισόδου από την επιθυμητή έξοδο.
- Ίσο με το σταθμισμένο άθροισμα εισόδου.
- Συνδυασμός κάποιας σταθερής τιμής και κάποιας μεταβλητής τιμής μεταβολής βάρους.

### **2.18.2. Adaline (Adaptive linear neurone)**

Ο τύπος αυτός ΤΝΔ προτάθηκε από τον Widrow και αποτελεί μια από τις πρώτες πρακτικές εφαρμογές των ΤΝΔ. **Το Adaline έχει την ικανότητα να ταξινομεί μόνο ψηφιακά γραμμικά διαχωρίσιμα διανύσματα εισόδου** (όπως το Perceptron). Ο η ΤΝ του Adaline διαθέτει μεταβλητά βάρη, εκ των οποίων ένα είναι συνδεδεμένο με μοναδιαία είσοδο, αναλαμβάνοντας έτσι τον ρόλο του κατωφλίου του κβαντιστή. Κάποιο διάνυσμα εισόδου  $X_n$  λαμβάνει μόνο τις τιμές **-1** και **+1**. Το σταθμισμένο άθροισμα  $NET_n$  των εισόδων επεξεργάζεται από έναν κβαντιστή ο οποίος είναι το στοιχείο λήψης αποφάσεων. Οι στάθμες εξόδου του κβαντιστή είναι  $OUT_n = -1$  ή  $OUT_n = +1$ . **Οι αρχικές τιμές των βαρών πρέπει να είναι τυχαίες, για να αποφεύγεται η παγίδευση του αλγόριθμου εκπαίδευσης στα τοπικά ελάχιστα του υπερχώρου των βαρών.** Αυτός ο υπερχώρος έχει διάσταση ίση με τον αριθμό των βαρών και κάθε «σημείο» του αντιστοιχεί σε ένα διάνυσμα βαρών.

### **2.1.3. Brain state in a box (BSB)**

Ο τύπος αυτός ΤΝΔ προτάθηκε από τον Anderson. Το BSB είναι ένα αυτοσυσχετιζόμενο ΤΝΔ που αποτελείται από ένα επίπεδο ΤΝ οι οποίοι επεξεργάζονται τα διπολικά διανύσματα εισόδου (οι συνιστώσες τους είναι -1 και +1 όπως και στο Adaline). Η έξοδος κάθε ΤΝ ανατροφοδοτείται στους άλλους ΤΝ του επιπέδου (αλλά και στον ίδιο τον ΤΝ), συνήθως επιλεκτικά και με ασυμμετρικά βάρη. Λειτουργικά το BSB μπορεί να χωριστεί σε δύο τμήματα:

- Έναν γραμμικό συσχετιστή.
- Ένα μη γραμμικό τμήμα.

#### **2.18.4. Hamming Network (Ha)**

Το ΤΝΔ **Ha** αποτελείται από το επίπεδο χαρακτηριστικών (επίπεδο εισόδου), με  $N$  ΤΝ (και έναν σταθερό με τιμή εξόδου **1**), το επίπεδο κατηγοριών (κρυφό επίπεδο) και το επίπεδο εξόδου με  $M$  ΤΝ το καθένα. Μεταξύ του επιπέδου εισόδου και του κρυφού επιπέδου υπάρχει πλήρης διασύνδεση με μεταβλητά βάρη, ενώ οι ΤΝ του κρυφού επιπέδου συνδέονται ένας προς έναν με τους αντίστοιχους του επιπέδου εξόδου και μάλιστα η δραστηριοποίηση των πρώτων περνάει στους δεύτερους χωρίς « φιλτράρισμα», εφόσον υλοποιείται με σταθερά μοναδιαία βάρη.

#### **2.18.5. ΤΝΔ βασιζόμενα στις εργασίες του Kohonen**

##### **Learning vector quantization (LVQ)**

Ο τύπος αυτός ΤΝΔ προτάθηκε από τον Kohonen. Τυπικά το LQV αποτελείται από το επίπεδο εισόδου, από το κρυφό επίπεδο που χωρίζεται σε ομάδες ΤΝ ανάλογα με τον αριθμό των κατηγοριών ταξινόμησης και από το επίπεδο εξόδου που διαθέτει τόσους ΤΝ όσες και οι κατηγορίες ταξινόμησης. Το επίπεδο εισόδου συνδέεται πλήρως και με μεταβλητά βάρη με το κρυφό επίπεδο. Οι ΤΝ κάποιας ομάδας του κρυφού επιπέδου συνδέονται μόνο με έναν ΤΝ του επιπέδου εξόδου, δηλαδή, με τον ΤΝ που αντιπροσωπεύει την κατηγορία τους και μάλιστα με σταθερά αμετάβλητα βάρη.

##### **Counter propagation (CP)**

Ο τύπος αυτός ΤΝΔ προτάθηκε από τον Hecht-Nielsen. Πρόκειται για ένα ετεροσυσχετιζόμενο ΤΝΔ που πραγματοποιεί απεικόνιση των διανυσμάτων εισόδου σε αντίστοιχα διανύσματα εξόδου, ενώ η πληροφορία κινείται και προς τις δύο κατευθύνσεις. Συγκεκριμένα εισάγουμε δύο

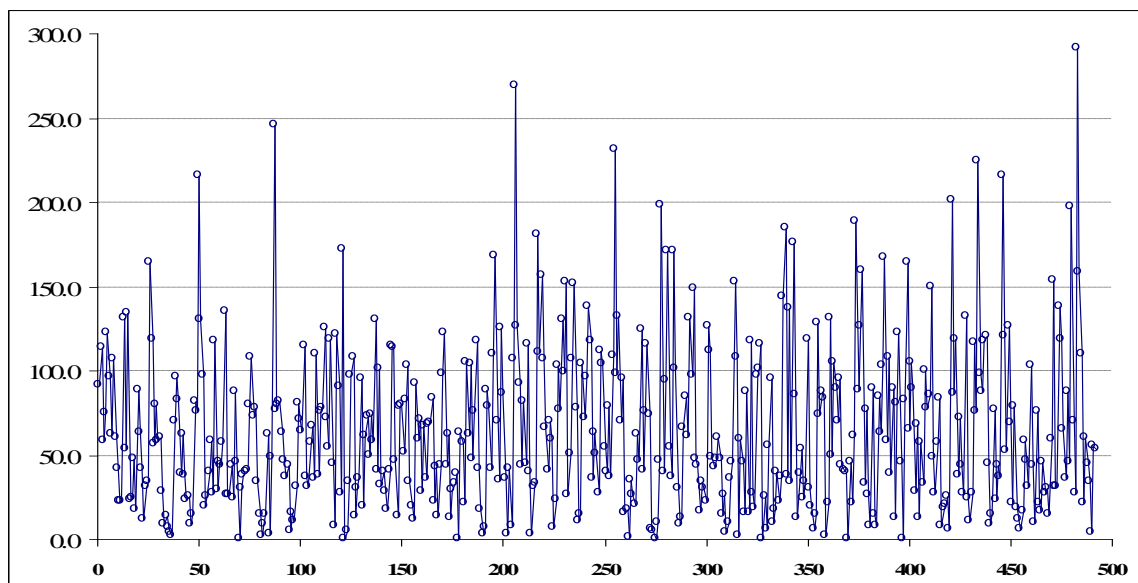


διανύσματα εισόδου  $x$  και  $y$ , τα οποία αλληλεπιδρούν και τελικά επιλέγεται ο TN που το διάνυσμα των βαρών του βρίσκεται πλησιέστερα στο διάνυσμα  $x+y$ . Αυτός ο TN ενεργοποιεί τα δύο επίπεδα εξόδου που δίνουν ως έξοδο τα πλησιέστερα αποθηκευμένα διανύσματα  $x'$  και  $y'$ . Αν εισάγουμε στο CP μόνο το  $x$ , τότε λαμβάνουμε ως έξοδο το  $x'+y'$ . Επομένως το CP υπολογίζει την συνάρτηση απεικόνισης  $x \rightarrow y'$ . Τέλος αν υπάρχει η αντίστροφη της προηγούμενης συνάρτησης, τότε εισάγοντας μόνο το  $y$  λαμβάνουμε ως έξοδο το  $x'+y'$  και επομένως το CP υπολογίζει την συνάρτηση απεικόνισης του  $y \rightarrow x'$ .

Η απλοποιημένη (μονοκατευθυντική) μορφή του CP αποτελείται από ένα επίπεδο εισόδου, που αποθηκεύει προσωρινά το διάνυσμα εισόδου (με ψηφιακές ή πραγματικές τιμές), από ένα κρυφό επίπεδο Kohonen και από ένα επίπεδο εξόδου "Grossberg Outstar". Αυτός ο συνδυασμός με διαφορετικού τύπου επίπεδα, παράγει ορισμένες χρήσιμες ιδιότητες τις οποίες δεν διαθέτει κανένα από τα δύο TND που αποτελούν το CP.

## 2.19. Εφαρμογή ΤΝΔ στις χρονοσειρές των υδρολογικών δεδομένων του σταθμού στο Νεστόριο.

Στην παρούσα εργασία έγινε χρήση της χρονοσειράς μηνιαίων υψών βροχής για τα έτη 1962 έως 2003, στο σταθμό Νεστορίου της λεκάνης απορροής του ποταμού Αλιάκμονα, σε υψόμετρο 850 m του νομού Καστοριάς. Αποτελούν ένα σύνολο από συνεχείς μετρήσεις με σημαντικό χρονικό μήκος κατάλληλο για την ανάπτυξη μοντέλων χρονικών σειρών. Τα πλήρη δεδομένα της σειράς δίνονται στον Πίνακα 2.17, ενώ στην Εικόνα 2.41. δίνεται η γραφική παράσταση της σειράς.



