

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

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**Στοχαστικά Μοντέλα Προσομοίωσης
στην Ποιότητα Επιφανειακών Υδάτων στον Ποταμό Νέστο**

ΣΕΝΤΑΣ ΑΝΤΩΝΗΣ

ΒΟΛΟΣ 2013

**«Στοχαστικά Μοντέλα Προσομοίωσης
στην Ποιότητα Επιφανειακών Υδάτων στον Ποταμό Νέστο»**

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή:

- 1) **Ψιλοβίκος Άρης**, Επίκουρος Καθηγητής, Αειφορική Διαχείριση Υδάτινων Πόρων, Τμήμα Γεωπονίας Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος Π.Θ.
- 2) **Λουκάς Αθανάσιος**, Καθηγητής, Υδρολογία και Υδατικοί Πόροι, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Π.Θ.
- 3) **Ματσιώρη Στεριανή**, Επίκουρη Καθηγήτρια, Οικονομική Αποτίμηση των Υδάτινων Πόρων, Τμήμα Γεωπονίας Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος Π.Θ.

Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή:

- 1) **Ψιλοβίκος Άρης**, Επίκουρος Καθηγητής, Αειφορική Διαχείριση Υδάτινων Πόρων, Τμήμα Γεωπονίας Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος Π.Θ.
- 2) **Λουκάς Αθανάσιος**, Καθηγητής, Υδρολογία και Υδατικοί Πόροι, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Π.Θ.
- 3) **Ματσιώρη Στεριανή**, Επίκουρη Καθηγήτρια, Οικονομική Αποτίμηση των Υδάτινων Πόρων, Τμήμα Γεωπονίας Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος Π.Θ.
- 4) **Αντωνόπουλος Βασίλειος**, Καθηγητής, Γεωργική Υδραυλική περιβάλλοντος, Τμήμα Γεωπονίας Α.Π.Θ.
- 5) **Παπαμιχαήλ Δημήτριος**, Καθηγητής, Γεωργική Υδραυλική-Υδρολογία, Τμήμα Γεωπονίας Α.Π.Θ.
- 6) **Κουγιουμτζής Δημήτριος**, Αναπληρωτής Καθηγητής, Υπολογιστικών Μεθόδων και Προγραμματισμού Η/Υ, Τμήμα Ηλεκτρ. Μηχανικών και Μηχ. Υπολογιστών, Πολυτεχνική Σχολή Α.Π.Θ.
- 7) **Νεοφύτου Νικόλαος**, Λέκτορας, Υδατοκαλλιέργειες και Περιβάλλον, Τμήμα Γεωπονίας Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος Π.Θ.

ΣΕΝΤΑΣ ΑΝΤΩΝΗΣ

**Στοχαστικά Μοντέλα Προσομοίωσης στην Ποιότητα
Επιφανειακών Υδάτων στον Ποταμό Νέστο**

- *Σέντας Αντώνης, 2013, Στοχαστικά Μοντέλα Προσομοίωσης στην Ποιότητα Επιφανειακών Υδάτων στον Ποταμό Νέστο*
- *Αριθμός προκαταρκτικών σελίδων 24*
- *Συνολικός αριθμός σελίδων της διατριβής 240*
- *Αριθμός Πινάκων 50*
- *Αριθμός Σχημάτων 78*
- *Αριθμός Εικόνων 11*
- *Αριθμός βιβλιογραφικών αναφορών 148*

*Αφιερώνεται στους γονείς μου
Γιώργο και Ευθυμία
και στον αδελφό μου
Παναγιώτη*

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της διδακτορικής διατριβής θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες πρώτα από όλους στον Επιβλέποντα Καθηγητή κ. Άρη Ψιλοβίκο, όχι μόνο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε όλα αυτά τα χρόνια αλλά και για τα πρότυπα συνεργασίας και ήθους που αποκόμισα. Ο απεριόριστος χρόνος που μου διέθεσε ήταν κινητήρια δύναμη σε όλα τα στάδια της παρούσας διατριβής. Τον ευχαριστώ για όλα τα παραπάνω αν και πιστεύω ότι όσο θερμό και από καρδιάς να είναι ένα ευχαριστώ, δεν μπορεί να συμπεριλάβει την πολύτιμη βοήθεια του.

Επίσης, θα ήθελα να απευθύνω τις θερμές μου ευχαριστίες προς τα μέλη της Συμβουλευτικής Επιτροπής, αποτελούμενη από τους κ.κ. Λουκά Αθανάσιο και Ματσίωρη Στεριανή, για τις χρήσιμες συμβουλές τους και την καθοδήγησή τους σε όλα τα στάδια διεκπεραίωσης και συγγραφής της έρευνας.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κ.κ. Αντωνόπουλο Βασίλειο, Παπαμιχαήλ Δημήτριο, Κουγιουμτζή Δημήτριο και Νεοφύτου Νικόλαο, για τον πολύτιμο χρόνο που διέθεσαν για τον έλεγχο, τις παρατηρήσεις και διορθώσεις της διατριβής στο τελικό κείμενο.

Αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Κουγιουμτζή Δημήτρη για τις χρήσιμες συμβουλές του σε θέματα χρονοσειρών, τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Λαόπουλο Θεόδωρο για την άψογη συνεργασία και τις πολύτιμες υποδείξεις του σε θέματα παρακολούθησης υδάτων και την Επίκουρη Καθηγήτρια κ. Γιαννάκου Ουρανία για την άψογη συνεργασία, την εμπιστοσύνη, το διαρκές ενδιαφέρον και τη βοήθεια που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια των διδακτορικών μου σπουδών.

Τέλος, θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου και στον αδελφό μου που όλα αυτά τα χρόνια ήταν αρωγοί σε όλους τους καίριους τομείς της ζωής μου. Η αληθινή αγάπη τους και η καταλυτική οικονομική και ψυχολογική συνδρομή τους, με βοήθησαν να υπερπηδήσω το οποιοδήποτε εμπόδιο.

Βόλος 2013

Σέντας Αντώνης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το νερό αποτελεί αναντικατάστατο αγαθό για τον άνθρωπο, για τον πολιτισμό του, για την ίδια του τη ζωή. Είναι αγαθό «εν αφθονία» και μάλιστα τα συνολικά αποθέματα νερού στη γη παραμένουν σταθερά σε ποσότητα και αναλλοίωτα στο πέρασμα των αιώνων. Το νερό όμως ρυπαίνεται συνεχώς από τους ανθρώπους, καθίσταται ακατάλληλο για χρήση, ξοδεύεται αλόγιστα, με αποτέλεσμα η αειφόρος διαχείριση των υδατικών αποθεμάτων να κρίνεται απολύτως αναγκαία.

Στην Ελλάδα τα τελευταία μόνο χρόνια άρχισε να λαμβάνεται υπόψη ο παράγοντας διατήρησης και προστασίας του περιβάλλοντος ως προς τη διαχείριση του νερού, σε ότι αφορά την ποσοτική και ποιοτική υποβάθμιση των υδάτινων συστημάτων. Για τον έλεγχο της κατάστασης των υδάτων, απαιτείται η συστηματική και μακροχρόνια παρακολούθησή τους (monitoring), που οδηγεί στη δημιουργία βάσεων δεδομένων, από μετρήσεις παραμέτρων σε επιφανειακούς υδάτινους πόρους.

Η παρούσα διατριβή ασχολείται με την ανάλυση δεδομένων από τρεις (3) σταθμούς μέτρησης τοποθετημένους σε όλο το μήκος του ποταμού Νέστου. Σκοπός είναι να εξαχθούν χρήσιμες πληροφορίες για τη βιώσιμη διαχείριση των υδάτων του ποταμού. Οι επιμέρους στόχοι είναι:

- 1) Η παρακολούθηση της κατάστασης του ποταμού μετά τις ανθρωπογενείς αλλαγές που οφείλονται στην κατασκευή των φραγμάτων του Θησαυρού και της Πλατανόβρυσης (1997 – 2000).
- 2) Η αξιολόγηση της πληροφορίας που εξάγεται από την εφαρμογή της ανάλυσης χρονικών σειρών στις ποιοτικές και ποσοτικές παραμέτρους και η αναγνώριση ακραίων φαινομένων όπως πλημμύρες, ρύπανση κ.ά.
- 3) Η διερεύνηση του κατά πόσο ο ποταμός έχει επανέλθει στην πρότερή του κατάσταση, μετά την κατασκευή του συστήματος των φραγμάτων.
- 4) Η εκτίμηση και αξιολόγηση του ταμειυτήρα του Θησαυρού, αναλύοντας δεδομένα σε διαφορετικά βάθη και εκτιμώντας προβλέψεις σε διαφορετικά βήματα ($m = 1, 2, 3, 5$ και 10). Ακόμη ελέγχεται η δυνατότητα απομάκρυνσης αισθητήρων που είναι τοποθετημένοι σε μεγαλύτερα βάθη, χρησιμοποιώντας την χρονοσειρά του 1 μέτρου ως χρονοσειρά εισόδου, για την προσομοίωση και πρόβλεψη των χρονοσειρών στα βάθη των 20, 40 και 70m.

Με χρήση εργαλείων περιγραφικής στατιστικής (μέτρα κεντρικής τάσης και μεταβλητότητας, δειγματική κατανομή συχνοτήτων, γραφήματα και θηκογράμματα) γίνεται αξιολόγηση των δεδομένων παρακολούθησης που αφορούν το βόρειο δίκτυο (Π.Σ. Παγονέρι). Γίνεται έλεγχος τάσης α) με προσαρμογή ευθείας και β) με τον επαυξημένο έλεγχο Dickey – Fuller. Για τον έλεγχο προσαρμογής σε κανονική και λογαριθμοκανονική κατανομή, εφαρμόζεται το test Kolmogorov – Smirnov.

Από την παραπάνω ανάλυση εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα για την ποιοτική και ποσοτική κατάσταση των υδάτων που εισέρχονται στην Ελλάδα από τη Βουλγαρία. Το κύριο χαρακτηριστικό των παραμέτρων είναι ότι παρουσιάζουν έντονες διακυμάνσεις, με αρκετές ακραίες χαμηλές και υψηλές τιμές με αιχμηρές κορυφές και έντονη ασυμμετρία

Στη συνέχεια, εφαρμόζοντας την ίδια στατιστική ανάλυση για το κεντρικό δίκτυο (Π.Σ. Θησαυρός), γίνεται αξιολόγηση των υδάτων του ταμιευτήρα του Θησαυρού σε τέσσερα διαφορετικά βάθη (1, 20, 40 και 70m), που οδηγούν σε ένα γενικό συμπέρασμα για την κατάσταση και τη φυσική λειτουργία του ταμιευτήρα. Επίσης, προσαρμόζονται στοχαστικά μοντέλα χρονικών σειρών ARIMA, Transfer Function και μοντέλα Νευρωνικών δικτύων, α) για τη σύγκριση της προβλεπτικής τους ικανότητας για διαφορετικά χρονικά βήματα και β) για τον έλεγχο της δυνατότητας κατάργησης αισθητήρων στα βαθύτερα στρώματα.

Η ανάλυση των χρονοσειρών οδηγεί στο συμπέρασμα ότι για πρόβλεψη μέχρι 4 χρονικά βήματα - μέρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα ARIMA και τα TF μοντέλα, προτείνονται όμως τα ARIMA ως απλούστερα στην κατασκευή και χρήση τους. Για 5 μέρες και πάνω, προτείνονται τα TF μοντέλα. Η κατάργηση αισθητήρων στα μεγαλύτερα βάθη είναι δυνατή μόνο για τον αισθητήρα των 20m και χρειάζεται περισσότερη έρευνα για τους αισθητήρες στα 40 και 70m.

Η ίδια στατιστική ανάλυση που εφαρμόστηκε στον Π.Σ. Παγονέρι, εφαρμόζεται και στο νότιο δίκτυο (Π.Σ. Νέστος). Το νότιο τμήμα του ποταμού όπου βρίσκονται οι εκβολές του και σχηματίζονται αρκετές λιμνοθάλασσες, παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς είναι ένα πλούσιο υδάτινο οικοσύστημα το οποίο χρειάζεται συνεχή παρακολούθηση και αξιολόγηση. Εκείνο που χαρακτηρίζει τις παραμέτρους του νοτίου δικτύου είναι η εξομάλυνση των έντονων διακυμάνσεων και των ακραίων τιμών.

Ολοκληρώνοντας την παρούσα διατριβή γίνεται σύγκριση των παραμέτρων παρακολούθησης των Π.Σ. Παγονέρι και Νέστος. Για το σκοπό αυτό συγκρίνονται και αξιο-

λογούνται τα περιγραφικά στατιστικά της κάθε μιας παραμέτρου, σε καθένα από τους σταθμούς. Γίνεται έλεγχος αυτοσυσχετίσεων με τη βοήθεια της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης (AutoCorrelation Function) και ανάλυση συσχετίσεων (Correlation analysis) με χρήση α) της συνάρτησης διασυσχέτισης (Cross Correlation Function) και β) της υπό συνθήκη αιτιότητας κατά Granger. Τέλος, σύμφωνα με τα συμπεράσματα της ανάλυσης συσχετίσεων, προσαρμόζονται μοντέλα Νευρωνικών Δικτύων και αξιολογείται η προβλεπτική τους ικανότητα, χρησιμοποιώντας 90% και 95% διαστήματα εμπιστοσύνης.

Η σύγκριση των δύο Π.Σ. οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι τιμές στον Π.Σ. Νέστος έχουν εξομαλυνθεί και ότι ο αριθμός των ακραίων τιμών έχει σημαντικά μειωθεί, γεγονός που οφείλεται στην κατασκευή των δύο φραγμάτων. Η χρήση των μοντέλων ΤΝΔ για πρόβλεψη θεωρείται επιτυχής για 95% δ.ε. ενώ προτείνονται με επιφύλαξη για 90% δ.ε.

Μελλοντική έρευνα μπορεί να εφαρμοστεί στα παρακάτω πεδία:

- 1) Στη χρήση μεγαλύτερης βάσης δεδομένων, με μεγαλύτερο αριθμό παραμέτρων και πλήθος παρατηρήσεων.
- 2) Στη χρήση ΤΝΔ και άλλων μοντέλων (π.χ. χαοτικών) για συμπλήρωση ελλειπουσών τιμών.
- 3) Στην κατασκευή άλλων στοχαστικών μοντέλων με στόχο την κατάργηση των αισθητήρων στα 40 και 70m.

Λέξεις κλειδιά: Στοχαστικά Μοντέλα, ARIMA models, Transfer Function models, Νέστος Ποταμός, Υδρολογικές παράμετροι, Υδατικοί Πόροι, Νευρωνικά δίκτυα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες	vii
Περίληψη	ix
Πίνακας Περιεχομένων	xiii
Κατάλογος Πινάκων	xvii
Κατάλογος Σχημάτων	xx
Κατάλογος Εικόνων	xxiv
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ	9
2.1. Εισαγωγή	9
2.2. Περιοχή έρευνας – Ποταμός Νέστος	9
2.2.1. Άνω ρους – Ορεινή Ζώνη	15
2.2.2. Μέσος ρους – Ενδοορεινή Κοιλάδα	16
2.2.2.1. Υδροηλεκτρικά φράγματα Θησαυρού και Πλατανόβρυσης	16
2.2.2.2. Στενά Νέστου – Θρακικά Τέμπε	19
2.2.3. Κάτω ρους – Πεδιάδα και Δέλτα Νέστου	22
2.2.4. Το δίκτυο παρακολούθησης (Monitoring) του ποταμού Νέστου	24
2.2.4.1. Περιγραφή του συστήματος παρακολούθησης στον ποταμό	26
2.3. Παράμετροι που καθορίζουν την ποιότητα του νερού	29
2.3.1. Θερμοκρασία νερού	29
2.3.2. Ηλεκτρική αγωγιμότητα	30
2.3.3. Αλατότητα	31
2.3.4. Διαλυμένο οξυγόνο και Οξυγόνο κορεσμού	32
2.3.5. Ενεργός οξύτητα ή συγκέντρωση ιόντων υδρογόνου (pH)	34
2.3.6. Δυναμικό Οξειδοαναγωγής (Redox Potential)	35
2.3.7. Στάθμη νερού	36
2.4. Στοχαστική Ανάλυση χρονικών σειρών	37
2.4.1. Έλεγχος προσαρμογής σε θεωρητική κατανομή (Kolmogorov-Smirnov test)	38

2.4.2. Στασιμότητα μιας χρονικής σειράς.....	39
2.4.3. Τάση και εποχικότητα στις χρονοσειρές.....	39
2.4.3.1. Στατιστικοί έλεγχοι για ανάλυση τάσης.....	39
2.4.3.2. Διερεύνηση στοχαστικής τάσης.....	42
2.4.3.3. Ανάλυση εποχικότητας.....	44
2.4.4. Συνάρτηση αυτοδιασποράς και αυτοσυσχέτισης.....	45
2.4.5. Συνάρτηση μερικής αυτοσυσχέτισης.....	46
2.4.6. Συνάρτηση διασυσχέτισης.....	48
2.4.7. Στάσιμες στοχαστικές διαδικασίες.....	48
2.4.7.1. Αυτοπαλινδρομούμενη διαδικασία τάξης p	49
2.4.7.2. Κινούμενου μέσου διαδικασία τάξης q	50
2.4.7.3. Μικτή διαδικασία τάξης p, q	51
2.4.8. Μη στάσιμες στοχαστικές διαδικασίες.....	52
2.4.8.1. Ολοκληρωμένες μικτές διαδικασίες τάξης p, q	53
2.4.8.2. Πολλαπλασιαστική ή Εποχική διαδικασία τάξης p, d, q, P, D, Q	54
2.4.9. Μοντέλα συνάρτησης μεταφοράς.....	55
2.4.10. Έλεγχος καταλληλότητας του μοντέλου.....	57
2.4.11. Εύρεση της τάξης του μοντέλου.....	58
2.4.11.1. Κριτήριο του Akaike.....	58
2.4.11.2. Κριτήριο του Schwarz.....	59
2.4.12. Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα.....	59
2.4.12.1. Ο Τεχνητός Νευρώνας.....	60
2.4.12.2. Συναρτήσεις Ενεργοποίησης.....	62
2.4.12.3. Πολυεπίπεδα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα.....	63
2.4.12.4. Εκπαίδευση Νευρωνικών Δικτύων.....	64
2.4.12.5. Πολυεπίπεδος Αισθητήρας.....	65
2.4.12.6. Διαστήματα Εμπιστοσύνης στα ΤΝΔ.....	67
2.4.13. Ανάλυση συσχετίσεων χρονικών σειρών.....	68
2.4.13.1. Η μέθοδος της προλεύκανης.....	68
2.4.13.2. Έλεγχος αιτιότητας κατά Granger.....	69
2.4.13.3. Υπό συνθήκη αιτιότητα κατά Granger.....	70
2.4.14. Μέτρα σύγκρισης στοχαστικών μοντέλων.....	71

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ	73
3.1. Εισαγωγή	73
3.2. Βόρειο Δίκτυο – Περιφερειακός Σταθμός Παγονέρι	74
3.2.1. Αξιολόγηση των δεδομένων παρακολούθησης - Περιγραφική στατιστική	75
3.2.2. Έλεγχος προσαρμογής σε κατανομή	85
3.2.3. Έλεγχος τάσης των παραμέτρων	88
3.3. Κεντρικό Δίκτυο - Περιφερειακός Σταθμός Θησαυρού.....	92
3.3.1. Αξιολόγηση των δεδομένων παρακολούθησης - Περιγραφικά στατιστικά	93
3.3.2. Έλεγχος τάσης των παραμέτρων του Π.Σ. Θησαυρού.....	97
3.3.3. Αξιολόγηση του ταμιευτήρα του Θησαυρού.....	102
3.3.4. Προσαρμογή στοχαστικών μοντέλων	110
3.3.4.1. Κατασκευή και προβλεπτική ικανότητα των μοντέλων.....	112
3.3.4.2. Κατασκευή μοντέλων και έλεγχος δυνατότητας κατάργησης αισθητήρων	136
3.4. Νότιο Δίκτυο - Περιφερειακός Σταθμός Νέστος	150
3.4.1. Αξιολόγηση των δεδομένων παρακολούθησης - Περιγραφικά στατιστικά	151
3.4.2. Έλεγχος προσαρμογής σε κατανομή	161
3.4.3. Έλεγχος τάσης των παραμέτρων του Π.Σ. Νέστος	164
3.5. Σύγκριση των παραμέτρων παρακολούθησης των Π.Σ. Παγονέρι και Νέστος	168
3.5.1. Αξιολόγηση των περιγραφικών στατιστικών	168
3.5.2. Αξιολόγηση της δυναμικής των παραμέτρων	175
3.5.2.1. Έλεγχος αυτοσυσχετίσεων	176
3.5.2.2. Έλεγχος συσχετίσεων	178
3.5.2.3. Μοντέλα Νευρωνικών Δικτύων	183
4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	191
4.1. Αναλυτικά Συμπεράσματα	192
4.2. Συνεισφορά της διατριβής	197

4.3. Μελλοντική έρευνα	198
5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	201
6. ABSTRACT	213

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.1:	Κριτήρια ποιότητας υδάτων για πόση και για υδρόβια ζωή, σύμφωνα με την Ελληνική και Ευρωπαϊκή νομοθεσία.....	76
Πίνακας 3.2:	Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία των παραμέτρων του Π.Σ. Παγονέρι.....	85
Πίνακας 3.3:	Έλεγχος προσαρμογής σε κατανομή για τις παραμέτρους του Π.Σ. Παγονέρι	87
Πίνακας 3.4:	Αποτελέσματα ελέγχου τάσης με προσαρμογή ευθείας για τον Π.Σ. Παγονέρι	89
Πίνακας 3.5:	Αποτελέσματα ADF ελέγχου για τον Π.Σ. Παγονέρι	90
Πίνακας 3.6:	Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία της παραμέτρου pH	93
Πίνακας 3.7:	Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία της παραμέτρου διαλυμένο οξυγόνο.....	95
Πίνακας 3.8:	Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία της παραμέτρου θερμοκρασία νερού	96
Πίνακας 3.9:	Αποτελέσματα προσαρμογής ευθείας, για τον Π.Σ. Θησαυρού	100
Πίνακας 3.10:	Αποτελέσματα ADF ελέγχου, για τον Π.Σ. Θησαυρού	101
Πίνακας 3.11:	ARIMA μοντέλα της παραμέτρου διαλυμένο οξυγόνο, στα τέσσερα βάθη	113
Πίνακας 3.12:	Στατιστικά μέτρα αξιολόγησης προβλεπτικής ικανότητας των ARIMA μοντέλων στα τέσσερα βάθη.....	116
Πίνακας 3.13:	ARIMA μοντέλα προλεύκανσης.....	117
Πίνακας 3.14:	Τιμές της σημαντικότητας του στατιστικού Q για τα TF μοντέλα.....	118
Πίνακας 3.15:	Στατιστικά μέτρα αξιολόγησης προβλεπτικής ικανότητας των TF μοντέλων στα τέσσερα βάθη	121
Πίνακας 3.16:	Σημαντικότητες και κανονικοποιημένες σημαντικότητες, μεταβλητών εισόδου των νευρωνικών δικτύων στον Π.Σ. Θησαυρό.....	122
Πίνακας 3.17:	Στατιστικά των νευρωνικών δικτύων στα τέσσερα βάθη	123
Πίνακας 3.18:	Εκτίμηση παραμέτρων του μοντέλου ANN-1.....	123
Πίνακας 3.19:	Εκτίμηση παραμέτρων του μοντέλου ANN-20.....	124
Πίνακας 3.20:	Εκτίμηση παραμέτρων του μοντέλου ANN-40.....	125
Πίνακας 3.21:	Εκτίμηση παραμέτρων του μοντέλου ANN-70.....	126
Πίνακας 3.22:	Στατιστικά μέτρα αξιολόγησης προβλεπτικής ικανότητας των ANN μοντέλων στα τέσσερα βάθη	129
Πίνακας 3.23:	Στατιστικά μέτρα για σύγκριση παρατηρούμενων και προβλεπόμενων τιμών, με χρήση ARIMA, TF και ANN μοντέλων και $m=1$	131

Πίνακας 3.23α: Στατιστικά μέτρα για σύγκριση παρατηρούμενων και προβλεπόμενων τιμών, με χρήση ARIMA, TF και ANN μοντέλων και $m = 1,2,3,5$ και 10 (βάθος 1m)	132
Πίνακας 3.23β: Στατιστικά μέτρα για σύγκριση παρατηρούμενων και προβλεπόμενων τιμών, με χρήση ARIMA, TF και ANN μοντέλων και $m = 1,2,3,5$ και 10 (βάθος 20m)	133
Πίνακας 3.23γ: Στατιστικά μέτρα για σύγκριση παρατηρούμενων και προβλεπόμενων τιμών, με χρήση ARIMA, TF και ANN μοντέλων και $m = 1,2,3,5$ και 10 (βάθος 40m)	134
Πίνακας 3.23δ: Στατιστικά μέτρα για σύγκριση παρατηρούμενων και προβλεπόμενων τιμών, με χρήση ARIMA, TF και ANN μοντέλων και $m = 1,2,3,5$ και 10 (βάθος 70m)	135
Πίνακας 3.24: Τιμές της σημαντικότητας του στατιστικού Q για τα TF μοντέλα	138
Πίνακας 3.25: Στατιστικά μέτρα αξιολόγησης προβλεπτικής ικανότητας των TF μοντέλων στα τρία βάθη	141
Πίνακας 3.26: Σημαντικότητες και κανονικοποιημένες σημαντικότητες, μεταβλητών εισόδου των νευρωνικών δικτύων, στον Π.Σ. Θησαυρό.....	142
Πίνακας 3.27: Στατιστικά των νευρωνικών δικτύων, στα τρία βάθη	142
Πίνακας 3.28: Εκτίμηση παραμέτρων του μοντέλου ANN-20	143
Πίνακας 3.29: Εκτίμηση παραμέτρων του μοντέλου ANN-40	144
Πίνακας 3.30: Εκτίμηση παραμέτρων του μοντέλου ANN-70	145
Πίνακας 3.31: Στατιστικά μέτρα αξιολόγησης προβλεπτικής ικανότητας των ANN μοντέλων, στα τρία βάθη	147
Πίνακας 3.32: Στατιστικά μέτρα για σύγκριση παρατηρούμενων και προβλεπόμενων τιμών, από τα TF και ANN μοντέλα	149
Πίνακας 3.33: Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία των παραμέτρων του Π.Σ. Νέστος	160
Πίνακας 3.34: Έλεγχος προσαρμογής σε κατανομή, για τις παραμέτρους του Π.Σ. Νέστος	163
Πίνακας 3.35: Αποτελέσματα ελέγχου τάσης με προσαρμογή ευθείας για τον Π.Σ. Νέστος	165
Πίνακας 3.36: Αποτελέσματα ADF ελέγχου για τον Π.Σ. Νέστος	166
Πίνακας 3.37: Συντελεστές συσχέτισης κατά Pearson μεταξύ των παραμέτρων του Π.Σ. Παγονέρι	179
Πίνακας 3.38: Συντελεστές συσχέτισης κατά Pearson μεταξύ των παραμέτρων του Π.Σ. Νέστος	179
Πίνακας 3.39: Σημαντικότητα του ελέγχου CGC για τις παραμέτρους του Π.Σ. Παγονέρι	181

Πίνακας 3.40: Σημαντικότητα του ελέγχου CGC για τις παραμέτρους του Π.Σ. Νέστος	181
Πίνακας 3.41: Σημαντικότητες μεταβλητών εισόδου για τον Π.Σ. Παγονέρι.....	185
Πίνακας 3.42: Εκτίμηση παραμέτρων Π.Σ. Παγονέρι.....	185
Πίνακας 3.43: Στατιστικά του νευρωνικού δικτύου του Π.Σ. Παγονέρι	186
Πίνακας 3.44: Σημαντικότητες μεταβλητών εισόδου για τον Π.Σ. Νέστος	186
Πίνακας 3.45: Εκτίμηση παραμέτρων Π.Σ. Νέστος	187
Πίνακας 3.46: Στατιστικά του νευρωνικού δικτύου του Π.Σ. Νέστος	188

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1:	Βιολογικός νευρώνας	60
Σχήμα 2.2:	Τεχνητός νευρώνας με τις εισόδους x_i και τα αντίστοιχα βάρη w_i	61
Σχήμα 2.3:	Αντιστοιχία βιολογικού - τεχνητού νευρώνα	61
Σχήμα 2.4:	Η βηματική συνάρτηση	61
Σχήμα 2.5:	Τέσσερις διαφορετικές συναρτήσεις ενεργοποίησης α) γραμμική, β) υπερβολική, γ) σιγμοειδής και δ) βηματική	63
Σχήμα 2.6:	Πολυεπίπεδο perceptron με δύο κρυμμένα επίπεδα	64
Σχήμα 3.1:	Η χρονοσειρά της παραμέτρου στάθμη νερού στον Τ.Σ. Παγονέρι	76
Σχήμα 3.2:	Η χρονοσειρά της παραμέτρου ηλεκτρική αγωγιμότητα στον Π.Σ. Παγονέρι	78
Σχήμα 3.3:	Οι χρονοσειρές των παραμέτρων στάθμη νερού και ηλ. αγωγιμότητας	79
Σχήμα 3.4:	Η χρονοσειρά της παραμέτρου διαλυμένο οξυγόνο στον Π.Σ. Παγονέρι	80
Σχήμα 3.5:	Η χρονοσειρά της παραμέτρου pH στον Π.Σ. Παγονέρι	81
Σχήμα 3.6:	Η χρονοσειρά της παραμέτρου θερμοκρασία νερού στον Π.Σ. Παγονέρι	82
Σχήμα 3.7:	Η χρονοσειρά της παραμέτρου θερμοκρασία αέρα στον Π.Σ. Παγονέρι	83
Σχήμα 3.8:	Η χρονοσειρά της παραμέτρου θερμοκρασία νερού και αέρα	84
Σχήμα 3.9:	Γράφημα της συνάρτησης διασυσχέτισης, μεταξύ των σφαλμάτων των παραμέτρων θερμοκρασία νερού και αέρα	84
Σχήμα 3.10:	Θηκογράμματα των παραμέτρων (α) Στάθμη νερού, (β) ηλεκτρική αγωγιμότητα, (γ) pH, (δ) διαλυμένο οξυγόνο, (ε) θερμοκρασία νερού και (στ) αέρα, του Π.Σ. Παγονέρι	86
Σχήμα 3.11:	Ιστόγραμμα συχνοτήτων και προσαρμοσμένη κανονική κατανομή της παραμέτρου διαλυμένο οξυγόνο	87
Σχήμα 3.12:	Περιοδογράμματα των παραμέτρων θερμοκρασία (α) νερού και (β) αέρα	88
Σχήμα 3.13:	Παρατηρούμενη και εξομαλυμένη χρονοσειρά των παραμέτρων θερμοκρασία (α) νερού και (β) αέρα, για τον Π.Σ. Παγονέρι	89
Σχήμα 3.14:	Οι μετρήσεις και η προσαρμοζόμενη ευθεία παλινδρόμησης των παραμέτρων (α) στάθμη νερού, (β) ηλεκτρική αγωγιμότητα και (γ) διαλυμένο οξυγόνο, στον Π.Σ. Παγονέρι	91
Σχήμα 3.15:	Γράφημα α) των μετρήσεων και β) του θηκογράμματος, της παραμέτρου pH για τον Τ.Σ. Θησαυρό	94
Σχήμα 3.16:	Γράφημα α) των μετρήσεων και β) του θηκογράμματος, της παραμέτρου διαλυμένο οξυγόνο για τον Τ.Σ. Θησαυρό	96

Σχήμα 3.17: Γράφημα α) των μετρήσεων και β) του θηκογράμματος, της παραμέτρου θερμοκρασία νερού για τον Τ.Σ. Θησαυρό	97
Σχήμα 3.18: Περιοδογράμματα της παραμέτρου θερμοκρασία νερού (α) στο 1μ, (β) στα 20μ, (γ) στα 40μ και (δ) στα 70μ.....	98
Σχήμα 3.19: Παρατηρούμενη και εξομαλυμένη χρονοσειρά των παραμέτρων θερμοκρασία νερού (α) στο 1m, (β) στα 20m, (γ) στα 40m και (δ) στα 70m.....	99
Σχήμα 3.20: Οι μετρήσεις και η προσαρμοζόμενη ευθεία παλινδρόμησης της παραμέτρου θερμοκρασία νερού σε βάθος 70m, για τον Τ.Σ. Θησαυρό.....	102
Σχήμα 3.21: Γράφημα των μετρήσεων των παραμέτρων α) θερμοκρασίας νερού και β) διαλυμένο οξυγόνο, στα τέσσερα βάθη για το έτος 2004.....	103
Σχήμα 3.22: Γράφημα των μετρήσεων των παραμέτρων α) διαλυμένο οξυγόνο και β) θερμοκρασία νερού, στα τέσσερα βάθη για το έτος 2005.....	105
Σχήμα 3.23: Γράφημα των μετρήσεων των παραμέτρων α) θερμοκρασία νερού και β) διαλυμένο οξυγόνο, στα τέσσερα βάθη για το έτος 2006	107
Σχήμα 3.24: Γράφημα των μετρήσεων των παραμέτρων α) θερμοκρασία νερού και β) διαλυμένο οξυγόνο, στα τέσσερα βάθη για το έτος 2007	108
Σχήμα 3.25: Προσαρμογή ARIMA μοντέλου στη χρονοσειρα του DO και όρια 95% δ.ε. για βάθος (α) 1m (β) 20m (γ) 40m (δ) 70m	114
Σχήμα 3.26: Διαγράμματα διασποράς παρατηρούμενων και προβλεπόμενων τιμών από τα ARIMA μοντέλα για βάθος (α) 1m (β) 20m (γ) 40m (δ) 70m	115
Σχήμα 3.27: Δειγματική συνάρτηση διασυσχέτισης (SCCF) μεταξύ διαλυμένου οξυγόνου και θερμοκρασίας κατόπιν προλεύκανσης, για βάθος (α) 1m (β) 20m (γ) 40m (δ) 70m	117
Σχήμα 3.28: Προσαρμογή TF μοντέλου και όρια 95% δ.ε. για βάθος (α) 1m (β) 20m (γ) 40m και (δ) 70m	119
Σχήμα 3.29: Διαγράμματα διασποράς παρατηρούμενων και προβλεπόμενων τιμών από τα TF μοντέλα για βάθος (α) 1m (β) 20m (γ) 40m (δ) 70m	120
Σχήμα 3.30: Διάγραμμα νευρωνικού δικτύου του μοντέλου ANN-1	124
Σχήμα 3.31: Διάγραμμα νευρωνικού δικτύου του μοντέλου ANN-20	125
Σχήμα 3.32: Διάγραμμα νευρωνικού δικτύου του μοντέλου ANN-40	126
Σχήμα 3.33: Διάγραμμα νευρωνικού δικτύου του μοντέλου ANN-70	127
Σχήμα 3.34: Προσαρμογή TF μοντέλου και όρια 95% δ.ε. για βάθος (α) 1m (β) 20m (γ) 40m και (δ) 70m	128
Σχήμα 3.35: Διαγράμματα διασποράς παρατηρούμενων και προβλεπόμενων τιμών από τα ANN μοντέλα για βάθος (α) 1m (β) 20m (γ) 40m (δ) 70m.....	129

Σχήμα 3.36: Τιμές διαλυμένου οξυγόνου παρατηρούμενης και εκτιμώμενης χρονοσειράς, από τα μοντέλα ARIMA, TF και ANN, για βάθος (α) 1m (β) 20m (γ) 40m και (δ) 70m.....	130
Σχήμα 3.37: Δειγματική συνάρτηση διασυσχέτισης μεταξύ διαλυμένου οξυγόνου στο 1m και της ίδιας παραμέτρου για βάθος (α) 20m (β) 40m και (γ) 70m	137
Σχήμα 3.38: Προσαρμογή TF μοντέλου και όρια 95% δ.ε. για βάθος (α) 20m (β) 40m και (γ) 70m	139
Σχήμα 3.39: Διαγράμματα διασποράς παρατηρούμενων και προβλεπόμενων τιμών από τα TF μοντέλα για βάθος (α) 20m (β) 40m και (γ) 70m.....	140
Σχήμα 3.40: Διάγραμμα νευρωνικού δικτύου του μοντέλου ANN-20	143
Σχήμα 3.41: Διάγραμμα νευρωνικού δικτύου του μοντέλου ANN-40	144
Σχήμα 3.42: Διάγραμμα νευρωνικού δικτύου του μοντέλου ANN-70	145
Σχήμα 3.43: Προσαρμογή ANN μοντέλου και όρια 95% δ.ε. για βάθος (α) 20m (β) 40m (γ) 70m	146
Σχήμα 3.44: Διαγράμματα διασποράς παρατηρούμενων και προβλεπόμενων τιμών από τα ANN μοντέλα για βάθος (α) 20m (β) 40m και (γ) 70m.....	147
Σχήμα 3.45: Τιμές διαλυμένου οξυγόνου παρατηρούμενης και εκτιμώμενης χρονοσειράς, από τα μοντέλα TF και ANN, για βάθος (α) 20m (β) 40m (γ) 70m	148
Σχήμα 3.46: Σύγκριση μεταξύ της φυσικής και της ανθρωπογενούς υδροπεριόδου του Νέστου, πριν και μετά την κατασκευή του φράγματος (Psilonikos <i>et al.</i> 2005)	152
Σχήμα 3.47: Η χρονοσειρά της παραμέτρου στάθμη νερού στον Π.Σ. Νέστο.....	152
Σχήμα 3.48: Η χρονοσειρά της παραμέτρου ηλεκτρική αγωγιμότητα στον Π.Σ. Νέστο	154
Σχήμα 3.49: Οι χρονοσειρές των παραμέτρων στάθμη νερού και ηλ. αγωγιμότητας.....	154
Σχήμα 3.50: Η χρονοσειρά της παραμέτρου διαλυμένο οξυγόνο στον Π.Σ. Νέστο	155
Σχήμα 3.51: Η χρονοσειρά της παραμέτρου Redox στον Π.Σ. Νέστο.....	156
Σχήμα 3.52: Η χρονοσειρά της παραμέτρου pH στον Π.Σ. Νέστο	157
Σχήμα 3.53: Η χρονοσειρά της παραμέτρου θερμοκρασία νερού στον Π.Σ. Νέστο	158
Σχήμα 3.54: Η χρονοσειρά της παραμέτρου θερμοκρασία αέρα στον Π.Σ. Νέστο.....	158
Σχήμα 3.55: Η χρονοσειρά της παραμέτρου θερμοκρασία νερού και αέρα.....	159
Σχήμα 3.56: Γράφημα της συνάρτησης διασυσχέτισης, μεταξύ των σφαλμάτων των παραμέτρων θερμοκρασία νερού και αέρα.....	160

Σχήμα 3.57: Θηκογράμματα των παραμέτρων (α) Στάθμη νερού, (β) ηλεκτρική αγωγιμότητα, (γ) Redox, (δ) pH, (ε) διαλυμένο οξυγόνο, (στ) θερμοκρασία νερού και (ζ) αέρα, του Π.Σ. Νέστο.....	162
Σχήμα 3.58: Ιστόγραμμα συχνοτήτων και προσαρμοσμένη κανονική κατανομή της παραμέτρου διαλυμένο οξυγόνο.....	163
Σχήμα 3.59: Περιοδογράμματα των παραμέτρων θερμοκρασία (α) νερού και (β) αέρα.....	164
Σχήμα 3.60: Παρατηρούμενη και εξομαλυμένη χρονοσειρά των παραμέτρων θερμοκρασία (α) νερού και (β) αέρα, για τον Π.Σ. Νέστο.....	165
Σχήμα 3.61: Οι μετρήσεις και η προσαρμοζόμενη ευθεία παλινδρόμησης των παραμέτρων (α) στάθμη νερού, (β) διαλυμένο οξυγόνο και (γ) Θερμοκρασία νερού μετά την απαλοιφή της περιοδικότητας, στον Π.Σ. Νέστο.....	167
Σχήμα 3.62: α) Η χρονοσειρά και β) η εμπειρική κατανομή της παραμέτρου στάθμη νερού, για τους Π.Σ. Παγονέρι και Νέστο.....	169
Σχήμα 3.63: α) Η χρονοσειρά και β) η εμπειρική κατανομή της παραμέτρου ηλεκτρική αγωγιμότητα, για τους Π.Σ. Παγονέρι και Νέστο.....	171
Σχήμα 3.64: α) Η χρονοσειρά και β) η εμπειρική κατανομή της παραμέτρου διαλυμένο οξυγόνο, για τους Π.Σ. Παγονέρι και Νέστο.....	172
Σχήμα 3.65: α) Η χρονοσειρά και β) η εμπειρική κατανομή της παραμέτρου pH, για τους Π.Σ. Παγονέρι και Νέστο.....	173
Σχήμα 3.66: α) Η χρονοσειρά και β) η εμπειρική κατανομή της παραμέτρου θερμοκρασία νερού, για τους Π.Σ. Παγονέρι και Νέστο.....	173
Σχήμα 3.67: α) Η χρονοσειρά και β) η εμπειρική κατανομή της παραμέτρου θερμοκρασία αέρα, για τους Π.Σ. Παγονέρι και Νέστο.....	174
Σχήμα 3.68: Διαγράμματα αυτοσυσχετίσεων των παραμέτρων των σταθμών (α) Παγονέρι (β) Νέστος.....	177
Σχήμα 3.69: Διάγραμμα νευρωνικού δικτύου Π.Σ. Παγονέρι.....	185
Σχήμα 3.70: Διάγραμμα νευρωνικού δικτύου Π.Σ. Νέστου.....	187
Σχήμα 3.71: Παρατηρούμενες και προβλεπόμενες ημερήσιες τιμές της παραμέτρου διαλυμένο οξυγόνο, για 95% διάστημα εμπιστοσύνης, για τους σταθμούς α) Παγονέρι και β) Νέστο.....	189
Σχήμα 3.72: Παρατηρούμενες και προβλεπόμενες ημερήσιες τιμές της παραμέτρου διαλυμένο οξυγόνο για 90% διάστημα εμπιστοσύνης για τους σταθμούς α) Παγονέρι και β) Νέστο.....	190

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2.1: Η λεκάνη απορροής του ποταμού Νέστου στο έδαφος Ελλάδος και Βουλγαρίας και το δέλτα του ποταμού	11
Εικόνα 2.2: Οι τρεις γεωγραφικές ενότητες στις οποίες χωρίζεται ο ποταμός: α) Άνω ρους - Ορεινή ζώνη, β) Μέσος ρους - Ενδοορεινή κοιλάδα και γ) Κάτω ρους - Πεδινή ζώνη - Δέλτα. Στην εικόνα διακρίνεται ο χωρισμός της Ενδοορεινής κοιλάδας στην περιοχή των υδροηλεκτρικών φραγμάτων και στα Θρακικά Τέμπη (Geo Strategy 2010).....	14
Εικόνα 2.3: Ο ποταμός Νέστος πριν (1990) και μετά (2000) την κατασκευή των δύο φραγμάτων του Θησαυρού και της Πλατανόβρυσης. Διακρίνονται οι πλημμυρισμένες περιοχές που δημιουργήθηκαν μετά την ανθρώπινη παρέμβαση (Ψιλοβίκος 2005).....	17
Εικόνα 2.4: Το φράγμα του Θησαυρού και οι πλημμυρισμένες εκτάσεις, μέρος της τεχνητής λίμνης που δημιουργείται από το φράγμα της Πλατανόβρυσης και η τοποθεσία του φράγματος του Τεμένους.....	18
Εικόνα 2.5: Η διαδρομή του ποταμού μεταξύ των οικισμών Παρανεστίου – Σταυρούπολης, ο καταρράκτης Λειβαδίτης και ένα μέρος της ροής του ποταμού.....	20
Εικόνα 2.6: Τα Στενά του Νέστου – Θρακικά Τέμπη όπου απεικονίζεται ο μαιανδρικός ρους του ποταμού	20
Εικόνα 2.7: Δέλτα του Νέστου. Στα αριστερά φαίνεται η διαμόρφωση των όχθων του Δέλτα έως την περιοχή της Κεραμωτής. Μικρότεροι κλάδοι του ποταμού καταλήγουν στη θάλασσα, δημιουργώντας λιμνοθάλασσες και βάλτους. Στο εσωτερικό διακρίνεται την πλατιά επίπεδη έκταση που αποτελεί την πεδιάδα του Δέλτα.....	22
Εικόνα 2.8: Οι εγκατεστημένοι τηλεμετρικοί σταθμοί στον ποταμό Νέστο	27
Εικόνα 3.1: Τ.Σ. Βορείου Δικτύου (α) Δοσπάτη και (β) Παγονέρι	74
Εικόνα 3.2: Ο πλωτός Τ.Σ. Θησαυρού και τα βάθη καταγραφής των μετρήσεων, κατά τη διάρκεια του έτους (Ψιλοβίκος, 2005).....	92
Εικόνα 3.3: Διαδικασίες λειτουργίας της υδάτινης στήλης του ταμιευτήρα του Θησαυρού (Moustaka <i>et al.</i> 2000, Albanakis <i>et al.</i> 2001)	106

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο Hal Borland (2003) σε μια παράγραφο του βιβλίου του «Beyond Your Doorstep», γράφει: «Κάθε ποτάμι είναι στην ουσία η σύνοψη μιας ολόκληρης κοιλάδας. Δε διαμορφώνει μόνο τη γη αλλά και τον πολιτισμό αυτής της κοιλάδας. Το να σκέφτεσαι το ποτάμι μόνο ως νερό είναι σα να αγνοείς το σημαντικότερο κομμάτι του».

Από τους προϊστορικούς χρόνους το υδάτινο στοιχείο αποτελούσε πηγή ζωής για τον άνθρωπο, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη οικισμών και σημαντικών πολιτισμών κοντά σε ποτάμια, λίμνες, παράκτιες ζώνες και οάσεις στην έρημο. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν, ο πολιτισμός της Μεσοποταμίας, της Αλεξάνδρειας και της Ρώμης. Στην Ελλάδα προϊστορικοί οικισμοί έχουν βρεθεί κατά μήκος του Πηνειού στο Θεσσαλικό κάμπο, στο Δισπηλιό της Καστοριάς δίπλα στη λίμνη και σε πολλά άλλα μέρη. Ακόμα και σήμερα μεγάλες πόλεις διασχίζονται από μικρούς ή μεγάλους ποταμούς, όπως το Λονδίνο από τον Τάμεση, το Παρίσι από το Σηκουάνα, η Βουδαπέστη, το Βελιγράδι και η Βιέννη από το Δούναβη, το Κάιρο από το Νείλο, η Πράγα από το Μοράβα κ.α.

Στις μέρες μας, οι ποταμοί συνεχίζουν να προσφέρουν τις υπηρεσίες τους στον άνθρωπο. Όμως, ο άνθρωπος στην προσπάθεια του να βελτιώσει τις υπηρεσίες αυτές, παρεμβαίνει με διάφορες διαχειριστικές δράσεις όπως αμμοληψίες, ευθυγραμμίσεις ή διευθετήσεις της κοίτης, εκβαθύνσεις, έλεγχο της ροής του νερού, άντληση του νερού κ.α. Οι παρεμβάσεις αυτές αν και γίνονται με σκοπό την προστασία από τις πλημμύρες και τα φερτά υλικά, τη δημιουργία υδροηλεκτρικών εγκαταστάσεων, τη μεταφορά εμπορευμάτων ή την άρδευση καλλιεργειών, εντούτοις τις περισσότερες φορές έχουν ως αποτέλεσμα την υποβάθμιση του ποταμού (Σκουλικίδης 1997).

Τα ποτάμια είναι δυναμικά οικοσυστήματα και με τους παραποτάμους τους αποτελούν ένα ενιαίο σύνολο. Μαζί με τις σημαντικές ποσότητες νερού που μεταφέρουν, μεταφέρουν και διαλυμένες ουσίες φυσικής ή ανθρωπογενούς προέλευσης. Η μετακινούμενη μάζα υφίσταται συνεχώς φυσικές, χημικές και βιολογικές αλλαγές, που επηρεάζουν σημαντικά τα δεδομένα της περιοχής που διασχίζει ο ποταμός. Η κατάσταση των υδάτων και η σταθερότητα του ποτάμιου οικοσυστήματος, είναι αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης πολλών περιβαλλοντικών παραγόντων (εδαφικών, ατμοσφαιρικών, κλιματολογικών), αλλά και ανθρωπίνων επιδράσεων που πολύ συχνά προκαλούν ρύπανση (Bricker & Jones 1995).

Η προσθήκη ρύπων στα ύδατα ενός ποταμού, με φυσικές διεργασίες ή με την παρέμβαση του ανθρώπου, έχει ως αποτέλεσμα την ποσοτική και ποιοτική υποβάθμισή τους. Στη χώρα μας, σε ότι αφορά την ποσοτική και ποιοτική υποβάθμιση των υδατικών συστημάτων, ο παράγοντας διατήρησης και προστασίας του περιβάλλοντος κατά τη διαχείριση του νερού, τα τελευταία μόνο χρόνια άρχισε να λαμβάνεται υπόψη. Ο έλεγχος της κατάστασης των υδάτων, απαιτεί τη συστηματική και μακροχρόνια παρακολούθησή τους (monitoring), δηλαδή τη δημιουργία βάσεων δεδομένων από μετρήσεις παραμέτρων σε επιφανειακούς υδάτινους πόρους (Αλμπανάκης και συν. 2001, Ψιλοβίκος και συν. 2001, Psilovikos *et al.* 2006, Λαόπουλος 2007, Matzafleri *et al.* 2009, Basiliades *et al.* 2009, Margoni *et al.* 2010).

Η αξιοποίηση αυτών των δεδομένων από τους επιστήμονες επιδιώκει την αειφόρο διαχείριση των υδατικών πόρων τόσο ως προς την ποσότητα - επάρκεια του νερού για όλες τις δυνατές χρήσεις όσο και ως προς την ποιότητα. Επίσης, συντελεί και στην αποτελεσματική αντιμετώπιση των πλημμυρών και της ξηρασίας. Η επεξεργασία αυτών των μετρήσεων γίνεται με χρήση στατιστικών μεθόδων και κυρίως με την προσαρμογή μοντέλων.

Η αναζήτηση μοντέλων για την περιγραφή και κυρίως για την πρόβλεψη φαινομένων χρησιμοποιώντας πραγματικά δεδομένα, ήταν είναι και θα είναι αντικείμενο έρευνας σε όλες τις επιστήμες. Η εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών (H/Y) βοήθησε πολύ προς την κατεύθυνση αυτή γιατί η ανάλυση μεγάλου όγκου δεδομένων απαιτεί πράξεις που δεν αντιμετωπίζονται παρά μόνο με τη χρήση τους, ενώ η ανάπτυξη στατιστικών πακέτων, έκανε την ανάλυση δεδομένων εργαλείο έρευνας μεγάλου πλήθους ερευνητών από όλους τους επιστημονικούς κλάδους. Απαραίτητα εφόδια είναι η κατανόηση της λειτουργίας των προγραμμάτων και η καλή γνώση της θεωρίας των μεθόδων που χρησιμοποιούνται.

Ένας βασικός διαχωρισμός στα μοντέλα είναι σε δύο μεγάλες κατηγορίες: α) τα προσδιοριστικά (deterministic) και β) τα στοχαστικά (stochastic models, probabilistic models). Στην πρώτη περίπτωση ανήκουν τα μοντέλα εκείνα βάσει των οποίων για μια ή περισσότερες δοσμένες τιμές, μπορεί να προβλεφθεί η ακριβής τιμή μιας παραμέτρου, ή η ένταση ενός φαινομένου, ή η απόκριση ενός συστήματος σε μια εξωτερική φόρτιση, δηλαδή η τιμή που προκύπτει δεν υπόκειται σε σφάλματα. Αυτό θα ήταν ευχή κάθε επιστήμονα. Στην πράξη τα στοχαστικά μοντέλα είναι αυτά που εφαρμόζονται γιατί η τιμή που προκύπτει ακολουθείται και από μια σειρά στατιστικής επεξεργασίας που α-

φορά μέση τιμή, μεταβλητότητα, σφάλματα, διαστήματα εμπιστοσύνης, οπότε μας δίνεται και η αβεβαιότητα της εκτίμησης του μοντέλου. Τα σφάλματα αυτά πληρούν κάποιες προϋποθέσεις.

Συγκεκριμένα με τη βοήθεια της στατιστικής ανάλυσης και ειδικότερα των στοχαστικών μοντέλων, εντοπίζονται τάσεις (Lessin & Raudsepp 2000, Sheng Yue *et al.* 2001, Kahya & Kalayci 2004, Psilovikos *et al.* 2006, Psilovikos & Sentas 2009, Margoni & Psilovikos 2010, Psilovikos *et al.* 2011), μέτρα κεντρικής τάσης και διασποράς, κατανομές (Smith & Maasdam 1994, Psilovikos *et al.* 2009) συσχετίσεις και συγκρίνονται παράμετροι (Lehmann & Rode 2000, Darken *et al.* 2002), στοιχεία τα οποία θεωρούνται απαραίτητα για την ορθή διαχείριση των υδάτων ενός ποταμού.

Προσαρμόζοντας στοχαστικά μοντέλα στα δεδομένα, προβλέπονται μελλοντικές τιμές των παραμέτρων με σκοπό την αντιμετώπιση διαφόρων καταστάσεων κάτω από διαφορετικά περιβαλλοντικά ή υδρολογικά σενάρια. Στοχαστικά μοντέλα που έχουν ευρέως χρησιμοποιηθεί είναι τα γραμμικά στοχαστικά μοντέλα (ARIMA, SARIMA, Transfer Function models), τα οποία προσαρμόζονται εξετάζοντας τις αυτοσυσχετίσεις και διασυσχετίσεις μεταξύ των παραμέτρων (Ahmad *et al.* 2001, Guo *et al.* 2003, Yi & Kang-Kun 2004, Yurekli *et al.* 2005, Σέντας και συν. 2008, Durdu 2010, Sentas & Psilovikos 2010, Sentas & Psilovikos 2012). Εξαιρετικό ενδιαφέρον παρουσιάζουν και τα Νευρωνικά μοντέλα (ANN), τα οποία είναι μη γραμμικά ευέλικτα μοντέλα, η χρήση των οποίων δεν απαιτεί περιορισμούς και προϋποθέσεις και για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται ευρέως για μοντελοποίηση και κυρίως για πρόβλεψη (Kurunc *et al.* 2004, Najah *et al.* 2009, Κοτοπούλη και συν. 2009, Wang & Gao 2010).

Ειδικότερα, στην Ελλάδα η ανάλυση και μοντελοποίηση των ποσοτικών και ποιοτικών παραμέτρων των υδάτων, συγκέντρωσε το ενδιαφέρον των Ελλήνων επιστημόνων εδώ και αρκετές δεκαετίες. Από τους πρώτους που ασχολήθηκαν με στοχαστική μοντελοποίηση ήταν οι Paramichail & Papazafiriou (1990), οι οποίοι προσάρμοσαν εποχικά στοχαστικά μοντέλα, σε δεδομένα του ποταμού Βενέτικου, οι Antonopoulos & Paramichail (1990) των οποίων η ανάλυση αναφέρεται στον Πτολεμαίο ποταμό και τέλος οι Argyropoulos & Ganoulis το 1992 οι οποίοι σε υδρολογικές μετρήσεις του Αξιού ποταμού, προσάρμοσαν ARIMA μοντέλα.

Για τον ποταμό Στρυμόνα οι Mitsiou *et al.* (1999), μελέτησαν με μεθόδους στατιστικής ανάλυσης δεδομένα χρονοσειρών μηνιαίων τιμών, δεκατεσσάρων ποιοτικών παραμέτρων και της παροχής, από δύο σταθμούς παρακολούθησης. Για τον ίδιο ποτα-

μό, οι Antonopoulos *et al.* το 2001 χρησιμοποιώντας μηνιαίες μετρήσεις για την περίοδο 1980-1997, για εννέα ποιοτικές και μία ποσοτική παράμετρο, προσάρμοσαν γραμμικά μοντέλα και έλεγξαν την ύπαρξη τάσης (έλεγχος Spearman) και συσχετίσεων (Correlation Coefficient) μεταξύ των παραμέτρων. Οι Antonopoulos & Papamichail (2002) εφάρμοσαν ανάλυση τάσης (Trend Analysis) στους διασυννοριακούς ποταμούς Αξιό και Στρυμόνα.

Με χρήση Transfer Function μοντέλων οι Lekkas *et al.* (2001), ανέλυσαν και πρόβλεψαν πλημμυρικά φαινόμενα του Πηνειού ποταμού. Μια πολυδιάστατη ανάλυση (principal component analysis, cluster analysis και multiple regression analysis on principal components) για πέντε ποταμούς της Βόρειας Ελλάδας (Αλιάκμονας, Αξιός, Γαλλικός, Λουδίας και Στρυμόνας) εφαρμόστηκε από τους Simeonov *et al.* το 2003, σε ένα σύνολο 22350 μηνιαίων παρατηρήσεων, 27 παραμέτρων, για την ομαδοποίηση και τον έλεγχο της ποιότητας των υδάτων.

Οι Gikas *et al.* (2009) ανέλυσαν μηνιαίες παρατηρήσεις από τον Ιούνιο του 2004 ως το Μάιο του 2005, για αρκετές παραμέτρους των υδάτων του ποταμού Αλιάκμονα, με σκοπό να ελέγξουν πώς τα νερά του ποταμού επηρεάζουν την ποιότητα των υδάτων της τεχνητής λίμνης του Πολυφύτου, στην οποία είχαν παρατηρηθεί φαινόμενα ευτροφισμού.

Στην εργασία Loukas (2010) εφαρμόζεται ο συντελεστής συσχέτισης Spearman και αξιολογούνται τα αποτελέσματα με το t-test, με στόχο τον έλεγχο της ποιότητας των υδάτων του ποταμού Πηνειού ως προς την καταλληλότητά τους για πόσιμο και για αγροτική και αστική χρήση, σύμφωνα με τη διεθνή και ελληνική νομοθεσία.

Ανάλογες εργασίες έχουν γίνει και σε άλλους ποταμούς της Ελλάδας, όπως στον Κόσυνθο στη Θράκη (Pisinaras *et al.* 2007), στο Βοσβόζη (Boskidis *et al.* 2010) και στον Λίσσο, στη βόρεια Ελλάδα (Dimou *et al.* 2011).

Όπως αναφέρθηκε, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η εφαρμογή των Νευρωνικών Δικτύων σε υδρολογικά δεδομένα. Στην χώρα μας οι Lekkas *et al.* (2004) και Diamantopoulou *et al.* (2005) προσάρμοσαν Νευρωνικά μοντέλα για δεδομένα που ελήφθησαν από σταθμούς παρακολούθησης των υδάτων των ποταμών Πηνειού και Αξιού αντίστοιχα, με σκοπό την αξιολόγηση της ικανότητας πρόβλεψης, ενώ οι Diamantopoulou *et al.* (2007) χρησιμοποίησαν τα ίδια μοντέλα για συμπλήρωση ελλειπουσών παρατηρήσεων σε δεδομένα των ποταμών Αξιού και Στρυμόνα.

Ο ποταμός Νέστος, ο οποίος αποτελεί την περιοχή μελέτης της παρούσης διατριβής, είναι ένας διασυνοριακός ποταμός, από τους σημαντικότερους της Ελλάδας, καθώς είναι ο πέμπτος μεγαλύτερος της χώρας και κατά μήκος του έχουν γίνει σημαντικές ανθρωπογενείς παρεμβάσεις. Για όλους τους παραπάνω λόγους, ο ποταμός Νέστος παρουσιάζει εξαιρετικό ερευνητικό ενδιαφέρον, το οποίο ξεκίνησε από το τέλος της δεκαετίας του 1980 (Psilovikos *et al.* 1988, Psilovikos & Vavliakis 1989, Ψιλοβίκος και συν. 1999, Choleev & Baltakov 1989, Argiropoulos *et al.* 1994, Argiropoulos *et al.* 1996).

Από το έτος 2000 η τοποθέτηση τηλεμετρικών σταθμών παρακολούθησης υδρολογικών και μετεωρολογικών παραμέτρων κατά μήκος του ποταμού, έδωσε την δυνατότητα δημιουργίας βάσης δεδομένων (Psilovikos *et al.* 1999, Ψιλοβίκος και συν. 2004, Psilovikos *et al.* 2005), τα οποία οι ερευνητές χρησιμοποίησαν και χρησιμοποιούν για τη συστηματική παρακολούθηση του ποταμού.

Η πρώτη προσπάθεια στατιστικής ανάλυσης των δεδομένων έγινε το 2003 και αφορούσε μετρήσεις που καταγράφηκαν από το σταθμό που βρίσκεται στο Δέλτα του ποταμού (Psilovikos *et al.* 2003). Οι Psilovikos *et al.* (2006) εφάρμοσαν στατιστική ανάλυση σε πέντε παραμέτρους από τον ίδιο σταθμό παρακολούθησης, χρησιμοποιώντας ημερήσιες μετρήσεις για τα έτη 2000-2002. Για κάθε μια παράμετρο εκτίμησαν την τάση, βάσει του κριτηρίου Spearman και προσάρμοσαν διάφορα μοντέλα (γραμμικό, τετραγωνικό, λογαριθμικό, εκθετικό και υπερβολικό), τα οποία συνέκριναν μεταξύ τους με τέσσερα στατιστικά κριτήρια (ME, MSE, MAE, MAPE).

Στη συνέχεια, οι εργασίες που αναφέρονται στο monitoring του Νέστου, αφορούν σε όλο του το μήκος. Κατά την είσοδό του από τη Βουλγαρία (Ψιλοβίκος και συν. 1999), η ποιότητα και η ποσότητα των υδάτων ελέγχεται και συγκρίνεται με την αντίστοιχη της περιοχής του Δέλτα (Ψιλοβίκος και συν. 2004), βασιζόμενη στα δεδομένα δύο σταθμών (Psilovikos & Sentas 2009, Koutroumanidis *et al.* 2009), όπως επίσης και καπάντη του συστήματος των φραγμάτων της ενδοορεινής περιοχής, όπου έχουμε το Δέλτα του ποταμού (Sentas *et al.* 2008) και τη λιμνοθάλασσα του Αγιάσματος (Christoforidis *et al.* 2007, Margoni 2007, Margoni & Psilovikos 2010).

Περιοχή εξαιρετικού ενδιαφέροντος αποτελεί το φράγμα του Θησαυρού, που βρίσκεται στο μέσο ρου του ποταμού. Άρχισε να λειτουργεί το 1997, αποτελεί ένα από τα υψηλότερα γεωφράγματα της Ευρώπης και την πιο βαθιά λίμνη στον Ελλαδικό χώρο. Η δημιουργία και η εξέλιξη του ταμιευτήρα, με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της παρουσιάζουν ερευνητικό ενδιαφέρον. Από τους πρώτους οι οποίοι ασχολήθηκαν με το Θη-

σαυρό ήταν οι Moustaka - Gouni *et al.* (2000) και Ψιλοβίκος και συν. (2001), οι οποίοι μελέτησαν, για την περίοδο 1997-1999, την οριζόντια κατανομή της σύνθεσης των ειδών του φυτοπλαγκτού, όπως επίσης την περιοδικότητα και την κατανομή των θειοβακτηρίων στην υδάτινη στήλη. Το 2001 οι Albanakis *et al.* αναλύοντας τις τιμές έξι παραμέτρων, διαπίστωσαν ισχυρή στρωμάτωση της υδάτινης στήλης και χειμερινή αναστροφή των υδάτων, μια φορά το χρόνο – μονομικτική λίμνη - με αποτέλεσμα τη δημιουργία ανοξικών συνθηκών στο υπολίμνιο. Η παρακολούθηση των υδάτων της λίμνης κρίνεται απαραίτητη για την αειφορική διαχείριση της περιοχής και ολόκληρου του ποταμού (Anastassopoulos 2006, Sentas & Psilovikos 2010, Sentas & Psilovikos 2012).

Άλλοι ερευνητές έχουν προσεγγίσει τον ποταμό Νέστο, από διαφορετική ερευνητική σκοπιά, όπως οι Myloroulos *et al.* (2008) οι οποίοι προτείνουν διαχειριστικές μεθόδους για διασυνοριακούς ποταμούς, χρησιμοποιώντας κατάλληλη μεθοδολογία. Επίσης οι Skoulikaris *et al.* (2009), μελετούν τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στη ροή του ποταμού. Τέλος, οι Boskidis *et al.* (2008, 2012) αναλύουν παρατηρήσεις που αναφέρονται σε μετρήσεις υπόγειων υδάτων στον κάτω ρου του ποταμού, χρησιμοποιώντας μοντέλα SWAT.

Όπως αναφέρθηκε ο Νέστος είναι ένας διασυνοριακός ποταμός, το μεγαλύτερο μέρος του οποίου διασχίζει τη γειτονική Βουλγαρία, από όπου και πηγάζει. Υπάρχει λοιπόν σημαντικό ενδιαφέρον και από τους εκεί επιστήμονες για την ορθολογική διαχείριση του ποταμού (Soufi *et al.* 2005, Uzunov *et al.* 2006a, Uzunov *et al.* 2006b, Nakova *et al.* 2009).

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή χρησιμοποιούνται ημερήσιες μετρήσεις για την περίοδο 2004-2008, που αφορούν ποιοτικές και ποσοτικές παραμέτρους του ποταμού Νέστου. Οι μετρήσεις αυτές έχουν ληφθεί σε όλο το μήκος του ποταμού. Αμέσως με τα Ελληνοβουλγαρικά σύνορα υπάρχουν παρατηρήσεις καθ' ότι ενδιαφέρει η ποιότητα και η ποσότητα των υδάτων που εισέρχονται στη χώρα. Επίσης στην ενδοορεινή κοιλάδα, όπου υπάρχει το σύστημα των φραγμάτων, το οποίο έχει μετατρέψει το μεγαλύτερο τμήμα του ποταμού από ποτάμιο σε λιμναίο, ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα χαρακτηριστικά και ο τρόπος λειτουργίας του ταμιευτήρα, όπως και η ποιότητα των υδάτων της, με τα οποία τροφοδοτεί τα κατάντη του ποταμού. Τέλος στο Δέλτα του ποταμού, περιοχή προστατευμένη από τη συνθήκη RAMSAR, πλούσια σε χλωρίδα και πανίδα, η οποία όμως δέχεται τις πιέσεις όλου του συστήματος, ενδιαφέρει η διατήρηση και η μη αλλοίωση των χαρακτηριστικών της.

Η ιδιαιτερότητα των παρατηρήσεων αυτών είναι ότι απεικονίζουν τη μεταβλητότητα της κάθε παραμέτρου σε μικρά χρονικά διαστήματα (ανά 24 ώρες) και παρουσιάζουν δυσκολία ως προς την ανάλυσή τους. Με έλεγχο τάσης, σύγκριση κατανομών, εκτίμηση συσχετίσεων, προσαρμογή στοχαστικών μοντέλων και τέλος χρήση των μοντέλων αυτών για πρόβλεψη, γίνεται προσπάθεια εξήγησης και μελέτης των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της κάθε παραμέτρου.

Σκοπός της παρούσης διδακτορικής διατριβής είναι η ανάλυση των παραπάνω δεδομένων που προέρχονται από διαφορετικές θέσεις κατά μήκος του ποταμού, για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων που βοηθούν στην αειφόρο διαχείριση των υδάτων του ποταμού. Έτσι θα μπορούσε να δημιουργηθεί ένα σύστημα συναγερμού, ανάλογο με τις ιδιαιτερότητες της κάθε περιοχής, ώστε να αποφεύγονται ακραία φαινόμενα που αφορούν τόσο την ποσότητα του νερού (πλημμύρες), όσο και την ποιότητα (ρύπανση).

Αναλυτικότερα οι επιμέρους στόχοι είναι:

- α) Αξιολόγηση και αποτίμηση της κατάστασης του ποταμού μετά τις εκτεταμένες ανθρωπογενείς μεταβολές που προέκυψαν λόγω της κατασκευής και λειτουργίας των μεγάλων φραγμάτων Θησαυρού – Πλατανόβρυσης μεταξύ των ετών 1997 και 2000.
- β) Αξιολόγηση της πληροφορίας με την ανάλυση των χρονοσειρών ποιότητας – ποσότητας του νερού και εντοπισμός ακραίων συνθηκών και περιπτώσεων που χρήζουν συναγερμού (πλημμύρες, ρύπανση κ.α.).
- γ) Αποτίμηση της κατάστασης (ποιότητας – ποσότητας) και διερεύνηση του κατά πόσο το ποτάμιο σύστημα του Νέστου επανήλθε σε ισορροπία μετά τις μεγάλες ανθρωπογενείς επεμβάσεις.
- δ) Αξιολόγηση και αποτίμηση του ταμιευτήρα του Θησαυρού, αναλύοντας δεδομένα που προέρχονται από διαφορετικά βάθη και έλεγχος της δυνατότητας κατάργησης των αισθητήρων στα μεγαλύτερα βάθη.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 Εισαγωγή

Ο ποταμός Νέστος αποτελεί την περιοχή μελέτης της παρούσης διδακτορικής διατριβής. Οι ποιοτικές και ποσοτικές παράμετροι του νερού για τις οποίες υπάρχουν μετρήσεις και οι οποίες αναλύονται είναι: α) η στάθμη νερού (H - cm), β) η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC_w - μS/cm), γ) η ενεργός οξύτητα (pH), δ) η θερμοκρασία (T_w - °C), ε) η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου (DO - mg/l), στ) η αλατότητα (Sal - ‰) και ζ) το δυναμικό οξειδοαναγωγής (Redox Potential). Τις χημικές και φυσικοχημικές ιδιότητες των παραπάνω παραμέτρων αναλύουμε διεξοδικά.

Οι μετρήσεις των παραμέτρων αυτών, αποτελούν χρονικές σειρές στις οποίες αναζητούνται γραμμικές και μη γραμμικές δυναμικές, βρίσκονται συσχετίσεις, τάσεις, εποχικότητες, προσαρμόζονται γραμμικά και μη γραμμικά μοντέλα, μοντέλα μεταφοράς συνάρτησης και τέλος ελέγχονται ως προς την προσαρμογή τους σε διάφορες κατανομές. Η εφαρμογή της παραπάνω στατιστικής μεθοδολογίας σκοπό έχει την εξήγηση υδρολογικών φαινομένων, τον έλεγχο της ποιότητας των υδάτων, την ανάδειξη της αναγκαιότητας του συστήματος παρακολούθησης και γενικά την εξασφάλιση της αειφορικής διαχείρισης του ποταμού.

2.2 Περιοχή έρευνας - Ποταμός Νέστος

Η περιοχή Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης καθορίζεται από την ύπαρξη σημαντικών ορεινών όγκων που καταλήγουν στη θάλασσα του Βορείου Αιγαίου. Ανάμεσα στα βουνά έχουν δημιουργηθεί επιμήκεις κοιλάδες από τις οποίες άλλες είναι πιο πλατιές - όπως του Στρυμόνα στην περιοχή των Σερρών ή του Αγγίτη στην περιοχή της Δράμας - και άλλες πιο στενές, όπως του Νέστου. Ακόμη έχουν δημιουργηθεί και απόκρημνες χαραδρώσεις, όπως επίσης και ανατολικότερα, μικρότερες λεκάνες απορροής (Ψιλοβίκος 1990).

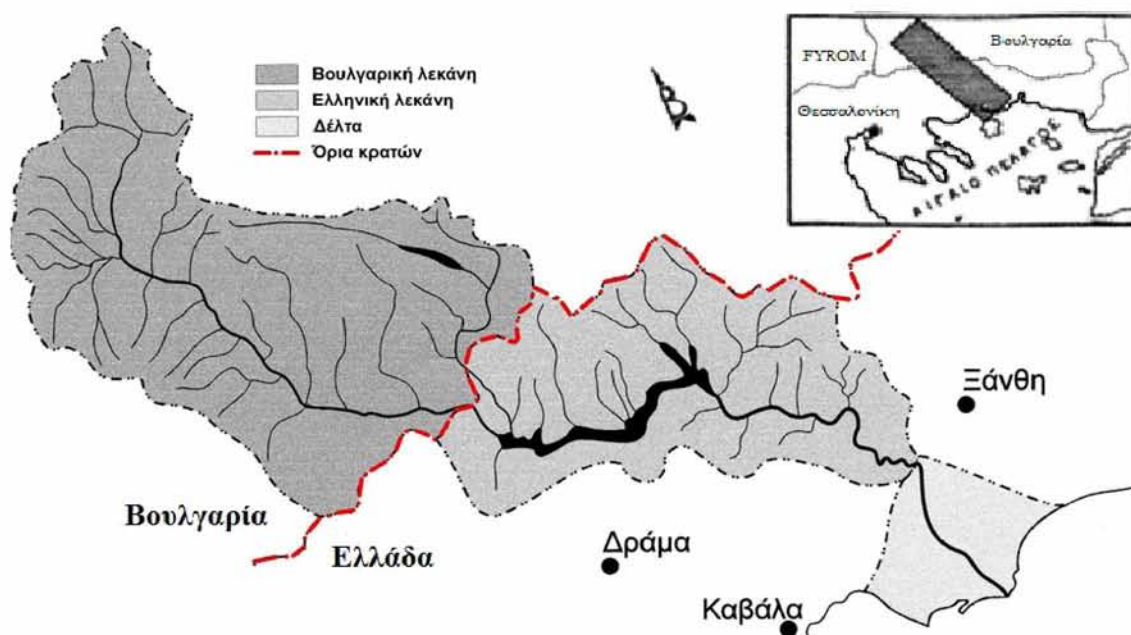
Ο ποταμός Νέστος είναι ένας από τους μεγαλύτερους ποταμούς της Ελλάδας, καθώς είναι ο πέμπτος σε μέγεθος λεκάνης απορροής. Συνιστά διασυνοριακό υδατικό πόρο στη Βαλκανική χερσόνησο, όπου μοιράζεται μεταξύ των χωρών Βουλγαρίας και Ελλάδας. Το ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον του ποταμού, καθώς επίσης και οι εκτεταμένες ανθρωπογενείς επεμβάσεις, οδήγησαν στη συστηματική παρακολούθηση των ποιοτικών και ποσοτικών παραμέτρων των υδάτων του, που αφορούν σε όλη το μήκος της ροής του.

Το όνομα του το οφείλει στην ελληνική μυθολογία κατά την οποία ο Νέστος ή Νέσσος γεννιέται στην αρχή του Χρόνου πριν ακόμη την ύπαρξη των ανθρώπων. Γεννήθηκε μαζί με 3000 ποταμούς και 3000 Νύμφες. Πατέρας του θεωρείται ο Ωκεανός και μητέρα του η Τηθύς. Ο Νέσσος υπήρξε θεός της Θράκης και πατέρας της Καλλιρρόης, σύμφωνα με τον Ησίοδο στη «Θεογονία». Ο Νέστος του Θουκυκίδη, του Ηρόδοτου, του Στράβωνα και του Πausανία, που όπως χαρακτηριστικά περιγράφουν, τα νερά του κρύβονται κάτω από παχιά ομίχλη, έγινε Mestus για τους Ρωμαίους και ως Μέστος αναφέρεται από την Άννα την Κομνηνή στην «Αλεξιάδα» (11ος αιώνας). Στη βουλγαρική γλώσσα ονομάζεται Μέστα, ονομασία που οφείλεται στη Σλαβική θηλυκή μορφή Μέστα (INAΛΕ 2010).

Ο ποταμός Νέστος πηγάζει από τα υψηλότερα βουνά της ανατολικής Ευρώπης, συγκεκριμένα από τα όρη Rila (2.925m) και Pirin-Planina (2.915m) στη νοτιοδυτική Βουλγαρία, εισέρχεται στην Ελλάδα στην περιοχή της ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης, διέρχεται από τα Θρακικά Τέμπε (Στενά Νέστου) και καταλήγει μέσω μιας εκτεταμένης πεδιάδας στο Θρακικό πέλαγος, απέναντι από τη νήσο Θάσο (Εικ. 2.1). Το συνολικό του μήκος είναι 234 km, από τα οποία τα 140 km περίπου βρίσκονται σε ελληνικό έδαφος (Psilovikos *et al.* 1988, Choleev & Baltakov 1989). Η συνολική λεκάνη απορροής υπολογίζεται περίπου σε 6.045 km², από τα οποία 3.317 km² δηλαδή το 61,27%, βρίσκεται σε βουλγαρικό έδαφος, ενώ το 38,73% (2.728 km²) σε ελληνικό έδαφος. Κατά την πορεία του διασχίζει βαθιές κοιλάδες, που έχει διανοίξει μέσα στα πετρώματα της Ροδόπης, σπουδαιότερες από τις οποίες είναι η Κλεισούρα στη Βουλγαρία και τα Θρακικά Τέμπε στην Ελλάδα. Κατά την έξοδο του από τη νότια ορεινή Ροδόπη, σχηματίζει μεγάλης έκτασης δελταϊκή πεδιάδα (615 km²), που οφείλεται στην απόθεση των φερτών υλικών (Psilovikos *et al.* 2006, Margoni & Psilovikos 2010). Η μέση ετήσια παροχή του ποταμού κυμαίνεται μεταξύ 32 και 48 m³/s ή σε τιμές απορροής 1,0–1,5x10⁹ m³/yr, ακόμη η μέση στερεοπαροχή ξεπερνά τα 1,8x10⁶ m³ φερτών υλών ανά έτος (Psilovikos *et al.* 1988, Choleev & Baltakov 1989, Πατρίκιος & Δρίτσα 2009), ενώ έχει σημειωθεί σοβαρή μείωση μετά την κατασκευή των φραγμάτων στο Θησαυρό και την Πλατανόβρυση.

Η λεκάνη απορροής του Νέστου στο ελληνικό έδαφος περιλαμβάνει εκτάσεις τριών νομών, των νομών Δράμας, Καβάλας και Ξάνθης. Ο ποταμός αποτελεί το γεωγραφικό όριο ανάμεσα στη Θράκη και τη Μακεδονία. Η διάσταση αυτή του Νέστου, ως γεωγραφικού ορίου, οφείλεται στην ύπαρξη βαθιών και πρακτικά αδιαπέραστων κοιλά-

δων σε μεγάλο μέρος της διαδρομής του. Ακόμη και σήμερα, η επικοινωνία μεταξύ της ανατολικής και της δυτικής όχθης, περιορίζεται σε συγκεκριμένα σημεία, οι θέσεις των οποίων εξαρτώνται από τη μορφολογία της κοίτης του ποταμού. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο Νέστος είχε οριστεί με τη συνθήκη του Βουκουρεστίου το 1913 ως συνοριακή γραμμή μεταξύ Ελλάδος – Βουλγαρίας.



Εικόνα 2.1: Η λεκάνη απορροής του ποταμού Νέστου στο Ελληνικό και Βουλγάρικο έδαφος και το δέλτα του ποταμού.

Λόγω του φυσικού περιβάλλοντος ο ποταμός Νέστος, από τις πηγές μέχρι τις εκβολές του, καλύπτεται κυρίως από δασικές ή χορτολιβαδικές εκτάσεις (75,41%), ενώ η γεωργία καταλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος του υπόλοιπου χώρου που αντιστοιχεί στο 20,3%. Στην Ελλάδα οι γεωργικές εκτάσεις βρίσκονται κυρίως στο Δέλτα του ποταμού, ενώ κατά μήκος της θάλασσας του Αιγαίου, κοντά στις εκβολές του, συναντώνται αλμυρά έλη και παράκτιες λιμνοθάλασσες (1,3%) (Gerakis & Kalburtji 1998).

Στο υδατικό οικοσύστημα του Νέστου (ποταμός, παραπόταμοι, ταμιευτήρες και λιμνοθάλασσες) έχουν βρεθεί συνολικά 37 είδη ιχθυοπανίδας. Από τα 20 είδη που ζουν στο ποτάμι, τους παραποτάμους και τους ταμιευτήρες, τα 10 είδη είναι εισαγόμενα στο οικοσύστημα. Τα περισσότερα αυτόχθονα είδη ανήκουν στην οικογένεια των Κυπρινοειδών. Στα ρέοντα ύδατα (παραπόταμοι και κυρίως ποτάμι) κυριαρχεί το Τυλινάρι (*Squalius orpheus*) και η Μπριάνα (*Barbus strumicae*), με εξάπλωση σε όλο το μήκος

του ποταμού στο ελληνικό έδαφος. Σε μικρότερα ποσοστά εμφανίζονται, το Τσιρονάκι (*Alburnoides strymonicus*), η Θρακοβελονίτσα (*Cobitis strumicae*), η Μουρμουρίτσα (*Rhodeus amarus*) και ο Σύρτης (*Chondrostoma vardarensis*). Άλλα είδη που διαβιούν στο οικοσύστημα είναι η Άγρια Πέστροφα (*Salmo macedonicus*), που χρήζει αυστηρής προστασίας καθώς οι πληθυσμοί της δέχονται πίεση από την παράνομη αλιεία, τα εμπόδια στη μετακίνηση, τη ρύπανση και την υποβάθμιση των οικοτόπων της. Το Γυφτόψαρο (*Gobius bulgaricus*) και το Πετροχείλι (*Oxynoemacheilus bureschi*) είναι ακόμη δύο είδη ψαριών που απαντώνται στο Νέστο και χρήζουν προστασίας λόγω της καταστροφής των οικοτόπων τους (Economidis *et al.* 2009, Apostolou *et al.* 2010, I-NAAE 2010).

Ο Νέστος μέχρι τα μέσα του 20^{ου} αιώνα λειτούργησε ως φυσικό ποτάμιο σύστημα με εξαιρετικά περιβαλλοντικά στοιχεία. Έκτοτε δέχθηκε σειρά ανθρωπογενών επεμβάσεων, οι οποίες μπορούν να διακριθούν σε δύο χρονικές περιόδους, με βάση αναπτυξιακούς στόχους (Ψιλοβίκος και συν. 2002):

Πρώτη περίοδος. Αφορά επεμβάσεις που έγιναν στη δελταϊκή πεδιάδα του Νέστου με σκοπό να μετατραπεί αυτή από ένα πολύπλοκο υγροτοπικό σύστημα, σε ένα οργανωμένο αγροτικό σύστημα. Αρχικά περιελάμβανε την κατασκευή αντιπλημμυρικών και στραγγιστικών έργων (τεχνητή κοίτη Νέστου, τάφρους στράγγισης, διευθετήσεις κοιτών διασποράς κ.ά.) και στη συνέχεια την κατασκευή αρδευτικών δικτύων για την άρδευση των γόνιμων εκτάσεων της πεδιάδας (Psilovikos & Vavliakis 1989). Παρά τις μεγάλης κλίμακας επεμβάσεις στη δελταϊκή πεδιάδα και την καταστροφή του δάσους «Κοτζά Ορμάν» η περιοχή διατήρησε ορισμένα σημαντικά περιβαλλοντικά στοιχεία, τα οποία και τη βοήθησαν να ενταχθεί στη Σύμβαση του Ramsar (1971-72) ως διεθνούς σημασίας υγροτοπικό σύστημα.

Δεύτερη περίοδος. Αφορά επεμβάσεις που έγιναν στο χώρο της ενδοορεινής κοιλάδας και λεκάνης του Νέστου προκειμένου να αξιοποιηθεί το υδατικό της δυναμικό για την παραγωγή ενέργειας, την αντιπλημμυρική προστασία της δελταϊκής πεδιάδας, την άρδευση των καλλιεργειών της και την υποστήριξη του υγροτοπικού της περιβάλλοντος. Τα έργα αυτά είναι οι φραγματογενείς λίμνες (dam-lakes, φραγμαλίμνες¹) του *Θησαυρού*, της Πλατανόβρυσης και του *Τεμένους* (υπό κατασκευή αναρρυθμιστικό έργο κατάντη της Πλατανόβρυσης), τα οποία κατασκευάστηκαν και λειτούργησαν από τη

¹ Ο όρος «φραγμαλίμνη» χρησιμοποιείται κυρίως από τους βιολόγους και ισοδυναμεί με τον όρο «ταμιευτήρας» ή «τεχνητή λίμνη» που χρησιμοποιούν οι γεωεπιστήμονες και οι μηχανικοί.

Δ.Ε.Η. σχετικά πρόσφατα (1997-2000) και δέχτηκαν κριτική από επιστήμονες και φορείς που ασχολούνται με το περιβάλλον για πιθανές δυσμενείς επιπτώσεις τους στο φυσικό περιβάλλον.

Η παρακολούθηση των υδάτων σε όλο το μήκος του ποταμού παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Κατά την είσοδο τους από τη Βουλγαρία κρίνεται αναγκαία για τον έλεγχο της ποιοτικής και ποσοτικής τους κατάστασης, για την αποφυγή πλημμυρικών φαινομένων και φαινομένων ρύπανσης.