Εικόνα 2.41. Γραφική απεικόνιση των τιμών της χρονοσειράς των υψών βροχής.

Ακολουθεί ο πίνακας 2.17, με τις τιμές των παρατηρήσεων της χρονοσειράς .

**Πίνακας 2.17**  
**ΦΟΡΕΑΣ: ΔΕΗ & ΙΔΕ****ΜΗΝΙΑΙΑ ΥΨΗ ΒΡΟΧΗΣ ΒΡΟΧΟΜΕΤΡΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΝΕΣΤΟΡΙΟΥ****ΥΨΟΜΕΤΡΟ =850 & 792 m**

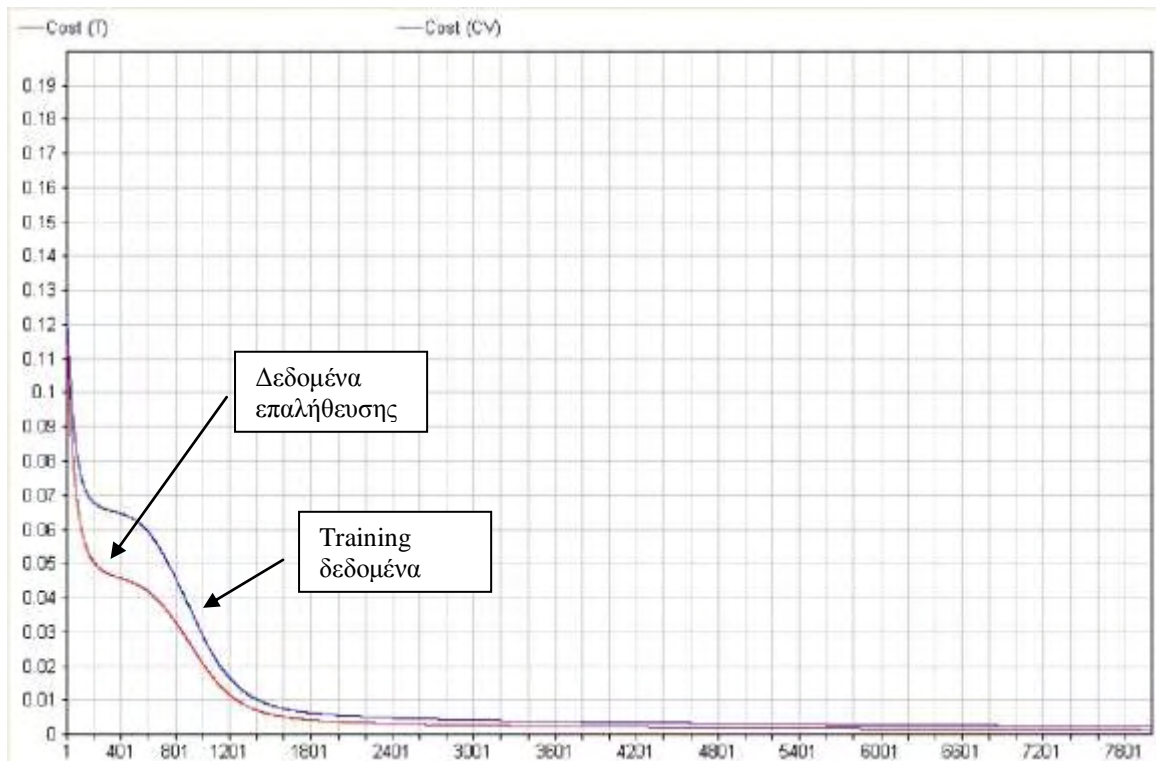
Υδρ. Έτος	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΕΤΟΣ
1962-63	91,0	114,0	58,0	75,0	122,0	96,0	62,0	107,0	60,0	42,0	22,0	22,0	<b>871,0</b>
1963-64	131,0	53,0	134,0	23,0	24,0	48,0	17,0	88,0	63,0	42,0	12,0	31,0	<b>666,0</b>
1964-65	34,0	164,0	118,0	56,0	80,0	58,0	60,0	28,0	9,0	14,0	7,0	4,0	<b>632,0</b>
1965-66	2,0	70,0	96,0	83,0	39,0	62,0	38,0	23,0	25,0	9,0	15,0	82,0	<b>544,0</b>
1966-67	76,0	216,0	130,0	97,0	19,0	25,0	40,0	58,0	27,0	117,0	29,0	46,0	<b>880,0</b>
1967-68	44,0	57,0	135,0	26,0	26,0	44,0	24,0	87,0	46,0	0,0	30,0	38,0	<b>557,0</b>
1968-69	40,0	41,0	80,0	108,0	73,0	78,0	34,0	15,0	2,0	9,0	15,0	62,0	<b>557,0</b>
1969-70	3,0	49,0	246,0	77,0	80,0	82,0	63,0	47,0	37,0	44,0	5,0	16,0	<b>749,0</b>
1970-71	11,0	31,0	81,0	71,0	64,0	115,0	37,0	31,0	57,0	67,0	36,0	110,0	<b>711,0</b>
1971-72	38,0	76,0	78,0	125,0	72,0	54,0	118,0	45,0	8,0	121,0	90,0	27,0	<b>852,0</b>
1972-73	172,0	0,0	5,0	34,0	97,0	108,0	14,0	30,0	36,0	95,0	19,0	61,0	<b>671,0</b>
1973-74	73,0	50,0	74,0	58,0	130,0	41,0	101,0	32,0	40,0	28,0	17,0	41,0	<b>685,0</b>
1974-75	115,0	114,0	47,0	14,0	79,0	80,0	51,0	83,0	103,0	34,0	19,0	12,0	<b>751,0</b>
1975-76	92,0	59,0	71,0	28,4	67,0	35,5	68,0	68,5	83,5	22,6	43,2	13,5	<b>652,2</b>
1976-77	43,8	98,3	122,0	43,7	62,1	12,3	28,8	32,6	38,9	0,0	63,2	57,0	<b>602,7</b>
1977-78	21,2	105,0	61,8	104,0	47,2	75,9	117,0	41,5	17,8	2,5	7,0	88,4	<b>689,3</b>
1978-79	78,6	41,7	110,0	168,0	69,6	34,5	125,0	86,4	35,6	3,3	41,8	7,3	<b>801,8</b>
1979-80	107,0	269,0	126,0	92,4	43,6	81,1	44,2	116,0	39,9	2,7	30,7	33,0	<b>985,6</b>
1980-81	181,0	111,0	156,0	107,0	66,0	41,1	69,5	58,9	6,9	23,3	103,0	76,5	<b>1000,2</b>
1981- 82	130,0	98,6	152,0	25,8	50,2	107,0	151,0	77,4	10,6	14,5	104,0	71,8	<b>992,9</b>
1982-83	96,3	138,0	117,0	35,5	63,0	50,5	27,3	112,0	104,0	54,1	39,5	79,0	<b>916,2</b>
1983- 84	37,2	109,0	231,0	97,6	132,0	70,2	95,5	15,6	17,5	1,1	34,5	25,8	<b>867,0</b>
1984-85	20,0	62,0	47,0	124,0	40,5	75,5	116,0	73,5	6,0	5,0	0,0	10,0	<b>579,5</b>
1985-86	47,0	198,0	40,0	94,0	171,0	54,5	36,5	171,0	101,0	30,0	9,0	13,0	<b>965,0</b>
1986-87	66,0	84,0	60,7	131,0	97,0	149,0	47,5	44,0	16,5	34,0	30,5	22,0	<b>782,2</b>
1987-88	126,0	112,0	49,0	42,5	48,0	60,0	48,0	14,1	26,0	4,0	9,6	36,4	<b>575,6</b>
1988-89	46,0	152,0	108,0	1,8	59,0	46,0	15,5	87,0	15,5	117,0	27,5	18,5	<b>693,8</b>
1989-90	97,0	100,5	116,0	0,3	25,5	6,0	55,0	95,0	10,0	17,5	40,0	22,0	<b>584,8</b>
1990-91	36,5	144,0	184,5	38,0	136,5	34,0	176,0	85,0	13,0	38,5	53,0	24,0	<b>963,0</b>
1991-92	34,0	118,0	30,0	19,5	5,5	15,0	128,5	74,0	87,0	83,5	1,5	21,0	<b>617,5</b>
1992-93	131,0	49,5	105,0	89,0	70,0	95,0	44,0	41,0	40,0	0,0	46,0	21,0	<b>731,5</b>
1993-94	61,0	188,0	88,0	126,0	159,0	33,0	77,0	26,0	8,0	89,0	15,0	8,0	<b>878,0</b>
1994-95	84,0	63,0	103,0	167,0	58,5	107,5	39,0	89,0	13,0	81,0	122,0	45,5	<b>972,5</b>
1995-96	0,0	82,5	164,0	65,0	105,0	89,0	28,0	68,0	13,0	57,0	33,0	100,0	<b>804,5</b>
1996-97	77,3	85,5	149,1	48,3	27,6	57,4	83,2	7,3	18,2	20,6	24,8	5,9	<b>605,2</b>
1997-98	200,8	86,8	118,1	38,2	72,3	43,5	27,3	131,6	24,5	10,6	27,0	116,9	<b>897,6</b>
1998-99	75,7	224,3	98,4	87,1	117,2	120,2	44,9	8,9	14,3	76,8	23,3	43,3	<b>934,4</b>
1999-00	37,0	215,9	120,0	52,7	126,1	68,6	21,6	78,5	18,1	11,2	5,4	16,2	<b>771,3</b>
2000-01	58,4	46,5	31,3	102,7	43,5	10,0	76,0	21,4	16,8	45,3	27,4	30,4	<b>509,7</b>
2001-02	14,8	59,2	153,6	31,5	31,5	137,8	118,3	65,2	36,0	87,2	46,1	197,2	<b>978,4</b>
2002-03	70,1	26,7	291,2	158,1	110,0	21,1	60,4	44,7	34,2	3,6	55,7	53,6	<b>929,4</b>
<b>Μέση τιμή</b>	<b>70,7</b>	<b>102,0</b>	<b>109,0</b>	<b>72,3</b>	<b>73,4</b>	<b>64,0</b>	<b>64,1</b>	<b>61,2</b>	<b>33,6</b>	<b>38,0</b>	<b>33,7</b>	<b>44,1</b>	<b>766,0</b>
<b>MAX</b>	<b>200,80</b>	<b>269,00</b>	<b>291,20</b>	<b>168,00</b>	<b>171,00</b>	<b>149,00</b>	<b>176,00</b>	<b>171,00</b>	<b>104,00</b>	<b>121,00</b>	<b>122,00</b>	<b>197,20</b>	<b>1000,20</b>
<b>MIN</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>5,00</b>	<b>0,30</b>	<b>5,50</b>	<b>6,00</b>	<b>14,00</b>	<b>7,30</b>	<b>6,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>5,90</b>	<b>509,70</b>
<b>Stand.Dev.</b>	<b>49,12</b>	<b>60,97</b>	<b>60,37</b>	<b>48,38</b>	<b>40,71</b>	<b>37,20</b>	<b>42,64</b>	<b>37,99</b>	<b>29,70</b>	<b>36,93</b>	<b>30,43</b>	<b>40,36</b>	<b>152,13</b>
<b>Variance</b>	<b>2412,66</b>	<b>3717,94</b>	<b>3644,39</b>	<b>2340,38</b>	<b>1657,29</b>	<b>1384,09</b>	<b>1817,93</b>	<b>1443,50</b>	<b>882,35</b>	<b>1363,90</b>	<b>926,14</b>	<b>1629,15</b>	<b>23143,16</b>
<b>Κύρτωση</b>	<b>0,35</b>	<b>0,72</b>	<b>1,73</b>	<b>-0,87</b>	<b>-0,31</b>	<b>-0,30</b>	<b>-0,35</b>	<b>0,65</b>	<b>1,19</b>	<b>-0,44</b>	<b>1,42</b>	<b>5,73</b>	<b>-1,36</b>

## **2.20. Τελικό Μοντέλο.**

Για την πρόβλεψη και ανάλυση των χρονοσειρών υπάρχουν διάφορες κατηγορίες μεθόδων προβλέψεων, όπως μετασχηματισμοί Box-Cox, μέθοδοι εξομάλυνσης, μέθοδοι κινητού μέσου όρου, μέθοδοι εκθετικής εξομάλυνσης (Single, Holt, Winters), μέθοδοι αποσύνθεσης, καμπύλη τάση; κύκλου, μέθοδος CensusII μοντέλα παλινδρόμησης, απλή παλινδρόμηση, πολλαπλή παλινδρόμηση (Δήμου, 2005a,b), οικονομετρικά μοντέλα, αλγόριθμοι NLS, αυτοπαλινδρομικά μοντέλα, ανάλυση Box-Jenkins (Box & Jenkins, 1970)., στασιμότητα και μετασχηματισμοί, ARMA και ARIMA μοντέλα, εποχικότητα και μοντέλα ARIMA ( Δαλέζιος, 2001)

### **2.20.1. Περιγραφή της τελικής τοπολογίας του μοντέλου.**

Το τελικό προτεινόμενο μοντέλο, (το οποίο είναι αποτέλεσμα μιας σειράς δοκιμών) υιοθετήθηκε γιατί μας έδωσε την καλύτερη προσαρμογή στα δεδομένα (μικρότερο τυπικό σφάλμα). Συγκεκριμένα, η τελική τοπολογία που διαμορφώθηκε ήταν ένα (12,5,3,1) επανατροφοδοτούμενο δίκτυο (Kamijo & Tanigawa, 1990) το οποίο αποτελούνταν από 12 κόμβους εισόδου, ένα κόμβο εξόδου και δύο κρυφά επίπεδα 5 και 3 κόμβων αντίστοιχα. Το διάγραμμα εκπαίδευσης με το πλήθος των epochs του μοντέλου δίνεται στην Εικόνα 2.42.

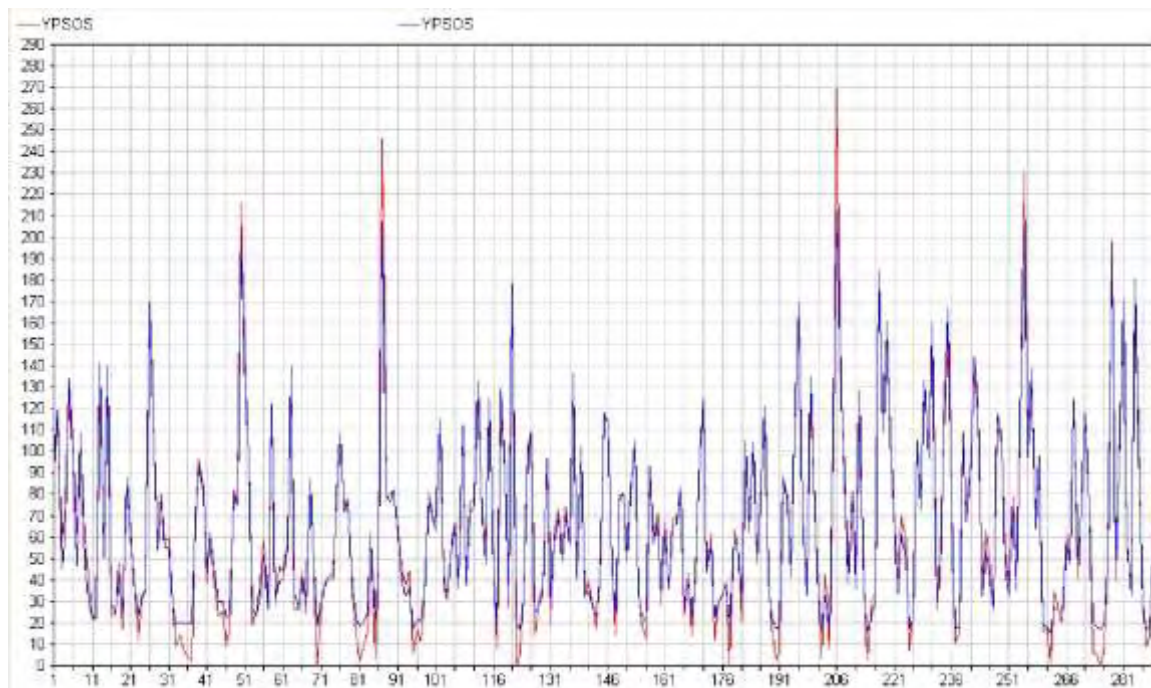


**Εικόνα 2.32** Διαδικασία εκπαίδευσης του τελικού δικτύου. Η προβλεπτική ικανότητα πιστοποιείται από τη σύγκλιση των Training δεδομένων και των δεδομένων επαλήθευσης

Στην Εικόνα 2.42 φαίνεται επίσης η δυνατότητα καλής προσαρμογής του μοντέλου στα δεδομένα λόγω της σύγκλισης των τιμών σφάλματος των δεδομένων εκπαίδευσης και των δεδομένων δοκιμής. Αυτό δηλώνει πως η ακρίβεια του μοντέλου θα είναι ίδια με την εκτιμώμενη όταν χρησιμοποιηθεί για πρόβλεψη σε νέες τιμές.

Το τελικό εκτιμώμενο σφάλμα (RMS) ήταν τάξης του ενός χιλιοστού βροχής όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.42. και κρίνεται πολύ ικανοποιητικό. Η πλατφόρμα λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη του μοντέλου ήταν το Neurosolution της εταιρείας Neurodomension ([www.nd.com](http://www.nd.com)) το οποίο δίνει την δυνατότητα σύνθεσης ανατροφοδοτούμενων Νευρωνικών Μοντέλων.

Στην Εικόνα 2.43, δίνονται από κοινού οι πραγματικές και οι προβλεπόμενες τιμές της χρονοσειράς των υψών βροχής.



**Εικόνα 2.43** Πραγματικές και προβλεπόμενες τιμές της χρονοσειράς των υψών βροχής για το τελικό μοντέλο του νευρωνικού δικτύου

### 3. ΣΥΖΗΤΗΣΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διατριβή, στόχος ήταν, η κατασκευή ενός μοντέλου προσομοίωσης, στηριζόμενη στην δημιουργία και εκπαίδευση Νευρωνικών δομών, οι οποίες διαμορφώθηκαν ώστε να αναπαράγουν την λογιστική καμπύλη και την τροχιά του συστήματος με όσο το δυνατόν μικρότερη τιμή σφάλματος προσομοίωσης.

Ο περιορισμός της έρευνάς μας συνίσταται, στην στενή θεματική περιοχή των μη γραμμικών συστημάτων. Η επιλογή αυτή δικαιολογείται από το γεγονός ότι, το Νευρωνικό μας μοντέλο στηρίχθηκε πάνω σε χρονοσειρές που προκύπτουν από τις διαδικασίες καταγραφής υψών βροχής και οι οποίες είναι μη γραμμικές, επομένως ο πειραματικός χαρακτηρισμός τους εμπίπτει σε αυτόν τον χώρο.