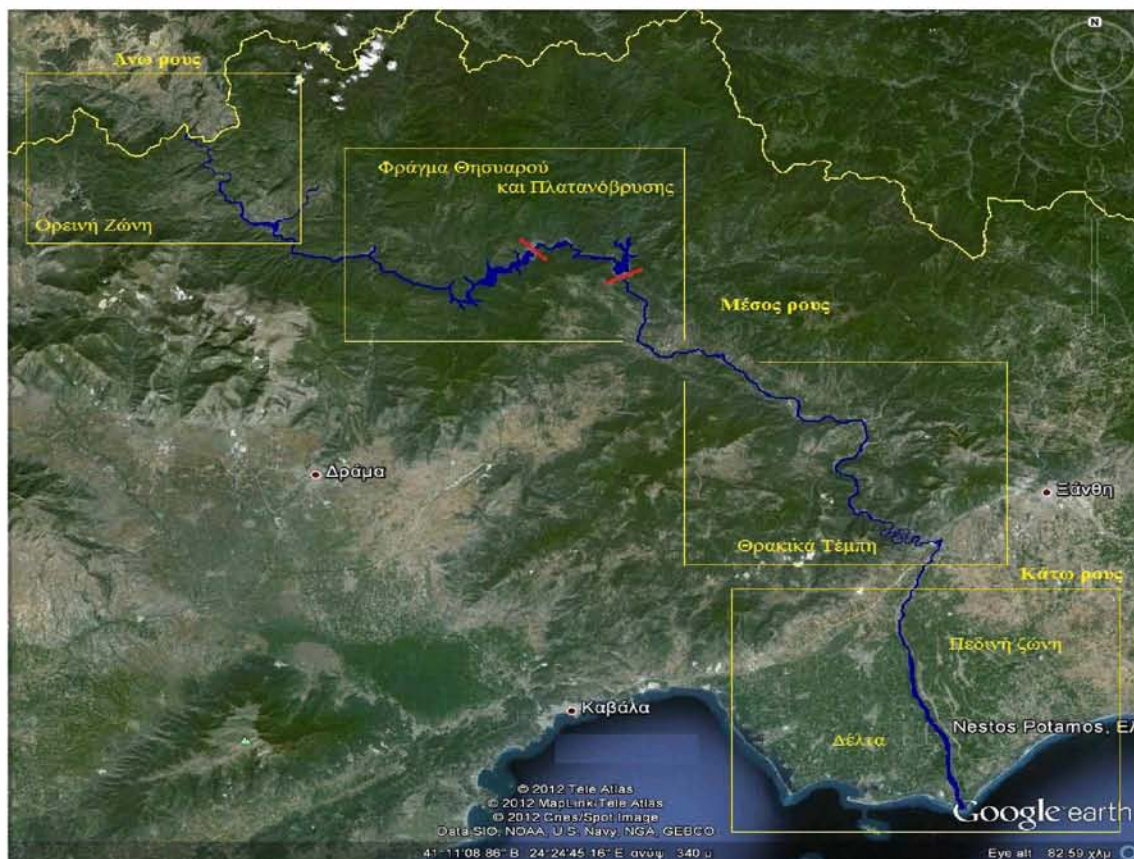
Η κατασκευή των φραγμάτων (Θησαυρού και Πλατανόβρυσης) στην ενδοορεινή περιοχή, έχει επιφέρει σημαντικές περιβαλλοντικές αλλαγές στο ρου του ποταμού και τους οργανισμούς που ζουν σε αυτόν, καθώς το μεγαλύτερο τμήμα του μετατράπηκε από ποτάμιο σε λιμναίο. Η αξιοποίηση των μετρήσεων των παραμέτρων των υδάτων της τεχνητής λίμνης του Θησαυρού, το βάθος της οποίας φτάνει περίπου τα 140 μέτρα, γεγονός που την καθιστά την πιο βαθιά λίμνη στον Ελλαδικό χώρο, αποκτά ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τον εντοπισμό και τη διερεύνηση σημαντικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στην υδάτινη στήλη.

Η οικολογική σημασία του Δέλτα του ποταμού είναι τεράστια, καθώς δημιουργούνται βιότοποι όλων των τύπων (λιμνοθάλασσες, γλυκόβαλτοι, καλαμιώνες, αμμοθίνες κ.ά.) και αποτελεί προστατευόμενη περιοχή (ΙΝΑΛΕ 2010). Η στατιστική ανάλυση των μετρήσεων που αναφέρονται στο Δέλτα του ποταμού αξιολογεί την κατάληξη των υδάτων, κατόπιν των φραγμάτων ώστε να έχουμε μια ολοκληρωμένη εικόνα της κατάστασης του ποταμού.

Ο Νέστος καθώς διατρέχει τον ελλαδικό χώρο, συμβάλλει με φυσικές διεργασίες στη δημιουργία περιοχών και οικοτόπων με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Ταυτόχρονα, η ανθρώπινη παρέμβαση συμβάλλει στην ανάπτυξη οικισμών, αγροτικών εκτάσεων και έργων μεγάλης κλίμακας όπως γέφυρες, φράγματα κ.ά. Με κριτήριο τη μορφολογία του ποταμού και τις ανθρώπινες παρεμβάσεις, που καθόρισαν και τις περιοχές μελέτης στην παρούσα διατριβή, ο ποταμός χωρίζεται σε τρεις γεωγραφικές ενότητες (Εικ. 2.2).

1) Άνω ρους - Ορεινή ζώνη: στην ενότητα αυτή περιλαμβάνεται το τμήμα του ποταμού από τα ελληνοβουλγαρικά σύνορα μέχρι τη συμβολή του Νέστου με τον ποταμό Δοσπάτη. Αποτελεί την ορεινή ενότητα στο βορειοανατολικό τμήμα της λεκάνης απορροής και ανήκει στο σύνολο της στο νομό Δράμας.

2) Μέσος ρους - Ενδοορεινή κοιλάδα: Η ζώνη αφορά σε περιοχές και των τριών νομών (Δράμας, Καβάλας, Ξάνθης) και καταλήγει στο σχηματισμό των στενών του



Εικόνα 2.2: Οι τρεις γεωγραφικές ενότητες στις οποίες χωρίζεται ο ποταμός: α) Άνω ρους - Ορεινή ζώνη, β) Μέσος ρους - Ενδοορεινή κοιλάδα και γ) Κάτω ρους - Πεδινή ζώνη - Δέλτα. Στην εικόνα διακρίνεται ο χωρισμός της Ενδοορεινής κοιλάδας στην περιοχή των υδροηλεκτρικών φραγμάτων και στα Θρακικά Τέμνη (Geo Strategy 2010).

Νέστου, γνωστά και ως Θρακικά Τέμνη. Είναι ίσως η πλέον ανομοιογενής από αυτές που ορίσαμε, καθώς περιλαμβάνει πλατιές κοιλάδες με πεδινές αγροτικές εκτάσεις, ορεινές περιοχές, οικισμούς στις υπώρειες της Ροδόπης, όπως επίσης και τα δύο μεγάλα φράγματα του Θησαυρού και της Πλατανόβρυσης. Αποτελεί τη μεγαλύτερη περιοχή από όλες και μπορεί να χωριστεί σε δύο υποπεριοχές:

α) στην περιοχή των υδροηλεκτρικών φραγμάτων η οποία ξεκινά από τη συμβολή Νέστου – Δοσπάτη και φτάνει μέχρι το φράγμα του Τεμένους. Εδώ συναντάμε τις πλημμυρισμένες εκτάσεις (λιμνοποτάμιες – υδροτοπικές περιοχές), εξαιτίας του συστήματος των φραγμάτων Θησαυρού και Πλατανόβρυσης και

β) στην περιοχή από το φράγμα του Τεμένους έως τα στενά του Νέστου – Θρακικά Τέμνη. Εδώ συναντάμε αφενός μεν τη σχετικά πλατιά κοιλάδα ανάμεσα στους οικισμούς Παρανέστι και Σταυρούπολη και αφετέρου τα Θρακικά Τέμνη, που είναι ένας

γεωλογικός σχηματισμός με απόκρημνα πρηνή και μαιανδρική μορφή, ο οποίος αποτελεί το πιο αναγνωρισμένο τμήμα του ποταμού.

3) Κάτω ρους - Πεδινή ζώνη - Δέλτα: Αποτελεί την κατάληξη του κύριου κλάδου του ποταμού στη θάλασσα. Ιδιαίτερα πλούσια περιοχή σε χλωρίδα και πανίδα, με τεράστια οικολογική σημασία για τα Βαλκάνια.

Οι γεωγραφικές ενότητες που ορίστηκαν, παρουσιάζουν αξιόλογες διαφορές και ιδιαίτερο ενδιαφέρον, γι' αυτό και θα τις αναπτύσσονται παρακάτω εκτενέστερα.

2.2.1 Άνω ρους - Ορεινή Ζώνη

Στην ορεινή ζώνη περιλαμβάνεται το τμήμα του ποταμού από τα ελληνοβουλγαρικά σύνορα μέχρι τη συμβολή του Νέστου με το Δοσπάτη. Ο ποταμός διατρέχει βαθιές ορεινές κοιλάδες με απότομες κλίσεις πρηνών, με εξαίρεση την πλατιά κοιλάδα στην περιοχή των οικισμών Ποταμοί και Πέρασμα, όπου παλαιότερα βρίσκονταν και οι πιο αποδοτικές γεωργικές εκμεταλλεύσεις. Οι ανθρώπινες παραγωγικές δραστηριότητες στην περιοχή αυτή, περιορίζονται στη γεωργία, την κτηνοτροφία και την υλοτομία. Λόγω της εγκατάλειψης των περιοχών από τους κατοίκους τους, η κτηνοτροφία είναι περιορισμένη, αν και παρατηρούνται φαινόμενα υπερβόσκησης στους υφιστάμενους βοσκότοπους. Η υλοτομία γίνεται με ήπιες μεθόδους, λόγω περιορισμών που τίθενται από το φυσικό ανάγλυφο και τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή αυτή, με αποτέλεσμα η δραστηριότητα να περιορίζεται σε ορισμένους μήνες το χρόνο (Πατρίκιος & Δρίτσα 2009).

Το οικοσύστημα που αναπτύσσεται στην ευρύτερη περιοχή είναι ορεινού τύπου. Στην οροσειρά της Ροδόπης συναντάται μεγάλη ποικιλία δασικών ειδών, όπως η Πεύκη, η ελάτη και η οξιά. Βόρεια του οικισμού Ποταμοί βρίσκεται ένα συμπαγές και εκτεταμένο δάσος σημύδας, ενώ βόρεια του Σιδηρόνερου βρίσκεται το δάσος της Ελατιάς (Ερυθρελάτη). Πάνω από υψόμετρο 1500m απαντάται ελάχιστη δενδρώδης βλάστηση. Με το λιώσιμο των χιονιών δημιουργούνται λιβάδια στα οποία παρατηρείται έντονη κτηνοτροφική δραστηριότητα. Ιστορικές μαρτυρίες αναφέρουν την ύπαρξη βοσκότοπων και στις γύρω ορεινές περιοχές, πριν το Β' Παγκόσμιο Πόλεμο. Με την εγκατάλειψη όμως τόσο της κτηνοτροφικής δραστηριότητας όσο και των ορεινών οικισμών, οι βοσκότοποι δασώθηκαν παρουσιάζοντας τη σημερινή εικόνα.

Στην πανίδα της περιοχής ανήκουν κυρίως άγρια ζώα, όπως η αρκούδα, ο λύκος, το τσακάλι, ο αγριόγατος, η αλεπού, το ελάφι, το αγριογούρουνο, το ζαρκάδι και ο αγριό-

γιδος, ενώ βέβαια στις δασικές εκτάσεις φιλοξενείται και πλήθος άλλων μικρότερων ειδών. Αντίστοιχα σημαντική είναι και η παρουσία της ορνιθοπανίδας, με σημαντικότερους εκπροσώπους τους αετούς και τα γερακοειδή, ενώ έχει αναφερθεί και η παρουσία του γύπα.

2.2.2 Μέσος ρους - Ενδοορεινή κοιλάδα

Όπως προαναφέραμε, η ενδοορεινή ζώνη περιλαμβάνει εδάφη των νομών Δράμας, Καβάλας και Ξάνθης. Είναι η μεγαλύτερη από τις τρεις ζώνες και χωρίζεται σε δύο υποπεριοχές: στη λιμνοποτάμια - υδροτοπική, η οποία περιλαμβάνει τις πλημμυρισμένες περιοχές των φραγμάτων και το υπόλοιπο τμήμα του ποταμού από το φράγμα του Τεμένους έως τα Θρακικά Τέμπη.

Το σύστημα φραγμάτων, κατασκευάστηκε από τη Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ) και σκοπός της κατασκευής τους ήταν η προστασία των αγροτικών καλλιεργειών από πλημμυρικά φαινόμενα, καθώς επίσης και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών της ευρείας περιοχής. Τα δύο μεγαλύτερα φράγματα (Θησαυρός και Πλατανόβρυση) κατασκευάστηκαν για να καλύψουν τις αυξημένες ανάγκες σε ηλεκτρικό ρεύμα, ενώ το φράγμα του Τεμένους σχεδιάστηκε για να αποθηκεύει το νερό κατάντη των δύο φραγμάτων, να καλύπτει τις καθημερινές ανάγκες άρδευσης της περιοχής και να λειτουργεί αναρρυθμιστικά τόσο ως προς την ποσότητα του νερού, όσο και ως προς τη θερμοκρασία (Ψιλοβίκος 1999).

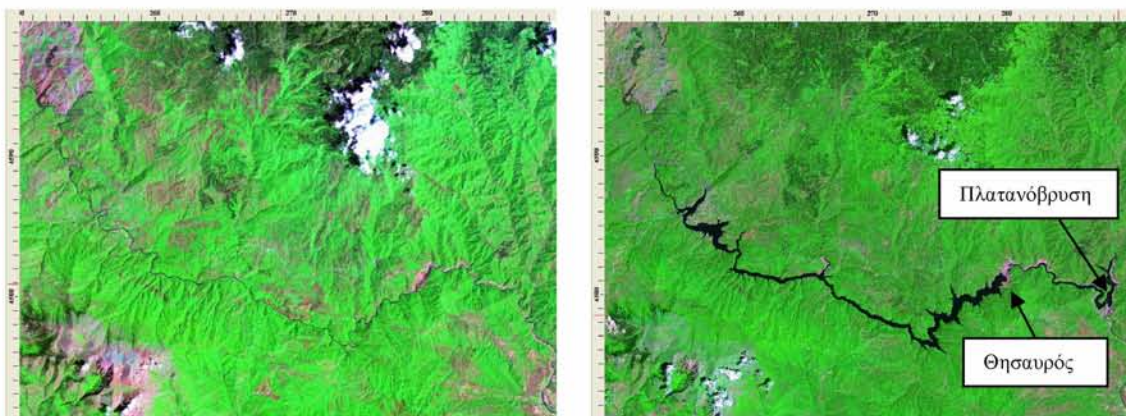
Συνεχίζοντας ο ποταμός σχηματίζει κοιλάδα στην οποία παρατηρείται συγκέντρωση πληθυσμού, με σημαντικότερους οικισμούς τη Σταυρούπολη στο νομό Ξάνθης, το Παρανέστι στο νομό Δράμας και τη Λεκάνη στο νομό Καβάλας. Σε αυτούς τους τρεις οικισμούς συγκεντρώνεται το σύνολο των κοινωνικών και διοικητικών υποδομών της περιοχής. Στο νότιο άκρο της κοιλάδας συναντάμε τα Θρακικά Τέμπη, όπου κυριαρχούν οι έντονοι μαιανδρικοί σχηματισμοί, το εντυπωσιακό ανάγλυφο με τις απόκρημνες βραχώδεις περιοχές και τα σπήλαια (Psilovikos & Vavliakis 1989).

2.2.2.1 Υδροηλεκτρικά φράγματα Θησαυρού και Πλατανόβρυσης

Το κυριότερο χαρακτηριστικό της περιοχής αυτής, είναι τα αποτελέσματα της ανθρώπινης παρέμβασης, με την κατασκευή των δύο φραγμάτων, στο τέλος της δεκαετίας του '90 (Θησαυρός 1996-1997, Πλατανόβρυση 1998-1999). Οι γεωγραφικές θέσεις τους βρίσκονται στα βόρεια- βορειοανατολικά του Παρανεστίου, απ' όπου υπάρχει και

η προσφορότερη οδική πρόσβαση. Πριν από την κατασκευή των φραγμάτων ο ποταμός αναπτυσσόταν σε υψόμετρο 250 – 300m. Μετά την κατασκευή των φραγμάτων, πέρα από τις τεχνητές λίμνες που δημιουργήθηκαν, έχει πλημμυρίσει μια ευρύτερη ζώνη μήκους περίπου 50 km και μέσου πλάτους 250m (το μέγιστο πλάτος ξεπερνά κατά τόπους τα 400m), ενώ η μέση στάθμη των υδάτων ακολουθεί την ισοϋψή καμπύλη των 360m (Albanakis *et al.* 2001, Sentas & Psilovikos 2010).

Το γεγονός αυτό έχει οδηγήσει σε σημαντικές περιβαλλοντικές αλλαγές στο ποτάμι και τους οργανισμούς που ζουν σε αυτό, καθώς το μεγαλύτερο τμήμα του Νέστου στην Ελλάδα μετατράπηκε από ποτάμιο σε λιμναίο (Εικ. 2.3). Οικισμοί μετατράπηκαν σε παραλίμνιους (Πέρασμα), ενώ υπήρξε και σημαντική μείωση των καλλιεργήσιμων εκτάσεων. Πέραν αυτών και άλλες κατασκευές που υπάρχουν κατά μήκος του Νέστου και των παραποτάμων του (π.χ. αρδευτικό φράγμα Τοξοτών, μικρά υδροηλεκτρικά έργα) λειτουργούν ως εμπόδια της μετακίνησης της ιχθυοπανίδας.



Εικόνα 2.3: Ο ποταμός Νέστος πριν (1990) και μετά (2000) την κατασκευή των δύο φραγμάτων του Θησαυρού και της Πλατανόβρυσης. Διακρίνονται οι πλημμυρισμένες περιοχές που δημιουργήθηκαν μετά την ανθρώπινη παρέμβαση (Ψιλοβίκος 2005).

Στην ιχθυοπανίδα της περιοχής κυριαρχεί το Τσιρώνι (*Rutilus rutilus*) και η Πέρκα (*Perca fluviatilis*), είδη τα οποία εγκαταστάθηκαν σταδιακά στους ταμειυτήρες με την αλλαγή του ποτάμιου περιβάλλοντος σε λιμναίο, όπως προαναφέραμε. Επίσης, μικρά ποσοστά εμφανίζουν το Τυλινάρι, ο Σύρτης και η Μπριάνα (Apostolou *et al.* 2010, I-NAΛΕ 2010).

Το φράγμα του Θησαυρού (Εικ. 2.4), ένα ψηλό χωμάτινο φράγμα (λιθόρριπτο) με αδιαπέραστο αργιλικό πυρήνα, άρχισε να λειτουργεί το 1997. Το ύψος του φτάνει τα 175m, γεγονός που το καθιστά ένα από τα υψηλότερα γεωφράγματα της Ευρώπης. Η

επιφάνεια του ταμιευτήρα είναι 18 km^2 , ενώ η μέγιστη χρήσιμη ικανότητα αποθήκευσης νερού, είναι της τάξης των $700 \times 10^6 \text{ m}^3$. Το βάθος της λίμνης φτάνει περίπου τα 140 m , πράγμα που την καθιστά την πιο βαθιά λίμνη στον Ελλαδικό χώρο. Η λεκάνη απορροής του ποταμού Νέστου στη θέση του Θησαυρού είναι 3.698 km^2 για τη ροή του ποταμού και 4.263 km^2 για τα πλημμυρικά φαινόμενα του ποταμού (Anastassopoulos 2006).



Εικόνα 2.4: Το φράγμα του Θησαυρού και οι πλημμυρισμένες εκτάσεις, μέρος της τεχνητής λίμνης που δημιουργείται από το φράγμα της Πλατανόβρυσης και η τοποθεσία του φράγματος του Τεμένους.

Ο κύριος σκοπός του φράγματος είναι η παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι έχει κατασκευαστεί υδροηλεκτρικό εργοστάσιο, το οποίο είναι εγκατεστημένο στο δεξιό αντρείσμα σε βάθος 400 m . Λειτουργούν τρεις μονάδες των 100 MW η καθεμία και η παραγόμενη ετήσια ενέργεια είναι περίπου 400 GWh .

Το φράγμα της Πλατανόβρυσης επιλέχθηκε να κατασκευαστεί στο στενότερο σημείο της κοιλάδας, έτσι ώστε να μειωθεί το μήκος του και να γίνει εφικτή η κατασκευή του από σκυρόδεμα (σε αντίθεση με αυτό του Θησαυρού). Βρίσκεται περίπου $7,5 \text{ km}$ σε ευθεία γραμμή (12 οδικά χιλιόμετρα) κατάντη και νοτιοανατολικά του Θησαυρού, άρχισε να λειτουργεί το 1999, η επιφάνεια του ταμιευτήρα είναι $3,25 \text{ km}^2$ και η τεχνητή λίμνη που δημιουργείται συγκρατεί ποσότητα νερού της τάξης των $90 \times 10^6 \text{ m}^3$. Η ετήσια παραγόμενη ενέργεια είναι περίπου 150 GWh .

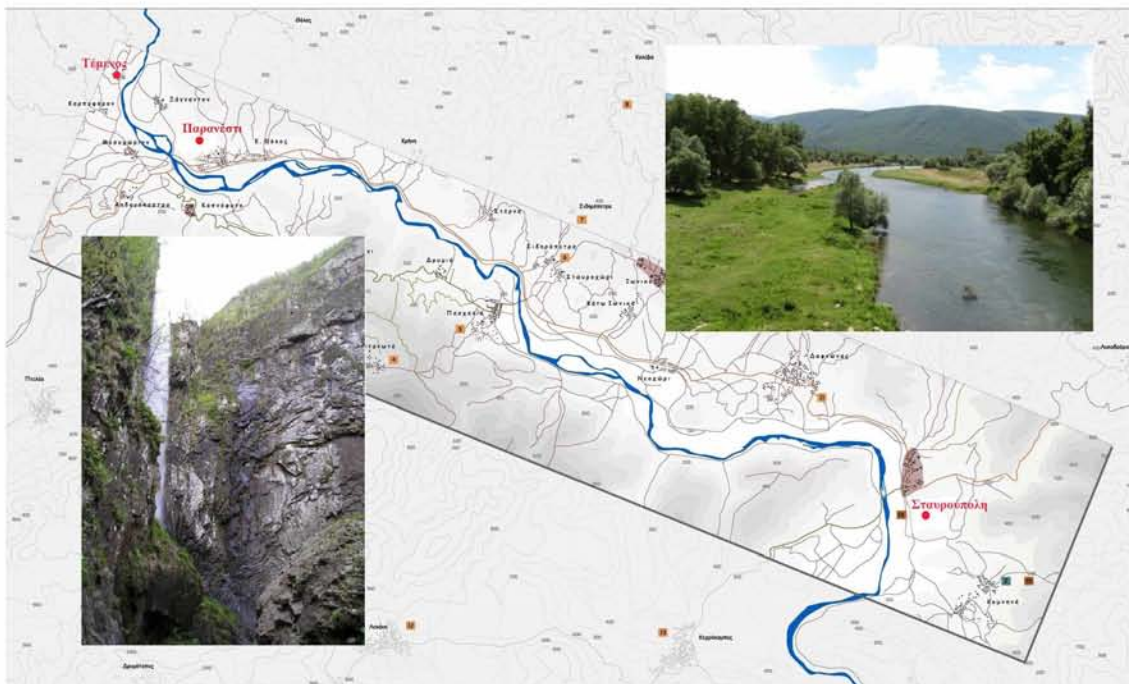
Για την αποτελεσματική λειτουργία των φραγμάτων έχει υπάρξει διακρατική συμφωνία με τη Βουλγαρία, η οποία ανέλαβε την υποχρέωση να επιτρέπει την παροχέτευση τουλάχιστον του 29% των υδάτων του ποταμού στο ελληνικό έδαφος. Τα δύο φράγματα λειτουργούν συμπληρωματικά ως ενιαίο σύστημα. Συγκεκριμένα, πέρα από τη δυνατότητα επανάχρησης των υδάτων που απελευθερώνονται από το φράγμα Θησαυρού, υπάρχει δυνατότητα άντλησης του νερού από την τεχνητή λίμνη της Πλατανόβρυσης σε αυτή του Θησαυρού, διαδικασία που γίνεται συνήθως κατά τη διάρκεια της νύχτας (μειωμένη ζήτηση) και επαναλαμβάνεται κάθε 24ωρο. Η συνολική ηλεκτροπαραγωγός ισχύς των φραγμάτων φτάνει τα 550 MW.

Οι συνέπειες στο φυσικό περιβάλλον από την κατασκευή και λειτουργία των φραγμάτων συνίστανται κυρίως στη μεγάλη αλλαγή του τοπίου που οφείλεται στο πλημμύρισμα των περιοχών και τη δημιουργία των τεχνητών λιμνών. Άμεσες συνέπειες του παραπάνω γεγονότος είναι η εξαφάνιση κάποιων σημαντικών ορεινών παραποτάμιων βιοτόπων και γεωργικών εκτάσεων. Επίσης, έχουν διαταραχθεί σε σημαντικό βαθμό οι συνθήκες φωλιάσματος και τροφοληψίας, τόσο για τα ζώα όσο και για τα πουλιά, καθώς έχουν εκλείψει οι ομαλές γραμμικές ζώνες των παραποτάμιων εκτάσεων. Στο οικοσύστημα του Δέλτα του ποταμού δεν φαίνεται να υπάρχουν σημαντικές συνέπειες από την ύπαρξη των συγκεκριμένων φραγμάτων, καθώς δεν δεσμεύονται ύδατα για αρδευτικούς σκοπούς. Υπάρχει όμως, σε κάθε περίπτωση, συγκράτηση φερτών υλών, που αλλάζει τη σύσταση των υδάτων (Apostolou *et al.* 2010) και προκαλεί έντονα φαινόμενα διάβρωσης στην παράκτια ζώνη.

2.2.2.2 Στενά Νέστου – Θρακικά Τέμπερη

Καθώς ο ποταμός συνεχίζει τη διαδρομή του κατάντη του συστήματος φραγμάτων και πριν φτάσει στα Θρακικά Τέμπερη, σχηματίζεται επιμήκης πλατιά κοιλάδα, ανάμεσα στους οικισμούς Παρανεστίου και Σταυρούπολης (Εικ. 2.5). Η κοιλάδα αναπτύσσεται παράλληλα με το ρου του ποταμού, από βορειοδυτικά προς νοτιοανατολικά σε μήκος περίπου 15 km. Οριοθετείται βόρεια από τις πλαγιές της Ροδόπης, νοτιοδυτικά από τα όρη της Λεκάνης και νοτιοανατολικά από τον ιδιαίτερο σχηματισμό των Στενών του Νέστου. Εντυπωσιακά είναι τα ρέματα που διατρέχουν τις ορεινές αυτές περιοχές και εκβάλλουν στο Νέστο. Σε αρκετές θέσεις δημιουργούν καταρράκτες, οι σημαντικότεροι από τους οποίους είναι της Αγ. Βαρβάρας στην περιοχή Πρασινάδας και του Λειβαδίτη (ο ψηλότερος καταρράκτης των Βαλκανίων).

Στην περιοχή Παρανεστίου – Σταυρούπολης κυριαρχούν οι γεωργικές καλλιέργειες, τα βοσκοτόπια και οι οικισμοί με τις αντίστοιχες χρήσεις, κάποιες από τις οποίες εξαπλώνονται κατά μήκος του κύριου οδικού άξονα της περιοχής. Όσον αφορά τις γεωργικές εκμεταλλεύσεις, περιορίζονται στην παραποτάμια ζώνη και κοντά στον οικισμό Σταυρούπολη, όπου από τα οθωμανικά χρόνια υπάρχει ιδιαίτερη ανάπτυξη της καπνοκαλλιέργειας (Εικ. 2.6).



Εικόνα 2.5: Η διαδρομή του ποταμού μεταξύ των οικισμών Παρανεστίου – Σταυρούπολης, ο καταρράκτης Λειβαδίτης και ένα μέρος της ροής του ποταμού.



Εικόνα 2.6: Τα Στενά του Νέστου – Θρακικά Τέμπη όπου απεικονίζεται ο μαιανδρικός ρους του ποταμού.

Ο σχηματισμός των Στενών του Νέστου αποτελεί περιοχή ποτάμιας κοιλάδας, ιδιαίτερου φυσικού κάλλους, μεγάλης περιβαλλοντικής και αισθητικής σημασίας, που προστατεύεται από διεθνείς νόμους και συμβάσεις (Οδηγία 79/409/ΕΟΚ, WWF Ελλάς 2009, Περιβάλλον 2000) και είναι γνωστή από την αρχαιότητα ως Θρακικά Τέμπη. Η συνολική της έκταση ανέρχεται σε 23,8 km² και εξαιτίας της πλούσιας χλωρίδας και πανίδας έχει χαρακτηριστεί ως «Αισθητικό Δάσος». Ο προσανατολισμός της είναι βορειοδυτικός-νοτιοανατολικός με μήκος 13 km, πλάτος 0,8 ως 1,5 km και συνολικό βάθος διάβρωσης 300 έως 400 m. Ο Νέστος ρέει στη βάση των Στενών ως εγκλιβωτισμένος μαιάνδρος, με πλάτος μαιανδρικής ζώνης 500-700 m. Το μήκος της κοίτης του μαιάνδρου είναι 24 km και το πλάτος της 50-70 m.

Ο ποταμός αποτελεί τη μόνη σταθερή δίοδο επικοινωνίας μεταξύ των εσωτερικών λεκανών της Ροδόπης και του Δέλτα του στο Θρακικό Πέλαγος. Σε ετήσια βάση μεταφέρει περίπου $1,0-1,5 \times 10^9$ m³ νερού και περίπου $1,8 \times 10^6$ m³ φερτών υλικών προς τη θάλασσα, με τάσης μείωσης. Μεγάλοι όγκοι λεπτόκοκκων φερτών υλικών ιλύος και αργίλου μεταφέρονται σε αιώρηση με το νερό και καταλήγουν στις εκβολές του ποταμού στο στενό της Θάσου (Psilovikos *et al.* 2006, Skoulikaris *et al.* 2009).

Η γεωμορφολογία της κοιλάδας, σε συνδυασμό και με τις κλιματικές συνθήκες, ευνοεί τη φυσική βλάστηση. Στα πρανή της κοιλάδας αναπτύσσονται θαμνώνες πρίνου, δάση φυλλοβόλλων, βελονοφόρων και μεικτά δάση. Επίσης, κατά μήκος του ποταμού αναπτύσσονται διάφορα είδη πλατάνου, σκλήθρου και ιτιάς. Οι δασικές αυτές περιοχές όπως αναφέραμε αποτελούν το «Αισθητικό Δάσος» των Στενών του Νέστου. Σε σχέση με την πανίδα της περιοχής στο Νέστο ζουν 8 είδη ψαριών, 9 είδη θηλαστικών και 56 είδη πτηνών, μεταξύ των οποίων υπάρχουν πολλά αρπακτικά, όπως ο γύπας, που χαρακτηρίζονται ως απειλούμενα είδη. Για το λόγο αυτό η σύμβαση του Ramsar που προστατεύει τον υγροβιότοπο του Δέλτα του Νέστου επεκτείνεται και στην περιοχή των Στενών για την προστασία της ορνιθοπανίδας (Φορ. Διαχ. Δέλτα Νέστου 2011).

Τα φράγματα του Θησαυρού και της Πλατανόβρυσης χρησιμοποιούν το νερό που συγκρατούν από τις πλημμυρικές παροχές του Νέστου για την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας και την άρδευση της δελταϊκής πεδιάδας του ποταμού. Αυτή η τροποποίηση της ροής του Νέστου και η συγκράτηση φερτών υλικών μέσα στους ταμιευτήρες, έχουν βέβαια μεταβάλει τις περιβαλλοντικές συνθήκες στο ποτάμιο σύστημα, όμως δεν αναμένεται να επιβαρύνουν το εξαιρετικό αυτό φυσικό περιβάλλον των Στενών του Νέστου, το οποίο συνεχίζει και σήμερα να λειτουργεί ομαλά (ΙΝΑΛΕ 2010, Sentas & Psilovikos 2010).

2.2.3 Κάτω ρους - Πεδιάδα και Δέλτα του Νέστου

Με την έξοδό του από τα Στενά ο Νέστος ορίζει μια πεδινή ζώνη η οποία αποτελεί – σε γεωλογικούς χρόνους - δημιούργημα του ποταμού, μέσω των προσχώσεων με φερτές ύλες (αλλουβικές αποθέσεις) που προέρχονται από τη διάβρωση των σκληρών πετρωμάτων του άνω ρου του ορεινού όγκου και καταλήγει στο δέλτα του Νέστου που είναι η εκβολή του κύριου κλάδου του ποταμού στη θάλασσα (Εικ. 2.7). Στο εσωτερικό της ζώνης αυτής, κατά μήκος των όχθων υπήρχε το υδροχαρές δάσος Κοτζά – Ορμάντο οποίο αποτελούσε ένα από τα μεγαλύτερα, ομορφότερα και πλουσιότερα σε είδη, υδροχαρή δάση στην Ευρώπη. Όμως το 1952 αποφασίστηκε η εκχέρσωση του μεγαλύτερου μέρους του και η καλλιέργειά του με γεωργικά φυτά, όπως το καλαμπόκι, ενώ ένα μεγάλο τμήμα του υγρότοπου αποστραγγίστηκε και οι εκτάσεις που προέκυψαν διανεμήθηκαν στους αγρότες (Φορέας. Διαχ. Δέλτα Νέστου 2011).



Εικόνα 2.7: Δέλτα του Νέστου. Στα αριστερά φαίνεται η διαμόρφωση των όχθων του Δέλτα έως την περιοχή της Κεραμωτής. Μικρότεροι κλάδοι του ποταμού καταλήγουν στη θάλασσα, δημιουργώντας λιμνοθάλασσες και βάλτους. Στο εσωτερικό διακρίνεται η πλατιά επίπεδη έκταση που αποτελεί την πεδιάδα του Δέλτα.

Στο σύνολό του ο δελταϊκός σχηματισμός εκτείνεται δυτικά από τις νότιες υπώρειες των ορέων της Λεκάνης, στην περιοχή της Νέας Καρβάλης και ανατολικά από τη λοφοσειρά μεταξύ των οικισμών Τοξότες και Άβδηρα του Νομού Ξάνθης. Η έκτασή του φτάνει περίπου τα 615 km² και η ακτογραμμή του φτάνει σε ανάπτυγμα τα 50 km (Psi-

Ionikos *et al.* 2006). Στην πραγματικότητα βέβαια, προς τα ανατολικά όλη η έκταση έως τις λιμνοθάλασσες Βιστωνίδα και Ισμαρίδα (Μητρικού), στο Νομό Κομοτηνής, αποτελεί ένα ενιαίο σύστημα που δημιουργήθηκε από τη συνδυασμένη δράση ενός πλήθους ποταμών (ποταμοί Νέστος, Κόσυνθος ή Ξάνθης, Κομψάτος, Ξηροπόταμος, Μπόσπος, Φιλιούρης κ.α.) και ακόμη περισσότερων ρεμάτων, που ξεκινούν από τον ορεινό όγκο της Ροδόπης και εκβάλλουν στο Θρακικό Πέλαγος.

Στην επαφή του ποταμού με τη θάλασσα, λόγω της προσχωσιακής και της διαβρωτικής δράσης των ποταμών και της θάλασσας αντίστοιχα, δημιουργούνται λιμνοθάλασσες. Οι μικρές και μεγάλες λιμνοθάλασσες του Δέλτα φτάνουν τις 27, αν και στην πραγματικότητα στο σύνολό τους οι λιμνοθάλασσες του συμπλέγματος είναι πολύ περισσότερες. Η αναγνώριση της σημασίας αυτής της φυσικής ενότητας, συνολικής έκτασης 148 km², έχει οδηγήσει από το 1996 στη δημιουργία του Εθνικού Πάρκου Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης, που αποτελεί τη μεγαλύτερη χερσαία προστατευόμενη περιοχή της χώρας. Στην ουσία το πάρκο ενοποιεί τις προστατευόμενες από τη συνθήκη Ramsar περιοχές Δέλτα Νέστου, λίμνη Βιστωνίδα και λίμνη Μητρικού, δηλαδή τρεις, από τις συνολικά 11 περιοχές Ramsar της χώρας (Psilovikos *et al.* 2006, Margoni & Psilovikos 2010).

Η οικολογική σημασία του Δέλτα του Νέστου είναι τεράστια, καθώς οι βιότοποι που δημιουργούνται είναι όλων των τύπων που απαντώνται στους υγροτοπικούς σχηματισμούς (λιμνοθάλασσες, γλυκόβαλτοι, καλαμιώνες, αμμοθίνες κ.α.). Στην παραποτάμια ζώνη διατηρείται ακόμα ένα μικρό τμήμα του υδροχαρούς δάσους Κοτζιά-Ορμάν (130 km²), το οποίο περιλαμβάνει πληθώρα διαφορετικών ειδών δένδρων. Εκτός από το δάσος και η υπόλοιπη φυσική φυτοκοινωνία του Δέλτα είναι εξαιρετικά σημαντική. Στο σύνολό της, με τους επιμέρους βιοτόπους και τη βλάστηση αποτελεί ενδιαίτημα ενός μεγάλου αριθμού ειδών πανίδας και ορνιθοπανίδας. Εξάλλου, το πλήθος και η ποικιλία των ατόμων κάθε είδους, αποτελούν δείκτη υγείας του οικοσυστήματος και κριτήριο για την ένταξη στις προστατευμένες περιοχές. Στο Δέλτα του Νέστου αναφέρεται η ύπαρξη 300 ειδών, πολλά από τα οποία ανήκουν στα απειλούμενα. Όσον αφορά την ιχθυοπανίδα, από τα 37 είδη που ζουν στο υδάτινο οικοσύστημα του Νέστου, τα 17 είναι ευρύαλα και διαβιούν στο εκβολικό σύστημα του ποταμού (Apostolou *et al.* 2010, ΙΝΑΛΕ 2010).

Πιέσεις προς το οικοσύστημα του Δέλτα του Νέστου ασκούνται κυρίως από τον πρωτογενή τομέα και από τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Όπως προαναφέραμε, με την εκχέρσωση του μεγαλύτερου μέρους του δάσους «Κοτζιά – Ορμάν», που ξεκίνησε το

1952, οι δασικές εκτάσεις μετατράπηκαν σε καλλιέργειες. Κατά τα επόμενα χρόνια έως το 1985, έγγειες βελτιώσεις και γεωργικοί αναδασμοί συνέχισαν να μεταβάλλουν το τοπίο σε ολοένα και πιο ανθρωπογενές. Επεμβάσεις όπως η υπερβόσκηση, η υλοτομία, οι αυθαίρετες πυρκαγιές των καλαμιώνων, η αναρρίχηση στις πλαγιές του φαραγγιού και τους βράχους, όπου σπάνια είδη ζώων έχουν τις φωλιές τους, καθώς και η διέλευση βαρκών σε περιόδους αναπαραγωγής που ενοχλούν το βιότοπο, μετέβαλαν τις οικολογικές συνθήκες της περιοχής. Ακόμη, η ρύπανση των υδάτων από τα γεωργικά φάρμακα, τα απόβλητα από τις βιομηχανίες ξυλείας, τα μεταλλεία ουρανίου στο χωριό Ελέσνιτσα της Βουλγαρίας και τα λατομεία μαρμάρων στη δυτική πλευρά, επιφέρουν επιπρόσθετες επιβαρύνσεις με σοβαρότερες συνέπειες για το οικοσύστημα του Δέλτα.

2.2.4 Το δίκτυο παρακολούθησης (Monitoring) του ποταμού Νέστου

Τα τελευταία χρόνια, σε όλο τον κόσμο, παρατηρείται μια ποιοτική και ποσοτική υποβάθμιση, στα περισσότερα υδατικά συστήματα (επιφανειακά και υπόγεια). Στη χώρα μας, παρά το γεγονός ότι είναι πλούσια σε κατά κεφαλήν διαθεσιμότητα υδατικών πόρων, επειδή το νερό ξοδεύεται αλόγιστα, κυρίως στη γεωργία και σε μικρότερο βαθμό στην ενέργεια, τη βιομηχανία και την οικιακή χρήση, το υδατικό ισοζύγιο τις περισσότερες φορές είναι ελλειμματικό. Σε ότι αφορά την ποιοτική υποβάθμιση, τα πρώτα σημάδια ρύπανσης αρχικά εντοπίστηκαν στα επιφανειακά νερά των λιμνών και των ποταμών ενώ σταδιακά και στα υπόγεια ύδατα, με αποτέλεσμα η προστασία και διαχείριση του νερού να αποκτά ιδιαίτερη βαρύτητα (Psilovikos *et. al.* 1999, 2003, Αντωνόπουλος 2010, Ψιλοβίκος 2005, Λαόπουλος και συν. 2007).

Για την αντιμετώπιση των παραπάνω προβλημάτων, είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός προγραμμάτων αειφορικής διαχείρισης των υδατικών πόρων. Το γεγονός αυτό καθιστά απαραίτητη τη συστηματική μέτρηση και καταγραφή των μεταβλητών που περιγράφουν την ποιότητα και ποσότητα ενός υδατικού σώματος σε μια υδρολογική λεκάνη. Λόγω των προβλημάτων ρύπανσης του νερού, που εμφανίστηκαν στις ανεπτυγμένες χώρες στη δεκαετία του '50, η παρακολούθηση της ποιότητας του νερού έχει καθιερωθεί νομοθετικά. Έχουν δημιουργηθεί τράπεζες δεδομένων των οποίων η αναλυτική στατιστική επεξεργασία τεκμηρίωσε μια σειρά από προτάσεις και μέτρα θεραπείας, προστασίας, διατήρησης, διαχείρισης και προπάντων πρόληψης της υποβάθμισης της ποιότητας του νερού.

Φορείς οι οποίοι ασχολήθηκαν και ασχολούνται συστηματικά με τα θέματα παρα-

κολούθησης των υδάτων, είναι τα Υπουργεία Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων (πρώην Γεωργίας), Ανάπτυξης, Οικονομίας, Π.Ε.Κ.Α., Υγείας και Κοινωνικών Ασφαλίσεων, καθώς επίσης και Υπηρεσίες όπως το ΙΓΜΕ, η ΔΕΗ, οι Ο.Τ.Α. και κάποιοι λιγοστοί ιδιώτες.

Ειδικότερα, το Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων συμβάλλοντας στην προσπάθεια για την εξασφάλιση και προστασία των υδατινών πόρων της Ελλάδας, κατάρτισε ένα πρόγραμμα παρακολούθησης των υδατικών συστημάτων της χώρας από τις αρχές της δεκαετίας του 80 το οποίο και έληξε στα μισά της δεκαετίας του 1990.

Σήμερα μετά τη θέσπιση της Οδηγίας 2000/60/ΕΕ, την εναρμόνιση της με την Ελληνική Νομοθεσία Ν.3199/2003, το Π.Δ. 51/2007 και τέλος την ΚΥΑ για το monitoring (ΚΥΑ 140384/2011) ξεκίνησε να παρακολουθείται ο Νέστος στο σύνολό του σε προκαθορισμένα σημεία από τους φορείς ΙΓΜΕ, ΓΧΚ, ΕΛΚΕΘΕ και ΕΚΒΥ, όπως προβλέπεται στην ΚΥΑ. Παρόλα αυτά, τα δεδομένα θεωρούνται πενιχρά και δε θα μπορούσε η παρούσα εργασία να στηριχθεί σ' αυτά, αφού το monitoring με βάση την οδηγία και την ΚΥΑ ξεκίνησε το 2011 και αφορά μηνιαίες και μικρότερης συχνότητας μετρήσεις.

Για να είναι εφικτή η σύγκριση και αξιολόγηση των ποιοτικών και ποσοτικών παραμέτρων του νερού, οι μετρήσεις θα πρέπει να λαμβάνονται σε τακτά χρονικά διαστήματα, συστηματικά και οργανωμένα, καθ' όλη τη διάρκεια του 24ώρου. Κάτι τέτοιο γίνεται εφικτό μόνο με την αυτοματοποιημένη παρακολούθηση (Αλμπανάκης και συν.2001, Psilovikos 2005, Matzafleri *et al.* 2009).

Το “*Monitoring*” ορίζεται από το Διεθνή Οργανισμό Τυποποίησης (International Organization for Standardization – ISO) ως «*Η προγραμματισμένη διαδικασία της δειγματοληψίας και των μετρήσεων και στη συνέχεια της καταγραφής ή τηλεμετάδοσης ή και των δύο διαφόρων χαρακτηριστικών του νερού, με στόχο την αποτίμηση της κατάστασης και της συμμόρφωσης σε συγκεκριμένους μακροπρόθεσμους αντικειμενικούς στόχους*» (ISO.org 2011).

Το monitoring στο Νέστο στα στοιχεία του οποίου βασίστηκε η διατριβή, υλοποιήθηκε με βάση την ΚΥΑ18492/19-06-96. Με βάση την ΚΥΑ αυτή, εγκρίνονται οι περιβαλλοντικοί όροι λειτουργίας των φραγμάτων του Νέστου, με την ανάληψη από τη ΔΕΗ της υποχρέωσης κατασκευής, εγκατάστασης και λειτουργίας ενός συστήματος παρακολούθησης στη λεκάνη και στο Δέλτα του ποταμού. Τη διεκπεραίωση του έργου αυτού ανέθεσε στην ερευνητική ομάδα “ΠΕΡΣΕΑΣ” (Περιβαλλοντική Έρευνα και Συστηματική Επισκόπηση με Αυτοματοποιημένες Συσκευές), η οποία και εγκατέστησε

ένα δίκτυο ηλεκτρονικών συστημάτων “REMOS” (**R**emote **E**nvironmental **M**onitoring **S**ystem) (Ψιλοβίκος 1999, Ψιλοβίκος και συν. 2002, Ψιλοβίκος και συν. 2005). Τα δεδομένα αυτά έδωσαν τη δυνατότητα εφαρμογής στοχαστικών μοντέλων και εξαγωγής χρήσιμων συμπερασμάτων.

Το δίκτυο REMOS είναι ένα αυτοματοποιημένο, τηλεμετρικό, ενεργειακά αυτόνομο δίκτυο σταθμών, που λειτουργεί όλο το 24ωρο παρακολουθώντας, καταγράφοντας και μεταδίδοντας τηλεμετρικά τιμές των ποσοτικών και ποιοτικών παραμέτρων του ποταμού Νέστου, στους εμπλεκόμενους φορείς. Καλύπτει όλη τη ροή του ποταμού στην Ελληνική επικράτεια, από τα σύνορα με τη Βουλγαρία μέχρι τις εκβολές του στο Θρακικό πέλαγος, εγκαθιστώντας τρεις ανεξάρτητες ομάδες σταθμών. Η λειτουργία τους ως σύστημα REMOS ολοκληρώθηκε στα τέλη του έτους 2007, δημιουργώντας πλούσιες χρονοσειρές ημερήσιας παρακολούθησης από συνολικά 3 ποτάμιους, 1 λιμναίο, 2 λιμνοθαλάσσιους και 2 μετεωρολογικούς σταθμούς.

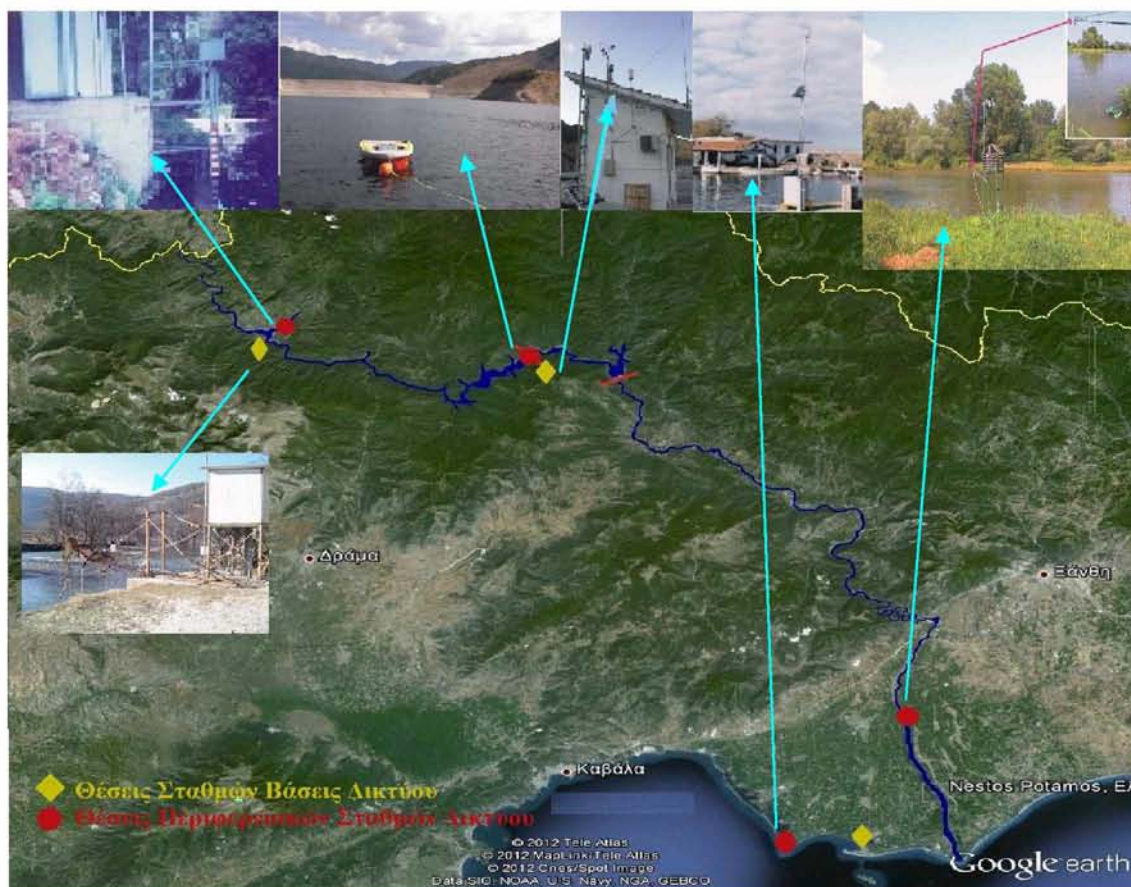
2.2.4.1 Περιγραφή του συστήματος παρακολούθησης στον ποταμό Νέστο

Το σύστημα παρακολούθησης REMOS στο Νέστο ποταμό, αποτελείται από ομάδες δικτύων, που κάθε μια περιλαμβάνει ένα Σταθμό Βάσης και Περιφερειακούς Σταθμούς (Psilonikos *et al.* 1988, 2005, Psilonikos & *col.* 1999, 2003).

- Ο **Σταθμός Βάσης (Σ.Β.)** είναι τοποθετημένος σε ειδικά διαμορφωμένο κλειστό χώρο, όπου υπάρχει παροχή ηλεκτρικού ρεύματος και τηλεφωνική γραμμή. Είναι εξοπλισμένος με το κατάλληλο υλικό (hardware) και λογισμικό (software), σύστημα τηλεμετρίας και ότι άλλο κρίνεται απαραίτητο για τη συγκέντρωση, αποθήκευση και τηλεμετάδοση δεδομένων (Data logger). Επίσης, είναι επιφορτισμένος με τον πλήρη έλεγχο των Περιφερειακών Σταθμών, την μεταβίβαση εντολών και συνδεδεμένος με Κέντρα Επιχειρήσεων Φορέων, Υπηρεσιών κ.ά.
- Οι **Περιφερειακοί Σταθμοί (Π.Σ.)** είναι εφοδιασμένοι με τοπική μονάδα ελέγχου, συστήματα τηλεμετρίας και τροφοδοσίας (φωτοβολταϊκά στοιχεία και μπαταρίες), όπως επίσης με αισθητήρια μέτρησης παραμέτρων του νερού ή και της ατμόσφαιρας εφόσον χρειάζεται. Η επικοινωνία τους με το Σ.Β. γίνεται μέσω ραδιοκυμάτων UHF/VHF όταν υπάρχει άμεση ορατότητα. Οι παράμετροι που μετρώνται στο νερό είναι:
 1. Στάθμη νερού (H – cm)
 2. Θερμοκρασία νερού (Tw – °C) και αέρα (Ta – °C)
 3. Ενεργός Οξύτητα (pH) ή το δυναμικό οξειδοαναγωγής (Redox – mV)

4. Διαλυμένο Οξυγόνο (DO – mg/l)
5. Αλατότητα (Sal – ppt) για τα παράκτια ύδατα και τις λιμνοθάλασσες
6. Ηλεκτρική Αγωγιμότητα (EC_w - μS/cm) για τα εσωτερικά ύδατα

Η εγκατάσταση και λειτουργία του συστήματος παρακολούθησης των ποιοτικών και ποσοτικών παραμέτρων του νερού στη λεκάνη του Νέστου, ξεκίνησε το έτος 2000. Όπως προαναφέραμε (Παρ. 2.2), λόγω των ειδικών συνθηκών του ποταμού, κατασκευάστηκαν και λειτουργούν τρεις ομάδες σταθμών του δικτύου (Εικ. 2.8).



Εικόνα 2.8: Οι εγκατεστημένοι τηλεμετρικοί σταθμοί στον ποταμό Νέστο.

1) Η Βόρεια Ομάδα εγκαταστάθηκε από τις αρχές του 2003 και είναι το πιο πρόσφατο δίκτυο. Αποτελείται από ένα Σ.Β. που βρίσκεται στο χωριό Ποταμοί Νευροκοπίου, έναν Μετεωρολογικό Σταθμό (Μ.Σ.) που βρίσκεται στο ίδιο μέρος και από δύο Π.Σ. που είναι τοποθετημένοι στις κοίτες των ποταμών Δοσπάτη (παραπόταμος του Νέστου) και Νέστου (τοποθεσία Παγονέρι). Σκοπός της λειτουργίας της Βόρειας ομάδας είναι η παρακολούθηση των υδάτων που εισέρχονται στην Ελλάδα από τη Βουλγαρία. Οι παράμετροι που μετρώνται είναι: Στάθμη νερού (H), Ηλεκτρική Αγωγιμότητα

(ECw), pH, Θερμοκρασία νερού (Tw) και αέρα (Ta) και Διαλυμένο Οξυγόνο (DO). Η ύπαρξη του Μετεωρολογικού Σταθμού, έχει σκοπό την παρακολούθηση τυχόν μικροκλιματικών αλλαγών που μπορεί να οφείλονται στην παρουσία της λίμνης του Θησαυρού και οι οποίες επηρεάζουν το φυσικό περιβάλλον και τις ανθρώπινες δραστηριότητες στην περιοχή.

2) Η Κεντρική Ομάδα εγκαταστάθηκε στις αρχές του 2001 στην ενδοορεινή κοιλάδα. Αποτελείται από ένα Σταθμό Βάσης (Σ.Β.), έναν Περιφερειακό (Π.Σ.) και ένα Μετεωρολογικό Σταθμό (Μ.Σ.). Ο Σ.Β. καθώς και ο Μ.Σ. βρίσκονται στη στέψη του φράγματος του Θησαυρού, ενώ ο Π.Σ. μέσα στη λίμνη (πλωτός). Σκοπός της ομάδας αυτής είναι ο έλεγχος των φαινομένων εποχιακής στρωμάτωσης και του προσδιορισμού των βαθών του επιλιμνίου, του θερμοκλινούς και του υπολιμνίου. Με τον τρόπο αυτό, διερευνώνται και προβλήματα ποιότητας που είχαν προκύψει κατά τα πρώτα στάδια λειτουργίας του ταμιευτήρα του Θησαυρού μέχρι να πληρωθεί και να ξεκινήσει η λειτουργία του, όπως φαινόμενα ανοξίας στα βαθύτερα στρώματα με την ύπαρξη θειοβακτηρίων (Moustaka *et al.* 2000). Τα ζητήματα της υποβάθμισης της ποιότητας των υδάτων της λίμνης, επηρεάζουν αρνητικά τόσο την ποιότητα του νερού του ταμιευτήρα, όσο και τις συνθήκες των εργαζομένων στο ΥΗΕ.

Οι παράμετροι που εξετάζονται είναι: pH, Θερμοκρασία νερού (Tw) και Διαλυμένο Οξυγόνο (DO) και αφορούν όλη τη στήλη του υδάτινου σώματος, δηλαδή λαμβάνονται σε τέσσερα διαφορετικά βάθη (1, 20, 40 και 70m). Οι μετεωρολογικοί παράμετροι που ελέγχονται αναφέρονται στο μικροκλίμα της κοιλάδας του Νέστου και του Όρους Φαλακρό και ιδιαίτερα έχουν να κάνουν με τις μεταβολές της χιονοκάλυψης και πώς επηρεάζεται από τη λίμνη του Θησαυρού.

3) Η Νότια Ομάδα είναι η παλαιότερη από τις τρεις ομάδες (έτος εγκατάστασης 2000) και περιλαμβάνει το Σ.Β. στο κτίριο του συνεταιρισμού Ιχθυοτρόφων Καβάλας στην Κεραμωτή και δύο Π.Σ., έναν στην κοίτη του Νέστου νοτιοανατολικά της Χρυσούπολης και τον δεύτερο στη λιμνοθάλασσα του Αγιάσματος, στο μέτωπο της Δελταϊκής πεδιάδας, ο οποίος το έτος 2005 μετεγκαταστάθηκε στη λιμνοθάλασσα Κεραμωτής. Σκοπός της είναι αφενός μεν, ο έλεγχος των ποιοτικών και ποσοτικών παραμέτρων της ροής του ποταμού κατάντη του συστήματος των φραγμάτων, αφετέρου δε, η παρακολούθηση των παλιρροϊκών κύκλων και των ποιοτικών χαρακτηριστικών των παραπάνω λιμνοθαλασσών στην περιοχή του Δέλτα. Οι παράμετροι που εξετάζονται είναι: Ηλεκτρική Αγωγιμότητα (ECw), Redox, Θερμοκρασία νερού (Tw) και αέρα (Ta), Αλατότητα (Sal) και Διαλυμένο Οξυγόνο (DO) (Psilonikos *et al.* 2005).

2.3 Παράμετροι που καθορίζουν την ποιότητα του νερού

Το νερό είναι ανόργανη χημική ένωση η οποία συναντάται σε όλα τα τμήματα της βιόσφαιρας (ατμόσφαιρα, υδρόσφαιρα, λιθόσφαιρα). Αποτελεί προϋπόθεση για την ύπαρξη κάθε μορφής ζωής, ενώ η διαρκώς αυξανόμενη ζήτηση επαρκών ποσοτήτων νερού καλής ποιότητας για κάθε χρήση και ιδίως για πόσιμο, καθιστά αναγκαίες τις συντονισμένες δράσεις σε Εθνικό, Ευρωπαϊκό και Διεθνές επίπεδο. Η ποιότητα του νερού γενικά περιγράφεται από ένα μεγάλο αριθμό παραμέτρων, οι οποίες διαχωρίζονται στις οργανοληπτικές, στις φυσικοχημικές και στις βιολογικές. Ο αριθμός αυτών των παραμέτρων δεν είναι σταθερός και εξαρτάται από τη χρήση του νερού, ενώ μεταβάλλεται με το χρόνο, όταν διαπιστωθεί ότι κάποιο συστατικό μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στους χρήστες.

Οι παράμετροι του νερού οι οποίες αναλύονται στην παρούσα εργασία, χωρίζονται σε ποιοτικές (φυσικοχημικές) και ποσοτικές. Στις ποιοτικές παραμέτρους ανήκουν οι (T_w , EC_w , Sal , DO , pH , $Redox$), ενώ στις ποσοτικές η στάθμη νερού (H).

2.3.1 Θερμοκρασία νερού

Η θερμοκρασία του νερού (Water Temperature - T_w) είναι σημαντική παράμετρος, γιατί επηρεάζει τη διαλυτότητα και τους χρόνους αντίδρασης των ουσιών. Είναι ο κύριος παράγοντας από τον οποίο εξαρτάται η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στα φυσικά υδατικά συστήματα. Η θερμοκρασία «ελέγχει» τους ρυθμούς των βιοχημικών αντιδράσεων όπως η αποικοδόμηση των οργανικών ουσιών από τους υδρόβιους μικροοργανισμούς. Σημαντικό, από βιολογική άποψη, είναι ότι τα περισσότερα υδρόβια είδη απαιτούν συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασιών προκειμένου να επιζήσουν. Εάν η θερμοκρασία του νερού ξεπεράσει αυτά τα όρια τα είδη θα στρεσαριστούν προκειμένου να επιζήσουν και κάποια ενδεχομένως να θανατωθούν. Στην καλύτερη των περιπτώσεων θα απομακρυνθούν, εάν το επιτρέπουν οι συνθήκες, από το υδατικό σύστημα που προκαλεί την πίεση.

Οι θερμοκρασίες των ρεόντων υδάτων επηρεάζονται από τις θερμοκρασίες της ατμόσφαιρας με μια ισχυρή γραμμική συσχέτιση η οποία μάλιστα παρουσιάζει χρονικές υστερήσεις στα ύδατα (Smith 1981). Από αυτή τη γραμμική συσχέτιση πολλές φορές παρουσιάζονται αποκλίσεις, καθώς η θερμοκρασία του νερού σπάνια κατεβαίνει κάτω από τους $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ όσο ακραίες και να είναι οι κλιματικές συνθήκες. Ακόμη, αποκλίσεις δημιουργούνται και λόγω της εαρινής τήξης των χιονιών που μπορεί να διατηρήσουν

θερμοκρασίες στα ύδατα, αρκετά κάτω από αυτές της ατμόσφαιρας, για εβδομάδες ή και για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Τέλος, ισχυρές βροχοπτώσεις μπορεί να επιφέρουν εισροή επιφανειακών ή υπογείων υδάτων, με θερμοκρασίες που διαφέρουν πολύ από αυτές τις ατμόσφαιρας (Ward 1985).

Η κυριότερη πηγή θερμότητας στις λίμνες είναι η ηλιακή ακτινοβολία, το μεγαλύτερο μέρος της οποίας απορροφάται ευθέως από τα λιμναία ύδατα. Σε αβαθή λιμναία ύδατα τα ιζήματα μπορούν να απορροφήσουν σημαντικές ποσότητες ηλιακής ακτινοβολίας και η θερμότητα αυτή, κατά ένα μέρος, να μεταφερθεί στα ύδατα. Ωστόσο, κυρίως η άμεση απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι αυτή που διαμορφώνει τη θερμοκρασία των υδάτων των λιμνών. Εξαιρέσεις αποτελούν λίμνες που προσλαμβάνουν σημαντικά ποσοστά του όγκου τους από επιφανειακές απορροές σε μικρές χρονικές περιόδους, όπως μικροί ή αβαθείς ταμιευτήρες, ακόμη λίμνες που τροφοδοτούνται από πηγές και αναβλύσεις υπόγειων υδάτων και οι ηφαιστειακές λίμνες (Wetzel 2006).

Η απότομη αύξηση της θερμοκρασίας των υδατορευμάτων και των λιμνών, που δεν σχετίζεται με μεταβολές του κλίματος, φανερώνει θερμική ρύπανση που προέρχεται συνήθως από εργοστάσια παραγωγής ενέργειας, όπως είναι τα θερμοηλεκτρικά και τα πυρηνικά εργοστάσια.

2.3.2 Ηλεκτρική αγωγιμότητα

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα (Electrical Conductivity of water – EC_w) είναι η αριθμητική έκφραση της ικανότητας του υδατικού διαλύματος να άγει το ηλεκτρικό ρεύμα, ιδιότητα που συνδέεται με τη συγκέντρωση των ιονισμένων ουσιών, την κινητικότητα τους και τη θερμοκρασία του νερού κατά τη στιγμή της μέτρησής της. Τέτοιες ουσίες είναι τα άλατα Φθορίου, Χλωρίου, Νατρίου, Ασβεστίου, Μαγνησίου κ.ά. (Stednick 1991).

Απότομη αύξηση της αγωγιμότητας του νερού αποτελεί ένδειξη ρύπανσης. Επίσης, η αύξηση της αγωγιμότητας συνδέεται με την ενηλικίωση (παλαίωση) μιας υδάτινης μάζας εξαιτίας της αύξησης των θρεπτικών συστατικών της (ευτροφισμός). Ακόμη όσο μεγαλύτερη είναι η αγωγιμότητα στα γλυκά νερά, τόσο μεγαλύτερη είναι και η βιολογική παραγωγικότητα. Τα όρια των τιμών της στα φυσικά γλυκά νερά κυμαίνονται από 50-1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (μονάδα αγωγιμότητας είναι το mS/cm ή $\mu\text{S}/\text{cm}$ ή dS/m στους 25 °C).

Η αγωγιμότητα του νερού άρδευσης έχει διττό ρόλο. Αφενός επηρεάζει την αλατότητα των αρδευόμενων εδαφών, αφετέρου επηρεάζει τη διηθητικότητά τους. Υψηλή αγωγιμότητα νερού άρδευσης είναι δυνατό να προκαλέσει προβλήματα στα καλλιερ-

γούμενα εδάφη με επακόλουθα προβλήματα πρόσληψης νερού από τα φυτά. Ηλεκτρική αγωγιμότητα του νερού άρδευσης μεγαλύτερη από 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$, μπορεί να δημιουργήσει πρόβλημα αλατότητας στο έδαφος, ανάλογα του τύπου υφής του εδάφους, το είδος της καλλιέργειας, το κλίμα και τον τρόπο εφαρμογής του νερού. Νερό με ηλεκτρική αγωγιμότητα μεγαλύτερη από 3 dS/m (3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) είναι κατά κανόνα ακατάλληλο για άρδευση (Παπαζαφειρίου & Αντωνόπουλος 1991, Μισοπολινός, 1991). Υψηλά επίπεδα πρόσληψης Νατρίου, ιδίως αν δεν εξισορροπείται από πρόσληψη Ασβεστίου, έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργούνται σοβαρά προβλήματα υγείας στους ανθρώπους. Χαμηλή αγωγιμότητα νερού άρδευσης (κάτω από 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$) είναι δυνατό να προκαλέσει έκπλυση των ελευθέρων αλάτων του εδάφους, με αποτέλεσμα τη μείωση της διηθητικής ικανότητας του εδάφους και την υδατική του καταπόνηση (Μισοπολινός 1991).

2.3.3 Αλατότητα

Το 1909 το Διεθνές Συμβούλιο για την Εξερεύνηση της Θάλασσας (International Council for the Exploration of the Sea) έδωσε τον ορισμό της αλατότητας ως: «Αλατότητα (Salinity) είναι το συνολικό ποσό σε γραμμάρια των διαλυμένων στερεών ουσιών που περιέχονται σε 1 Kg θαλασσινού νερού, όταν όλα τα ανθρακικά έχουν μετατραπεί σε οξείδια, το βρώμιο και το ιώδιο έχουν αντικαταστεί από χλώριο και όλα τα οργανικά έχουν οξειδωθεί τελείως» (Αλμπανάκης 2007). Η αλατότητα αναφέρεται στη σχετική περιεκτικότητα άλατος του νερού και συνήθως εκφράζεται σε μέρη ανά χιλιάδα (parts per thousand, ppt).

Η καταγραφή της αλατότητας μπορεί να γίνει με ένα από τα παρακάτω μεγέθη: α) τα ολικά διαλυμένα στερεά (Total Dissolved Solids – TDS), που εκφράζονται σε mg/l ή ppm ή mg/kg νερού, β) την ολική αλατότητα (total salinity) που εκφράζεται σε me/l, γ) την ενεργό αλατότητα (effective or potential salinity – ES) εκφρασμένη σε me/l και υπολογιζόμενη από τη σχέση: $ES = Cl + (1/2)SO_4$ και δ) την ηλεκτρική αγωγιμότητα (Αντωνόπουλος 2003).

Η αλατότητα των θαλασσών κυμαίνεται μεταξύ 32,0-37,5 ‰. Στους πόλους της γης καταγράφονται χαμηλές τιμές αλατότητας, ενώ πολύ υψηλές στις τροπικές ζώνες. Το γεγονός αυτό οφείλεται στις βροχοπτώσεις, στα ποσοστά εξάτμισης του νερού, στην τήξη του πάγου και σε άλλους παράγοντες (Νταρακάς 2010).

Γενικά η υψηλή συγκέντρωση αλάτων στο νερό αποτελεί πρόβλημα τόσο για χρήση ως πόσιμο νερό από τους ανθρώπους και τα ζώα λόγω αλλοίωσης της γεύσης του,

αλλά και υγείας ανάλογα και με το είδος των αλάτων. Ακόμη πρόβλημα μπορεί να δημιουργήσει η υψηλή συγκέντρωση αλάτων και όταν χρησιμοποιείται στη βιομηχανία.

2.3.4 Διαλυμένο οξυγόνο και οξυγόνο κορεσμού

Το οξυγόνο είναι η πλέον βασική παράμετρος των λιμνών και των ρεόντων υδάτων. Το διαλυμένο οξυγόνο (Dissolved Oxygen – DO) είναι απαραίτητο για το μεταβολισμό όλων των αερόβιων οργανισμών που ζουν στο νερό. Οι υδρόβιοι οργανισμοί δεν χρησιμοποιούν το οξυγόνο των μορίων του νερού, γιατί δεν μπορούν να το αποσπάσουν από αυτά ώστε να γίνει διαθέσιμο. Στην πραγματικότητα μια μικρή ποσότητα οξυγόνου με συγκέντρωση περίπου 10 μορίων οξυγόνου (O₂) ανά 10⁶ μορίων νερού, βρίσκεται διαλυμένο μέσα στο νερό. Αυτό το διαλυμένο οξυγόνο χρησιμοποιείται από τους υδρόβιους οργανισμούς (Κυριακίδης 2004).

Η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στο νερό αντανακλά την ισορροπία μεταξύ των διαδικασιών που προσθέτουν οξυγόνο και αυτών που αφαιρούν (ισοζύγιο διαλυμένου οξυγόνου). Στις πηγές διαλυμένου οξυγόνου συγκαταλέγεται η ατμόσφαιρα, η φωτοσυνθετική δραστηριότητα και η υδρομηχανική κατανομή του οξυγόνου. Εξισορρόπηση του συστήματος επιτυγχάνεται από τον καταναλωτικό μεταβολισμό των οργανισμών και από τις αβιοτικές χημικές αντιδράσεις (Wetzel 2006).

Η διακύμανση της θερμοκρασίας, οι ημερήσιες και οι εποχιακές μεταβολές της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας και της παροχής, η διαδικασία αποξυγόνωσης και επαναερισμού, καθιστούν τη συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου πολύ ευμετάβλητη. Όσο μικρότερη είναι η θερμοκρασία του νερού τόσο μεγαλύτερη είναι η συγκέντρωση του οξυγόνου κορεσμού (Γεράκης & Τσιούρης 1989, Margoni & Psilovikos 2010).

Η χημική οξείδωση ανόργανων ενώσεων όπως η αμμωνία (με τη νιτροποίηση) και η βιοχημική οξείδωση οργανικών ενώσεων, είναι οι κύριες διαδικασίες που οδηγούν στη μείωση της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου. Μεγάλες ποσότητες οργανικών υπολειμμάτων, όπως πτώματα ζώων, κοπριά, φυτικά υπολείμματα και μεγάλη συγκέντρωση αμμωνίας και άλλων ανόργανων ενώσεων από λιπάσματα κυρίως, μπορούν να προκαλέσουν την ταχεία ελάττωση του διαλυμένου οξυγόνου στο νερό. Αύξηση της ανάπτυξης των φυκών, εξαιτίας μεγάλης ποσότητας θρεπτικών που φτάνουν στο νερό, έχει ως αποτέλεσμα μετά το θάνατό τους, να υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση οργανικής ουσίας η οποία καθώς αποσυντίθεται από τα βακτήρια συντελεί στη μείωση του διαλυμένου οξυγόνου (Wetzel 2006).

Το φάσμα των τιμών που κυμαίνεται η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου είναι συνήθως μεταξύ 0 mg/l και 14 mg/l σε θερμοκρασία στην οποία το νερό αρχίζει να μετατρέπεται σε πάγο (περίπου 0 °C). Στη βιβλιογραφία εκτός από τα 14 mg/l συναντώνται και μεγαλύτερες συγκεντρώσεις όπως 16 mg/l ή και 18 mg/l. Ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν τη στιγμή της μέτρησης είναι δυνατό το νερό να είναι υπερκορεσμένο σε οξυγόνο οπότε να παρουσιάζει υψηλότερες των 14 mg/l συγκεντρώσεις. Η μέτρησή του επί τοις εκατό ποσοστού κορεσμού του νερού σε διαλυμένο οξυγόνο βοηθάει στον εντοπισμό παραγόντων που δρουν περιοριστικά στη συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου πέρα από τη θερμοκρασία, την ταχύτητα ροής και την ατμοσφαιρική πίεση. Σε συγκεντρώσεις κάτω από 3 mg/l είναι δυνατό να συμβούν θάνατοι ψαριών, αν και έχει παρατηρηθεί σε Σκανδιναβικές λίμνες, ότι τα ψάρια επιβιώνουν και σε χαμηλότερες τιμές διαλυμένου οξυγόνου (Αντωνόπουλος 2010).

Ο υδάτινος αποδέκτης έχει τη δυνατότητα να διατηρεί μία μέγιστη συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου, η οποία καλείται συγκέντρωση κορεσμού και συμβολίζεται με C_s . Παράγοντες που επηρεάζουν τη συγκέντρωση είναι η θερμοκρασία, η βαρομετρική πίεση και η αλατότητα του νερού. Μάλιστα η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί μείωση της C_s και αναφέρεται χαρακτηριστικά ότι για θερμοκρασία 20 °C και για βαρομετρική πίεση 760 mmHg, η τιμή κορεσμού είναι 9,15 ppm. Τα θαλασσινά νερά έχοντας μεγαλύτερη αλατότητα, εμφανίζουν για αντίστοιχες θερμοκρασίες μικρότερες συγκεντρώσεις κορεσμού, ίσες περίπου με 75-80% των αντίστοιχων τιμών των γλυκών νερών. Για παράδειγμα για θαλασσινό νερό θερμοκρασίας 20 °C και αλατότητας $Sal = 19.000$ ppm, η συγκέντρωση κορεσμού κάτω από τις ίδιες συνθήκες είναι 7,41 ppm. Η εξίσωση της C_s δίνεται από τον ακόλουθο τύπο (Antonopoulos 1995).

$$DO_s = (14,652 - 0,4102 \cdot Tw + 0,007991 \cdot Tw^2 - 0,000077794 \cdot Tw^3) \cdot \left(1 - \frac{Sal}{100000}\right) \quad (2.1)$$

όπου Tw η θερμοκρασία του νερού (°C)

Sal η αλατότητα του νερού σε μονάδες ιόντων χλωρίου (ppm)

DO_s το κορεσμένο οξυγόνο (mg/l)

Όταν η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στον αποδέκτη (C_a) είναι μικρότερη από την τιμή κορεσμού, τότε παρατηρείται το φαινόμενο της οξυγόνωσης. Σύμφωνα με το φαινόμενο αυτό το οξυγόνο από την ατμόσφαιρα εισέρχεται και διαλύεται στο νερό του αποδέκτη, με αποτέλεσμα τον εμπλουτισμό του σε οξυγόνο. Η ταχύτητα οξυ-

γόνωσης (dC_a/dt) σε όρους συγκέντρωσης είναι ανάλογη της διαφοράς $C_s - C_a$ που ονομάζεται έλλειμμα οξυγόνου.

2.3.5 Ενεργός οξύτητα ή συγκέντρωση ιόντων υδρογόνου (pH)

Η ενεργός οξύτητα (pH) του νερού είναι καθοριστικός παράγοντας κάθε φυσικής διαδικασίας, κρίσιμος παράγοντας λειτουργίας των υδατικών οικοσυστημάτων και σημαντικό εργαλείο για την εκτίμηση άλλων παραμέτρων της ποιότητας του νερού, όπως η αλκαλικότητα (Stednick 1991).

Το pH χρησιμοποιείται για καθορισμό της οξύτητας ή της αλκαλικότητας του νερού και οι μονάδες του μετρούνται σε λογαριθμική κλίμακα. Οι τιμές του κυμαίνονται σε ένα εύρος από 0 ως 14 με το 7 να θεωρείται το επίπεδο ουδετερότητας. Τιμές κάτω από 7 χαρακτηρίζουν το νερό ως όξινο και πάνω από 7 ως βασικό. Η ενεργός οξύτητα είναι μέτρο των ελεύθερων κατιόντων H^+ και ανιόντων υδροξυλίου OH^- του νερού. Αν η συγκέντρωση των πρώτων είναι μεγαλύτερη από αυτή των δεύτερων τότε το νερό χαρακτηρίζεται ως όξινο. Καθώς η ενεργός οξύτητα επηρεάζεται από χημικές ουσίες που προστίθενται στο νερό αποτελεί ένα σημαντικό και βασικό δείκτη της ποιότητας του νερού.

Η οξίνιση επηρεάζει τα υδατικά συστήματα σε όλα τα επίπεδα και έχει προφανείς επιπτώσεις στις κοινότητες των φυτών και των ζώων. Οι υδρόβιοι οργανισμοί επηρεάζονται τόσο άμεσα, λόγω της δημιουργίας τοξικών συνθηκών, όσο και έμμεσα, λόγω της μείωσης των ευαίσθητων σε όξινες συνθήκες ειδών που αποτελούν τροφή για άλλα είδη. Έτσι υποβαθμίζεται η βιοποικιλότητα των υδατικών συστημάτων. Σε υδατικά συστήματα με pH μικρότερο από 5 γενικά δεν συναντιούνται πολλά είδη ψαριών (Γεράκης & Τσιούρης, 1989).

Η τιμή της ενεργού οξύτητας επηρεάζει τη γεύση του νερού και σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα του πόσιμου νερού (Ayers & Westcot 1994) πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 7 και 8,5 για πόσιμο νερό. Για τους υδρόβιους οργανισμούς η τιμή του πρέπει να βρίσκεται μεταξύ 6 και 9 και για το νερό άρδευσης μεταξύ 6,5 και 8,4. Γενικά οι επιπτώσεις της μείωσης του pH συνοψίζονται στα εξής (WHO 1984, European Union Directive 2000/60/EC 2002):

- **Σε ότι αφορά την πανίδα,** νερό με ενεργό οξύτητα κάτω από 4 προκαλεί το θάνατο όλων των σπονδυλωτών, μερικών ασπόνδυλων και πολλών μικροοργανισμών.

- Σε ότι αφορά τη διάβρωση, νερό με όξινο pH (<7) προκαλεί διάβρωση πολλών υλικών. Μερικά προϊόντα διάβρωσης είναι τοξικά για τους υδρόβιους οργανισμούς.
- Σε ότι αφορά τη χλωρίδα, νερό με pH χαμηλότερο από 4,5 μπορεί να βλάψει τους φυτικούς οργανισμούς είτε απευθείας είτε έμμεσα. Οι έμμεσες συνέπειες προκύπτουν από την απελευθέρωση τρισθενών ιόντων Αργιλίου και Σιδήρου, που οι υψηλές τους συγκεντρώσεις είναι και τοξικές.

2.3.6 Δυναμικό Οξειδοαναγωγής (Redox Potential)

Η λέξη Redox είναι συντομογραφία των λέξεων Reduction - Oxidation (αναγωγή-οξείδωση). Το δυναμικό οξειδοαναγωγής προσδιορίζει τη δυνατότητα μιας ουσίας να προσδίδει ή να λαμβάνει ηλεκτρόνια. Στο υδατικό περιβάλλον είναι ένα μέτρο για τη μέτρηση της συγκέντρωσης των οξειδωτικών και αναγωγικών ουσιών, μέσα στο νερό. Η τιμή του επηρεάζεται τόσο από το pH όσο και από τη θερμοκρασία. Ο τύπος υπολογισμού του δυναμικού οξειδοαναγωγής είναι:

$$E_H = \frac{2,3RT}{nF} \cdot \log K \quad (2.2)$$

Όπου: E_H = Redox Potential (V) (σε σχέση με ένα φυσιολογικό ηλεκτρόδιο υδρογόνου) κάτω από φυσιολογικές συνθήκες (σύνολο δραστηριοτήτων = 1, $P_{H_2} = 1 \text{ atm}$, $\{H^+\} = 1M$)

$$F = 1 \text{ faraday } (=96490 \cdot \text{mol}^{-1})$$

n = αριθμός ανταλλαγμένων ηλεκτρονίων

$$R = \text{σταθερά αερίων } (=8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$$

T = θερμοκρασία (K)

$$2,3RT/F = 0.059 \text{ V (στους } 25 \text{ }^\circ\text{C)}$$

Το δυναμικό οξειδοαναγωγής, αποτελεί την αναλογία μεταξύ των οξειδωτικών και των αναγωγικών διεργασιών. Είναι ένα μέτρο σύγκρισης που μας δίνει πληροφορίες για τις οξειδοαναγωγικές διεργασίες μέσα στα ύδατα. Για θετικές τιμές του Redox, επικρατούν οι αερόβιες συνθήκες και λαμβάνει χώρα οξείδωση με τη βοήθεια των αερόβιων οργανισμών, ενώ για αρνητικές τιμές του Redox, επικρατούν οι αναερόβιες συνθήκες και λαμβάνουν χώρα οι αναγωγικές διεργασίες με τη βοήθεια των αναερόβιων οργανισμών.

Η πτώση του διαλυμένου οξυγόνου στα υδατικά σώματα ενισχύει τη δράση των αναγωγικών διεργασιών, οι οποίες σε ότι αφορά τις θρεπτικές ενώσεις, όπως για παρά-

δειγμα τα νιτρικά αποσυντίθενται γρήγορα σε νιτρώδη άλατα και αμμωνία, που είναι τοξική, συμβάλλοντας στην κακή ποιότητα των υδάτων. Οι αρνητικές επιπτώσεις αυτών των παραγόντων μπορούν να μετριαστούν από την παρουσία του διαλυμένου οξυγόνου και του όζοντος, παράγοντες οι οποίοι συμβάλουν στην αύξηση των τιμών του Redox καθώς είναι οξειδωτικοί.

2.3.7 Στάθμη νερού

Η στάθμη του νερού (H) μετριέται σε εκατοστά (cm) και στο συγκεκριμένο τηλεμετρικό σύστημα δείχνει το βάθος του νερού στο σημείο μέτρησης. Αποτελεί σημαντική ποσοτική παράμετρο ενός ποταμού ή λίμνης, καθώς σε συνδυασμό με γεωμετρικά στοιχεία και ποσοτικά δεδομένα του ποταμού ή της λίμνης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου.

Η παροχή του νερού των υδατορευμάτων αλλάζει συνεχώς, από μέρα σε μέρα, ή ακόμα από λεπτό σε λεπτό. Οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την παροχή του νερού είναι: 1) η βροχή, η οποία αυξάνει τη στάθμη του νερού των ποταμών ακόμα και αν έχει βρέξει στα ορεινά τμήματα της λεκάνης απορροής, μακριά από τη θέση που παρατηρούμε τη ροή, 2) η τήξη του χιονιού, συνήθως τους τελευταίους μήνες του χειμώνα, 3) οι αντλήσεις - εκτροπές νερού για αρδευτικούς – υδρευτικούς και βιομηχανικούς σκοπούς και 4) η διοχέτευση νερών αποβλήτων μετά από επεξεργασία τους σε βιολογικούς καθαρισμούς.

Η στάθμη των μεγάλων ποταμών εμφανίζει πιο σταθερή ροή και αλλάζει πιο αργά σε σχέση με τη στάθμη των μικρών χειμαρικής ροής, καθ' ότι τα μεγαλύτερα ποτάμια έχουν μεγάλη λεκάνη απορροής και αντιδρούν με μικρότερους βαθμούς απόκρισης σε καταιγίδες και βροχές (Αντωνόπουλος 2010). Σε μια μικρή λεκάνη, η στάθμη του ποταμού θα ανέλθει και θα κατέλθει μέσα σε μερικά λεπτά ή ώρες. Στα μεγάλα ποτάμια κάτι τέτοιο μπορεί να πάρει μέρες και οι πλημμύρες μπορεί να διαρκέσουν πολύ (Αντωνόπουλος & Τσιούρης 1991). Εξαρτάται βέβαια και από τις χρήσεις γης στη λεκάνη απορροής και από το γεγονός εάν έχει καταστροφές από πυρκαγιές κ.ά.

Το επίπεδο της στάθμης του νερού σε μια λιμνοθάλασσα, εξαρτάται από το ποσό του εισερχόμενου ύδατος, την ανάμιξη και απόθεση των φερτών υλικών περιμετρικά και στον πυθμένα, αλλά και τις διόδους επικοινωνίας με τη θάλασσα και τους χειμάρρους του υδρογραφικού δικτύου που εκρέουν σ' αυτή. Εξαρτάται ακόμη από τις παλίρροιας, την απορροή, τις μετεωρολογικές συνθήκες, τα κατακρημνίσματα είτε αυτά είναι

έντονα με τη μορφή της καταιγίδας είτε όχι, την κυματική δράση λόγω του ανέμου και λόγω των περιοδικών ταλαντώσεων της θάλασσας, και τέλος από τις αλλαγές στη θερμοκρασία και την πυκνότητα των υδάτων (Παπαζαφειρίου & Αντωνόπουλος 1991).

2.4 Στοχαστική Ανάλυση χρονικών σειρών

Χρονική σειρά είναι μια σειρά δεδομένων που λαμβάνονται σε διαδοχικές χρονικές στιγμές. Μπορεί να είναι συνεχής ή διακριτή. Συνεχείς χρονοσειρές ονομάζονται αυτές στις οποίες οι παρατηρούμενες τιμές x_t , $t \in [a, b]$ λαμβάνονται σε συνεχή χρόνο ενώ διακριτές ονομάζονται αυτές στις οποίες οι παρατηρούμενες τιμές x_t , $t = 1, 2, \dots, n$ λαμβάνονται σε διακριτό χρόνο και μάλιστα σε ισαπέχοντα χρονικά διαστήματα (Box & Jenkins 1976). Η τιμή της θερμοκρασίας των υδάτων ενός ποταμού ανά ημέρα ή η μέτρηση του διαλυμένου οξυγόνου ανά μήνα, αποτελούν παραδείγματα διακριτών χρονικών σειρών.