Την χρονοσειρά την επιλέξαμε από τον χώρο της τεχνικής υδρολογίας και συγκεκριμένα από την υδρολογική μελέτη κατασκευής φράγματος, στο Νεστόριο του νομού Καστοριάς. Αντικείμενο της ανωτέρω μελέτης ήταν η εκτίμηση των πλημμυρών σχεδιασμού διαφόρων περιόδων επαναφοράς και την πιθανή μέγιστη πλημμύρα του ποταμού Αλιάκμονα στην θέση Νεστόριο του νομού Καστοριάς προκειμένου να υποστηριχθεί η διαστασιολόγηση του φράγματος και των συναφών έργων (υπερχειλίσης, σήραγγα εκτροπής) που πρόκειται να κατασκευασθούν στη θέση αυτή.

Η λεκάνη απορροής του π. Αλιάκμονα στη θέση Νεστόριο του νομού Καστοριάς είναι υπολεκάνη του δυτικού κλάδου του ποταμού και ευρίσκεται στο δυτικότερο άκρο της Μακεδονίας, στην ανατολική ομβροπλευρά του όρους Γράμου και σε γεωγραφική θέση του κέντρου βάρους της  $20^{\circ} 53' \text{A.M}$  και  $40^{\circ} 25' \text{B.P.}$  περίπου. Το στόμιο της λεκάνης είναι σε υψόμετρο περίπου 780 m,

ενώ το μεγαλύτερο υψόμετρο του υδροκρίτη είναι στο +2520. Η λεκάνη, με έκταση 255,3 Km<sup>2</sup> και μέσο υψόμετρο 1398m, διαθέτει πολύ ανεπτυγμένο και πυκνό υδρογραφικό δίκτυο. Το μεγαλύτερο μέρος καλύπτεται από προϊόντα αποσάθρωσης τριτογενών αποθέσεων (72,2%) και από αποσάθρωση μικτού φλύσχη (22,3%). Τα εδάφη αυτά είναι στη πλειοψηφία τους βαθιά. Με μικρότερο ποσοστό συνολικής κάλυψης (3,5%), ευρίσκονται εδάφη από αποσάθρωση σκληρών ασβεστολίθων, κατά το μεγαλύτερο μέρος τους αβαθή έως γυμνός βράχος. Η λεκάνη παρουσιάζει στο μεγαλύτερο μέρος της πλούσια δασική βλάστηση, με εξαίρεση κυρίως τον ορεινό όγκο του Γράμου στα δυτικά, όπου η βλάστηση είναι πολύ αραιή και το ανατολικότερο άκρο της λεκάνης, εκατέρωθεν της κύριας κοίτης, όπου είναι έντονη η ανθρωπογενής επίδραση και η ανάπτυξη καλλιεργειών. Οι εμφανιζόμενες ζώνες βλάστησης είναι της φυλλοβόλου δρυός, της ελάτης που περιλαμβάνει διαπλάσεις ελάτης, οξιάς και μαύρης πεύκης και στα μεγαλύτερα υψόμετρα, η ψευδαλπική ζώνη, αποτελούμενη από λιβάδια.

Στην ευρύτερη περιοχή μελέτης το βροχομετρικό δίκτυο είναι επαρκές, γεγονός που επέτρεψε τον υπολογισμό μηνιαίας χρονοσειράς της επιφανειακής βροχόπτωσης που δέχεται η λεκάνη. Ουσιαστικό ρόλο στους υπολογισμούς αυτούς διαδραμάτισαν τα στοιχεία από τους βροχομετρικούς σταθμούς 1) του Πεύκου (ΔΕΗ) στο κέντρο της λεκάνης, 2) του Νεστορίου (ΙΔΕ και μετέπειτα ΔΕΗ) ακριβώς στην έξοδο της λεκάνης 3) του Πληκατίου (ΔΕΗ) σε πολύ μικρή απόσταση (περίπου 5 km προς τα ΝΔ) από τον υδροκρίτη της υπό μελέτη λεκάνης, 4) της Δαμασκηνιάς (ΔΕΗ) περίπου 11 km ΝΑ των ορίων του υδροκρίτη και των σταθμών του 5) Άργους Ορεστικού και 6) Πενταλόφου, οι οποίοι βρίσκονται στην ευρύτερη περιοχή της λεκάνης απορροής



Αφού έγινε επεξεργασία των δεδομένων των χρονοσειρών για όλους τους σταθμούς της λεκάνης απορροής και η απεικόνιση σε διαγράμματα του μέσου μηνιαίου ύψους βροχής και της χρονικής μεταβολής των ετήσιων βροχοπτώσεων τους, το επόμενο βήμα ήταν η απεικόνιση των ετήσιων και μέσων μηνιαίων διακυμάνσεων υετού. Στην συνέχεια συσχετίσαμε την μεταβολή του ύψους βροχής με τα γεωδαιτικά υψόμετρα των σταθμών και συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι, υπάρχει ισχυρή γραμμική συσχέτιση της αύξησης του μέσου ετήσιου ύψους βροχής (mm) με την αύξηση του υψόμετρου (m). Οι συσχετίσεις δε όλων των σταθμών σε σχέση με τους σταθμούς Πεύκου και Νεστορίου έδωσαν συντελεστές οι οποίοι κυμαίνονται από 0,69 έως 0,94 και κρίνονται πολύ ικανοποιητικοί ( $R^2 = 0,9715$ ).

Μετά από την ολοκλήρωση αυτής της αναζήτησής μας πάνω στα υδρολογικά δεδομένα της περιοχής μελέτης, κρίναμε ως κατάλληλη χρονοσειρά για την διεξαγωγή ενός μοντέλου με χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων, αυτή του βροχομετρικού σταθμού Νεστορίου που βρίσκεται σε υψόμετρο 850 m και μας δίνει μηνιαία ύψη βροχής για τα έτη από 1962 έως 2003. Η επιλογή μας στηρίχθηκε στο γεγονός ότι, η χρονοσειρά αποτελείται από ένα σύνολο συνεχών μετρήσεων με σημαντικό χρονικό μήκος κατάλληλο για την ανάπτυξη μοντέλων χρονικών σειρών.

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη του μοντέλου ήταν το Neurosolution της εταιρίας Neurodomation ([www.nd.com](http://www.nd.com))

Μετά από μια σειρά δοκιμών προέκυψε το τελικό μας προτεινόμενο μοντέλο και υιοθετήθηκε γιατί έδωσε το μικρότερο τυπικό σφάλμα της τάξης του ενός χιλιοστού βροχής και κρίνεται πολύ ικανοποιητικό. Έτσι μπορούμε καταληκτικά να σημειώσουμε τις εξής παρατηρήσεις:

- \_ Το Νευρωνικό Μοντέλο προσομοιώνει την χρονοσειρά με αρκούντως ικανοποιητικό τρόπο.
- \_ Η ανάπτυξη του μοντέλου είναι ανεξάρτητη από ενδεχόμενη ύπαρξη τάσης ή παραδοχές στασιμότητας.
- \_ Το τελικό μοντέλο είναι μη ρητό και απαιτεί την υποστήριξη από κατάλληλο υπολογιστικό σύστημα.

Πρέπει να τονιστεί επίσης πως η προβλεπτική ικανότητα του μοντέλου είναι βραχεία και εκπορεύεται από τα δεδομένα εκπαίδευσης. Αυτό σημαίνει πως η αξιοπιστία του μοντέλου εξαντλείται σε ένα ή δύο χρονικά βήματα στο μέλλον. Κάθε φορά που μια νέα μέτρηση πραγματοποιείται το δίκτυο πρέπει να επανεκπαιδεύεται και να επαναπροσδιορίζονται οι τιμές των βαρών του ώστε να είναι αξιοποιήσιμο για νέα πρόβλεψη.

#### 4. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

**Abbe.**, 1915. Gigantic snowflakes. Monthly Weather Review, (43): 73-78.

**Abott, M.B., J.C. Bathurst, J.A. Cunge, P.E. O'Connell and J. Rasmussen,**

1986a. An introduction to European hydrological systems - systeme hydrologique Europeen (SHE) Part 1: History and philosophy of physically based distributing modeling system. Journal of hydrology, 87,45-59.

**Abott, M.B., J.C. Bathurst, J.A. Cunge, P.E. O'Connell and J. Rasmussen,**

1986b.

An introduction to European hydrological systems - systeme hydrologique Europeen (SHE) Part 1: Structure of a physically based distributing modeling system. Journal of hydrology, 87, 61-77.

**Adams, F.D.**, 1954. The birth and development of geological sciences. Dover

Publ., New York, 426-460.

**Ακριτίδης, Κ.Β.**, 1993. Ξήρανση – αποθήκευση γεωργικών προϊόντων.

Εκδόσεις Γιαχούδη – Γιαπούλη, Θεσσαλονίκη, 287 σελ.

**Alley, W.M. and P.E., Smith,** 1982. Distributed routing rainfall - runoff model

Version II. U.S. Geological Survey, Open File Report, 82-344.

**Alley, W.M.**, 1984. On the treatment of evapotranspiration, soil moisture

accounting and aquifer recharge in monthly water balance models. Water Resour. Res., 20, 1137-1149.

**Allen, R.G. and W.O. Pruitt,** 1986. Rational use of the FAO Blaney-Criddle

formula. Journal of Irrig. and Drain. Engrg., ASCE 114(2):  
375- 380.

**Alsing P, Gavrielides A, Kovanis V**, February 1994. Using Neural Networks  
for Controlling Chaos, Physical Review E, Volume 49,  
Number 2, pages 1225-1231

**Anderson D, McNeil G**, August 1992. Artificial Neural Networks Te-  
chnology - a DACS State of the Art Report.

**Anderson, Jame A**, 1995. An introduction to Neural Networks. Cambridge,  
MA : The I.T. Press.

**Arnold, J.G., J.R. Williams, A.D. Nicks, and N.B. Sammons**, 1990.  
SWRRB - A basin scale model for soil and water resources  
management. Texas University Press, Texas

**Alsing P, Gavrielides A, Kovanis V**, February 1994, Using Neural Networks  
for Controlling Chaos, Physical Review E, Volume 49,  
Number 2, pages 1225-1231

**Βαβλιάκης ΕΛ.**, 1989, «Τα συστήματα Qanat(Κανάτ) στην Ελλάδα. Μελέτη  
των συστημάτων Qanat στη Επαρχία Φυλλίδας Σερρών από  
μορφολογική, υδρογραφική και κοινωνικοοικονομική άποψη»,  
Μονογραφία, Επιστημονική Επετηρίδα του τμήματος Γεωλογίας  
του ΑΠΘ, Παράρτημα Αρ.9, σελ.93

**Bathurst, J.C.**, 1986a. Physically based distributing modeling of an upland  
catchment using the systeme hydrologique Europeen. Journal of  
Hydrology, 87, 79-102.

**Bathurst, J.C.**, 1986b. Sensitivity analysis of the systeme hydrologique  
Europeen for an upland catchment. Journal of Hydrology, 87,

103-121.

- Battan, L.J.**, 1973. Radar observation of the atmosphere. Chicago, University of Chicago Press, 324 p.
- Bergeron, T.**, 1933. On the physics of clouds and precipitation. Proc. Union of Geodesy and Geophysics, Lisbon, Portugal.
- Biswas, A.K.**, 1969. A short history of hydrology. In: Progress of hydrology, Proc. of the First International Seminar for Hydrology Professors, Univ. of Illinois, Urbana, Ill., 914-936.
- Black, R.F.**, 1954. Precipitation at Barrow, Alaska, greater than recorder. Trans. A.G.U.,35(2):203-206.
- Bobee, B.**, 1973. Sample error of T year events computed by fitting a Pearson Type 3 distribution. Wat. Res. Res.,9(5): 1264-1270.
- Bobee, B.**, 1975. The Log Pearson Type 3 distribution and its application in hydrology. Wat. Res. Res., 11(5): 681-689.
- Bobee, B. and F. Ashkar**, 1991. The gamma family and derived distributions applied in hydrology. Water Resources Publications, USA, 203 p.
- Box, G.E.P. and G.M. Jenkins**, 1976. Time series analysis: forecasting and control Revised Edition, Holden Day, Inc., San Francisco, Calif., 532 p.
- Brown, M.J. and E.L. Peck**, 1962. Reliability of precipitation measurements as related to exposure. Journal of Applied Meteorology, 1(2):202-207.

- Chow, V.T.**, 1964. Hydrology and its development. In: Handbook of applied hydrology (Chow v.T., ed.). McGraw-Hill Book Co., New York, Chapter 1, 1-10.
- Chow, V.T., D.R. Maidment and L.W. Mays**, 1988. Applied hydrology. McGraw Hill Book Co., New York, Chapter 1, 1-49.
- Chow, Y.T., D.R. Maidmeot and L.W. Mays**, 1988. Applied hydrology. McGraw Hill Book Company, 572 p.
- Clarke, R.T.**, 1973. A review of some mathematical models used in hydrology with observations on their calibration and use. Journal of Hydrology, 19, 1-20.
- Collier, C.G.**, 1989. Applications of weather radar systems. A guide to uses of radar data in meteorology and hydrology. Ellis Horwood Ltd, Chichester, Simon & Schuster, London, 294 p.
- Corps of Engineers.**, 1972. Program description and users manual for SSARR. U.S. Army Engineer Division, North Pacific Division.
- Creutin, J., G. Delrieu and T. Lebel**, 1988. Rain measurement by raingage – radar combination : A geostatistical approach . Journal of Atmosp. Ocean Techn., Vol. 5, 102-115.
- Crawford, N.H. and R.K. Linsley**, 1966. Digital simulation in hydrology Stanford watershed model IV. T.R. 39, Department of Civil Engineering, Stanford University, Stanford, California.
- Davalo E. and Naim P**, 1991. Neural Networks. London: Macmillan Education
- Dayhoff, Judith**, 1990. Neural Network Architectures: An Introduction, New York ,NY: Van Nostrand Reinhold

- Doorenbos, J. and W.O. Pruitt** 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrig. and Drain. Paper No 24, 2<sup>nd</sup> ed., FAO Rome, Italy, 156 p.
- Durrant, E.F., and S.R. Blackwell**, 1959. The magnitude and frequency of floods on the Canadian Prairies. Proceedings, Symp. on Spillway design floods, Ottawa.
- Feldman, A.D.**, 1981. HEC Model for water resources system simulation: theory and experience. Advances in Hydroscience, Ven Te Chow (ed.), vol 12, Academic Press, Inc., New York, 297-423.
- Feldman, A.D.**, 1992. Systems analysis applications at the hydrologic engineering center. Journal of Water Resources Planning and Management, 118(3), 249-261.
- Fritz, S. and J.H. McDonald**, 1949. Average solar radiation in the United States. Heating and Ventilating 46: 61-64.
- Frohlich, C.**, 1977. Contemporary measures of solar constant. In: O.R. White, (ed.). The solar output and its variations. Colo. Assoc. University Press, Boulder, Colo., 526 p.
- Φλόκας, Α.**, 1986. Μαθήματα μετεωρολογίας και κλιματολογίας. Εκδόσεις Ζήτη.
- Gallant A, White H**, 1988. There Exists a Neural Network That Does Not Make Avoidable Mistakes, Proceedings of the Second Annual IEEE Conference on Neural Networks, Volume I, pages 657-664.
- Gray, D.M. and P.J. Landine**, 1987. An energy - budget snowmelt model for

the Canadian Prairies. Can. J. Earth Sci., Vol. 25, No 9,  
1292-1303.

**Green, W.H. and G.A. Ampt**, 1911. Studies on soil physics. Journal of Agric. Sci., Vol. 4, part 1, 1-24.

**Goldman, D.M.**, 1989. Loss rate representation in HEC-1 watershed model: In unsaturated flow in hydrologic modeling. Theory and Practice, Morel-Seytoux, H.J. (ed), Nato ASI Series, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

**Gumbel, E.J.**, 1941. The return period of flood flows. Ann. Math. Stat., Vol. 12, No 2, 163-190.

**Γεωργίου, Π.Ε., Δ.Μ. Παπαμιχαήλ και Ζ. Παπαζαφειρίου**, 2000. Συγκριτική αξιολόγηση των μεθόδων Penman και Penman-Monteith με τη βοήθεια εκτιμήσεων εξατμισοδιαπνοής αναφοράς στην Ελλάδα. Πρακτικά 5<sup>ου</sup> Πανελληνίου Επιστημονικού Συνεδρίου Μετεωρολογίας - Κλιματολογίας Φυσικής της Ατμόσφαιρας, Θεσσαλονίκη.

**Γεωργίου, Π.Ε.**, 1996. Διαστασιολόγηση ταμιευτήρων με τη μέθοδο Rippl σε συνθετικές σειρές εισροών και τη μέθοδο των πιθανοτήτων μετάβασης σε ιστορική σειρά. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τμήμα Γεωπονίας Α.Π.Θ., 269 σελ.

**Γεωργίου, Π.Ε. και Δ.Μ. Παπαμιχαήλ**, 2000. Διαστασιολόγηση του ταμιευτήρα του Ολύθιου με χρήση συνθετικών σειρών μηνιαίων εισροών. Γεωτεχνικά Επιστημονικά Θέματα, Τόμος 11, Σειρά Ι, No 2/2000, Θεσσαλονίκη, 148-160.



**Δήμος Γ.**, 2005a. Γενικά μαθηματικά . Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας

**Δήμος Γ.**, 2005 b. Βιοστατιστική. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας

**Haan, C. T.**, 1977. Statistical methods in hydrology. The Iowa University Press, Iowa.

**Haan, C.τ., H.P. Johson, and D.L. Brakensiek**, 1982. Hydrologic modeling of small watersheds. ASAE Monograph, Michigan, USA, 533 ρ.

**Hamilton, E.L. and L.F. Reimann**, 1958. Simplified method of sampling rainfall on the San Dimas experimental forest. Calif. Forest and Range Exp. Sta. Tech. Paper No.26, U.S. Dept. of Agriculture, 8 ρ.

**Haykin S**, 1994. Neural Networks - A comprehensive foundation, Prentice Hall, ISBN 0-02-352761-7

**Hazen, A.**, 1914. Storage to be provided in impounding reservoirs for municipal water supply. Trans. Am. Soc. Civ. Eng., vol. 77, 1539-1640

**Hecht-Nielsen R**, New York 1987. Kolmogorov's Mapping Neural Network Existence Theorem in Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks, pages 11-14.

**Hendin O, Horn D, Usher M**, 1991. Chaotic Behavior of a Neural Network with Dynamical Thresholds, International Journal of Neural Systems, Volume 1, pages 327-335.

**Hershfield, D.M.**, 1961. Estimating the probable maximum precipitation. Proc. ASCE, 87, HY5, 99-116.

**Hershfield, D.M.**, 1965. On the spacing of rain gages. Paper presented at IASH and WMO Symposium of Design of Hydrometeorological

Networks, Laval Univ. Quebec City, Canada, 7p.