Μία χρονική σειρά μπορεί να είναι μονοδιάστατη, όταν οι μετρήσεις αναφέρονται σε ένα μόνο χαρακτηριστικό (π.χ. θερμοκρασία νερού ή αέρα, ηλεκτρική αγωγιμότητα κ.ά.), μπορεί να είναι όμως και πολυδιάστατη, όταν οι μετρήσεις καταγράφουν κατά την ίδια χρονική στιγμή πολλά διαφορετικά χαρακτηριστικά (π.χ. στον Π.Σ. Νέστο καταγράφονται οι τιμές 6 παραμέτρων την ίδια χρονική στιγμή) (Wei 2005).

Στην παρούσα διατριβή όλες οι μετρήσεις που υπάρχουν για τις διάφορες παραμέτρους, αποτελούν διακριτές χρονοσειρές στις οποίες με x_t παριστάνεται η παρατήρηση τη χρονική στιγμή t και είναι μονοδιάστατες και διδιάστατες.

Στη στατιστική, στοχαστική διαδικασία $\{X_t\}$, $t = -\infty, \dots, +\infty$ είναι μία ακολουθία τυχαίων μεταβλητών που αναφέρονται στο χρόνο t . Συνεπώς η χρονική σειρά είναι μια πεπερασμένη στοχαστική διαδικασία. Μια πραγματοποίηση αυτής της στοχαστικής διαδικασίας είναι το σύνολο των παρατηρήσεων:

$$\{\dots X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_t = x_t, X_{t+1} = x_{t+1}, \dots\} \quad (2.3)$$

Με την ορολογία της κλασικής στατιστικής, η έννοια της στοχαστικής διαδικασίας είναι ανάλογη της έννοιας του πληθυσμού, ενώ η έννοια της χρονικής σειράς είναι ανάλογη της έννοιας του δείγματος (Knill 2009).

Υπάρχουν πολλοί λόγοι για να μελετηθούν οι χρονικές σειρές. Ένας λόγος μπορεί να είναι η ανίχνευση μιας εποχικότητας, ένας άλλος η διαπίστωση μιας τάσης στα δεδομένα ή η δημιουργία ενός μαθηματικού μοντέλου που να περιγράφει τη συμπεριφορά

της χρονικής σειράς στο παρελθόν και να προβλέπει μελλοντικές τιμές και άλλοι. Η δυνατότητα επιτυχών προβλέψεων είναι προφανώς πολύ σημαντική και πολύ χρήσιμη σε κάθε πεδίο έρευνας. Η διαπίστωση μιας αυξητικής τάσης της ρύπανσης ενός ποταμού π.χ., αποτελεί αιτία λήψης μέτρων και αντιμετώπισής της.

Στις επόμενες παραγράφους αυτού του κεφαλαίου θα περιγραφούν α) τα βασικά εργαλεία τα οποία χρησιμοποιούνται στην ανάλυση μονοδιάστατων και διδιάστατων χρονοσειρών, β) τα κυριότερα γραμμικά μοντέλα, γ) τα κριτήρια επιλογής μοντέλου, δ) η μέθοδος των Box και Jenkins για την προσαρμογή βέλτιστου μοντέλου σε δεδομένες χρονικές σειρές και τέλος ε) η χρήση νευρωνικών δικτύων.

2.4.1 Έλεγχος προσαρμογής σε θεωρητική κατανομή (Kolmogorov-Smirnov test)

Με τη διερευνητική ανάλυση, γίνεται δυνατή η περιγραφή της εμπειρικής κατανομής των δεδομένων. Τα αριθμητικά στατιστικά μέτρα δηλαδή τα μέτρα κεντρικής τάσης (μέση τιμή, διάμεσος, ποσοστιαία σημεία), τα μέτρα διασποράς (διασπορά, τυπική απόκλιση, εύρος) και οι γραφικές παραστάσεις, βοηθούν προς αυτήν την κατεύθυνση (Helsel & Hirsch 1992).

Η κατανομή πιθανότητας εμφάνισης των τιμών κάθε μεταβλητής, με την προϋπόθεση ότι οι τιμές αυτές είναι τυχαίες και ανεξάρτητες, περιγράφεται από τις θεωρητικές κατανομές πιθανότητας. Οι κατανομές πιθανότητας και κυρίως η κατανομή πιθανότητας της Κανονικής κατανομής, προσεγγίζει ικανοποιητικά πολλά φαινόμενα, γεγονός που δίνει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην εκτίμηση της κανονικότητας ή όχι των μεταβλητών. Ο έλεγχος καταλληλότητας προσαρμογής γίνεται με δοκιμασία X^2 ($X^2 - test$) ή με δοκιμασία Kolmogorov – Smirnov.

Για τον έλεγχο προσαρμογής των δεδομένων στην κανονική και στην λογαριθμοκανονική κατανομή στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκε το test Kolmogorov-Smirnov, για στάθμη σημαντικότητας $\alpha = 0.05$ ή 5%. Η μηδενική υπόθεση H_0 και η εναλλακτική H_1 του ελέγχου, ορίζονται ως:

- $H_0 : F(x) = F_0(x)$ όπου η $F_0(x)$ είναι η κανονική ή η λογαριθμοκανονική κατανομή και τα δεδομένα προσαρμόζονται στην υπό έλεγχο κατανομή.
- $H_1 : F(x) \neq F_0(x)$ τα δεδομένα δεν προσαρμόζονται στην εξεταζόμενη κατανομή.

Αν $S_n(x)$ είναι η δειγματική αθροιστική κατανομή του τυχαίου δείγματος x_1, x_2, \dots, x_n , υποθέτοντας ότι οι τιμές του δείγματος έχουν διαταχθεί κατ' αύξουσα σειρά, η

δειγματική αθροιστική κατανομή λαμβάνεται προσθέτοντας τις διαδοχικές συχνότητες k_i/n , για κάθε παρατήρηση x_i . Εάν ισχύει η μηδενική υπόθεση, οι αποκλίσεις μεταξύ δειγματικής και θεωρητικής κατανομής, πρέπει να είναι μικρές. Το test Kolmogorov-Smirnov χρησιμοποιεί τη μεγαλύτερη από αυτές τις αποκλίσεις, σαν ένα μέτρο ελέγχου της καλής προσαρμογής (Marques de Sa 2007).

Ως στατιστικό του ελέγχου ορίζεται το $D_n = \max |F_0(x) - S_n(x)|$ για μέγεθος δείγματος n . Η μηδενική υπόθεση H_0 απορρίπτεται σε στάθμη σημαντικότητας α , αν $D_n > d_{n,\alpha}$, όπου $d_{n,\alpha}$ τιμή κρίσεως η οποία βρίσκεται από τους αντίστοιχους πίνακες (Marques de Sa 2007).

2.4.2 Στασιμότητα μιας χρονικής σειράς

Μια πολύ σημαντική ιδιότητα των χρονικών σειρών είναι η στασιμότητα. Μια χρονική σειρά λέγεται στάσιμη εάν κανένα από τα χαρακτηριστικά της δεν μεταβάλλεται συναρτήσει του χρόνου. Η έλλειψη στασιμότητας μπορεί να οφείλεται στην παρουσία τάσης σε σχέση με τον χρόνο ή στην αλλαγή μεταβλητότητας συναρτήσει του χρόνου ή ακόμη στην ύπαρξη εποχικότητας (Box *et al.* 1994, Wei 2005).

Μια χρονική σειρά $\{x_t\}$ θα λέγεται στάσιμη (δεύτερης τάξης) εάν η μέση τιμή και οι συνδιασπορές (συμμεταβλητότητες) μεταξύ X_t και X_{t+k} για οποιοδήποτε k , είναι ανεξάρτητες του χρόνου t είναι όμως δυνατόν να εξαρτώνται από το k , δηλαδή:

$$EX_t = \mu, \quad Var(X_t) = \sigma_x^2 \quad \forall t \text{ και} \quad (2.4)$$

$$Cov(X_t, X_{t+k}) = \gamma_k \quad \forall t, k. \quad (2.5)$$

2.4.3 Τάση και εποχικότητα στις χρονοσειρές

Οι υδρολογικές χρονικές σειρές παρουσιάζουν τάση, εποχικότητα, αυτοσυσχέτιση ή μη κανονικότητα. Τα χαρακτηριστικά αυτά ονομάζονται συστατικά (components) και οι χρονικές σειρές θα πρέπει να αναλύονται στα συστατικά τους.

2.4.3.1 Στατιστικοί έλεγχοι για ανάλυση τάσης

Η διερεύνηση της τάσης των ποιοτικών παραμέτρων του νερού παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τις περιβαλλοντικές επιστήμες. Η αντιμετώπιση της αύξησης της ρύπανσης, της ελάττωσης της παροχής ή της αύξησης της θερμοκρασίας π.χ., είναι

προβλήματα μέγιστης σημασίας για την αιφορική διαχείριση των υδατινών συστημάτων. Σκοπός του ελέγχου των τάσεων είναι να προσδιοριστεί αν οι καταγεγραμμένες για μια χρονική περίοδο μετρήσεις μιας τυχαίας μεταβλητής π.χ. της συγκέντρωσης μιας χημικής ουσίας, αυξάνονται ή μειώνονται, δηλαδή αν η ποιότητα καλυτερεύει ή χειροτερεύει με την πάροδο του χρόνου. Με στατιστικούς όρους, αυτό σημαίνει ότι ζητείται να προσδιοριστεί αν η μέση τιμή της κατανομής του πληθυσμού από τον οποίο προέρχονται τα δεδομένα, μεταβάλλεται συναρτήσει του χρόνου και επιπλέον να περιγραφεί και να ελεγχθεί ο ρυθμός της μεταβολής αυτής (Antonopoulos *et al.* 2001, Psilovikos *et al.* 2006).

Η ύπαρξη τάσης σε μια χρονοσειρά ανήκει στα προβλήματα ύπαρξης μη στασιμότητας. Σε πολλά φαινόμενα η αύξηση ή μείωση της ολικής τάσης είναι προφανής. Ενδιαφέρει όμως, για την αξιολόγηση ενός φαινομένου, τί γίνεται σε σχέση με την τάση και σε μικρά χρονικά διαστήματα. Σε μια χρονοσειρά, όταν η τάση μπορεί να παρασταθεί με μια συνάρτηση του χρόνου $\mu_t = f(t)$, τότε ονομάζεται καθοριστική ή προσδιοριστική τάση (Deterministic trend). Η συνάρτηση αυτή είναι συνήθως πολυωνυμική και αν είναι πρώτου βαθμού, τότε είναι η γραμμική. Σε τέτοια περίπτωση ο έλεγχος κλίσης της ευθείας δίνει πληροφορίες για το ρυθμό μεταβολής της τιμής της μεταβλητής στη μονάδα του χρόνου. Υπάρχει όμως περίπτωση η τάση σε μια χρονοσειρά να μη μπορεί να περιγραφεί από μια γνωστή συνάρτηση του χρόνου, δηλαδή να παρουσιάζει μεταβολές συναρτήσει του χρόνου, αλλά με όχι καθορισμένο τρόπο. Η τάση αυτή λέγεται στοχαστική (Stochastic trend).

Ο έλεγχος είναι ιδιαίτερα δύσκολος στην περίπτωση της διερεύνησης της τάσης στις χρονοσειρές των ποιοτικών παραμέτρων των υδατικών πόρων οι οποίες χαρακτηρίζονται από ασύμμετρες κατανομές, απομονωμένες τιμές, εποχικότητα, ελλείπουσες τιμές και κυρίως από σειριακή συσχέτιση-αυτοσυσχέτιση (Hirsch *et al.* 1982), στοιχεία τα οποία μπορεί να «νοθεύουν» τον υπολογισμό και τον έλεγχο της τάσης, ιδίως όταν αυτή είναι πολύ μικρή.

Ανεξάρτητα από τη μέθοδο (διαδικασία) που χρησιμοποιείται για την ανάλυση της τάσης, είναι απαραίτητο να προηγηθεί ο έλεγχος ύπαρξης τάσης (Hirsch *et al.* 1991). Ο έλεγχος μπορεί να πραγματοποιηθεί με παραμετρικούς ή μη παραμετρικούς ελέγχους:

α) Παραμετρικοί έλεγχοι:

- 1) Διερεύνηση γραμμικής τάσης με προσαρμογή ευθείας.

Προσαρμόζεται στις παρατηρήσεις y_t το απλό γραμμικό μοντέλο $y_t = a + \beta \cdot t$, με ανεξάρτητη μεταβλητή το χρόνο t (σε ημέρες). Η σημαντικότητα της κλίσης β της ευθείας ελέγχεται βάσει της μηδενικής υπόθεσης $H_0: \beta = 0$ (δεν υπάρχει κλίση), ως προς την εναλλακτική $H_1: \beta \neq 0$ (υπάρχει κλίση) και γίνεται δεκτή, όταν:

$$\frac{|\hat{\beta}|}{S_{\beta}} < t_{n-2; \alpha/2} \quad (2.6)$$

όπου:

$$\hat{\beta} = \frac{\sum_{t=1}^n (t - \bar{t}) y_t}{\sum_{t=1}^n (t - \bar{t})^2} \quad \text{ο εκτιμητής ελαχίστων τετραγώνων της κλίσης της ευθείας}$$

$$S_{\beta} = \left[\frac{12 \sum_{t=1}^n (y_t - \hat{a} - \hat{\beta}t)^2}{(n-2)n(n^2-1)} \right]^{1/2} \quad \text{η δειγματική τυπική της απόκλιση}$$

$t_{n-2; \alpha/2}$ η τιμή της t-κατανομής για $n-2$ βαθμούς ελευθερίας και στάθμη σημαντικότητας α

n το πλήθος των μετρήσεων

β) Μη παραμετρικοί έλεγχοι:

1) Έλεγχος Spearman (Spearman's rank-correlation test).

Ο συντελεστής συσχέτισης Spearman (Spearman 1904) είναι ένα μη παραμετρικό μέτρο της συσχέτισης μεταξύ δύο μεταβλητών. Αν η μία από τις μεταβλητές είναι οι μετρήσεις y_t και η άλλη ο χρόνος t , τότε ο έλεγχος συσχέτισης ισοδυναμεί με έλεγχο τάσης.

Έστω ρ_{sp} ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ των μεταβλητών y_t και t τότε η μηδενική υπόθεση $H_0: \rho_{sp} = 0$ (δεν υπάρχει τάση), έναντι της εναλλακτικής $H_1: \rho_{sp} \neq 0$ (υπάρχει τάση), ελέγχεται με χρήση του στατιστικού:

$$t = \hat{\rho}_{sp} \cdot \left(\frac{n-2}{1 - \hat{\rho}_{sp}^2} \right)^{1/2} \quad (2.7)$$

το οποίο ακολουθεί *Student's t* - κατανομή με $n-2$ βαθμούς ελευθερίας.

Όπου $\hat{\rho}_{sp} = 1 - \frac{6 \cdot \sum_{i=1}^n D_i^2}{n(n^2 - 1)}$ ο δειγματικός συντελεστής συσχέτισης του Spearman

Kt_i η τάξη της μεταβλητής t

Ky_i η τάξη της μεταβλητής y_i

$D_i = Kt_i - Ky_i$ η διαφορά των τάξεων των μεταβλητών t και y_i

2) Έλεγχος Mann-Kendall

Ο μη παραμετρικός έλεγχος Mann-Kendall (Mann 1945, Kendall 1970) ελέγχει την ύπαρξη τάσης χωρίς καθορισμό της μορφής της (γραμμική ή μη γραμμική). Σε μια χρονική σειρά y_t υπολογίζεται ο αριθμός m_i των όρων y_j της σειράς που προηγούνται κάθε όρου y_i ($i > j$) έτσι ώστε $y_j < y_i$. Ο στατιστικός έλεγχος d_i δίνεται από το άθροισμα $d_i = \sum_j m_i$ και ακολουθεί ασυμπτωτικά κανονική κατανομή, με μέση τιμή $E(d_i) = i(i-1)/4$ και διασπορά $\text{var}(d_i) = i(i-1)(2i+5)/72$.

Υπολογίζονται όλα τα $u(d_i)$, $1 \leq i \leq n$ όπου $u(d_i) = [d_i - E(d_i)] / \sqrt{\text{var}(d_i)}$ και η μηδενική υπόθεση $H_0: \beta = 0$ (δεν υπάρχει τάση) απορρίπτεται όταν $|u(d_n)| > z_\alpha$, όπου z_α η τιμή της κανονικής κατανομής για στάθμη σημαντικότητας α .

Η δοκιμή Kendall έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό του χρονικού σημείου εμφάνισης τάσης.

2.4.3.2 Διερεύνηση στοχαστικής τάσης

Η διερεύνηση στοχαστικής τάσης στην ανάλυση χρονοσειρών γίνεται με τη βοήθεια της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης και έλεγχο σημαντικότητας των αυτοσυσχετίσεων (Παρ. 2.4.4) και με οποιοδήποτε έλεγχο αναζήτησης μοναδιαίας ρίζας (Unit root test). Στην δεύτερη περίπτωση ανήκει ο επαυξημένος έλεγχος Dickey-Fuller.

1) Ο επαυξημένος έλεγχος Dickey-Fuller (ADF)

Για τον επαυξημένο έλεγχο Dickey-Fuller εξετάζεται η γενική μορφή του μοντέλου (2.8) και δίνεται η σημαντικότητα του κάθε συντελεστή δ_i και β_i .

$$y_t = \delta_0 + \delta_1 t + \delta_2 y_{t-1} + \sum_{i=1}^{\mu} \beta_i \Delta y_{t-i} + e_t \quad (2.8)$$

όπου:

δ_0 ο σταθερός όρος

δ_1 ο συντελεστής ελέγχου της κλίσης της γραμμικής τάσης

δ_2 ο συντελεστής ελέγχου της στοχαστικής τάσης ή της μοναδιαίας ρίζας

Δy_{t-i} οι πρώτες διαφορές των παρατηρήσεων υστέρησης i

β_i οι συντελεστές των πρώτων διαφορών υστέρησης i

e_t τα σφάλματα

Η μηδενική υπόθεση H_0 η οποία ελέγχεται, είναι ότι η χρονική σειρά έχει μοναδιαία ρίζα, δηλαδή έχει στοχαστική τάση ($\delta_2 = 1$), δεν έχει σταθερό όρο ($\delta_0 = 0$) και δεν έχει γραμμική τάση ($\delta_1 = 0$). Διακρίνονται οι εξής περιπτώσεις:

- i. $\delta_1 = 0$ και $\delta_2 = 1$, σημαίνει ότι υπάρχει στοχαστική τάση, η σειρά είναι μη στάσιμη, ενώ δεν υπάρχει γραμμική τάση.
- ii. $\delta_1 \neq 0$ και $\delta_2 \neq 1$, σημαίνει ότι υπάρχει προσδιοριστική τάση, δεν υπάρχει στοχαστική τάση και η χρονοσειρά κινείται ανοδικά ή καθοδικά ανάλογα με το πρόσημο του δ_1
- iii. $\delta_1 \neq 0$ και $\delta_2 = 1$, σημαίνει ότι η y_t έχει και προσδιοριστική και στοχαστική τάση, δηλαδή μακροχρόνια κινείται ανοδικά ή καθοδικά, ανάλογα με το πρόσημο του δ_1 και οι διακυμάνσεις της τάσης σε μικρά χρονικά διαστήματα είναι σημαντικές.

Οι τιμές κρίσεως για τον έλεγχο ADF λαμβάνονται από τους πίνακες Dickey-Fuller (Dickey-Fuller 1979). Ο έλεγχος αυτός σε περίπτωση αποδοχής της προσδιοριστικής τάσης, ισχυροποιεί τον έλεγχο προσαρμογής γραμμικού μοντέλου (παράγραφος 2.4.3.1), αποφεύγοντας το πρόβλημα της κίβδηλης παλινδρόμησης. Δεδομένου ότι είναι ένας σύνθετος έλεγχος, ο οποίος πρώτα ελέγχει την ύπαρξη στοχαστικής τάσης και δεδομένου του αποτελέσματος, πραγματοποιεί το δεύτερο έλεγχο γραμμικής τάσης. Σε περίπτωση διαφοροποίησης των αποτελεσμάτων γίνονται δεκτά τα συμπεράσματα του ελέγχου ADF.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε σε πρώτη φάση η προσαρμογή ευθείας ελαχίστων τετραγώνων για τον έλεγχο της γραμμικής μακροχρόνιας τάσης (Δαμιανού & Κούτρας 1991). Επειδή όμως η κλίση της ευθείας στις περισσότερες περιπτώσεις είχε

τιμές πολύ μικρές και σε κάποιες περιπτώσεις τα εξαγόμενα συμπεράσματα ήταν ασαφή, χρησιμοποιήθηκε σε δεύτερη φάση ο επαυξημένος-πλήρης έλεγχος των Dickey - Fuller (ADF – Augmented Dickey-Fuller test) (Dickey-Fuller 1979), για να ελεγχθεί συγχρόνως η ύπαρξη γραμμικής και στοχαστικής τάσης.

2.4.3.3 Ανάλυση εποχικότητας

Εάν κάποια παράμετρος παρουσιάζει εποχικότητα, βάσει της θεωρίας των χρονοσειρών (Κουγιουμτζής 2012) πρέπει πρώτα να απαλειφθεί και μετά να γίνει έλεγχος τάσης. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι απαλοιφής της περιοδικότητας ή εποχικότητας όταν αυτή είναι γνωστή:

- α) Με χρήση φίλτρου κινούμενου μέσου τάξης ίσης με την εποχικότητα. Εάν s η εποχικότητα, όπου $s = 2k + 1$, τότε εφαρμόζοντας τη σχέση $m_t = \frac{1}{2k+1} \sum_{j=-k}^k y_{t+j}$ προκύπτει μια νέα χρονοσειρά y'_t , από την αφαίρεση της τιμής m_t από κάθε μία τιμή y_t , δηλαδή $y'_t = y_t - m_t$. Στη νέα αυτή χρονική σειρά ανιχνεύεται η τάση.
- β) Λαμβάνοντας διαφορές υστέρησης ίσης με την εποχικότητα ή s -διαφορές, δηλαδή $y'_t = y_t - y_{t-s}$.
- γ) Υπολογίζοντας τη μέση τιμή κάθε ημέρας για τα τέσσερα έτη (2004-2007) για τα οποία υπάρχουν δεδομένα και αφαιρώντας από τις τιμές των τεσσάρων αυτών ετών. Αυτόν τον μετασχηματισμό τον επαναλαμβάνουμε για όλες τις ημέρες του έτους. Εάν s_t η περιοδική χρονοσειρά του ετήσιου κύκλου, η νέα χρονοσειρά $y'_t = y_t - s_t$ είναι απαλλαγμένη εποχικότητας. Στη χρονοσειρά y'_t εφαρμόζεται έλεγχος τάσης.

Στην παρούσα μελέτη οι παράμετροι θερμοκρασία νερού και θερμοκρασία αέρα παρουσιάζουν ετήσια εποχικότητα ($s = 365$) η οποία ανιχνεύτηκε με χρήση περιοδογράμματος και για το λόγο αυτό έγινε πρώτα απαλοιφή εποχικότητας και ύστερα διερεύνηση τάσης.

Για να απαλειφθεί η εποχικότητα, εξομαλύνθηκε η χρονοσειρά λαμβάνοντας διαφορές υστέρησης ίσης με την περιοδικότητα ($s = 365$), γεγονός το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα την απαλοιφή του περιοδικού στοιχείου τάξης s . Στις χρονοσειρές οι οποίες προκύπτουν μετά την εξομάλυνση και των οποίων το μέγεθος είναι μικρότερο κατά s παρατηρήσεις, εφαρμόζονται οι έλεγχοι τάσης.

2.4.4 Συνάρτηση αυτοδιασποράς και αυτοσυσχέτισης

Ονομάζεται **συνάρτηση θεωρητικής αυτοδιασποράς** (AutoCovariance Function – ACVF) ως προς k μιας στάσιμης χρονικής σειράς $\{X_t\} t=1, \dots, n$, η ποσότητα:

$$\gamma_k = Cov(X_t, X_{t+k}) = Cov(X_{t-k}, X_t) \quad (2.9)$$

που είναι η συνδιασπορά της X_t με την X_{t+k} (ή της X_{t-k} με την X_t) όπου X_{t+k} η παρατήρηση η μετατοπισμένη ως προς το χρόνο κατά k χρονικά διαστήματα δηλαδή με υστέρηση k (Box *et al.* 1994, Wei 2005).

Ονομάζεται **συνάρτηση δειγματικής αυτοδιασποράς** (Sample AutoCovariance Function) υστέρησης k , η ποσότητα:

$$\hat{\gamma}_k = c_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \bar{x})(x_{i+k} - \bar{x}), \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2.10)$$

όπου $\bar{x} = \frac{x_1 + \dots + x_n}{n}$ η δειγματική μέση τιμή της χρονικής σειράς και $-n \leq k \leq n$.

Αποδεικνύεται ότι $\gamma_k = \gamma_{-k}$ και $\gamma_0 = \sigma_X^2$.

Είναι γνωστό από τη θεωρία πιθανοτήτων ότι ο συντελεστής συσχέτισης δύο τυχαίων μεταβλητών ορίζεται ως ο λόγος της συνδιασποράς τους προς το γινόμενο των τυπικών αποκλίσεων των δύο τυχαίων μεταβλητών:

$$\rho = \frac{Cov(X, Y)}{\sqrt{Var(X)}\sqrt{Var(Y)}} \quad (2.11)$$

Παίρνει τιμές από -1 έως 1 , εάν $\rho = -1$ ή $\rho = 1$ έχουμε πλήρη αρνητική ή θετική συσχέτιση αντίστοιχα, ενώ εάν $\rho > 0$ ή $\rho < 0$ υπάρχει θετική ή αρνητική συσχέτιση, η οποία είναι τόσο πιο ισχυρή, όσο πλησιάζουμε τις τιμές -1 και 1 . Όταν $\rho = 0$ συνεπάγεται ανεξαρτησία μεταξύ των δύο τυχαίων μεταβλητών. Ο συντελεστής αυτός είναι απαλλαγμένος μονάδων και δίνει μια καλή εικόνα της σχέσης μεταξύ των δύο τυχαίων μεταβλητών.

Στις χρονικές σειρές ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ της X_t και της X_{t+k} ονομάζεται συντελεστής αυτοσυσχέτισης υστέρησης k . Ονομάζεται έτσι διότι εκφράζει τη συσχέτιση μεταξύ της ίδιας τυχαίας μεταβλητής σε δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές, και υστέρησης k , διότι k είναι η μετακίνηση κατά μήκος του άξονα του χρόνου.

Ονομάζεται **συνάρτηση θεωρητικής αυτοσυσχέτισης** (AutoCorrelation Function - ACF) υστέρησης k (μιας στάσιμης χρονικής σειράς) η ποσότητα:

$$\rho_k = \frac{\gamma_k}{\gamma_0}, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2.12)$$

Βάσει του ορισμού συνεπάγεται $\rho_0 = 1$ και $\rho_k = \rho_{-k}$.

Ονομάζεται **δειγματική συνάρτηση αυτοσυσχέτισης** (Sample AutoCorrelation Function) η ποσότητα:

$$\hat{\rho}_k = r_k = \frac{c_k}{c_0}, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2.13)$$

Έχει αποδειχθεί ότι για μεγάλο πλήθος παρατηρήσεων: $r_k \sim N(\rho_k, \text{Var}(r_k))$

όπου:

$$\text{Var}(r_k) \cong \frac{1}{N} \sum_{m=-\infty}^{\infty} (\rho_m^2 + \rho_{m+k} \rho_{m-k} + 2\rho_k^2 \rho_m^2 - 4\rho_k \rho_m \rho_{m-k}) \approx \frac{1}{n} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \rho_m^2 \quad (2.14)$$

(Bartlett 1946) ή με την προϋπόθεση ότι η στοχαστική διαδικασία είναι λευκός θόρυβος, δηλαδή μια ακολουθία ασυσχέτιστων τυχαίων μεταβλητών κάθε μία από τις οποίες έχει μέση τιμή μηδέν, ισχύει:

$$\text{Var}(r_k) \approx \frac{1}{n} \quad (2.15)$$

Οι Ljung και Box (1978) έχουν δώσει έναν ακριβέστερο τύπο υπολογισμού της διασποράς των αυτοσυσχετίσεων. Το γράφημα των δειγματικών αυτοσυσχετίσεων ονομάζεται διάγραμμα αυτοσυσχετίσεων (correlogram) και είναι ένα από τα σημαντικότερα γραφήματα στην ανάλυση των χρονικών σειρών.

Για τη δειγματική συνάρτηση αυτοσυσχέτισης παρατηρείται ότι για μεγάλες τιμές του k , το άθροισμα περιλαμβάνει λίγους όρους και έτσι η εκτίμηση έχει μεγάλο στατιστικό σφάλμα. Στην πράξη χρησιμοποιούνται με μεγαλύτερη αξιοπιστία τα r_k για $k < \frac{n}{2}$.

2.4.5 Συνάρτηση μερικής αυτοσυσχέτισης

Η **συνάρτηση μερικής αυτοσυσχέτισης** (Partial AutoCorrelation Function - PACF), ορίζεται από τη σχέση:

$$\phi_{kk} = \text{Corr}(x_t x_{t+k} / x_{t+1}, \dots, x_{t+k-1}) \quad k = 1, 2, \dots \quad (2.16)$$

δηλ. είναι ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ x_t και x_{t+k} μη προσμετρώντας τη συσχέτιση με τις $x_{t+1}, \dots, x_{t+k-1}$.

Η συνάρτηση μερικής αυτοσυσχέτισης θεωρούμενη ως ο συντελεστής παλινδρόμησης της τελευταίας «μεταβλητής» που υπεισέρχεται στο AR(k) μοντέλο, περιγράφει τη σημαντικότητα της τελευταίας αυτής μεταβλητής. Δηλαδή, αν ο συντελεστής ϕ_{kk} είναι σημαντικά διάφορος του μηδενός, τότε το μοντέλο k τάξης, είναι προτιμότερο από το μοντέλο τάξης k-1.

Επομένως ο υπολογισμός των ϕ_{kk} έχει πρακτική σημασία στην εκτίμηση της τάξης του μοντέλου. Πράγματι αν η τάξη του μοντέλου που προσαρμόζεται καλύτερα στα δεδομένα είναι p, τότε ισχύει:

$$\phi_{kk} \neq 0 \text{ για } k \leq p$$

$$\phi_{kk} = 0 \text{ για } k > p$$

Στην πράξη υπολογίζεται η δειγματική συνάρτηση μερικής αυτοσυσχέτισης για $k = 1, 2, \dots$ η οποία με τη βοήθεια των εξισώσεων Yule-Walker (Yule 1927, Walker 1931) αποδεικνύεται ότι δίδεται από τον τύπο:

$$\hat{\phi}_{kk} = \frac{\begin{vmatrix} 1 & \hat{\rho}_1 & \hat{\rho}_2 & \dots & \hat{\rho}_{k-2} & \hat{\rho}_1 \\ \hat{\rho}_1 & 1 & \hat{\rho}_1 & \dots & \hat{\rho}_{k-3} & \hat{\rho}_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \hat{\rho}_{k-1} & \hat{\rho}_{k-2} & \hat{\rho}_{k-3} & \dots & \hat{\rho}_1 & \hat{\rho}_k \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & \hat{\rho}_1 & \hat{\rho}_2 & \dots & \hat{\rho}_{k-2} & \hat{\rho}_{k-1} \\ \hat{\rho}_1 & 1 & \hat{\rho}_1 & \dots & \hat{\rho}_{k-3} & \hat{\rho}_{k-2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \hat{\rho}_{k-1} & \hat{\rho}_{k-2} & \hat{\rho}_{k-3} & \dots & \hat{\rho}_1 & 1 \end{vmatrix}} \quad (2.17)$$

και ελέγχεται ως προς τη σημαντικότητα της.

Ο Quenouille (1949) και άλλοι απέδειξαν ότι:

$$\hat{\phi}_{kk} \sim N\left(0, \frac{1}{n}\right) \text{ για } k \geq p+1. \quad (2.18)$$

Συνεπώς ως απορριπτική περιοχή της μηδενικής υπόθεσης $H_0 : \phi_{kk} = 0$, (με εναλλακτική $H_1 : \phi_{kk} \neq 0$) ορίζεται η:

$$|\hat{\phi}_{kk}| > z_{\alpha/2} / \sqrt{n} \quad (2.19)$$

όπου n το πλήθος των παρατηρήσεων της χρονικής σειράς.

2.4.6 Συνάρτηση διασυσχέτισης

Για την εκτίμηση της σχέσης που συνδέει δύο χρονικές σειρές, καθοριστικό ρόλο έχει η **συνάρτηση διασυσχέτισης** (Cross Correlation Function - CCF). Η συνάρτηση διασυσχέτισης είναι ένα χρήσιμο μέτρο της ισχύος και της κατεύθυνσης της συσχέτισης ανάμεσα σε δύο τυχαίες μεταβλητές και μάλιστα με χρονική υστέρηση. Η συνάρτηση συνδιασποράς μεταξύ των x_t και y_t υστέρησης k , δίνεται από τη σχέση:

$$\gamma_{xy}(k) = E[(x_t - \mu_x)][(y_{t+k} - \mu_y)] \quad (2.20)$$

για $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, όπου $\mu_x = E(x_t)$ και $\mu_y = E(y_t)$.

Τυποποιώντας την τελευταία σχέση παίρνουμε τη συνάρτηση διασυσχέτισης:

$$\rho_{xy}(k) = \frac{\gamma_{xy}(k)}{\sigma_x \sigma_y}, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (2.21)$$

όπου σ_x και σ_y είναι οι τυπικές αποκλίσεις των x_t και y_t αντίστοιχα.

Είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι η συνάρτηση συνδιασποράς $\gamma_{xy}(k)$ και η συνάρτηση διασυσχέτισης $\rho_{xy}(k)$ είναι γενίκευση των συναρτήσεων αυτοδιασποράς και αυτοσυσχέτισης διότι $\gamma_{xx}(k) = \gamma_x(k)$ και $\rho_{xx}(k) = \rho_x(k)$. Όμως, ενώ η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης $\rho_x(k)$ είναι συμμετρική δηλαδή $\rho_x(k) = \rho_x(-k)$, η συνάρτηση διασυσχέτισης $\rho_{xy}(k)$ δεν είναι συμμετρική $\rho_{xy}(k) \neq \rho_{xy}(-k)$, όπως προκύπτει αν παρατηρήσουμε ότι:

$$\gamma_{xy}(k) = E(x_t - \mu_x)(y_{t+k} - \mu_y) = E(y_{t+k} - \mu_y)(x_t - \mu_x) = \gamma_{yx}(-k) \neq \gamma_{xy}(-k)$$

Αυτό δικαιολογεί το γεγονός ότι η συνάρτηση CCF είναι «ένα μέτρο της ισχύος και της κατεύθυνσης της συσχέτισης». Πρέπει να σημειωθεί τέλος ότι ο ρόλος της συνάρτησης διασυσχέτισης είναι ιδιαίτερα σημαντικός στην εκτίμηση ενός μοντέλου μεταφοράς,

2.4.7 Στάσιμες στοχαστικές διαδικασίες

Όπως έχουμε αναφέρει, στοχαστική διαδικασία είναι το θεωρητικό μοντέλο μια πραγματοποίηση του οποίου πρέπει να είναι η χρονική σειρά. Σε αυτήν την παράγραφο

αναφέρονται οι συνήθεις στάσιμες στοχαστικές διαδικασίες που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση χρονικών σειρών. Αναλυτικότερα περιγράφονται τα αυτοπαλινδρομούμενα μοντέλα **Auto Regressive** $AR(p)$, τα κινούμενου μέσου **Moving Average** $MA(q)$ και τα μικτά μοντέλα $ARMA(p,q)$ (Box *et al.* 1994). Στα παρακάτω γίνεται η παραδοχή ότι η διαδικασία έχει μέση τιμή μηδέν γιατί η παραδοχή αυτή δεν επηρεάζει την εκτίμηση της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης. Ακόμη θα συμβολίζεται η στοχαστική διαδικασία με $\{X_t\}$ ενώ για τα σφάλματα θα ισχύει η συνήθης υπόθεση η οποία ισχύει για όλα τα στοχαστικά μοντέλα, ότι δηλαδή είναι ασυσχέτιστα με μέση τιμή μηδέν.

2.4.7.1 Αυτοπαλινδρομούμενη διαδικασία τάξης p

Αυτοπαλινδρομούμενη διαδικασία ή αυτοπαλινδρομούμενο μοντέλο τάξης p (**Auto****R**egressive model - $AR(p)$), λέγεται το μοντέλο που εκφράζεται από τη σχέση:

$$X_t = \phi_1 X_{t-1} + \phi_2 X_{t-2} + \dots + \phi_p X_{t-p} + a_t \quad (2.22)$$

$$\text{ή} \quad (1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p) X_t = a_t \quad (2.23)$$

$$\text{ή} \quad \phi(B) X_t = a_t \quad (2.24)$$

όπου: $\phi(B) = 1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p = 1 - \sum_{i=1}^p \phi_i B^i$ το αυτοπαλινδρομούμενο πολυώνυμο τάξης p ,

$\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p$ οι p άγνωστες παράμετροι του μοντέλου,

B ο τελεστής προς τα πίσω μετατόπισης $B^i X_t = X_{t-i}$ και

a_t τα σφάλματα του μοντέλου για τα οποία, όπως έχει αναφερθεί, ισχύει:

$$E(a_t) = 0 \quad \text{Var}(a_t) = \sigma_a^2 \quad (2.25)$$

Σε ένα αυτοπαλινδρομούμενο μοντέλο, η έκφραση της X_t είναι ένας γραμμικός συνδυασμός των τελευταίων πρόσφατων τιμών της ίδιας της διαδικασίας πλήθους p , δηλαδή των $X_{t-1}, X_{t-2}, \dots, X_{t-p}$, συν ο,τιδήποτε άλλο που δεν μπορεί να εξηγηθεί από τη διαδικασία και ενσωματώνεται στον όρο a_t , ο οποίος είναι ανεξάρτητος της διαδικασίας.

Για το αυτοπαλινδρομούμενο μοντέλο ισχύουν οι εξισώσεις Yule-Walker:

$$\begin{aligned}
\rho_1 &= \phi_1 + \phi_2 \rho_1 + \phi_3 \rho_2 + \dots + \phi_p \rho_{p-1} \\
\rho_2 &= \phi_1 \rho_1 + \phi_2 + \phi_3 \rho_1 + \dots + \phi_p \rho_{p-2} \\
&\vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \\
\rho_p &= \phi_1 \rho_{p-1} + \phi_2 \rho_{p-2} + \phi_3 \rho_{p-3} + \dots + \phi_p
\end{aligned} \tag{2.26}$$

Οι εξισώσεις αυτές αποτελούν ένα γραμμικό σύστημα p εξισώσεων με p αγνώστους το οποίο με μορφή πινάκων γράφεται:

$$\bar{\rho}_p = \bar{P}_p \cdot \bar{\phi} \tag{2.27}$$

$$\text{όπου } \bar{\rho}_p = \begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \vdots \\ \rho_p \end{bmatrix}, \quad \bar{P}_p = \begin{bmatrix} 1 & \rho_1 & \cdots & \rho_{p-1} \\ \rho_1 & 1 & \cdots & \rho_{p-2} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \rho_{p-1} & \rho_{p-2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad \text{και } \bar{\phi} = \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \vdots \\ \phi_p \end{bmatrix}$$

πίνακες διαστάσεων $p \times 1$, $p \times p$ και $p \times 1$ αντίστοιχα.

Οι παραπάνω εξισώσεις αποτελούν ένα σύστημα p εξισώσεων με p αγνώστους από το οποίο όταν είναι γνωστές οι τιμές των παραμέτρων ϕ_i , λύνοντάς το υπολογίζονται οι άγνωστες αυτοσυσχετίσεις ρ_i ή όταν είναι γνωστές οι αυτοσυσχετίσεις, λύνοντάς το υπολογίζονται οι άγνωστες παράμετροι ϕ_i . Στην πράξη επειδή στη διάθεσή μας έχουμε παρατηρήσεις από τις οποίες μπορούμε να υπολογίσουμε τις δειγματικές αυτοσυσχετίσεις, λύνοντας το σύστημα υπολογίζονται οι εκτιμητές των παραμέτρων $\hat{\phi}_i$.

2.4.7.2 Κινούμενου μέσου διαδικασία τάξης q

Κινούμενου μέσου μοντέλο τάξης q (Moving Average model - $MA(q)$) λέγεται το μοντέλο που εκφράζεται από τη σχέση:

$$x_t = a_t - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} - \dots - \theta_q a_{t-q} \tag{2.28}$$

όπου a_t ασυσχέτιστα σφάλματα τέτοια ώστε: $E(a_t) = 0$, $Var(a_t) = \sigma_a^2$

και $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$ οι q άγνωστες παράμετροι του μοντέλου.

Η σχέση 2.28 με τη βοήθεια του τελεστή προς τα πίσω μετατόπισης γράφεται:

$$x_t = (1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q) a_t \tag{2.29}$$

ή ισοδύναμα:
$$x_t = \theta(B)a_t \quad (2.30)$$

με $\theta(B) = 1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q$ το κινούμενου μέσου πολυώνυμο τάξης q .

Ένα μοντέλο κινούμενου μέσου τάξης q , αποτελεί μια γραμμική παλινδρόμηση της παρούσας τιμής της χρονικής σειράς στις προηγούμενες τιμές της διαδικασίας $\{a_t\}$. Για τη στάσιμη διαδικασία κινούμενου μέσου η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης υστέρησης k δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_k = \begin{cases} 0 & k > q \\ \frac{-\theta_k + \theta_1 \theta_{k+1} + \theta_2 \theta_{k+2} + \dots + \theta_{q-k} \theta_q}{1 + \theta_1^2 + \theta_2^2 + \dots + \theta_q^2} & k = 1, 2, \dots, q \\ \rho_{-k} & k < q \end{cases} \quad (2.31)$$

ενώ για $k = 0$, το γ_0 , δηλ. η διασπορά της διαδικασίας, ισούται με:

$$\sigma_x^2 = \gamma_0 = (1 + \theta_1^2 + \theta_2^2 + \dots + \theta_q^2) \sigma_a^2 \quad (2.32)$$

Παρατηρούμε ότι σε μια διαδικασία κινούμενου μέσου, το πλήθος των σημαντικών αυτοσυσχετίσεων είναι ίσο με την τάξη του μοντέλου. Ακόμη από τη σχέση 2.31 για $k = 1, 2, 3, \dots, q$ μπορούμε να σχηματίσουμε με γνωστές τις δειγματικές αυτοσυσχετίσεις, ένα μη γραμμικό σύστημα q εξισώσεων με q αγνώστους $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$ η λύση του οποίου θα δώσει εκτιμητές των αγνώστων παραμέτρων του μοντέλου.

2.4.7.3 Μικτή διαδικασία τάξης p, q

Εάν η χρονική σειρά έχει συγχρόνως χαρακτηριστικά αυτοπαλινδρομούμενης και κινούμενου μέσου διαδικασίας, τότε μπορούμε να προσαρμόσουμε στα δεδομένα μας ένα πιο σύνθετο μοντέλο, το μικτό μοντέλο τάξης p, q (**AutoRegressive Moving Average model - ARMA** (p, q)) που ορίζεται ως εξής:

$$x_t = \phi_1 x_{t-1} + \dots + \phi_p x_{t-p} + a_t - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} - \dots - \theta_q a_{t-q} \quad (2.33)$$

ή
$$\phi(B)x_t = \theta(B)a_t \quad (2.34)$$

όπου $\phi(B) = 1 - \phi_1 B - \dots - \phi_p B^p$

$\theta(B) = 1 - \theta_1 B - \dots - \theta_q B^q$

Ένα ARMA (p, q) μοντέλο, μπορεί να θεωρηθεί:

α) ως AR(p) χρονική σειρά, με σφάλματα που ακολουθούν MA(q) χρονική σειρά. Δηλαδή:

$$\phi(B)x_t = e_t, \quad \text{όπου } e_t = \theta(B)a_t$$

β) ως MA(q) χρονική σειρά, με σφάλματα που ακολουθούν AR(p) χρονοσειρά. Δηλαδή:

$$x_t = \theta(B)b_t, \quad \text{όπου } b_t = \phi^{-1}(B)a_t$$

2.4.8 Μη στάσιμες στοχαστικές διαδικασίες

Στην παράγραφο 2.4.5 περιγράφηκαν τα χαρακτηριστικά μιας στάσιμης χρονοσειράς. Στις εφαρμογές, όπου μια χρονοσειρά προέρχεται από την παρατήρηση ενός φαινομένου, όπως π.χ. της θερμοκρασίας νερού (παράγραφος 2.3.1), η τάση αποτελεί την πιο συνηθισμένη μορφή μη στασιμότητας. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι απαλοιφής τάσης.

Ένα απλό μοντέλο τάσης είναι το: $x_t = a_0 + a_1 t + z_t$, όπου z_t στάσιμη διαδικασία. Το παραπάνω μοντέλο σημαίνει ότι, εάν σε μια χρονοσειρά που έχει τάση προσαρμοσθεί μια ευθεία, τα υπόλοιπα της προσαρμογής αποτελούν στάσιμη χρονική σειρά.

Μια άλλη μέθοδος, η οποία συγχρόνως απαλείφει την τάση και προσαρμόζει μοντέλο και την οποία πρότειναν οι Box & Jenkins (Box & Jenkins 1976) είναι αυτή που αντί της ίδιας χρονικής σειράς x_t , χρησιμοποιεί εκείνη που προκύπτει παίρνοντας πρώτες διαφορές, δηλαδή χρησιμοποιεί την $z_t = x_t - x_{t-1} = (1-B)x_t = \nabla x_t$ στην οποία και προσαρμόζει μοντέλο.

Τα προτεινόμενα μοντέλα για την περίπτωση αυτή είναι τα ολοκληρωμένα μικτά μοντέλα (AutoRegressive Integrated Moving Average models - $ARIMA(p, d, q)$) όπου d η τάξη των διαφορών για επίτευξη στασιμότητας.

Η τάση δεν είναι η μόνη αιτία μη στασιμότητας μιας χρονοσειράς. Η διαφοροποίηση της μεταβλητότητας συναρτήσει του χρόνου ή η εποχικότητα, αποτελούν επίσης λόγους μη στασιμότητας. Ο συνηθέστερος τρόπος σταθεροποίησης της μεταβλητότητας, είναι η χρήση του λογάριθμου ή της τετραγωνικής ρίζας των παρατηρήσεων ενώ για την απομάκρυνση της εποχικότητας οι Box και Jenkins, πρότειναν τη χρησιμοποίηση εποχικών διαφορών αντί των αρχικών παρατηρήσεων, δηλαδή τις:

$$z_t = x_t - x_{t-s} = (1-B^s)x_t = \nabla^s x_t,$$

όπου s η εποχικότητα.

Τα μοντέλα που προσαρμόζονται σε παρατηρήσεις που έχουν εποχικότητα είναι τα εποχικά μοντέλα. Πολλές φορές οι παρατηρήσεις που έχουμε στη διάθεσή μας, μπορεί να έχουν και τάση και εποχικότητα. Για τη μοντελοποίηση τέτοιων παρατηρήσεων προτείνονται τα πιο σύνθετα μοντέλα χρονοσειρών τα $ARIMA(p, d, q)(P, D, Q)$ ή

$SARIMA(p, d, q)(P, D, Q)_s$, όπου d και D η τάξη των απλών και εποχικών διαφορών για την επίτευξη στασιμότητας στην περίπτωση που η πρώτη τάξη δεν είναι επαρκής.

2.4.8.1 Ολοκληρωμένες μικτές διαδικασίες τάξης p, q

Ολοκληρωμένη μικτή διαδικασία $ARIMA(p, d, q)$, είναι μια διαδικασία η οποία «δι-αφορίζομενη» d φορές, παράγει $ARMA(p, q)$ διαδικασία. Η έκφρασή της με τη βοήθεια πολυωνύμων είναι:

$$\phi(B)\nabla^d X_t = \theta(B)e_t \quad \text{ή} \quad \phi(B)Y_t = \theta(B)a_t \quad \text{όπου} \quad Y_t = \nabla^d X_t \quad (2.35)$$

Το πολυώνυμο $\phi(B)(1-B)^d$ έχει μία ρίζα ίση με τη μονάδα τάξης d και όλες τις άλλες έξω από το μοναδιαίο κύκλο. Η προσαρμογή $ARIMA$ μοντέλου σε κάποια δεδομένα, ακολουθεί τα παρακάτω βήματα:

- 1) Κατασκευάζεται το γράφημα της σειράς και ελέγχεται “οπτικά” ως προς τη στασιμότητά της.
- 2) Για τις αρχικές παρατηρήσεις δηλαδή για $d=0$, κατασκευάζεται το γράφημα των αυτοσυσχετίσεων και των μερικών αυτοσυσχετίσεων.
- 3) Εάν όλες οι αυτοσυσχετίσεις είναι ασήμαντες, ενδεχομένως ένα μη γραμμικό μοντέλο να προσαρμόζεται στα δεδομένα. Στην περίπτωση αυτή μπορούμε να εφαρμόσουμε και ένα δεύτερο έλεγχο ανεξαρτησίας. Εάν υπάρχουν πολλές σημαντικές αυτοσυσχετίσεις ή οι τιμές των αυτοσυσχετίσεων ελαττώνονται αργά, (δηλαδή 5-6 ή και περισσότερες παραμένουν διάφορες του μηδενός) αυτό σημαίνει ότι η χρονική σειρά των δεδομένων δεν είναι στάσιμη, οπότε εφαρμόζοντας κάποιο μετασχηματισμό ή παίρνοντας διαφορές κάποιας τάξης λαμβάνονται νέα δεδομένα και συνεχίζουμε τη διαδικασία από το βήμα ένα (1).

Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται τόσες φορές μέχρι να επιτευχθεί στασιμότητα. Συνήθως το πολύ μέχρι διαφορές δεύτερης τάξης αρκούν για επίτευξη στασιμότητας, δηλαδή οι συνήθεις τιμές του d είναι 0, 1, 2.

- 4) Στις νέες παρατηρήσεις εφαρμόζεται κάποιο μοντέλο AR , MA ή $ARMA$.
- 5) Ελέγχεται το μοντέλο ως προς την προσαρμοστικότητά του. Εάν υπάρχουν περισσότερα από ένα κατάλληλα μοντέλα, επιλέγεται το καλύτερο.
- 6) Το τελικό μοντέλο χρησιμοποιείται για πρόβλεψη.

Η παραπάνω μέθοδος είναι γνωστή σε μέθοδος των Box και Jenkins (1976).

2.4.8.2 Πολλαπλασιαστική ή Εποχική διαδικασία τάξης p, d, q, P, D, Q

Η διαδικασία $\{X_t\}$ θα θεωρείται SARIMA(p, d, q) \times (P, D, Q) $_s$ διαδικασία με περιοδικότητα s , εάν η

$$Y_t = \nabla^d \nabla_s^D X_t = (1 - B)^d (1 - B^s)^D X_t$$

είναι διαδικασία

$$ARMA(p + Ps, q + Qs).$$

Με τη βοήθεια πολωνύμων η παραπάνω διαδικασία γράφεται:

$$\phi(B)\Phi(B^s)Y_t = \theta(B)\Theta(B^s)a_t \quad (2.36)$$

Το πολώνυμο $\Phi(B^s)$ είναι βαθμού Ps ενώ το $\Theta(B^s)$ βαθμού Qs .

Το εποχικό ή γενικό πολλαπλασιαστικό μοντέλο όπως αλλιώς ονομάζεται, προσαρμόζεται σε χρονοσειρές για τις οποίες μπορεί να υποθετηθεί ότι στις παρατηρήσεις που απέχουν s χρονικές στιγμές εφαρμόζεται το ίδιο εποχικό μοντέλο ARIMA(P, D, Q) $_s$, ενώ στις παρατηρήσεις που περιέχονται μέσα σε κάθε περίοδο, το ίδιο ολοκληρωμένο μικτό μοντέλο ARIMA(p, d, q).

Η διαδικασία που ακολουθείται για την ανάλυση χρονοσειρών με περιοδικότητα, είναι η παρακάτω:

- 1) Κατασκευάζεται το γράφημα της σειράς και ελέγχεται “οπτικά” ως προς την τάση και την εποχικότητά της.
- 2) Κατασκευάζεται το γράφημα, των αυτοσυσχετίσεων και των μερικών αυτοσυσχετίσεων της σειράς. Εάν το γράφημα επαναλαμβάνεται ανά s αυτοσυσχετίσεις τότε η εποχικότητα του μοντέλου είναι s και από το γράφημα των αυτοσυσχετίσεων που αντιστοιχούν σε υστερήσεις πολλαπλάσιες της περιοδικότητας δηλαδή από το γράφημα των αυτοσυσχετίσεων $r_s, r_{2s}, r_{3s}, \dots$, επιλέγεται το ARIMA(P, D, Q) $_s$ μοντέλο το οποίο προσαρμόζεται στις παρατηρήσεις.
- 3) Στα εκτιμώμενα σφάλματα που προκύπτουν μετά την προσαρμογή του παραπάνω μοντέλου, προσαρμόζεται ένα ARIMA(p, d, q) μοντέλο και το “γινόμενο” των δύο είναι το γενικό πολλαπλασιαστικό μοντέλο.
- 4) Το μοντέλο ελέγχεται ως προς την προσαρμοστικότητά του. Εάν υπάρχουν περισσότερα από ένα κατάλληλα μοντέλα, επιλέγεται το καλύτερο.

Όσα αναφέρθηκαν παραπάνω για την επιλογή μοντέλου, είναι ενδεικτικά γιατί στην πράξη η εικόνα που παρουσιάζουν τα γραφήματα δεν είναι τόσο σαφής. Η χρήση στα-

τιστικών της θεωρίας ανάλυσης χρονικών σειρών, όπως επίσης και στατιστικών της θεωρίας προσαρμογής στοχαστικών μοντέλων, βοηθούν στην τελική επιλογή του “καλύτερου” μοντέλου.

2.4.9 Μοντέλα συνάρτησης μεταφοράς

Τα μοντέλα συνάρτησης μεταφοράς (Transfer Function models - TF) είναι μοντέλα στα οποία μια (χρονική) σειρά εξόδου συνδέεται με μια ή περισσότερες (χρονικές) σειρές εισόδου. Για παράδειγμα, οι πωλήσεις μπορεί να συνδέονται με τις διαφημιστικές δαπάνες, η σειρά της καθημερινής κατανάλωσης ηλεκτρισμού μπορεί να συνδέεται με τις σειρές των μεταβλητών κάποιων καιρικών συνθηκών, όπως η καθημερινή μέγιστη εξωτερική θερμοκρασία, η σχετική υγρασία και άλλες. Υποθέτουμε ότι τα ζευγάρια των παρατηρήσεων $\{x_t, y_t\}$ αναφέρονται σε ισαπέχοντα χρονικά διαστήματα μιας εισόδου X και μιας εξόδου Y από κάποιο δυναμικό σύστημα.

Υποθέτουμε ακόμη ότι $\{x_t\}$ και $\{y_t\}$ είναι κατάλληλα μετασχηματισμένες χρονικές σειρές έτσι ώστε να είναι στάσιμες. Στα απλής εισόδου, απλής εξόδου μοντέλα, η έξοδος y_t και η είσοδος x_t του μοντέλου, συνδέονται μέσω ενός γραμμικού φίλτρου, ως εξής:

$$y_t = \nu(B)x_t + n_t \quad (2.37)$$

όπου $\nu(B) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} \nu_j B^j$ πολυώνυμο ως προς B , το οποίο συχνά αναφέρεται ως συνάρτηση μεταφοράς και n_t είναι ο θόρυβος της σειράς του συστήματος, ο οποίος είναι ανεξάρτητος από την είσοδο της σειράς x_t .

Το μοντέλο συνάρτησης μεταφοράς λέμε ότι είναι ευσταθές αν $\sum |v_j| < \infty$, και αιτιατό αν $\nu_j = 0$ για $j < 0$. Το αιτιατό μοντέλο ονομάζεται επίσης και πραγματοποιήσιμο και όπως φαίνεται όλα τα πραγματικά φυσικά συστήματα είναι αιτιατά. Άρα, η παρούσα έξοδος επηρεάζεται μόνο από τις τρέχουσες και τις παρελθοντικές τιμές εισόδου των συστημάτων. Στην πράξη συχνά εξετάζονται μόνο ευσταθή και αιτιατά μοντέλα της μορφής:

$$y_t = \nu_0 x_t + \nu_1 x_{t-1} + \nu_2 x_{t-2} + \dots + n_t = \nu(B)x_t + n_t \quad (2.38)$$

όπου $\nu(B) = \sum_{j=0}^{\infty} \nu_j B^j$, $\sum_{j=0}^{\infty} |\nu_j| < \infty$ και τα x_t και n_t είναι ανεξάρτητα.

Στόχος της προσαρμογής ενός μοντέλου μεταφοράς, είναι ο προσδιορισμός και η

εκτίμηση της συνάρτησης μεταφοράς $v(B)$ και του θορύβου του μοντέλου n_t , βασισμένος στη διαθέσιμη πληροφορία της εισόδου x_t και της εξόδου y_t της χρονικής σειράς. Στις δυσκολίες συγκαταλέγονται το ότι η πληροφορία των x_t και y_t είναι πεπερασμένη και η συνάρτηση μεταφοράς $v(B)$, όπως ορίστηκε παραπάνω, ίσως να περιέχει πολύ μεγάλο αριθμό συντελεστών. Για να ελαχιστοποιηθούν τα προβλήματα που προκύπτουν από αυτές τις δυσκολίες, εκφράζεται η συνάρτηση μεταφοράς $v(B)$ με τη προσεγγιστική σχέση:

$$v(B) = \frac{\omega(B)B^b}{\delta(B)} \quad (2.39)$$

όπου $\omega(B) = \omega_0 - \omega_1 B - \dots - \omega_s B^s$

$$\delta(B) = 1 - \delta_1 B - \dots - \delta_r B^r \text{ και}$$

b είναι η παράμετρος υστέρησης, η οποία συμβολίζει τον πραγματικό χρόνο υστέρησης, τον χρόνο δηλαδή που μεσολαβεί πριν την απόκριση της μεταβλητής εισόδου στο αποτέλεσμα της μεταβλητής εξόδου.

Για ευσταθή συστήματα, υποθέτουμε ότι οι ρίζες του $\delta(B) = 0$ είναι έξω από το μοναδιαίο κύκλο. Η τάξη των s, r, b και των σχέσεών τους με τα v_j μπορεί να βρεθεί εξισώνοντας τους όρους των συντελεστών του B^j της παραπάνω σχέσης, δηλαδή:

$$\delta(B)v(B) = \omega(B)B^b \quad (2.40)$$

ή

$$\left[1 - \delta_1 B - \dots - \delta_r B^r\right] \left[v_0 + v_1 B + v_2 B^2 + \dots\right] = \left[\omega_0 - \omega_1 B - \dots - \omega_s B^s\right] B^b \quad (2.41)$$

Άρα, έχουμε:

$$\begin{aligned} v_j &= 0, & j < b \\ v_j &= \delta_1 v_{j-1} + \delta_2 v_{j-2} + \dots + \delta_r v_{j-r} + \omega_0, & j = b \\ v_j &= \delta_1 v_{j-1} + \delta_2 v_{j-2} + \dots + \delta_r v_{j-r} - \omega_{j-b}, & j = b+1, b+2, \dots, b+s \\ v_j &= \delta_1 v_{j-1} + \delta_2 v_{j-2} + \dots + \delta_r v_{j-r}, & j > b+s. \end{aligned}$$

Επιγραμματικά τα βήματα που ακολουθούμε για την προσαρμογή ενός TF μοντέλου σύμφωνα με τη μέθοδο των Box και Jenkins (1976), είναι:

α) Προσαρμόζουμε ARMA μοντέλο στην σειρά εισόδου: $\varphi(B)x_t = \theta(B)a_t$

- β) Υπολογίζουμε τα σφάλματα που προκύπτουν από την προσαρμογή αυτού του μοντέλου: $a_t = \varphi(B)^{-1}\theta(B)x_t$
- γ) Φιλτράρουμε τη σειρά εξόδου με το ίδιο μοντέλο της x_t : $\beta_t = \varphi(B)^{-1}\theta(B)y_t$
- δ) Υπολογίζουμε τη συνάρτηση: $\hat{\nu}_k = \rho_{\alpha\beta}(k) \frac{\sigma_\beta^2}{\sigma_\alpha^2}$ (2.42)
- ε) Από τη μορφή της $\hat{\nu}_k$ σε συνδυασμό και με τη σχέση 2.39, εκτιμώνται οι παράμετροι b , r , s .

Γενικά το b παίρνει την τιμή του lag της πρώτης σημαντικής συνιστώσας της συνάρτησης ν_k . Για τον υπολογισμό των παραμέτρων s και r ισχύει:

$$s = \begin{cases} 0 & \nu_b \neq 0 \\ 1 & \nu_b, \nu_{b+1} \neq 0 \\ 2 & \nu_b, \nu_{b+1}, \nu_{b+2} \neq 0 \end{cases}$$

$$r = \begin{cases} 0 & \text{όταν μετά την ή τις σημαντικές } \nu_k, \text{ όλες οι άλλες είναι ασήμαντες} \\ 1 & \text{όταν μετά την ή τις σημαντικές } \nu_k, \text{ όλες οι άλλες μειώνονται εκθετικά} \\ 2 & \text{όταν μετά την ή τις σημαντικές } \nu_k, \text{ όλες οι άλλες έχουν ημιτονοειδή συμπεριφορά} \end{cases}$$

2.4.10 Έλεγχος καταλληλότητας του μοντέλου

Υπάρχουν διάφορα κριτήρια για τον έλεγχο του μοντέλου. Η βασική ιδέα είναι η εξής: εάν το μοντέλο είναι σωστό, τότε τα σφάλματα που προκύπτουν από την προσαρμογή του μοντέλου θα πρέπει να είναι ασυσχέτιστα και να ακολουθούν κανονική κατανομή με μέση τιμή μηδέν και κάποια «μικρή» διασπορά.

Οποιοσδήποτε έλεγχος προσαρμογής δεδομένων σε κανονική κατανομή μπορεί να χρησιμοποιηθεί, όπως ο έλεγχος X^2 ή το test Kolmogorov-Smirnov. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί το διάγραμμα Q-Q plot ή P-P plot (Gibbons 1997). Για τον έλεγχο της ανεξαρτησίας των σφαλμάτων, μπορούμε να ελέγξουμε τις αυτοσυσχετίσεις τους οι οποίες πρέπει να είναι όλες ασήμαντες ή το πολύ ένα $a\%$ των ελεγχόμενων να είναι σημαντικές, εάν ο έλεγχος γίνεται σε στάθμη σημαντικότητας a . Ένας άλλος έλεγχος για την ανεξαρτησία των σφαλμάτων είναι ο έλεγχος Portmanteau (Box & Pierce 1970) ο οποίος χρησιμοποιεί το στατιστικό:

$$Q = n \sum_{s=1}^k r_s^2(\hat{a}_t) \quad (2.43)$$

όπου n το πλήθος των παρατηρήσεων της χρονικής σειράς και

$r_s(\hat{a}_t)$ οι αυτοσυσχετίσεις των σφαλμάτων πλήθους k .

Το κριτήριο αυτό ελέγχει εάν οι k πρώτες αυτοσυσχετίσεις των σφαλμάτων είναι όλες ασήμαντες. Το στατιστικό Q με την προϋπόθεση ότι τα δεδομένα μας ακολουθούν ARMA(p, q) μοντέλο ακολουθεί X^2 - κατανομή με $k - p - q$ βαθμούς ελευθερίας.

2.4.11 Εύρεση της τάξης του μοντέλου

Στη στατιστική συνήθως αναζητούνται τα καλύτερα μοντέλα με το μικρότερο πλήθος εκτιμώμενων παραμέτρων. Για το λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί διάφορα κριτήρια για την εύρεση της τάξης του καλύτερα προσαρμοζόμενου στα διαθέσιμα δεδομένα μοντέλου, τα σπουδαιότερα των οποίων περιγράφονται παρακάτω.

2.4.11.1 Κριτήριο του Akaike

Το σημαντικότερο κριτήριο για την αναζήτηση της καλύτερης τάξης ενός μοντέλου είναι το κριτήριο του Akaike (Akaike's Information Criterion - AIC). Αναπτύχθηκε το 1971 από τον Hirotugu Akaike με την αρχική ονομασία "κριτήριο πληροφοριών" αλλά από το 1974 επικράτησε η ονομασία «κριτήριο του Akaike» (Akaike 1978).

Το κριτήριο του Akaike δίνεται από τη σχέση:

$$AIC(k) = 2k + n \ln(RSS) \quad (2.44)$$

όπου n το πλήθος των παρατηρήσεων της σειράς

k το πλήθος των παραμέτρων του προσαρμοζόμενου μοντέλου

RSS (Residual Sum of Squares) το άθροισμα ελαχίστων τετραγώνων των

υπολοίπων:
$$RSS = \sum_{i=1}^n a_i^2 \quad (2.45)$$

με την προϋπόθεση ότι τα υπόλοιπα που προκύπτουν από την προσαρμογή του μοντέλου είναι ασυσχέτιστα και κανονικά κατανεμημένα.

Η τάξη του μοντέλου που δίνει τη μικρότερη τιμή στο κριτήριο του AIC είναι και η ενδεικνυόμενη για το μοντέλο μας. Το κριτήριο στο οποίο αναφερόμαστε δεν αποτελεί μόνο ένα μέτρο εύρεσης του καλύτερα προσαρμοζόμενου μοντέλου αλλά και του μοντέλου με τις λιγότερες παραμέτρους. Υπάρχουν και διάφορες άλλες εκφράσεις του κριτηρίου του Akaike που βοηθούν στην επιλογή της τάξης του μοντέλου, αυτή που αναφέρθηκε είναι η αρχική και η περισσότερο χρησιμοποιούμενη.

2.4.11.2 Κριτήριο του Schwarz

Ο Gideon Schwarz το 1978 (Schwarz 1978) ανέπτυξε ένα περισσότερο αυστηρό κριτήριο σε σχέση με το κριτήριο *AIC* το οποίο στηρίζεται στις ίδιες προϋποθέσεις, ονομάζεται **Bayesian Information Criterion (BIC)** ή **Schwarz Criterion (SBIC)** και δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$BIC(k) = \ln(\sigma_a^2) + \frac{k}{n} \ln(n) \quad (2.46)$$

όπου n το πλήθος των παρατηρήσεων της χρονοσειράς,

k το πλήθος των παραμέτρων του προσαρμοσμένου μοντέλου και

σ_a^2 η διασπορά των υπολοίπων

Τα κριτήρια *AIC* και *BIC* συνήθως λειτουργούν συνδυαστικά. Το μοντέλο που θα βρεθεί με τη μικρότερη τιμή στα δύο κριτήρια, είναι και το καλύτερα προσαρμοσμένο στη χρονοσειρά.

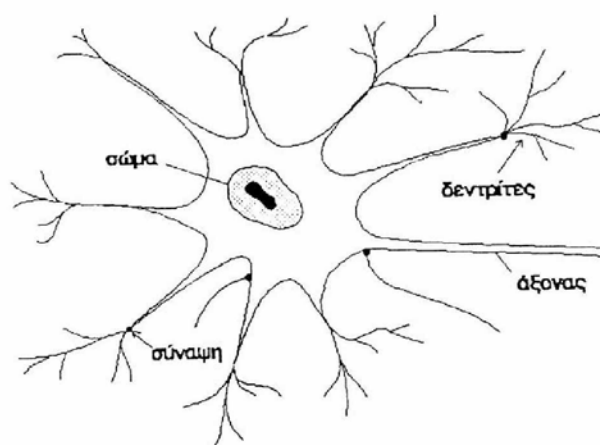
2.4.12 Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα

Τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ΤΝΔ) ή Artificial Neural Networks (ANN) είναι ευέλικτες μαθηματικές δομές ικανές να προσδιορίσουν σύνθετες μη γραμμικές σχέσεις μεταξύ εισερχόμενων και εξερχόμενων συνόλων δεδομένων.

Από το 1943 που οι McCulloch και Pitts πρότειναν το πρώτο μοντέλο Νευρωνικού Δικτύου έως σήμερα, έχουν γίνει πολλές βελτιώσεις στο υπολογιστικό τους μέρος, με επικρατέστερο μοντέλο στις μέρες μας το Multilayer Perceptron (MLP).

Με χρήση ΤΝΔ επιλύονται προβλήματα όλων των επιστημονικών πεδίων χωρίς βέβαια να αποτελούν το μοναδικό τρόπο αντιμετώπισής τους. Ωστόσο η χρήση των συγκεκριμένων μοντέλων προσφέρει ευκολία υλοποίησης, σχετικά αξιόπιστη λειτουργία και άμεση απόκριση κατά τη φάση πραγματικής λειτουργίας εφόσον υλοποιούνται σε υπολογιστικό περιβάλλον (hardware). Κίνητρο για την κατασκευή των ΤΝΔ υπήρξε η διαπίστωση ότι ο τρόπος λειτουργίας του ανθρώπινου εγκεφάλου είναι εντελώς διαφορετικός από τη λειτουργία ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή. Ο ανθρώπινος εγκέφαλος είναι ένα μη γραμμικό υπολογιστικό σύστημα, που έχει την ικανότητα να οργανώνει τα δομικά υλικά έτσι ώστε να εκτελεί πολύπλοκους υπολογισμούς και λειτουργίες με ταχύτητες πολύ πιο μεγάλες από αυτές των γρηγορότερων σημερινών υπολογιστών (Τζαφέστας 2002).

Από τη βιολογία είναι γνωστό πως δομική μονάδα του ανθρώπινου εγκεφάλου είναι ένας τύπος κυττάρου που ονομάζεται νευρώνας (neuron) (σχ. 2.1). Ο βιολογικός νευρώνας αποτελεί το βασικό στοιχείο επεξεργασίας της πληροφορίας και η κύρια λειτουργία του είναι να λαμβάνει τα σήματα εισόδου και να τα διαβιβάζει στην έξοδο όταν η συνολική είσοδος του νευρώνα ξεπεράσει μια ορισμένη τιμή η οποία ονομάζεται τιμή κατωφλίου (threshold value). Η έξοδος από κάθε νευρώνα μέσω των συνάψεων (synapses), αποτελεί είσοδο στους γειτονικούς νευρώνες, ενώ πρέπει να σημειωθεί ότι οι νευρώνες δε λειτουργούν μόνοι τους αλλά συμμετέχουν σε ομάδες που ονομάζονται Νευρωνικά Δίκτυα (Neural Networks).



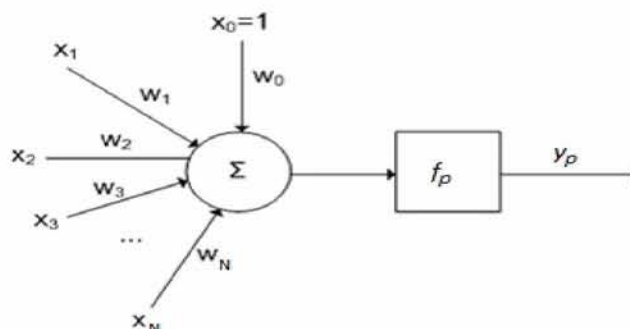
Σχήμα 2.1: Βιολογικός νευρώνας.

Οι δομές των Νευρωνικών Δικτύων λόγω της σπουδαιότητάς τους έχουν γίνει αντικείμενο εντατικής έρευνας τις τελευταίες δεκαετίες, ωστόσο η μελέτη τους πραγματοποιείται με χρήση ειδικών αρχιτεκτονικών δομών που ονομάζονται τεχνητά νευρωνικά δίκτυα και οι οποίες αποτελούνται από ένα πλήθος διασυνδεδεμένων μονάδων επεξεργασίας, τους τεχνητούς νευρώνες.

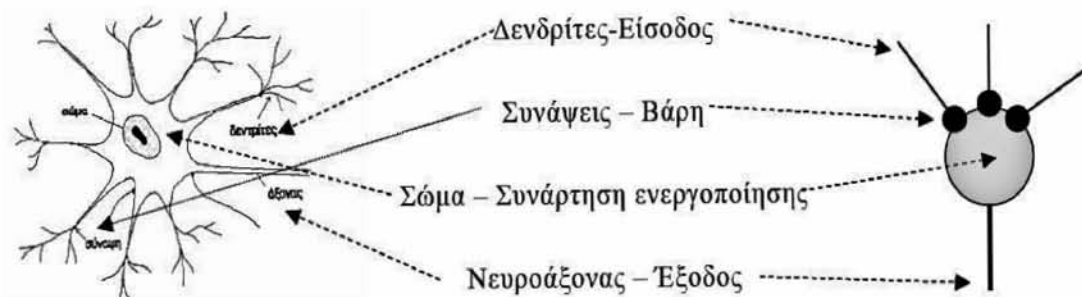
2.4.12.1 Ο Τεχνητός Νευρώνας

Ο Τεχνητός Νευρώνας είναι η βασική μονάδα επεξεργασίας ενός ΤΝΔ. Κατασκευάστηκε έτσι ώστε να μιμείται τα χαρακτηριστικά του βιολογικού νευρώνα. Για την ακρίβεια, ένα σύνολο εισόδων διαφόρων νευρώνων γίνονται έξοδοι σε άλλους νευρώνες. Κάθε είσοδος πολλαπλασιάζεται με ένα αντίστοιχο «βάρος» που είναι ανάλογο της ισχύος μιας απλής βιολογικής σύναψης και όλες οι σταθμισμένες εισοδοι (weighted inputs) αθροίζονται για να χρησιμοποιηθούν σαν μεταβλητές μιας συνάρτησης ενεργο-

ποίησης (activation function) (Λύκας 2008). Στο σχήμα 2.2 απεικονίζεται το μοντέλο ενός τέτοιου νευρώνα, ενώ στο σχήμα 2.3 η αντιστοιχία μεταξύ βιολογικού και τεχνητού νευρώνα.



Σχήμα 2.2: Τεχνητός νευρώνας με τις εισόδους x_i και τα αντίστοιχα βάρη w_i



Σχήμα 2.3: Αντιστοιχία βιολογικού - τεχνητού νευρώνα.

Ο νευρώνας του σχήματος 2.2 αποτελείται από ένα σύνολο N εισόδων, κάθε μία από τις οποίες δέχεται ένα σήμα εισόδου x_i ($i = 1, 2, \dots, N$) στο οποίο αντιστοιχεί ένα βάρος w_i ($i = 1, 2, \dots, N$). Η είσοδος x_0 έχει τιμή εισόδου 1 και βάρος w_0 το οποίο ονομάζεται μεροληψία (bias) του νευρώνα. Η εισαγωγή της μεροληψίας βελτιώνει την υπολογιστική ικανότητα μάθησης (learning) του δικτύου και προσαρμογής στα δεδομένα εκπαίδευσης.

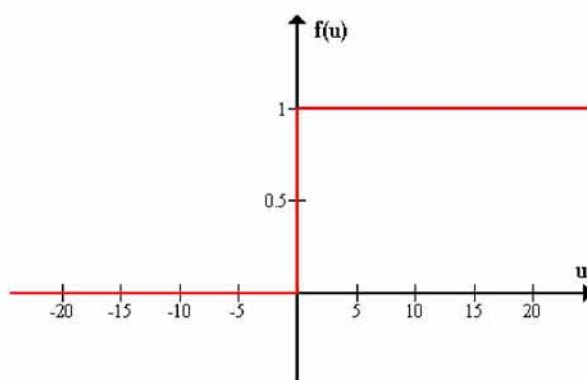
Ένας νευρώνας επιτελεί δύο υπολογισμούς:

- 1) τον υπολογισμό της συνολικής εισόδου $f(\vec{x}) = \sum_{i=1}^N w_i x_i + w_0$ και
- 2) τον υπολογισμό της εξόδου $\hat{y}(\vec{x})$ του νευρώνα, μέσω μιας συνάρτησης ενεργοποίησης (activation function).

Συνήθως ένα ΤΝΔ αναπτύσσει μια συνολική λειτουργικότητα μέσω μιας μορφής εκπαίδευσης (μάθησης - learning). Μεγαλύτερα και περισσότερα σύνθετα δίκτυα, γενικά προσφέρουν και καλύτερα αποτελέσματα. Αν και έχουν κατασκευασθεί δίκτυα για κάθε νοητή διαμόρφωση, η διάταξη των νευρώνων σε επίπεδα, μιμείται καλύτερα τη δομή ορισμένων τμημάτων του εγκεφάλου. Για το λόγο αυτό, τα τελευταία χρόνια όλοι οι αλγόριθμοι που έχουν κατασκευαστεί, έχουν δομηθεί πάνω σε αυτήν τη λογική.

2.4.12.2 Συναρτήσεις Ενεργοποίησης

Ο βιολογικός νευρώνας θεωρείται ότι χρησιμοποιεί σα συνάρτηση ενεργοποίησης μια βηματική συνάρτηση ή συνάρτηση κατωφλίου, την $f(x) = \begin{cases} 1 & u \geq 0 \\ 0 & u < 0 \end{cases}$, με γράφημα που παρουσιάζεται στο σχήμα 2.4.



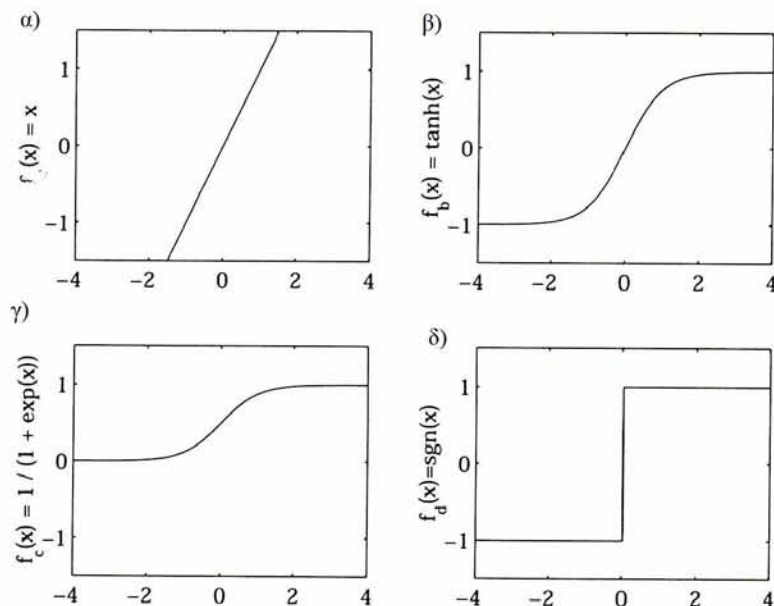
Σχήμα 2.4: Η βηματική συνάρτηση.

Στα ΤΝΔ χρησιμοποιούνται συναρτήσεις που προσεγγίζουν τη βηματική συνάρτηση αν και είναι συνεχείς, τέτοιες συναρτήσεις είναι:

- η γραμμική, που ορίζεται από τη σχέση: $f(x) = x$,
- η υπερβολική $f(x) = \tanh(x)$,
- η σιγμοειδής $f(x) = \frac{1}{1 + \exp(x)}$, που είναι ιστορικά η πιο δημοφιλής και τέλος
- η βηματική $f(x) = \text{sgn}(x)$.

Η βηματική συνάρτηση είναι μερικού ενδιαφέροντος καθόσον χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις που τα δεδομένα αναφέρονται σε απαντήσεις τύπου ναι ή όχι.

Οι γραφικές παραστάσεις των τεσσάρων συναρτήσεων φαίνονται στο σχήμα 2.5 (Norgaard *et al.* 2003).



Σχήμα 2.5: Τέσσερις διαφορετικές συναρτήσεις ενεργοποίησης α) γραμμική, β) υπερβολική, γ) σιγμοειδής και δ) βηματική.

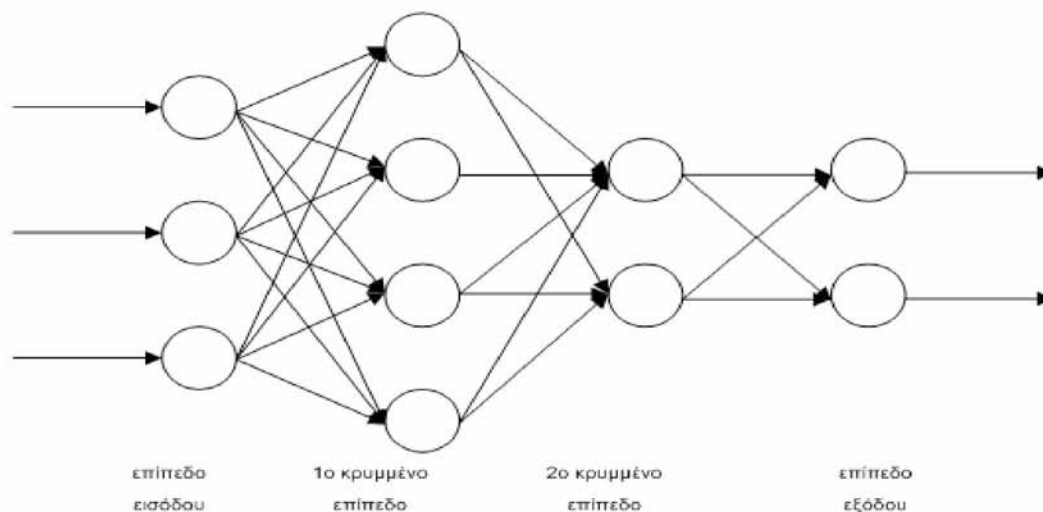
2.4.12.3 Πολυεπίπεδα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα

Στις συνήθεις περιπτώσεις οι νευρώνες είναι οργανωμένοι σε επίπεδα:

- Το επίπεδο εισόδου (input layer), το οποίο δέχεται την πληροφορία εισόδου.
- Το επίπεδο εξόδου (output layer), είναι το τελευταίο και αυτό που επιστρέφει την έξοδο του δικτύου.
- Κρυφά επίπεδα (hidden layers), υπάρχουν ένα ή περισσότερα και είναι τα ενδιάμεσα επίπεδα που μεταφέρουν την πληροφορία από τα επίπεδα εισόδου στο επίπεδο εξόδου.

Μια διάταξη ενός πολυεπίπεδου ΤΝΔ παρουσιάζεται στο σχήμα 2.6.

Το πλήθος των νευρώνων στα επίπεδα εισόδου και εξόδου διαμορφώνεται από το ίδιο το πρόβλημα για τη λύση του οποίου χρησιμοποιούμε τα Νευρωνικά Δίκτυα. Το πλήθος όμως και η δομή των κρυφών επιπέδων δεν προκαθορίζεται ούτε υπαγορεύεται από κάποιους κανόνες αλλά είναι αντικείμενο πειραματικής μελέτης.



Σχήμα 2.6: Πολυεπίπεδο perceptron με δύο κρυμμένα επίπεδα.

Υπάρχουν οι εξής κατηγορίες ΤΝΔ:

- Τα πλήρως συνδεδεμένα ΤΝΔ (fully connected), στα οποία κάθε νευρώνας συνδέεται με όλους τους νευρώνες του επόμενου επιπέδου.
- Τα μερικώς συνδεδεμένα ΤΝΔ (partially connected), στα οποία κάθε νευρώνας δε συνδέεται με όλους τους νευρώνες του επόμενου επιπέδου.
- Τα δίκτυα με απλή τροφοδότηση (feed forward), στα οποία δεν υπάρχουν συνάψεις μεταξύ των νευρώνων ενός επιπέδου και των νευρώνων προηγούμενου επιπέδου, τέλος
- τα δίκτυα με ανατροφοδότηση (feedback ή recurrent), στα οποία υπάρχουν συνάψεις μεταξύ των νευρώνων ενός επιπέδου και νευρώνων προηγούμενου επιπέδου.

Ακόμη τα ΤΝΔ ως προς τον τρόπο εκμάθησης, ο οποίος συνίσταται στη βελτίωση των βαρών των συνδέσεων μεταξύ των νευρώνων, μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: α) σ' αυτά που η εκμάθηση γίνεται με επίβλεψη (supervised learning) και β) σ' αυτά όπου η εκμάθηση γίνεται χωρίς επίβλεψη (unsupervised learning).

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή χρησιμοποιήθηκαν τα MLP δίκτυα, με απλή τροφοδότηση (feedforward) και τα οποία περιγράφονται παρακάτω αναλυτικά.

2.4.12.4 Εκπαίδευση Νευρωνικών Δικτύων

Συνήθως ένα ΤΝΔ αναπτύσσει μια συνολική λειτουργικότητα μέσω μιας μορφής εκπαίδευσης (μάθησης). Η μάθηση είναι μια θεμελιώδης ικανότητα των ΤΝΔ, σύμφωνα

με την οποία τα ΤΝΔ μαθαίνουν από το περιβάλλον τους και έτσι συνεχώς βελτιώνουν τη συμπεριφορά τους. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω ανανέωσης της τιμής των (συναπτικών) βαρών, μέχρι την επίτευξη της επιθυμητής συμπεριφοράς (Haykin 2009). Η εκπαίδευση των ΤΝΔ γίνεται με έναν αλγόριθμο μάθησης, δηλαδή ένα προκαθορισμένο σύνολο κανόνων επίλυσης του προβλήματος. Υπάρχουν πολλοί αλγόριθμοι μάθησης, κάθε ένας από τους οποίους προσεγγίζει το πρόβλημα της ανανέωσης των βαρών με διαφορετικό τρόπο.

Η μάθηση μπορεί να είναι με επίβλεψη ή χωρίς επίβλεψη. Στην περίπτωση μάθησης με επίβλεψη (supervised learning) η αλλαγή των παραμέτρων γίνεται με κάποιο κανόνα επιβλεπόμενης μάθησης. Η έξοδος συνδυάζεται με κάθε είσοδο, συνεπώς η διαδικασία μάθησης μπορεί να χρησιμοποιήσει τη γνώση ως επόπτη και να διορθώσει το δίκτυο. Στη μάθηση χωρίς επίβλεψη οι αλλαγές στις τιμές των συναπτικών βαρών γίνονται αυτόματα βάσει κανόνων, ενσωματωμένων στους αλγόριθμους επεξεργασίας. Ο χρήστης ενός τέτοιου δικτύου πρέπει να εξετάσει το αποτέλεσμα του δικτύου και αν δεν τον ικανοποιεί, τότε θα πρέπει να ρυθμιστεί κάποια από τις παραμέτρους εκπαίδευσης και το δίκτυο να εκπαιδευτεί πάλι από την αρχή.

2.4.12.5 Πολυεπίπεδος Αισθητήρας

Το χαρακτηριστικό των πολυεπιπέδων αισθητήρων (Multilayer Perceptrons - MLP) είναι ότι δεν υπάρχει σύνδεση μεταξύ νευρώνων που ανήκουν στο ίδιο επίπεδο. Υπάρχουν τρία επίπεδα, το επίπεδο εισόδου, το επίπεδο εξόδου και ένα κρυφό επίπεδο (hidden level). Οι νευρώνες ξεκινούν από ένα νευρώνα ενός επιπέδου και καταλήγουν σε νευρώνες του επόμενου επιπέδου.

Κατά την εκπαίδευση ενός MLP, κάθε είσοδος x_i πολλαπλασιάζεται επί ένα βάρος w_i και αθροίζονται οι σταθμισμένες εισοδοί. Εάν αυτό το άθροισμα είναι μεγαλύτερο από ένα προκαθορισμένο κατώφλι, έξοδος είναι η μονάδα, αλλιώς είναι το μηδέν. Τα συστήματα αυτά ονομάστηκαν perceptrons (αισθητήρες) και είναι τα πιο δημοφιλή συστήματα.

Αν θεωρήσουμε ότι ο νευρώνας έχει N εισόδους x_i (όπου $i = 1, \dots, N$), είναι προφανές ότι αυτές οι εισοδοί προέρχονται από τους νευρώνες των προηγούμενων επιπέδων, οι οποίοι συνδέονται με το συγκεκριμένο νευρώνα μέσω των συνάψεων. Σε κάθε μια από τις N εισόδους x_i αντιστοιχεί ένα βάρος w_i που εκφράζει το ποσοστό κατά το οποίο η εν λόγω είσοδος συνεισφέρει στην έξοδο, συνεπώς η συνολική είσοδος που διαβιβάζεται

σε αυτό το νευρώνα θα είναι:

$$\vec{x} \cdot \vec{w} = \sum_{i=1}^N x_i \cdot w_i \quad (2.47)$$

όπου:

$$i = 1, \dots, N \quad \text{ο αριθμός εισόδων}$$

$$\vec{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_N\} \quad \text{το διάνυσμα εισόδων}$$

$$\vec{w} = \{w_1, w_2, \dots, w_N\} \quad \text{το αντίστοιχο διάνυσμα βαρών}$$

Από τη συνολική τιμή εισόδου αφαιρείται η τιμή του κατωφλίου w_0 και επιτρέπεται η ενεργοποίηση του μόνο αν το αποτέλεσμα είναι θετικό, δηλαδή παράγεται έξοδος μόνο εάν: $h = \vec{x} \cdot \vec{w} - w_0 > 0$, διαδικασία η οποία βρίσκεται σε πλήρη αναλογία με τους βιολογικούς νευρώνες.

Για τον j νευρώνα ισχύει:

$$h_j = \sum_{i=1}^N x_i \cdot w_{ij} + w_{j0} \quad (2.48)$$

όπου h_j το σταθμισμένο άθροισμα του j -νευρώνα για τα δεδομένα εισόδου που φθάνουν από το προηγούμενο επίπεδο,

w_{ij} το βάρος μεταξύ του j -νευρώνα και του i -νευρώνα του προηγούμενου επιπέδου,

x_i η έξοδος του i -νευρώνα του προηγούμενου επιπέδου και

w_{j0} η μεροληψία του j -νευρώνα.

Η έξοδος του j -νευρώνα \hat{y}_j υπολογίζεται με τη βοήθεια μιας συνάρτησης f ως:

$$\hat{y}_j = f(h_j) \quad (2.49)$$

Η συνάρτηση f η οποία είναι η συνάρτηση ενεργοποίησης, όπως αναφέρθηκε, μπορεί να είναι γραμμική, δηλαδή βηματική ή συνάρτηση προσήμου είτε μη γραμμική, δηλαδή σιγμοειδής ή υπερβολικής εφαπτομένης.

Ακόμη, η εκμάθηση του δικτύου επιτυγχάνεται “διορθώνοντας-βελτιώνοντας” τα βάρη, ενώ η διαδικασία της εκμάθησης γίνεται με τη βοήθεια ενός μεγάλου αριθμού συνόλων εκμάθησης (training sets) και κύκλων εκμάθησης (epochs). Η διαδικασία εκμάθησης ολοκληρώνεται, όταν εκτιμηθεί το καλύτερο σύνολο βαρών, εκείνο δηλαδή το

οποίο εκτιμά τους νευρώνες εξόδου με το μικρότερο σφάλμα.

Το άθροισμα τετραγώνων των σφαλμάτων (Sum of Squares Error - SSE) του δικτύου, το οποίο δίδεται από τη σχέση:

$$SSE = \sum_{i=1}^M (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (2.50)$$

όπου y_i και \hat{y}_i είναι αντίστοιχα η πραγματική και η εκτιμώμενη τιμή του i -νευρώνα εξόδου, είναι το κριτήριο που χρησιμοποιείται συνήθως για τον έλεγχο καλής προσαρμογής ενός MLP μοντέλου στα δεδομένα μας.

Άλλα στατιστικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο καλής προσαρμογής είναι τα στατιστικά σφάλματα E_i και το μέσο απόλυτο σφάλμα (Mean Absolute Error - MAE), τα οποία ορίζονται ακολούθως:

$$E_i = \frac{\hat{y}_i - y_i}{y_i} \times 100 \quad (2.51)$$

και

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |E_i| \quad (2.52)$$

2.4.12.6 Διαστήματα Εμπιστοσύνης στα ΤΝΔ

Η εκτίμηση των διαστημάτων εμπιστοσύνης στα ΤΝΔ δε γίνεται άμεσα, πράγμα που αποτελεί βασικό μειονέκτημα αυτής της μεθοδολογίας σε σχέση με τις κλασικές. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι:

1. η μη παραμετρική μέθοδος
2. η μέθοδος της επαναδειγματοληψίας
3. η μέθοδος της εύρεσης σφάλματος εξόδου και
4. η μέθοδος της πολυεπίπεδης παλινδρόμησης, προσαρμοσμένη όμως στα ΤΝΔ.

Οι Silva και Moylin (2000) ασχολήθηκαν με την αξιολόγηση των μεθόδων εκτίμησης διαστημάτων εμπιστοσύνης, καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι οι μη παραμετρικές μέθοδοι και κυρίως η μέθοδος επαναδειγματοληψίας είναι ακριβέστερες. Στην παρούσα εργασία εφαρμόστηκε μη παραμετρική μέθοδος εκτίμησης, σύμφωνα με την οποία τα N σφάλματα εκτίμησης ταξινομούνται σε αύξουσα σειρά και ανάλογα με το διάστημα εμπιστοσύνης που θέλουμε, π.χ. αν θέλουμε 95% διάστημα εμπιστοσύνης, απορρίπτουμε από το τέλος και την αρχή πλήθος σφαλμάτων ίσο με 5%. Τα όρια του

διαστήματος εμπιστοσύνης ορίζονται από τις ακραίες τιμές των σφαλμάτων που έχουν απομείνει. Το πλήθος των σφαλμάτων που απορρίπτονται στην αρχή και στο τέλος της διατεταγμένης ακολουθίας, δηλαδή στις «ουρές», είναι $N \times p$ (όπου p η πιθανότητα της κάθε ουράς) και επειδή $N \times p$ είναι συνήθως δεκαδικός αριθμός, απορρίπτονται οι $[N \times p]$ ακραίες τιμές σε κάθε ουρά, όπου $[x]$ το ακέραιο μέρος ενός αριθμού. Τα μη παραμετρικά διαστήματα εμπιστοσύνης που δημιουργούνται με τη μέθοδο αυτή είναι συμμετρικά ως προς την πιθανότητα, όχι όμως απαραίτητα και ως προς το \hat{y} .

Η μεθοδολογία η οποία περιγράφηκε είναι αυτή που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των διαστημάτων εμπιστοσύνης στα μοντέλα ΤΝΔ, στην παρούσα εργασία.

2.4.13 Ανάλυση συσχετίσεων χρονικών σειρών

Σε ένα πολυμεταβλητό σύστημα, ένα πολύ σημαντικό ερώτημα είναι ο έλεγχος του κατά πόσο μια μεταβλητή X επιδρά σε μια άλλη Y ή δέχεται επίδραση από αυτήν ή είναι ασυσχέτιστες. Ο τρόπος με τον οποίο απαντάται το παραπάνω ερώτημα, είναι συνήθως να εφαρμοστεί μοντέλο παλινδρόμησης της μεταβλητής Y στη X χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που υπάρχουν και να ελεγχθεί η σημαντικότητα του συντελεστή της X ή να υπολογιστεί η συσχέτιση των X και Y και στη συνέχεια να εξεταστεί η σημαντικότητα του αποτελέσματος. Στην περίπτωση που οι μεταβλητές είναι χρονοσειρές, η εφαρμογή των παραπάνω μεθόδων προϋποθέτει την προλεύκανση (pre-whitening) των χρονοσειρών (Chatfield 2004).

Η ύπαρξη όμως υψηλής συσχέτισης μεταξύ δύο μεταβλητών δεν αποτελεί και απόδειξη ότι υπάρχει σχέση αιτιότητας μεταξύ των μεταβλητών. Ο οικονομολόγος Granger (1969) προσπαθώντας να αντιμετωπίσει τις δυσκολίες καθορισμού μιας κατευθυνόμενης σχέσης αιτιότητας, εισήγαγε την έννοια της αιτιότητας κατά Granger (Granger Causality). Σύμφωνα με τον Granger, η μεταβλητή X αιτιάζει κατά Granger μια άλλη Y , αν η πληροφορία από τις πρόσφατες και προηγούμενες τιμές της μεταβλητής αυτής βοηθούν στην καλύτερη πρόβλεψη των τιμών της Y .

2.4.13.1 Η μέθοδος της προλεύκανης

Ο συνήθης τρόπος ελέγχου της συσχέτισης μεταξύ δύο μεταβλητών X και Y είναι ο υπολογισμός του συντελεστή συσχέτισης κατά Pearson, κατά Spearman ή κατά Kendall και ο έλεγχος σημαντικότητάς του. Όταν όμως πρόκειται για χρονικές σειρές, η αυτοσυσχέτιση η οποία υπάρχει μεταξύ των παρατηρήσεων τους επηρεάζει τον υπολογισμό

των παραπάνω συντελεστών συσχέτισης και «νοθεύει» τα συμπεράσματα.

Στην περίπτωση αυτή εφαρμόζεται η μέθοδος της προλεύκανσης (Chatfield 2004) η οποία ακολουθεί τα παρακάτω βήματα:

- I. προσαρμόζεται ARIMA μοντέλο σε κάθε χρονοσειρά
- II. υπολογίζονται τα σφάλματα τα οποία προκύπτουν από την προσαρμογή του παραπάνω μοντέλου και τα οποία είναι ανεξάρτητα και ακολουθούν κανονική κατανομή.
- III. μεταξύ αυτών των σφαλμάτων υπολογίζεται ο συντελεστής συσχέτισης κατά Pearson και ελέγχεται η σημαντικότητα του ($H_0 : \rho = 0$).

Στην πολυμεταβλητή περίπτωση η μέθοδος αυτή δίνει έναν τετραγωνικό συμμετρικό πίνακα, με τις τιμές των συντελεστών συσχέτισης μεταξύ των μεταβλητών ανά δύο και με τη σημαντικότητα για τον έλεγχο του κάθε συντελεστή. Από τις τιμές των συντελεστών φαίνεται η ένταση και το πρόσημο της συσχέτισης.

2.4.13.2 Έλεγχος αιτιότητας κατά Granger

Ο απλός έλεγχος αιτιότητας κατά Granger αναφέρεται σε δύο στάσιμες χρονοσειρές, X_t και Y_t οι οποίες εκφράζονται από το διδιάστατο Autoregressive μοντέλο (VAR):

$$y_t = \mu_{01} + \sum_{i=1}^m \alpha_{i0} y_{t-i} + \sum_{i=1}^m \beta_{i0} x_{t-i} + u_t \quad (2.53)$$

και

$$x_t = \mu_{02} + \sum_{i=1}^m \alpha_{i1} y_{t-i} + \sum_{i=1}^m \beta_{i1} x_{t-i} + e_t \quad (2.54)$$

όπου m το πλήθος των χρονικών υστερήσεων,

u_t και e_t τα σφάλματα του μοντέλου, τα οποία θεωρούνται ασυσχέτιστα,

α_{i0} και α_{i1} οι αυτοπαλινδρομούμενες παράμετροι του μοντέλου,

β_{i0} και β_{i1} οι κινούμενου μέσου παράμετροι του μοντέλου και

μ_{01} και μ_{02} οι μέσες τιμές.

Γίνονται οι εξής επιμέρους έλεγχοι:

- I. αν υπάρχει αιτιότητα κατά Granger από τη X_t προς τη Y_t ($X_t \rightarrow Y_t$),
- II. αν υπάρχει αιτιότητα κατά Granger από τη Y_t προς τη X_t ($Y_t \rightarrow X_t$) και
- III. αν δεν υπάρχει αιτιότητα μεταξύ των δύο χρονοσειρών ($X_t \not\rightarrow Y_t$ και $Y_t \not\rightarrow X_t$).

Οι παραπάνω έλεγχοι γίνονται με τα VAR μοντέλα, τα στατιστικά των ελέγχων ακολουθούν την F-κατανομή και οι τιμές κρίσεως λαμβάνονται από τους πίνακες της F-κατανομής για κάποιο επίπεδο σημαντικότητας.

2.4.13.3 Υπό συνθήκη αιτιότητα κατά Granger

Η απλή αιτιότητα κατά Granger όπως αναφέρθηκε, ορίζεται από δύο μόνο χρονοσειρές. Αν έχουμε περισσότερες μπορούμε να την εφαρμόσουμε, λαμβάνοντάς τες ανά δύο. Όμως αν υπάρχει αιτιότητα π.χ. $X_t \rightarrow Y_t$ και $Y_t \rightarrow Z_t$ τότε μπορεί να προκύψει και αιτιότητα της $X_t \rightarrow Z_t$. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος ορίστηκε μια νέα αιτιότητα η υπό συνθήκη αιτιότητα κατά Granger (Geweke 2010, Seth Anil 2010). Η υπό συνθήκη αιτιότητα κατά Granger (Conditional Granger Causality, CGC) αποτελεί μια γενίκευση της αιτιότητας κατά Granger, αναφέρεται στην πολυμεταβλητή περίπτωση ή αλλιώς υπό όρων περίπτωση και εξετάζει την αιτιότητα κατά Granger της X_t στην Y_t λαμβάνοντας όμως υπ' όψιν τις υπόλοιπες μεταβλητές οι οποίες επιδρούν και αυτές στη διαμόρφωση των τιμών της Y_t .

Στην περίπτωση αυτή υπολογίζονται τα στατιστικά των ελέγχων για όλους τους συνδυασμούς των χρονοσειρών ανά δύο και ελέγχεται η σημαντικότητά τους. Τα στατιστικά υπολογίζονται χρησιμοποιώντας το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (Mean Square Error, MSE) των προβλέψεων της Y_t ή βήματα μπροστά, χωρίς την επίδραση και με την επίδραση της X_t αλλά λαμβάνοντας υπ' όψιν την επίδραση και των υπολοίπων μεταβλητών.

Για την εφαρμογή του CGC στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκε το στατιστικό πακέτο MatLab. Ο έλεγχος δίνει ένα τετραγωνικό πίνακα στον οποίο καταγράφονται οι σημαντικότητες των ελέγχων για όλα τα ζεύγη χρονικών σειρών (x_i, x_j) παρουσία των υπολοίπων χρονικών σειρών του διανύσματος \bar{x} και για τις δύο κατευθύνσεις ($x_i \rightarrow x_j | (\bar{x} - \{x_i, x_j\})$ και $x_j \rightarrow x_i | (\bar{x} - \{x_i, x_j\})$).

Η μηδενική υπόθεση H_0 αυτών των ελέγχων είναι ότι δεν υπάρχει αιτιότητα ενώ η εναλλακτική H_1 ότι υπάρχει. Ο πίνακας δεν είναι συμμετρικός καθώς μεταξύ των δύο χρονικών σειρών η αιτιότητα διαφέρει στις δύο κατευθύνσεις.

2.4.14 Μέτρα σύγκρισης στοχαστικών μοντέλων

Για τη σύγκριση της προσαρμοστικής και προβλεπτικής ικανότητας των στοχαστικών μοντέλων χρησιμοποιούνται διάφορα στατιστικά μέτρα (Diamantopoulou *et. al.* 2007). Τα μέτρα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή είναι: το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (Mean Square Error, MSE) και η τετραγωνική του ρίζα (Root Mean Square Error, RMSE), το μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα (Mean Absolute Percentage Error, MAPE) και ο Nash – Sutcliffe συντελεστής αποτελεσματικότητας (Nash – Sutcliffe Coefficient of efficiency, NSC) (Nash & Sutcliffe 1970).

- Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα ορίζεται ως:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (2.55)$$

όπου y_i οι παρατηρούμενες μετρήσεις,
 \hat{y}_i οι προβλεπόμενες τιμές από το μοντέλο και
 n ο αριθμός δεδομένων.

Είναι ένα στατιστικό ποσοτικοποίησης της διαφοράς μεταξύ παρατηρούμενων και εκτιμώμενων τιμών μιας παραμέτρου και ανάλογο του μέτρου της διασποράς μιας τυχαίας μεταβλητής. Σε αναλογία με την τυπική απόκλιση λαμβάνεται και η τετραγωνική ρίζα του MSE.

- Η τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος ορίζεται ως:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (2.56)$$

και πολλές φορές αναφέρεται και ως ρίζα της μέσης τετραγωνικής απόκλισης.

- Το μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα ορίζεται ως:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\hat{y}_i - y_i}{y_i} \right| \cdot 100 \quad (2.57)$$

Είναι ένα άλλο στατιστικό που μετρά την ακρίβεια της προσαρμογής και της πρόβλεψης ενός μοντέλου. Οι μικρότερες τιμές των παραπάνω κριτηρίων δηλώνουν εκτιμητές του μοντέλου πιο κοντά στις πραγματικές τιμές, συνεπώς καλύτερη προσαρμοστική ή προβλεπτική ικανότητα του μοντέλου.

- Το μέτρο NSC ορίζεται από τον τύπο:

$$NSC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\bar{y} - y_i)^2} \quad (2.58)$$

όπου \bar{y} η δειγματική μέση τιμή (Benyahya *et al.* 2007).

Λαμβάνει τιμές μικρότερες της μονάδας και ουσιαστικά συγκρίνει τη μέση τιμή ως εκτιμητή, με τους εκτιμητές του μοντέλου. Τιμή του κριτηρίου NSC ίση με το μηδέν, σημαίνει ότι η παρατηρούμενη μέση τιμή είναι τόσο καλός εκτιμητής πρόβλεψης όσο και ο εκτιμητής του μοντέλου. Τιμή ίση με ένα σημαίνει εξαιρετική προσαρμογή, δηλαδή $y_i = \hat{y}_i$ και τέλος αρνητικές τιμές του κριτηρίου δείχνουν ότι ο εκτιμητής του μοντέλου δεν είναι καλύτερος της μέσης τιμής (Palani *et al.* 2003).

Σύμφωνα με το κριτήριο καλύτερο μοντέλο είναι αυτό για το οποίο η τιμή του NSC πλησιάζει περισσότερο τη μονάδα.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.1 Εισαγωγή

Η κατάσταση της ποιότητας των υδατικών συστημάτων, είναι ένα σύνθετο αποτέλεσμα φυσικών και ανθρωπογενών δραστηριοτήτων και των μεταξύ τους αλληλεπιδράσεων στο χρόνο και το χώρο. Η καταγραφή μακροχρόνιων μετρήσεων και η δημιουργία βάσεων δεδομένων, αποτελούν το κύριο εργαλείο για την εκτίμηση της περιβαλλοντικής κατάστασης των συστημάτων αυτών. Με τη βοήθεια της κατάλληλης στατιστικής διερεύνησης, τα στοιχεία των μετρήσεων αποκτούν σημασία. Έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τους επιστήμονες των υδατικών πόρων για την εξαγωγή συνολικών και ειδικών συμπερασμάτων τόσο για την αποτίμηση των υδατικών συστημάτων, όσο και τη διατύπωση προτάσεων. Οι προτάσεις αυτές αποτελούν τη βάση του προγραμματισμού της ορθολογικής διαχείρισης των υδατικών πόρων.

Η εκτίμηση της ποιότητας του νερού σε διάφορες θέσεις ενός ποταμού, από τα δεδομένα των μετρήσεων, γίνεται με στατιστική ανάλυση των δεδομένων των διαφόρων μεταβλητών ποιότητας, χρησιμοποιώντας τις μεθόδους της περιγραφικής και συμπερασματικής στατιστικής ή με στοχαστικά μοντέλα που βασίζονται στην ιστορία των παραμέτρων (χρονοσειρές) και λαμβάνουν υπόψη την αβεβαιότητα των μετρήσεων και την τυχαιότητα των παραμέτρων αυτών.

Οι παρατηρήσεις οι οποίες αναλύθηκαν είναι ημερήσιες μετρήσεις που καλύπτουν το χρονικό διάστημα από 1 Ιανουαρίου 2004 έως 31 Δεκεμβρίου 2007. Οι χρονοσειρές των παραμέτρων παρουσίαζαν ελλείπουσες τιμές που συνήθως οφείλονται σε βλάβη του αισθητήρα, σε βλάβη μεταξύ της επικοινωνίας του Π.Σ. με τον Σ.Β. ή τέλος σε ανθρώπινο σφάλμα κατά την καταγραφή των δεδομένων. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για τη συμπλήρωση των ελλειπουσών τιμών, οι πιο συνηθισμένες σε υδρολογικές παρατηρήσεις είναι η αντικατάσταση τους με: α) τη μέση τιμή της χρονοσειράς (Series mean), β) τη μέση τιμή ή τη διάμεσο ενός μέρους τιμών της χρονοσειράς, πριν και μετά από το κενό (Mean or Median of nearby points), γ) γραμμική παρεμβολή (Linear Interpolation) και δ) γραμμική τάση για το συγκεκριμένο σημείο (Linear trend at point).

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της γραμμικής παρεμβολής, η οποία από προηγούμενες εργασίες κρίθηκε ως ικανοποιητική για τη συμπλήρωση ελλειπουσών τιμών (Sentas & Psilovikos 2010; 2012). Σύμφωνα με την παραπάνω μέθοδο

η τελευταία και η πρώτη υπάρχουσα τιμή της χρονοσειράς, πριν και μετά αντίστοιχα από την ή τις ελλείπουσες τιμές, χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ευθείας παλινδρόμησης, βάσει της οποίας εκτιμώνται οι ελλείπουσες τιμές.

Τα στατιστικά πακέτα που χρησιμοποιήθηκαν για τη στατιστική επεξεργασία και την προσαρμογή μοντέλων στα δεδομένα, ήταν το SPSS version 19.0 και το Matlab version 7.11.0584 (R2010b).

3.2 Βόρειο Δίκτυο – Περιφερειακός Σταθμός Παγονέρι

Το βόρειο δίκτυο – άνω ρους, όπως αναφέρθηκε (παρ. 2.2.1) είναι το τμήμα της ροής του ποταμού από τα ελληνοβουλγαρικά σύνορα μέχρι τη συμβολή του Νέστου με τον παραπόταμο Δοσπάτη. Είναι το τμήμα του ποταμού που δεν έχει υποστεί ανθρωπογενείς επεμβάσεις, στην έκταση που έχει υποστεί το κεντρικό και νότιο δίκτυο. Συνεπώς η ανάλυση των παραμέτρων των υδάτων της περιοχής αυτής, μπορεί να αποτελέσει σημείο αναφοράς και συγκριτικό στοιχείο για τις παραμέτρους και των υπολοίπων περιοχών.



(α)



(β)

Εικόνα 3.1: ΠΣ Βορείου Δικτύου (α) Δοσπάτη και (β) Παγονέρι.

Ακόμη, στόχος της λειτουργίας του σταθμού είναι η παρακολούθηση των ποσοτικών και ορισμένων ποιοτικών παραμέτρων των υδάτων του ποταμού Νέστου, κατά την είσοδο τους στην Ελλάδα από τη Βουλγαρία και η παρακολούθηση των μετεωρολογικών παραμέτρων στο χώρο που επηρεάζεται από την παρουσία της λίμνης του Θησαυ-

ρού (μικροκλιματικές αλλαγές) και έχει πιθανόν συνέπειες στο φυσικό περιβάλλον (δασικά συμπλέγματα) ή στα ανθρώπινα έργα (χιονοδρομικό κέντρο Φαλακρού).

Οι παραπάνω λόγοι καθιστούν τη στατιστική ανάλυση των παραμέτρων των υδάτων της περιοχής αυτής σημαντική και απαραίτητη. Για την εξαγωγή των συμπερασμάτων έγινε εκτίμηση τάσης, μεταβλητότητας των παραμέτρων, εντοπισμός των μεγίστων και ελαχίστων, αναζήτηση της κατανομής που ακολουθούν οι τιμές κάθε παραμέτρου και της εποχικότητάς τους.

Αναλύθηκαν ημερήσιες παρατηρήσεις από τον Π.Σ. Παγονέρι (παρ. 2.2.4.1) οι οποίες αναφέρονται σε ποιοτικές και ποσοτικές παραμέτρους των υδάτων του ποταμού, για τα έτη 2004 ως 2007. Οι ποιοτικές παράμετροι που εξετάστηκαν είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα (ECw), το διαλυμένο οξυγόνο (DO), το pH, η θερμοκρασία των υδάτων (Tw) και του αέρα (Ta), ενώ στις ποσοτικές ανήκει η στάθμη νερού (H).

Η μέθοδος προσέγγισης για την αξιολόγηση των παραμέτρων έγινε με περιγραφική στατιστική, με ανάλυση παλινδρόμησης και με ελέγχους καλής προσαρμογής. Από τα στοιχεία περιγραφικής στατιστικής η διασπορά, τα μέγιστα και ελάχιστα κάθε παραμέτρου και η εποχική συμπεριφορά τους ήταν αυτά που μας ενδιέφεραν. Με εφαρμογή ανάλυσης παλινδρόμησης, προσαρμόζοντας ευθεία ελαχίστων τετραγώνων, καθώς επίσης και με χρήση του διευρυμένου ελέγχου Dickey - Fuller ελέγχθηκε η γραμμική και στοχαστική τάση των παραμέτρων, ενώ με έλεγχο Kolmogorov-Smirnov ελέγχθηκε η προσαρμογή των δεδομένων στην κανονική και στη λογαριθμοκανονική κατανομή. Για όλους τους στατιστικούς ελέγχους χρησιμοποιήθηκε στάθμη σημαντικότητας $\alpha = 0,05$ ή 5%.

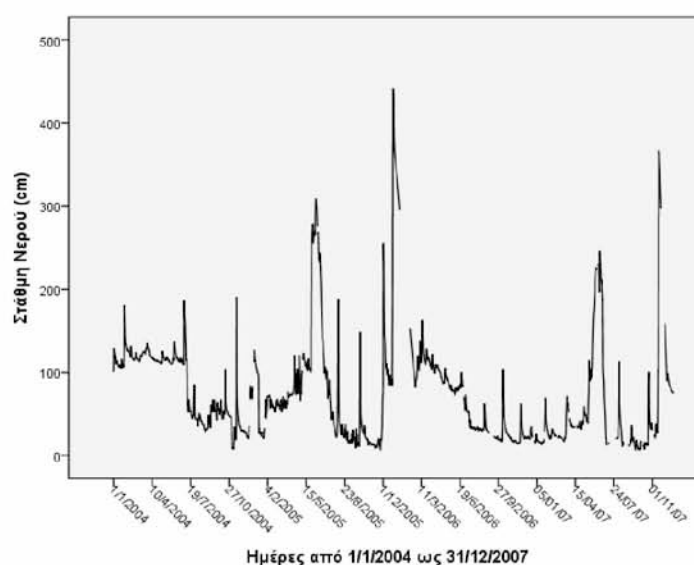
3.2.1 Αξιολόγηση των δεδομένων παρακολούθησης - Περιγραφική στατιστική

Στη χώρα μας τα όρια ποσιμότητας καθορίζονται από την ελληνική νομοθεσία (KYA Y2/260/2001), (ΦΕΚ 892/B/11 της 11/07/2001) εναρμονισμένη με την οδηγία 98/83/EK του Συμβουλίου της Ε.Ε. της 31/11/1998. Για τις παραμέτρους που αναλύονται στο Βόρειο δίκτυο και στον Π.Σ. Παγονέρι, τα κριτήρια ποιότητας καταγράφονται στον πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1: Κριτήρια ποιότητας υδάτων για πόση και για υδρόβια ζωή, σύμφωνα με την Ελληνική και Ευρωπαϊκή νομοθεσία.

Παράμετροι	Ελληνική Υπουργική Οδηγία (ΚΥΑ Υ2/2600/2001)		Ευρωπαϊκή Νομοθεσία (WHO, EU)
	Πόσιμο Νερό	Υδάτινο περιβάλλον	Πόσιμο Νερό
Ηλεκτρική Αγωγιμότητα ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	< 400	< 1000	< 400
pH	6,5 < pH < 8,5	5,5 < pH < 9	6,5 < pH < 8,5
Θερμοκρασία Νερού ($^{\circ}\text{C}$)	< 30	< 21,5 Σαλμονοειδή < 28 Κυπρινοειδή	< 25
Διαλυμένο Οξυγόνο (mg/l)	----	> 5	----

Στάθμη Νερού (H - cm). Είναι η παράμετρος η οποία, σε συνδυασμό με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής, καταγράφει την ποσότητα νερού που φτάνει από τη Βουλγαρία στην Ελλάδα. Η χρονοσειρά της παραμέτρου (σχ. 3.1) παρουσιάζει πολύ αιχμηρές κορυφές, ειδικά κατά τη διάρκεια του έτους 2005, με τιμές που ξεπερνάν τα 200 cm (από 29/5 έως 23/6 και 2-3/12), γεγονός που οφείλεται στην τήξη του χιονιού στη Βουλγαρία. Αξιοσημείωτο είναι ότι μέσα στο 2005 υπήρξαν και διαστήματα με τιμές μεγαλύτερες των 300 cm (9/6 έως 12/6 και 27/12 έως 31/12) λόγω τήξης χιονιού και έντονων βροχοπτώσεων. Υψηλές τιμές παρατηρήθηκαν επίσης και το έτος 2007,



Σχήμα 3.1: Η χρονοσειρά της παραμέτρου στάθμη νερού στον Π.Σ. Παγονέρι.

στις 6 έως 8 Ιουνίου (τιμές από 216 έως 223 cm) και από 17 έως 24 Ιουνίου (τιμές 200 έως 246 cm). Η μέγιστη στάθμη νερού καταγράφηκε στις 27 Δεκεμβρίου του 2005, με τιμή 442 cm. Παρατηρούμε ότι το έτος 2005 ήταν το έτος με τις μεγαλύτερες τιμές στάθμης νερού για το διάστημα των μετρήσεων, πράγμα το οποίο επιβεβαιώνεται και από το γεγονός ότι ενώ η μέση τιμή για το σύνολο των ετών 2004-2007 είναι 71,349 cm η μέση τιμή για το έτος 2005 είναι 80,045 cm.

Στον αντίποδα, χαμηλές τιμές (μικρότερες των 20 cm) καταγράφηκαν σε όλα τα έτη για τα οποία υπήρχαν μετρήσεις. Αναλυτικότερα, για το έτος 2004 κατά το μήνα Νοέμβριο, για διάστημα 10 ημερών παρατηρήθηκε στάθμη νερού μικρότερη των 20cm (3/11 έως 8/11 και 11/11 έως 14/11). Για το έτος 2005 διακρίνουμε δύο περιόδους με τιμές χαμηλές, από 1 Σεπτεμβρίου έως 1 Οκτωβρίου και από 19 Οκτωβρίου έως 25 Νοεμβρίου. Ομοίως για το έτος 2006 οι χαμηλότερες τιμές στάθμης νερού καταγράφονται από 26 Σεπτεμβρίου έως 7 Οκτωβρίου και από 31 Οκτωβρίου έως 22 Νοεμβρίου ενώ για το έτος 2007 έχουμε τρεις περιόδους χαμηλής στάθμης νερού, από 1 έως 23 Ιανουαρίου, από 13 έως 18 Μαρτίου και από 11 Σεπτεμβρίου έως 21 Οκτωβρίου, διάστημα στο οποίο καταγράφεται και η χαμηλότερη τιμή 5,88cm στις 19 Σεπτεμβρίου.

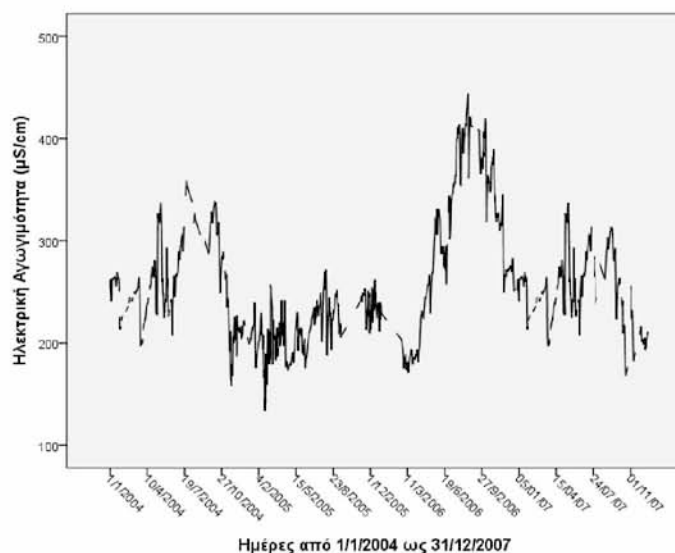
Οι χαμηλές τιμές στάθμης νερού και για τα τέσσερα έτη, καταγράφονται κατά την αρδευτική περίοδο και πριν αρχίσουν οι συστηματικά μεγάλοι ύψους βροχοπτώσεις, ενώ κάποια μικρά διαστήματα με πολύ χαμηλές τιμές στάθμης νερού, ερμηνεύονται ως περίοδοι ανομβρίας .

Τα σημαντικότερα περιγραφικά στατιστικά στοιχεία της παραμέτρου δίνονται στον πίνακα 3.2. Συμπερασματικά, για το διάστημα μελέτης 2004 έως 2007, παρατηρείται ότι:

- Υπάρχει συνεχής ροή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, παρατηρείται όμως μεγάλη διακύμανση μεταξύ των μέγιστων και ελάχιστων τιμών (τυπική απόκλιση 56,94 cm) και εύρος από 5,8 έως 442 cm.
- Το έτος 2005 παρουσιάζει τις υψηλότερες τιμές στάθμης νερού, ενώ το 2007 τις χαμηλότερες.
- Κατά τους μήνες Ιούνιο και Δεκέμβριο καταγράφονται οι υψηλότερες τιμές γεγονός το οποίο οφείλεται στην τήξη του χιονιού στους ορεινούς όγκους της Βουλγαρίας κατά τους θερινούς μήνες και σε πλημμυρικά φαινόμενα τους χειμερινούς μήνες.
- Οι περίοδοι υψηλής στάθμης που παρατηρούνται έχουν μικρή χρονική διάρκεια (αιχμηρές κορυφές).

- Κατά τους μήνες Σεπτέμβριο, Οκτώβριο και Νοέμβριο έχουμε τις χαμηλότερες τιμές της παραμέτρου, γεγονός το οποίο οφείλεται στην κατακράτηση υδάτων τόσο στα φράγματα της Βουλγαρίας όσο και της Ελλάδας (Θησαυρός, Πλατανόβρυση) για αρδευτικές ανάγκες και στην έλλειψη επανατροφοδότησης λόγω μείωσης των βροχοπτώσεων.

Ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC_w – μS/cm). Οι τιμές της παρουσιάζουν απότομες μεταβολές και διακυμάνσεις μεταξύ 130-440 μS/cm (ελάχιστη τιμή 134 μS/cm στις 20/2/2005 και μέγιστη 444,22 μS/cm στις 21/8/2006) (σχ. 3.2). Η μέση τιμή της παραμέτρου για το σύνολο των παρατηρήσεων είναι 257,88 μS/cm και η τυπική απόκλιση 57,83 μS/cm (πίν. 3.2).



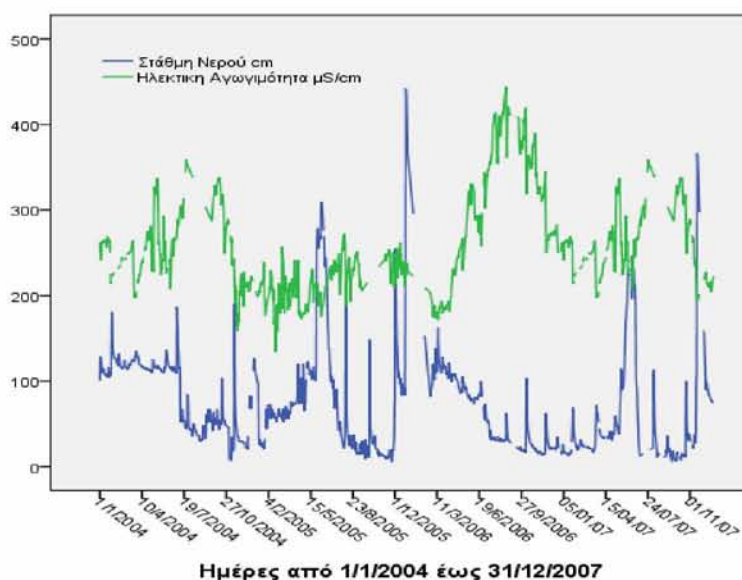
Σχήμα 3.2: Η χρονοσειρά της παραμέτρου ηλεκτρική αγωγιμότητα στον Π.Σ. Παγονέρι.

Η αγωγιμότητα, μας παρέχει πληροφορίες για την κατάσταση των διαλυμένων αλάτων και των ιόντων στο νερό, χωρίς την ποιοτική πληροφορία, δηλαδή τί είδους είναι τα ιόντα και τα άλατα αυτά εάν προέρχονται δηλαδή από στοιχεία ή ενώσεις όπως π.χ. τα θρεπτικά. Για το λόγο αυτό δεν μπορεί να δοθεί ακριβής ερμηνεία εάν οι τιμές της οφείλονται σε κάποια συγκεκριμένη αιτία. Σε γενικές γραμμές αυξημένες τιμές στις στάθμες και παροχές, συνοδεύονται με μειωμένες τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και το αντίστροφο.

Άρα είναι προφανές ότι οι παράμετροι στάθμη-αγωγιμότητα συνδέονται αντιστρόφως ανάλογα (υψηλή στάθμη – χαμηλή αγωγιμότητα) (σχ. 3.3). Αυτή η αντίθετη πορεία

επιβεβαιώνεται και στη συνέχεια με τη βοήθεια των μοντέλων τάσης και έχει επιβεβαιωθεί και με προηγούμενες εργασίες για το συγκεκριμένο ποταμό (Psilonikos *et al.* 2006, Margoni & Psilonikos 2010).

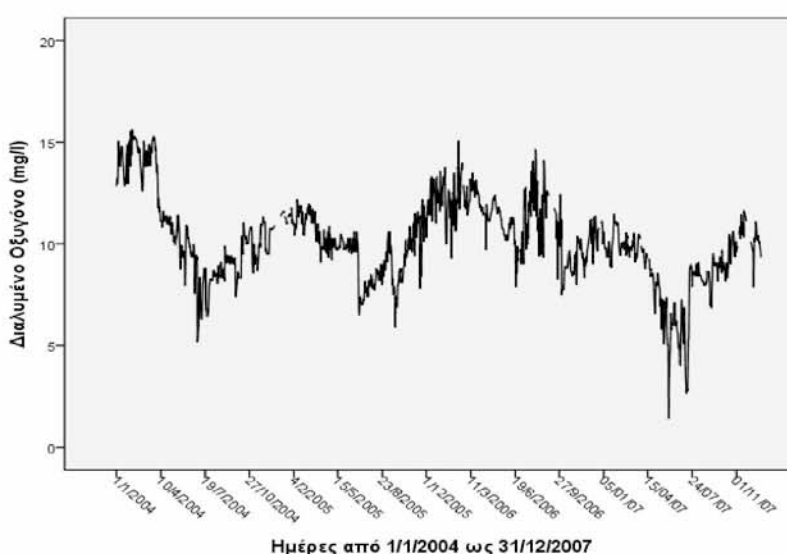
Οι μετρήσεις της ηλεκτρικής αγωγιμότητας δείχνουν ότι ποιοτικά το νερό είναι πολύ καλό για αστική και αρδευτική χρήση, καθώς το σύνολο των τιμών είναι κάτω από 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, όριο το οποίο θέτει η Ελληνική νομοθεσία (ΚΥΑ Υ2/2600/2001). Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή νομοθεσία (WHO 1984, EC 2000) η οποία είναι αυστηρότερη της Ελληνικής θέτοντας ως ανώτατο όριο τιμών τα 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$, υπάρχουν διαστήματα μέσα στο 2006 (22/7 έως 29/7, 5/8 έως 20/9 και 3/10 έως 7/10) που σημειώθηκε υπέρβαση του ορίου, φτάνοντας μέχρι την ανώτατη τιμή των 444,22 $\mu\text{S}/\text{cm}$, φαινόμενο το οποίο οφείλεται σε κάποιο έκτακτο γεγονός, καθότι όλες οι υπόλοιπες τιμές βρίσκονται κάτω του ορίου (πιν. 3.1).



Σχήμα 3.3: Οι χρονοσειρές των παραμέτρων στάθμη νερού και ηλ. Αγωγιμότητας.

Συνοψίζοντας θα μπορούσε να ειπωθεί ότι οι τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στη ροή του ποταμού στο βόρειο τμήμα, δείχνουν εν γένει την καταλληλότητα του νερού όσον αφορά τη χρήση του για άρδευση, καθώς επίσης και την καλή ποιότητά του από πλευράς διαλυμένων αλάτων, γεγονός που έχει θετική επίδραση στην τροφοδοσία των υπόγειων υδροφόρων στρωμάτων της περιοχής, συμπέρασμα το οποίο συμφωνεί και με παλιότερη έρευνα (Psilonikos 2004).

Διαλυμένο Οξυγόνο (DO – mg/l). Οι μετρήσεις της παραμέτρου διαλυμένο οξυγόνο, όπως παρατηρείται στο σχήμα 3.4, κυμαίνονται σχεδόν σε όλη την περίοδο έρευνας σε ικανοποιητικά επίπεδα, 1,40 έως 15,62 mg/l, με μικρές κατά περιόδους διακυμάνσεις. Η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση είναι 10,13 mg/l και 2,08 mg/l αντίστοιχα, ενώ η διάμεσος είναι 10,05 mg/l πράγμα το οποίο σημαίνει ότι οι μισές παρατηρήσεις έχουν τιμή μικρότερη του 10,05 ενώ οι υπόλοιπες είναι μεγαλύτερες. Η μέγιστη τιμή 15,62 mg/l καταγράφηκε στις 5 Φεβρουαρίου του 2004, ενώ η ελάχιστη 1,40 mg/l σημειώθηκε την πρώτη Ιουνίου 2007 (πίν. 3.2).



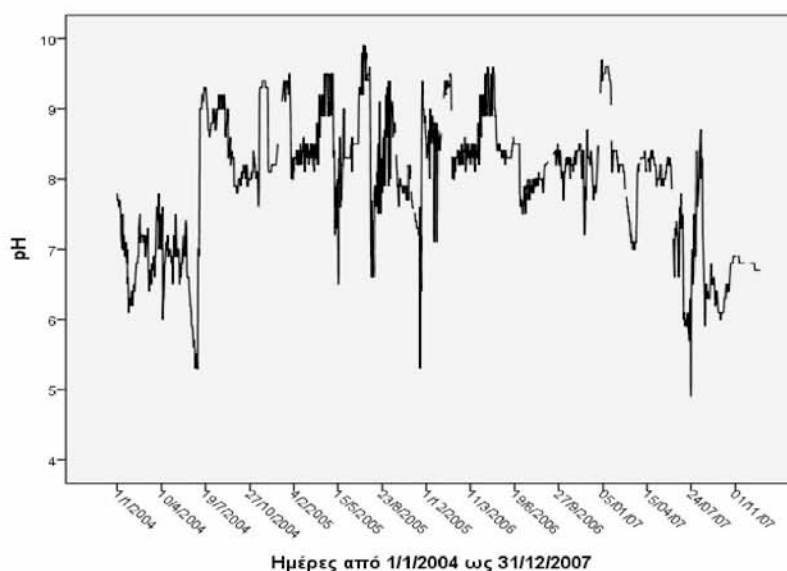
Σχήμα 3.4: Η χρονοσειρά της παραμέτρου διαλυμένο οξυγόνο στον Π.Σ. Παγονέρι.

Όπως αναφέρθηκε (παρ. 2.3.4) το διαλυμένο οξυγόνο είναι μια από τις πιο σημαντικές ποιοτικές παραμέτρους των υδάτων, καθώς αποτελεί βασικό στοιχείο για την ύπαρξη ζωής στο υδάτινο περιβάλλον. Βάσει της ελληνικής νομοθεσίας (ΚΥΑ 46399/1352/1986) το κατώτατο επιτρεπόμενο όριο για τη διατήρηση της υδρόβιας ζωής είναι η τιμή 5 mg/l κατά μέσο όρο ημερησίως. Σε τιμές χαμηλότερες του ορίου οι αναερόβιες διαδικασίες αποσύνθεσης ευνοούνται με αποτέλεσμα να πιέζονται οι οργανισμοί λόγω μικρής κατανάλωσης διαθέσιμου διαλυμένου οξυγόνου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, περίοδοι με τιμές χαμηλότερες του ορίου παρατηρούνται κατά τους θερινούς μήνες του έτους 2007 και για τα διαστήματα 1 με 6 Ιουνίου, 24 με 27 Ιουνίου και 8 με 14 Ιουλίου, Πιθανότατα λόγω των φαινομένων ευτροφισμού που βρίσκονται σε έξαρση κατά τους μήνες Ιούλιο – Οκτώβριο.

Από όλα τα παραπάνω γίνεται σαφές ότι η κατάσταση των υδάτων, όσον αφορά την

παράμετρο διαλυμένο οξυγόνο είναι πολύ καλή, με τιμές οι οποίες σε κάποιες περιπτώσεις πλησιάζουν τα επίπεδα κορεσμού, ενώ σε κάποιες άλλες τις ξεπερνούν προφανώς λόγω φωτοσύνθεσης και παραγωγής οξυγόνου από τους φυτοπλαγκτονικούς οργανισμούς.

Συγκέντρωση ιόντων υδρογόνου (pH). Οι τιμές της παραμέτρου κυμαίνονται από 5 μέχρι 10, με μέγιστη τιμή 9,9 στις 12 και 13 Ιουλίου του 2005 και ελάχιστη 4,9 στις 24 Ιουλίου του 2007 (σχ. 3.5). Η τυπική απόκλιση για το σύνολο των παρατηρήσεων είναι 0,93 και η μέση τιμή 7,9 τιμή ικανοποιητική καθώς το pH του νερού πολλών ελληνικών ποταμών είναι κοντά στο 8 (Μαμάης 2008-2009).

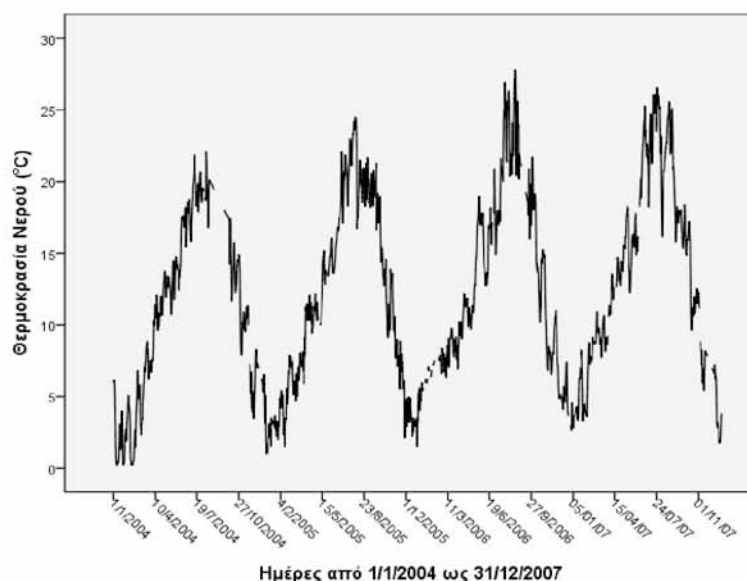


Σχήμα 3.5: Η χρονοσειρά της παραμέτρου pH στον Π.Σ. Παγονέρι.

Το σύνολο σχεδόν των υδρόβιων και χερσαίων οργανισμών, δεν μπορούν να ανεχθούν τιμές του pH που είναι μακριά από την τιμή 7. Βάσει της Ελληνικής και Ευρωπαϊκής νομοθεσίας για να χαρακτηριστεί το νερό ως πόσιμο θα πρέπει οι τιμές του να κυμαίνονται στο διάστημα μεταξύ 6,5 και 8,5. Στην περίπτωση της παραμέτρου pH στον Π.Σ. Παγονέρι το 36,4% του συνόλου των παρατηρήσεων βρίσκεται έξω από αυτό το διάστημα. Βάσει της ίδιας νομοθεσίας το νερό χαρακτηρίζεται ως κατάλληλο για τους υδρόβιους οργανισμούς, όταν το pH κυμαίνεται μεταξύ 5,5 και 9,5. Το ποσοστό των παρατηρήσεων που βρίσκονται έξω από αυτό το διάστημα είναι 4,87%.

Γίνεται λοιπόν φανερό ότι ως προς το pH το νερό του ποταμού Νέστου, στο Βόρειο τμήμα, είναι γενικά σε καλή κατάσταση και κατάλληλο για τη διατήρηση της υδρόβιας ζωής.

Θερμοκρασία νερού ($T_w - ^\circ\text{C}$). Οι τιμές της κυμαίνονται από $0\text{ }^\circ\text{C}$ έως $28\text{ }^\circ\text{C}$. Η μέγιστη τιμή $27,81\text{ }^\circ\text{C}$ σημειώνεται στις 7 Αυγούστου του 2006, ενώ η ελάχιστη τιμή $0,23\text{ }^\circ\text{C}$ στις 24 Ιανουαρίου του 2004 (σχ. 3.6). Η μέση τιμή της θερμοκρασίας νερού ανέρχεται στους $12,12\text{ }^\circ\text{C}$, ενώ η τυπική απόκλιση στους $6,55\text{ }^\circ\text{C}$. Οι μεταβολές της θερμοκρασίας του νερού κρίνονται φυσιολογικές καθώς κατά τη διάρκεια του χειμώνα είναι χαμηλές ενώ κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού είναι υψηλές, όπως αναμένεται, χωρίς απότομες διακυμάνσεις.



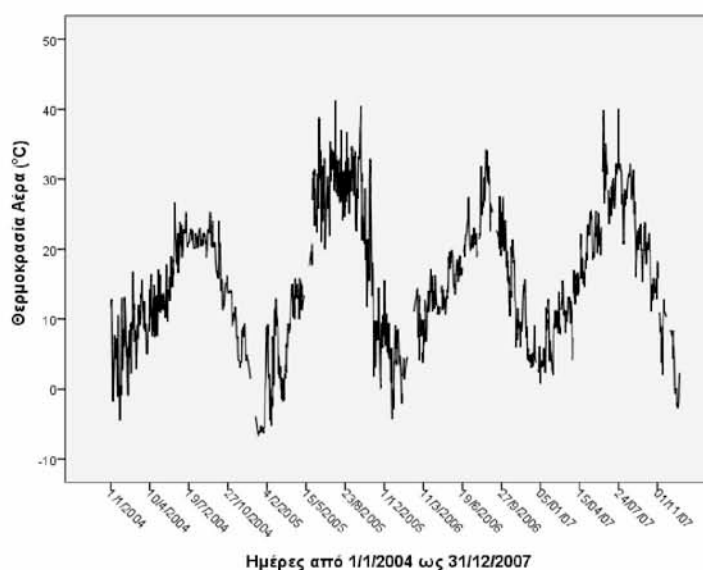
Σχήμα 3.6: Η χρονοσειρά της παραμέτρου θερμοκρασία νερού στον Π.Σ. Παγονέρι.

Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος (νερού) είναι ο ρυθμιστής της θερμοκρασίας του σώματος των ψαριών και συνεπώς και της ταχύτητας μεταβολισμού η οποία διπλασιάζεται για αύξηση της θερμοκρασίας κατά $10\text{ }^\circ\text{C}$. Ανάλογα αυξάνονται και οι απαιτήσεις σε οξυγόνο στις οποίες είναι δυνατό να μη μπορεί να ανταποκριθεί το αναπνευστικό σύστημα των ψαριών με πιθανό αποτέλεσμα το θάνατο από ασφυξία.

Οι Οδηγίες της Ε.Ε. ορίζουν ότι το νερό για να είναι κατάλληλο για πόση θα πρέπει η θερμοκρασία του να είναι κάτω από $25\text{ }^\circ\text{C}$. Από τις παρατηρήσεις που αναλύθηκαν βρέθηκε ότι μόνο ένα ποσοστό της τάξης του 2,44% ήταν πάνω από αυτή την τιμή. Τα αντίστοιχα όρια που θέτει η Ελληνική οδηγία είναι για πόσιμο νερό κάτω από $30\text{ }^\circ\text{C}$, ενώ σε ότι αφορά τη διαβίωση των ιχθύων κάτω από $21,5\text{ }^\circ\text{C}$ και $28\text{ }^\circ\text{C}$ για σαλμονίδες και κυπρινίδες αντίστοιχως. Τα ποσοστά που υπολογίστηκαν πάνω από τα προαναφερόμενα όρια ήταν 0%, 9,01% και 0% αντίστοιχα.

Από τα παραπάνω στοιχεία φαίνεται ότι το νερό του ποταμού, στη θέση Παγονέρι, ως προς τη θερμοκρασία του είναι στα επιθυμητά όρια, σύμφωνα με την ισχύουσα Νομοθεσία.

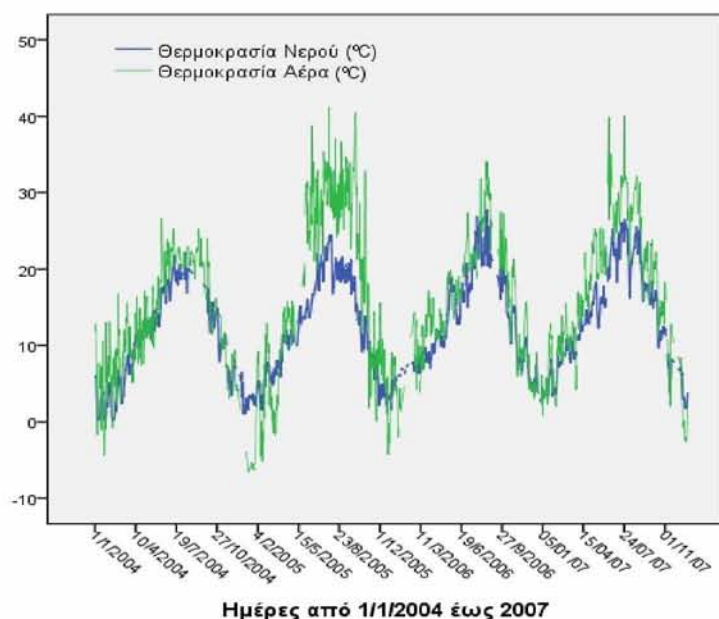
Θερμοκρασία αέρα ($T_a - ^\circ\text{C}$). Η μέγιστη και ελάχιστη τιμή που σημειώνεται κατά τη διάρκεια του έτους είναι $-6,6\text{ }^\circ\text{C}$ στις 12 και 13 Ιανουαρίου του 2005 και $41,2\text{ }^\circ\text{C}$ στις 29 Ιουλίου του 2005 (σχήμα 3.7), με μέση τιμή $15,54\text{ }^\circ\text{C}$ και τυπική απόκλιση $9,50\text{ }^\circ\text{C}$. Η συμπεριφορά της παραμέτρου κρίνεται κανονική και αναμενόμενη.



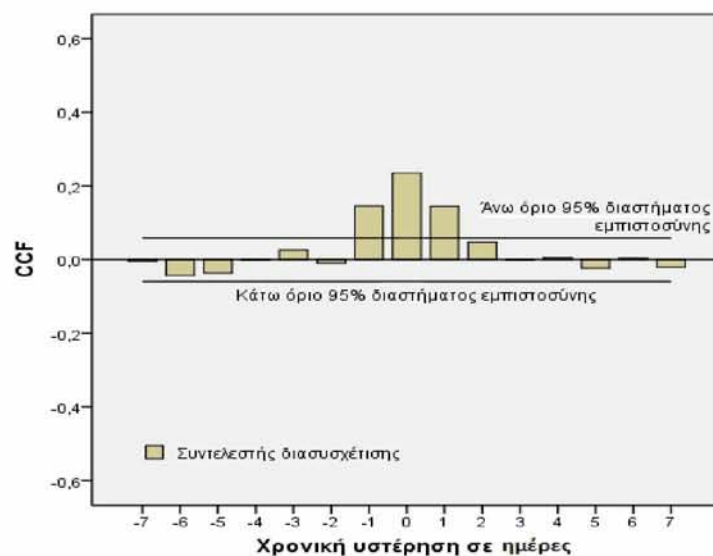
Σχήμα 3.7: Η χρονοσειρά της παραμέτρου θερμοκρασία αέρα στον Π.Σ. Παγονέρι.

Συγκρίνοντας τα στοιχεία της θερμοκρασίας του νερού και του αέρα της περιοχής (σχ. 3.8), παρατηρούμε ότι και οι δύο παράμετροι παρουσιάζουν φυσιολογική εποχικότητα, δηλαδή αυξημένες τιμές τους θερινούς μήνες και μειωμένες τιμές τους χειμερινούς μήνες.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η εκτίμηση της χρονικής υστέρησης με την οποία η μια χρονοσειρά επηρεάζει την άλλη, δηλαδή η αλλαγή στη θερμοκρασία του αέρα μετά από πόσες ημέρες επηρεάζει την θερμοκρασία των επιφανειακών υδάτων του ποταμού. Για το σκοπό αυτό εφαρμόστηκαν ARIMA μοντέλα στις δύο χρονοσειρές και υπολογίστηκε η συνάρτηση διασυσχέτισης (Cross Correlation Function – CCF) μεταξύ των σφαλμάτων που προέκυψαν μετά την προσαρμογή των μοντέλων (σχ. 3.9).



Σχήμα 3.8: Η χρονοσειρά της παραμέτρου θερμοκρασία νερού και αέρα.



Σχήμα 3.9: Γράφημα της συνάρτησης διασυσχέτισης, μεταξύ των σφαλμάτων των παραμέτρων θερμοκρασία νερού και αέρα.

Από το σχήμα 3.9 παρατηρούμε ότι υπάρχει σημαντική χρονική υστέρηση μιας ημέρας και οριακά δύο ημερών, που σημαίνει ότι η κάθε μεταβολή της θερμοκρασίας του αέρα επιφέρει αντίστοιχη μεταβολή στη θερμοκρασία των υδάτων την επόμενη τουλάχιστον μέρα.

Στον πίνακα 3.2 αναγράφονται όλα τα περιγραφικά στατιστικά των παραμέτρων που αναλύσαμε.

Πίνακας 3.2: Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία των παραμέτρων του Π.Σ. Παγονέρι.

Τ.Σ. Παγονέρι	Στάθμη Νερού (cm)	Ηλεκτρική Αγωγιμότητα (μS/cm)	Διαλυμένο Οξυγόνο (mg/l)	pH	Θερμοκρασία Νερού (°C)	Θερμοκρασία Αέρα (°C)
Μέγιστη τιμή	442,00	444,22	15,62	9,9	27,81	41,20
Ελάχιστη τιμή	5,80	134,00	1,40	4,9	0,23	-6,60
Μέση τιμή	71,34	257,88	10,13	7,9	12,12	15,54
Διασπορά	3242,37	3344,72	4,36	0,86	43,01	90,38
Τυπ. απόκλιση	56,94	57,83	2,08	0,93	6,55	9,50
Διάμεσος	57,09	247,36	10,05	8,20	11,49	14,61

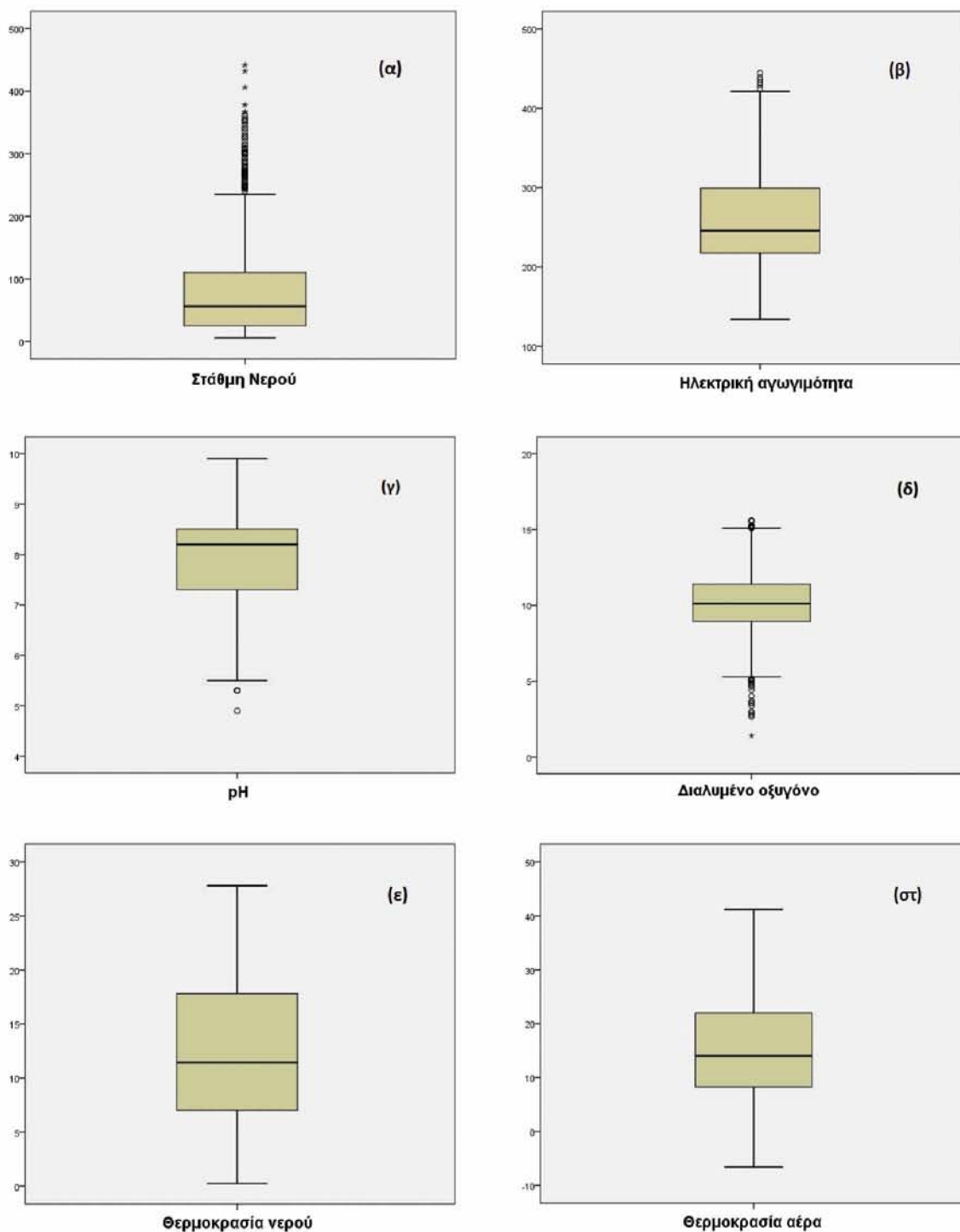
3.2.2 Έλεγχος προσαρμογής σε κατανομή

Ο έλεγχος προσαρμογής των δεδομένων μιας παραμέτρου, στην κατανομή που ακολουθεί ο πληθυσμός, αποτελεί κριτήριο επιλογής των στατιστικών διαδικασιών που θα χρησιμοποιηθούν για περαιτέρω ανάλυση (ανάλυση συσχέτισης, ανάλυση τάσης κ.ά.), κατά τον έλεγχο των υποθέσεων και κατά την εφαρμογή πιθανών μετασχηματισμών των παραμέτρων (Helsel & Hirsch 1992, Mitsiou *et al.* 1999).

Μια εικόνα της εμπειρικής κατανομής των δεδομένων η οποία προϋποθέτει για την προσαρμογή σε κάποια κατανομή, μπορούμε να πάρουμε με την κατασκευή θηκογραμμάτων. Στο σχήμα 3.10 παρουσιάζονται τα θηκογράμματα των παραμέτρων που εξετάστηκαν στον Π.Σ. Παγονέρι.

Από το σχήμα 3.10 γίνεται φανερό ότι οι χρονοσειρές των παραμέτρων στάθμη νερού (α), ηλεκτρική αγωγιμότητα (β) και pH (γ), παρουσιάζουν ακραίες, υψηλές και χαμηλές τιμές, εμφανίζουν ασυμμετρία και απομακρύνουν την πιθανότητα προσαρμογής στην κανονική κατανομή. Η παράμετρος διαλυμένο οξυγόνο (δ) παρουσιάζει ακραίες τιμές, όμως οι υπόλοιπες δείχνουν να κατανέμονται συμμετρικά πάνω και κάτω από τη διάμεσο σε αντίθεση με τις παραμέτρους θερμοκρασία νερού (ε) και αέρα (στ) που δεν υπάρχουν ακραίες τιμές, αλλά η κατανομή των τιμών δε φαίνεται να είναι συμμετρική.

Ο έλεγχος προσαρμογής των δεδομένων στην κανονική και στην λογαριθμοκανονική κατανομή (Normal and Lognormal distribution) έγινε με το μη παραμετρικό στατιστικό test των Kolmogorov-Smirnov (παρ. 2.4.1).



Σχήμα 3.10: Θηκογράμματα των παραμέτρων (α) Στάθμη νερού, (β) ηλεκτρική αγωγιμότητα, (γ) pH, (δ) διαλυμένο οξυγόνο, (ε) θερμοκρασία νερού και (στ) αέρα, του Π.Σ. Παγονέρι.

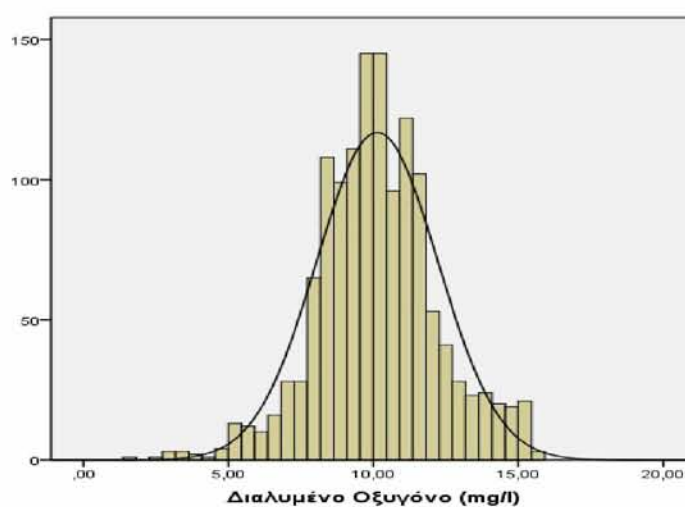
Στον πίνακα 3.2 αναγράφεται η σημαντικότητα (sig.) όλων των ελέγχων, καθώς και η αποδοχή ή η απόρριψη της προσαρμογής στις δύο ελεγχόμενες κατανομές.

Πίνακας 3.3: Έλεγχος προσαρμογής σε κατανομή, για τις παραμέτρους του Π.Σ. Παγονέρι.

Τ.Σ. Παγονέρι Έλεγχος Κατανομής		Στάθμη Νερού (cm)	Ηλεκτρική Αγωγιμότητα ($\mu\text{S/cm}$)	Διαλυμένο Οξυγόνο (mg/l)	pH	Θερμοκρασία Νερού ($^{\circ}\text{C}$)	Θερμοκρασία Αέρα ($^{\circ}\text{C}$)
Κανονική κατανομή	Προσαρμογή	όχι	όχι	Οριακά ναι	όχι	όχι	όχι
	Sig.	0,000	0,000	0,011	0,000	0,001	0,005
Λογ/νική κατανομή	Προσαρμογή	όχι	όχι	όχι	όχι	όχι	όχι
	Sig.	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,005

Το συμπέρασμα το οποίο εξάγεται είναι ότι καμία από τις παραμέτρους δεν ακολουθεί κανονική ή λογαριθμοκανονική κατανομή, εκτός από την παράμετρο διαλυμένο οξυγόνο, η οποία για στάθμη σημαντικότητας 5% ($\alpha = 0,05$) δεν ακολουθεί την κανονική κατανομή ενώ για στάθμη σημαντικότητας 1% ($\alpha = 0,01$) την ακολουθεί.

Η προσαρμογή μιας παραμέτρου στην κανονική κατανομή σημαίνει ότι οι περισσότερες τιμές της, με πολύ μεγάλη πιθανότητα, βρίσκονται γύρω από τη μέση τιμή και με πολύ μικρή πιθανότητα υπάρχουν τιμές απομακρυσμένες από τη μέση τιμή. Στην περίπτωση της παραμέτρου διαλυμένο οξυγόνο (σχ. 3.11), η φυσική ερμηνεία της προσαρμογής στην κανονική κατανομή, είναι ότι οι τιμές της κατανέμονται συμμετρικά γύρω από τη μέση τιμή (10,13 mg/l), στο διάστημα [8,05 , 12,21] ανήκει περίπου το 67% των παρατηρήσεων, ενώ η πιθανότητα μία τιμή να βρίσκεται έξω από το διάστημα [3,89, 16,37] είναι πάρα πολύ μικρή (Psilovikos & Sentas 2009).

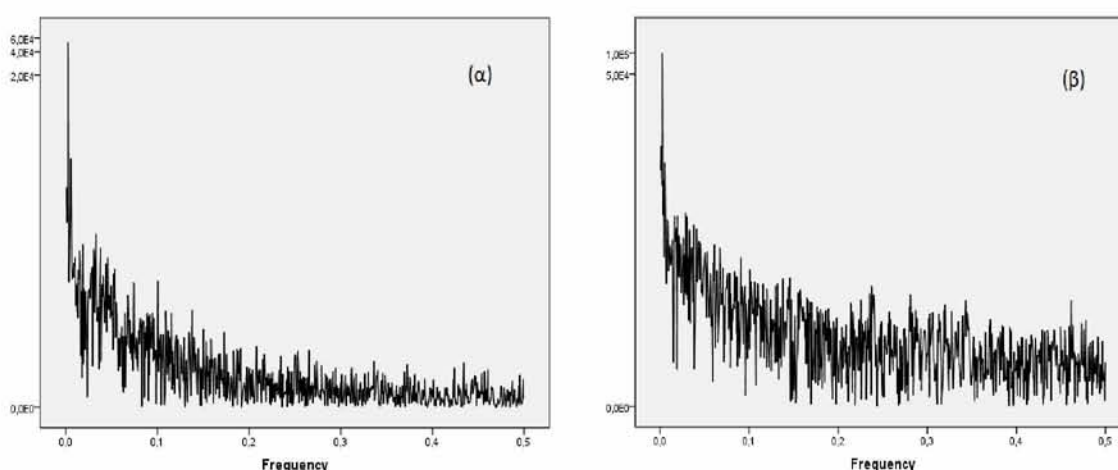


Σχήμα 3.11: Ιστόγραμμα συχνοτήτων και προσαρμοσμένη κανονική κατανομή της παραμέτρου διαλυμένο οξυγόνο.

3.2.3 Έλεγχος τάσης των παραμέτρων

α) Αποτελέσματα ελέγχου τάσης με προσαρμογή ευθείας

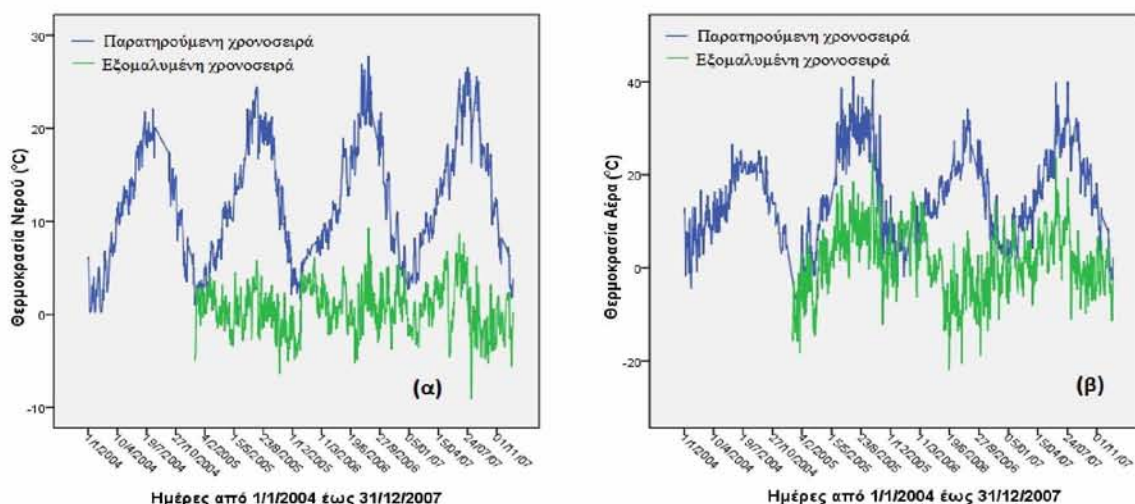
Στο σταθμό Παγονέρι ελέγχθηκαν όλες οι παράμετροι για την ύπαρξη τάσης. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι παράμετροι θερμοκρασία νερού και αέρα, καθώς αναμένεται να έχουν εποχικότητα. Δεδομένου ότι οι παρατηρήσεις που αναλύονται είναι ημερήσιες, η αναμενόμενη εποχικότητα και για τις δύο παραμέτρους είναι ανά 365 ημέρες. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται από το περιοδογράμμα τους (σχ. 3.12α και 3.12β), στα οποία η μεγαλύτερη συνιστώσα αντιστοιχεί σε συχνότητα $1/365 \approx 0$.



Σχήμα 3.12: Περιοδογράμματα των παραμέτρων θερμοκρασία (α) νερού και (β) αέρα.

Βάσει της θεωρίας των χρονοσειρών (παρ. 2.4.3) θα πρέπει πρώτα να απαλειφθεί η εποχικότητα και μετά να γίνει έλεγχος τάσης. Η απαλοιφή της εποχικότητας έγινε λαμβάνοντας διαφορές υστέρησης ίσης με την εποχικότητα s , δηλαδή $y'_t = y_t - y_{t-365}$ (Κουγιουμτζής 2012). Με τον τρόπο αυτό απαλείφεται η περιοδικότητα, δηλαδή απαλείφεται ουσιαστικά το περιοδικό στοιχείο τάξης s . Στις νέες χρονοσειρές εφαρμόστηκαν οι έλεγχοι τάσης και για τις δύο παραμέτρους (σχ. 3.13α και 3.13β).

Τα αποτελέσματα ελέγχου τάσης με εφαρμογή ανάλυσης παλινδρόμησης, δίνονται στον πίνακα 3.4, στον οποίο αναγράφονται οι τιμές του σταθερού όρου και της κλίσης της ευθείας, η τυπική απόκλισή τους, το στατιστικό t της κατανομής Student και η σημαντικότητα του ελέγχου. Παρατηρούμε ότι οι παράμετροι στάθμη νερού, ηλεκτρική αγωγιμότητα, διαλυμένο οξυγόνο και pH παρουσιάζουν τάση, αφού η σημαντικότητα του ελέγχου της κλίσης της ευθείας είναι μικρότερη του 0,05.



Σχήμα 3.13: Παρατηρούμενη και εξομαλυμένη χρονοσειρά των παραμέτρων θερμοκρασία (α) νερού και (β) αέρα για τον Π.Σ. Παγονέρι.

Πίνακας 3.4: Αποτελέσματα ελέγχου τάσης με προσαρμογή ευθείας, για τον Π.Σ. Παγονέρι.

Τ.Σ. Παγονέρι Ανάλυση Τάσης Ευθεία παλινδρόμησης		Εκτίμηση σταθεράς	Τυπική απόκλιση	t	Σημαντικότητα του ελέγχου
Στάθμη νερού	α (σταθ. όρος)	97,996	2,960	33,103	0,000
	β (κλίση)	-0,039	0,004	-10,540	0,000
Ηλεκτρική αγωγιμότητα	α (σταθ. όρος)	227,964	3,478	65,536	0,000
	β (κλίση)	0,042	0,004	9,870	0,000
Διαλυμένο οξυγόνο	α (σταθ. όρος)	11,422	0,105	108,818	0,000
	β (κλίση)	-0,002	0,032	-14,225	0,000
pH	α (σταθ. όρος)	8,113	0,050	163,230	0,000
	β (κλίση)	0,000	0,016	-3,499	0,000
Θερμοκρασία Νερού	α (σταθ. όρος)	0,770	0,239	3,226	0,001
	β (κλίση)	0,000	0,000	-0,644	0,519
Θερμοκρασία Αέρα	α (σταθ. όρος)	2,074	0,649	3,193	0,001
	β (κλίση)	-0,001	0,001	-1,342	0,180

Ειδικότερα η παράμετρος στάθμη νερού παρουσιάζει αρνητική τάση ($\beta = -0,039$), η ευθεία παλινδρόμησης που προσαρμόζεται είναι η $y = 97,996 - 0,039 \cdot t$. Το αρνητικό πρόσημο της τάσης σημαίνει ότι παρατηρείται ελάττωση της στάθμης του νερού, συναρτήσει του χρόνου.

Η παράμετρος ηλεκτρική αγωγιμότητα παρουσιάζει αυξητική τάση, η κλίση της ευθείας εκτιμάται ίση με 0,042, ενώ η ευθεία παλινδρόμησης που προσαρμόζεται στη

χρονοσειρά, είναι η $y = 227,964 + 0,042 \cdot t$.

Για την παράμετρο διαλυμένο οξυγόνο η εκτιμώμενη τάση είναι αρνητική, με τιμή κλίσης $-0,002$ και εξίσωση προσαρμοσμένης ευθείας $y = 11,422 - 0,002 \cdot t$.

Στην περίπτωση της παραμέτρου pH, η τιμή της σημαντικότητας του ελέγχου είναι μικρότερη του $0,05$ που σημαίνει ότι υπάρχει τάση, όμως η τιμή της κλίσης είναι μηδέν, που σημαίνει $\beta < 0,0005$ με αποτέλεσμα να οδηγούμαστε σε αντιφατικά συμπεράσματα. Για ακριβέστερα συμπεράσματα η εφαρμογή του ADF ελέγχου θεωρείται απαραίτητη.

Για τις παραμέτρους θερμοκρασία νερού και αέρα η γραμμική τάση εκτιμάται ως ασήμαντη. Δηλαδή, από το συγκεκριμένο σύνολο μετρήσεων που αναλύθηκαν, εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι θερμοκρασίες δεν παρουσιάζουν αύξηση ή μείωση των τιμών τους συναρτήσει του χρόνου.

β) Αποτελέσματα ελέγχου τάσης με το ADF test

Τα αποτελέσματα ελέγχου τάσης με εφαρμογή του επαυξημένου ελέγχου Dickey-Fuller, δίνονται στον πίνακα 3.5 στον οποίο αναγράφεται η ύπαρξη γραμμικής ή στοχαστικής τάσης, η τιμή του εκτιμώμενου $\hat{\delta}_1$ το πρόσημο του οποίου σε συνδυασμό με τη σημαντικότητα του δείχνει εάν η γραμμική τάση είναι θετική ή αρνητική και τέλος η σημαντικότητα του κάθε ελέγχου.

Πίνακας 3.5: Αποτελέσματα ADF ελέγχου, για τον Π.Σ. Παγονέρι.

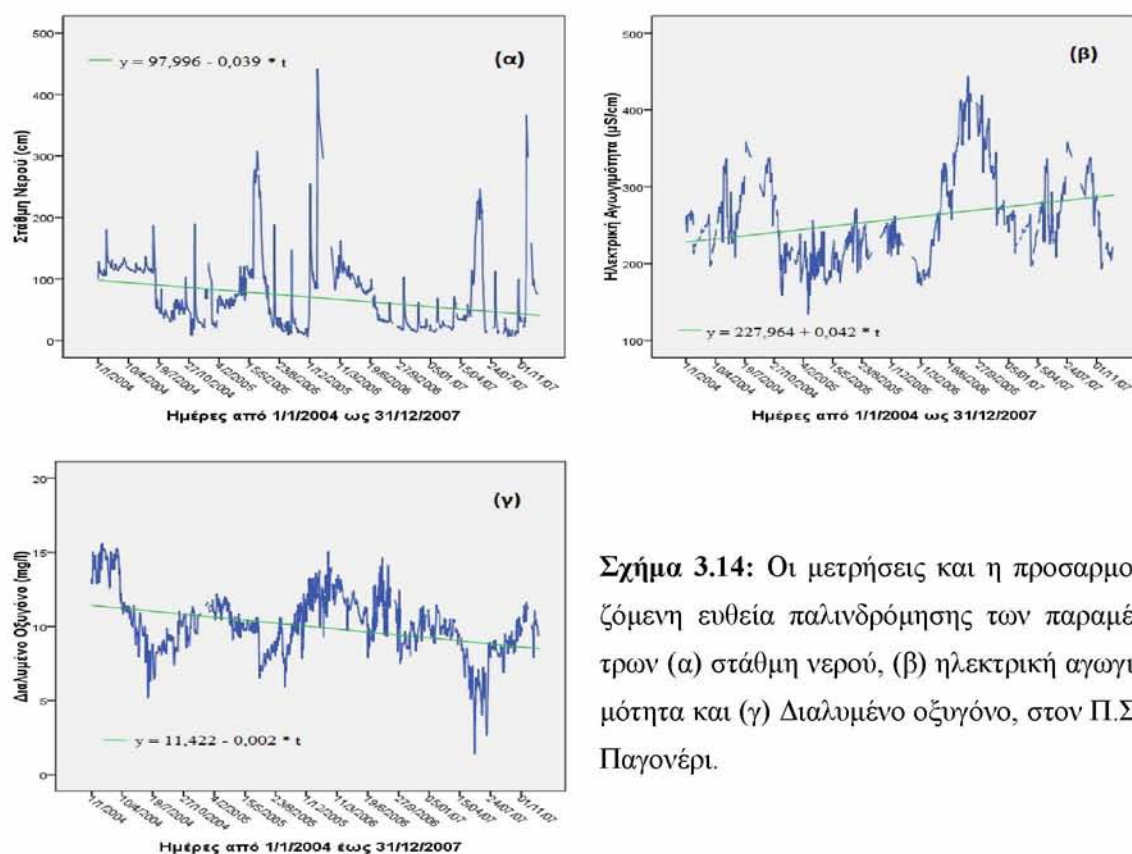
Τ.Σ. Παγονέρι Ανάλυση Τάσης Έλεγχος ADF		Ύπαρξη τάσης	$\hat{\delta}_1$	Σημαντικότητα του ελέγχου
Στάθμη νερού	Γραμμική τάση	οριακά ναι	-0,0034	0,0479
	Στοχαστική τάση	όχι	-	< 0,001
Ηλεκτρική αγωγιμότητα	Γραμμική τάση	ναι	0,00141	0,0183
	Στοχαστική τάση	όχι	-	0,01421
Διαλυμένο οξυγόνο	Γραμμική τάση	ναι	-0,00011	0,0247
	Στοχαστική τάση	όχι	-	< 0,001
pH	Γραμμική τάση	όχι	0,00002	0,4672
	Στοχαστική τάση	όχι	-	< 0,001
Θερμοκρασία Νερού	Γραμμική τάση	όχι	-0,00005	0,6781
	Στοχαστική τάση	οριακά ναι	-	0,0553
Θερμοκρασία Αέρα	Γραμμική τάση	όχι	-0,00022	0,5281
	Στοχαστική τάση	ναι	-	0,18776

Σύμφωνα με τον πίνακα 3.5:

- Επιβεβαιώνεται η ύπαρξη γραμμικής τάσης των παραμέτρων στάθμη νερού, ηλεκτρική αγωγιμότητα και διαλυμένο οξυγόνο.
- Για την παράμετρο pH δεν υπάρχει στοχαστική τάση, επίσης διευκρινίζεται η ασάφεια του πρώτου ελέγχου και τελικά δεν παρουσιάζει ούτε γραμμική τάση. Ο έλεγχος ADF θεωρείται πιο πλήρης και το συμπέρασμα στηρίζεται σε αυτόν.
- Όλες οι παράμετροι δεν παρουσιάζουν στοχαστική τάση με εξαίρεση τις παραμέτρους θερμοκρασία νερού και αέρα.