- Hershfield, D.M. and W.T. Wilson**, 1960. A comparison of extreme rainfall depth from tropical and non-tropical storms. *Journal of Geophysical Research*, 65, 969-982.
- Hipel, K.W. and A.I McLeod**, 1994. Time series modeling of water resources and environmental systems. Elsevier Science B.v., *Developments in Water Science*, No 45, 1013 p.
- Holtan, H.N., N.E. Minshall and L.L. Harrold**, 1962. Field manual for research in agricultural hydrology. SWCD-ARS, Washington D.C., 214 p.
- Holtan, H.N., G.J. Stitner, N.H. Henson and N.C. Lopez**, 1975. USDAHL-74 revised model of watershed hydrology. Technical Bulletin, No 1518, Agricultural Research Service, U.S.D.A., Washington.
- Horner, W.W., and F.L. Flynt**, 1936. Relation between rainfall and runoff from urban areas. *Transactions ASCE*, 101: 140-206.
- Hornik K, Stinchcombe, White H**, 1989. Multilayer Feedforward Networks are Universal Approximators, *Neural Networks*, Volume 2, pages 359-366.
- Horton, R.E.**, 1933. The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Trans. Am. Geophys. union*, Vol. 14, 446-460.
- Horton, R.E.**, 1945. Erosional development of streams and their drainage basins. Hydrophysical approach to quantitative morphology, *Bull. Geol. Soc. Am.*, Vol. 56, 275-370.
- Hurst, H.E.**, 1951. Long-term storage capacity of reservoirs. *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.*, Vol.116, paper no 2447, 770-799.

**Hydrologic Engineering Center**, 1980. HEC-1, Flood hydrograph package.

US Army Corps of Engineers, Davis, CA, USA.

**Hydrologic Engineering Center.**,1990. HEC-1 flood hydrograph package.

Program users manual. US Army Corps of Engineers, Davis, CA, USA.

**Institute of Hydrology**, 1978. Methods of flood estimation. A Guide to the

Flood Studies Report. Wallingford, Oxon, U.K

**Jain, S.K., B. Storm, J.C. Refsgaard and R.D. Singh**, 1992. Application of the SHE to catchments in India-Part2. Field experiments and simulation studies on Kolar sub-catchments of Narmada River. Journal of Hydrology, 140,25-47.

**Jensen, M.E., R.D. Burman and R.G. Allen**, 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No 70, ASCE, N.Y. 332 p.

**Καραμούζης, Δ., Γ. Παρισσόπουλος και Δ.Μ. Παπαμιχαήλ**, 1999.

Χωροθέτηση και προκαταρκτική διερεύνηση φράγματος Πετρένια Γοματίου Χαλκιδικής. Πακέτο Εργασίας στο Ερευνητικό Πρόγραμμα "Διαχείριση Υδατικών Πόρων Υδρολογικής Λεκάνης Ολυθίου Χαλκιδικής", Θεσσαλονίκη.

**Καραμούζης, Δ., Δ.Μ. Παπαμιχαήλ και Π.Ε. Γεωργίου**, 2000. Εκτίμηση της ραγδαιότητας και των πλημμυρογραφημάτων της βροχόπτωσης της 7-8 Οκτωβρίου 2000 στην πληγείσα περιοχή της Μεγάλης Παναγιάς. Πακέτο εργασίας στο Ερευνητικό Πρόγραμμα «Διαχείριση Υδατικών Πόρων Υδρολογικής Λεκάνης Ολυθίου Χαλκιδικής».

**Καραμούζης, Δ., Γ. Παρισσόπουλος, Δ. Μ. Παπαμιχαήλ, και Π. Ε. Γεωργίου,**

2000α. Χωροθέτηση και προκαταρκτική διερεύνηση φράγματος Καπρινίκιας Ορμύλιας Χαλκιδικής. Πακέτο Εργασίας στο Ερευνητικό Πρόγραμμα "Διαχείριση Υδατικών Πόρων Υδρολογικής Λεκάνης Ολυθίου Χαλκιδικής", Θεσσαλονίκη.

**Καραμούζης, Δ., Γ. Παρισσόπουλος, Δ. Μ. Παπαμιχαήλ και Π. Ε. Γεωργίου,**

2000β. Χωροθέτηση και Προκαταρκτική Διερεύνηση Φράγματος Βατόνια (Ολυθίου) Χαλκιδικής, Πακέτο Εργασίας στο Ερευνητικό Πρόγραμμα "Διαχείριση Υδατικών Πόρων Υδρολογικής Λεκάνης Ολυθίου Χαλκιδικής", Θεσσαλονίκη.

**Kamijo K.I. and Tnigawa T,** 1990. 'Stock Price Pattern Recognition –

Arecurrent Neural Network Approach', in Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks, San Diego, 17-21 June, volume 1 (Ann Arbor, MI: IEEE Neural Network Council), pp.215-221

**Kinnison, H.E., and Y.R.Colby,** 1945. Flood formulas based on drainage

basin characteristics. Proceedings ASCE, 69:849-876.

**Kirpich, Z.P.,** 1940. Time of concentration of small agricultural watersheds.

Civil Eng. Am. Soc. Civ. Eng. Rs., Vol. 10, p. 362.

**Kite, G.W.,** 1974. Performance of two deterministic models. IASH

Publ., 115, 136-142.

**Kite, G.W.,** 1977. Frequency and risk analysis in hydrology. Water Resources

Publications, Fort Collins, Colorado, USA.

**Kite, G.W.,** 1978. Development of a hydrologic model for a Canadian

watershed. *Can., J. Civil Engineering*, 5(1), 126-134.

- Kite, G. W.**, 1988. Frequency and risk analyses in hydrology. Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado, USA, 257 p.
- Kite, G.W.**, 1989. Hydrologic modeling with remotely sensed data. Proc. 57th Annual Western Snow Conference, Ft. Collins, Co., April 8-20, 1-8.
- Kite, G.W.**, 1991. Hydrologic applications: Computer programs for water resources engineering. Water Resources Publications, 137 p.
- Kondratev, V.**, 1954. Radiant energy of the sun. Gidromet, Lenigrad, USSR.
- Krajewski, W.F.**, 1987. CoKriging of radar and rain gage data. *J. of Geoph. Res.*, Vol. 92(08), 9571-9580.
- Kurtyla, J.C.**, 1963. Precipitation measurement study. Illinois State Water Survey Division, Urbana, Ill. 178 p.
- Kuzmin, P.P.**, 1960. Snow cover and snow reserves. Μετάφραση από τα ρωσικά στο: Trans. U.S. National Science Foundation, Wash. D.C., 1963, 99-105.
- Κυριαζόπουλος, Β.**, 1938. Τροποποιήσεις εις το δεκαπλασιαστικό βροχόμετρο. *Εργ. Γεωργ. Φυσικής και Μετεωρολογίας*, Δημοσίευμα αριθμ. 12, 27-30.
- Κωτούλας, Δ.**, 1985. Διευθετήσεις χειμαρρικών ρευμάτων. Έκδοση Υπηρεσία Δημοσιευμάτων Α.Π.Θ., 321 σελ.
- Λαλάγκα, Α.**, 1997. Συγκριτική αξιολόγηση των διαφόρων μεθόδων εκτίμησης της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τμήμα Γεωπονίας Α.Π.Θ., 226 σελ.
- Laue, E.G. and A.G. Drummond**, 1968. Solar constant: First direct

measurements. Science 161: 888-891.

**Lean, J.**, 1989. Contribution of ultraviolet irradiance variations to changes in the sun's total irradiance. Science 244: 197-200.

**Linsley, R.K., M.A. Kohler and J.L.H. Paulhus**, 1949. Applied hydrology. McGraw-Hill Book Co., New York, 1-4.

**Linsley, R.K., M.A. Kohler and J.L.H. Paulhus**, 1988. Hydrology for engineers. McGraw-Hill Book Company, 492 p.

**List, R.J.**, 1984. Smithsonian meteorological tables. 6<sup>th</sup> rev., Smithsonian Institution, Washington, 539 p.

**Lohani, Y.K., J.C. Refsgaard, T. Clausen, M. Erlich and B. Storm**, 1993. Application of SHE for irrigation command area studies in India. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 119, 34-49.

**London, J. and C. Frohlich**, 1982. Extended abstracts presented at the Symposium on the solar constant and the spectral distribution of solar irradiance. IAMAP 3<sup>rd</sup> Scientific Assembly, Hamburg, F.R. Germany, 41 p.

**Maidment, D.R.**, 1993. Handbook of hydrology. McGraw-Hill Company.

**Margaris A, Roumeliotis M, Adamopoulos M**, 2001. Development of Neural Models for the Logistic Equation and Study of the Neural Based Trajectories in the Convergence, Periodic and Chaotic Regions, Neural, Parallel & Scientific Computations Volume 9, pages 221-230.

**Margaris A, Roumeliotis M**, 2002. Logistic Map Neural Models, Proceedings of 2nd Hellenic Conference on Artificial Intelligence, SETN

2002, 11-12 April 2002, Thessaloniki, Greece, Companion  
Volume, pages 293-306.

**McKay, G.A., and J.G.S. McMorine**, 1962. Storm rainfall and runoff at Buffalo Gap, Saskatchewan. Meteorological Report No 2, Canadian Dept. of Agriculture, Hydrology Division.

**Meinzer, O.E.**, 1942. Definition of hydrology. In: Hydrology (Meinzer, O.E., ed.). Dover Publ. Inc., New York, 1-31.

**Μιρίκου, Μ.Α.**, 1994. Τεχνολογία υδατικών πόρων. Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 564 σελ.

**Mimikou, M. and E. Baltas**, 1996. Flood forecasting based on Radar rainfall measurements. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, vol 122, No 3, 151-156.

**Μήτσιου, κ., Β.Ζ. Αντωνόπουλος και Δ.Μ. Παπαμιχαήλ**, 1999. Στατιστική διερεύνηση των χρονοσειρών παραμέτρων ποιότητας του νερού του ποταμού Στρυμόνα. Υδροτεχνικά, Τόμος 9, 59-74.

**Mockus, V.**, 1957. Use of storm and watershed characteristics in synthetic hydrograph analysis and application. Paper presented at A.G.U.'s Southwest Region Meeting, Sacramento, California.

**Morton, F.I.**, 1983. Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology. Journal of Hydrology, 66, 77-100.

**Μπαλαφούτης, Χ.**, 1988. Το Ισοζύγιο του ύδατος στον Ελλαδικό χώρο. Επιστημονική Επετηρίδα του Τμήματος Γεωλογίας, Παράρτημα αρ. 3 του 1<sup>ου</sup> τόμου, 100 σελ.