Η ύπαρξη στοχαστικής τάσης στις παραμέτρους θερμοκρασία νερού και αέρα οφείλεται στις διακυμάνσεις της τάσης οι οποίες καταγράφονται σε μικρά ημερήσια χρονικά διαστήματα. Η φυσική ερμηνεία του γεγονότος αυτού είναι η παρουσία ξαφνικών μεταβολών στις τιμές των θερμοκρασιών γεγονός το οποίο εμφανίζεται πιο έντονα στη θερμοκρασία του αέρα και ηπιότερα στη θερμοκρασία νερού.

Στο σχήμα 3.14 παρουσιάζονται τα γραφήματα των χρονοσειρών και της ευθείας που προσαρμόζεται σε αυτά, για τις παραμέτρους στάθμη νερού (α), ηλεκτρική αγωγιμότητα (β) και διαλυμένο οξυγόνο (γ).



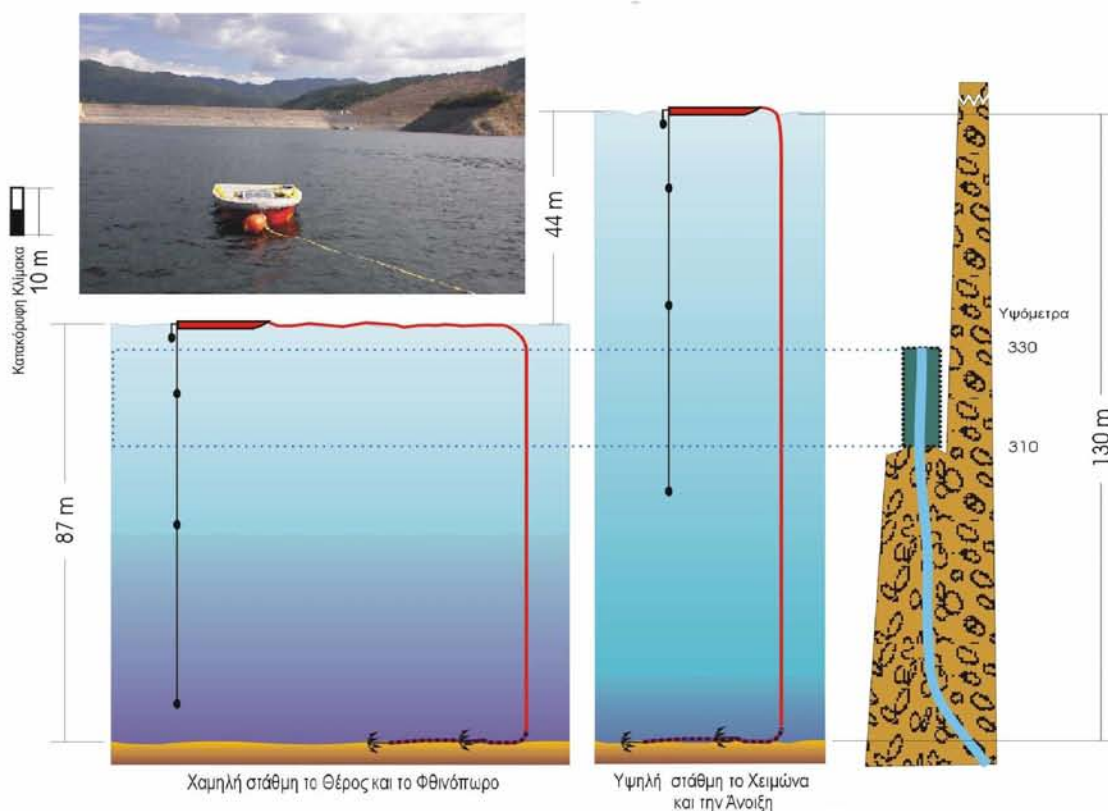
Σχήμα 3.14: Οι μετρήσεις και η προσαρμοζόμενη ευθεία παλινδρόμησης των παραμέτρων (α) στάθμη νερού, (β) ηλεκτρική αγωγιμότητα και (γ) Διαλυμένο οξυγόνο, στον Π.Σ. Παγονέρι.

3.3 Κεντρικό Δίκτυο - Περιφερειακός Σταθμός Θησαυρού

Ο μέσος ρους του ποταμού Νέστου αποτελεί την περιοχή του ποταμού με τη μεγαλύτερη ανθρωπογενή παρέμβαση καθώς στην περιοχή αυτή έχουν κατασκευαστεί και λειτουργούν τα φράγματα του Θησαυρού και της Πλατανόβρυσης (παρ. 2.2.2.1). Η κατασκευή τους επέφερε σημαντικές περιβαλλοντικές αλλαγές στην περιοχή και στο ρου του ποταμού, καθώς το μεγαλύτερο τμήμα του μετατράπηκε από ποτάμιο σε λιμναίο.

Σκοπός του συστήματος των φραγμάτων είναι να αποτρέψουν τα πλημμυρικά επεισόδια του Νέστου, προστατεύοντας έτσι τα χωριά, τις πόλεις και τις ανθρώπινες δραστηριότητες στα κατάντη. Την ίδια στιγμή αποτρέπουν τις πλημμύρες στην περιοχή του Δέλτα του Νέστου, προστατεύοντας και διατηρώντας το φυσικό περιβάλλον της προστατευμένης από τη συνθήκη Ramsar περιοχής. Οι ανθρώπινες ανάγκες για ενέργεια και άρδευση καθορίζουν τη ροή στα κατάντη του ποταμού, με αποτέλεσμα η βιώσιμη διαχείριση του ποταμού Νέστου να αποτελεί γεγονός υψίστης σημασίας.

Στο βαθύτερο τμήμα της λεκάνης του ταμειωτήρα ανάντη του φράγματος του Θησαυρού, είχε αγκυροβοληθεί πλωτός περιφερειακός σταθμός (εικ. 3.2) που καταγράφει



Εικόνα 3.2: Ο πλωτός Π.Σ. Θησαυρού και τα βάθη καταγραφής των μετρήσεων, κατά τη διάρκεια του έτους (Ψιλοβίκος, 2005).

τις μεταβολές της θερμοκρασίας νερού (T_w) και του διαλυμένου οξυγόνου (DO) σε τέσσερα διαφορετικά βάθη (1, 20, 40 και 70m), καθώς επίσης και του pH σε βάθος 1m. Για τις παραμέτρους αυτές, στην παρούσα εργασία αναλύθηκαν και αξιολογήθηκαν οι ημερήσιες καταγραφές των ετών 2004 έως 2007.

Τα περιγραφικά στατιστικά που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των παραμέτρων καθώς επίσης και η ανάλυση τάσης στα διάφορα βάθη, δίνουν μια πλήρη εικόνα των μεταβολών της κάθε παραμέτρου σε ολόκληρη την υδάτινη στήλη. Ακόμη, προσαρμόστηκαν στοχαστικά μοντέλα ARIMA, Transfer Function και μοντέλα Νευρωνικών Δικτύων, με σκοπό αφενός μεν την αξιολόγηση της προβλεπτικής ικανότητας αυτών των μοντέλων, αφετέρου δε τη δυνατότητα κατάργησης των αισθητήρων μέτρησης στα 20, 40 και 70m με βάση τις μετρήσεις του ενός μέτρου, δηλαδή ουσιαστικά τη δυνατότητα βελτιστοποίησης των συστημάτων παρακολούθησης στα 20, 40 και 70 m.

3.3.1 Αξιολόγηση των δεδομένων παρακολούθησης - Περιγραφικά στατιστικά

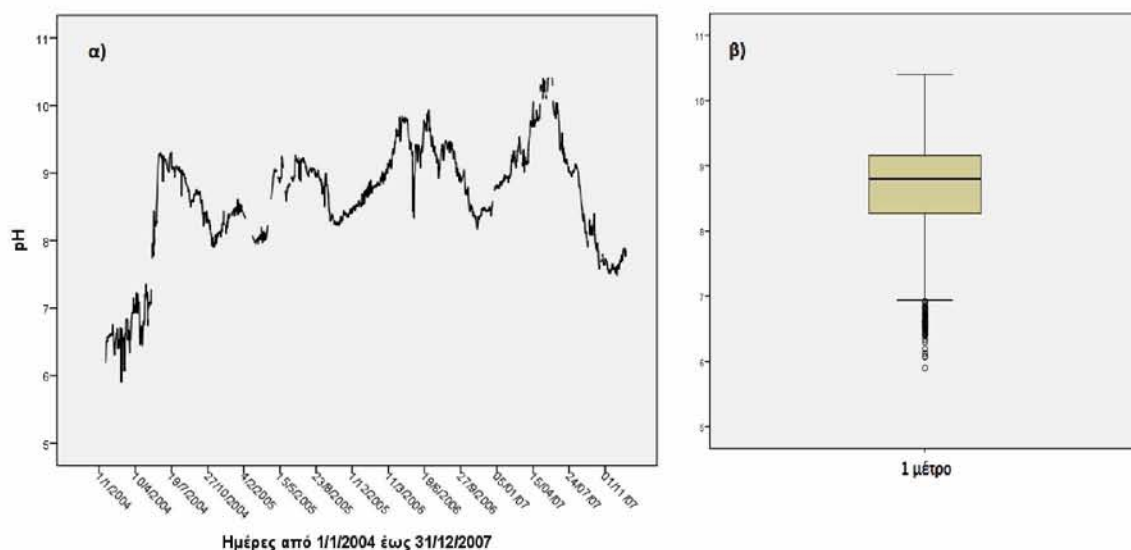
Συγκέντρωση ιόντων υδρογόνου (pH). Τα στατιστικά της παραμέτρου δίνονται στον πίνακα 3.6, σύμφωνα με τον οποίο οι τιμές της παραμέτρου κυμαίνονται από 6 μέχρι 10,5 με μέγιστη τιμή 10,4 στις 13, 26 και 27 Μαΐου του 2007 και ελάχιστη 5,9 στις 2 Μαρτίου του 2004 (σχ. 3.15.α). Η τυπική απόκλιση για το σύνολο των παρατηρήσεων είναι 0,83 και η μέση τιμή 8,6. Με εξαίρεση τις τιμές του πρώτου τριμήνου του έτους 2004 οι υπόλοιπες τιμές ανήκουν στο αλκαλικό φάσμα. Στις περισσότερες λίμνες οι τιμές του pH κυμαίνονται από 6 έως 9, ενώ για τιμές μεγαλύτερες του 8, οι λίμνες χαρακτηρίζονται ασβεστολιθικές με νερό υψηλής σκληρότητας (Wetzel 2006).

Πίνακας 3.6: Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία της παραμέτρου pH.

pH	Μέγιστη τιμή	Ελάχιστη τιμή	Μέση τιμή	Διασπορά	Τυπική απόκλιση	Διάμεσος
1 μέτρο	10,40	5,90	8,61	0,68	0,828	8,80

Στο σχήμα 3.15.β παρουσιάζεται το θηκόγραμμα των μετρήσεων της παραμέτρου pH στο οποίο καταγράφεται μια ασυμμετρία της κατανομής των τιμών, καθώς επίσης και ένα σύνολο πιθανών ελάχιστων ακραίων τιμών.

Οι περισσότερες λίμνες παρουσιάζουν μεγάλη ρυθμιστική ικανότητα, ανθίστανται δηλαδή μέσω μιας σειράς χημικών αντιδράσεων που συμβαίνουν στο εσωτερικό τους σε απότομες μεταβολές του pH. Στην περίπτωση του ταμιευτήρα του Θησαυρού επιβε-



Σχήμα 3.15: Γράφημα α) των μετρήσεων και β) του θηκογράμματος, της παραμέτρου pH για τον Π.Σ. Θησαυρό.

βαιώνεται το παραπάνω γεγονός, ενώ οι υψηλές τιμές που καταγράφονται τους θερινούς κυρίως μήνες (Ιούλιο, Αύγουστο), μπορεί να οφείλονται σε έντονη φωτοσυνθετική δραστηριότητα – ευτροφισμό ή σε περιπτώσεις ρύπανσης της λίμνης με αλκαλικές ουσίες (απορρυπαντικά κ.ά. από αστικά και βιομηχανικά απόβλητα) που προέρχονται από εισροές από τη γείτονα χώρα – Βουλγαρία – από τα ανάντη και σε αυξημένες συγκεντρώσεις ασβεστίου, νατρίου και μαγνησίου.

Διαλυμένο Οξυγόνο (DO – mg/l). Στον πίνακα 3.7 καταγράφονται τα στατιστικά της παραμέτρου στα τέσσερα διαφορετικά βάθη. Σε βάθος **1 μέτρου** η μέση τιμή του διαλυμένου οξυγόνου είναι 7,86 mg/l, η μέγιστη τιμή 14,42 mg/l καταγράφεται στις 22 Ιουνίου 2007 και η ελάχιστη 3,10 mg/l στις 4 Νοεμβρίου του ίδιου έτους. Η μέγιστη τιμή καταγράφεται την εποχή όπου στο σύστημα παρατηρείται έντονη φωτοσυνθετική δραστηριότητα και παρουσιάζει αρχικά στάδια ευτροφισμού. Η ελάχιστη τιμή καταγράφεται την εποχή ολοκλήρωσης του κύκλου ευτροφισμού, όπου καταγράφονται επίσης χαμηλές εισροές και τελειώνει η περίοδος άρδευσης.

Οι αντίστοιχες τιμές της δειγματικής μέσης τιμής, για τα βάθη **20, 40 και 70 μέτρα** είναι 6,48 mg/l, 6,25 mg/l και 5,08 mg/l, αντίστοιχα. Στα **20 μέτρα** η μέγιστη τιμή 9,10mg/l καταγράφεται στις 17 Απριλίου 2006, ενώ η ελάχιστη 3,90 mg/l στις 2 Νοεμβρίου 2007. Επίσης, στα **40 μέτρα** η μέγιστη τιμή 9,03 mg/l καταγράφεται στις 23 Ιανουαρίου 2006, ενώ η ελάχιστη 2,61 mg/l στις 12 Οκτωβρίου 2007. Τέλος, τα αντίστοι-

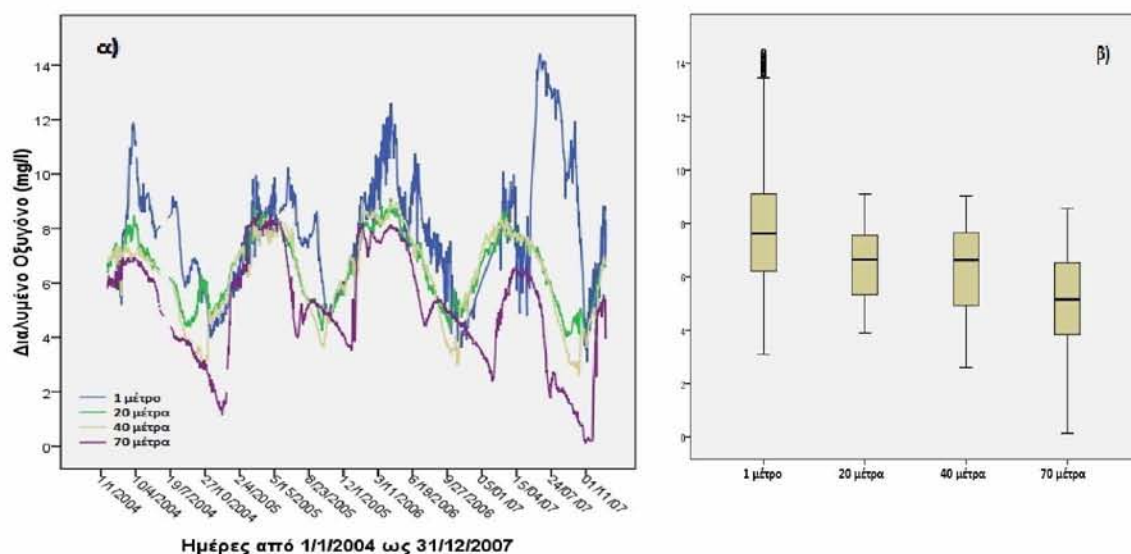
χα ακρότατα για τα **70 μέτρα** είναι 8,57 mg/l και 0,13 mg/l, που καταγράφονται στις 29 Μαρτίου 2005 και 30 – 31 Οκτωβρίου 2007.

Σε αρκετές περιπτώσεις οι τιμές του διαλυμένου οξυγόνου προσεγγίζουν τα επίπεδα κορεσμού και σε ορισμένες περιπτώσεις τις υπερβαίνουν, προφανώς λόγω της φωτοσύνθεσης και της παραγωγής οξυγόνου από τα φύκη, κάτι το οποίο απαντάται κυρίως στα τέλη της άνοιξης – μέσα καλοκαιριού που καταγράφονται τα αρχικά στάδια ευτροφισμού. Την περίοδο αυτή παρατηρείται υπερπαραγωγή διαλυμένου οξυγόνου, χωρίς ταυτόχρονα να έχουν ολοκληρωθεί οι γεωμετρικοί ρυθμοί ανάπτυξης των οργανισμών (χλωρίδα – πανίδα) που θα απαιτούσαν μεγάλες ποσότητες διαλυμένου οξυγόνου για τη θρέψη τους με την αποικοδόμηση των θρεπτικών. Αυτό παρατηρείται κυρίως προς τα τέλη του καλοκαιριού – τέλη φθινοπώρου, όπου η αφθονία των οργανισμών είναι τόση που δεν επαρκεί το υπάρχον διαλυμένο οξυγόνο του νερού για την αποικοδόμηση των θρεπτικών και την θρέψη των οργανισμών, με αποτέλεσμα τη σταδιακή θανάτωση τους που συνοδεύεται με φαινόμενα πράσινο-καφέ χρωματισμού του νερού και έντονη δυσοσμία και τιμές διαλυμένου οξυγόνου στα επίπεδα της ανοξίας (0 – 2 mg/l).

Πίνακας 3.7: Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία της παραμέτρου διαλυμένο οξυγόνο.

Διαλυμένο οξυγόνο	Μέγιστη τιμή	Ελάχιστη τιμή	Μέση τιμή	Διασπορά	Τυπική απόκλιση	Διάμεσος
1 μ	14,42	3,10	7,86	5,10	2,259	7,63
20 μ	9,10	3,90	6,48	1,66	1,290	6,64
40 μ	9,03	2,61	6,25	2,65	1,629	6,63
70 μ	8,57	0,13	5,08	4,08	2,020	5,16

Παρατηρείται μια ελάττωση της δειγματικής μέσης τιμής με την αύξηση του βάθους και μια διαφοροποίηση του εύρους τιμών στα διάφορα βάθη. Συγκεκριμένα, όπως παρατηρείται και στο σχήμα 3.16.β, στο 1m το εύρος τιμών είναι 11,32 με πιθανές μέγιστες ακραίες τιμές, ενώ το εύρος στα υπόλοιπα βάθη είναι αντίστοιχα 5,2 6,42 και 8,74. Η εμπειρική κατανομή των τιμών των μεγαλύτερων της διαμέσου είναι περίπου η ίδια, ενώ παρατηρείται μια μείωση ως προς τις ελάχιστες τιμές συναρτήσει του βάθους.



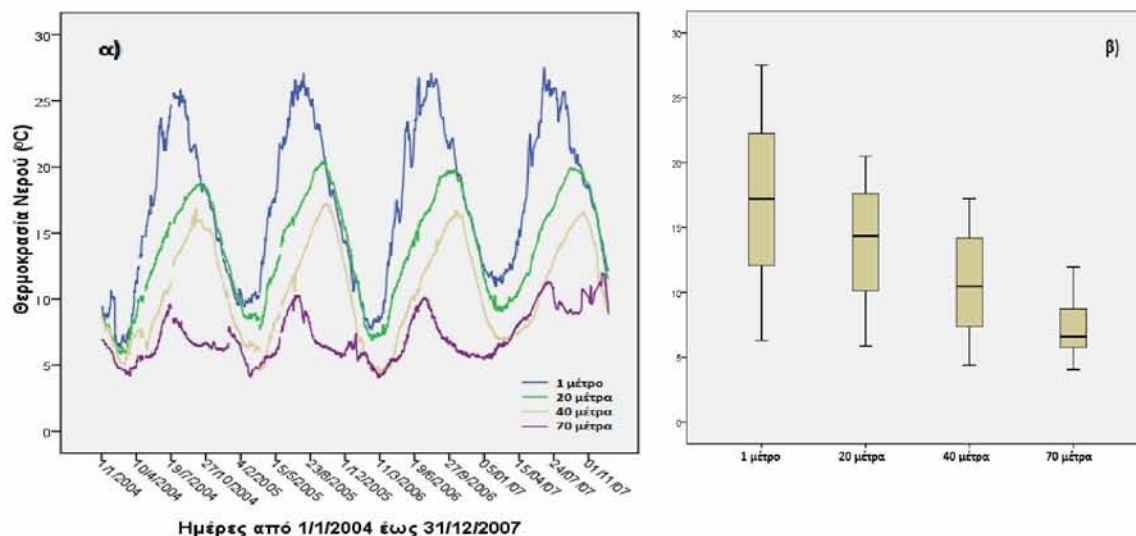
Σχήμα 3.16: Γράφημα α) των μετρήσεων και β) του θηκογράμματος, της παραμέτρου διαλυμένο οξυγόνο για τον Τ.Σ. Θησαυρό.

Γίνεται αντιληπτό λοιπόν ότι προχωρώντας στα βαθύτερα του ταμιευτήρα συναντάται λιγότερο διαλυμένο οξυγόνο στο νερό, με ελάχιστες παρατηρούμενες τιμές δηλαδή τιμές μικρότερες από 1 mg/l στα 70m, γεγονός που δημιουργεί ανοξικές συνθήκες. Η παραπάνω συμπεριφορά συμφωνεί με τη λειτουργία μιας φυσικής βαθιάς λίμνης.

Θερμοκρασία νερού ($T_w - ^\circ\text{C}$). Τα στατιστικά της παραμέτρου καταγράφονται στον πίνακα 3.8, ενώ στο σχήμα 3.17 παρουσιάζονται τα γραφήματα και τα θηκογράμματα των τιμών της στα τέσσερα διαφορετικά βάθη. Παρατηρείται μια ταχεία μείωση ως προς τις μέσες τιμές συναρτήσει του βάθους, καθώς από 17,26 $^\circ\text{C}$ στο 1m κατεβαίνει η μέση θερμοκρασία στους 7,16 $^\circ\text{C}$ στα 70m. Επίσης, καταγράφεται μια αργή μείωση ως προς τις ελάχιστες τιμές, σε αντίθεση με τις μέγιστες, όπου παρατηρείται ταχεία μείωση, γεγονός που δικαιολογεί το γρήγορο ρυθμό μείωσης της διακύμανσης των τιμών.

Πίνακας 3.8: Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία της παραμέτρου θερμοκρασία νερού.

Θερμοκρασία νερού	Μέγιστη τιμή	Ελάχιστη τιμή	Μέση τιμή	Διασπορά	Τυπική απόκλιση	Διάμεσος
1 μ	27,50	6,27	17,26	34,10	5,839	17,20
20 μ	20,48	5,86	13,89	17,06	4,130	14,36
40 μ	17,23	4,37	10,68	13,92	3,731	10,45
70 μ	11,95	4,05	7,16	3,43	1,822	6,59



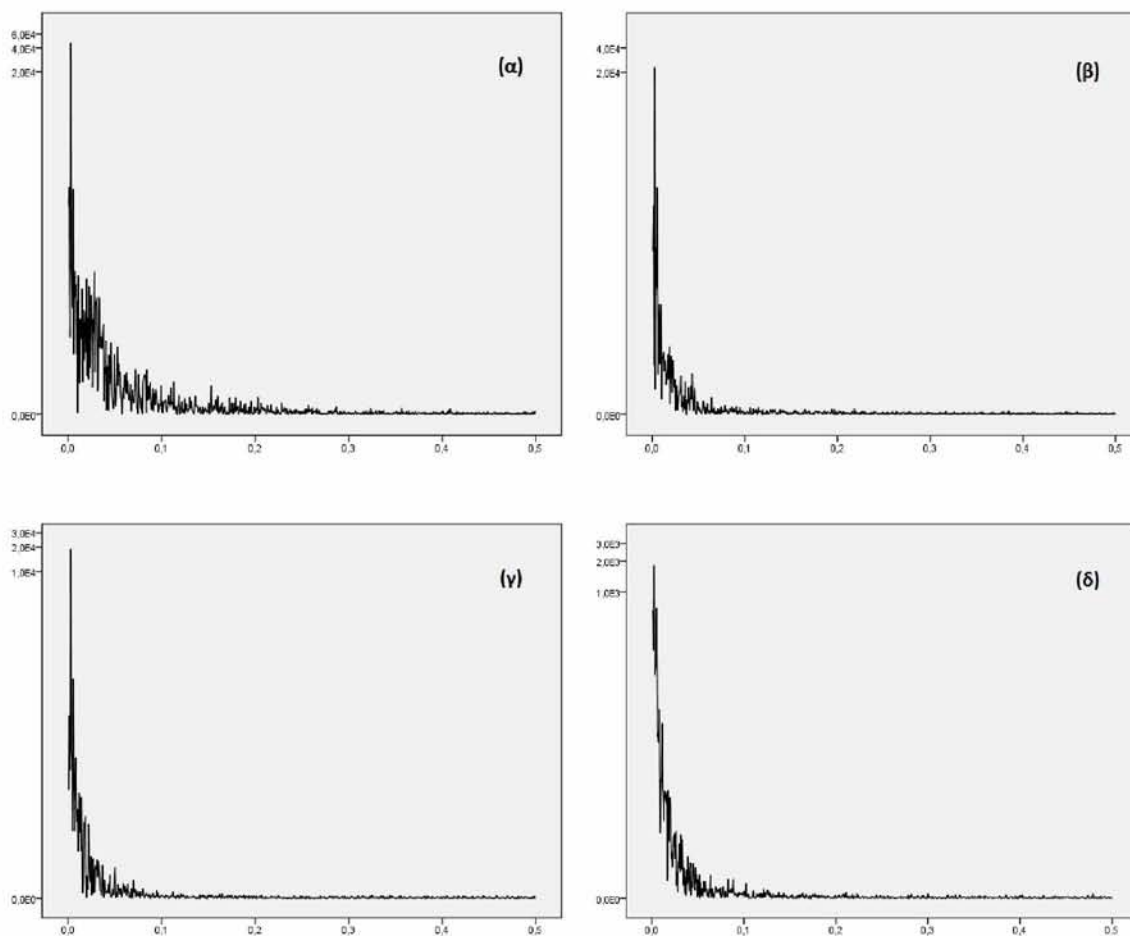
Σχήμα 3.17: Γράφημα α) των μετρήσεων και β) του θηκογράμματος, της παραμέτρου θερμοκρασία νερού για τον Τ.Σ. Θησαυρό.

Συγκρίνοντας τις καταγραφές στα τέσσερα διαφορετικά βάθη, παρουσιάζονται οι εξής μεταβολές της θερμοκρασίας για κάθε βάθος. Στο **επιφανειακό στρώμα** είναι εμφανής η επιρροή των αλλαγών της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας σύμφωνα με την εποχιακή διακύμανση της. Σε βάθος **20 μέτρα** παρατηρείται μια βαθμιαία θέρμανση του νερού από τέλος Ιουλίου έως τα μέσα Οκτωβρίου και στη συνέχεια μια μείωση της θερμοκρασίας περίπου στο τέλος Δεκεμβρίου. Σε βάθος **40 μέτρα** παρουσιάζεται η ίδια πορεία της θερμοκρασίας νερού με αυτή του στρώματος των 20m, αλλά με τιμές χαμηλότερες. Τέλος, στο στρώμα βάθους **70 μέτρα** η πορεία των τιμών παρουσιάζει την ίδια εποχική διακύμανση με αυτήν του 1m με μικρού εύρους μεταβολές.

3.3.2 Έλεγχος τάσης των παραμέτρων του Π.Σ. Θησαυρού

α) Αποτελέσματα ελέγχου τάσης με προσαρμογή ευθείας

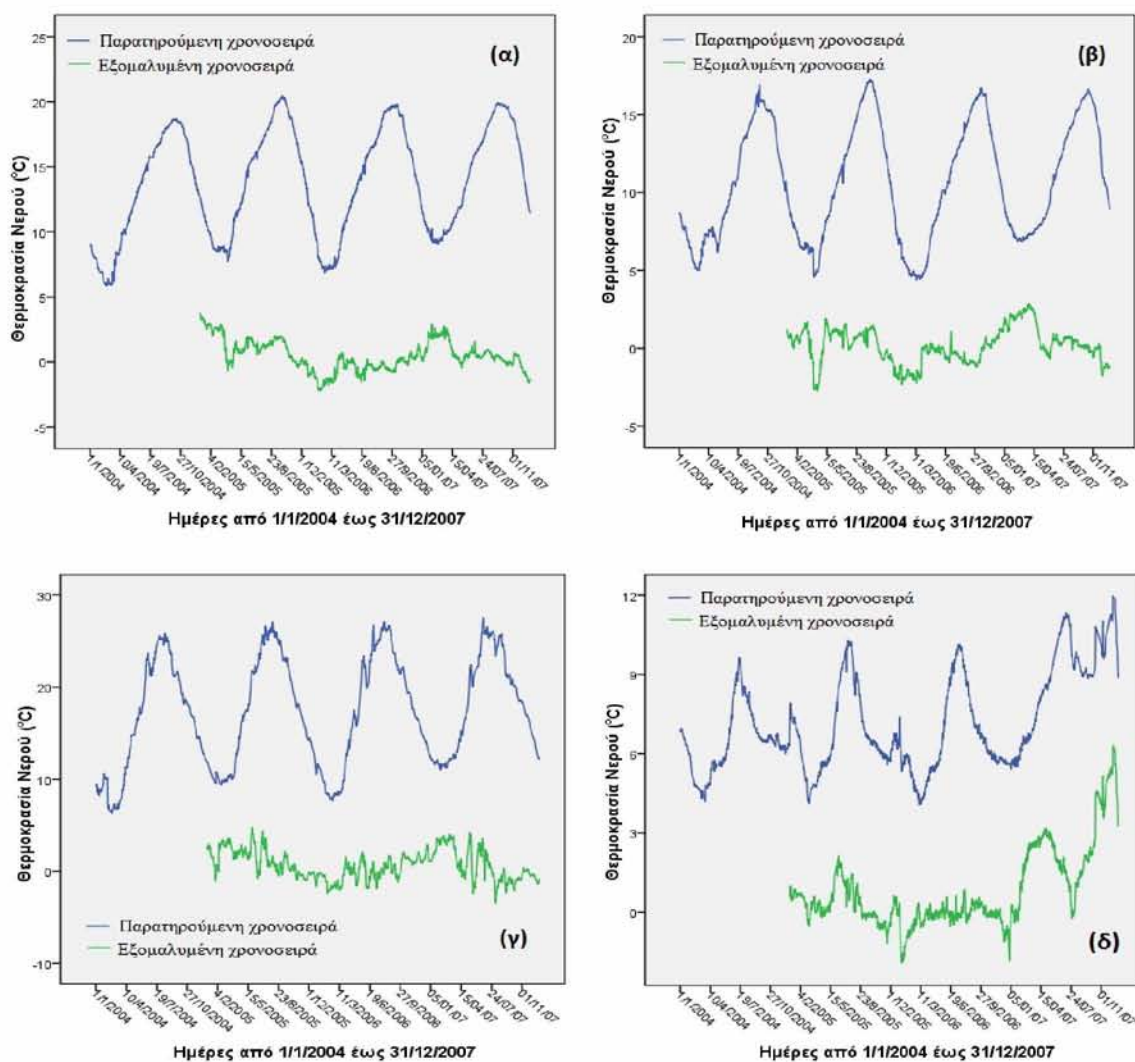
Στο σταθμό Θησαυρό ελέγχθηκαν ως προς την ύπαρξη τάσης οι παράμετροι pH στο 1m, διαλυμένο οξυγόνο και θερμοκρασία νερού στα τέσσερα βάθη. Η θερμοκρασία νερού ελέγχθηκε ως προς την ύπαρξη περιοδικότητας ανά έτος, με την κατασκευή περιοδογράμματος για κάθε βάθος (σχ. 3.18).



Σχήμα 3.18: Περιοδογράμματα της παραμέτρου θερμοκρασία νερού (α) στο 1μ, (β) στα 20μ, (γ) στα 40μ και (δ) στα 70μ.

Όπως παρατηρείται σε όλα τα περιοδογράμματα, η μέγιστη συνιστώσα αντιστοιχεί σε συχνότητα μηδέν που σημαίνει ότι υπάρχει περιοδικότητα ανά 365 ημέρες. Συνεπώς, για να ελεγχθεί η ύπαρξη τάσης γίνεται πρώτα απαλοιφή της εποχικότητας, παίρνοντας διαφορές υστέρησης ίσης με 365 (Κουγιουμτζής 2012) και στις χρονοσειρές που προκύπτουν (εξομαλυμένες χρονοσειρές) εφαρμόζονται οι έλεγχοι τάσης.

Στο σχήμα 3.19 παρουσιάζονται η παρατηρούμενη και εξομαλυμένη χρονοσειρά της παραμέτρου θερμοκρασία νερού, για τα τέσσερα διαφορετικά βάθη.



Σχήμα 3.19: Παρατηρούμενη και εξομαλυμένη χρονοσειρά των παραμέτρων θερμοκρασία νερού (α) στο 1m, (β) στα 20m, (γ) στα 40m και (δ) στα 70m.

Στον πίνακα 3.9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του ελέγχου τάσης με προσαρμολή ευθείας παλινδρόμησης. Η κλίση της ευθείας κρίνεται σημαντική για όλες τις παραμέτρους και για όλα τα βάθη, συνεπώς όλες εμφανίζουν τάση.

Η παράμετρος **pH** του νερού παρουσιάζει θετική τάση 0,001 και το γραμμικό μοντέλο που προσαρμολίζεται είναι $y = 8,008 + 0,001 \cdot t$. Η θετική κλίση της ευθείας δείχνει ότι μακροχρόνια με πολύ αργό ρυθμό, οι τιμές του pH των υδάτων του ταμιευτήρα αυξάνονται.

Πίνακας 3.9: Αποτελέσματα προσαρμογής ευθείας, για τον Π.Σ. Θησαυρού.

Παράμετρος	Βάθος		Εκτίμηση σταθεράς	Τυπική απόκλιση	t	Σημαντικότητα του ελέγχου
pH	1 μέτρο	α (σταθ. όρος)	8,008	0,043	186,471	0,000
		β (κλίση)	0,001	0,000	16,165	0,000
Θερμοκρασία Νερού	1 μέτρο	α (σταθ. όρος)	1,771	0,141	12,601	0,000
		β (κλίση)	-0,001	0,000	-8,340	0,000
	20 μέτρα	α (σταθ. όρος)	1,465	0,103	14,260	0,000
		β (κλίση)	-0,001	0,000	-10,112	0,000
	40 μέτρα	α (σταθ. όρος)	-0,080	0,104	-0,774	0,439
		β (κλίση)	0,000	0,000	2,460	0,014
	70 μέτρα	α (σταθ. όρος)	-1,727	0,113	-15,244	0,000
		β (κλίση)	0,003	0,000	23,763	0,000
Διαλυμένο οξυγόνο	1 μέτρο	α (σταθ. όρος)	7,095	0,126	54,121	0,000
		β (κλίση)	0,001	0,000	6,898	0,000
	20 μέτρα	α (σταθ. όρος)	6,855	0,073	93,820	0,000
		β (κλίση)	0,000	0,000	-5,662	0,000
	40 μέτρα	α (σταθ. όρος)	6,471	0,094	68,997	0,000
		β (κλίση)	0,000	0,000	-2,556	0,011
	70 μέτρα	α (σταθ. όρος)	6,323	0,108	58,693	0,000
		β (κλίση)	-0,002	0,000	-13,102	0,000

Η **θερμοκρασία νερού** σε όλα τα βάθη παρουσιάζει σημαντική τάση. Συγκεκριμένα η ευθεία που προσαρμόζεται στις μετρήσεις του 1m είναι $y = 1,771 - 0,001 \cdot t$, δηλαδή υπάρχει ελάχιστη αρνητική τάση. Η ίδια τιμή κλίσης της ευθείας παρουσιάζεται σε βάθος 20m με εξίσωση ευθείας $y = 1,465 - 0,001 \cdot t$. Στην περίπτωση των 40m ενώ έχουμε σημαντική τάση, η εκτίμηση της κλίσης της ευθείας είναι μικρότερη του 0,0005 οπότε το στατιστικό πακέτο SPSS δίνει σαν τιμή κλίσης την τιμή μηδέν, πράγμα το οποίο καθιστά αδύνατη την καταγραφή της ευθείας. Τέλος, για τα 70m έχουμε θετική τάση της τάξεως του 0,003 και η προσαρμοζόμενη ευθεία είναι η $y = -1,727 + 0,003 \cdot t$.

Η παράμετρος **διαλυμένο οξυγόνο** παρουσιάζει σημαντική τάση για όλα τα βάθη. Στο 1m η τάση είναι θετική και η ευθεία που προσαρμόζεται είναι η $y = 7,095 + 0,001 \cdot t$, στα 70m η τάση είναι αρνητική με ευθεία $y = 6,323 - 0,002 \cdot t$, ενώ στα 20 και 40m η εκτιμώμενη κλίση της ευθείας είναι μηδενικής τάξης.

Για αποσαφήνιση των αποτελεσμάτων ελέγχου τάσης, εφαρμόστηκε και ο επαυξημένος έλεγχος Dickey-Fuller.

β) Αποτελέσματα ελέγχου τάσης με το ADF test

Τα αποτελέσματα ελέγχου τάσης με εφαρμογή του ADF test, δίνονται στον πίνακα 3.10.

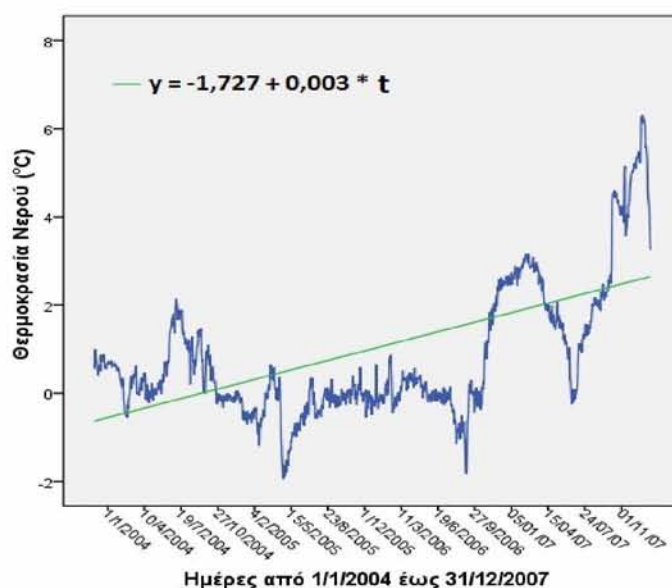
Πίνακας 3.10: Αποτελέσματα ADF ελέγχου, για τον Π.Σ. Θησαυρού.

Παράμετρος	Βάθος	Τάση	Ύπαρξη τάσης	$\hat{\delta}_1$	Σημαντικότητα του ελέγχου
pH	1 μέτρο	Γραμμική	όχι	-0,0000	0,935
		Στοχαστική	ναι	-	0,15947
Θερμοκρασία Νερού	1 μέτρο	Γραμμική	όχι	-0,00003	0,3985
		Στοχαστική	οριακά ναι	-	0,01652
	20 μέτρα	Γραμμική	όχι	-0,00001	0,5461
		Στοχαστική	οριακά ναι	-	0,05194
	40 μέτρα	Γραμμική	όχι	0,0000	0,8622
Στοχαστική		ναι	-	0,14352	
70 μέτρα	Γραμμική	ναι	0,00005	0,0389	
	Στοχαστική	ναι	-	0,21945	
Διαλυμένο οξυγόνο	1 μέτρο	Γραμμική	όχι	0,0000	0,5314
		Στοχαστική	όχι	-	0,00588
	20 μέτρα	Γραμμική	όχι	0,0000	0,66289
		Στοχαστική	ναι	-	0,34017
40 μέτρα	Γραμμική	όχι	0,0000	0,8593	
	Στοχαστική	ναι	-	0,66289	
70 μέτρα	Γραμμική	όχι	0,00001	0,5090	
	Στοχαστική	ναι	-	0,70165	

Σύμφωνα με τον πίνακα 3.10:

- Ως προς την παράμετρο pH η ύπαρξη μη στασιμότητας της χρονοσειράς οφείλεται στη στοχαστική τάση και όχι στη γραμμική.
- Η παράμετρος θερμοκρασία νερού σε βάθος 1m δεν παρουσιάζει τάση. Σε βάθος 20 και 40m γραμμική τάση δεν εμφανίζεται, ενώ είναι εμφανής η ύπαρξη στοχαστικής τάσης. Τέλος, σε βάθος 70m παρουσιάζεται ελάχιστη θετική γραμμική τάση όπως επίσης και στοχαστική.
- Για την παράμετρο διαλυμένο οξυγόνο γραμμική τάση δεν παρουσιάζεται σε κανένα βάθος ενώ τα βάθη 20, 40 και 70m παρουσιάζουν στοχαστική τάση.

Στο σχήμα 3.20 παρουσιάζεται το γράφημα της χρονοσειράς της θερμοκρασίας νερού για βάθος 70m μετά την απαλοιφή της περιοδικότητας μαζί με την ευθεία που προσαρμόζεται σε αυτήν.



Σχήμα 3.20: Οι μετρήσεις και η προσαρμοζόμενη ευθεία παλινδρόμησης της παραμέτρου θερμοκρασία νερού σε βάθος 70m, για τον Π.Σ. Θησαυρό.

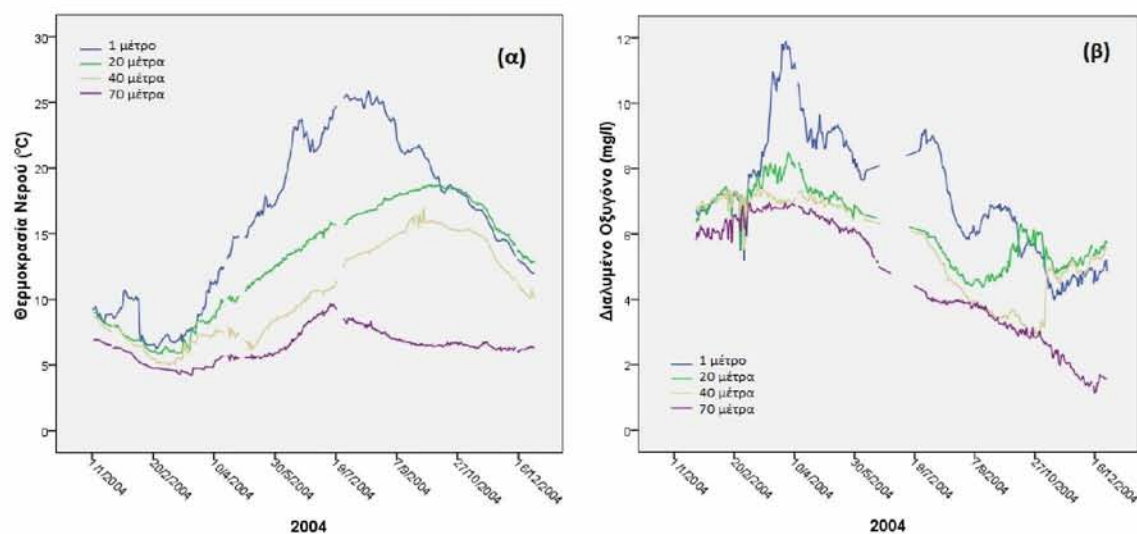
3.3.3 Αξιολόγηση του ταμιευτήρα του Θησαυρού

Οι φραγμαλίμενες είναι ένα σχετικά νέο πεδίο έρευνας που σχετίζεται με τη γεωγραφική και χρονική κατανομή της ποιότητας του νερού, ενώ παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές συγκρινόμενες με τις φυσικές λίμνες, οι κυριότερες από τις οποίες είναι (Λουκάς 2007):

- Οι ταμιευτήρες συναντώνται συνήθως σε ξηρές περιοχές, με τραχιά γεωμορφολογία, σε ενδεδειγμένες θέσεις όπου δύναται να αποθηκεύουν μεγάλες ποσότητες νερού.
- Συναντώνται σε απόκρημνες κοιλάδες, ανάντη φράγματος κατασκευασμένου από σκυρόδεμα ή από χώμα.
- Οι ταμιευτήρες διαφέρουν σημαντικά από τις λίμνες στο γεγονός ότι οι εκροές και οι ποσότητες των υδάτων ρυθμίζονται ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη χρήση για τον άνθρωπο. Το γεγονός αυτό έχει σημαντική επίδραση στη διαδικασία μεταφοράς και ανάμιξης των υδάτων εντός του ταμιευτήρα, αλλά και στην ποιότητα των υδάτων που απορρέουν από αυτόν.
- Τέλος, χαρακτηρίζονται από υψηλές τιμές εισροών και εκροών, μικρό χρόνο παραμονής και ανανέωσης του νερού από τις βροχοπτώσεις και την τήξη του χιονιού σε σύγκριση με τις λίμνες οι οποίες χαρακτηρίζονται από μεγάλο χρόνο παραμονής και φαινόμενα στασιμότητας.

Η πλήρης περιγραφή της τεχνητής λίμνης του Θησαυρού, η αναγκαιότητα του έργου καθώς και η σημαντικότητά της για την περιοχή, έγινε στην παράγραφο 2.2.2.1. Για την ορθολογική διαχείριση των υδάτων του ποταμού στα κατάντη του φράγματος, αλλά και για τη σωστή λειτουργία του ΥΗΣ, θα πρέπει να γίνει αξιολόγηση των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στην υδάτινη στήλη. Για το σκοπό αυτό, έγινε ξεχωριστή ανάλυση των δεδομένων για κάθε έτος.

Για το 2004, η παράμετρος θερμοκρασία νερού στην αρχή του έτους εμφανίζει ήπια πτωτική τάση σε όλα τα στρώματα, η οποία συνεχίζεται μέχρι τα μέσα Μαρτίου οπότε οι τιμές σταθεροποιούνται, με το ανώτερο στρώμα του 1m να βρίσκεται στους 7 °C και το κατώτερο των 70m στους 5 °C (σχ. 3.21.α). Είναι προφανώς η περίοδος της αναστροφής των υδάτων και της θερμοκρασιακής ομοιογένειας της στήλης του νερού. Για το υπόλοιπο του έτους παρατηρείται ισχυρή στρωμάτωση, με αποτέλεσμα τη δημιουργία τριών στρωμάτων: επιλίμνιο, μεταλίμνιο (θερμοκλινές) και υπολίμνιο.



Σχήμα 3.21: Γράφημα των μετρήσεων των παραμέτρων α) θερμοκρασίας και β) διαλυμένο οξυγόνο, στα τέσσερα βάθη, για το έτος 2004.

Ειδικά για τα βαθύτερα στρώματα των 70m η θερμοκρασία του νερού διατηρείται σε πολύ χαμηλά επίπεδα, με ελάχιστες διακυμάνσεις, παρουσιάζοντας τη μέγιστη τιμή στο τέλος Ιουλίου ενώ κατά το τέλος φθινοπώρου οδηγείται σε στασιμότητα.

Επισημαίνεται επίσης το γεγονός ότι κατά τα μέσα Οκτωβρίου οι θερμοκρασίες του επιφανειακού στρώματος είναι χαμηλότερες από τις θερμοκρασίες του στρώματος του

βάθους των 20m. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι τον Οκτώβριο ενώ το επιφανειακό στρώμα έχει ήδη αρχίσει να ψύχεται σταδιακά, το στρώμα των 20m εξακολουθεί να θερμαίνεται και να πλησιάζει τις μέγιστες τιμές του, με διαφορά φάσης – υστέρηση. Αυτά τα φαινόμενα εμφανίζονται λόγω της μεγάλης θερμοχωρητικότητας του νερού, του μεγάλου όγκου του ταμιευτήρα ($700 \times 10^6 \text{ m}^3$) και του βάθους του (140m).

Για την παράμετρο διαλυμένο οξυγόνο, όπως παρατηρείται στο σχήμα 3.21.β, το πρώτο εξάμηνο του 2004 υπήρξε ικανοποιητική οξυγόνωση όλης της στήλης του νερού, γεγονός που αποδίδεται στις ικανοποιητικές εισροές ψυχρού – οξυγονωμένου νερού του Νέστου στον ταμιευτήρα.

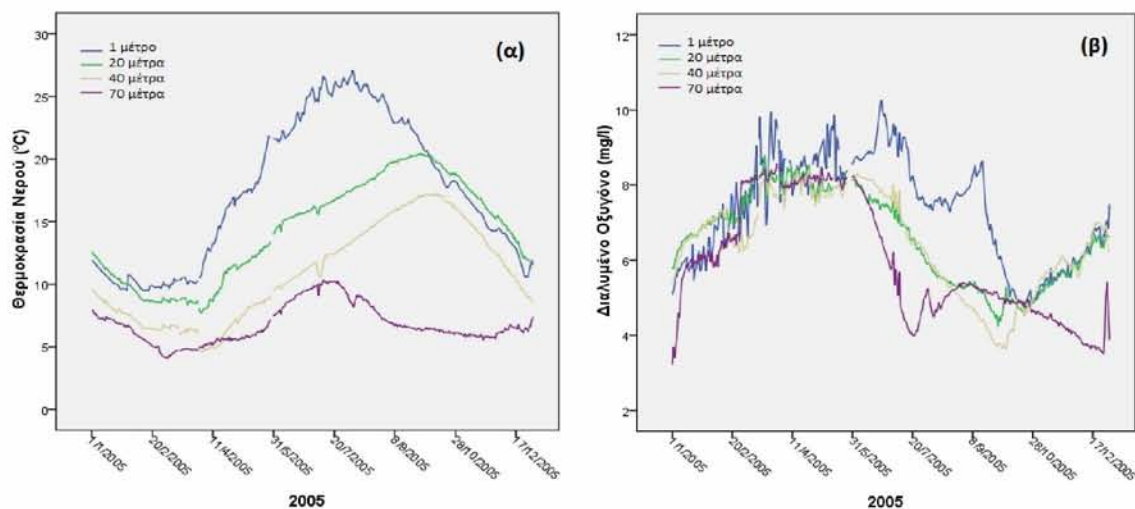
Κατά τα μέσα Μαρτίου – μέσα Απριλίου καταγράφονται υψηλές τιμές στο επιφανειακό στρώμα που οφείλονται σε φαινόμενα αύξησης της βιολογικής κυρίως δραστηριότητας την περίοδο της άνοιξης, δηλαδή ανάπτυξη φυτοπλαγκτού και φαινόμενα φωτοσύνθεσης.

Στις αρχές Μαρτίου παρατηρείται μια έντονη διαταραχή με τα βαθύτερα στρώματα των 40 και 70m να υπερβαίνουν τις τιμές του διαλυμένου οξυγόνου των επιφανειακών στρωμάτων του 1 και 20m. Αυτό υποδηλώνει και αποδεικνύει ότι κατά την περίοδο αυτή υπήρξε μια αναστροφή σε ότι αφορά το διαλυμένο οξυγόνο, με οξυγόνωση και των βαθύτερων στρωμάτων. Μια πρώτη ερμηνεία του φαινομένου αυτού μπορεί να αποδοθεί στην εισροή μεγάλων όγκων ψυχρού νερού από το Νέστο στο Θησαυρό λόγω τήξης χιονιού ή εκδήλωσης πλημμυρικών φαινομένων. Το γεγονός αυτό διαφοροποιεί τη λειτουργία του Θησαυρού ως ταμιευτήρα σε σχέση με αντίστοιχες βαθιές φυσικές λίμνες. Αυτή η ερμηνεία είναι συμβατή και με τις καταγραφές της στάθμης νερού στο σταθμό Παγονέρι ανάντη του Θησαυρού (παρ. 3.2.1).

Επίσης, κατά τους μήνες Σεπτέμβριο και Οκτώβριο παρατηρείται περίπου ταύτιση των τιμών του διαλυμένου οξυγόνου στα 40 και 70m. Ενώ προς το τέλος του έτους οι τιμές στα 20 και 40m υπερβαίνουν αυτές του επιφανειακού στρώματος όπως ακριβώς παρατηρήθηκε και στην περίπτωση της θερμοκρασίας.

Στην αρχή του έτους **2005** η παράμετρος θερμοκρασία νερού εμφανίζει την ίδια συμπεριφορά με το έτος 2004 με μόνη διαφορά ότι η περίοδος αναστροφής των υδάτων εντοπίζεται στις αρχές Φεβρουαρίου (σχ. 3.22.α). Στο διάστημα αυτό οι τιμές στο βάθος 1m κυμαίνονται γύρω στους 9°C , ενώ στο υπολίμνιο βρίσκονται στους $6,5$ με 7°C . Για το υπόλοιπο του έτους παρατηρείται ισχυρή στρωμάτωση. Οι θερμοκρασίες του επιφανειακού στρώματος κατά τα μέσα Οκτωβρίου και για το έτος 2005, εμφανίζονται χαμη-

λότερες από τις αντίστοιχες του στρώματος βάθους 20m, για τους λόγους που εξηγήθηκαν πριν.



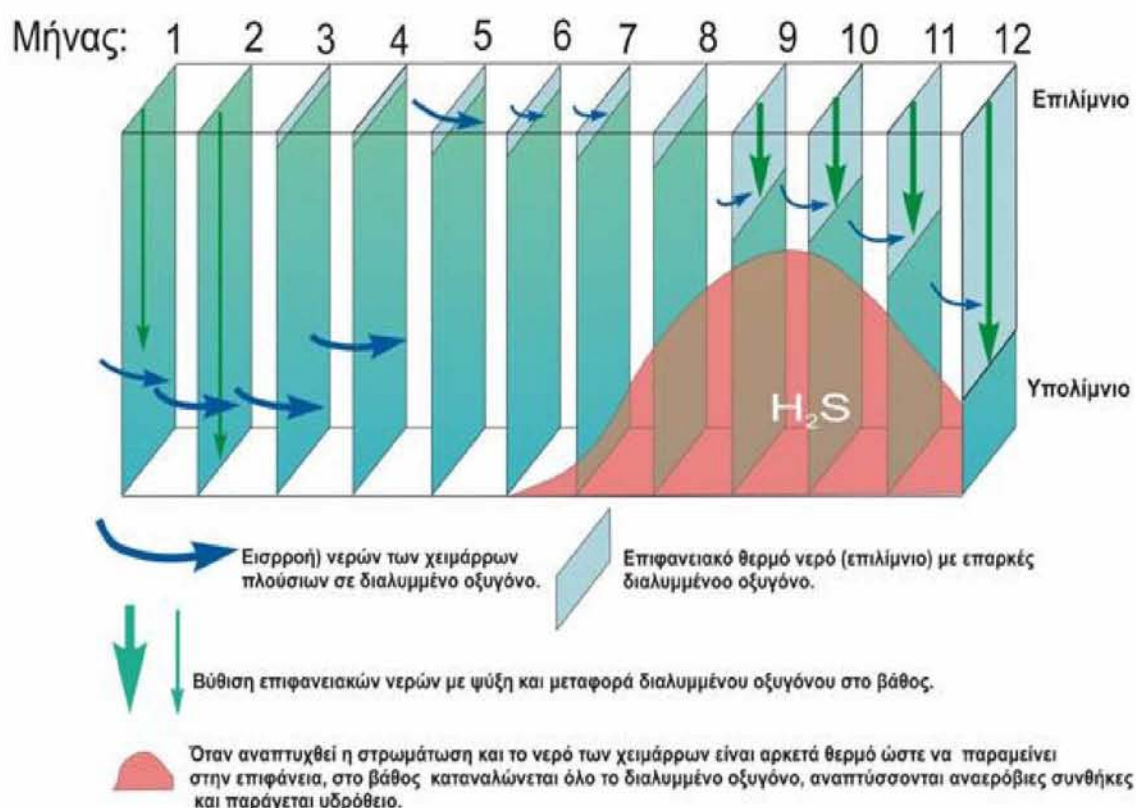
Σχήμα 3.22: Γράφημα των μετρήσεων των παραμέτρων α) διαλυμένο οξυγόνο και β) θερμοκρασία νερού, στα τέσσερα βάθη, για το έτος 2005.

Για το διαλυμένο οξυγόνο οι τιμές κατά το πρώτο εξάμηνο του 2005 παρουσιάζουν ανοδικές τάσεις, με έντονες διακυμάνσεις, ενώ σταθεροποιούνται από το τέλος Μαρτίου έως και το μήνα Μάιο. Επίσης χαρακτηριστικό της περιόδου αυτής είναι οι ιδιαίτερα υψηλές τιμές για βάθος 70m (σχ. 3.22.β).

Κατά τα μέσα Μαρτίου παρατηρείται μια αναστροφή των υδάτων της στήλης, με τις τιμές στα 40 και 70m να υπερβαίνουν αυτές των επιφανειακών στρωμάτων. Η ερμηνεία του φαινομένου είναι αυτή που αναπτύχθηκε και στην περίπτωση του έτους 2004.

Από το τέλος Μαΐου καταγράφεται έντονα πτωτική τάση των τιμών για όλα τα βάθη, με εντονότερη για τα 70m. Επίσης, κατά τους μήνες Σεπτέμβριο και Οκτώβριο παρατηρείται περίπου ταύτιση των τιμών του διαλυμένου οξυγόνου στα 40 και 70m. Προς το τέλος του έτους, οι τιμές στα 20 και 40m υπερβαίνουν αυτές του επιφανειακού στρώματος, για τους λόγους που αναλύθηκαν για την περίπτωση του 2004.

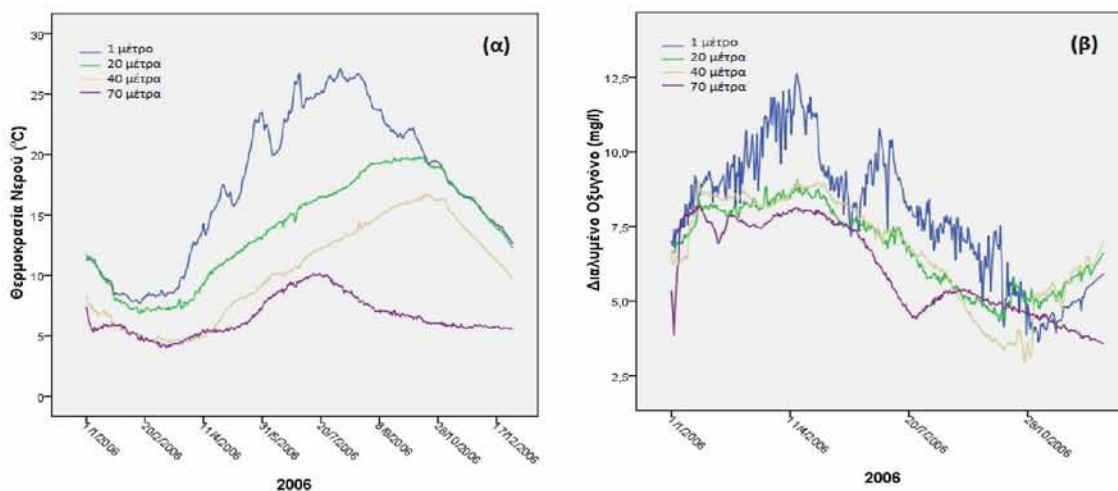
Αξιοσημείωτη είναι η υψηλή περιεκτικότητα διαλυμένου οξυγόνου ως και τα βαθύτερα στρώματα του νερού, γεγονός εξαιρετικά θετικό για την καλή λειτουργία του ταμιευτήρα και του υδροηλεκτρικού σταθμού Θησαυρού. Αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα δημιουργίας φαινομένων στασιμότητας, υποξίας και πιθανής ανοξίας και δημιουργίας τοξικών ενώσεων (CH_4 , NH_3 , H_2S) συνοδευμένων με την παρουσία θειοβακτηρίων, όπως είχε παρατηρηθεί κατά τα πρώτα στάδια της λειτουργίας του (Moustaka *et al.* 2000, Albanakis *et al.* 2001).



Εικόνα 3.3: Διαδικασίες λειτουργίας της υδάτινης στήλης του ταμιευτήρα του Θησαυρού (Moustaka *et al.* 2000, Albanakis *et al.* 2001).

Για το 2006 η περίοδος αναστροφής της θερμοκρασίας των υδάτων, λαμβάνει χώρα στα τέλη Ιανουαρίου με αρχές Φεβρουαρίου, με μετρούμενες τιμές από 6 έως 8,5 °C για τα τέσσερα βάθη (σχ. 3.23.α). Χαρακτηριστικό είναι ότι οι τιμές της θερμοκρασίας στα 70m είναι ίσες ή μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες των 40m, από τέλη Ιανουαρίου έως μέσα Απριλίου. Για το υπόλοιπο του έτους παρατηρείται στρωμάτωση της στήλης των υδάτων όμοια με αυτή που περιγράφηκε τα προηγούμενα έτη.

Όπως και τα προηγούμενα έτη, έτσι και στην περίπτωση του 2006 το διαλυμένο οξυγόνο παρουσιάζει ανοδικές τάσεις τους πρώτους μήνες του έτους έως τα μέσα Απριλίου. Στις 20 με 25 Ιανουαρίου παρατηρείται μια προσέγγιση των τιμών του διαλυμένου οξυγόνου στα τέσσερα βάθη, με τιμές που κυμαίνονται από 8 έως 8,5 mg/l, γεγονός που καταδεικνύει αναστροφή των υδάτων η οποία καταγράφεται χρονικά νωρίτερα από τα προηγούμενα έτη (σχ. 3.23.β). Αυτό οφείλεται στο δριμύ ψύχος που παρατηρήθηκε το μήνα Ιανουάριο του 2006, με πολύ χαμηλές θερμοκρασίες αέρα και νερού. Στο επιφανειακό στρώμα σχετικά νωρίς έπεσε η θερμοκρασία στα επίπεδα του υπολίμνιου οπότε επήλθε και η στρωμάτωση ένα μήνα πιο νωρίς.

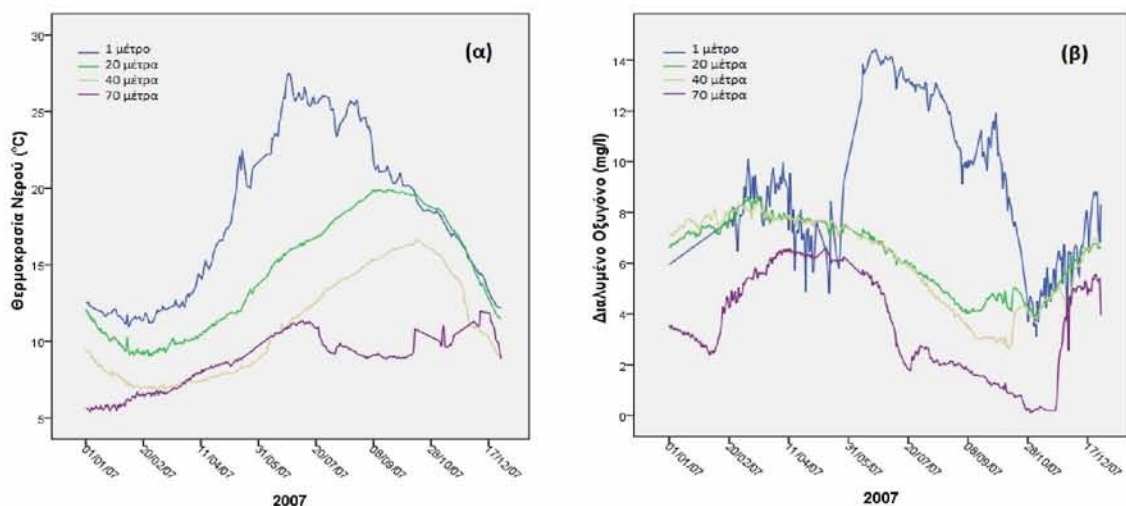


Σχήμα 3.23: Γράφημα των μετρήσεων των παραμέτρων α) θερμοκρασία νερού και β) διαλυμένο οξυγόνο, στα τέσσερα βάθη, για το έτος 2006.

Από τα μέσα Απριλίου έως τις αρχές Οκτωβρίου παρατηρείται μείωση των τιμών του διαλυμένου οξυγόνου, σε όλα τα βάθη. Η μείωση αυτή δεν είναι ίδια, καθώς οι τιμές στα 70m διατηρούνται σε υψηλά για την εποχή επίπεδα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να καταγράφονται μικρότερες τιμές από τις αρχές Αυγούστου έως αρχές Οκτωβρίου για τα 20m και από τις αρχές Αυγούστου έως τέλος Οκτωβρίου για τα 40m. Τέλος, από τα μέσα Οκτωβρίου έως τα μέσα Νοεμβρίου αντίστοιχα μειωμένες τιμές παρατηρούνται και για το επιφανειακό στρώμα.

Οι μετρήσεις του τελευταίου έτους **2007** φαίνεται να διαφοροποιούνται σε σχέση με τα προηγούμενα έτη. Έτσι η παράμετρος θερμοκρασία στις αρχές του έτους παρουσιάζει πτωτική τάση, αλλά μόνο για τα τρία πρώτα βάθη, ενώ οι μετρήσεις των 70m παρουσιάζουν ανοδική τάση σε όλο το πρώτο εξάμηνο του έτους (σχ. 3.24.α). Η σχέση η οποία παρατηρήθηκε ανάμεσα στις θερμοκρασίες των 40 και 70m αρχές του 2006 παρατηρείται και το έτος 2007 με μεγαλύτερη όμως διάρκεια (από 26/3 έως 25/6).

Κατά τους θερινούς μήνες καταγράφονται υψηλές τιμές θερμοκρασιών στο επιφανειακό στρώμα και έντονη στρωμάτωση για τα υπόλοιπα βάθη. Από τα μέσα Οκτωβρίου παρατηρούνται χαμηλότερες τιμές για τις θερμοκρασίες σε βάθος 1m από τις αντίστοιχες των 20m. Προς το τέλος του έτους το υπολίμνιο παρουσιάζει υψηλές για την εποχή θερμοκρασίες, οι οποίες τον τελευταίο μήνα είναι υψηλότερες των αντίστοιχων των 40m.



Σχήμα 3.24: Γράφημα των μετρήσεων των παραμέτρων α) θερμοκρασία νερού και β) διαλυμένο οξυγόνο, στα τέσσερα βάθη, για το έτος 2007.

Για το 2007 το διαλυμένο οξυγόνο παρουσιάζει γενικά έντονες διακυμάνσεις καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, κυρίως στο επιλίμνιο και υπολίμνιο. Κατά τους μήνες Απρίλιο και Μάιο καταγράφονται ορισμένες τιμές στο 1m μικρότερες από αυτές των 70m. Ιδιαίτερα υψηλές τιμές παρατηρούνται στο επιφανειακό στρώμα από αρχές Ιουνίου έως μέσα Οκτωβρίου. Το αντίστοιχο διάστημα τα 70m καταγράφουν πολύ χαμηλές τιμές, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται στο υπολίμνιο από τις 27/8 έως τις 23/11 συνθήκες υποξίας και σχεδόν ανοξίας.

Η επιμέρους ανά έτος ανάλυση, οδήγησε στα εξής συνολικά συμπεράσματα για την τεχνητή λίμνη του Θησαυρού:

1. Χαρακτηρίζεται ως μονομικτική λίμνη, καθώς μια φορά το χρόνο και συνήθως κατά τους μήνες Φεβρουάριο – Μάρτιο, παρουσιάζεται το φαινόμενο της αναστροφής των υδάτων με αποτέλεσμα την ανάμιξη της υδάτινης στήλης. Η ανάμιξη των υδάτων έχει σα συνέπεια την κυκλοφορία των θρεπτικών στοιχείων που υπάρχουν στην επιφάνεια της λίμνης, σε όλη τη μάζα του νερού, ενισχύοντας την ομοιόμορφη κατανομή των θρεπτικών στοιχείων και του διαλυμένου οξυγόνου σε όλη τη στήλη του νερού κατά την περίοδο της αναστροφής. Το συμπέρασμα αυτό συμφωνεί και με παλαιότερες μελέτες που έχουν γίνει (Moustaka - Gouni *et al.* 2000, Albanakis *et al.* 2001, Margoni & Psilovikos 2010, Sentas & Psilovikos 2010).
2. Για τους υπόλοιπους μήνες παρατηρείται ισχυρή στρωμάτωση στην υδάτινη στήλη, δημιουργώντας τρία στρώματα.

- i. *Επιλίμνιο*: αναφέρεται στο επιφανειακό νερό, που δέχεται άμεσα όλες τις εποχιακές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Είναι ένα ζεστό, πλούσιο σε διαλυμένο οξυγόνο και παραγωγικό υδάτινο σώμα. Για την τεχνητή λίμνη του Θησαυρού, απαντάται στα 0 – 5 έως 0 – 40m αναλόγως της εποχής, με βάση τα παραπάνω.
 - ii. *Μεταλίμνιο ή θερμοκλινές*: είναι το μεταβατικό στρώμα νερού, μεταβλητού πάχους που παρουσιάζει έντονη διαβάθμιση θερμοκρασίας και εντοπίζεται σε διαφορετικά βάθη καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου. Χαρακτηρίζεται από επίσης απότομες διαβαθμίσεις του διαλυμένου οξυγόνου, ενώ και οι δύο παράμετροι μειώνονται με την αύξηση του βάθους με όρους μέσων τιμών. Για το Θησαυρό, παρατηρείται μεταξύ των 5 και 60m.
 - iii. *Υπολίμνιο*: απαντάται από τα 60 – 70m και κάτω, αποτελεί το βαθύτερο, ψυχρότερο και αδιατάρακτο στρώμα της λίμνης και έχει τις χαμηλότερες τιμές διαλυμένου οξυγόνου και θερμοκρασίας. Παρατηρήθηκαν σε ελάχιστες περιπτώσεις μικρής χρονικής διάρκειας ανοξικές συνθήκες.
3. Η θερμοκρασία νερού για την περίοδο μελέτης εμφανίζει το αξιοσημείωτο φαινόμενο κατά το οποίο τα στρώματα του νερού σε βάθη 20 και 40m απορροφούν και αποταμιεύουν θερμότητα κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου και καταγράφουν τις μέγιστες τιμές της θερμοκρασίας στα μέσα του φθινοπώρου. Τα παραπάνω επιβεβαιώνουν το γεγονός ότι ο ταμιευτήρας του Θησαυρού λειτουργεί σα μια φυσική βαθιά λίμνη, όπου τους ανοιξιάτικους μήνες το θερμοκλινές συναντάται σε ρηχά βάθη ενώ τους φθινοπωρινούς μετατοπίζεται βαθύτερα, κάτω από τα 40m, αφού μέχρι αυτό το βάθος φτάνει η θέρμανση από το επιφανειακό στρώμα.
 4. Οι υψηλές τιμές του διαλυμένου οξυγόνου στο 1m από τα μέσα Μαρτίου έως τα μέσα Ιουλίου περίπου που παρατηρούνται σε όλα τα έτη, οφείλονται στο φαινόμενο της φωτοσύνθεσης το οποίο συμβαίνει κατά τη διάρκεια της άνοιξης και νωρίς το καλοκαίρι εξαιτίας της ανάπτυξης φυτοπλαγκτού. Στη συνέχεια, λόγω της γεωμετρικής ανάπτυξης του φυτοπλαγκτού, οι ανάγκες σε διαλυμένο οξυγόνο για την αποικοδόμηση των θρεπτικών είναι πολύ μεγαλύτερες από την προσφορά λόγω φωτοσύνθεσης, με αποτέλεσμα να μειώνονται οι ποσότητες του διαλυμένου οξυγόνου και σταδιακά το φυτοπλαγκτό να θανατώνεται, οπότε και παρατηρούνται οι χαμηλότερες τιμές του διαλυμένου οξυγόνου, μεταξύ Οκτωβρίου – Δεκεμβρίου.

5. Κατά τη διάρκεια του πρώτου εξαμήνου κάθε έτους παρατηρείται ικανοποιητική οξυγόνωση της υδάτινης στήλης, με εξαίρεση τα 70m βάθος, τα οποία όπως έχει ήδη αναφερθεί αποτελούν το υπολίμνιο στρώμα. Κατά περιόδους και στο υπολίμνιο έχουν καταγραφεί τιμές μεγαλύτερες από 7 ως 8,2 mg/l.
6. Απότομες διακυμάνσεις του διαλυμένου οξυγόνου παρατηρούνται στο επιφανειακό στρώμα και για τα τέσσερα έτη. Οι έντονες αυτές μεταβολές του DO στην επιφάνεια, οφείλονται στις έντονες μεταβολές που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της ημέρας. Γενικά θα μπορούσαμε να πούμε ότι η περιεκτικότητα σε διαλυμένο οξυγόνο σε όλη την υδάτινη στήλη είναι ικανοποιητική.

3.3.4 Προσαρμογή στοχαστικών μοντέλων

Η λήψη αποφάσεων σε θέματα διαχείρισης υδατικών πόρων και διαχείρισης υδρολογικών κινδύνων, απαιτεί προσεκτική μοντελοποίηση, πρόβλεψη και ανάλυση της ποιότητας των υδάτων για διάφορα δυνατά σενάρια. Η χρήση της στατιστικής και των υπολογιστών έχουν βελτιώσει τις μεθόδους μοντελοποίησης για την εφαρμογή μοντέλων στις χρονικές σειρές των υδρολογικών δεδομένων όπου έχει καταγραφεί μεγάλη προσπάθεια τα περασμένα χρόνια για την ανάπτυξη και βελτίωση των μοντέλων πρόβλεψης στις χρονικές σειρές. Σήμερα ένας σημαντικός αριθμός ερευνητών παγκοσμίως, χρησιμοποιεί τα στοχαστικά μοντέλα σε υδρολογικά δεδομένα.

Στην παρούσα εργασία γίνεται προσαρμογή διαφορετικών μοντέλων με σκοπό: α) τη σύγκριση μεταξύ τους, ώστε να επιλέγεται το πιο κατάλληλο κατά περίπτωση, β) την αξιολόγηση της ακρίβειας πρόβλεψης των μοντέλων και ειδικά για τα ANN τον έλεγχο με διάστημα εμπιστοσύνης και γ) τη δυνατότητα συσχετισμού των μετρήσεων στα 20, 40 και 70m με μετρήσεις της επιφάνειας, γεγονός που θα μπορούσε να οδηγήσει σε κατάργηση των αισθητήρων στα βαθύτερα στρώματα και βελτιστοποίηση των οικονομικών δεδομένων του τηλεμετρικού συστήματος.

Χρησιμοποιήθηκαν ημερήσιες μετρήσεις των παραμέτρων διαλυμένου οξυγόνου και θερμοκρασίας, για το χρονικό διάστημα από 19 Ιανουαρίου 2004 έως 28 Δεκεμβρίου 2007 και αναφέρονται σε τέσσερα διαφορετικά βάθη (1, 20, 40 και 70m).

Για να αξιολογηθεί η ακρίβεια πρόβλεψης των μοντέλων και στις δύο περιπτώσεις, διασπάστηκε το σύνολο δεδομένων (1440 παρατηρήσεις) σε δύο υποσύνολα, ένα κυρίως σύνολο (historical period) με 1420 μετρήσεις και ένα δοκιμαστικό σύνολο (forecast-

ing period) με τις τελευταίες 20. Το πρώτο σύνολο χρησιμοποιήθηκε για την επιλογή του καλύτερα προσαρμοσμένου μοντέλου στα δεδομένα, ενώ το δεύτερο για πρόβλεψη m βήμα μπροστά ($\hat{y}_t(m)$). Αν $m = 1$ τότε η πρόβλεψη γίνεται για «ένα βήμα μπροστά» και σημαίνει την πρόβλεψη της παρατήρησης τη χρονική στιγμή $t+1$, με δεδομένες τις παρατηρήσεις μέχρι τον χρόνο t ο οποίος ονομάζεται χρόνος αφετηρίας. Για την αξιολόγηση της πρόβλεψης χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα στατιστικά μέτρα, τα MSE , $RMSE$, $MAPE$ και NSC (παρ. 2.4.14). Τέλος, υπολογίστηκαν διαστήματα εμπιστοσύνης 95% για όλα τα μοντέλα που επιλέχθηκαν.

Η πρόβλεψη των 20 ημερών θεωρήθηκε επαρκής καθώς ο ταμιευτήρας του Θησαυρού λειτούργησε για πρώτη φορά το έτος 2000, ενώ από τα τέλη του 1997 όπου και ολοκληρώθηκε η κατασκευή του, ξεκίνησε η πλήρωσή του με νερό. Από τα τέλη του 1997 μέχρι τις αρχές του 2000, παρατηρήθηκαν κάποια έντονα φαινόμενα στασιμότητας του νερού που συνοδεύτηκαν από ανοξία, με τις αναγωγικές διεργασίες να υπερτερούν, την παραγωγή υδροθείου στο υπολίμνιο και την ανάπτυξη θειοβακτηρίων (Moustaka *et al.*, 2000). Από τη στιγμή που ο ταμιευτήρας ξεκίνησε να λειτουργεί και να έχουμε και απολήψεις νερού για τις διάφορες χρήσεις (υδροηλεκτρική παραγωγή, άρδευση, αντιπλημμυρική προστασία, οικολογική), δηλαδή από αρχές του έτους 2000 μέχρι σήμερα, ακόμη προσπαθεί το σύνθετο υδροσύστημα Νέστου – Θησαυρού να αποκαταστήσει τις συνθήκες ισορροπίας ανάμεσα στο φυσικό περιβάλλον και στις ανθρωπογενείς επεμβάσεις.

Έτσι, μία περίοδος των τεσσάρων ετών (αρχές 2004 – τέλη 2007) είναι απαραίτητη για την παρακολούθηση των χαρακτηριστικών του σε όλη τη στήλη του νερού σε διάφορα βάθη, γιατί παρατηρούνται μικρές μεταβολές όπως για παράδειγμα στη θερμοκρασία του υπολιμνίου. Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση ενός υφιστάμενου ταμιευτήρα θα αρκούσε 1 το πολύ 2 έτη για την πλήρη παρακολούθηση και την εξαγωγή αξιόπιστων συμπερασμάτων, αλλά στην περίπτωση του Θησαυρού, θεωρήθηκε ότι χρειάζονται 4 συνεχή έτη. Επιλέχτηκε λοιπόν η πρόβλεψη (forecasting) να πραγματοποιηθεί στο τέλος της τετραετούς περιόδου λειτουργίας (Δεκέμβριος 2007), χωρίς να υπάρχουν ενδιάμεσες περίοδοι π.χ. άνοιξη του ίδιου ή και προηγούμενου έτους, γιατί δε θα ανταποκρινόταν επακριβώς στην ερμηνεία του φυσικού προβλήματος.

3.3.4.1 Κατασκευή και προβλεπτική ικανότητα των μοντέλων

Για τον έλεγχο της προβλεπτικής τους ικανότητας, κατασκευάστηκαν και ελέγχθηκαν τα παρακάτω στοχαστικά μοντέλα: 1) ARIMA, 2) Transfer Function και 3) μοντέλα Νευρωνικών Δικτύων. Για κάθε βάθος προσαρμόστηκε στη χρονοσειρά του διαλυμένου οξυγόνου ένα ARIMA μοντέλο, ένα μοντέλο νευρωνικού δικτύου και ένα μοντέλο TF. Συνολικά προσαρμόστηκαν τέσσερα ARIMA, τέσσερα μοντέλα νευρωνικών δικτύων και τέσσερα TF μοντέλα με μεταβλητή εξόδου τη χρονοσειρά του διαλυμένου οξυγόνου σε κάθε βάθος και μεταβλητή εισόδου τη θερμοκρασία των υδάτων του αντίστοιχου βάθους. Με χρήση όλων των παραπάνω μοντέλων έγινε πρόβλεψη για $m = 1, 2, 3, 5$ και 10 βήματα μπροστά.

α) ARIMA μοντέλα

Για κάθε χρονοσειρά, έγιναν διάφορες δοκιμές για την επιλογή του βέλτιστου, ARIMA μοντέλου. Το μοντέλο με σημαντικές παραμέτρους που ικανοποιούσαν όλους τους στατιστικούς διαγνωστικούς ελέγχους οι οποίοι έχουν περιγραφεί στην παράγραφο 2.4.10, επιλέχθηκε σαν το τελικό ARIMA μοντέλο πρόβλεψης.

Για την προσαρμογή του ARIMA μοντέλου στα διαθέσιμα δεδομένα, ακολουθήθηκαν τα τρία βήματα της μεθόδου Box και Jenkins (παρ. 2.4.7.1), δηλαδή 1) αναγνώριση του μοντέλου, 2) εκτίμηση των παραμέτρων του και 3) έλεγχος καταλληλότητας. Με τη βοήθεια της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης έγινε η αναγνώριση του μοντέλου, ενώ με χρήση του κριτηρίου AICs (παρ. 2.4.11.1) και Schwarz (παρ. 2.4.11.2) έγινε η επιλογή του καλύτερα προσαρμοσμένου μοντέλου. Όλες οι παράμετροι του τελικού μοντέλου ήταν σημαντικές σε επίπεδο σημαντικότητας 5% και τα σφάλματα της προσαρμογής ελέγχθηκαν ως προς την ανεξαρτησία τους με τη βοήθεια της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης και με το στατιστικό Ljung – Box –Pierce (παρ. 2.4.10).

Η συμβολική και η αναλυτική έκφραση των μοντέλων που επιλέχθηκαν για κάθε βάθος, καθώς επίσης και η σημαντικότητα του στατιστικού Ljung – Box –Pierce για τις 18 πρώτες αυτοσυσχετίσεις των σφαλμάτων, δίνονται στον πίνακα 3.11.

Από τις τιμές της σημαντικότητας του στατιστικού Ljung–Box–Pierce, φαίνεται ότι όλα τα μοντέλα είναι αποδεκτά σε στάθμη σημαντικότητας 5%.

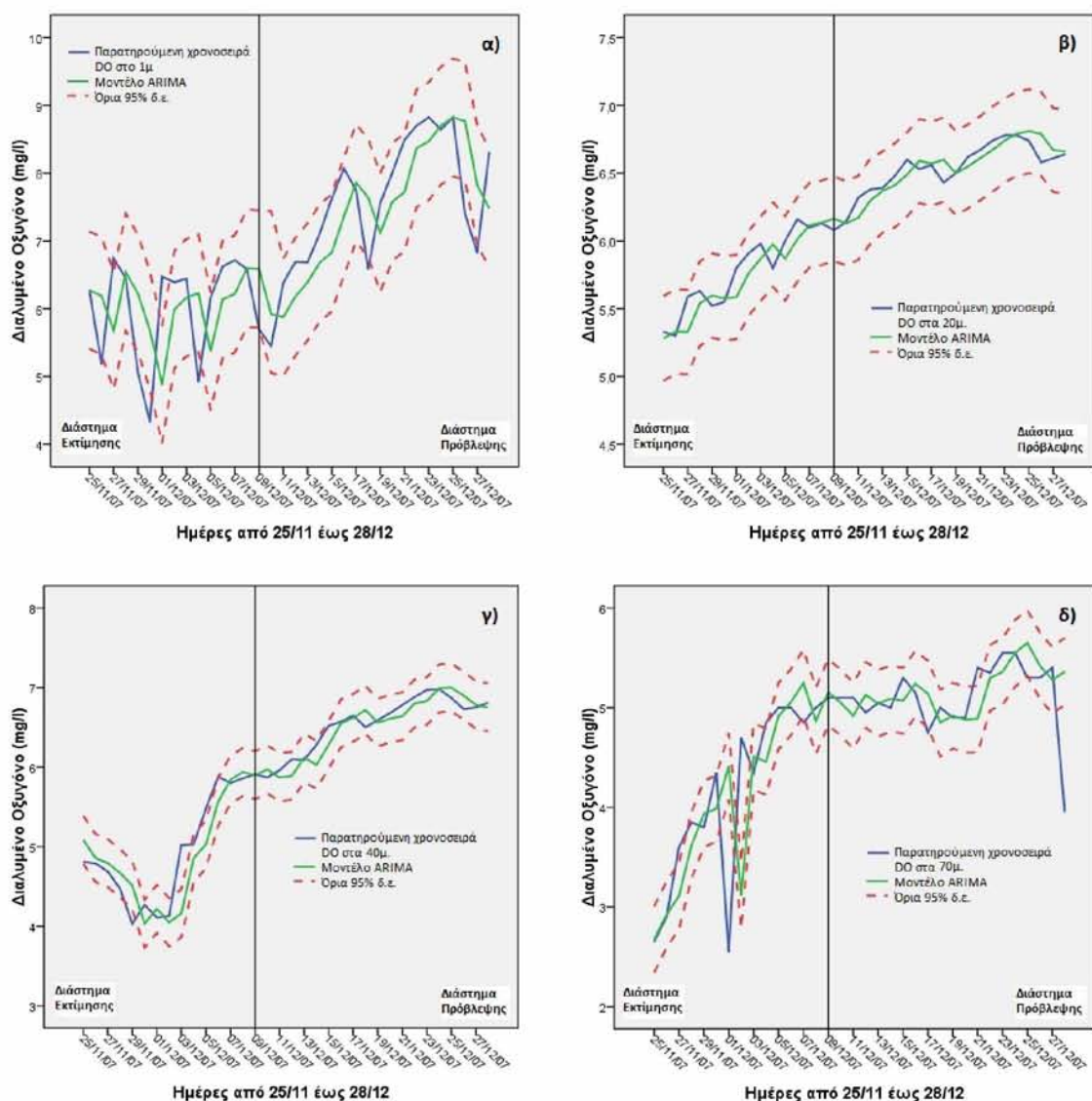
Πίνακας 3.11: ARIMA μοντέλα της παραμέτρου διαλυμένο οξυγόνο, στα τέσσερα βάθη.

DO	Μοντέλο	Αναλυτική έκφραση	Sig.(Q18)
1μ	ARIMA(3,1,5)	$y_t = \frac{(1 - 0,5B^2 - 0,790B^3 + 0,366B^4 + 0,102B^5)e_t}{(1 - B)(1 + 0,397B - 0,245B^2 + 0,880B^3)}$	0,136 (3.1)
20μ	ARIMA(2,1,3)	$y_t = \frac{(1 - 0,722B - 0,498B^2 + 0,274B^3)e_t}{(1 - B)(1 - 0,428B + 0,534B^2)}$	0,250 (3.2)
40μ	ARIMA(2,1,13)	$y_t = \frac{(1 + 0,108B + 0,308B^2)e_t}{(1 - B)(1 - 0,339B^2 + 0,189B^3 + 0,082B^{13})}$	0,850 (3.3)
70μ	ARIMA(2,1,10)	$y_t = \frac{(1 - 0,563B^2)e_t}{(1 - B)(1 - 0,206B - 0,477B^2 + 0,252B^3 + 0,123B^{10})}$	0,585 (3.4)

Η γραφική απεικόνιση της παρατηρούμενης χρονοσειράς, της εκτιμώμενης από το μοντέλο και τα όρια του 95% διαστήματος εμπιστοσύνης, δίνονται στο σχήμα 3.25. Το διάστημα από 25 Νοεμβρίου έως 8 Δεκεμβρίου του 2007 είναι μέρος του διαστήματος εκτίμησης του μοντέλου και σε αυτό απεικονίζεται η προσαρμογή του μοντέλου, ενώ το διάστημα από 9 έως 28 Δεκεμβρίου, αποτελεί το διάστημα πρόβλεψης και σε αυτό απεικονίζεται η ικανότητα πρόβλεψης του μοντέλου.

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε στο σχήμα 3.25.α η προσαρμογή και η πρόβλεψη του ARIMA μοντέλου σε βάθος **1 μέτρου**, αν και γενικά ακολουθεί τις μεταβολές των δεδομένων, δεν είναι ικανοποιητική δεδομένου ότι υπάρχουν τιμές και στο διάστημα εκτίμησης και στο διάστημα πρόβλεψης, εκτός των ορίων του διαστήματος εμπιστοσύνης. Η αδυναμία του μοντέλου να δώσει «άριστες» προβλέψεις, οφείλεται στο γεγονός ότι το επιφανειακό στρώμα επειδή έρχεται σε άμεση επαφή με τον αέρα και το περιβάλλον, είναι το πιο ευμετάβλητο σε ότι αφορά τιμές διαλυμένου οξυγόνου, οι οποίες καταγράφονται σε ημερήσια βάση στη χρονοσειρά των δεδομένων. Η διακύμανση των τιμών του 1m, φαίνεται εξάλλου ξεκάθαρα και στα αντίστοιχα σχήματα.

Η εικόνα παρουσιάζεται ιδιαίτερα βελτιωμένη στη χρονοσειρά του διαλυμένου οξυγόνου για βάθος **20 μέτρων**, στην οποία το ARIMA μοντέλο έχει μια πολύ ικανοποιητική προσαρμογή (σχ. 3.25.β), χωρίς καμία από τις μετρήσεις και στα δύο διαστήματα να εξέρχεται των ορίων εμπιστοσύνης.



Σχήμα 3.25: Προσαρμογή ARIMA μοντέλου στη χρονοσειρά του DO και όρια 95% δ.ε. για βάθος (α) 1m (β) 20m (γ) 40m (δ) 70m.

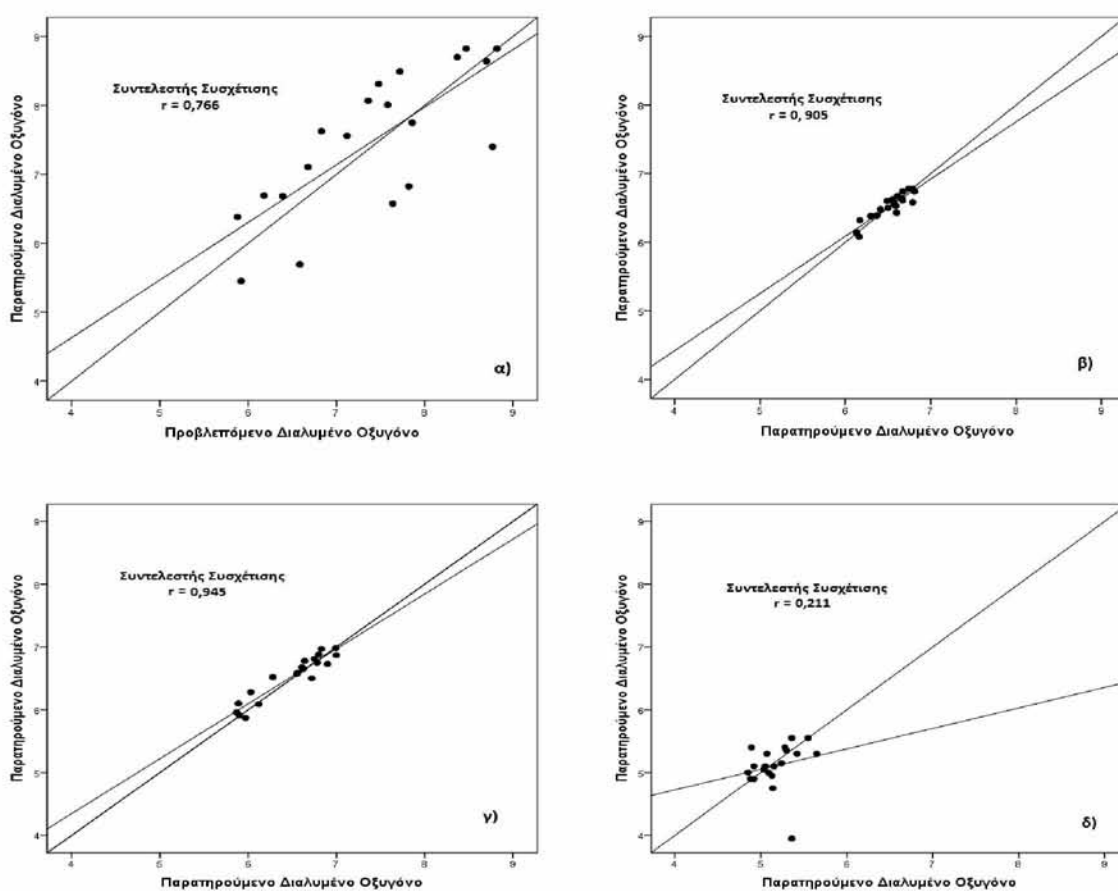
Το μοντέλο της χρονοσειράς του διαλυμένου οξυγόνου για βάθος **40 μέτρων** φαίνεται να ακολουθεί όλες τις αυξομειώσεις της χρονοσειράς, να κάνει ικανοποιητική πρόβλεψη, με ελάχιστο όμως αριθμό μετρήσεων να αγγίζει τα όρια του διαστήματος εμπιστοσύνης (σχ. 3.25.γ).

Οι προβλέψεις του μοντέλου των **70 μέτρων** στο σύνολό τους, ακολουθούν τις μεταβολές της χρονοσειράς (σχ. 3.25.δ), εκτός δύο τιμών που βρίσκονται ελάχιστα εκτός ορίων εμπιστοσύνης. Τη γενικά αποδεκτή εικόνα του διαστήματος πρόβλεψης, αλλοιώνει η πρόβλεψη της τελευταίας παρατήρησης, η οποία απέχει από την πραγματική τιμή, που καταγράφει μια απότομη μείωση του διαλυμένου οξυγόνου κατά τη διάρκεια μιας

ημέρας. Αυτή η μεμονωμένη τιμή, ενδέχεται να οφείλεται και σε λάθος καταγραφή του αισθητήρα.

Οι τιμές των συντελεστών συσχέτισης ανάμεσα στις προβλεπόμενες και στις παρατηρούμενες τιμές του διαλυμένου οξυγόνου στα τέσσερα βάθη, είναι 0,766 για το 1m βάθος, 0,905 για τα 20m, 0,945 για τα 40m και 0,211 για τα 70m. Η ιδιαίτερα χαμηλή τιμή του συντελεστή συσχέτισης για βάθος 70m οφείλεται στη μεγάλη απόκλιση μεταξύ της πραγματικής και της εκτιμώμενης τιμής του διαλυμένου οξυγόνου την τελευταία ημέρα του διαστήματος πρόβλεψης, σημείο το οποίο καταγράφεται χαρακτηριστικά και στο διάγραμμα διασποράς (σχ. 3.26.δ).

Στο σχήμα 3.26 παρουσιάζονται τα διαγράμματα διασποράς (scatter plots) μεταξύ των παρατηρούμενων και των προβλεπόμενων τιμών καθώς επίσης ο συντελεστής συσχέτισης, η ευθεία άριστης προσαρμογής (ευθεία 1:1) και η γραμμή παλινδρόμησης, για έναν πρώτο οπτικό έλεγχο της προβλεπτικής ικανότητας των τεσσάρων μοντέλων.



Σχήμα 3.26: Διαγράμματα διασποράς παρατηρούμενων και προβλεπόμενων τιμών από τα ARIMA μοντέλα για βάθος (α) 1m (β) 20m (γ) 40m (δ) 70m.

Στον πίνακα 3.12 καταγράφονται οι τιμές των στατιστικών μέτρων που αναφέρονται στην αξιολόγηση των προβλέψεων των προσαρμοσμένων μοντέλων. Η διάταξη των μοντέλων ως προς την προβλεπτική τους ικανότητα, σύμφωνα με τα τρία πρώτα στατιστικά μέτρα (MSE, RMSE και MAPE) είναι ότι: καλύτερη πρόβλεψη δίνει το ARIMA των 20m, ακολουθεί το μοντέλο των 40m και έπονται των 70m και του 1m. Η σειρά διαφοροποιείται σύμφωνα με το μέτρο NSC, όπου η πρόβλεψη που δίνει το μοντέλο των 40m εμφανίζεται καλύτερη, αυτής των 20m, και στη συνέχεια του 1m και των 70m, όπου η τιμή είναι αρνητική.

Η αλλαγή της διάταξης που παρατηρείται στο τελευταίο στατιστικό μέτρο, οφείλεται στη διαφορετική λογική του κριτηρίου, σύμφωνα με την οποία το μέτρο αξιολογεί τους εκτιμητές του μοντέλου σε σχέση με τη δειγματική μέση τιμή αν τη θεωρήσουμε ως εκτιμητή, σε αντίθεση με τα άλλα κριτήρια που αξιολογούν τις αποκλίσεις των εκτιμώμενων βάσει του μοντέλου τιμών, από τις πραγματικές (παρ. 2.4.14).

Πίνακας 3.12: Στατιστικά μέτρα αξιολόγησης προβλεπτικής ικανότητας των ARIMA μοντέλων, στα τέσσερα βάθη.

ARIMA	MSE	RMSE	MAPE	NSC
1m βάθος	0,4425	0,6652	7,9472	0,614
20m βάθος	0,0077	0,0877	1,0552	0,799
40m βάθος	0,0167	0,1293	1,5882	0,916
70m βάθος	0,1376	0,3709	4,4140	-0,170

Τα διαγράμματα διασποράς με τις τιμές των συντελεστών συσχέτισης, καθώς επίσης και οι τιμές των μέτρων, επιβεβαιώνουν τα συμπεράσματα για την προσαρμογή των ARIMA μοντέλων που έχουν περιγραφεί παραπάνω.

β) Transfer Function μοντέλα

Για την κατασκευή των τεσσάρων Transfer Function μοντέλων, χρησιμοποιήθηκε για κάθε βάθος ως μεταβλητή εισόδου η παράμετρος της θερμοκρασίας και ως μεταβλητή εξόδου η παράμετρος του διαλυμένου οξυγόνου. Για την προσαρμογή καταρχήν υπολογίστηκαν οι συναρτήσεις διασυσχέτισης (Sample Cross Correlation Functions, SCCF) ακολουθώντας τη μέθοδο της προλεύκανσης. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, εκτιμήθηκε η συνάρτηση διασυσχέτισης μεταξύ των σφαλμάτων (Noise Residuals) που

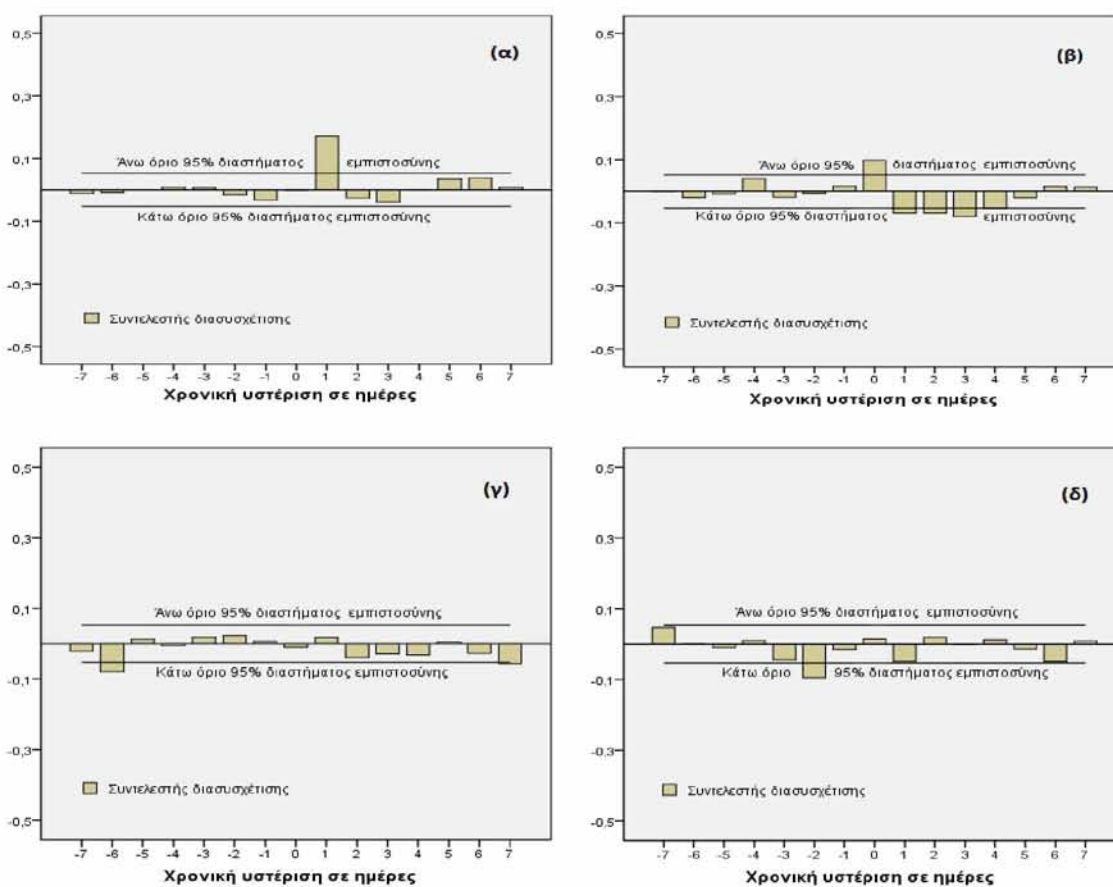
προέκυψαν μετά την προσαρμογή των ARIMA μοντέλων στις δύο παραμέτρους.

Τα ARIMA μοντέλα με τα οποία έγινε η προλεύκανση των δύο παραμέτρων αναγράφονται στον πίνακα 3.13.

Πίνακας 3.13: ARIMA μοντέλα προλεύκανσης.

Βάθος	Διαλυμένο οξυγόνο	Θερμοκρασία νερού
1 μέτρο	ARIMA(3,1,5)	ARIMA(1,1,13)
20 μέτρα	ARIMA(2,1,3)	ARIMA(1,1,2)
40 μέτρα	ARIMA(2,1,13)	ARIMA(1,1,2)
70 μέτρα	ARIMA(2,1,10)	ARIMA(1,1,2)

Στο σχήμα 3.27 παρουσιάζονται τα γραφήματα των συναρτήσεων διασυσχέτισης για κάθε βάθος, μετά τη διαδικασία της προλεύκανσης.



Σχήμα 3.27: Δειγματική συνάρτηση διασυσχέτισης (SCCF) μεταξύ διαλυμένου οξυγόνου και θερμοκρασίας κατόπιν προλεύκανσης, για βάθος (α) 1m (β) 20m (γ) 40m (δ) 70m.

Παρατηρούμε ότι σε όλες τις περιπτώσεις υπάρχουν σημαντικές συσχετίσεις, όχι ιδιαίτερα ισχυρές, μεταξύ διαλυμένου οξυγόνου και θερμοκρασίας, καθώς υπάρχουν τιμές της συνάρτησης εκτός των ορίων του 95% διαστήματος εμπιστοσύνης (σχ. 3.27).

Ακολουθώντας τη διαδικασία η οποία έχει περιγραφεί αναλυτικά στην παράγραφο 2.4.9 προσαρμόστηκαν διάφορα TF μοντέλα και βάση των κριτηρίων που περιγράφονται στις παραγράφους 2.4.10 και 2.4.11, επιλέχθηκαν τα τέσσερα καλύτερα μοντέλα TF-1, TF-20, TF-40 και TF-70. Η αναλυτική έκφραση των μοντέλων είναι:

TF-1:

$$y_t = 0,073 - 0,004x_t + \frac{(1 - 0,440B^2 - 0,755B^3 + 0,346B^4 + 0,107B^5)}{(1 - B)(1 - 0,465B + 0,809B^3)} e_t \quad (3.5)$$

TF-20:

$$y_t = 0,091x_t - 0,09x_{t-1} + \frac{(1 - 0,706B - 0,513B^2 + 0,276B^3)}{(1 - B)(1 - 0,421B - 0,540B^2)} e_t \quad (3.6)$$

TF-40:

$$y_t = \frac{0,048(B - 1)}{1 - 0,856} x_{t-6} + \frac{(1 + 0,943B^2 - 0,09B^4 + 0,216B^5 - 0,067B^6 + 0,083B^7)}{(1 - B)(1 - 0,128B + 0,983B^2)} e_t \quad (3.7)$$

TF-70:

$$y_t = -0,113x_{t-2} + 0,113x_{t-3} + \frac{(1 - 1,089B + 0,23B^2 + 0,06B^4)}{(1 - B)(1 - 0,895B)} e_t \quad (3.8)$$

όπου η μέτρηση της θερμοκρασίας και

y_t η μέτρηση του διαλυμένου οξυγόνου κατά την ίδια χρονική στιγμή t .

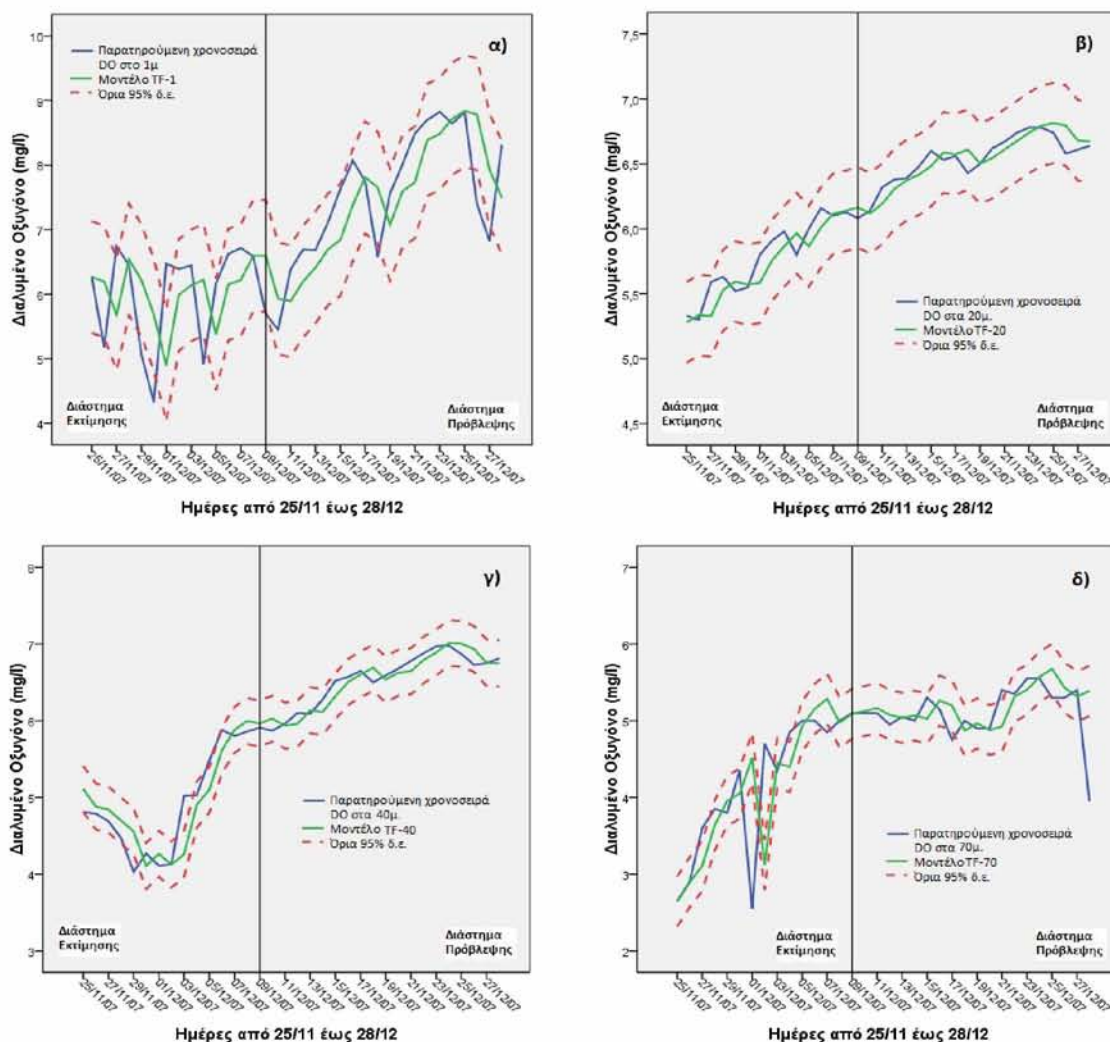
Για όλα τα παραπάνω μοντέλα η σημαντικότητα του στατιστικού Ljung – Box – Pierce $Q(r)$, για 18 αυτοσυσχετίσεις σφαλμάτων, είναι μεγαλύτερη του 0,05, που σημαίνει ότι όλα τα μοντέλα είναι αποδεκτά. Οι τιμές του στατιστικού δίνονται στον πίνακα 3.14.

Πίνακας 3.14: Τιμές της σημαντικότητας του στατιστικού Q, για τα TF μοντέλα.

	TF-1	TF-20	TF-40	TF-70
Σημαντικότητα του στατιστικού Q(18)	0,106	0,103	0,229	0,10

Η παρατηρούμενη χρονοσειρά, οι εκτιμήσεις του TF μοντέλου και τα όρια του 95% διαστήματος εμπιστοσύνης, για τα τέσσερα διαφορετικά βάθη, δίνονται στο σχήμα

3.28. Όμοια και στην περίπτωση των TF μοντέλων δίνονται στα σχήματα τα ίδια χρονικά διαστήματα εκτίμησης και πρόβλεψης, δηλαδή από 25 Νοεμβρίου έως 8 Δεκεμβρίου και από 9 έως 28 Δεκεμβρίου του 2007, αντίστοιχα.

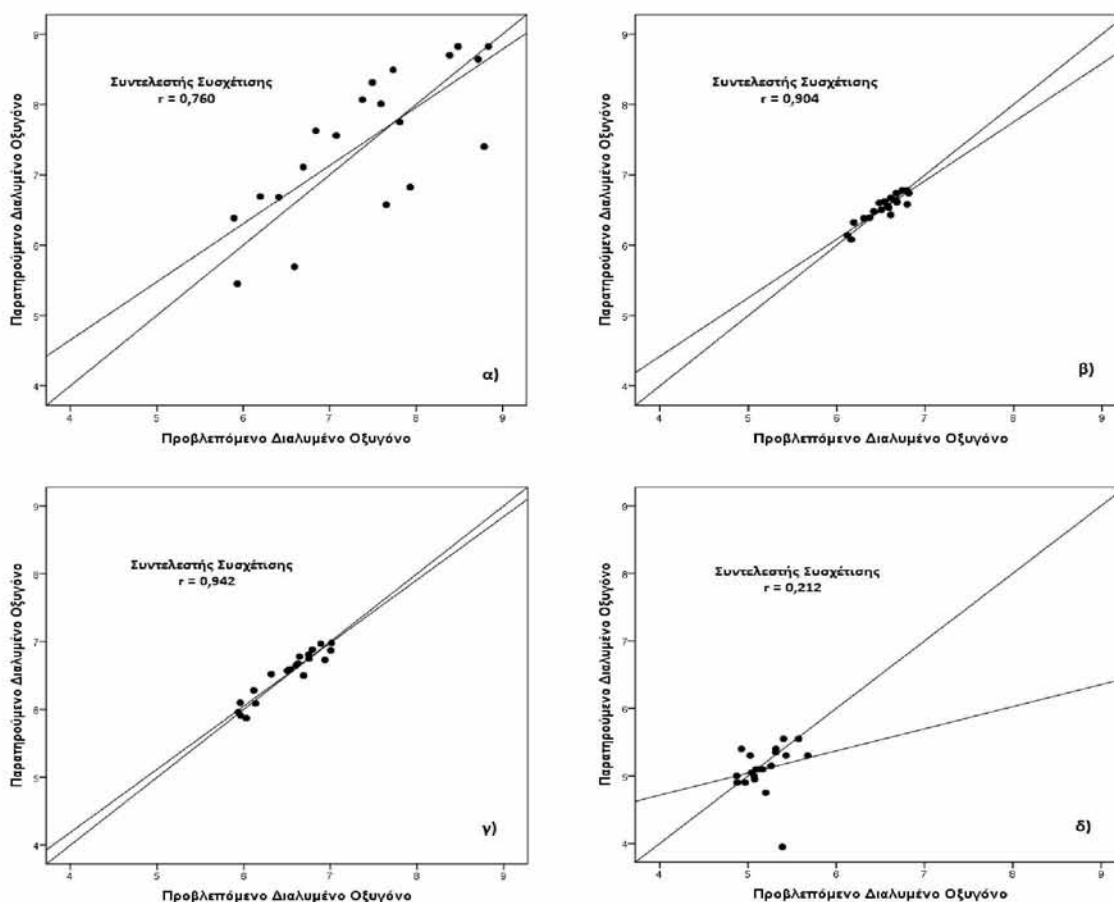


Σχήμα 3.28: Προσαρμογή TF μοντέλου και όρια 95% δ.ε. για βάθος (α) 1m (β) 20m (γ) 40m και (δ) 70m.

Από το σχήμα 3.28 φαίνεται ότι τα TF μοντέλα ακολουθούν τις μεταβολές της παρατηρούμενης χρονοσειράς, έχουν καλή προσαρμογή, καλύτερη για τα 20 και 40m και λιγότερο καλή για τα 1 και 70m. Η εντύπωση που δημιουργείται από τα γραφήματα του σχήματος είναι ότι η προσαρμογή των TF και ARIMA μοντέλων είναι περίπου η ίδια, εικόνα η οποία θα γίνει σαφέστερη ελέγχοντας και άλλα στατιστικά.

Στο σχήμα 3.29 παρουσιάζονται τα διαγράμματα διασποράς (scatter plots) μεταξύ των παρατηρούμενων και των προβλεπόμενων τιμών από τα TF μοντέλα και ο συντε-

λεστής συσχέτισης για τις τέσσερις χρονοσειρές του διαλυμένου οξυγόνου στα τέσσερα βάθη. Οι τιμές των συντελεστών συσχέτισης είναι 0,760 για το 1m βάθος, 0,904 για τα 20m, 0,949 για τα 40m και 0,212 για τα 70m. Οι τιμές αυτές διαφέρουν από τις αντίστοιχες των ARIMA μοντέλων στο τρίτο δεκαδικό, γεγονός που ενισχύει τη μικρή διαφορά προβλεπτικής ικανότητας των δύο μοντέλων. Στην ουσία όμως οι δύο μέθοδοι μας δίνουν παρόμοια αποτελέσματα.



Σχήμα 3.29: Διαγράμματα διασποράς παρατηρούμενων και προβλεπόμενων τιμών από τα TF μοντέλα για βάθος (α) 1m (β) 20m (γ) 40m (δ) 70m.

Οι τιμές των στατιστικών MSE, RMSE, MAPE και NSC καταγράφονται στον πίνακα 3.15, σύμφωνα με τις οποίες για τα τρία πρώτα στατιστικά, την ακριβέστερη πρόβλεψη δίνει το Transfer Function μοντέλο που προσαρμόζεται στη χρονοσειρά των 20m (TF-20), την αμέσως επόμενη το TF-40, έπεται το TF-70 και τελευταίο το TF-1. Σύμφωνα με το στατιστικό NSC, προηγείται ως προς την προβλεπτική του ικανότητα το μοντέλο TF-40, ακολουθούν το TF-20 και το TF-1 και τελευταίο το TF-70.

Πίνακας 3.15: Στατιστικά μέτρα αξιολόγησης προβλεπτικής ικανότητας των TF μοντέλων, στα τέσσερα βάθη.

Transfer Function	MSE	RMSE	MAPE	NSC
1m βάθος	0,4527	0,6728	7,9748	0,605
20m βάθος	0,0079	0,0891	1,075	0,793
40m βάθος	0,0131	0,1144	1,4791	0,934
70m βάθος	0,1413	0,3759	4,3697	-0,202

γ) Νευρωνικά δίκτυα

Για σύγκριση της επίδοσης των ARIMA και TF μοντέλων με τα νευρωνικά δίκτυα, κατασκευάστηκαν τέσσερα μοντέλα ANN, βασισμένα στη δομή των ARIMA μοντέλων, στα αντίστοιχα τέσσερα βάθη (παρ. 3.3.4.1).

Σε κάθε περίπτωση ως παράμετροι εισόδου χρησιμοποιήθηκαν τιμές διαλυμένου οξυγόνου του ίδιου βάθους αλλά προηγούμενων ημερών (Dorffner 1996). Έτσι κατασκευάστηκαν τα παρακάτω νευρωνικά δίκτυα:

$$\text{ANN-1: } y_t = f(y_{t-1}, y_{t-2}, y_{t-3}, y_{t-4}) \quad (3.9)$$

$$\text{ANN-20: } y_t = f(y_{t-1}, y_{t-2}, y_{t-3}) \quad (3.10)$$

$$\text{ANN-40: } y_t = f(y_{t-1}, y_{t-2}, y_{t-3}) \quad (3.11)$$

$$\text{ANN-70: } y_t = f(y_{t-1}, y_{t-2}, y_{t-3}) \quad (3.12)$$

όπου ANN- k το νευρωνικό δίκτυο που αντιστοιχεί σε βάθος k μέτρα.

Όπως αναφέρθηκε (παρ. 3.3.4) το συνολικό δείγμα των 1440 ημερήσιων παρατηρήσεων χωρίστηκε σε δύο υποσύνολα: υποσύνολο εκτίμησης (historical period) και υποσύνολο πρόβλεψης του μοντέλου (forecasting period). Το 70% του υποσυνόλου εκτίμησης ορίστηκε ως δείγμα εκπαίδευσης (training sample), ενώ το υπόλοιπο 30% του υποσυνόλου, ως δείγμα πιστοποίησης ή ελέγχου του μοντέλου (validation ή testing sample).

Τα νευρωνικά μοντέλα τα οποία δοκιμάστηκαν και από τα οποία έγινε η επιλογή των τελικών μοντέλων, ακολουθούσαν την παρακάτω αρχιτεκτονική:

- ένα κρυφό επίπεδο,
- σιγμοειδή συνάρτηση (sigmoid function) ενεργοποίησης εισόδου,

- ταυτοτική συνάρτηση (identity function) ενεργοποίησης εξόδου,
- κανόνα ολοκλήρωσης του αλγόριθμου τη μη αύξηση του λάθους ύστερα από δύο βήματα ή τη συμπλήρωση του μέγιστου χρόνου των 15 λεπτών ή τη συμπλήρωση του μέγιστου αριθμού εποχών (2000 εποχές),
- 100 επαναλήψεις για κάθε μοντέλο και τέλος
- επιλογή του τελικού μοντέλου, βάσει του αθροίσματος τετραγώνων των σφαλμάτων (Sum of Squares Error – SSE) του υποσυνόλου πιστοποίησης.

Για τον **Π.Σ. Θησαυρό** τα νευρωνικά μοντέλα που επιλέχθηκαν για τα τέσσερα βάρη, έχουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

Από τις παραμέτρους εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των νευρωνικών δικτύων και στις τέσσερις περιπτώσεις, τη μεγαλύτερη σημαντικότητα και συμβολή στη διαμόρφωση του μοντέλου παρουσιάζει η χρονοσειρά της προηγούμενης ημέρας y_{t-1} , γεγονός αναμενόμενο, καθώς η τιμή της κάθε ημέρας είναι λογικό να έχει πρωταρχικό ρόλο στη διαμόρφωση της τιμής της επόμενης ημέρας. Η σημαντικότητα των υπολοίπων χρονοσειρών εισόδου, διαφοροποιείται ανάλογα με το μοντέλο. Στον πίνακα 3.16 καταγράφονται οι σημαντικότητες και οι κανονικοποιημένες σημαντικότητες των χρονοσειρών εισόδου.

Πίνακας 3.16: Σημαντικότητες και κανονικοποιημένες σημαντικότητες μεταβλητών εισόδου των νευρωνικών δικτύων στον Π.Σ. Θησαυρό.

Τ.Σ. Θησαυρός	ANN-1		ANN-20		ANN-40		ANN-70	
	Σημ.	Κανον. Σημ.	Σημ.	Κανον. Σημ.	Σημ.	Κανον. Σημ.	Σημ.	Κανον. Σημ.
y_{t-1}	0,713	100%	0,704	100%	0,684	100%	0,677	100%
y_{t-2}	0,067	9,4%	0,150	21,2%	0,201	29,3%	0,269	39,8%
y_{t-3}	0,178	24,9%	0,147	20,9%	0,116	17%	0,054	8%
y_{t-4}	0,043	6%	-	-	-	-	-	-

Για το μοντέλο ANN-1 η y_{t-3} έχει τη δεύτερη συνεισφορά στη διαμόρφωση του μοντέλου, ενώ η δεύτερη και η τέταρτη τις αμέσως επόμενες. Στα υπόλοιπα μοντέλα η σειρά σημαντικότητας των y_{t-2} και y_{t-3} είναι η ίδια, με περίπου το ίδιο ποσοστό συνεισφοράς στα μοντέλα ANN-20 και ANN-40, ενώ για το μοντέλο ANN-70 η σημαντικότητα της y_{t-2} είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της y_{t-3} .

Στον πίνακα 3.17 παρουσιάζονται τα στατιστικά των τελικών μοντέλων, δηλαδή το άθροισμα τετραγώνων (Sum of Squares Error, SSE) και το σχετικό σφάλμα (Relative Error, RE) των υπολοίπων της προσαρμογής των μοντέλων, στο δείγμα εκπαίδευσης (Training sample) και στο δείγμα ελέγχου (Testing sample).

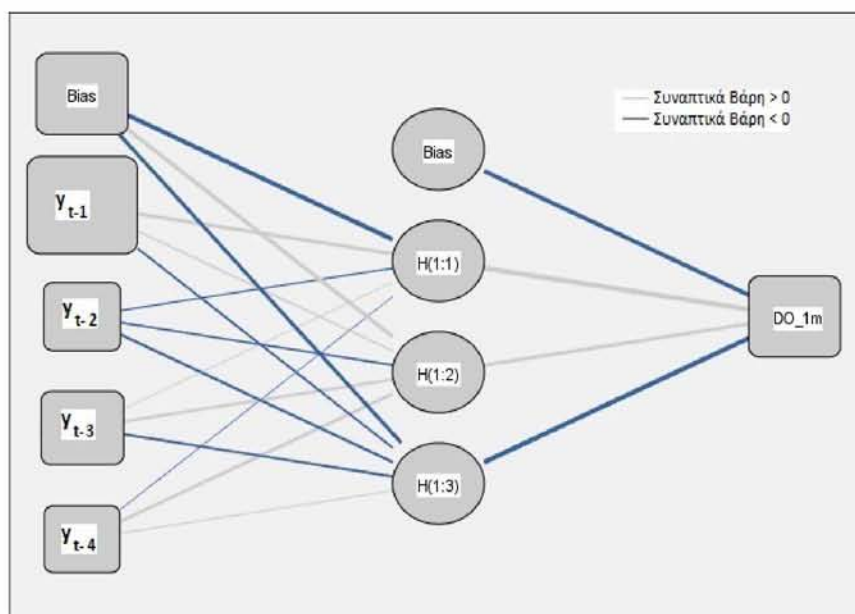
Πίνακας 3.17: Στατιστικά των νευρωνικών δικτύων στα τέσσερα βάθη.

Τ.Σ. Θησαυρός	Στατιστικά ANN	ANN-1	ANN-20	ANN-40	ANN-70
Δείγμα εκπαίδευσης	Άθροισμα τετραγώνων των σφαλμάτων (SSE)	23,679	8,867	6,369	4,418
	Σχετικό σφάλμα (RE)	0,48	0,017	0,013	0,09
Δείγμα ελέγχου	Άθροισμα τετραγώνων των σφαλμάτων (SSE)	7,082	2,335	1,416	0,968
	Σχετικό σφάλμα (RE)	0,027	0,013	0,007	0,005

Για τα μοντέλα ANN-1, ANN-20, ANN-40 και ANN-70 στους πίνακες 3.18, 3.19, 3.20 και 3.21 καταγράφονται οι εκτιμώμενες τιμές των βαρών (παραμέτρων) και οι μεροληψίες των μοντέλων, ενώ στα σχήματα 3.30, 3.31, 3.32 και 3.33, παρουσιάζονται τα διαγράμματά τους.

Πίνακας 3.18: Εκτίμηση παραμέτρων του μοντέλου ANN-1.

ANN-1		Εκτιμώμενα Βάρη			
		Κρυφό Επίπεδο		Επίπεδο Εξόδου	
		H(1:1)	H(1:2)	H(1:3)	DO 1m
Παράμετροι εισόδου (Input Layer)	(Bias)	-1,340	1,135	-0,868	
	y_{t-1}	0,808	0,108	-0,183	
	y_{t-2}	-0,100	-0,120	-0,599	
	y_{t-3}	0,045	0,656	-0,227	
	y_{t-4}	-0,037	0,724	0,071	
Κρυφό επίπεδο (Hidden Layer)	(Bias)				-1,165
	H(1:1)				4,706
	H(1:2)				0,788
	H(1:3)				-1,411

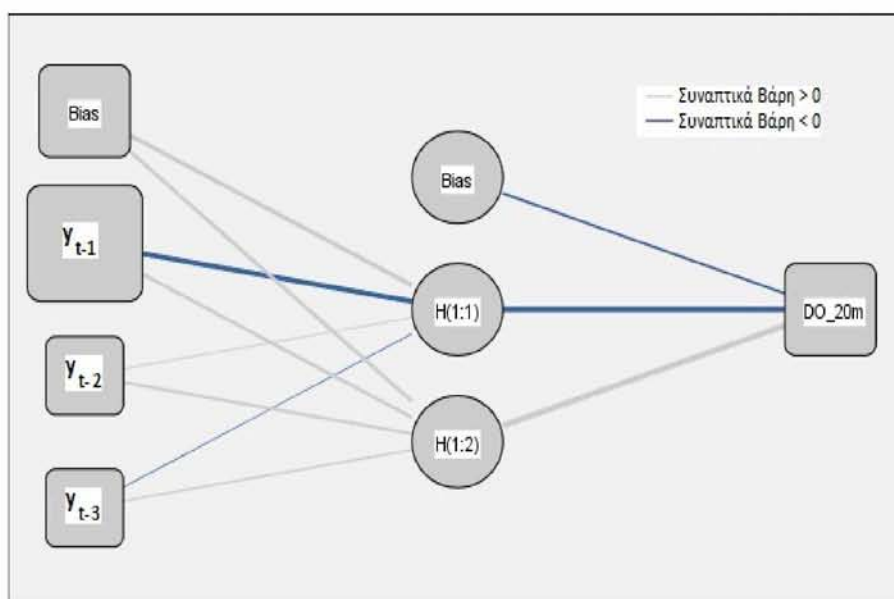


Συνάρτηση ενεργοποίησης κρυφού επιπέδου: Σιγμοειδής
Συνάρτηση ενεργοποίησης επιπέδου εξόδου: Ταυτοτική

Σχήμα 3.30: Διάγραμμα νευρικού δικτύου του μοντέλου ANN-1.

Πίνακας 3.19: Εκτίμηση παραμέτρων του μοντέλου ANN-20.

ANN-20		Εκτιμώμενα Βάρη		
		Κρυφό Επίπεδο		Επίπεδο Εξόδου
		H(1:1)	H(1:2)	DO 20m
Παράμετροι εισόδου (Input Layer) (Input Layer)	(Bias)	0,450	0,418	
	y_{t-1}	-0,710	0,364	
	y_{t-2}	0,104	0,284	
	y_{t-3}	-0,099	0,107	
Κρυφό επίπεδο (Hidden Layer)	(Bias)			-0,233
	H(1:1)			-2,811
	H(1:2)			3,239

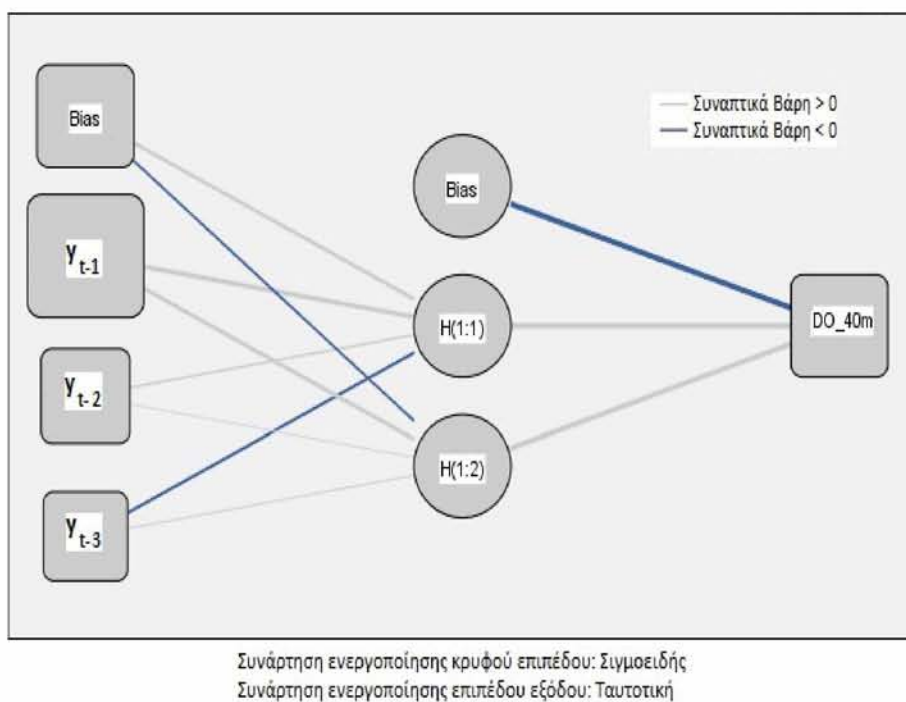


Συνάρτηση ενεργοποίησης κρυφού επιπέδου: Σιγμοειδής
Συνάρτηση ενεργοποίησης επιπέδου εξόδου: Ταυτοτική

Σχήμα 3.31: Διάγραμμα νευρωνικού δικτύου του μοντέλου ANN-20.

Πίνακας 3.20: Εκτίμηση παραμέτρων του μοντέλου ANN-40.

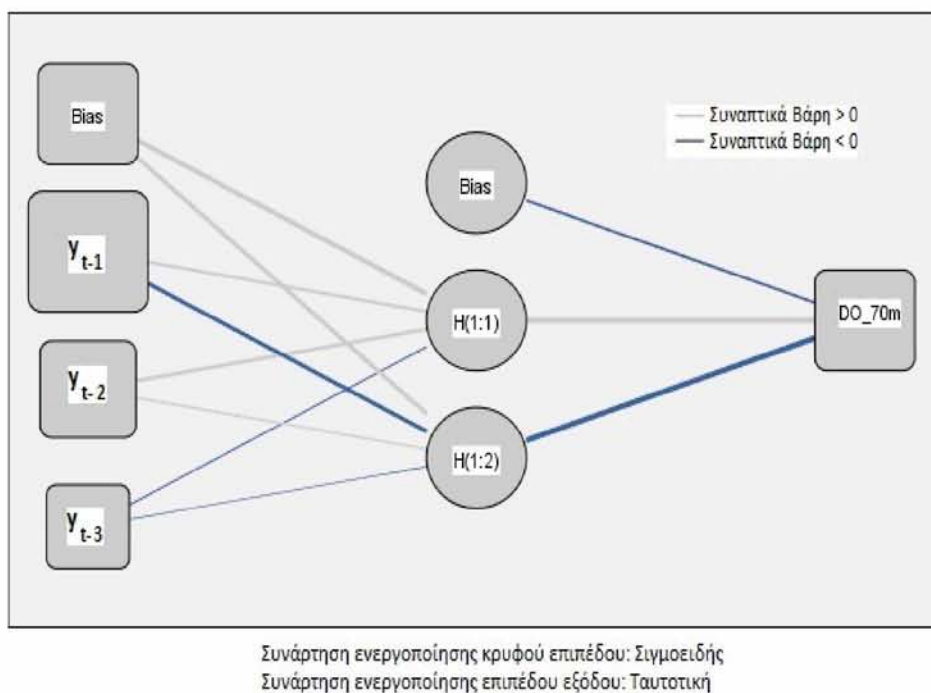
ANN-40		Εκτιμώμενα Βάρη		
		Κρυφό Επίπεδο		Επίπεδο Εξόδου
		H(1:1)	H(1:2)	DO 40m
Παράμετροι εισόδου (Input Layer)	(Bias)	0,377	-0,339	
	y_{t-1}	0,910	0,474	
	y_{t-2}	0,219	0,160	
	y_{t-3}	-0,340	0,164	
Κρυφό επίπεδο (Hidden Layer)	(Bias)			-2,965
	H(1:1)			3,538
	H(1:2)			2,092



Σχήμα 3.32: Διάγραμμα νευρωνικού δικτύου του μοντέλου ANN-40.

Πίνακας 3.21: Εκτίμηση παραμέτρων του μοντέλου ANN-70.

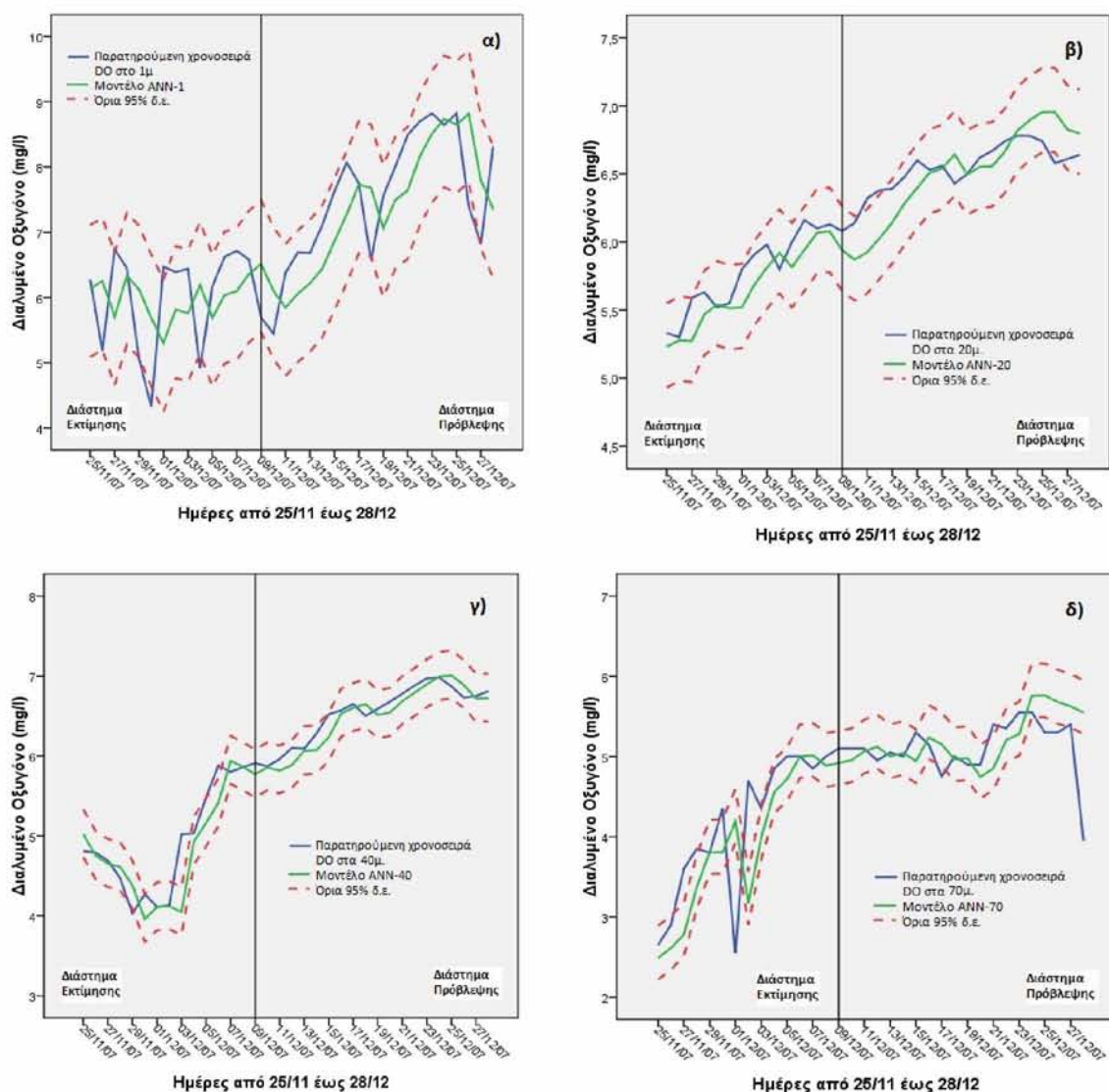
ANN-70		Εκτιμώμενα Βάρη		
		Κρυφό Επίπεδο		Επίπεδο Εξόδου
		H(1:1)	H(1:2)	DO 70m
Παράμετροι εισόδου (Input Layer)	(Bias)	1,247	0,913	
	y_{t-1}	0,326	-0,871	
	y_{t-2}	0,623	0,195	
	y_{t-3}	-0,181	-0,098	
Κρυφό επίπεδο (Hidden Layer)	(Bias)			-0,293
	H(1:1)			3,588
	H(1:2)			-3,488



Σχήμα 3.33: Διάγραμμα νευρωνικού δικτύου του μοντέλου ANN-70.

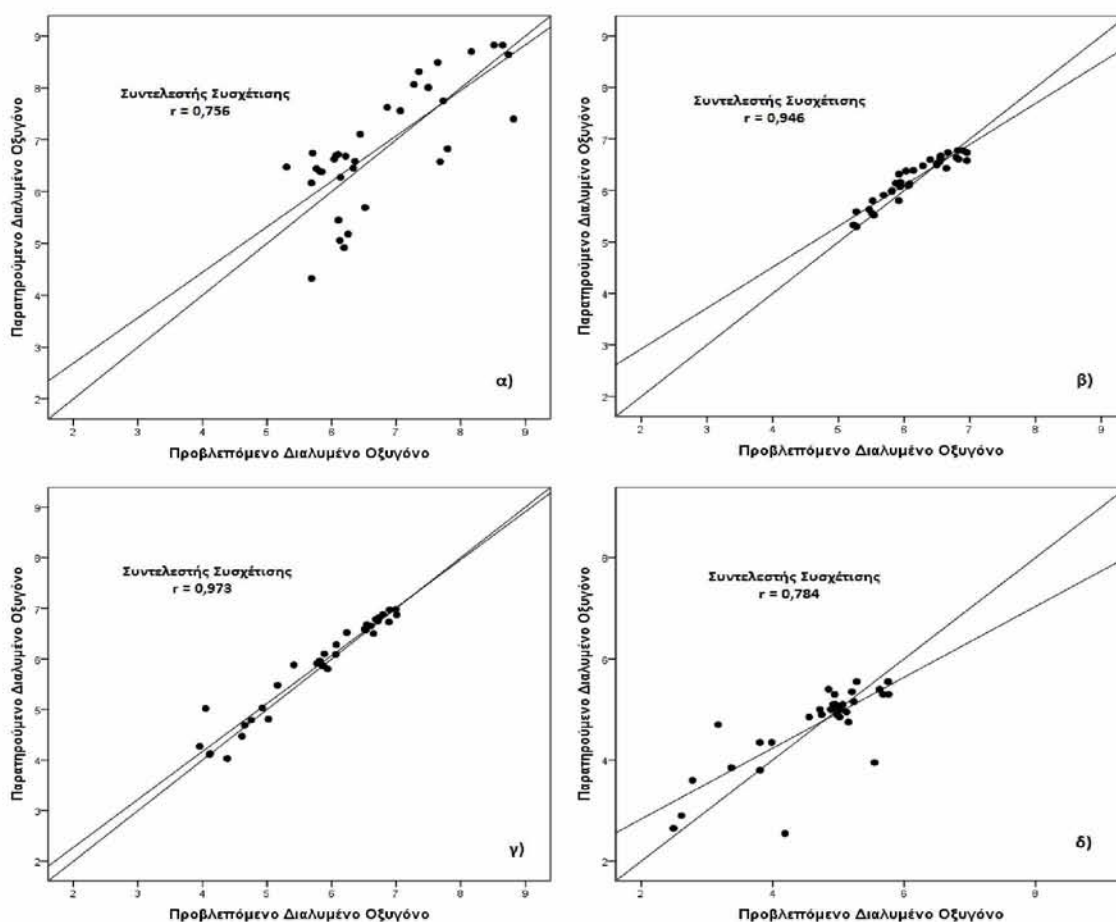
Στο σχήμα 3.34 δίνονται η παρατηρούμενη χρονοσειρά, οι εκτιμήσεις του νευρωνικού δικτύου και τα όρια του 95% διαστήματος εμπιστοσύνης για τα τέσσερα διαφορετικά βάθη και για τα ίδια χρονικά διαστήματα εκτίμησης και πρόβλεψης (25/11 έως 8/12 και 9 έως 28/12/2007).

Τα μοντέλα νευρωνικών δικτύων όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε στο σχήμα 3.34, κάνουν πολύ καλή πρόβλεψη για βάθος 40m, αρκετά ικανοποιητική για βάθος 20m και λιγότερο ικανοποιητική για βάθη 1 και 70m. Το διάστημα εμπιστοσύνης του μοντέλου του 1m (ANN-1) έχει το μεγαλύτερο εύρος (σχ. 3.34.α) γεγονός που οφείλεται στην ύπαρξη μεγάλων σφαλμάτων προσαρμογής, με αποτέλεσμα μικρός αριθμός μετρήσεων διαλυμένου οξυγόνου να βρίσκονται εκτός των ορίων του διαστήματος.



Σχήμα 3.34: Προσαρμογή TF μοντέλου και όρια 95% δ.ε. για βάθος (α) 1m (β) 20m (γ) 40m και (δ) 70m.

Οι τιμές των συντελεστών συσχέτισης μεταξύ των παρατηρούμενων και των προβλεπόμενων τιμών από τα ANN μοντέλα, καθώς και τα διαγράμματα διασποράς (scatter plots) των τεσσάρων χρονοσειρών του διαλυμένου οξυγόνου στα τέσσερα βάθη, παρουσιάζονται στο σχήμα 3.35. Οι τιμές των συντελεστών συσχέτισης είναι 0,756 για το 1m βάθος, 0,946 για τα 20m, 0,973 για τα 40m και 0,784 για τα 70m. τιμές οι οποίες κρίνονται ιδιαίτερα υψηλές σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές των ARIMA και TF μοντέλων.



Σχήμα 3.35: Διαγράμματα διασποράς παρατηρούμενων και προβλεπόμενων τιμών από τα ANN μοντέλα για βάθος (α) 1m (β) 20m (γ) 40m (δ) 70m.

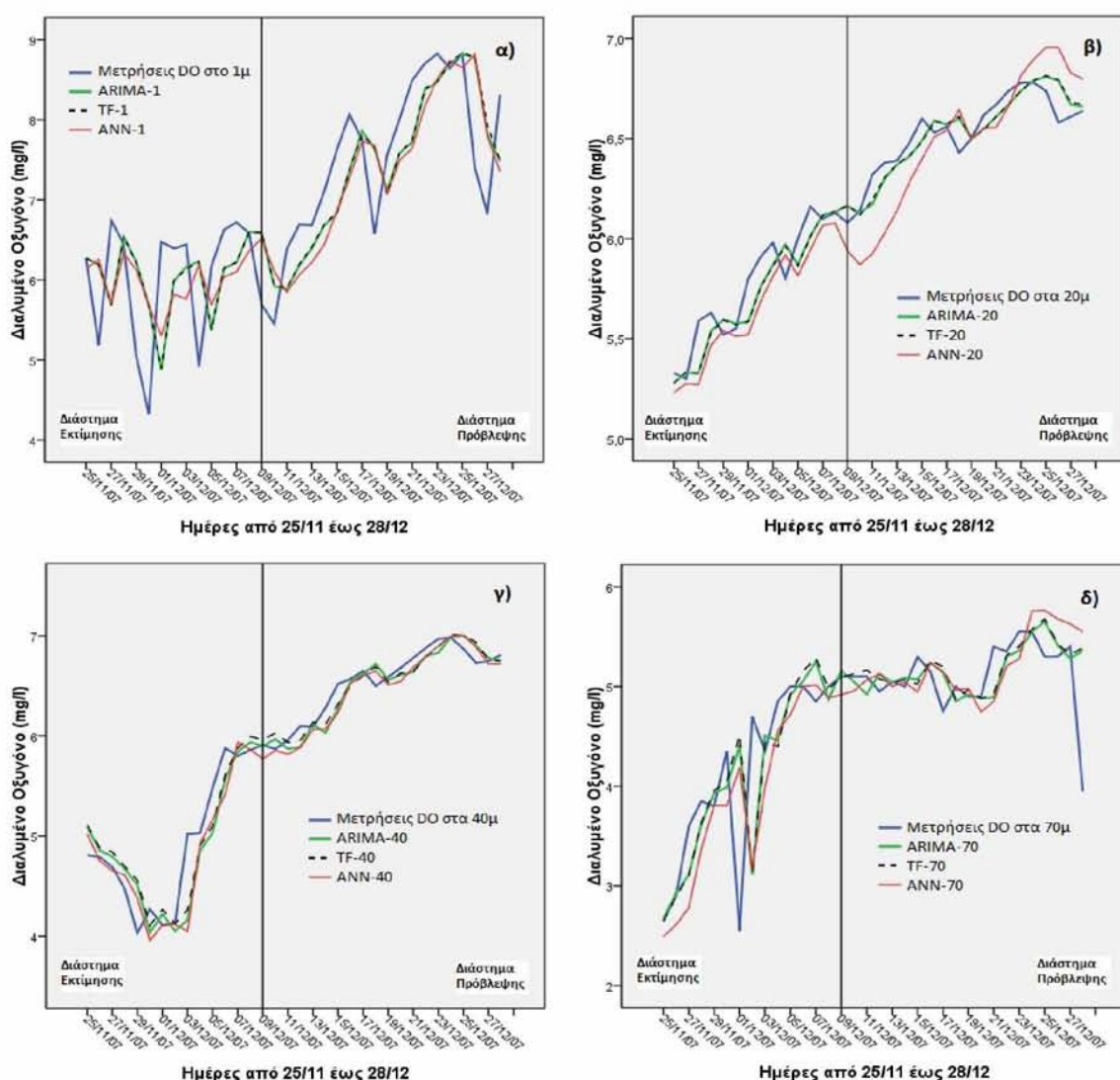
Τα στατιστικά μέτρα για την κατάταξη των νευρωνικών δικτύων, ως προς την ικανότητα πρόβλεψης καταγράφονται στον πίνακα 3.22. Σύμφωνα με τις τιμές των τριών πρώτων στατιστικών (MSE, RMSE και MAPE), την καλύτερη πρόβλεψη κάνει το ANN-40 μοντέλο και ακολουθούν με τη σειρά ANN-20, ANN-70 και ANN-1. Ως προς το τελευταίο μέτρο (NSC) η διάταξη των μοντέλων είναι ANN-40, ANN-1, ANN-20 και ANN-70.

Πίνακας 3.22: Στατιστικά μέτρα αξιολόγησης προβλεπτικής ικανότητας των ANN μοντέλων, στα τέσσερα βάθη.

ANN	MSE	RMSE	MAPE	NSC
1m βάθος	0,5233	0,7233	8,934	0,544
20m βάθος	0,0434	0,2084	2,672	-0,130
40m βάθος	0,0170	0,1305	1,678	0,915
70m βάθος	0,1913	0,4375	5,860	-0,628

δ) Σύγκριση της προβλεπτικής ικανότητας των μοντέλων για $m = 1$

Όπως αναφέρθηκε στην αρχή της παραγράφου, σκοπός της προσαρμογής των στατιστικών μοντέλων στις μετρήσεις του διαλυμένου οξυγόνου στα τέσσερα βάθη, είναι η σύγκριση της ικανότητας πρόβλεψης των μοντέλων. Για το σκοπό αυτό συγκρίθηκαν τα στατιστικά μέτρα, τα οποία παρουσιάζονται στον πίνακα 3.23. Επίσης, η εικόνα της παραπάνω σύγκρισης δίνεται στο σχήμα 3.36, το οποίο περιέχει τα γραφήματα της παρατηρούμενης και τις εκτιμώμενης από κάθε μοντέλο χρονοσειράς.



Σχήμα 3.36: Τιμές διαλυμένου οξυγόνου παρατηρούμενης και εκτιμώμενης χρονοσειράς, από τα μοντέλα ARIMA, TF και ANN, για βάθος (α) 1m (β) 20m (γ) 40m και (δ) 70m.

Πίνακας 3.23: Στατιστικά μέτρα για σύγκριση παρατηρούμενων και προβλεπόμενων τιμών, με χρήση ARIMA, TF και ANN μοντέλων και $m = 1$

Βάθος	Στατιστικά μέτρα	ARIMA	TF	ANN
1 μέτρο	MSE	0,4425	0,4527	0,5233
	RMSE	0,6652	0,6728	0,7233
	MAPE	7,9472	7,9748	8,934
	NSC	0,614	0,605	0,544
20 μέτρα	MSE	0,0077	0,0079	0,0434
	RMSE	0,0877	0,0891	0,2084
	MAPE	1,0560	1,0750	2,672
	NSC	0,799	0,793	-0,130
40 μέτρα	MSE	0,0167	0,0131	0,0170
	RMSE	0,1293	0,1144	0,1305
	MAPE	1,5882	1,4791	1,678
	NSC	0,916	0,934	0,915
70 μέτρα	MSE	0,1376	0,1413	0,1913
	RMSE	0,3709	0,3759	0,4375
	MAPE	4,414	4,3697	5,860
	NSC	-0,170	-0,202	-0,628

Βάσει των τιμών του πίνακα 3.23 εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- Για βάθος **1 μέτρο**. Το ARIMA μοντέλο δίνει καλύτερες τιμές όλων των στατιστικών με ελάχιστη διαφορά (δεύτερου δεκαδικού) να ακολουθεί το TF.
- Για βάθος **20 μέτρα**. Η εικόνα είναι παρόμοια με αυτή του 1m, με το ANN να ακολουθεί σε μικρότερη απόσταση τα άλλα δύο μοντέλα.
- Για βάθος **40 μέτρα**. Όλα τα στατιστικά μέτρα συνηγορούν στο ότι το TF μοντέλο κάνει την καλύτερη πρόβλεψη, με μικρή διαφορά ακολουθεί το ARIMA και με επίσης πολύ μικρή διαφορά το ANN μοντέλο.
- Για βάθος **70 μέτρα**. Σύμφωνα με τα στατιστικά MSE, RMSE και NSC καλύτερη προβλεπτική ικανότητα έχει το ARIMA ακολουθεί με μικρή διαφορά το TF και μεγαλύτερη το ANN. Ως προς το στατιστικό MAPE, καλύτερο μοντέλο είναι το TF ακολουθούμενο από το ARIMA και ANN.

Από την παραπάνω ανάλυση των στατιστικών μέτρων, γίνεται φανερό ότι στις περισσότερες περιπτώσεις τα ARIMA μοντέλα κάνουν καλύτερη πρόβλεψη από τα υπό-

λοιπα. Ακολουθούν τα TF με ίδιες περίπου τιμές στατιστικών, ενώ τα ANN έχουν μικρότερη προβλεπτική ικανότητα.

ε) Σύγκριση της προβλεπτικής ικανότητας των μοντέλων για $m = 2, 3, 5$ και 10

Βάσει της παραπάνω ανάλυσης τα ARIMA και TF μοντέλα για πρόβλεψη ένα βήμα μπροστά δείχνουν να είναι περίπου ισοδύναμα. Το γεγονός αυτό απετέλεσε το έναυσμα για περαιτέρω διερεύνηση της προβλεπτικής ικανότητας των μοντέλων για περισσότερα του ενός βήματα. Για να ελεγχθεί η βραχυπρόθεσμη και μεσοπρόθεσμη αξιοπιστία των προβλέψεων, έγινε σύγκριση των μοντέλων ως προς την ικανότητά τους για πρόβλεψη 2, 3, 5 και 10 βήματα μπροστά ($m = 2, 3, 5, 10$) για όλα τα βάθη.

Για **1 μέτρο βάθος** τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 3.23α όπου με $\hat{y}_t(m)$ συμβολίζεται η πρόβλεψη τη χρονική στιγμή $t+m$ μιας χρονοσειράς y_t στην οποία είναι γνωστές οι παρατηρήσεις μέχρι το χρόνο t . Ομοίως δίνονται τα αποτελέσματα για βάθη 20, 40 και 70 μέτρα, στους πίνακες 3.23β, 3.23γ και 3.23δ αντίστοιχα.

Πίνακας 3.23α: Στατιστικά μέτρα για σύγκριση παρατηρούμενων και προβλεπόμενων τιμών, με χρήση ARIMA, TF και ANN μοντέλων και $m = 1, 2, 3, 5$ και 10 (βάθος 1m)

<i>Π.Σ. Θησαυρός – Παράμετρος DO – Βάθος 1m</i>					
$\hat{y}_t(m)$	Μοντέλα	MSE	RMSE	MAPE	NSC
$m = 1$	ARIMA	0,442	0,665	7,947	0,614
	TF	0,452	0,672	7,974	0,605
	ANN	0,523	0,723	8,934	0,544
$m = 2$	ARIMA	0,852	0,923	11,158	0,256
	TF	0,816	0,903	10,589	0,196
	ANN	1,010	1,005	12,002	0,599
$m = 3$	ARIMA	0,960	0,979	11,713	0,163
	TF	0,938	0,968	11,562	0,532
	ANN	1,182	1,087	12,182	0,545
$m = 5$	ARIMA	1,020	1,010	10,440	0,110
	TF	0,965	0,982	10,055	0,519
	ANN	1,201	1,095	12,660	0,428
$m = 10$	ARIMA	1,659	1,288	15,161	0,755
	TF	1,256	1,120	12,916	0,814
	ANN	1,965	1,401	16,055	0,519

Οι τιμές που καταγράφονται στον πίνακα 3.23α οδηγούν στα εξής συμπεράσματα:

- Για $m = 1$ το ARIMA μοντέλο προηγείται, όπως έχει ήδη αναφερθεί.
- Για $m = 2$ και $m = 3$ το TF μοντέλο δίνει λίγο καλύτερες τιμές στατιστικών από το ARIMA και καλύτερες από το ANN, εκτός από την περίπτωση του στατιστικού NSC βάσει του οποίου προηγείται το ANN μοντέλο.
- Για $m = 5$ και $m = 10$ το TF μοντέλο ξεκάθαρα προηγείται ως προς τα δύο άλλα σε όλα τα στατιστικά μέτρα.

Πίνακας 3.23β: Στατιστικά μέτρα για σύγκριση παρατηρούμενων και προβλεπόμενων τιμών, με χρήση ARIMA, TF και ANN μοντέλων και $m = 1, 2, 3, 5$ και 10 (βάθος 20m)

<i>Π.Σ. Θησαυρός – Παράμετρος DO – Βάθος 20m</i>					
$\hat{y}_t(m)$	Μοντέλα	MSE	RMSE	MAPE	NSC
$m = 1$	ARIMA	0,0077	0,0877	1,0552	0,7992
	TF	0,0079	0,0891	1,0752	0,7931
	ANN	0,0434	0,2084	2,6721	-0,1303
$m = 2$	ARIMA	0,0154	0,1241	1,6505	0,9913
	TF	0,0163	0,1278	1,6945	0,5751
	ANN	0,0570	0,2387	3,0021	0,0191
$m = 3$	ARIMA	0,0215	0,1466	1,9787	0,9881
	TF	0,0228	0,1511	2,0194	0,4061
	ANN	0,0882	0,2969	3,2124	0,0072
$m = 5$	ARIMA	0,0244	0,1562	2,0176	0,3647
	TF	0,0236	0,1537	1,9933	0,9869
	ANN	0,1124	0,3352	3,6942	0,0015
$m = 10$	ARIMA	0,0382	0,1954	2,6821	0,9821
	TF	0,0359	0,1895	2,5978	0,9831
	ANN	0,4758	0,6897	4,0451	-0,0314

Για τα **20m βάθος** σύμφωνα με τον πίνακα 3.23β:

- Για $m = 1, 2$ και 3 τα ARIMA δίνουν με ελάχιστη διαφορά καλύτερες προβλέψεις από τα TF μοντέλα.
- Για $m = 5$ και 10 ισχύει αντίστροφη εικόνα, με τα TF να προηγούνται.
- Σε όλες τις περιπτώσεις τα ANN μοντέλα κατατάσσονται τελευταία.

Πίνακας 3.23γ: Στατιστικά μέτρα για σύγκριση παρατηρούμενων και προβλεπόμενων τιμών, με χρήση ARIMA, TF και ANN μοντέλων και $m = 1,2,3,5$ και 10 (βάθος 40m)

<i>Π.Σ. Θησαυρός – Παράμετρος DO – Βάθος 40m</i>					
$\hat{y}_t(m)$	Μοντέλα	MSE	RMSE	MAPE	NSC
$m = 1$	ARIMA	0,0167	0,1293	1,5882	0,9167
	TF	0,0131	0,1144	1,4791	0,9341
	ANN	0,0170	0,1305	1,6781	0,9154
$m = 2$	ARIMA	0,0545	0,2334	2, 5415	0,9245
	TF	0,0301	0,1732	2,0954	0, 7155
	ANN	0,0510	0,2258	2,7102	0,6112
$m = 3$	ARIMA	0,0741	0,2722	3,6787	0,9611
	TF	0,0515	0,2269	3,0231	0,5930
	ANN	0,0893	0,2988	3,7487	0,4327
$m = 5$	ARIMA	0,1415	0,3762	4,5596	0,9258
	TF	0,0764	0,2764	3,4948	0,3961
	ANN	0,1705	0,4129	4,8724	0,4071
$m = 10$	ARIMA	0,7950	0,8916	11,4999	0,6404
	TF	0,3847	0,6202	4,0983	0,6831
	ANN	0,8578	0,9261	12,0368	0,0413

Για τα **40m βάθος** σύμφωνα με τον πίνακα 3.23γ:

- Σε όλες τις περιπτώσεις ($m = 1, 2, 3, 5$ και 10) τα TF μοντέλα παρουσιάζουν καλύτερα στατιστικά.
- Η διαφορά των στατιστικών για βήματα 1, 2 και 3 μεταξύ ARIMA και TF μοντέλων είναι μικρή, ενώ από τα 5 βήματα και πάνω ($m \geq 5$) γίνεται μεγαλύτερη.

Πίνακας 3.23δ: Στατιστικά μέτρα για σύγκριση παρατηρούμενων και προβλεπόμενων τιμών, με χρήση ARIMA, TF και ANN μοντέλων και $m = 1,2,3,5$ και 10 (βάθος 70m)

<i>Π.Σ. Θησαυρός – Παράμετρος DO – Βάθος 70m</i>					
$\hat{y}_t(m)$	Μοντέλα	MSE	RMSE	MAPE	NSC
$m = 1$	ARIMA	0,1376	0,3709	4,4140	-0,170
	TF	0,1413	0,3759	4,3697	-0,202
	ANN	0,1913	0,4375	5,860	-0,628
$m = 2$	ARIMA	0,1470	0,3834	5,1874	-0,1809
	TF	0,1725	0,4153	5,4653	0,0325
	ANN	0,2130	0,4615	5,9012	-0,1109
$m = 3$	ARIMA	0,1760	0,4195	6,2807	-0,1771
	TF	0,2010	0,4484	6,7227	0,0298
	ANN	0,2278	0,4772	7,0136	-0,0208
$m = 5$	ARIMA	0,3294	0,5739	8,4452	-0,0572
	TF	0,3128	0,5593	8,3757	0,0644
	ANN	0,4758	0,6897	9,0724	-0,0361
$m = 10$	ARIMA	0,6360	0,7974	12,0752	-0,1231
	TF	0,5932	0,7701	11,7581	0,0301
	ANN	0,8362	0,9144	14,3674	-0,0314

Για τα **70m βάθος** σύμφωνα με τον πίνακα 3.23δ:

- Για πρόβλεψη 1,2 και 3 βήματα μπροστά ($m = 1, 2$ και 3) προηγούνται τα ARIMA μοντέλα.
- Για πρόβλεψη 5 και 10 βήματα ($m = 5$ και 10) προηγούνται τα TF μοντέλα.
- Η διαφορά των στατιστικών για βήματα 1, 2 και 3 μεταξύ ARIMA και TF μοντέλων είναι μικρή, ενώ από τα 5 βήματα και πάνω ($m \geq 5$) γίνεται μεγαλύτερη.

Από την ανάλυση που προηγήθηκε, είναι εμφανές ότι όσο μεγαλώνει το βήμα τόσο οι τιμές των στατιστικών χειροτερεύουν, ουσιαστικά οι εκτιμητές των προβλέψεων απέχουν περισσότερο από τις παρατηρούμενες τιμές.

Για βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη $m = 1, 2$ και 3 όπως διαπιστώθηκε από τα προηγούμενα άλλοτε προηγούνται τα ARIMA μοντέλα και άλλοτε τα TF μοντέλα με ελάχιστη διαφορά, σε όλες όμως τις περιπτώσεις για $m = 5$ και 10 προηγούνται τα TF μοντέλα. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι όσο μεγαλώνει η απόσταση μεταξύ αφετηρίας και πρόβλεψης (αυξάνεται το m), η συμμετοχή παρατηρούμενων τιμών της παραμέτρου στην εκτίμηση της πρόβλεψης ελαττώνεται. Ουσιαστικά δηλαδή για την εκτίμηση της τιμής του $\hat{y}_t(m)$ χρησιμοποιούνται εκτιμώμενες και όχι παρατηρούμενες τιμές της y_t , έτσι η συνεισφορά γνωστών τιμών της θερμοκρασίας νερού στα αντίστοιχα βάθη, γίνεται περισσότερο σημαντική και τα TF μοντέλα δίνουν καλύτερες προβλέψεις από τα ARIMA.

Συνοψίζοντας, θα μπορούσε να ειπωθεί ότι για πρόβλεψη μέχρι τέσσερις μέρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα ARIMA και τα TF μοντέλα, προτείνονται όμως τα ARIMA ως απλούστερα στην κατασκευή και χρήση τους. Για πέντε μέρες και πάνω προτείνονται τα TF μοντέλα (Sentas & Psilovikos 2010, 2012).

3.3.4.2 Κατασκευή μοντέλων και έλεγχος δυνατότητας κατάργησης αισθητήρων

Όπως έχει περιγραφεί στην παράγραφο 2.2.4.1, στον ταμιευτήρα του Θησαυρού υπάρχει ένας πλωτός περιφερειακός σταθμός, με τέσσερις αισθητήρες μέτρησης των παραμέτρων του νερού στα διαφορετικά βάθη. Στα χρόνια λειτουργίας του Τ.Σ. έχουν παρατηρηθεί διαστήματα βλάβης των αισθητήρων κυρίως στα βαθύτερα στρώματα με αποτέλεσμα τη δημιουργία ελλειπουσών παρατηρήσεων στη βάση δεδομένων. Η επισκευή και επαναλειτουργία του συστήματος αποδείχθηκε αρκετά δαπανηρή και χρονοβόρα, ενώ τα στοιχεία που χάθηκαν, συμπληρώνονται με μεθόδους παρεμβολής.

Η σκέψη κατάργησης των αισθητήρων μέτρησης στα μεγαλύτερα βάθη και συγκεκριμένα στα 20, 40 και 70m, απετέλεσε κίνητρο για την αναζήτηση μοντέλων κατάλληλων για την αντιμετώπιση του συγκεκριμένου προβλήματος. Με στόχο την επιλογή μοντέλου αφενός αποδεκτού σύμφωνα με τα κριτήρια της ανάλυσης χρονικών σειρών, αφετέρου με την καθόλου ή ελάχιστη χρήση εκτιμώμενων μετρήσεων, προσαρμόστηκαν στα δεδομένα Transfer Function μοντέλα και Νευρωνικά δίκτυα.

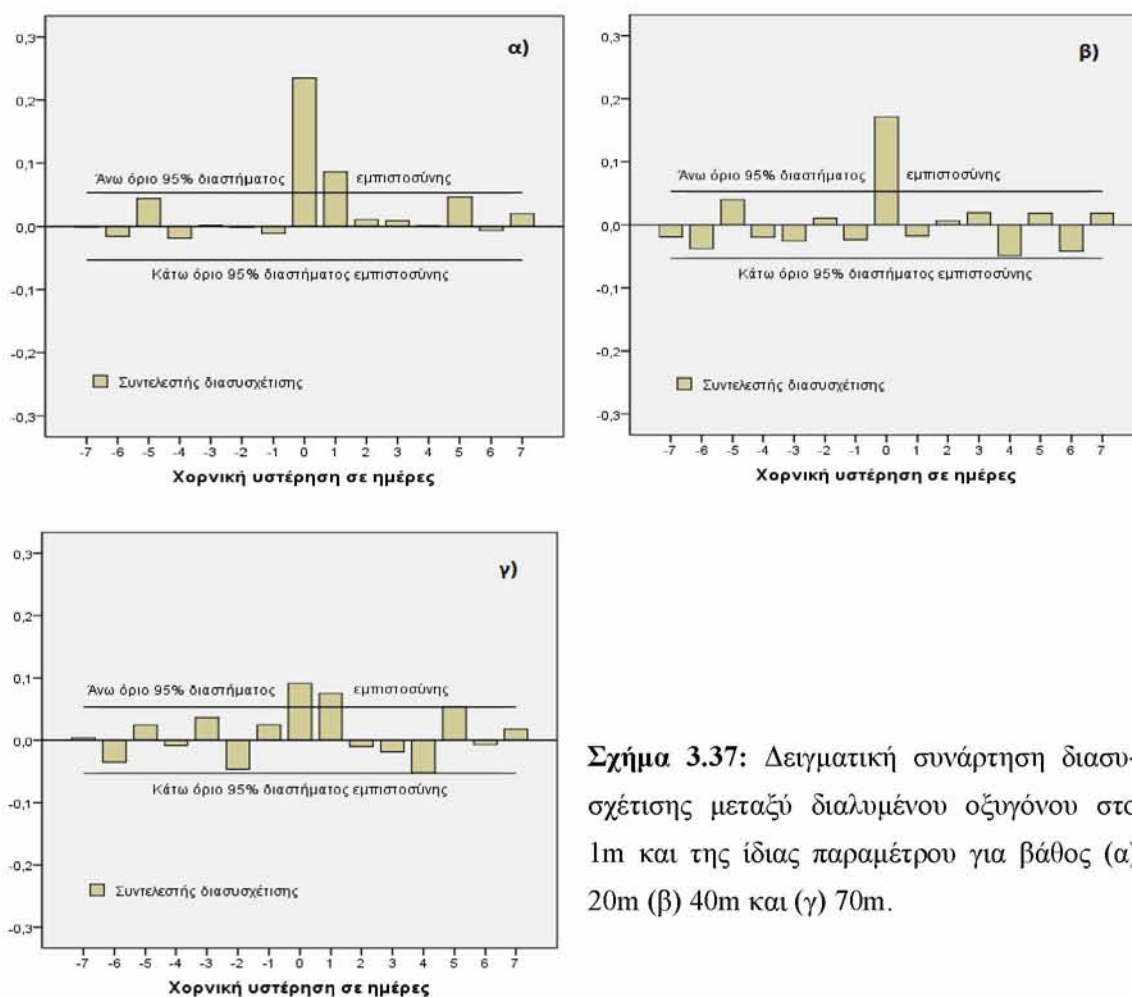
α) Transfer Function μοντέλα

Έγινε προσπάθεια κατασκευής TF μοντέλων τα οποία να έχουν ως μεταβλητή εισόδου τη χρονοσειρά του 1m και μεταβλητές εξόδου τις χρονοσειρές των 20, 40 και 70m.

Επειδή όμως οι χρονοσειρές των μετρήσεων του διαλυμένου οξυγόνου είναι μη στάσιμες (παρ. 2.4.8), ήταν αδύνατη η κατασκευή TF μοντέλων που να εκτιμούν την τιμή του DO τη χρονική στιγμή t , δηλαδή την y_t μόνο από τις μετρήσεις του DO σε βάθος 1m την ίδια χρονική στιγμή t ή προηγούμενες $x_t, x_{t-1}, x_{t-2}, \dots$. Συνεπώς αναζητήθηκαν TF μοντέλα της μορφής $y_t = f(\hat{y}_{t-1}, x_t, x_{t-1}, \dots)$, δηλαδή μοντέλα στα οποία η μέτρηση y_t σε βάθος 20, 40 ή 70m τη χρονική στιγμή t , να εκφράζεται ως συνάρτηση της εκτιμώμενης μέτρησης στο ίδιο βάθος την προηγούμενη χρονική στιγμή \hat{y}_{t-1} και μετρήσεων του DO στο 1m τις χρονικές στιγμές $t, t-1, \dots$ (x_t, x_{t-1}, \dots).

Κατασκευάστηκαν τρία Transfer Function μοντέλα, τα TF-20, TF-40 και TF-70, ακολουθώντας τα βήματα της μεθόδου των Box και Jenkins (1976).

Καταρχήν, με τη μέθοδο της προλεύκανσης των χρονοσειρών (παρ. 2.4.13.1), έγινε ανάλυση συσχετίσεων και στο σχήμα 3.37 παρουσιάζονται οι συναρτήσεις διασυσχέτισης μεταξύ των σφαλμάτων προσαρμογής των ARIMA μοντέλων ανάμεσα στα 1 με 20m,



Σχήμα 3.37: Δειγματική συνάρτηση διασυσχέτισης μεταξύ διαλυμένου οξυγόνου στο 1m και της ίδιας παραμέτρου για βάθος (α) 20m (β) 40m και (γ) 70m.

1 με 40m και 1 με 70m. Στη συνέχεια από τη συνάρτηση διασυσχέτισης εκτιμήθηκαν οι παράμετροι b , r , και s , προσαρμόστηκαν διάφορα TF μοντέλα στις πρώτες διαφορές των χρονοσειρών των μετρήσεων στα αντίστοιχα βάθη και τέλος έγινε έλεγχος καταλληλότητας των μοντέλων.

Όπως διαπιστώνεται από το σχήμα 3.37 υπάρχουν σημαντικές διασυσχετίσεις, κυρίως μεταξύ των μετρήσεων των 20 και 40m με τις μετρήσεις σε βάθος 1m και λιγότερο σημαντικές διασυσχετίσεις μεταξύ 1 και 70m, παρατήρηση η οποία ενθαρρύνει την κατασκευή των TF μοντέλων.