**Μπαλτάς, Ε. και Ε. Αφτιάς**, 1997. Πρόγνωση πλημμυρών με χρήση

στοιχείων ραντάρ. Υδροτεχνικά, Τόμος 7, 19-38.

**Nash, J.E. and J.V. Sutcliffe**, 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I - A Discussion of Principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290.

**Οικονόμου, Γ., Α. Μιγκάρδου, Α. Νιάνιος και Γ. Τσακίρης**, 1995. Εκτίμηση των μεγεθών ραγδαίας βροχής στις πληγείσες περιοχές του Οκτωβρίου 1994. Πρακτικά 2<sup>ου</sup> Εθνικού Συνεδρίου της ΕΕΔΥΠ «Ολοκληρωμένες Επεμβάσεις για τη Μείωση του Κινδύνου από τις Πλημμύρες», Αθήνα, 195-199.

**Παπαδόπουλος, Α.Η.**, 1986. Πρόβλεψη των παροχών του χειμάρρου Ολύνθιου Χαλκιδικής με χρήση ντετερμινιστικού υδρολογικού μοντέλου. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τμήμα Γεωπονίας Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, 171 σελ.

**Παπαζαφειρίου, Ζ.Γ.**, 1980. Υδρολογία επιφανειακών υδάτων. Έκδοση Υπηρεσία Δημοσιευμάτων Α.Π.Θ.

**Παπαζαφειρίου, Ζ.Γ.**, 1999. Οι ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών. Εκδόσεις Ζήτη, 347 σελ.

**Papamichail, D.M. and I. Alexiou**, 1998. Application of the theory of regionalized variables for estimating reference evapotranspiration in Greece. *Proc. of an Int. Conference Protection and Restoration of the Environment IV, Halkidiki, Greece, Volume I*, 222-229.

**Παπαμιχαήλ, Δ.Μ. και Ζ.Γ. Παπαζαφειρίου**, 1987. Στοχαστικά ομοιώματα δημιουργίας μακρόχρονων συνθετικών απορροών του ποταμού Αλιάκμονα. Πρακτικά 3<sup>ου</sup> Πανελληνίου Συνεδρίου της



E.Y.E., Θεσσαλονίκη, 639-649.

**Παπαμιχαήλ, Δ.Μ. και Ζ.Γ. Παπαζαφειρίου**, 1990. Προσομοίωση των μηνιαίων απορροών του ποταμού Βενέτικου με εποχιακά στοχαστικά ομοιώματα. Πρακτικά 4<sup>ου</sup> Πανελληνίου Συνεδρίου της Ε.Υ.Ε., Ηράκλειο Κρήτης, 119-132.

**Paramichail, D.M. and Z.G. Papazafiriou**, 1992. Multiple input - single output linear functional models for river flow routing. Journal of Hydrology, 133, 365 - 377.

**Παπαμιχαήλ, Δ.Μ.**, 1991. Στοχαστική υδρολογία. Πανεπιστημιακές Παραδόσεις στο Μεταπτυχιακό Τμήμα Εγγείων Βελτιώσεων Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, 175 σελ.

**Παπαμιχαήλ, Δ.Μ.**, 1993. Προσομοίωση των μηνιαίων παροχών του ποταμού Αχελώου με εποχιακά στοχαστικά ομοιώματα. Πρακτικά 200 Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, Πάτρα, 693-703.

**Παπαμιχαήλ, Δ.Μ. και Ε. Μεταξά**, 1993. Εκτίμηση της μέσης βροχόπτωσης και βέλτιστη επιλογή των θέσεων των βροχομετρικών σταθμών. Υδροτεχνικά, Τόμος 3(1), 75-91.

**Παπαμιχαήλ, Δ.Μ., Σ.Ι. Κωτσόπουλος και Π.Ε. Γεωργίου**, 1994. Συγκριτική ανάλυση των έμμεσων μεθόδων εκτίμησης της εξαμισοδιαπνοής της καλλιέργειας αναφοράς. Πρακτικά 2<sup>ου</sup> Πανελληνίου επιστημονικού Συνεδρίου Μετεωρολογίας – Κλιματολογίας - Φυσικής της Ατμόσφαιρας, Θεσσαλονίκη, 35-43.

**Παπαμιχαήλ, Δ.Μ. και Π.Ε. Γεωργίου**, 1995α. Εκτίμηση της εξαμισοδιαπνοής της καλλιέργειας αναφοράς στον αυτόματο

τηλεμετρικό σταθμό της Πιπεριάς με τις τροποποιημένες μεθόδους του Penman και του Εξαμισιμέτρου. Ετήσια Έκθεση στο Ερευνητικό Πρόγραμμα: Έρευνα Εκτίμησης Υδατικού Ισοζυγίου Λεκανών Απορροής Περιοχών Βορείου Ελλάδος, Θεσσαλονίκη, 1-18.

**Παπαμιχαήλ, Δ.Μ. και Π.Ε. Γεωργίου**, 1995β. Παρουσίαση των μετρήσεων των κλιματικών παραμέτρων στον αυτόματο τηλεμετρικό σταθμό της Πιπεριάς. Ετήσια Έκθεση στο Ερευνητικό Πρόγραμμα: Έρευνα Εκτίμησης Υδατικού Ισοζυγίου Λεκανών Απορροής Περιοχών Βορείου Ελλάδος, Θεσσαλονίκη, 1-23.

**Παπαμιχαήλ, Δ.Μ. και Π.Ε. Γεωργίου**, 1996. Διαστασιολόγηση ταμιευτήρων με τη μέθοδο Rippl και τη χρήση ιστορικής σειράς και συνθετικών σειρών εισροών. Πρακτικά 20ου Πανελληνίου Συνεδρίου Εγγειοβελτιωτικά Έργα - Διαχείριση Υδατικών Πόρων - Εκμηχάνιση Γεωργίας", Λάρισα, 853-867.

**Παπαμιχαήλ, Δ.Μ. και Δ. Παπαδήμος**, 1995. Διερεύνηση των σχέσεων βροχής απορροής με τη βοήθεια του μοναδιαίου υδρογραφήματος του Nash και του αριθμού καμπύλης απορροής (CN) της SCS. Πρακτικά 6<sup>ου</sup> Πανελληνίου Συνεδρίου ΕΥΕ, Θεσσαλονίκη, 262-270.

**Παπαμιχαήλ, Δ.Μ., Χ. Μπαμπατζιμόπουλος, Σ.Ι. Κωτσόπουλος, Π.Ε. Γεωργίου και Γ.Α. Τερζίδης**, 1995. Διερεύνηση των σχέσεων βροχής - απορροής της λεκάνης της Αλμωπίας με τη βοήθεια του HEC-I. Πρακτικά 20ου Εθνικού Συνεδρίου ΕΕΔ ΥΠ, Αθήνα, 57-64.

- Παπαμιχαήλ, Δ.Μ. και Γ.Α. Τερζίδης**, 1996. Διαχείριση των υδατικών πόρων της υδρολογικής λεκάνης της Αλμωπίας. Πρακτικά ημερίδας «Υδατικοί πόροι νομού Πέλλας. Διαχείριση - Προβλήματα – Προοπτικές», Έδεσσα, 53-67
- Παπαμιχαήλ, Δ.Μ. και Π.Ε. Γεωργίου**, 1997. Διερεύνηση των σχέσεων βροχής απορροής της υδρολογικής λεκάνης της Αλμωπίας με την εφαρμογή ενός υδρολογικού μοντέλου. Πρακτικά 7<sup>ου</sup> Πανελληνίου Συνεδρίου ΕΥΕ, Πάτρα, 68-76.
- Παπαμιχαήλ, Δ.Μ. και Π.Ε. Γεωργίου**, 1999. Συγκριτική ανάλυση των ωριαίων και ημερήσιων εκτιμήσεων της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς με τη μέθοδο FAO Penman - Monteith. Πρακτικά 4<sup>ου</sup> Εθνικού Συνεδρίου ΕΕΔ ΥΠ, Βόλος, τεύχος Α', 183-189.
- Papamichail, D.M. and P.E. Georgiou**, 1995. Application of multiplicative seasonal ARIMA models for reservoir operation. Proceedings of the 3rd Balkan Conference on Operational Research, Thessaloniki, Greece, 1434-1448.
- Papamichail, O.M. and E. Metaxa**, 1996. Geostatistical analysis of spatial variability of rainfall and optimal design of a rain gauge network. Water Resources Management, Vol 10, 107-127.
- Papamichail, O.M. and G.A. Terzidis**, 1996. Assessment of the meteorological parameters effects on the Penman reference evapotranspiration. 2<sup>nd</sup> International symposium on Irrigation of Horticultural Crops, Chania (Crete), Volume 1, 281-288.
- Paulhus, J.L.H.**, 1965. Indian ocean and Taiwan rainfalls set new records. Mon. Weath. Rev., 93(5), 331-335.