Η αναλυτική έκφραση των τελικών μοντέλων είναι:

TF-20:

$$y_t = \hat{y}_{t-1} + 0,085x_t - 0,049x_{t-1} - 0,036x_{t-2} + (1 - 0,307B - 0,081B^2 + 0,059B^3 - 0,073B^7)e_t \quad (3.13)$$

TF-40:

$$y_t = \hat{y}_{t-1} + 0,053x_t - 0,053x_{t-1} + (1 - 0,109B + 0,151B^3 - 0,055B^4 + 0,092B^5)e_t \quad (3.14)$$

TF-70:

$$y_t = \hat{y}_{t-1} + 0,027x_{t-1} - 0,027x_{t-2} + (1 - 0,204B + 0,064B^2 + 0,140B^3 + 0,075B^4 + 0,087B^7 + 0,151B^{10})e_t \quad (3.15)$$

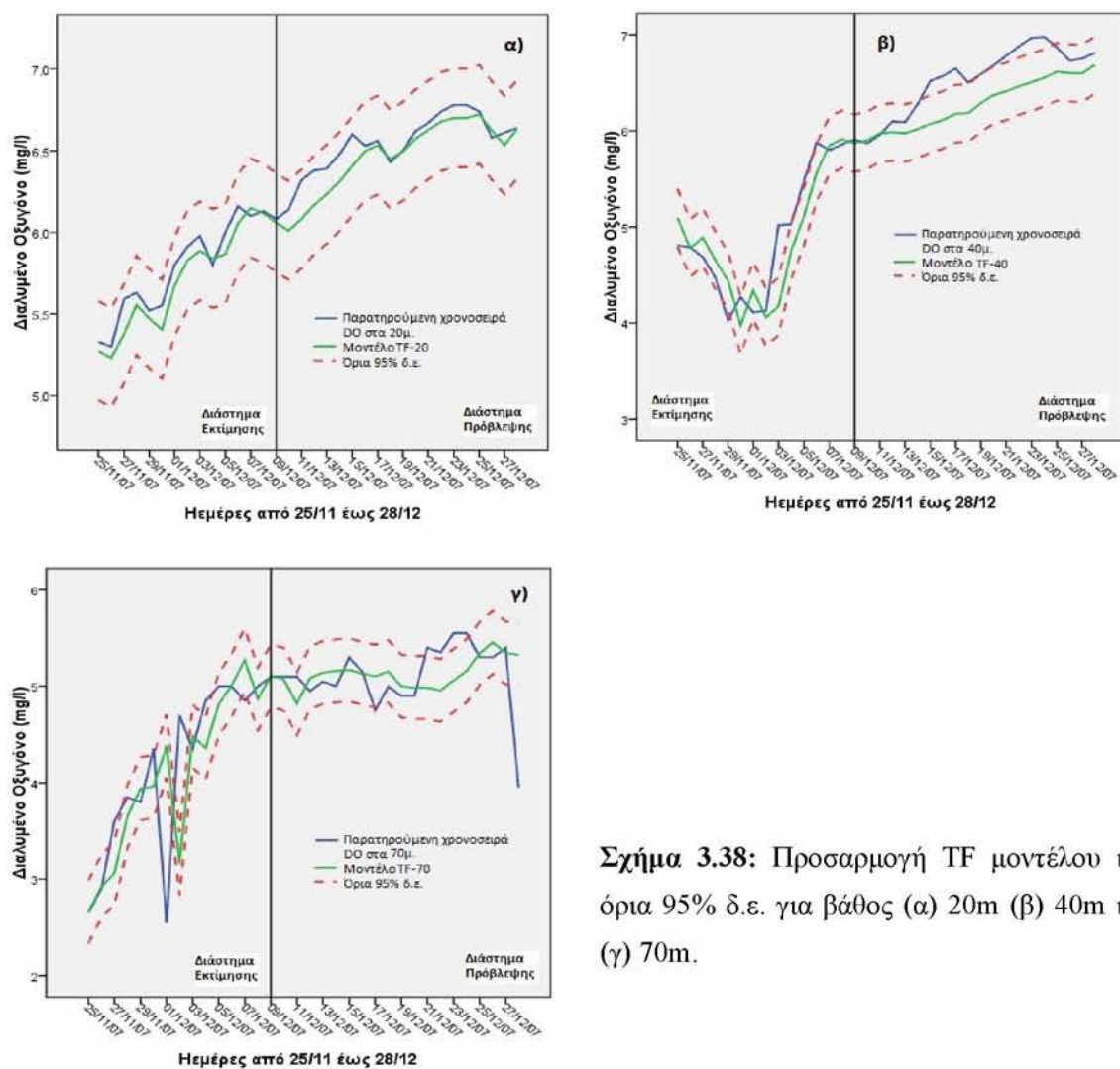
όπου \hat{y}_{t-1} η εκτίμηση της τιμής του διαλυμένου οξυγόνου στα 20, 40 και 70m της προηγούμενης ημέρας (χρονική στιγμή $t-1$) και x_t η μέτρηση του διαλυμένου οξυγόνου σε βάθος 1m την ίδια ημέρα (παρούσα χρονική στιγμή t).

Όλα τα παραπάνω μοντέλα είναι αποδεκτά βάσει του στατιστικού Ljung – Box – Pierce $Q(18)$. Σύμφωνα με τις σημαντικότητες του στατιστικού (πίν. 3.24), τα μοντέλα TF-20 και TF-40, είναι αποδεκτά σε στάθμη σημαντικότητας 1%, ενώ το TF-70 σε σ.σ. 5%.

Πίνακας 3.24: Τιμές της σημαντικότητας του στατιστικού Q , για τα TF μοντέλα.

	TF-20	TF-40	TF-70
Σημαντικότητα του στατιστικού $Q(18)$	0,023	0,015	0,131

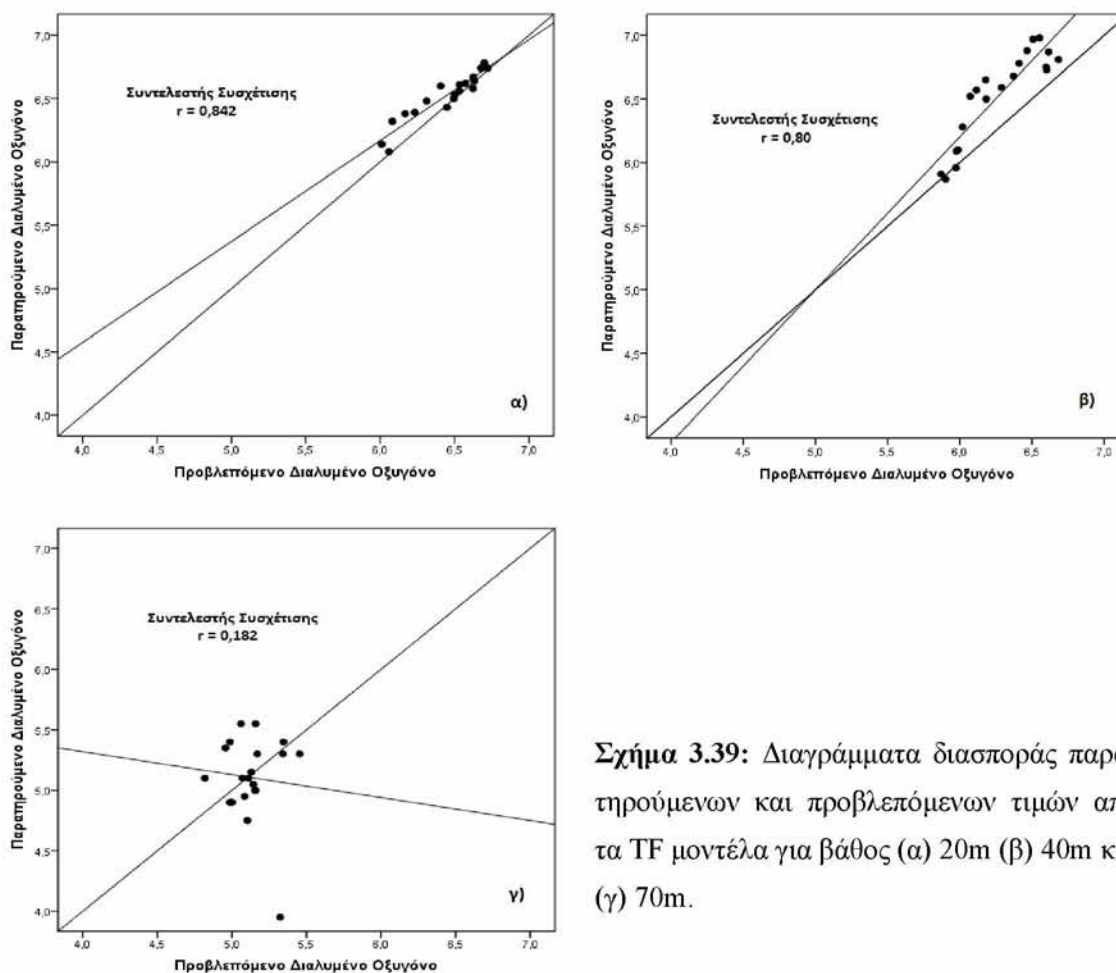
Τα γραφήματα της παρατηρούμενης χρονοσειράς, οι εκτιμήσεις των TF μοντέλων και τα όρια των 95% διαστημάτων εμπιστοσύνης για τα διαστήματα εκτίμησης και πρόβλεψης όπως ορίστηκαν στην παράγραφο 3.3.4, παρουσιάζονται στο σχήμα 3.38.



Σχήμα 3.38: Προσαρμογή TF μοντέλου και όρια 95% δ.ε. για βάθος (α) 20m (β) 40m και (γ) 70m.

Τα TF μοντέλα, όπως φαίνεται από το σχήμα 3.38, για βάθος 20m ακολουθούν αρκετά ικανοποιητικά τις μεταβολές της παρατηρούμενης χρονοσειράς και όλες οι προβλεπόμενες παρατηρήσεις παραμένουν εντός των ορίων του διαστήματος εμπιστοσύνης. Για τα βάθη των 40 και 70m η ακρίβεια των μοντέλων δεν είναι τόσο ικανοποιητική, με τα μοντέλα να ακολουθούν με μεγαλύτερες αποκλίσεις τις αυξομειώσεις της χρονοσειράς και με αρκετές τιμές να βρίσκονται εκτός των ορίων του διαστήματος εμπιστοσύνης.

Τα διαγράμματα διασποράς (scatter plots) μεταξύ των παρατηρούμενων και των προβλεπόμενων τιμών του διαστήματος πρόβλεψης και ο συντελεστής συσχέτισης για τα μοντέλα TF-20, TF-40 και TF-70, παρουσιάζονται στο σχήμα 3.39.



Σχήμα 3.39: Διαγράμματα διασποράς παρατηρούμενων και προβλεπόμενων τιμών από τα TF μοντέλα για βάθος (α) 20m (β) 40m και (γ) 70m.

Παρατηρούμε ότι οι συντελεστές συσχέτισης για τα δύο πρώτα μοντέλα (TF-20 και TF-40) έχουν υψηλή τιμή 0,842 και 0,800 αντίστοιχα, ενώ για το μοντέλο TF-70 η τιμή του σ.σ. είναι αρκετά χαμηλή ($r = 0,182$).

Σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση, καλύτερη προβλεπτική ικανότητα με διαφορά έχει το μοντέλο TF-20 και ακολουθούν με τη σειρά το TF-40 και το TF-70. Η διάταξη αυτή επιβεβαιώνεται και με τα στατιστικά μέτρα αξιολόγησης της ικανότητας πρόβλεψης των μοντέλων (πίν. 3.25).

Πίνακας 3.25: Στατιστικά μέτρα αξιολόγησης προβλεπτικής ικανότητας των TF μοντέλων, στα τρία βάθη.

TF	MSE	RMSE	MAPE	NSC
20m βάθος	0,0120	0,1097	1,2820	0,687
40m βάθος	0,0915	0,3024	3,8959	0,543
70m βάθος	0,1463	0,3825	5,0451	-0,244

β) Νευρωνικά δίκτυα

Για την επίτευξη της δυνατότητας κατάργησης των αισθητήρων μέτρησης στα 20, 40 και 70m, εκτός από τα TF μοντέλα, έγινε προσπάθεια κατασκευής μοντέλων νευρωνικών δικτύων. Αναζητήθηκαν μοντέλα ANN τα οποία να έχουν μεταβλητή εξόδου τη χρονοσειρά των 20, 40 και 70m και μεταβλητή εισόδου τη χρονοσειρά του 1m. Με βάση το ARIMA(3,1,5) μοντέλο (παρ. 3.3.4.1.α) το οποίο προσαρμόστηκε στη χρονοσειρά του 1m, κατασκευάστηκαν τα παρακάτω τρία ANN μοντέλα:

$$\text{ANN-20:} \quad y_t = f(x_{t-1}, x_{t-2}, x_{t-3}, x_{t-4}) \quad (3.16)$$

$$\text{ANN-40:} \quad y_t = f(x_{t-1}, x_{t-2}, x_{t-3}, x_{t-4}) \quad (3.17)$$

$$\text{ANN-70:} \quad y_t = f(x_{t-1}, x_{t-2}, x_{t-3}, x_{t-4}) \quad (3.18)$$

όπου y_t η χρονοσειρά εξόδου για κάθε μοντέλο, δηλαδή η χρονοσειρά των 20, 40 και 70m

x_t η χρονοσειρά του 1m

ANN- k το νευρωνικό δίκτυο που αντιστοιχεί σε βάθος k μέτρων

Το συνολικό δείγμα των δεδομένων (1440 παρατηρήσεις) όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις (παρ. 3.3.4), χωρίστηκε στα υποσύνολα εκτίμησης (1420 παρατηρήσεις) και πρόβλεψης (20 παρατηρήσεις). Το 70% του υποσυνόλου εκτίμησης ορίστηκε ως δείγμα εκπαίδευσης, ενώ το υπόλοιπο 30%, ως δείγμα πιστοποίησης ή ελέγχου του μοντέλου.

Η αρχιτεκτονική που ακολουθήθηκε για την κατασκευή των μοντέλων είναι αυτή που περιγράφεται στην παράγραφο 3.3.4.1.γ και τα μοντέλα τα οποία επιλέχθηκαν περιγράφονται παρακάτω.

Οι σημαντικότητες και οι κανονικοποιημένες σημαντικότητες των χρονοσειρών εισόδου, καταγράφονται στον πίνακα 3.26.

Πίνακας 3.26: Σημαντικότητες και κανονικοποιημένες σημαντικότητες, μεταβλητών εισόδου των νευρωνικών δικτύων, στον Π.Σ. Θησαυρό.

Π.Σ. Θησαυρό	ANN-20		ANN-40		ANN-70	
	Σημ.	Κανον. Σημ.	Σημ.	Κανον. Σημ.	Σημ.	Κανον. Σημ.
x_{t-1}	0,465	100%	0,484	100%	0,381	100%
x_{t-2}	0,112	24%	0,152	31,5%	0,209	54,9%
x_{t-3}	0,217	46,6%	0,125	25,9%	0,179	46,9%
x_{t-4}	0,207	44,6%	0,239	49,4%	0,231	60,7%

Παρατηρούμε ότι όλες οι μεταβλητές εισόδου συμμετέχουν σημαντικά στη διαμόρφωση του μοντέλου, η χρονοσειρά x_{t-1} έχει τη μεγαλύτερη συνεισφορά, ενώ η συνεισφορά της κάθε μιας από τις υπόλοιπες διαφοροποιείται ανάλογα με το μοντέλο.

Τα στατιστικά των τελικών μοντέλων δηλαδή το άθροισμα τετραγώνων και το σχετικό σφάλμα των υπολοίπων της προσαρμογής των μοντέλων, στα δείγματα εκπαίδευσης και ελέγχου, παρουσιάζονται στον πίνακα 3.27.

Πίνακας 3.27: Στατιστικά των νευρωνικών δικτύων, στα τρία βάθη.

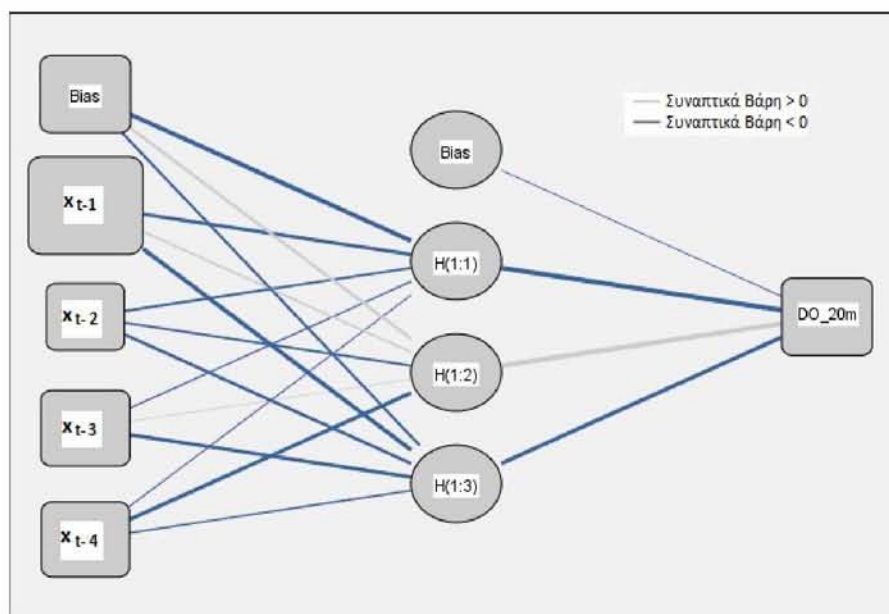
Π.Σ. Θησαυρός	Στατιστικά ANN	ANN-20	ANN-40	ANN-70
Δείγμα εκπαίδευσης	Άθροισμα τετραγώνων των σφαλμάτων (SSE)	354,573	380,141	355,340
	Σχετικό σφάλμα (RE)	0,691	0,751	0,694
Δείγμα ελέγχου	Άθροισμα τετραγώνων των σφαλμάτων (SSE)	122,263	118,990	119,013
	Σχετικό σφάλμα (RE)	0,643	0,718	0,691

Παρατηρείται ότι τα αθροίσματα τετραγώνων των σφαλμάτων έχουν αρκετά υψηλή τιμή, γεγονός το οποίο προϋποθέτει για την ύπαρξη μεγάλων υπολοίπων προσαρμογής των μοντέλων.

Στους πίνακες 3.28, 3.29 και 3.30 καταγράφονται οι εκτιμώμενες τιμές των παραμέτρων και οι μεροληψίες των μοντέλων ANN-20, ANN-40 και ANN-70 αντίστοιχα, ενώ στα σχήματα 3.40, 3.41 και 3.42, παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα.

Πίνακας 3.28: Εκτίμηση παραμέτρων του μοντέλου ANN-20.

ANN-20		Εκτιμώμενα Βάρη			
		Κρυφό Επίπεδο		Επίπεδο Εξόδου	
		H(1:1)	H(1:2)	H(1:3)	DO 1m
Παράμετροι εισόδου (Input Layer)	(Bias)	-1,535	0,533	-0,474	
	x_{t-1}	-0,851	0,334	-1,354	
	x_{t-2}	-0,439	-0,339	-0,753	
	x_{t-3}	-0,265	0,071	-0,930	
	x_{t-4}	-0,237	-0,978	-0,285	
Κρυφό επίπεδο (Hidden Layer)	(Bias)				-0,095
	H(1:1)				-1,846
	H(1:2)				1,897
	H(1:3)				-1,151

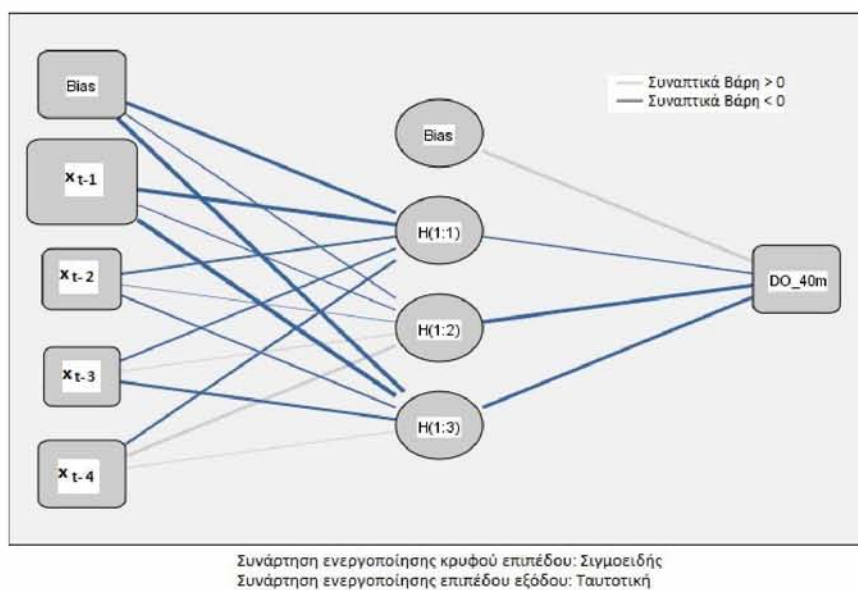


Συνάρτηση ενεργοποίησης κρυφού επιπέδου: Συγμοειδής
Συνάρτηση ενεργοποίησης επιπέδου εξόδου: Ταυτοτική

Σχήμα 3.40: Διάγραμμα νευρωνικού δικτύου του μοντέλου ANN-20.

Πίνακας 3.29: Εκτίμηση παραμέτρων του μοντέλου ANN-40.

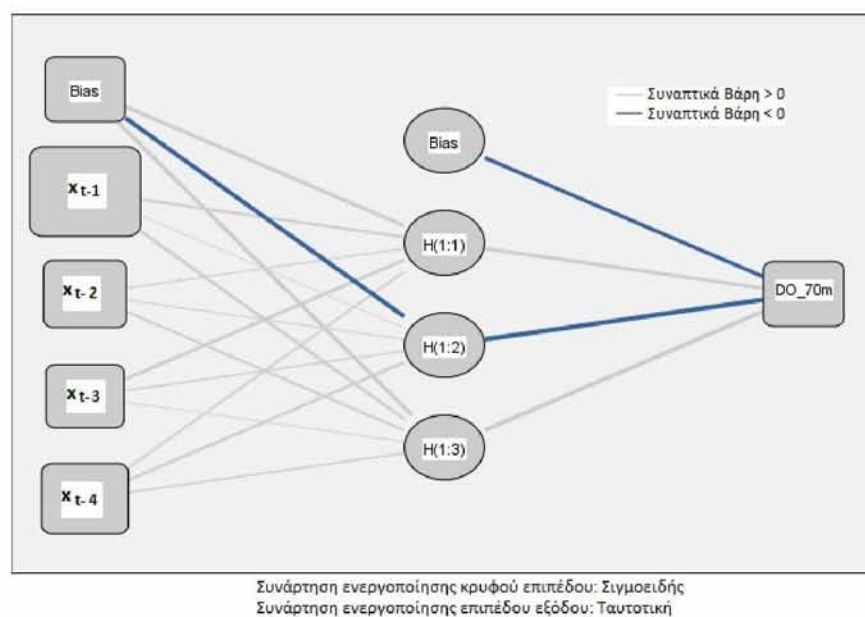
ANN-40		Εκτιμώμενα Βάρη			
		Κρυφό Επίπεδο		Επίπεδο Εξόδου	
		H(1:1)	H(1:2)	H(1:3)	DO 1m
Παράμετροι εισόδου (Input Layer)	(Bias)	-1,477	-0,551	-1,874	
	x_{t-1}	-1,636	-0,354	-2,242	
	x_{t-2}	-0,665	-0,024	-0,638	
	x_{t-3}	-0,665	0,259	-0,821	
	x_{t-4}	-0,736	0,838	0,153	
Κρυφό επίπεδο (Hidden Layer)	(Bias)				1,342
	H(1:1)				-0,622
	H(1:2)				-1,626
	H(1:3)				-1,421



Σχήμα 3.41: Διάγραμμα νευρωνικού δικτύου του μοντέλου ANN-40.

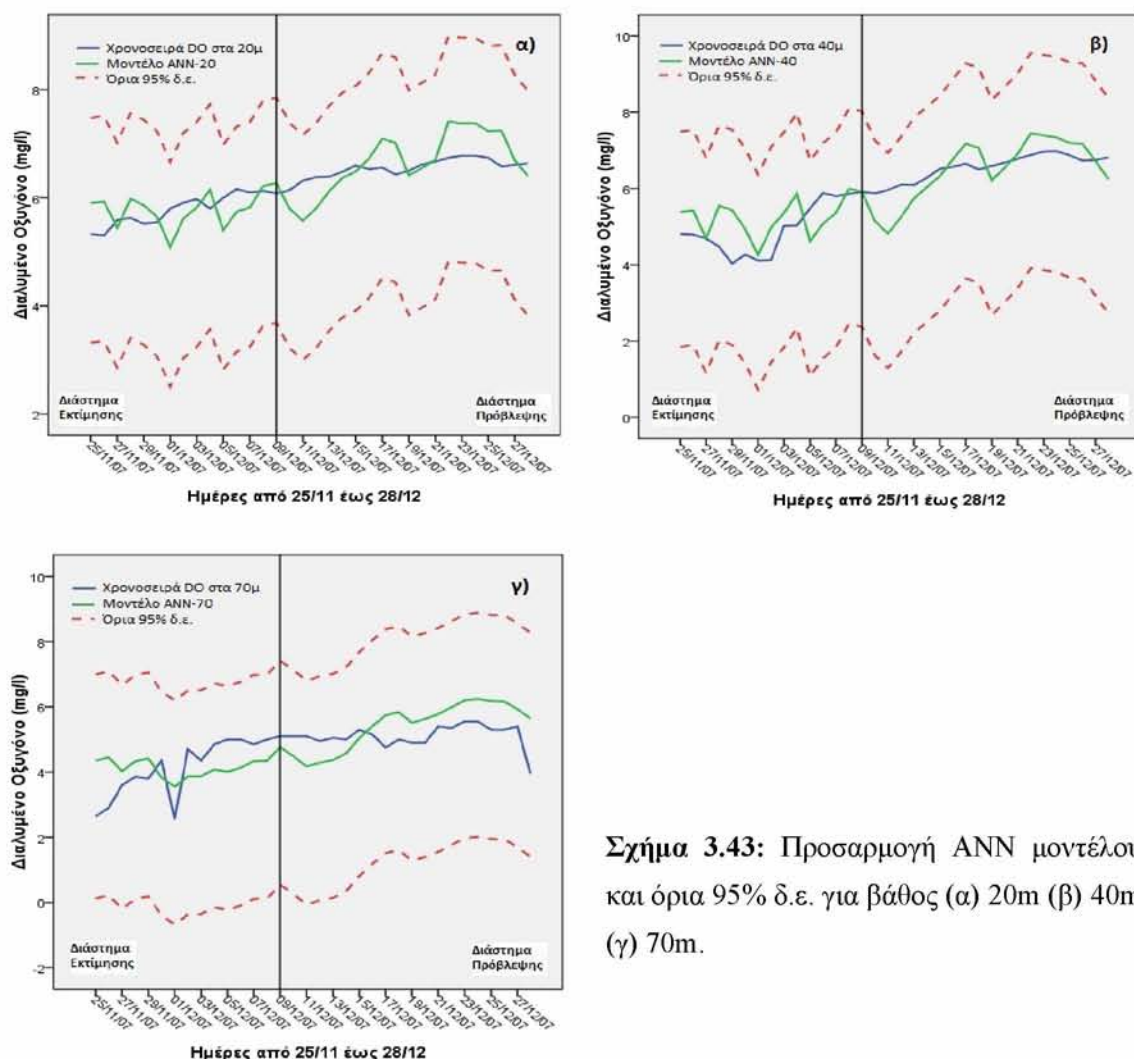
Πίνακας 3.30: Εκτίμηση παραμέτρων του μοντέλου ANN-70.

ANN-70		Εκτιμώμενα Βάρη			
		Κρυφό Επίπεδο		Επίπεδο Εξόδου	
		H(1:1)	H(1:2)	H(1:3)	DO 1m
Παράμετροι εισόδου (Input Layer)	(Bias)	1,246	-1,700	1,370	
	x_{t-1}	0,693	0,031	0,748	
	x_{t-2}	0,164	0,131	0,688	
	x_{t-3}	0,814	0,451	0,126	
	x_{t-4}	0,576	0,747	0,563	
Κρυφό επίπεδο (Hidden Layer)	(Bias)				-1,324
	H(1:1)				1,177
	H(1:2)				-1,997
	H(1:3)				1,423



Σχήμα 3.42: Διάγραμμα νευρωνικού δικτύου του μοντέλου ANN-70.

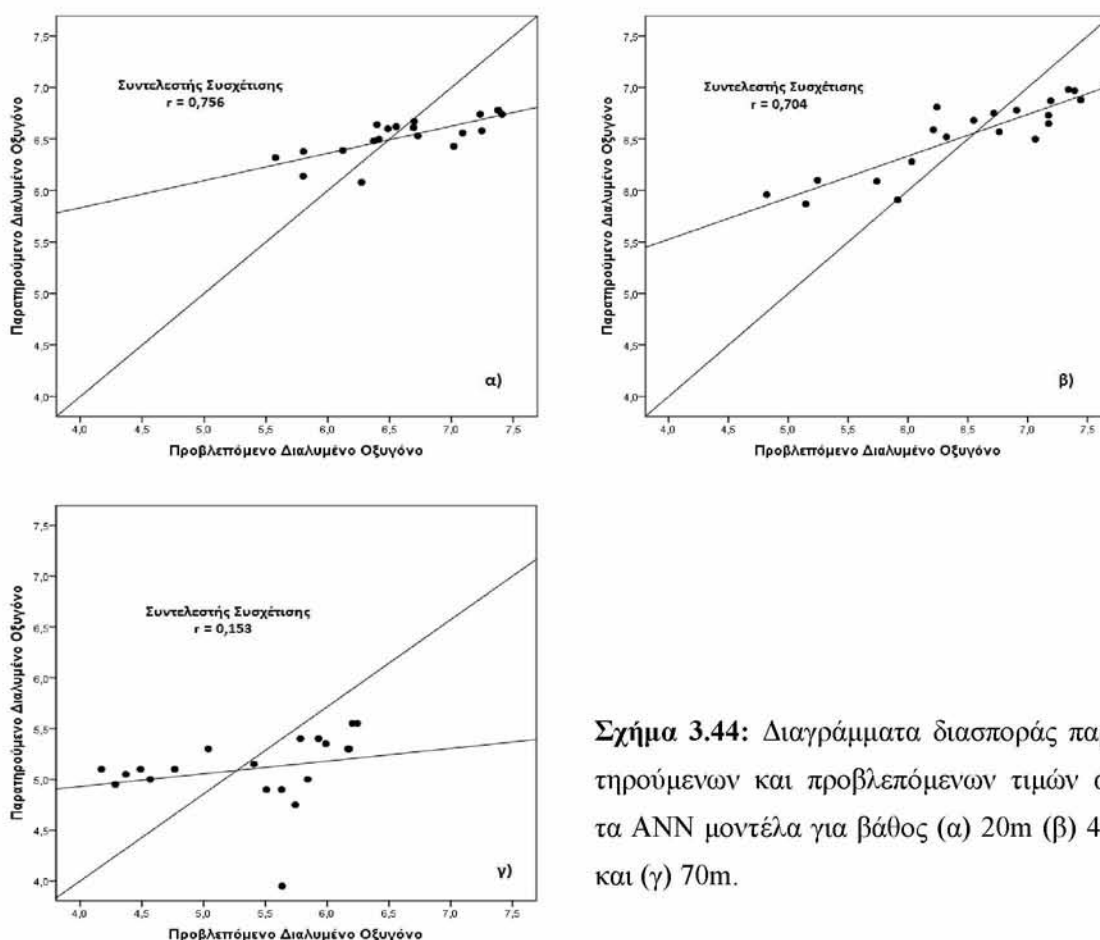
Στο σχήμα 3.43 δίνεται μια γραφική απεικόνιση των εκτιμώμενων από το μοντέλο τιμών του διαλυμένου οξυγόνου στα τρία βάθη, των παρατηρούμενων μετρήσεων και των ορίων του 95% διαστήματος εμπιστοσύνης.



Σχήμα 3.43: Προσαρμογή ANN μοντέλου και όρια 95% δ.ε. για βάθος (α) 20m (β) 40m (γ) 70m.

Από το παραπάνω σχήμα φαίνεται ότι υπάρχει σημαντική απόκλιση μεταξύ των παρατηρήσεων του διαλυμένου οξυγόνου και των εκτιμώμενων από τα μοντέλα τιμών της παραμέτρου, με αποτέλεσμα η προσαρμογή και η πρόβλεψη σε όλα τα βάθη να κρίνεται μη ικανοποιητική. Παρόλα αυτά, όλες οι τιμές βρίσκονται εντός του δ.ε. γεγονός το οποίο αποδίδεται όχι στην ακρίβεια της πρόβλεψης, αλλά στο μεγάλο εύρος του δ.ε. λόγω ύπαρξης μεγάλων σφαλμάτων προσαρμογής.

Οι τιμές των συντελεστών συσχέτισης και τα διαγράμματα διασποράς, μεταξύ των παρατηρούμενων και των προβλεπόμενων τιμών από τα ANN μοντέλα, παρουσιάζονται στο σχήμα 3.44. Οι τιμές των συντελεστών συσχέτισης είναι 0,756 για το ANN-20, 0,704 για το ANN-40 και 0,153 για το ANN-70, τιμές μικρότερες των σ.σ. των TF μοντέλων στα αντίστοιχα βάθη.



Σχήμα 3.44: Διαγράμματα διασποράς παρατηρούμενων και προβλεπόμενων τιμών από τα ANN μοντέλα για βάθος (α) 20m (β) 40m και (γ) 70m.

Τα στατιστικά μέτρα αξιολόγησης της ικανότητας πρόβλεψης για το διάστημα των 20 ημερών, παρουσιάζονται στον πίνακα 3.31. Σύμφωνα με τις τιμές του πίνακα η κατάταξη των μοντέλων είναι ANN-20, ANN-40 και ANN-70, για τα τρία πρώτα στατιστικά (MSE, RMSE και MAPE), ενώ για το τελευταίο μέτρο (NSC) το μοντέλο των 40μ εμφανίζεται καλύτερο σε σχέση με τα άλλα δύο τα οποία εμφανίζουν την ίδια περίπου ικανότητα πρόβλεψης. Οι τιμές των στατιστικών συνολικά δείχνουν φτωχή προσαρμογή και για τα τρία μοντέλα.

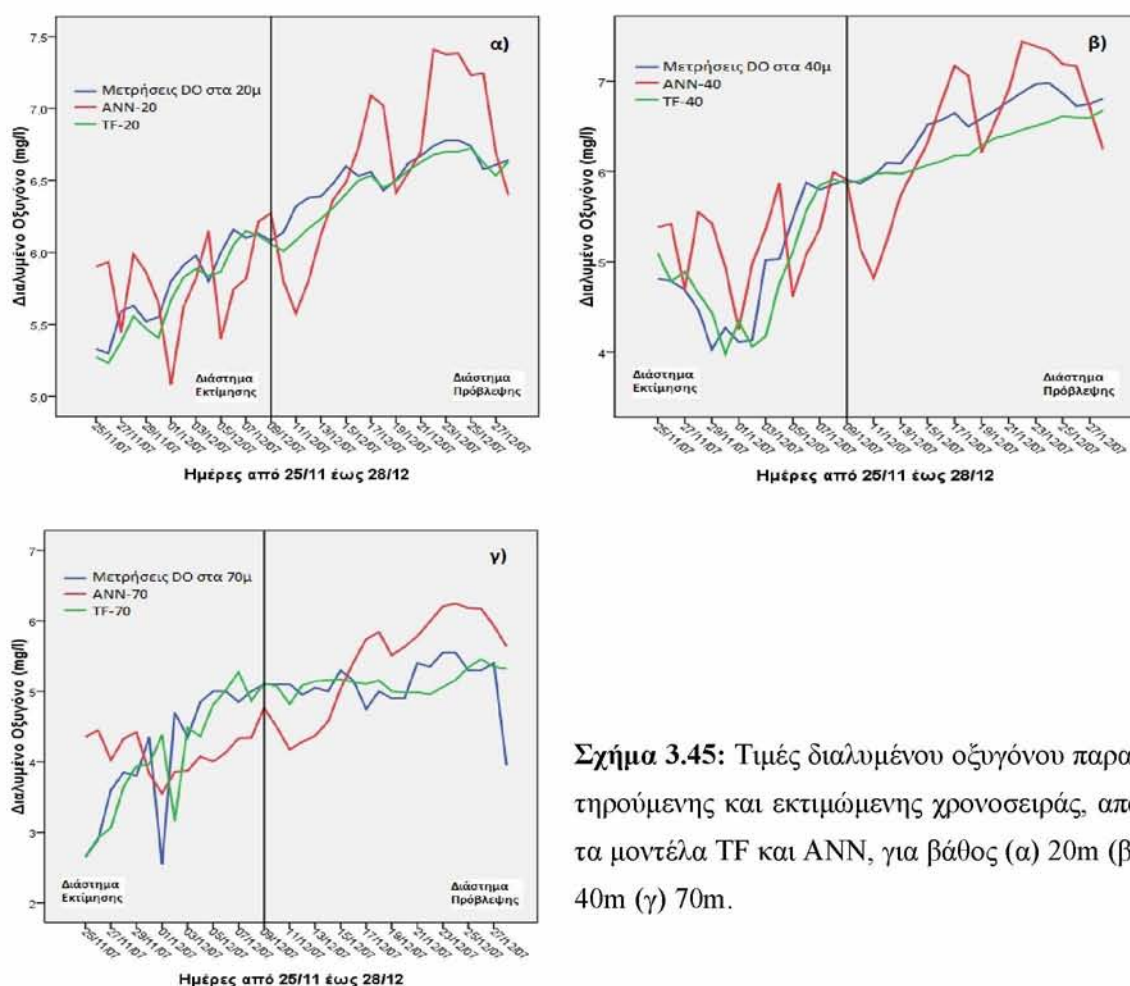
Πίνακας 3.31: Στατιστικά μέτρα αξιολόγησης προβλεπτικής ικανότητας των ANN μοντέλων, στα τρία βάθη.

ANN	MSE	RMSE	MAPE	NSC
20m βάθος	0,1862	0,4315	5,501	-3,845
40m βάθος	0,2411	0,4910	6,329	-0,206
70m βάθος	0,5621	0,7497	13,776	-3,799

γ) Σύγκριση μοντέλων για κατάργηση των αισθητήρων

Σκοπός της κατασκευής των TF και ANN μοντέλων στη δεύτερη περίπτωση (παρ. 3.3.4.2) ήταν η διερεύνηση της δυνατότητας κατάργησης των αισθητήρων μέτρησης στα βαθύτερα στρώματα του ταμιευτήρα. Για το σκοπό αυτό συγκρίθηκαν και αξιολογήθηκαν τα παραπάνω μοντέλα, ως προς την ικανότητα τους να προβλέπουν τις τιμές του διαλυμένου οξυγόνου στα 20, 40 και 70m, συναρτήσει των τιμών της παραμέτρου στο 1m.

Μια εικόνα της παραπάνω σύγκρισης δίνεται στο σχήμα 3.45 το οποίο περιέχει τα γραφήματα της παρατηρούμενης και τις εκτιμώμενης από κάθε μοντέλο χρονοσειράς.



Σχήμα 3.45: Τιμές διαλυμένου οξυγόνου παρατηρούμενης και εκτιμώμενης χρονοσειράς, από τα μοντέλα TF και ANN, για βάθος (α) 20m (β) 40m (γ) 70m.

Όπως παρατηρείται από το σχήμα 3.45 τα TF μοντέλα για όλα τα βάθη, έχουν καλύτερη ικανότητα προσαρμογής και πρόβλεψης από τα αντίστοιχα ANN μοντέλα τα οποία δεν ακολουθούν τις μεταβολές της χρονοσειράς του διαλυμένου οξυγόνου.

Πιο συγκεκριμένα στα **20 μέτρα** βάθος, το μοντέλο TF-20 έχει πολύ καλή προσαρμογή και ακρίβεια πρόβλεψης καθώς οι εκτιμώμενες από το μοντέλο τιμές καταγράφουν τις αυξομειώσεις της χρονοσειράς με μικρή απόκλιση. Στην περίπτωση των **40 μέτρων** αν και η προσαρμογή του μοντέλου στη χρονοσειρά είναι σχετικά καλή, η πρόβλεψη μόνο των πέντε πρώτων ημερών του διαστήματος πρόβλεψης είναι ικανοποιητική, καθώς για το υπόλοιπο διάστημα σημειώνεται αρκετή απόκλιση. Τέλος, το μοντέλο των **70 μέτρων** παρουσιάζει μέτρια προσαρμογή και ακρίβεια πρόβλεψης.

Η σύγκριση των στατιστικών μέτρων, μεταξύ των δύο μοντέλων στα διαφορετικά βάθη, παρουσιάζεται στον πίνακα 3.32.

Πίνακας 3.32: Στατιστικά μέτρα για σύγκριση παρατηρούμενων και προβλεπόμενων τιμών, από τα TF και ANN μοντέλα.

Βάθος	Στατιστικά μέτρα	TF	ANN
20 μέτρα	MSE	0,0120	0,1862
	RMSE	0,1097	0,4315
	MAPE	1,2820	5,5013
	NSC	0,686	-3,843
40 μέτρα	MSE	0,0915	0,2411
	RMSE	0,3024	0,4910
	MAPE	3,8959	6,3289
	NSC	0,542	-0,206
70 μέτρα	MSE	0,1463	0,5621
	RMSE	0,3825	0,7497
	MAPE	5,0451	13,776
	NSC	-0,244	-0,378

Βάσει των τιμών όλων των στατιστικών του πίνακα 3.32 και των γραφημάτων του σχήματος 3.45, τα TF μοντέλα εμφανίζουν ένα σαφές προβάδισμα έναντι των νευρωνικών δικτύων.

Από την παραπάνω ανάλυση γίνεται κατανοητό ότι στην περίπτωση που θέλουμε να προβλέψουμε τις τιμές του διαλυμένου οξυγόνου στα 20, 40 και 70m βάθος χρησιμοποιώντας μόνο τις μετρήσεις του επιφανειακού στρώματος, ουσιαστικά δηλαδή καταργώντας τους αισθητήρες στα τρία μεγαλύτερα βάθη, προτείνονται τα Transfer Function μοντέλα.

Αναλυτικότερα οι προβλέψεις του TF-20 μοντέλου είναι ικανοποιητικές για όλο το διάστημα πρόβλεψης και θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στη θέση των πραγματικών μετρήσεων της παραμέτρου με ακρίβεια 95%, δεδομένου ότι όλες οι προβλεπόμενες τιμές βρίσκονται εντός του 95% δ.ε. (σχ. 3.38.α).

Για το μοντέλο TF-40 οι προβλέψεις είναι ακριβείς μόνο για τις πρώτες 5 ημέρες του διαστήματος πρόβλεψης, ενώ για το υπόλοιπο διάστημα η ακρίβεια μειώνεται σημαντικά. Το μοντέλο αυτό θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για εκτίμηση των τιμών της παραμέτρου στα 40m βάθος με αρκετή επιφύλαξη.

Τέλος, οι προβλέψεις του TF-70 είναι λιγότερο ακριβείς, γεγονός που καθιστά τη χρήση του μοντέλου μη προτεινόμενη. Παρατηρείται δηλαδή μια μείωση της προβλεπτικής ικανότητας των μοντέλων με την αύξηση του βάθους, η οποία οφείλεται στη μείωση της επίδρασης του επιφανειακού στρώματος στα βαθύτερα.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, η αρχική σκέψη κατάργησης σταθμών δεν έδωσε και τα καλύτερα αποτελέσματα, μπορεί όμως να αντικαταστεί από μια δεύτερη, τη χρήση των παραπάνω στοχαστικών μοντέλων για συμπλήρωση κενών τα οποία δημιουργούνται όταν κάποιος από τους αισθητήρες μέτρησης πάθει βλάβη λόγω ελλιπούς συντήρησης ή φυσικών καταστροφών φαινόμενο πολύ σύνηθες σε υδρολογικές μετρήσεις. Σε αυτή την περίπτωση τα μοντέλα δείχνουν να είναι ικανά να συμπληρώσουν τα κενά, ίσως και ικανοποιητικότερα από τις γνωστές μεθόδους παρεμβολής, γεγονός που χρειάζεται περαιτέρω έρευνα.

3.4 Νότιο Δίκτυο - Περιφερειακός Σταθμός Νέστος

Το νότιο δίκτυο του ποταμού βρίσκεται εγκατεστημένο στη μεγάλη πεδινή πλατφόρμα του δέλτα του Νέστου που είναι δημιούργημα του ποταμού μέσω των διεργασιών μεταφοράς και απόθεσης με φερτές ύλες από τον άνω και μέσο ρου. Το δέλτα του Νέστου περιλαμβάνει πολλές λιμνοθάλασσες περί των εκβολών του κύριου κλάδου του ποταμού στη θάλασσα. Η οικολογική σημασία του Δέλτα του Νέστου είναι τεράστια γεγονός το οποίο οδήγησε το 1996 στη δημιουργία του Εθνικού Πάρκου Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης, που αποτελεί τη μεγαλύτερη χερσαία περιοχή της χώρας. Το Δέλτα του Νέστου μαζί με τις λίμνες Βιστωνίδα και Μητρικού, αποτελούν τρεις από τις συνολικά 11 προστατευόμενες περιοχές Ramsar της Ελλάδας.

Στο οικοσύστημα του Δέλτα του Νέστου ασκούνται πιέσεις κυρίως από τον πρωτο-

γενή τομέα και από τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Είναι μια περιοχή όπου γίνονται εμφανείς όλες οι συνέπειες της έντονης ανθρώπινης παρουσίας όπως υπερβόσκηση, υλοτομία, πυρκαγιές, αυθαίρετη τουριστική ανάπτυξη κ.ά., συνέπειες οι οποίες άλλαξαν τις οικολογικές συνθήκες της περιοχής. Ακόμη, τα απόβλητα από τις βιομηχανίες που βρίσκονται στον άνω ρου του ποταμού και πιο συγκεκριμένα στη γείτονα χώρα Βουλγαρία, καθώς και η ρύπανση των υδάτων από τα γεωργικά φάρμακα, επιφέρουν επιπρόσθετες επιβαρύνσεις με σοβαρότερες συνέπειες για το οικοσύστημα του Δέλτα.

Για όλους τους παραπάνω λόγους η παρακολούθηση και η στατιστική ανάλυση των παραμέτρων των υδάτων στο Δέλτα του ποταμού, κρίνεται αναγκαία. Ακόμη, η διατήρηση του ανθρωπογενούς περιβάλλοντος και η προστασία του από ακραία φαινόμενα που θα μπορούσαν να επιφέρουν καταστροφές αγροτικών, κτηνοτροφικών, υδατοκαλλιεργητικών, τουριστικών και οικιστικών δραστηριοτήτων, αποτελούν σοβαρούς λόγους για παρακολούθηση των υδάτων. Τέλος, ελέγχοντας τα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά των υδάτων στον κάτω ρου του ποταμού, εξάγουμε χρήσιμα συμπεράσματα για τη σωστή λειτουργία των φραγμάτων του μέσου ρου.

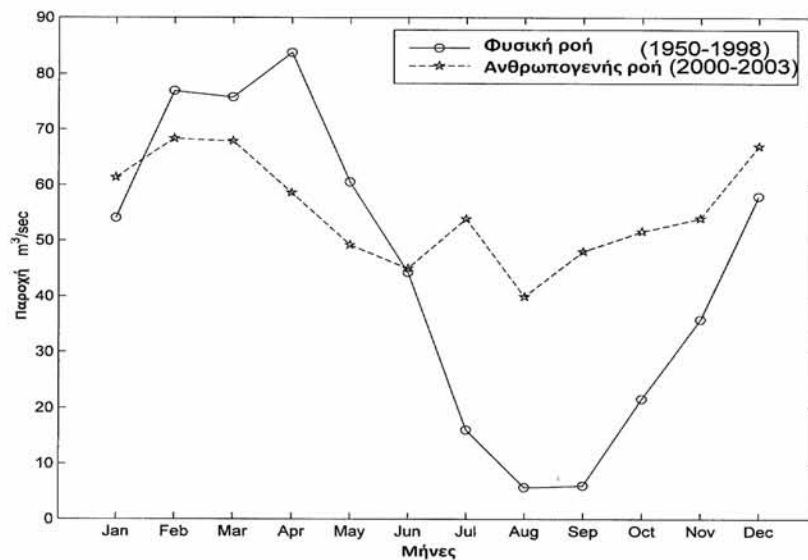
Οι παρατηρήσεις οι οποίες αναλύθηκαν στην παρούσα εργασία, προέρχονται από το σταθμό Νέστο (παρ. 2.2.4.1), είναι ημερήσιες μετρήσεις και αναφέρονται σε ποιοτικές και ποσοτικές παραμέτρους των υδάτων του ποταμού για τα έτη 2004 έως 2007. Οι ποιοτικές παράμετροι οι οποίες εξετάζονται είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC_w), το διαλυμένο οξυγόνο (DO), το δυναμικό οξειδοαναγωγής (Redox Potential), το pH, η θερμοκρασία των υδάτων (T_w) και του αέρα (T_a), ενώ στις ποσοτικές ανήκει η στάθμη νερού (H).

Η αποτίμηση των παραμέτρων έγινε με τις στατιστικές μεθόδους που αναπτύχθηκαν και εφαρμόστηκαν στον Π.Σ. Παγονέρι (παρ. 3.2).

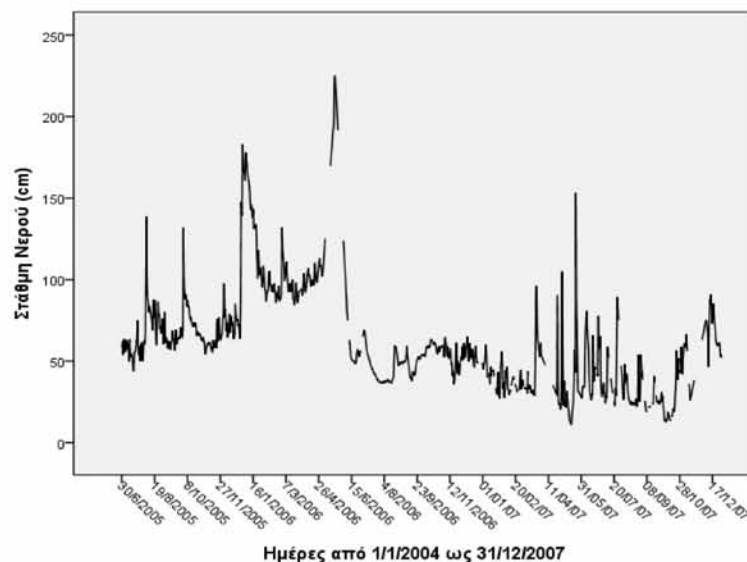
3.4.1 Αξιολόγηση των δεδομένων παρακολούθησης - Περιγραφικά στατιστικά

Στάθμη Νερού (H - cm). Οι μετρήσεις της παραμέτρου στάθμη νερού στο Δέλτα του ποταμού ουσιαστικά μας πληροφορούν για την ποσότητα νερού που καταλήγει στην τεχνητή κοίτη του Νέστου, στο χώρο της δελταϊκής πεδιάδας, προ των εκβολών του ποταμού στη θάλασσα, αφού πρώτα έχει διατρέξει όλο το ρου του, έχει δεχθεί όλες τις πιέσεις από τις ανθρωπογενείς παρεμβάσεις (σύστημα φραγμάτων, ταμιευτήρες κτλ.) και αφού έχουν ικανοποιηθεί οι αρδευτικές ανάγκες των καλλιεργειών της δελταϊκής πεδιάδας.

Όπως προκύπτει από το σχήμα 3.47, υπάρχει συνεχής ροή στο τμήμα αυτό του Νέστου, σε αντίθεση με αυτό που συνέβαινε πριν την κατασκευή των φραγμάτων, όπου από τη μία τους χειμερινούς μήνες είχαμε πολύ υψηλές στάθμες στον Νέστο και από την άλλη τους καλοκαιρινούς μήνες, η στάθμη βρισκόταν σε πολύ χαμηλά, σχεδόν μηδενικά επίπεδα, υποβάλλοντας σε σημαντικές πιέσεις τα οικοσυστήματα και το περιβάλλον (σχ. 3.46) (Psilovikos *et al.* 2005).



Σχήμα 3.46: Σύγκριση μεταξύ της φυσικής και της ανθρωπογενούς υδροπεριόδου του Νέστου, πριν και μετά την κατασκευή του φράγματος (Psilovikos *et al.* 2005).



Σχήμα 3.47: Η χρονοσειρά της παραμέτρου στάθμη νερού στον Π.Σ. Νέστο.

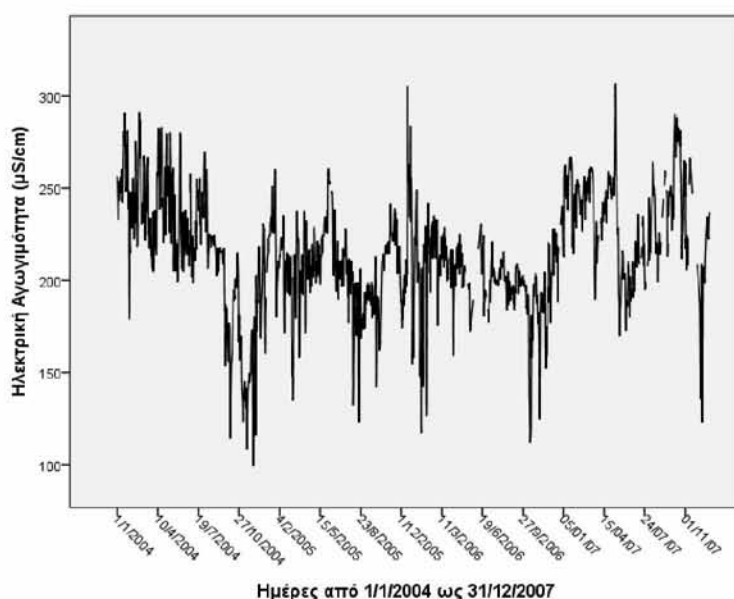
Η νέα αυτή ανθρωπογενώς τροποποιημένη ροή, εμφανίζει μικρές διακυμάνσεις οι οποίες τείνουν να εξομαλυνθούν και δεν υπερβαίνουν τα 60-70 m³/s, σε σχέση με τα 80 και 90 m³/s που εμφανίζονταν πριν κατά τους χειμερινούς μήνες. Επίσης, εμφανίζονται υψηλές στάθμες τους καλοκαιρινούς μήνες, λόγω της λειτουργίας του υδροηλεκτρικού σταθμού Θησαυρού και Πλατανόβρυσης, όπου οι παροχές εμφανίζουν υψηλές τιμές μεγαλύτερες από 40 m³/s, σε σχέση με τιμές μικρότερες από 10 m³/s των παρατηρήσεων κατά τους μήνες Αύγουστο και Σεπτέμβριο, πριν την κατασκευή των φραγμάτων.

Το εύρος των τιμών της παραμέτρου είναι 214,28 cm, με ελάχιστη τιμή τα 11,10 cm να καταγράφεται στις 16 Μαΐου του 2007 και μέγιστη τα 225,38 cm στις 21 Μαΐου του 2006. Η μέση τιμή της στάθμης νερού είναι τα 67,73 cm και η τυπική απόκλιση 29,64 cm (πίν. 3.33).

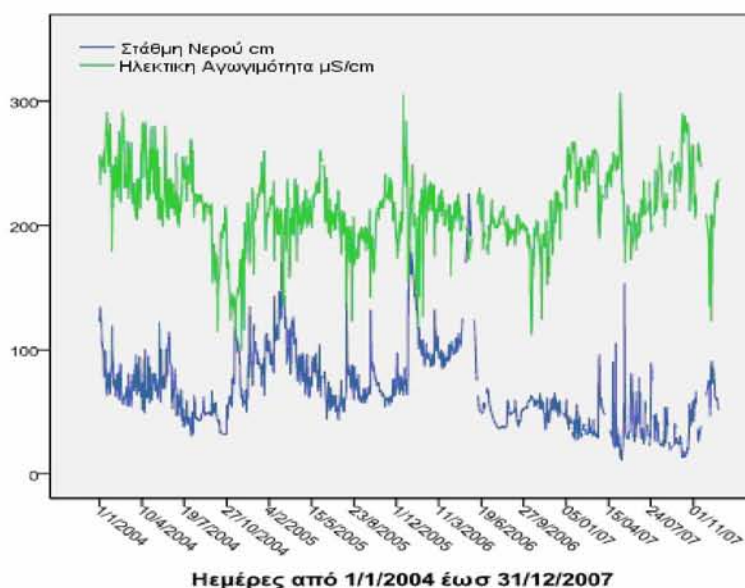
Έκτακτα επεισόδια πλημμυρών με στάθμες άνω των 200 cm δεν παρατηρούνται σε όλα τα χρόνια παρακολούθησης της παραμέτρου, εκτός από τις 20 και 21 Μαΐου του 2006. Αντίστοιχα, πολύ χαμηλές στάθμες κάτω των 20 cm καταγράφονται σε ποσοστό μόλις 1,7%, ενώ κάτω των 30 cm σε ποσοστό 7,18% και όλες συναντώνται στο έτος 2007. Υπάρχει επομένως εξομάλυνση της ροής του Νέστου, με αποτέλεσμα να υπάρχει συνεχής και ικανοποιητική ροή υδάτων στο δέλτα του, γεγονός που υποστηρίζει το περιβάλλον, τα οικοσυστήματα, τους υδροφορείς και τις εκβολές.

Ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC_w – μS/cm). Η μέση τιμή για την παράμετρο ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι 214,04 μS/cm και η τυπική απόκλιση 31,11 μS/cm. Η μέγιστη τιμή 306,558 μS/cm καταγράφεται στις 13 Μαΐου του 2007, ενώ η ελάχιστη 99,46 μS/cm στις 1 Δεκεμβρίου του 2004 (πίν. 3.33) (σχ. 3.48).

Η παράμετρος αγωγιμότητα, όπως σχολιάστηκε και στην παράγραφο 3.2.1, συνήθως ακολουθεί αντίθετη πορεία από αυτή των διακυμάνσεων της στάθμης (υψηλή στάθμη – χαμηλή αγωγιμότητα), εικόνα η οποία για τον Π.Σ. Νέστο είναι εμφανής, χωρίς έντονες διαφοροποιήσεις μεταξύ μεγίστων και ελαχίστων (σχ. 3.49). Το παραπάνω γεγονός για τον ίδιο σταθμό, έχει αποδειχθεί για τα έτη 2000-2002 (Psilovikos *et al.* 2006).



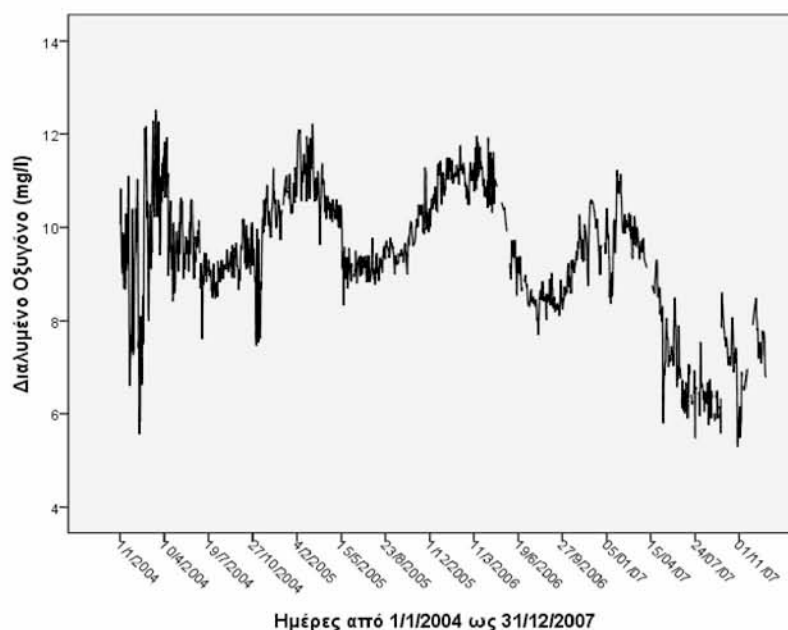
Σχήμα 3.48: Η χρονοσειρά της παραμέτρου ηλεκτρική αγωγιμότητα στον Π.Σ. Νέστο.



Σχήμα 3.49: Οι χρονοσειρές των παραμέτρων στάθμη νερού και ηλ. αγωγιμότητα.

Οι μετρήσεις της αγωγιμότητας δείχνουν ότι το νερό βρίσκεται εντός των αποδεκτών ορίων για αστική και αρδευτική χρήση καθώς το σύνολο των τιμών είναι κάτω από 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, όριο το οποίο θέτει η Ελληνική νομοθεσία (ΚΥΑ 46399/1352/1986) και κάτω των 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$, όριο το οποίο θέτει η Ευρωπαϊκή νομοθεσία (WHO 1984, EC 2000).

Διαλυμένο Οξυγόνο (DO – mg/l). Οι τιμές της παραμέτρου διαλυμένο οξυγόνο όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε (σχ. 3.50), κυμαίνονται σε πολύ ικανοποιητικά επίπεδα, μεταξύ 5,28 και 12,52 mg/l, με την ελάχιστη τιμή να καταγράφεται στις 29 Οκτωβρίου του 2007 και τη μέγιστη στις 22 Μαρτίου του 2004. Η μέση τιμή είναι 9,42 mg/l, η τυπική απόκλιση 1,37 mg/l και η διάμεσος 9,48 mg/l (πίν. 3.33). Παρατηρούμε ότι η διάμεσος είναι πολύ κοντά στη μέση τιμή, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι δεν υπάρχουν απότομες μεταβολές των τιμών κατά τη διάρκεια των ετών 2004 έως 2007.



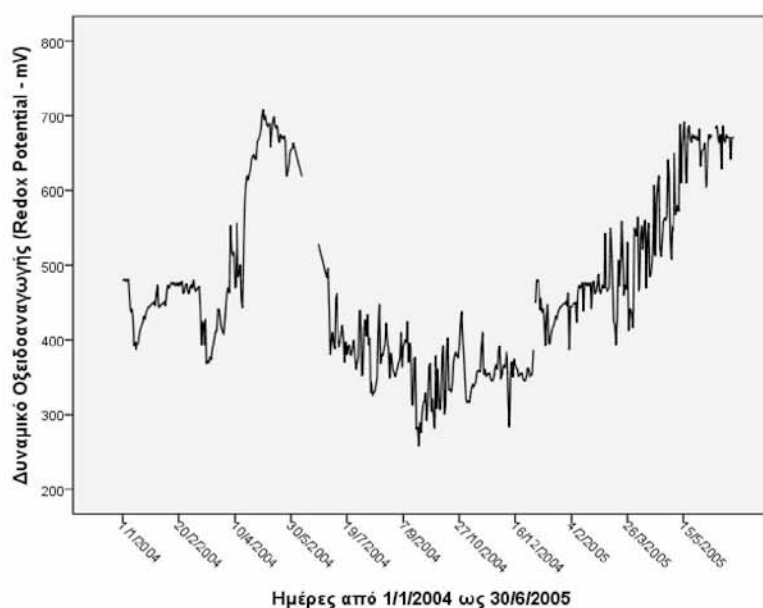
Σχήμα 3.50: Η χρονοσειρά της παραμέτρου διαλυμένο οξυγόνο στον Π.Σ. Νέστο.

Το κατώτατο επιτρεπόμενο όριο για τη διατήρηση της υδρόβιας ζωής βάσει της ελληνικής νομοθεσίας (ΚΥΑ 46399/1352/1986) είναι η τιμή 5 mg/l. Για τα έτη 2004 έως 2007 στον Π.Σ. Νέστο δεν καταγράφηκε τιμή κάτω του ορίου, υπήρξε βέβαια ένα μικρό ποσοστό 1,6% τιμών μεταξύ 5 και 6 mg/l, ποσοστό το οποίο δεν αλλοιώνει την καλή εικόνα της ποιότητας του νερού. Σε ότι αφορά την παράμετρο του διαλυμένου οξυγόνου οι συνθήκες θεωρούνται ιδανικές για τη διατήρηση των οικοσυστημάτων του δέλτα.

Δυναμικό Οξειδοαναγωγής (Redox Potential - mV). Για την παράμετρο Redox, στην περίπτωση των υδάτων του Π.Σ. Νέστου, υπήρχαν μετρήσεις για το χρονικό διάστημα 1 Ιανουαρίου 2004 έως 29 Ιουνίου 2005, οπότε σταμάτησε η καταμέτρηση της

παραμέτρου (σχ. 3.51) και ξεκίνησε να μετράται το pH. Η μέση τιμή των καταγεγραμμένων τιμών είναι 465,08 mV, η τυπική απόκλιση 110,71 mV και το εύρος τιμών 451,091 mV (πίν. 3.33).

Το Redox για τιμή ίση με 800 mV, βρίσκεται σε ισορροπία με το ατμοσφαιρικό οξυγόνο. Στην περίπτωση των υδάτων του Νέστου, οι τιμές του Redox κυμάνθηκαν από 250 έως 710 mV, πιο συγκεκριμένα η μέγιστη τιμή 708,86 mV καταγράφεται στις 5 Μαΐου του 2004, ενώ η ελάχιστη 257,764 mV στις 21 Σεπτεμβρίου του ίδιου έτους, φανερώνοντας με τον τρόπο αυτό ότι στα ύδατα του Νέστου επικρατούν οι οξειδωτικές διεργασίες (Margoni & Psilovikos 2010). Οι διεργασίες αυτές, συνοδεύονται και από υψηλές τιμές διαλυμένου οξυγόνου, κατάλληλες να διατηρήσουν τις υδρόβιες μορφές ζωής κάτι που τεκμηριώνεται άλλωστε και από τις παρατηρούμενες τιμές του διαλυμένου οξυγόνου στο αντίστοιχο διάστημα.

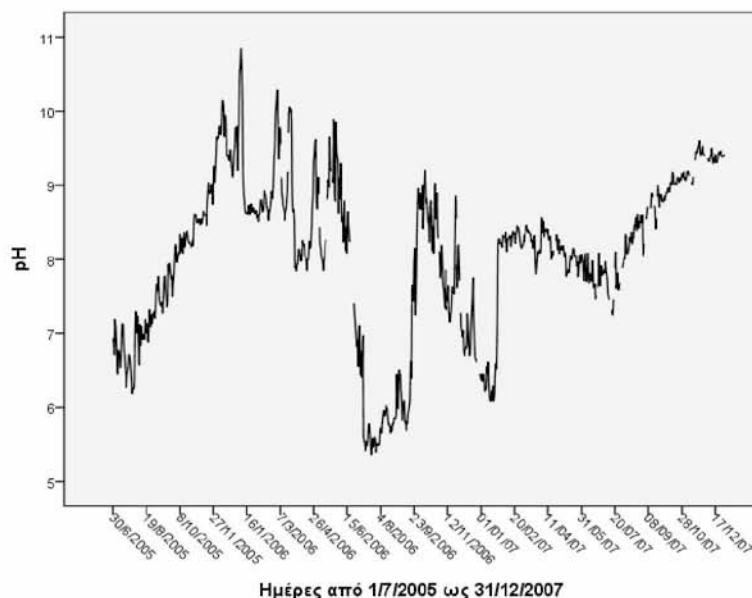


Σχήμα 3.51: Η χρονοσειρά της παραμέτρου Redox στον Π.Σ. Νέστο.

pH. Οι τιμές της παραμέτρου κυμαίνονται από ελάχιστη 5,36 που παρατηρήθηκε στις 21 Ιουλίου του 2006, μέχρι μέγιστη 10,85 στις 7 Ιανουαρίου του 2006 (σχ. 3.52). Η μέση τιμή για το σύνολο των παρατηρήσεων είναι 8,03 και η τυπική απόκλιση 1,1 τιμή ικανοποιητική και σύμφωνη με το pH των υδάτων πολλών ελληνικών ποταμών (Μαμάης 2008).

Βάσει της Ελληνικής και ξένης νομοθεσίας, όπως έχει αναφερθεί (παρ. 3.1) τα όρια για να χαρακτηριστεί το νερό ως πόσιμο είναι μεταξύ 6,5 και 8,5, ενώ χαρακτηρίζεται

ως κατάλληλο για τη διαβίωση των υδρόβιων οργανισμών όταν οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 5,5 και 9,5. Για τα δεδομένα του Π.Σ. Νέστου το 51,6% και το 93,3% των παρατηρήσεων ανήκουν αντίστοιχα σε αυτά τα διαστήματα.

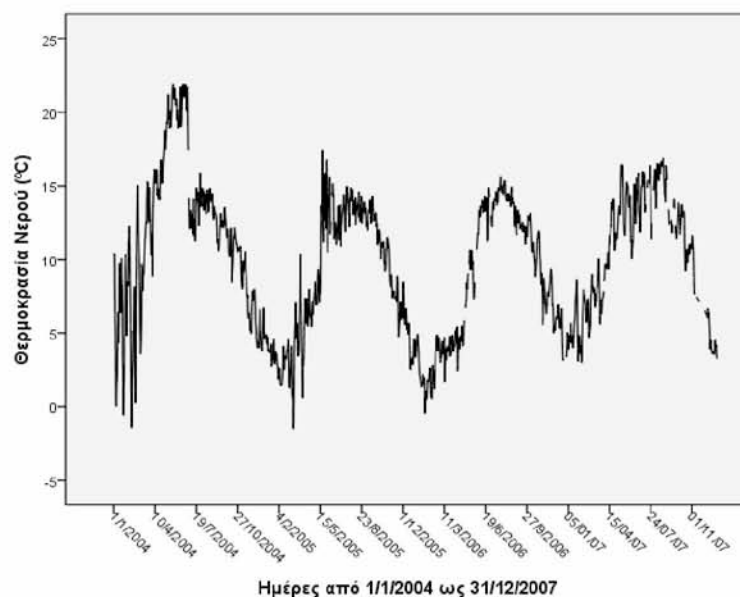


Σχήμα 3.52: Η χρονοσειρά της παραμέτρου pH στον Π.Σ. Νέστο.

Οι παραπάνω παρατηρήσεις οδηγούν στο συμπέρασμα ότι το νερό του ποταμού στην περιοχή του δέλτα, είναι κατάλληλο για τη διατήρηση της υδρόβιας ζωής.

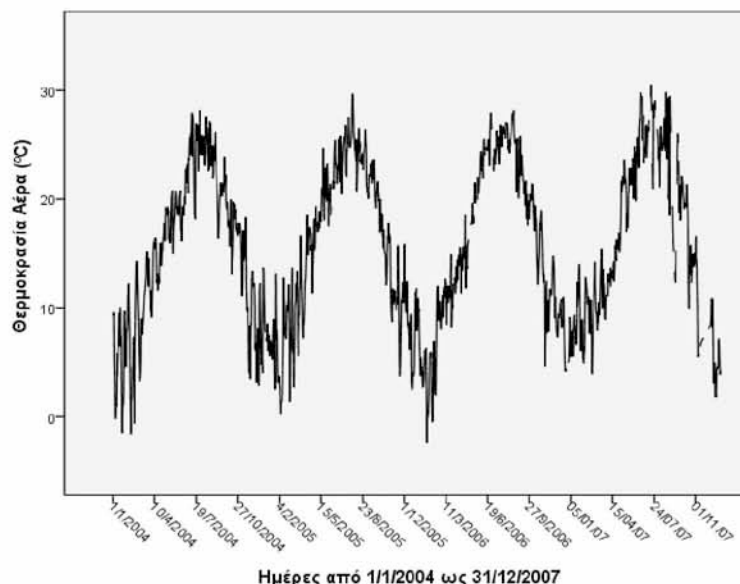
Θερμοκρασία νερού ($T_w - ^\circ\text{C}$). Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η αξιολόγηση των μετρήσεων της παραμέτρου θερμοκρασία νερού στον Π.Σ. Νέστο, καθώς η ύπαρξη των Υ.Η.Σ. στο Θησαυρό – Πλατανόβρυση, θα μπορούσαν να προκαλέσουν μεταβολές της θερμοκρασίας του νερού του αποδέκτη σε επίπεδα μη ανεκτά από το υδατικό οικοσύστημα, τόσο μείωσης λόγω άντλησης του νερού από τα χαμηλά στρώματα του μόνιμου υπολιμνίου, όσο και αύξησης λόγω της λειτουργίας των στροβίλων.

Οι τιμές της κυμαίνονται από $-1,5\text{ }^\circ\text{C}$ έως $22\text{ }^\circ\text{C}$, με τη μέγιστη τιμή $21,91\text{ }^\circ\text{C}$ να σημειώνεται στις 23 Μαΐου του έτους 2004 και την ελάχιστη $-1,51\text{ }^\circ\text{C}$ στις 11 Μαρτίου του 2005 (σχ. 3.53). Η μέση τιμή είναι $9,79\text{ }^\circ\text{C}$ και η τυπική απόκλιση $4,78\text{ }^\circ\text{C}$ (πίν.3.33). Από το σύνολο των παρατηρήσεων μόλις 9 μετρήσεις έχουν τιμή μεγαλύτερη από $21,5\text{ }^\circ\text{C}$ που αποτελεί το κατώτατο όριο για τη διαβίωση των σαλμονίδων, ενώ καμία τιμή δεν ξεπερνά τους $25\text{ }^\circ\text{C}$, γεγονός που καθιστά τα ύδατα του Νέστου κατάλληλα για διαβίωση ιχθύων.



Σχήμα 3.53: Η χρονοσειρά της παραμέτρου θερμοκρασία νερού στον Π.Σ. Νέστο.

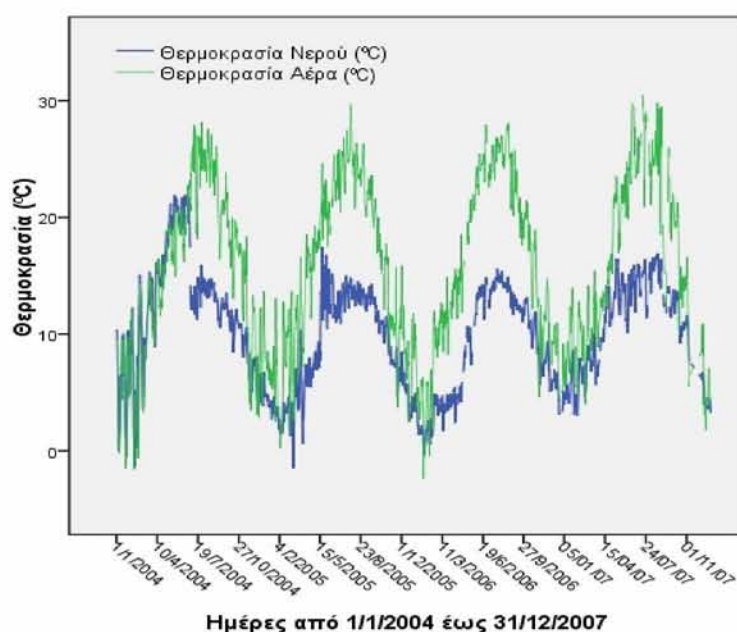
Θερμοκρασία αέρα (T_a – °C). Η μέση τιμή της θερμοκρασίας του αέρα είναι 15,4 °C, η τυπική απόκλιση 7,29 °C, η μέγιστη και ελάχιστη τιμή που σημειώνεται κατά τη διάρκεια της περιόδου παρακολούθησης των υδάτων του ποταμού, είναι 30,5 °C στις 17 Ιουλίου του 2007 και -2,41 °C στις 24 Ιανουαρίου του 2006 αντίστοιχα (σχ. 3.54).



Σχήμα 3.54: Η χρονοσειρά της παραμέτρου θερμοκρασία αέρα στον Π.Σ. Νέστο.

Όπως γίνεται ορατό από το σχήμα 3.55, όπου παρουσιάζονται τα γραφήματα της θερμοκρασίας νερού και αέρα, τα στοιχεία της θερμοκρασίας του νερού και του αέρα

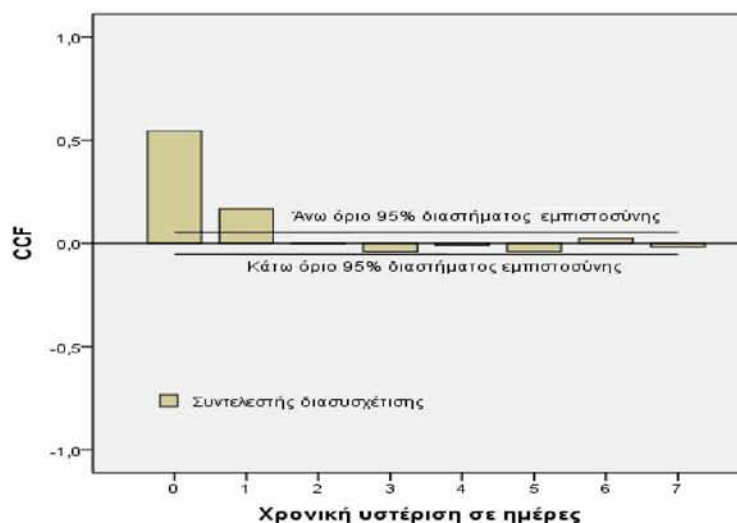
της περιοχής δείχνουν ότι κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου το νερό που ρέει στην κοίτη του Νέστου στη δελταϊκή πεδιάδα είναι ψυχρότερο από την αντίστοιχη τιμή της θερμοκρασίας του αέρα, γεγονός που οφείλεται στις εκροές ψυχρού νερού από τα Υ.Η.Σ. Θησαυρού και Πλατανόβρυσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι λόγω του μεγάλου βάθους του νερού στις φραγματογενείς λίμνες και των θέσεων των υδροληψιών τους, το νερό που εκρέει από αυτές έχει θερμοκρασία 10-15 °C κατά τη θερινή περίοδο. Η διαδρομή του νερού στην κατάντη των φραγμάτων κοίτη του Νέστου δεν είναι αρκετή για τη «θέρμανσή» του στα επίπεδα της θερμοκρασίας του αέρα και για το λόγο αυτό παραμένει ψυχρότερο μέχρι τις εκβολές του ποταμού στη θάλασσα (Ψιλοβίκος και συν. 2002, Ψιλοβίκος και συν. 2003, Psilovikos *et al.* 2006).



Σχήμα 3.55: Η χρονοσειρά της παραμέτρου θερμοκρασία νερού και αέρα.

Είναι βέβαιο ότι η κατασκευή του αναρρυθμιστικού έργου του Τεμένους θα έχει θετικές επιπτώσεις στην εξομάλυνση της θερμοκρασίας του νερού, ώστε να αμβλυνοθούν οι διαφορές μεταξύ θερμοκρασίας νερού και αέρα στο Νέστο κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών. Είναι επίσης αναγκαίο να μελετηθούν και οι πιθανές θετικές ή αρνητικές επιδράσεις του φαινομένου αυτού στο περιβάλλον.

Σύμφωνα με τη δειγματική συνάρτηση διασυσχέτισης (SCCF), η οποία υπολογίζεται με τον τρόπο που περιγράψαμε στην παράγραφο 3.2.1, η χρονική υστέρηση με την οποία η θερμοκρασία του αέρα επηρεάζει την θερμοκρασία του νερού είναι μια ημέρα (σχ. 3.56).



Σχήμα 3.56: Γράφημα της συνάρτησης διασυσχέτισης, μεταξύ των σφαλμάτων των παραμέτρων θερμοκρασία νερού και αέρα.

Στον πίνακα 3.33 αναγράφονται όλα τα περιγραφικά στατιστικά των παραμέτρων του Τ.Σ. Νέστος που αναλύσαμε.

Πίνακας 3.33: Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία των παραμέτρων του Π.Σ. Νέστο.

Τ.Σ. Νέστος	Στάθμη Νερού (cm)	Ηλεκτρική Αγωγιμότητα (μS/cm)	Διαλυμένο Οξυγόνο (mg/l)	Redox Potential (mV)	pH	Θερμοκρασία Νερού (°C)	Θερμοκρασία Αέρα (°C)
Μέγιστη τιμή	225,38	306,558	12,520	708,855	10,80	21,90	30,50
Ελάχιστη τιμή	11,10	99,460	5,289	257,764	5,30	-1,51	-2,41
Μέση τιμή	67,73	214,04	9,42	465,07	8,03	9,79	15,40
Διασπορά	878,32	968,078	1,88	12256,62	1,21	22,874	53,252
Τυπ. απόκλιση	29,63	31,11	1,37	110,70	1,10	4,78	7,29
Διάμεσος	62,42	213,62	9,48	445,60	8,19	10,55	15,22

Η ποιότητα των υδάτων του Νέστου εκτιμάται ότι βρίσκεται σε πολύ καλά επίπεδα σε ότι αφορά την χρήση του νερού για άρδευση και διατήρηση των οικοσυστημάτων του δέλτα αφού δεν παρατηρήθηκαν ακραίες τιμές για τις παραμέτρους που καταγράφηκαν σύμφωνα με την κείμενη νομοθεσία (πιν. 3.1). Επίσης σε ότι αφορά την ποσοτική παράμετρο της Στάθμης, αυτή κυμαίνεται σε πολύ ικανοποιητικά επίπεδα, αφού έ-

χουν αμβλυνθεί οι μέγιστες (πλημμύρες) και οι ελάχιστες (ανομβρία) τιμές της που κατά διαστήματα είχαν παρατηρηθεί στο παρελθόν πριν την κατασκευή των φραγμάτων Θησαυρού και Πλατανόβρυσης.

Σε γενικές γραμμές έχουν αμβλυνθεί τα πλημμυρικά φαινόμενα που λάμβαναν χώρα τους χειμερινούς μήνες, αφού οι ποσότητες του νερού συγκρατούνται από τα φράγματα. Από την άλλη μεριά, έχουν αυξηθεί και οι ελάχιστες τιμές στάθμης και παροχής, οι οποίες κατά τους καλοκαιρινούς μήνες πριν την κατασκευή των φραγμάτων, καταγράφονταν σε πολύ χαμηλά επίπεδα.

Το αποτέλεσμα είναι σε ποσοτικό τουλάχιστον επίπεδο ότι υπάρχει ένας εξορθολογισμός των ποσοτήτων του νερού που φτάνουν στο δέλτα, ώστε και να μην πλημμυρίζει το χειμώνα και να διατηρείται η ζωή το καλοκαίρι, με εξασφάλιση ελάχιστης στάθμης.

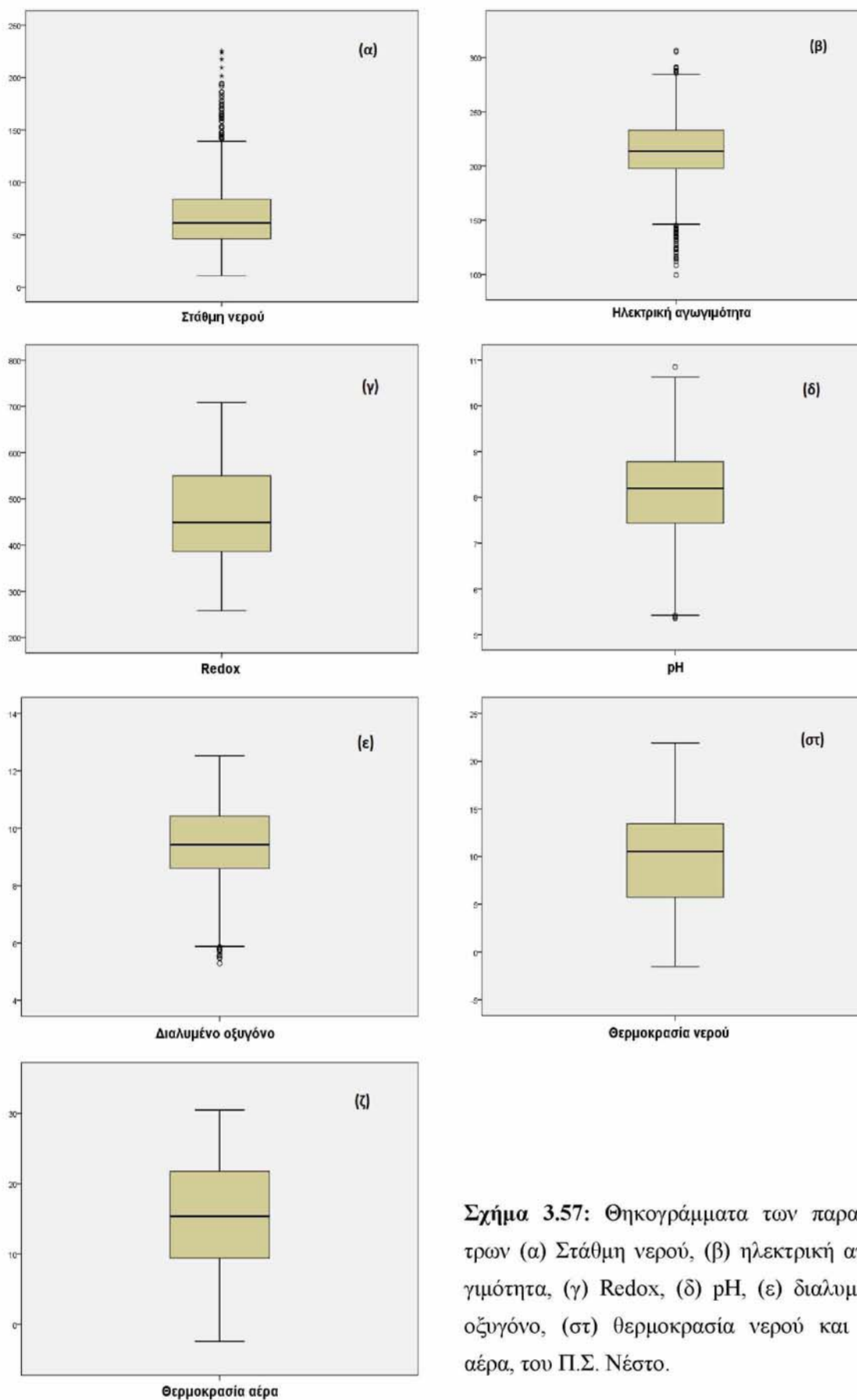
Η θερμοκρασία του νερού που φτάνει στο δέλτα αποτελεί πρόβλημα καθώς συγκρινόμενη με αυτή του αέρα για τους θερινούς μήνες εμφανίζεται με ασυνήθιστα μεγάλες διαφορές, δηλαδή παρατηρούνται πολύ χαμηλές θερμοκρασίες νερού σε σχέση με του αέρα. Ένα δεύτερο πρόβλημα παραμένει η κατακράτηση φερτών υλών στον ταμιευτήρα, η οποία στερεί το δέλτα από τα υλικά αυτά που είναι ευεργετικά για τις καλλιέργειες και ανασταλτικά για την παράκτια διάβρωση. Η λειτουργία του αναρρυθμιστικού φράγματος του Τεμένους θα είχε ιδιαίτερα θετικά αποτελέσματα, τόσο για την αναρρύθμιση της θερμοκρασίας, όσο και για την περαιτέρω αναρρύθμιση των ποσοτήτων νερού.

Έτσι μπορούμε να πούμε ότι το ανθρωπογενώς τροποποιημένο υδατικό σύστημα του Νέστου ανταποκρίνεται θετικά στις νέες αλλαγές του φυσικού περιβάλλοντος.

3.4.2 Έλεγχος προσαρμογής σε κατανομή

Για τον έλεγχο προσαρμογής των δεδομένων στην κανονική και στην λογαριθμικοκανονική κατανομή, σε διερευνητική φάση έγιναν τα θηκογράμματα όλων των παραμέτρων (σχ. 3.57) του Π.Σ. Νέστος, για την απεικόνιση της εμπειρικής τους κατανομής και ακολούθως χρησιμοποιήθηκε το test Kolmogorov-Smirnov (παρ. 3.1.2).

Από το σχήμα 3.57 γίνεται φανερό ότι οι χρονοσειρές των παραμέτρων στάθμη νερού (α), ηλεκτρική αγωγιμότητα (β), Redox (γ) και pH (δ), παρουσιάζουν ασυμμετρία και περιέχουν ακραίες τιμές. Επίσης, οι παράμετροι θερμοκρασία νερού (στ) και αέρα (ζ), δεν περιέχουν ακραίες τιμές, παρουσιάζουν μικρή ασυμμετρία η οποία είναι εντονότερη στη θερμοκρασία νερού, ενώ το διαλυμένο οξυγόνο (ε), παρουσιάζει σχετική συμμετρία αλλά και κάποιες ακραίες χαμηλές τιμές.



Σχήμα 3.57: Θηκογράμματα των παραμέτρων (α) Στάθμη νερού, (β) ηλεκτρική αγωγιμότητα, (γ) Redox, (δ) pH, (ε) διαλυμένο οξυγόνο, (στ) θερμοκρασία νερού και (ζ) αέρα, του Π.Σ. Νέστο.

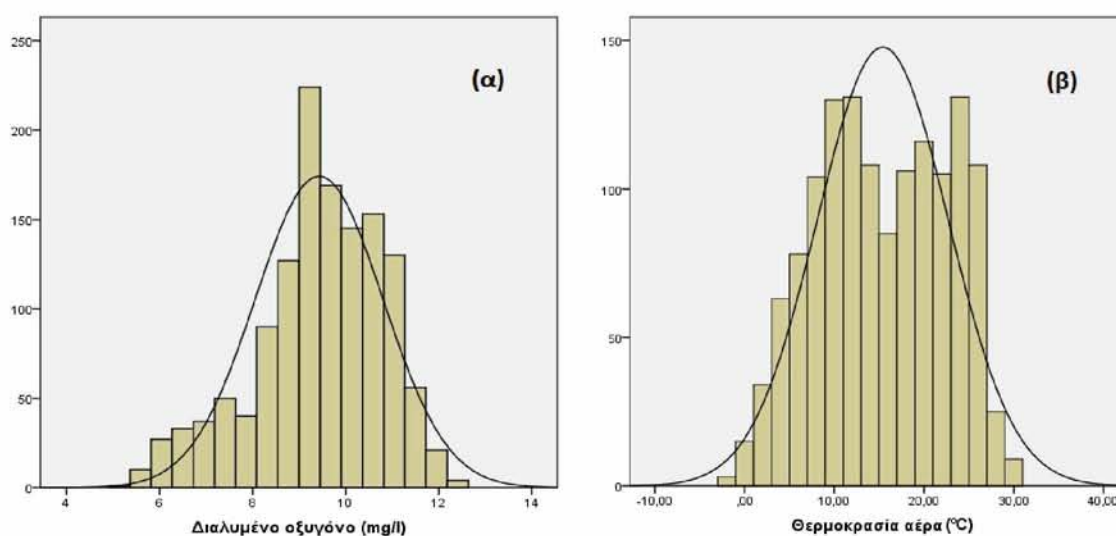
Στον πίνακα 3.34 αναγράφεται η σημαντικότητα (sig.) όλων των ελέγχων του test Kolmogorov-Smirnov, καθώς και η αποδοχή ή η απόρριψη της προσαρμογής στην κανονική ή λογαριθμοκανονική κατανομή κάθε μιας μεταβλητής.

Πίνακας 3.34: Έλεγχος προσαρμογής σε κατανομή, για τις παραμέτρους του Π.Σ. Νέστο.

Τ.Σ. Νέστος Έλεγχος Κατανομής		Στάθμη Νερού (cm)	Ηλεκτρική Αγωγιμότητα ($\mu\text{S/cm}$)	Διαλυμένο Οξυγόνο (mg/l)	Redox Potential (mV)	pH	Θερμοκρα- σία Νερού ($^{\circ}\text{C}$)	Θερμοκρα- σία Αέρα ($^{\circ}\text{C}$)
Κανονική κατανομή	Προσαρμογή	όχι	όχι	Οριακά ναι	όχι	όχι	όχι	Οριακά ναι
	Sig.	0,000	0,001	0,012	0,000	0,000	0,002	0,009
Λογ/νική κατανομή	Προσαρμογή	όχι	όχι	όχι	όχι	όχι	όχι	όχι
	Sig.	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Συμπερασματικά καμία από τις παραμέτρους που ελέγχθηκαν για τον Π.Σ. Νέστο, δεν προσαρμόζεται στην κανονική ή στην λογαριθμοκανονική κατανομή σε στάθμη σημαντικότητας 5%, ενώ σε στάθμη σημαντικότητας 1% οριακά προσαρμόζονται οι παράμετροι διαλυμένο οξυγόνο και θερμοκρασία αέρα.

Στο σχήμα 3.58 παρουσιάζεται το ιστόγραμμα συχνοτήτων των χρονοσειρών διαλυμένο οξυγόνο (α) και θερμοκρασία αέρα (β), μαζί με την καλύτερα προσαρμοσμένη κανονική κατανομή.



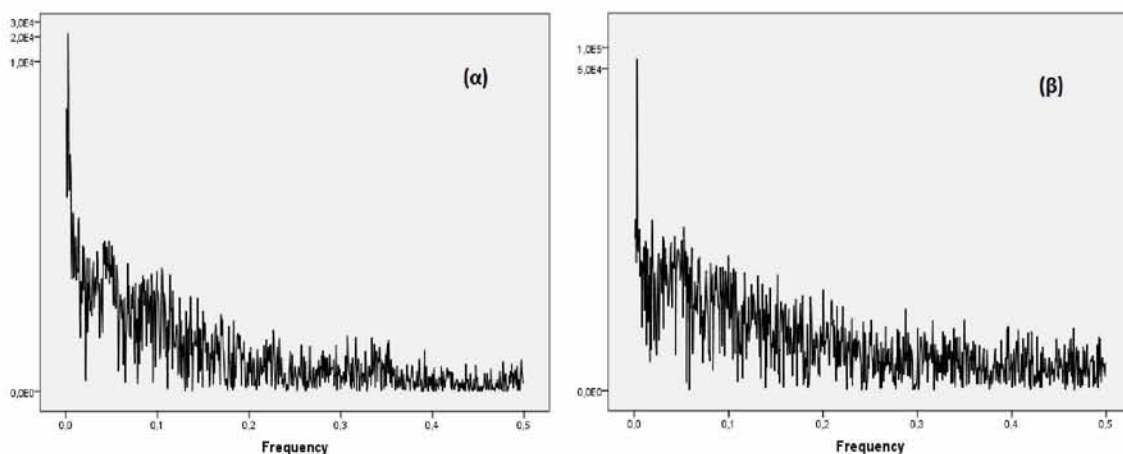
Σχήμα 3.58: Ιστόγραμμα συχνοτήτων και προσαρμοσμένη κανονική κατανομή της παραμέτρου διαλυμένο οξυγόνο.

3.4.3 Έλεγχος τάσης των παραμέτρων του Π.Σ. Νέστος

α) Αποτελέσματα ελέγχου τάσης με προσαρμογή ευθείας

Εξετάστηκαν ως προς την ύπαρξη τάσης οι παράμετροι στάθμη νερού, ηλεκτρική αγωγιμότητα, διαλυμένο οξυγόνο, pH και Redox. Για τις παραμέτρους θερμοκρασία νερού και αέρα επειδή παρουσιάζουν εποχική μεταβλητότητα, όπως και στην περίπτωση του βόρειου και κεντρικού δικτύου (παρ. 3.2.3 και 3.3.2), γίνεται πρώτα απαλοιφή της περιοδικότητας και κατόπιν έλεγχος τάσης.

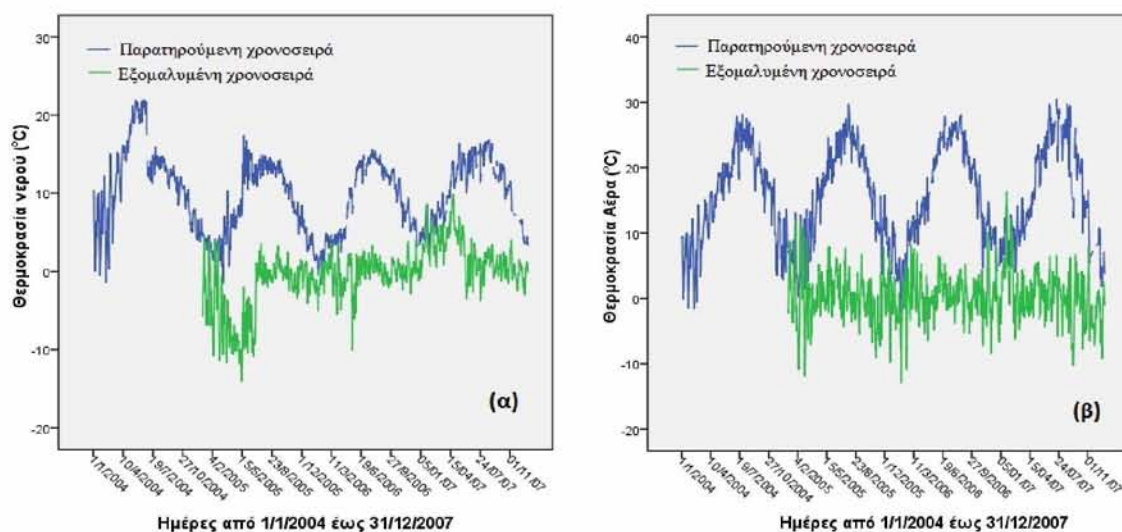
Στο σχήμα 3.59 παρουσιάζονται τα περιοδογράμματα των παραμέτρων (α) θερμοκρασία νερού και (β) αέρα, όπου γίνεται φανερή η ύπαρξη περιοδικότητας ανά 365 ημέρες.



Σχήμα 3.59: Περιοδογράμματα των παραμέτρων θερμοκρασία (α) νερού και (β) αέρα.

Για την απαλοιφή της εποχικότητας εφαρμόστηκε το φίλτρο των εποχικών διαφορών (παρ. 3.2.3). Οι νέες χρονοσειρές που προέκυψαν μετά την απαλοιφή της εποχικότητας και οι παρατηρούμενες, εμφανίζονται στο σχήμα 3.60.

Τα αποτελέσματα ελέγχου τάσης με προσαρμογή γραμμικού μοντέλου, δίνονται στον πίνακα 3.35. Σύμφωνα με τον πίνακα, οι παράμετροι στάθμη νερού, διαλυμένο οξυγόνο, Redox, pH και οριακά η θερμοκρασία νερού, παρουσιάζουν τάση και πιο συγκεκριμένα στην περίπτωση του διαλυμένου οξυγόνου, του pH και της θερμοκρασίας νερού, ο ρυθμός μεταβολής της παραμέτρου συναρτήσει του χρόνου είναι πολύ μικρός. Τέλος, οι παράμετροι ηλεκτρική αγωγιμότητα και θερμοκρασία αέρα, δεν παρουσιάζουν τάση.



Σχήμα 3.60: Παρατηρούμενη και εξομαλυμένη χρονοσειρά των παραμέτρων θερμοκρασία (α) νερού και (β) αέρα, για τον Π.Σ. Νέστο.

Πίνακας 3.35: Αποτελέσματα ελέγχου τάσης με προσαρμογή ευθείας για τον Π.Σ. Νέστο.

Π.Σ. Νέστος Ανάλυση Τάσης		Εκτίμηση σταθεράς	Τυπική απόκλιση	t	Σημαντικότητα του ελέγχου
Στάθμη νερού	α (σταθ. όρος)	85,628	1,481	57,804	0,000
	β (κλίση)	-0,026	0,002	-14,117	0,000
Ηλεκτρική αγωγιμότητα	α (σταθ. όρος)	212,676	1,664	127,785	0,001
	β (κλίση)	0,002	0,002	0,959	0,338
Διαλυμένο οξυγόνο	α (σταθ. όρος)	10,432	0,066	157,892	0,000
	β (κλίση)	-0,001	0,000	-17,682	0,000
Redox Potential	α (σταθ. όρος)	427,070	9,653	44,242	0,000
	β (κλίση)	0,137	0,030	4,543	0,000
pH	α (σταθ. όρος)	7,402	0,147	50,188	0,000
	β (κλίση)	0,001	0,000	4,430	0,000
Θερμοκρασία Νερού	α (σταθ. όρος)	-4,154	0,283	-23,332	0,000
	β (κλίση)	0,006	0,000	2,012	0,049
Θερμοκρασία Αέρα	α (σταθ. όρος)	0,679	0,337	2,019	0,044
	β (κλίση)	-0,001	0,001	-1,521	0,129

Η παράμετρος στάθμη νερού παρουσιάζει αρνητική τάση $-0,026$, το γραμμικό μοντέλο που προσαρμόζεται είναι η $y = 85,628 - 0,026 \cdot t$. Η αρνητική κλίση της ευθείας δείχνει ότι σε βάθος χρόνου η στάθμη νερού μειώνεται με αργό ρυθμό.

Η κλίση της ευθείας της παραμέτρου διαλυμένο οξυγόνο, έχει τιμή $-0,001$ δηλαδή υποδηλώνει πολύ αργή μείωση των τιμών της παραμέτρου σε σχέση με τον χρόνο. Η ευθεία παλινδρόμησης που προσαρμόζεται στη χρονοσειρά, είναι η $y = 10,432 - 0,001 \cdot t$.

Για την παράμετρο Redox η τάση εκτιμάται θετική, με τιμή κλίσης $0,137$ και εξίσωση προσαρμοσμένης ευθείας $y = 427,07 + 0,137 \cdot t$, ενώ για την παράμετρο pH παρατηρείται θετική τάση, με εξίσωση γραμμικού μοντέλου $y = 7,402 + 0,001 \cdot t$.

Για την παράμετρο θερμοκρασία νερού παρατηρούμε ότι η κλίση της ευθείας είναι σημαντική για επίπεδο σημαντικότητας 5%, ενώ είναι ασήμαντη για 1%. Το γραμμικό μοντέλο το οποίο οριακά προσαρμόζεται είναι το $y = -4,1544 + 0,006 \cdot t$.

β) Αποτελέσματα ελέγχου τάσης με το ADF test

Τα αποτελέσματα του ελέγχου τάσης σύμφωνα με το test ADF, παρουσιάζονται στον πίνακα 3.36.

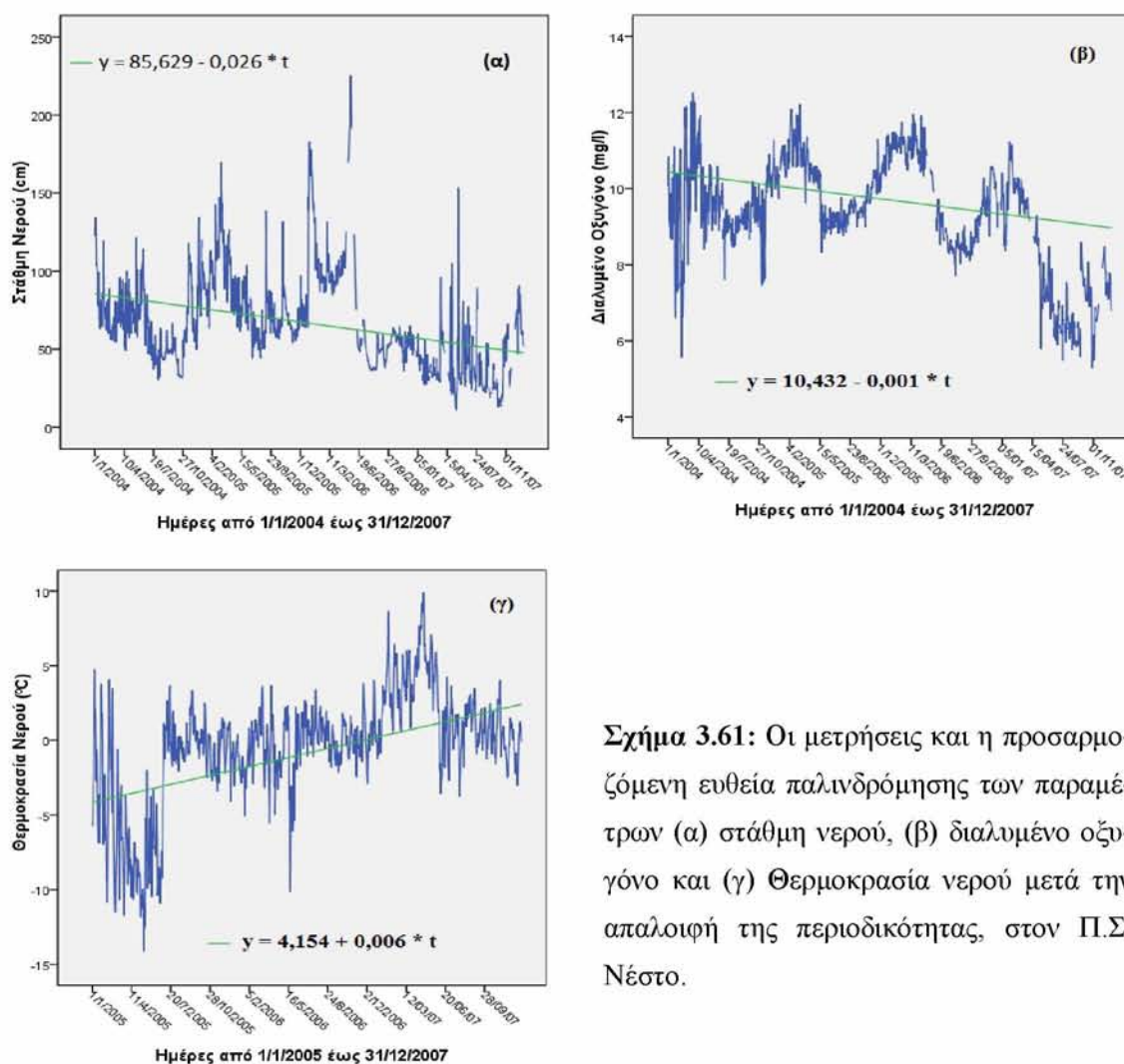
Πίνακας 3.36: Αποτελέσματα ADF ελέγχου για τον Π.Σ. Νέστο.

Π.Σ. Νέστος Ανάλυση Τάσης Έλεγχος ADF		Υπαρξη τάσης	$\hat{\delta}_1$	Σημαντικότητα του ελέγχου
Στάθμη νερού	Γραμμική τάση	ναι	-0,00262	0,0066
	Στοχαστική τάση	όχι	-	< 0,001
Ηλεκτρική αγωγιμότητα	Γραμμική τάση	όχι	0,00038	0,7345
	Στοχαστική τάση	όχι	-	< 0,001
Διαλυμένο οξυγόνο	Γραμμική τάση	ναι	-0,00011	0,0031
	Στοχαστική τάση	όχι	-	< 0,001
Redox	Γραμμική τάση	όχι	0,01273	0,2080
	Στοχαστική τάση	ναι	-	0,06452
pH	Γραμμική τάση	όχι	0,00002	0,5742
	Στοχαστική τάση	ναι	-	0,06955
Θερμοκρασία Νερού	Γραμμική τάση	ναι	0,00059	0,0001
	Στοχαστική τάση	όχι	-	< 0,001
Θερμοκρασία Αέρα	Γραμμική τάση	όχι	-0,00014	0,5376
	Στοχαστική τάση	όχι	-	< 0,001

Σύμφωνα με τον πίνακα 3.36:

- Επιβεβαιώνεται η ύπαρξη γραμμικής τάσης για τις παραμέτρους στάθμη νερού, διαλυμένο οξυγόνο και θερμοκρασία νερού.
- Τα αποτελέσματα για τις παραμέτρους Redox και pH διαφοροποιούνται. Ο έλεγχος τάσης με εφαρμογή γραμμικού μοντέλου για τις δύο παραμέτρους, έδειξε θετική τάση, ενώ ο έλεγχος ADF, έδειξε στοχαστική τάση και όχι γραμμική.
- Οι παράμετροι στάθμη νερού, ηλεκτρική αγωγιμότητα, διαλυμένο οξυγόνο, θερμοκρασία νερού και αέρα δεν παρουσιάζουν στοχαστική τάση.

Στο σχήμα 3.61 παρουσιάζονται τα γραφήματα των χρονοσειρών (α) στάθμη νερού, (β) διαλυμένου οξυγόνου και (γ) θερμοκρασία νερού μετά την απαλοιφή της περιοδικότητας, μαζί με την ευθεία που προσαρμόζεται σε αυτές.



Σχήμα 3.61: Οι μετρήσεις και η προσαρμοζόμενη ευθεία παλινδρόμησης των παραμέτρων (α) στάθμη νερού, (β) διαλυμένο οξυγόνο και (γ) Θερμοκρασία νερού μετά την απαλοιφή της περιοδικότητας, στον Π.Σ. Νέστο.

3.5 Σύγκριση των παραμέτρων παρακολούθησης των Π.Σ. Παγονέρι και Νέστος

Η στατιστική ανάλυση και η αξιολόγηση των δεδομένων από τους σταθμούς Παγονέρι και Νέστος, έχουν γίνει αντίστοιχα στις παραγράφους 3.2 και 3.4. Σε αυτήν την παράγραφο θα συγκρίνονται οι μετρήσεις των κοινών παραμέτρων των δύο σταθμών με σκοπό την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων για:

- α) Την ποιότητα και την ποσότητα των υδάτων που διατρέχουν τον ποταμό κατά την είσοδο τους στην Ελλάδα (Βόρειο δίκτυο) και κατά την εκβολή τους στο Θρακικό πέλαγος (Νότιο Δίκτυο).
- β) Την επίδραση του συστήματος των φραγμάτων και των ταμιευτήρων στα κατάντη του ποταμού.
- γ) Την προσαρμογή μοντέλων νευρωνικών δικτύων για πρόβλεψη της ποιότητας των υδάτων.

Οι παράμετροι οι οποίοι συγκρίθηκαν είναι οι εξής:

- | | |
|--------------------------|----------------------|
| 1. Στάθμη νερού | 4. pH |
| 2. Ηλεκτρική αγωγιμότητα | 5. Θερμοκρασία νερού |
| 3. Διαλυμένο οξυγόνο | 6. Θερμοκρασία αέρα |

Στον Π.Σ. Νέστο μέχρι τις 29 Ιουνίου 2005, καταγράφεται η παράμετρος του δυναμικού οξειδοαναγωγής (Redox), ενώ από την 1 Ιουλίου 2005, καταγράφεται η παράμετρος της συγκέντρωσης ιόντων υδρογόνου (pH). Συνεπώς για την παράμετρο pH χρησιμοποιήθηκαν για μεν τον Π.Σ. Παγονέρι δεδομένα από το 2004 έως το 2007, ενώ για τον Π.Σ. Νέστο χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τον Ιούλιο του 2005 έως το τέλος του 2007.

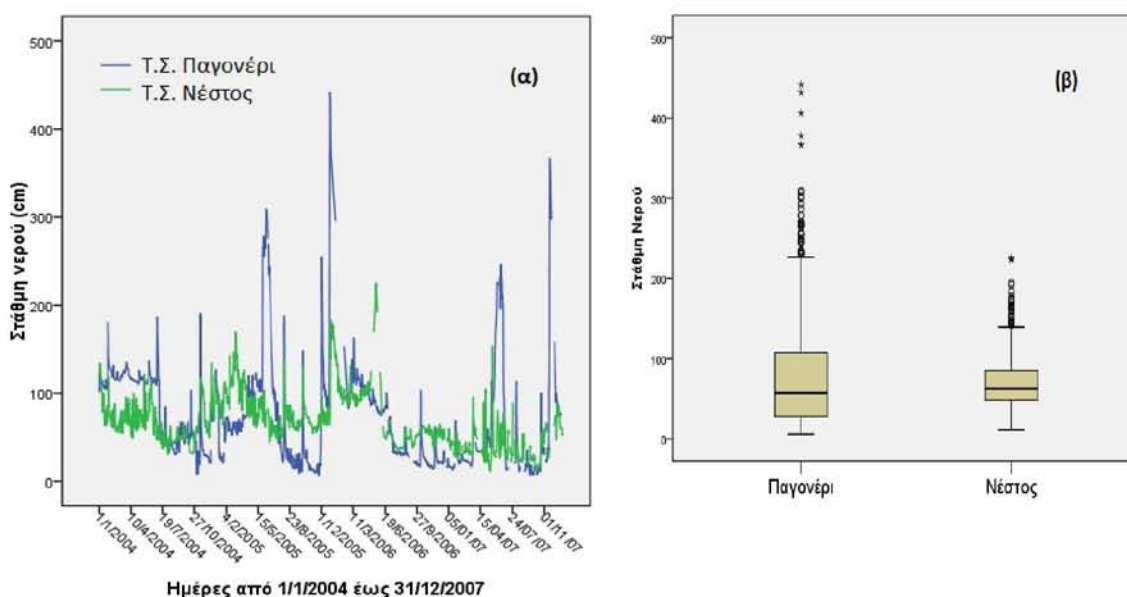
3.5.1 Αξιολόγηση των περιγραφικών στατιστικών

Στάθμη Νερού. Η ροή στο Βόρειο τμήμα στο σταθμό Παγονέρι, παρουσιάζει πολύ αιχμηρές κορυφές και έντονη μεταβλητότητα τιμών. Αντίθετα στο Δέλτα του Νέστου παρατηρείται ομαλή ροή, χωρίς μεγάλες διακυμάνσεις, εκτός από ορισμένες μέγιστες τιμές οι οποίες είναι περιορισμένης έντασης και με μικρή χρονική διάρκεια (σχ. 3.62.α).

Στον Π.Σ. Παγονέρι οι μέγιστες αιχμές που καταγράφονται κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου οφείλονται σε πλημμυρικά φαινόμενα, ενώ οι ελάχιστες τιμές κατά

τη διάρκεια της καλοκαιρινής περιόδου σε φαινόμενα ξηρασίας. Στον Π.Σ. Νέστο εκτός από τους χειμερινούς μήνες, οι περίοδοι υψηλής στάθμης παρατηρούνται και κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, γεγονός που οφείλεται στη λειτουργία των φραγμάτων Θησαυρού και Πλατανόβρυσης ως έργων αιχμής για τις αυξημένες ανάγκες σε ηλεκτρικό ρεύμα της Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης τους καλοκαιρινούς μήνες με τη λειτουργία των κλιματιστικών.

Από το σχήμα 3.62.β γίνεται φανερό ότι η διαφορά μεταξύ των εμπειρικών κατανομών της παραμέτρου στους δύο Π.Σ. οφείλεται κυρίως στο διαφορετικό εύρος των κατανομών και στις μέγιστες ακραίες τιμές (outliers) οι οποίες είναι εντονότερες στον Π.Σ. Παγονέρι. Ως προς τις ελάχιστες τιμές φαίνεται ότι οι μετρήσεις δεν διαφοροποιούνται σημαντικά.



Σχήμα 3.62: α) Η χρονοσειρά και β) η εμπειρική κατανομή της παραμέτρου στάθμη νερού, για τους Π.Σ. Παγονέρι και Νέστο.

Οι πλημμυρικές παροχές του ποταμού Νέστου ανάντη των ταμιευτήρων συγκρατούνται στις φραγματογενείς λίμνες και δε συνεχίζουν τη ροή προς τις εκβολές. Επομένως υπάρχει εξομάλυνση της ροής του Νέστου στην κοίτη κατάντη των ΥΗΣ Θησαυρού και Πλατανόβρυσης. Η εξομάλυνση αυτή τείνει να αμβλύνει κυρίως τις μέγιστες και λιγότερο τις ελάχιστες τιμές της παροχής που παρατηρούνταν πριν την κατασκευή των μεγάλων φραγμάτων.

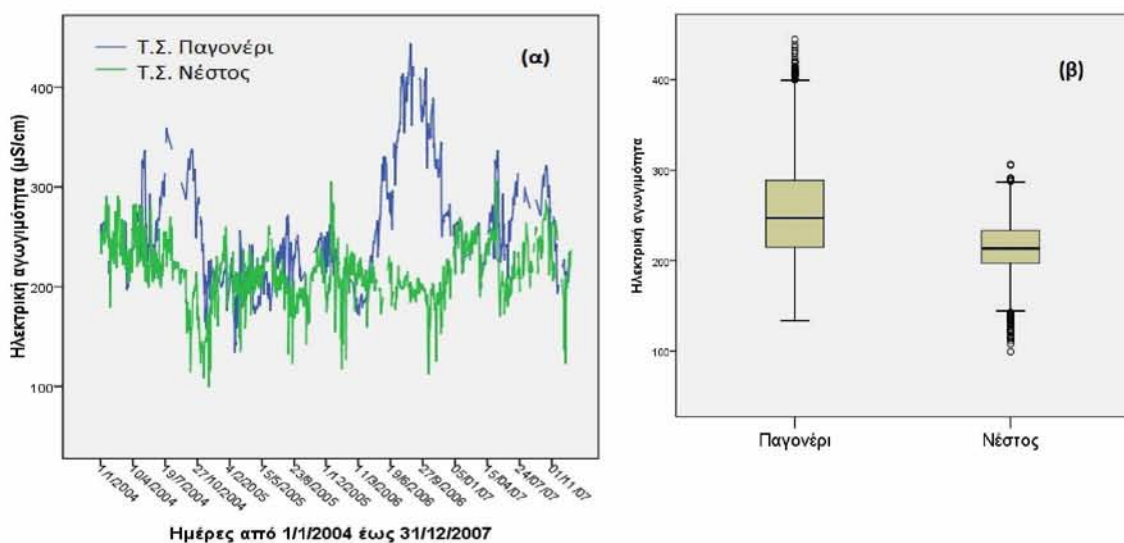
Για καθένα από τους δύο σταθμούς για την παράμετρο στάθμη νερού, έγινε έλεγχος προσαρμογής στην κανονική και στη λογαριθμοκανονική κατανομή καθώς και έλεγχος τάσης. Τα αποτελέσματα του πρώτου ελέγχου ήταν αρνητικά ως προς την προσαρμογή στις δύο κατανομές, ενώ ο έλεγχος τάσης έδειξε ύπαρξη αρνητικής γραμμικής τάσης και για τους δύο σταθμούς, που σημαίνει ότι υπάρχει μια αργού ρυθμού μακροχρόνια μείωση της στάθμης του νερού στον ποταμό.

Γίνεται φανερό ότι, η φυσική υδροπερίοδος του Νέστου έχει αλλάξει (Psilonikos *et al.* 2005). Αυτό είναι προφανές κυρίως κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, όταν η στάθμη του νερού ανεβαίνει στη ροή του ποταμού, τις λίμνες και τους υδροφόρους ορίζοντες του δέλτα (Psilonikos *et al.* 2003) με αποτέλεσμα την αναβάθμιση του φυσικού περιβάλλοντος. Αυτή η μόνιμη αύξηση κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών οφείλεται όπως αναφέρθηκε, στη λειτουργία των φραγμάτων του Θησαυρού και της Πλατανόβρυσης που σκοπό έχει την ικανοποίηση των αυξημένων ενεργειακών αναγκών στις Περιφέρειες Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης. Αντίστοιχα, κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών, οι μέγιστες κορυφές των πλημμυρών είναι πιο ήπιες, συμβάλλοντας έτσι στην αντιπλημμυρική προστασία του δέλτα.

Ηλεκτρική Αγωγιμότητα. Συγκρίνοντας τις μετρήσεις της παραμέτρου στους δύο σταθμούς παρατηρείται ότι οι τιμές στο σταθμό Νέστο παρουσιάζουν μικρή διακύμανση, ενώ οι τιμές στο σταθμό Παγονέρι παρουσιάζουν πολύ απότομες μεταβολές και μεγάλες διακυμάνσεις (σχ. 3.63.α). Το εύρος της δειγματικής κατανομής είναι πολύ μικρότερο για τον Π.Σ. Νέστο, παρουσιάζει σχετική συμμετρία, υπάρχουν πιθανές ακραίες τιμές κυρίως ελάχιστες, ενώ για τον Π.Σ. Παγονέρι υπάρχουν πιθανές ακραίες τιμές μόνο μέγιστες (σχ. 3.63.β).

Γίνεται αντιληπτό ότι αν και κατά την εισροή του Νέστου στην Ελλάδα η ηλεκτρική αγωγιμότητα παρουσιάζει απότομες διακυμάνσεις και αιχμές οι οποίες οφείλονται σε αντίστοιχες απότομες διακυμάνσεις της στάθμης νερού, φτάνοντας στο Δέλτα του ποταμού οι τιμές της τείνουν να ομαλοποιηθούν.

Η παράμετρος ηλεκτρική αγωγιμότητα δεν ακολουθεί κανονική ή λογαριθμοκανονική κατανομή, ενώ σε ότι αφορά την τάση, παρουσιάζει μικρή θετική γραμμική τάση στο σταθμό Παγονέρι και μηδενική τάση στο Νέστο. Η διαφοροποίηση του αποτελέσματος του ελέγχου τάσης, εξηγείται από το γεγονός ότι η ανθρωπογενής ροή στη Δελταϊκή πεδιάδα έχει ομαλοποιηθεί.

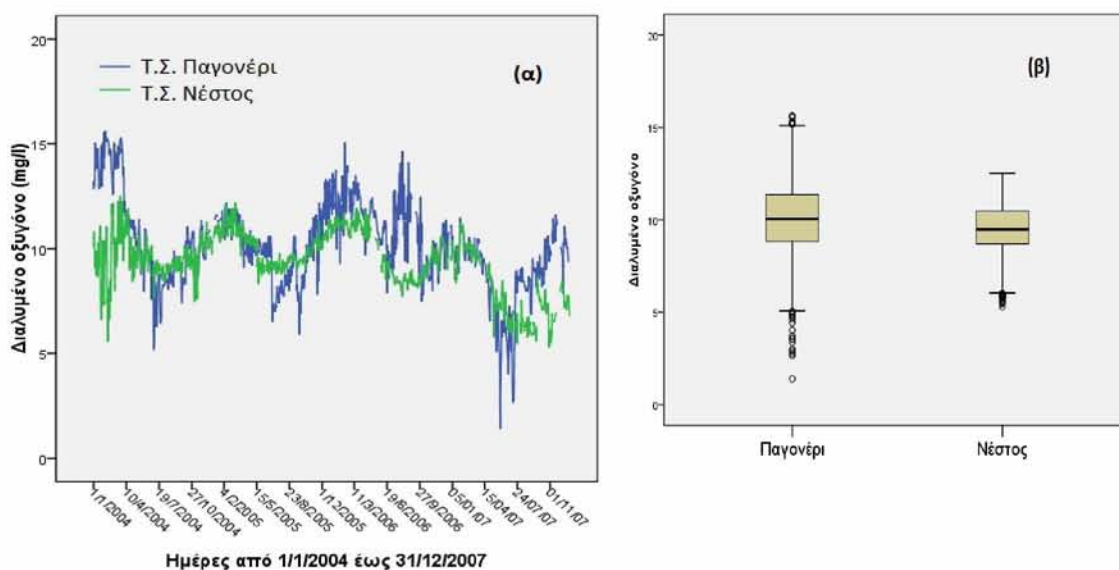


Σχήμα 3.63: α) Η χρονοσειρά και β) η εμπειρική κατανομή της παραμέτρου ηλεκτρική αγωγιμότητα, για τους Π.Σ. Παγονέρι και Νέστο.

Οι μετρήσεις της παραμέτρου και στους δύο σταθμούς δείχνουν ότι, σε ότι αφορά την παράμετρο της ηλεκτρικής αγωγιμότητας το νερό βρίσκεται εντός των ορίων για αστική και αρδευτική χρήση καθώς το σύνολο των τιμών είναι κάτω από $1000 \mu\text{S/cm}$ και κάτω των $400 \mu\text{S/cm}$, όρια τα οποία θέτουν η Ελληνική (ΚΥΑ 46399/1352/1986) και η Ευρωπαϊκή νομοθεσία (WHO 1984, EC 2000) αντίστοιχα.

Διαλυμένο Οξυγόνο. Η σύγκριση των τιμών της παραμέτρου δείχνει ότι γενικά διατηρούνται σε υψηλά επίπεδα στον Π.Σ. Νέστο κυμαινόμενες από 5 έως $12,5 \text{ mg/l}$, ενώ στον Π.Σ. Παγονέρι, το εύρος των τιμών είναι μεταξύ $1,40$ και $15,62 \text{ mg/l}$ για το σύνολο της περιόδου έρευνας (σχ. 3.64.α). Παρατηρείται επίσης, μεγαλύτερη συγκέντρωση των τιμών για τον Π.Σ. Νέστο (μικρότερη τυπική απόκλιση), καθώς και λιγότερες ακραίες τιμές (σχ. 3.64.β).

Όπως και κατά τη σύγκριση των προηγούμενων παραμέτρων, ο σταθμός Παγονέρι παρουσιάζει πολύ έντονες διακυμάνσεις με απότομες μεταβολές τόσο στις μέγιστες όσο και στις ελάχιστες τιμές. Παρόμοιες μεταβολές παρατηρούνται στο δέλτα του Νέστου, στον ομώνυμο σταθμό, σε μικρότερη όμως κλίμακα. Η μέση τιμή του διαλυμένου οξυγόνου είναι ελαφρά υψηλότερη στον Π.Σ. Παγονέρι ($10,13 \text{ mg/l}$) από ότι στον Π.Σ. Νέστο ($9,42 \text{ mg/l}$).



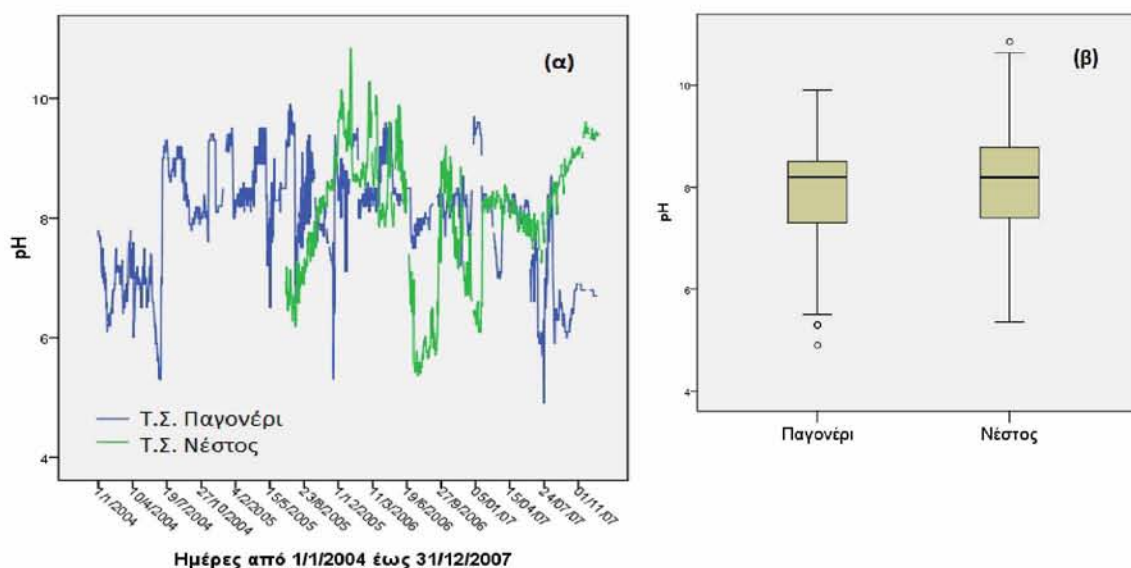
Σχήμα 3.64: α) Η χρονοσειρά και β) η εμπειρική κατανομή της παραμέτρου διαλυμένο οξυγόνο, για τους Π.Σ. Παγονέρι και Νέστο.

Η χρονοσειρά της παραμέτρου προσαρμόζεται για στάθμη σημαντικότητας 1% στην κανονική κατανομή και για τους δύο σταθμούς. Ως προς τον έλεγχο τάσης παρουσιάζει αρνητική γραμμική τάση, γεγονός το οποίο συμφωνεί με τα αποτελέσματα του ελέγχου τάσης της παραμέτρου στάθμη νερού.

pH. Οι τιμές της παραμέτρου και για τους δύο σταθμούς κυμαίνονται από 5 μέχρι 10, με μέση τιμή 7,9 για τον Π.Σ. Παγονέρι και 8,03 για τον Π.Σ. Νέστο, τιμή σύμφωνη με το pH των υδάτων των περισσότερων ελληνικών ποταμών (σχ. 3.65.α). Η εμπειρική κατανομή για τις μετρήσεις του Π.Σ. Παγονέρι παρουσιάζει μεγαλύτερη ασυμμετρία, με ελάχιστες πιθανές ακραίες τιμές, ενώ οι μετρήσεις του Π.Σ. Νέστου παρουσιάζουν μεγαλύτερη συμμετρία, μεγαλύτερο εύρος τιμών και μόνο μια πιθανή ακραία τιμή (σχ. 3.65.β).

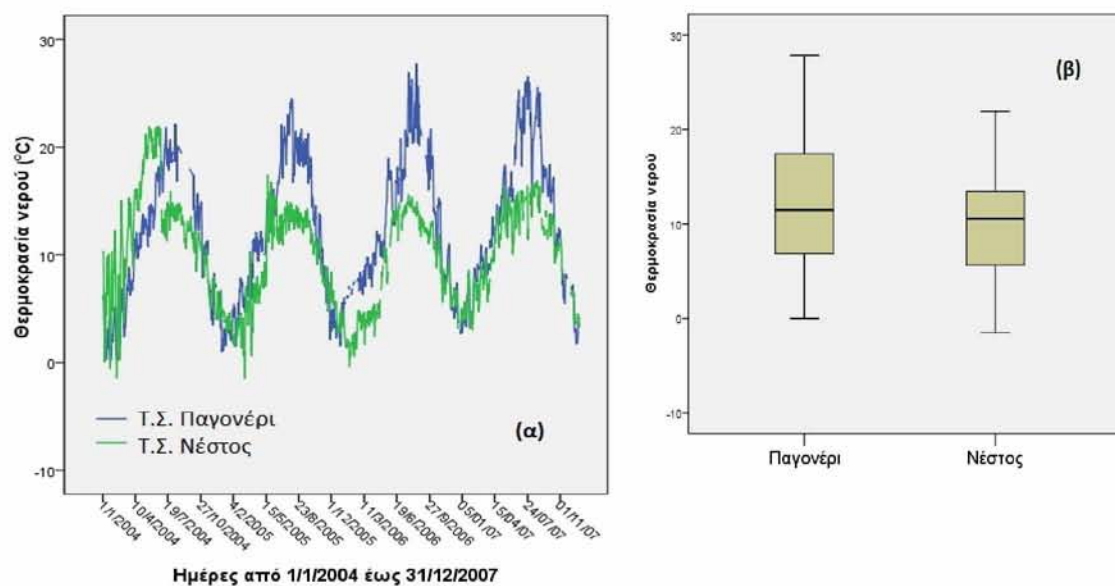
Οι δύο χρονοσειρές της παραμέτρου pH ελέγχθηκαν ως προς την προσαρμογή τους στην κανονική και στη λογαριθμοκανονική κατανομή. Και στις δύο περιπτώσεις η αποδοχή της προσαρμογής απορρίφθηκε. Σε κανένα από τους δύο σταθμούς δεν διαπιστώθηκε γραμμική τάση ενώ μόνο στον Π.Σ. Νέστου παρουσιάστηκε στοχαστική τάση.

Τέλος, ως προς την ποιότητα των υδάτων του ποταμού Νέστο, με βάση την παράμετρο pH, γίνεται φανερό ότι είναι γενικά σε καλή κατάσταση και κατάλληλο για τη διατήρηση της υδρόβιας ζωής.



Σχήμα 3.65: α) Η χρονοσειρά και β) η εμπειρική κατανομή της παραμέτρου pH, για τους Π.Σ. Παγονέρι και Νέστο.

Θερμοκρασία νερού Συγκρίνοντας τους δύο σταθμούς κατά τη διάρκεια της περιόδου έρευνας, η εποχική συμπεριφορά της θερμοκρασίας του νερού εμφανίζεται αρκετά όμοια, με μικρές διαφοροποιήσεις στις ελάχιστες τιμές και μεγαλύτερες στις μέγιστες (σχ. 3.66.α). Αξιοσημείωτο είναι ότι τους καλοκαιρινούς μήνες παρατηρείται μια διαφορά τιμών της τάξης των 5-10 °C, με μεγαλύτερες τιμές να καταγράφονται στον Π.Σ. Παγονέρι.

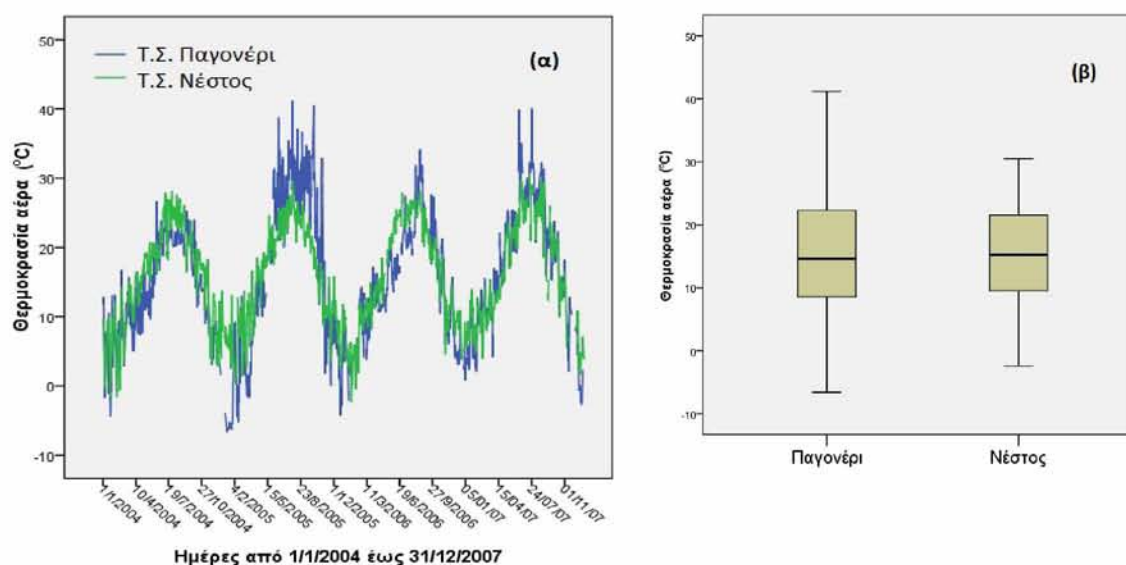


Σχήμα 3.66: α) Η χρονοσειρά και β) η εμπειρική κατανομή της παραμέτρου θερμοκρασία νερού, για τους Π.Σ. Παγονέρι και Νέστο.

Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί του Θησαυρού και της Πλατανόβρυσης χρησιμοποιούνται για τις αυξημένες ανάγκες του δικτύου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, οπότε από το ταμιευτήρα του Θησαυρού, αντλείται νερό από τα βαθύτερα στρώματα, περίπου 30 έως 60m, (εξαρτάται από τη στάθμη του φράγματος) δηλαδή από το μόνιμο ψυχρό υπολίμνιο. Η ερμηνεία αυτή επιβεβαιώνει τα δεδομένα μέτρησης από το φράγμα Θησαυρού από προηγούμενες μελέτες (Moustaka-Gouni *et al.* 2000, Sentas & Psilovikos 2010). Αυτές οι χαμηλές θερμοκρασίες δεν είναι δυνατόν να προσεγγίσουν τις φυσικές τιμές, δηλαδή τις θερμοκρασίες του νερού το καλοκαίρι κατά τη διάρκεια της πορείας των 65Km του ποταμού κατάντη της ροής των φραγμάτων μέχρι τις εκβολές του.

Η παράμετρος θερμοκρασία νερού δεν προσαρμόζεται σε καμία από τις κατανομές για τις οποίες έγινε έλεγχος προσαρμογής, δεν παρουσίασε γραμμική τάση, ενώ μόνο η χρονοσειρά του Π.Σ. Παγονέρι παρουσίασε στοχαστική τάση για στάθμη σημαντικότητας περίπου 1%.

Θερμοκρασία αέρα. Η θερμοκρασία του αέρα παρουσιάζει την αναμενόμενη ανά έτος εποχικότητα και εύρος τιμών 47,8 °C και 32,9 °C για τους Π.Σ. Παγονέρι και Νέστο αντίστοιχα (σχ. 3.67.β). Τα μέγιστα και ελάχιστα τα οποία καταγράφονται κατά τους θερινούς και χειμερινούς μήνες στον Π.Σ. Παγονέρι είναι εντονότερα, σε σχέση με τον Π.Σ. Νέστο στον οποίο οι μετρήσεις εμφανίζονται χωρίς έντονες διακυμάνσεις.



Σχήμα 3.67: α) Η χρονοσειρά και β) η εμπειρική κατανομή της παραμέτρου θερμοκρασία αέρα, για τους Π.Σ. Παγονέρι και Νέστο.

Η θερμοκρασία αέρα προσαρμόζεται οριακά (επίπεδο σημαντικότητας 1%) στην κανονική κατανομή στον Π.Σ. Νέστο, ενώ δεν προσαρμόζεται σε καμία κατανομή στον Π.Σ. Παγονέρι. Οι μετρήσεις στο σταθμό Παγονέρι δεν παρουσιάζουν γραμμική τάση, ενώ παρουσιάζουν στοχαστική. Αντιθέτως, στο σταθμό Νέστο παρουσιάζουν αρνητική γραμμική τάση και όχι στοχαστική.

3.5.2 Αξιολόγηση της δυναμικής των παραμέτρων

Από εφαρμογή της περιγραφικής στατιστικής ανάλυσης μεταξύ των κοινών παραμέτρων των δύο σταθμών, διαπιστώνεται μια διαφοροποίηση της εμπειρικής κατανομής των παραμέτρων δηλαδή αλλαγή της μέσης τιμής, του εύρους ή του πλήθους των ακραίων τιμών. Για περαιτέρω διερεύνηση της δομής και της δυναμικής των παραμέτρων, έγινε έλεγχος των αυτοσυσχετίσεων κάθε μιας παραμέτρου ξεχωριστά, έλεγχος συσχετίσεων μεταξύ των παραμέτρων κάθε σταθμού, προσαρμογή στοχαστικών μοντέλων και σύγκριση των στατιστικών των μοντέλων που προσαρμόστηκαν.

Με την ανάλυση των αυτοσυσχετίσεων γίνεται η στατιστική επιβεβαίωση τυχόν αλλαγής της εσωτερικής δυναμικής των αντίστοιχων παραμέτρων των δύο σταθμών. Παρατηρούμε δηλαδή αν διαφοροποιήθηκαν οι αυτοσυσχετίσεις μεταξύ των αντίστοιχων χρονοσειρών. Πρακτικά εμφάνιση ή αύξηση των αυτοσυσχετίσεων σε μια χρονοσειρά σημαίνει ότι οι παρατηρήσεις της δεν είναι ασυσχέτιστες αλλά οργανωμένες κάτω από μια συγκεκριμένη δομή.

Η ανάλυση συσχετίσεων εκτιμά τις συσχετίσεις μεταξύ των παραμέτρων, προσδιορίζει την κατεύθυνση που μία παράμετρος ενεργεί σε μία άλλη δηλαδή κατά πόσο μια παράμετρος αιτιάζει ή αιτιάζεται από μία άλλη ή είναι ανεξάρτητη από αυτή. Η διαδικασία αυτή προηγείται της κατασκευής πολυμεταβλητών στοχαστικών μοντέλων γιατί καθορίζει το σύνολο των ανεξάρτητων και εξαρτημένων μεταβλητών που θα συμμετέχουν στην κατασκευή του μοντέλου.

Στην παρούσα παράγραφο προσαρμόστηκαν μοντέλα νευρωνικών δικτύων στην παράμετρο διαλυμένο οξυγόνο, στους σταθμούς Παγονέρι και Νέστο, με σκοπό την αξιολόγηση της ικανότητας τους για έλεγχο και πρόβλεψη της ποιότητας σε ότι αφορά τη συγκεκριμένη παράμετρο.

3.5.2.1 Έλεγχος αυτοσυσχετίσεων

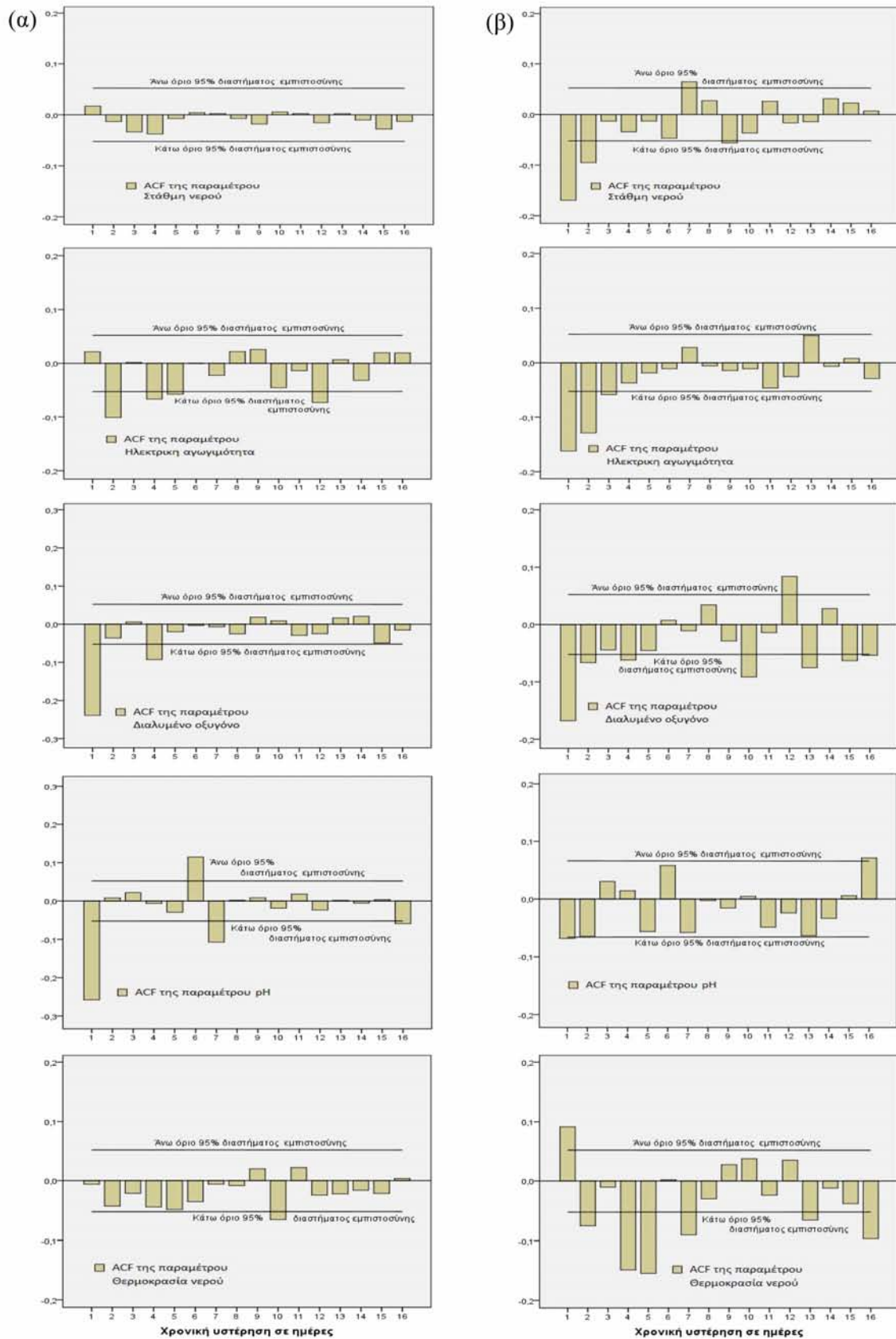
Στην ανάλυση χρονικών σειρών η συνάρτηση αυτοσυσχετίσης υστέρησης k , εκφράζει τη συσχέτιση μεταξύ των τιμών της ίδιας τυχαίας μεταβλητής σε δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές t και $t+k$ (παρ. 2.4.3), δηλαδή αναφέρεται στην εσωτερική δυναμική της παραμέτρου. Στο σχήμα 3.68 εμφανίζονται τα γραφήματα της δειγματικής συνάρτησης αυτοσυσχετίσης (AutoCorrelation Function, ACF) όλων των παραμέτρων των δύο σταθμών αφού πρώτα αφαιρέθηκαν τα στοιχεία μη στασιμότητας όπου υπήρχαν.

Παρατηρείται ότι για τον Π.Σ. Νέστο οι περισσότερες από τις παραμέτρους παρουσιάζουν μεγαλύτερο αριθμό σημαντικών αυτοσυσχετίσεων, γεγονός το οποίο δείχνει ότι οι μετρήσεις κάθε ημέρας είναι άμεσα αυτοσυσχετισμένες με τις μετρήσεις των προηγούμενων ημερών σε αντίθεση με τον Π.Σ. Παγονέρι όπου η εικόνα δεν είναι τόσο ξεκάθαρη.

Ειδικότερα, η παράμετρος στάθμη νερού στον Π.Σ. Παγονέρι δεν παρουσιάζει σημαντικές αυτοσυσχετίσεις, πράγμα που σημαίνει ότι η μέτρηση της κάθε ημέρας είναι ασυσχέτιστη με τις μετρήσεις των προηγούμενων ημερών για τη στάσιμη χρονοσειρά. Αντίθετα στον Π.Σ. Νέστο παρουσιάζεται ισχυρή αυτοσυσχέτιση, υστέρησης 1 και 2 και οριακή υστέρησης 7 και 9 δηλαδή η παροχή της κάθε ημέρας έχει άμεση σχέση με τις μετρήσεις προηγούμενων ημερών. Παρόμοια συμπεριφορά παρουσιάζει και η παράμετρος ηλεκτρική αγωγιμότητα η οποία στο σταθμό Νέστο έχει σημαντικές τις δύο πρώτες αυτοσυσχετίσεις υστέρησης 1 και 2.

Ισχυρές επίσης αυτοσυσχετίσεις παρουσιάζουν οι παράμετροι διαλυμένο οξυγόνο και θερμοκρασία νερού για το σταθμό Νέστο, ενώ λιγότερες παρατηρούνται στο σταθμό Παγονέρι. Αντίθετη συμπεριφορά παρουσιάζει η παράμετρος pH η οποία ενώ στο σταθμό Παγονέρι έχει σημαντικές αυτοσυσχετίσεις, οι τιμές της παραμέτρου εμφανίζονται ασυσχέτιστες για το σταθμό Νέστο.

Από την παραπάνω ανάλυση γίνεται φανερό ότι οι μετρήσεις των παραμέτρων στον Π.Σ. Νέστο παρουσιάζουν ισχυρότερες αυτοσυσχετίσεις δηλαδή η εσωτερική δομή τους παρουσιάζεται περισσότερο οργανωμένη. Η φυσική ερμηνεία του γεγονότος αυτού είναι ότι οι χρονοσειρές στον Π.Σ. Νέστο δεν παρουσιάζουν απότομες διακυμάνσεις, δηλαδή εμφανίζονται ομαλοποιημένες ως προς τις αιχμές τους.



Σχήμα 3.68: Διαγράμματα αυτοσυσχετίσεων των παραμέτρων των σταθμών (α) Παγονέρι (β) Νέστος.

Οι παρατηρήσεις που καταγράφονται στον ποταμό Νέστο κατάντη των φραγμάτων, επηρεάζονται από τις τεχνητές λίμνες Θησαυρού και Πλατανόβρυσης. Το νερό των τεχνητών λιμνών είναι σαφώς πιο στάσιμο σε σχέση με το νερό του ποταμού και είναι πιθανό να μη μεταβάλλονται τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του με την ίδια ταχύτητα και δυναμική όπως σε ένα φυσικό ποτάμιο σύστημα (Παγονέρι). Τα παραπάνω ενισχύουν το συμπέρασμα ότι μετά την κατασκευή των έργων Θησαυρού και Πλατανόβρυσης στην ενδοορεινή κοιλάδα, η ροή του ποταμού έχει κανονικοποιηθεί, τόσο από ποσοτικής όσο και από ποιοτικής σκοπιάς. Έτσι παρουσιάζονται σημαντικές αυτοσυσχετίσεις οι οποίες στην πράξη ερμηνεύονται από το γεγονός ότι για κάθε συγκεκριμένη παράμετρο της ποιότητας, οι μετρήσεις με διαφορά 1,2, ..., 7,9 ακόμα και 15 ημερών εξαρτώνται μεταξύ τους. Εδώ φαίνεται ξεκάθαρα η αργή μεταβολή των παραμέτρων ενός υδατικού οικοσυστήματος που τροφοδοτείται από τεχνητή λίμνη, σε σχέση με την ταχεία μεταβολή των παραμέτρων ενός φυσικού υδατικού οικοσυστήματος.

3.5.2.2 Έλεγχος συσχετίσεων

Όπως αναφέρθηκε (παρ. 2.4.13) για να ελεγχθεί η συσχέτιση μεταξύ χρονικών σειρών, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε 1) τον μη παραμετρικό συντελεστή συσχέτισης κατά Spearman ή κατά Kendall, 2) τη μέθοδο της προλευκανσης (prewhitening) ή 3) την υπό συνθήκη αιτιότητα κατά Granger. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν η μέθοδος της προλευκανσης με χρήση του στατιστικού πακέτου SPSS και η μέθοδος Conditional Granger Causality, με χρήση του πακέτου MatLab. Και οι δύο μέθοδοι εφαρμόστηκαν για τις παραμέτρους κάθε σταθμού ξεχωριστά και συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

Σύμφωνα με τη μέθοδο της προλευκανσης προσαρμόστηκαν ARIMA μοντέλα στις παραμέτρους κάθε Π.Σ. και εκτιμήθηκαν οι μεταβλητές των σφαλμάτων $\hat{e}_{i,t} = y_{i,t} - \hat{y}_{i,t}$ που προέκυψαν από την προσαρμογή των παραπάνω μοντέλων στις αρχικές χρονοσειρές. Βάσει της θεωρίας των στοχαστικών μοντέλων οι μεταβλητές αυτές ακολουθούν κανονική κατανομή και συνεπώς ο κατάλληλος συντελεστής συσχέτισης δίνεται από το κριτήριο του Pearson. Για όλους τους συνδυασμούς των παραμέτρων κάθε Π.Σ. υπολογίστηκε ο συντελεστής συσχέτισης κατά Pearson, αξιολογήθηκε η σημαντικότητά του και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους πίνακες 3.37 και 3.38.

Πίνακας 3.37: Συντελεστές συσχέτισης κατά Pearson μεταξύ των παραμέτρων του Π.Σ. Παγονέρι.

Π.Σ. Παγονέρι		Pearson Criterion					
		H	ECw	pH	DO	Tw	Ta
H	P – Coeff.	-	-0,144**	-0,061*	0,029**	-0,114**	0,031
	P – Sig.	-	0,000	0,019	0,006	0,000	0,237
ECw	P – Coeff.	-	-	-0,015	-0,075**	0,125**	0,078*
	P – Sig.	-	-	0,547	0,004	0,000	0,013
pH	P – Coeff.	-	-	-	0,041*	-0,008*	0,025
	P – Sig.	-	-	-	0,014	0,012	0,753
DO	P – Coeff.	-	-	-	-	-0,076**	-0,05
	P – Sig.	-	-	-	-	0,004	0,056
Tw	P – Coeff.	-	-	-	-	-	0,229**
	P – Sig.	-	-	-	-	-	0,000
Ta	P – Coeff.	-	-	-	-	-	-
	P – Sig.	-	-	-	-	-	-

Πίνακας 3.38: Συντελεστές συσχέτισης κατά Pearson μεταξύ των παραμέτρων του Π.Σ. Νέστο.

Π.Σ. Νέστος		Pearson Criterion					
		H	ECw	pH	DO	Tw	Ta
H	P – Coeff.	-	-0,354**	0,044*	0,036**	-0,188*	0,003
	P – Sig.	-	0,000	0,036	0,004	0,014	0,337
ECw	P – Coeff.	-	-	-0,001	-0,065**	0,145**	0,009
	P – Sig.	-	-	0,557	0,006	0,000	0,720
pH	P – Coeff.	-	-	-	0,033*	-0,007*	0,000
	P – Sig.	-	-	-	0,012	0,011	0,812
DO	P – Coeff.	-	-	-	-	-0,090**	-0,038
	P – Sig.	-	-	-	-	0,001	0,147
Tw	P – Coeff.	-	-	-	-	-	0,544**
	P – Sig.	-	-	-	-	-	0,000
Ta	P – Coeff.	-	-	-	-	-	-
	P – Sig.	-	-	-	-	-	-

Σε κάθε κελί του πίνακα αναγράφονται η τιμή του συντελεστή συσχέτισης και η σημαντικότητά του. Με ένα αστεράκι σημειώνονται οι περιπτώσεις για τις οποίες ο συντελεστής συσχέτισης είναι σημαντικός σε στάθμη σημαντικότητας (σ.σ.) 5%, ενώ με δύο αστεράκια εκείνες για τις οποίες ο συντελεστής συσχέτισης είναι σημαντικός σε επίπεδο 1%.

Παρατηρούμε ότι:

- Η παράμετρος **στάθμη νερού** και στους δύο Π.Σ., σε επίπεδο σημαντικότητας 1% παρουσιάζει αρνητική συσχέτιση με την παράμετρο ηλεκτρική αγωγιμότητα, γεγονός που έχει τεκμηριωθεί (Psilovikos *et al.* 2006, Margoni & Psilovikos 2010) και αποδεικνύεται έτσι η αντίστροφη τάση με την οποία εμφανίζονται οι 2 αυτές παράμετροι. Επίσης, αρνητική συσχέτιση εμφανίζει και με τη θερμοκρασία νερού καθώς η στάθμη νερού ανέρχεται σε πλημμυρικά φαινόμενα ως επί το πλείστον το χειμώνα. Παρόμοια αλλά θετική συσχέτιση παρουσιάζει με το διαλυμένο οξυγόνο καθώς η αύξηση της στάθμης με νερά βροχής ή τήξης χιονιού έχει συνήθως σαν αποτέλεσμα την οξυγόνωση των υδάτων. Τέλος, είναι αρνητικά συσχετισμένη με το pH σε σ.σ. 5% ενώ ασυσχέτιστη με τη θερμοκρασία αέρα.
- Η παράμετρος **ηλεκτρική αγωγιμότητα** και για τους δύο Π.Σ. είναι αρνητικά συσχετισμένη με το διαλυμένο οξυγόνο, θετικά συσχετισμένη με τη θερμοκρασία νερού σε σ.σ. 1% και ασυσχέτιστη με την παράμετρο pH. Με τη θερμοκρασία αέρα παρουσιάζει θετική σημαντική συσχέτιση σε σ.σ. 5% για τον Π.Σ. Παγονέρι και είναι ασυσχέτιστη για τον Π.Σ. Νέστο.
- Η παράμετρος **pH** παρουσιάζει θετική συσχέτιση με την παράμετρο διαλυμένο οξυγόνο, αρνητική συσχέτιση με τη θερμοκρασία νερού (σ.σ. 1%) και μηδενική συσχέτιση με τη θερμοκρασία αέρα. Τα αποτελέσματα είναι παρόμοια και για τους δύο Π.Σ.
- Η παράμετρος **διαλυμένο οξυγόνο** και στους δύο Π.Σ. είναι αρνητικά συσχετισμένη με τη θερμοκρασία νερού σε σ.σ. 1% και ασυσχέτιστη με τη θερμοκρασία αέρα.
- Τέλος, η παράμετρος **θερμοκρασία νερού** παρουσιάζει υψηλή θετική συσχέτιση με τη θερμοκρασία αέρα και για τους δύο σταθμούς.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στους δύο πίνακες, μπορούμε να πούμε ότι είναι παρόμοια με ελάχιστες διαφοροποιήσεις. Αξιοσημείωτο είναι ότι η πιθανότητα αποδοχής της μηδενικής υπόθεσης ($H_0 : \rho = 0$) είναι μεγαλύτερη για τον Π.Σ. Νέστο ενώ η πιθανότητα απόρριψης της μηδενικής υπόθεσης ($H_1 : \rho \neq 0$) είναι μικρότερη. Δηλαδή, οι σημαντικότητες των ελέγχων στον πίνακα του Π.Σ. Νέστος είναι πολύ πιο ισχυρές, οδηγώντας σε ένα πολύ πιο ξεκάθαρο αποτέλεσμα σχετικά με τη συσχέτιση μεταξύ των παραμέτρων. Εδώ επιβεβαιώνονται και τα προηγούμενα αποτελέσματα σχετικά με τη σταθερότητα των μετρήσεων και τη χαμηλή δυναμική του οικοσυστήματος, όσο αφορά τις απότομες αλλαγές στις τιμές των παραμέτρων.

Με τη μέθοδο της προλεύκανσης, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ελέγχεται η συσχέτιση των παραμέτρων ανά δύο. Θεωρώντας ότι οι παράμετροι του κάθε σταθμού αποτελούν συνιστώσες μιας πολυδιάστατης χρονοσειράς (παρ. 2.4), εφαρμόζεται το κριτήριο της υπό συνθήκη αιτιότητας κατά Granger, έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί ο έλεγχος των συσχετίσεων των παραμέτρων ανά δύο λαμβάνοντας όμως υπόψη την επίδραση των υπολοίπων παραμέτρων και επιπλέον να αναζητηθεί η κατεύθυνση της κάθε συσχέτισης.

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του ελέγχου CGC, για τις παραμέτρους κάθε σταθμού παρακολούθησης, παρουσιάζονται στους πίνακες 3.39 και 3.40.

Πίνακας 3.39: Σημαντικότητα του ελέγχου CGC για τις παραμέτρους του Π.Σ. Παγονέρι.

Π.Σ. Παγονέρι	Conditional Granger Causality					
	H	ECw	pH	DO	Tw	Ta
H	-	0,0003**	0,0527	0,0030**	0,0010**	0,0755
ECw	0,0188*	-	0,0550	0,0055**	0,0030**	0,0557
pH	0,0435*	0,0152*	-	0,0551	0,0765	0,0815
DO	0,0519	0,0156*	0,0138*	-	0,0007**	0,0716
Tw	0,0219*	0,0015**	0,0111*	0,0008**	-	0,0562
Ta	0,0514	0,0154*	0,0515	0,0360*	0,0005**	-

Πίνακας 3.40: Σημαντικότητα του ελέγχου CGC για τις παραμέτρους του Π.Σ. Νέστος.

Π.Σ. Νέστος	Conditional Granger Causality					
	H	ECw	pH	DO	Tw	Ta
H	-	0,0053**	0,0619	0,0008**	0,0006**	0,0683
ECw	0,0402*	-	0,0627	0,0048**	0,0012**	0,0619
pH	0,0593	0,0472*	-	0,0569	0,0650	0,0877
DO	0,0587	0,0070**	0,0225*	-	0,0004**	0,0650
Tw	0,0125*	0,0010**	0,0076**	0,0006**	-	0,0675
Ta	0,0531	0,0138*	0,0588	0,0346*	0,0002**	-

Στους παραπάνω πίνακες σε κάθε κελί αναγράφεται η σημαντικότητα του ελέγχου της υπό συνθήκη αιτιότητας κατά Granger. Στο κελί π.χ. (4,5) αναγράφεται η σημαντικότητα της παραμέτρου διαλυμένο οξυγόνο στην παράμετρο θερμοκρασία νερού, δεσμευμένη ως προς τις υπόλοιπες παραμέτρους στάθμη νερού, ηλεκτρική αγωγιμότητα,

pH και θερμοκρασία αέρα, δηλαδή $DO \rightarrow Tw/H, ECw, pH, Ta$. Αναλύοντας τα αποτελέσματα του ελέγχου CGC παρατηρούμε ότι:

- Η παράμετρος **στάθμη νερού** σε στάθμη σημαντικότητας 1%, αιτιάζει τις παραμέτρους ηλεκτρική αγωγιμότητα, διαλυμένο οξυγόνο και θερμοκρασία νερού, ενώ δεν αιτιάζει τις παραμέτρους pH και θερμοκρασία αέρα. Η ίδια παράμετρος αιτιάζεται σε σ.σ. 5% από τις παραμέτρους ηλεκτρική αγωγιμότητα, pH και θερμοκρασία νερού για τον Π.Σ. Παγονέρι, ενώ για τον Π.Σ. Νέστο επηρεάζεται από τις παραμέτρους ηλεκτρική αγωγιμότητα και θερμοκρασία νερού.
- Η παράμετρος **ηλεκτρική αγωγιμότητα** σε σ.σ. 1% αιτιάζει τις παραμέτρους διαλυμένο οξυγόνο και θερμοκρασία νερού, ενώ σε σ.σ. 5% τη στάθμη νερού και καθόλου τις παραμέτρους pH και θερμοκρασία αέρα. Τα αποτελέσματα είναι ίδια και για τους δύο σταθμούς. Η ίδια παράμετρος επηρεάζεται σε σ.σ. 1% από τη στάθμη νερού, το διαλυμένο οξυγόνο και τη θερμοκρασία νερού, ενώ σε 5% από το pH και τη θερμοκρασία αέρα. Τα αποτελέσματα είναι παρόμοια για τους δύο σταθμούς, με μόνη διαφορά ότι ο έλεγχος για την παράμετρο διαλυμένο οξυγόνο είναι σημαντικός σε σ.σ. 5% για τον Π.Σ. Παγονέρι.
- Το **pH** είναι η παράμετρος που επηρεάζει λιγότερο από οποιαδήποτε άλλη τις υπόλοιπες, αφού σε σ.σ. 5% για τον Π.Σ. Παγονέρι αιτιάζει τη στάθμη νερού και την ηλεκτρική αγωγιμότητα, ενώ για τον Π.Σ. Νέστο μόνο την ηλεκτρική αγωγιμότητα. Επηρεάζεται σε σ.σ. 5% για τον Π.Σ. Παγονέρι από το διαλυμένο οξυγόνο και τη θερμοκρασία νερού, ενώ για τον Π.Σ. Νέστο, από τις ίδιες παραμέτρους σε σ.σ. 5% και 1% αντίστοιχα.
- Το **διαλυμένο οξυγόνο** επηρεάζει τις παραμέτρους ηλεκτρική αγωγιμότητα, pH (σ.σ. 5%) και θερμοκρασία νερού (σ.σ. 1%), ενώ επηρεάζεται από τη στάθμη νερού, την ηλεκτρική αγωγιμότητα και την θερμοκρασία νερού (σ.σ. 1%) και την θερμοκρασία αέρα σε σ.σ. 5%.
- Η **θερμοκρασία νερού** για τον Π.Σ. Παγονέρι αιτιάζει τις παραμέτρους ηλεκτρική αγωγιμότητα και διαλυμένο οξυγόνο σε σ.σ. 1%, τις παραμέτρους στάθμη νερού και pH σε σ.σ. 5% και καθόλου τη θερμοκρασία αέρα. Για τον Π.Σ. Νέστο τα αποτελέσματα είναι ίδια με τον Π.Σ. Παγονέρι, εκτός από την περίπτωση της παραμέτρου pH, την οποία αιτιάζει σε σ.σ. 1%. Η θερμοκρασία νερού αιτιάζεται από τις παραμέτρους στάθμη νερού, ηλεκτρική αγωγιμότητα, διαλυμένο οξυγόνο και θερμοκρασία αέρα σε σ.σ. 1% και στους δύο σταθμούς.

- Η **θερμοκρασία αέρα** παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά και στους δύο σταθμούς σύμφωνα με την οποία δεν αιτιάζεται από καμία παράμετρο, ενώ αιτιάζει τη θερμοκρασία νερού σε σ.σ. 1%, το διαλυμένο οξυγόνο και την ηλεκτρική αγωγιμότητα σε σ.σ. 5%.

Αξιολογώντας τους δύο πίνακες, μπορούμε να πούμε ότι ως προς το γενικό συμπέρασμα της ύπαρξης ή μη υπό συνθήκη αιτιότητας δεν διαφέρουν σημαντικά, δηλαδή και στους δύο σταθμούς η κάθε παράμετρος αιτιάζει και αιτιάζεται από τις ίδιες παραμέτρους με διαφορετική στάθμη σημαντικότητας σε ελάχιστες περιπτώσεις. Όπως στην περίπτωση ελέγχου με τη μέθοδο της προλεύκανσης έτσι και στην περίπτωση ελέγχου με το κριτήριο CGC, οι σημαντικότητες στον Π.Σ. Νέστο ισχυροποιούν το συμπέρασμα αποδοχής ή απόρριψης της αιτιότητας.

3.5.2.3 Μοντέλα Νευρωνικών Δικτύων

Ένα χρήσιμο εργαλείο για τον έλεγχο, την αποτίμηση και την πρόβλεψη της ποιότητας των υδάτων όπως αναφέραμε (παρ. 2.4.12) αποτελούν τα νευρωνικά δίκτυα. Μπορούν με επιτυχία να χρησιμοποιηθούν σε σχέδια διαχείρισης τόσο της ποιότητας όσο και της ποσότητας. Οι μετρήσεις της παραμέτρου του διαλυμένου οξυγόνου σε κάθε έναν από τους σταθμούς Παγονέρι και Νέστο χρησιμοποιούνται ως παράμετρος εξόδου, για το λόγο ότι: α) είναι μια παράμετρος πολύ δυναμική που εξαρτάται από τις διακυμάνσεις άλλων παραμέτρων (στάθμη, θερμοκρασία, αλατότητα, συγκέντρωση θρεπτικών) όπως αποδείχθηκε προηγούμενα, β) είναι ζωτικότητας σημασίας παράμετρος αφού από αυτή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό η ανάπτυξη της υδρόβιας ζωής και η κατάσταση του υδατικού συστήματος.

Κατά την κατασκευή ενός νευρωνικού δικτύου το πρώτο βήμα είναι να ορίσουμε τις μεταβλητές εισόδου οι οποίες επηρεάζουν σημαντικά τη μεταβλητή εξόδου. Η επιλογή των μεταβλητών εισόδου (input layer) γενικά καθορίζεται από μια προηγούμενη γνώση των μεταβλητών που αιτιάζουν τη μεταβλητή εξόδου. Στα παρόντα νευρωνικά μοντέλα η επιλογή των μεταβλητών εισόδου στηρίχθηκε στην ανάλυση συσχετίσεων η οποία προηγήθηκε (παρ. 3.5.2.2). Σύμφωνα με αυτήν οι παράμετροι στάθμη νερού, ηλεκτρική αγωγιμότητα και θερμοκρασία νερού και στους δύο σταθμούς επηρεάζουν σημαντικά την παράμετρο διαλυμένο οξυγόνο (output layer) και μάλιστα σε επίπεδο σημαντικότητας 1% και για το λόγο αυτό επιλέχθηκαν σα μεταβλητές εισόδου. Στη δο-

μή του μοντέλου δεν συμπεριλήφθηκαν οι παράμετροι των οποίων οι συσχετίσεις με το διαλυμένο οξυγόνο ήταν σημαντικές σε επίπεδο 5%.

Για την κατασκευή των μοντέλων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Multilayer Perceptron (MLP) βάσει της οποίας δοκιμάστηκαν μοντέλα με ένα ή δύο κρυφά επίπεδα, μέγιστο αριθμό κόμβων πενήντα, με διαφορετικό αριθμό εποχών και με διαφορετικές συναρτήσεις ενεργοποίησης ώστε να επιλεγεί το καλύτερο για κάθε περίπτωση.

Το συνολικό δείγμα αποτελείται από ημερήσιες μετρήσεις τεσσάρων ετών (1/1/2004 έως 31/12/2007), δηλαδή 1461 παρατηρήσεις. Από τις μετρήσεις αυτές οι 1430 χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση του μοντέλου, αποτελούν δηλαδή το δείγμα εκτίμησης του μοντέλου (historical period) και οι υπόλοιπες 31 δηλαδή ο τελευταίος μήνας για πρόβλεψη (forecasting period).

Το δείγμα εκτίμησης χωρίστηκε σε δύο υποσύνολα ως εξής:

- 1) Το πρώτο υποσύνολο, αποτελεί το 70% του δείγματος και είναι το δείγμα εκπαίδευσης (training sample),
- 2) Το δεύτερο υποσύνολο αποτελεί το 30% του δείγματος και είναι το δείγμα πιστοποίησης ή ελέγχου (validation ή testing sample).

Η αρχιτεκτονική των μοντέλων στα οποία καταλήξαμε αποτελείται από ένα κρυφό επίπεδο, συνάρτηση ενεργοποίησης εισόδου τη σιγμοειδή (sigmoid function) και εξόδου την ταυτοτική (identity function), κανόνα ολοκλήρωσης του αλγόριθμου τη μη αύξηση του λάθους ύστερα από δύο βήματα ή τη συμπλήρωση του μέγιστου χρόνου των 15 λεπτών ή τη συμπλήρωση του μέγιστου αριθμού εποχών (2000 εποχές).

Για κάθε μοντέλο έγιναν 100 επαναλήψεις και επιλέχθηκε εκείνο που αντιστοιχούσε στο μικρότερο άθροισμα τετραγώνων των σφαλμάτων (Sum of Squares Error – SSE) του υποσυνόλου πιστοποίησης.

Για τον **Π.Σ. Παγονέρι** το μοντέλο που επιλέχθηκε έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

α) Από τις παραμέτρους εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του νευρωνικού δικτύου, τη μεγαλύτερη σημαντικότητα και συμβολή στη διαμόρφωση του μοντέλου παρουσιάζει η παράμετρος θερμοκρασία νερού (0,591), ακολουθεί η παράμετρος στάθμη νερού (0,213) και τελευταία η ηλεκτρική αγωγιμότητα (0,197). Οι σημαντικότητες των παραμέτρων αναγράφονται στον πίνακα 3.41.

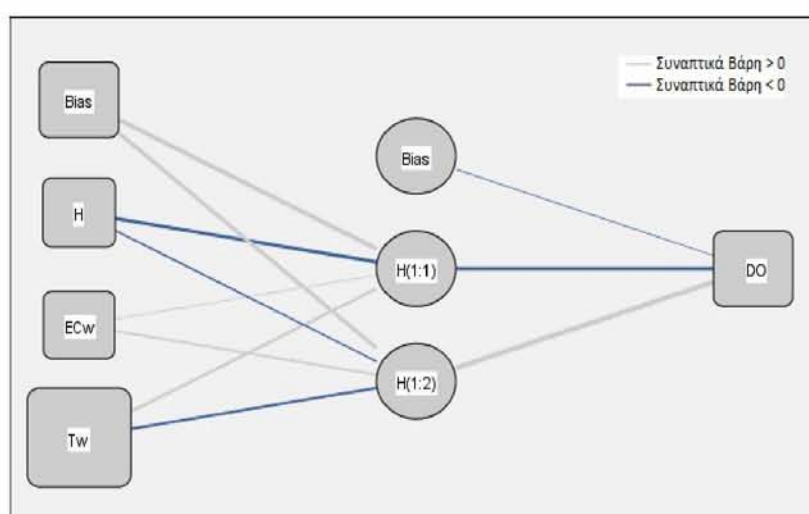
Πίνακας 3.41: Σημαντικότητες μεταβλητών εισόδου για τον Π.Σ. Παγονέρι.

Τ.Σ. Παγονέρι	Σημαντικότητα	Κανονικοποιημένη Σημαντικότητα
Στάθμη Νερού	0,213	36,0%
Ηλεκτρική Αγωγιμότητα	0,197	33,3%
Θερμοκρασία Νερού	0,591	100,0%

β) Τα βέλτιστα συναπτικά βάρη (Synaptic weights) και οι μεροληψίες (Bias) του μοντέλου παρουσιάζονται στον πίνακα 3.42. Επίσης στο σχήμα 3.69 παρουσιάζεται το διάγραμμα του νευρωνικού δικτύου.

Πίνακας 3.42: Εκτίμηση παραμέτρων Π.Σ. Παγονέρι.

Τ.Σ. Παγονέρι		Εκτιμώμενα Βάρη		
		Κρυφό Επίπεδο		Επίπεδο Εξόδου
		H(1:1)	H(1:2)	DO
Παράμετροι εισόδου (Input Layer)	(Bias)	2,182	2,106	
	H	-1,889	-0,848	
	ECw	0,415	0,960	
	Tw	1,714	-1,707	
Κρυφό επίπεδο (Hidden Layer)	(Bias)			-0,302
	H(1:1)			-2,025
	H(1:2)			2,218



Συνάρτηση ενεργοποίησης κρυφού επιπέδου: Σιγμοειδής
Συνάρτηση ενεργοποίησης επιπέδου εξόδου: Ταυτοτική

Σχήμα 3.69: Διάγραμμα νευρωνικού δικτύου Π.Σ. Παγονέρι.

γ) Τα αθροίσματα τετραγώνων των σφαλμάτων και των σχετικών σφαλμάτων των δειγμάτων εκπαίδευσης και πιστοποίησης του μοντέλου που επιλέχθηκε για τον Π.Σ. Παγονέρι, αναγράφονται στον πίνακα 3.43.

Πίνακας 3.43: Στατιστικά του νευρωνικού δικτύου του Π.Σ. Παγονέρι.

Δείγμα εκπαίδευσης (Training)	Άθροισμα τετραγώνων των σφαλμάτων (Sum of Squares Error)	238,905
	Σχετικό σφάλμα (Relative Error)	0,473