- Πιστρίκας, Κ. και Α. Γαλερίδης**, 1995. Οι πλημμύρες της 22ης και 23ης Οκτωβρίου στους νομούς Καρδίτσας και Λάρισας - Αίτια καταστροφών – Προτάσεις. Πρακτικά 2<sup>ου</sup> Εθνικού Συνεδρίου της ΕΕΔΥΠ «Ολοκληρωμένες Επεμβάσεις για τη Μείωση του Κινδύνου από τις Πλημμύρες», Αθήνα, 201-208.
- Ρίζος Γ.**, 1996. Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα. Νέες Τεχνολογίες. Αθήνα
- Refsgaard, J.C., S.M. Seth, J.C. Bathurst, M. Erlich and B. Jorgensen**, 1992.  
Application of SHE to catchment in India Part II: general results. *Journal of Hydrology*, 140,23-59.
- Refsgaard, J.C. and B. Storm**, 1995. MIKE SHE. In Singh, V.P.(Ed.)  
Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publication, CO USA, 806 - 846.
- Σακκάς, Ι.**, 1985. Τεχνική υδρολογία: Τεύχος 1 - Υδρολογία επιφανειακών υδάτων. Εκδόσεις Ν. Αϊβαζής - Σ. Ζουμπούλης, 371 σελ.
- Seligman, G.**, 1962. Snow structure and ski fields. R.R. Clarke Ltd, Edinburg, Scotland, 555 p.
- Shaw, E.M.**, 1988. Hydrology in practice. Chapman & Hall (Second ed.), 539 p.
- Sherman, L.K.**, 1932. Streamflow from rainfall by the unit-graph method. *Eng. News Rec.*, vol. 108, 501-505.
- Sherman, L.K.**, 1940. The hydraulics of surface runoff. *Civil Engineer*, 10: 165 -166.
- Sherman, L.K.**, 1949. The unit hydrograph method IN: hydrology (Mainzer, O.Editor), Dover Publications, New York, 514-526.

**Singh, R., κ.Subramanian and J.C. Refsgaard**, 1999. Hydrological modelling of a small watershed using MIKE SHE for Irrigation planning. Agricultural water management, 149-166.

**Smith, M., R.G. Allen, J.L. Monteith, A. Peppier, L. Pereira and A. Segeren**, 1991.  
Report of the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements. UN-FAO, Rome, Italy, 54 p.

**Snyder, F.F.**, 1938. Synthetic unit graphs. Transactions A.G.U., 19:447-454.

**Soil Conservation Service.**, 1972. National engineering handbook. Department of Agriculture, Washington.

**Soil Conservation Service.**, 1973. Computer program for project formulation hydrology. Technical Release no. 20, U.S. Department of Agriculture.

**Σούλιος, Γ.**, 1996. Γενική Υδρογεωλογία. Πρώτος Τόμος, University Studio Press, 295 σελ.

**Σπυρίδης Α., Ψιλοβίκος Αρ., Κουτάλου Β.**, 2002. Εξαγωγή όμβριων καμπυλών Ν Κοζάνης και χρήση αυτών σε αντιπλημμυρικά έργα και έργα διαχείρισης υδατικών πόρων. Εφαρμογή στο αποχετευτικό δίκτυο ομβρίων της πόλης της Κοζάνης . Πρακτικά του 6<sup>ου</sup> Πανελληνίου Γεωγραφικού Συνεδρίου, Θεσ/νίκη Οκτ.202, Τόμος Ι,σελ.339-36

**Steenhuis, T.S. and W.H. Van Der Molen**, 1986. The Thorthwaite - Mather procedure as a simple engineering method to predict recharge. Journal of Hydrology, 84, 221-229.

- Subramanian, K.**, 1997. Hydrological modeling of a watershed using MIKE SHE. M. Tech Thesis, Indian Institute of Technology, Kharagpur, 51 p.
- Terstriep, M.I. and J.B. Stall**, 1974. The Illinois urban drainage simulator ILLUDAS. Bulletin 58, Illinois State Water Survey, Urbana, Illinois.
- Thorntwaite, C. and J. Mather**, 1957. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. Publication in climatology, Vol 10, no 3 Centerton, N.J., Drexel inst.
- Τσακίρης, Γ.**, 1995. Υδατικοί πόροι: 1. Τεχνική υδρολογία. Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 675 σελ.
- U.N. ECAFE**, 1964. Flood Control Series No 7.
- U.S. Army Corps of Engineers**, 1948. Hydrologic and hydrograph analyses: flood hydrograph analyses and computations. U.S. Dept. of Army, Washington D.C.
- U.S. Corps of Engineers, North Pacific Div.**, 1956. Snow hydrology. 433 p.
- Vonnegut, B., 1949. The nucleation of ice formation by silver iodide. J. Applied Physics, 18: 593-595.
- USDA Soil Conservation Service**, 1957. Hydrology, Supplement A in: Engineering Handbook Section 4, Washington D.C.
- U.S.D.I.**, 1987. Design of small dams, A Water Resources Technical Publication, 3-57.
- Wanielista, M., R. Kersten and R. Eaglin**, 1997. Hydrology : Water quantity

- and quality control. John Wiley & Sons (Second edition), 567 p
- Wilson, W.T.**, 1954. Discussion of precipitation at Barrow, Alaska, greater than recorded. By R.F. Black. Trans. A.G.U., 35: 206-207.
- Wilson, J.W.**, 1976. Radar - rain gage precipitation measurements - a summary. Proc. 1<sup>st</sup> Conf. On Hydrometeorology, at Fort Worth Texas, April 20-22, AMS 72-75.
- Wilson, E.M.**, 1990. Engineering hydrology. Fourth edition, 348 p.
- Ψιλοβίκος Αρ., Ζαρκάδας Π.**, 2006. «Διαχείριση των υδατικών πόρων της λεκάνης απορροής της λίμνης της Καστοριάς». Πρακτικά 10<sup>ου</sup> Πανελληνίου Συνέδριου ΕΥΕ», Ξάνθη.
- Zawadski, I.**, 1984. Factors affecting the precision of radar measurements of rain. Preprints 22<sup>nd</sup> Conf. on Radar Met., Zurich, Switzerland, AMS, Boston, 251-256.

## 5. ABSTRACT

In the present thesis, the goal was, the construction of a simulation model, based on the creation and training of Neuronic structures, which were formed as for the produce the monitoring curve and the path of the system, with the smallest possible simulation fault factor.

The limitation of our research comes from the close thematic area of the non linear systems. This choice is justified by the fact that, our Neuronic model was based on time-sequences which occur from the recording procedures of rainfall levels which are non linear, consequently their experimental characteristic falls into that area.

We chose the time-sequence from the area of the technical hydrology and in specific from the hydrological construction design of the dam, in Nestorio of the County of Kastorias. Subject of the above study was the evaluation of the submersion, the study of various restoration periods and the possible maximum submersion of the Aliakmona river in the are of Nestorios of the County Kastoria in order to support the coordinated dimensioning of the dam and the related works (overflow, diversion tunnel) which is about to be constructed in this area.

The drainage basin of the Aliakmona river in the area of Nestorio of the County of Kastorias is a sub-basin of the west branch of the river and is found at the most west point of Macedonia, at the east waterside of the mountain range of Gramos. The mouth of the basin is at an altitude of about 780 m., while the biggest altitude of the watershed is at +2520. The basin, with an expanse of 255,3 km<sup>2</sup> and average altitude of 1398 m, provides a very developed and dense hydrographical network. The biggest part is covered with products of



weathered tertiary depositions (72,2 %) and weathered mixed flysch (22,3%). These grounds are in their majority deep. With a smaller percentage of total cover (3,5%), is found ground from weathered hard lime stones, for their biggest part flat until naked rock. The basin presents for its' biggest part a rich forest flora, with an exemption of mainly the mountain range of Gramos at the west, where the vegetation is very sparse and at the most east end of the basin, on both sides of the main riverbed, where there is a strong human influence as well as a development of cultivation. The appearing zones of vegetation are of the deciduous trees, the fir trees which includes the pine tree, the spruce and the black pine tree and at the highest altitudes, the pseudo-alpine zone, consisting of grassland.

In the greater area of the study the pluviometrical network is sufficient, a fact which allowed the monthly time-sequence calculation of the surface rock fall which the basin takes. An essential role in these calculations take effect the data from the pluviometrical stations 1) of Pevkos (PPC) at the centre of the basin 2) of Nestorios (IPC and after PPC) exactly at the outlet of the basin 3) of Plikatios (PPC) at a very small distance (about 5 km. towards SW) from the watershed of the basin under study 4) of Damaskinias (PPC) about 11 km. SE of the limits of the watershed and the stations of 5) Argos Orestikos and 6) Pentalofos, which are at the greater area of the basin outflow.

After the processing of the data of the time-sequences was done for all the stations of the drainage basin and the drafting of them in diagrams of the average monthly rainfall levels, the next step was the drafting of the yearly and monthly average fluctuations of rain. Following we correlated the transition of the rainfall levels with the geodesic altitudes of the stations and in conclusion

we can say that there is a strong linear correlation of the increase of the average yearly rainfall level (mm) with the increase of the elevation (m). The correlations of all the stations in relation to the stations of Pevkos and Nestorios gave factors which are fluctuating from 0,69 until 0,94 and are considered very satisfactory ( $R^2 = 0,9715$ ).

After the completion of our argument based on the hydrological data of the area under study, we consider the time-sequence as suitable for the conducting of a model with the use of technical neuronal networks, the one of the pluviometrical station of Nestorios which is at an altitude of 850 m and gives us a monthly rainfall level for the years of 1962 until 2003. Our choice is based on the fact, that the time-sequence consists of a total of continuous measurements in a significant time length suitable for the development of time-sequence models.

The software used for the development of the model was Neurosolution of the company Neurodomation ([www.nd.com](http://www.nd.com))

After a sequence of tests resulted our final proposed model and was also adopted because it gave the smallest typical fault factor of the order of one millimeter of rainfall and is considered very satisfactory. As such we can finally note the following remarks:

- The Neuronal model simulates the time-sequence in a ample suitable way.
- The development of the model is independent from the potential existence of tension or admission of stasis.

- The final model is not categorical and requests the support by a proper software system.

It has to be underlined also that the prevision ability of the model is short and origins from the training data. This means that the credibility of the model is exhausted within one or two time steps in the future. Each time when a new measurement is realized, the network must be reset and the values of the weights to be readjusted as for the new prevision to be reliable.

## **6. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ**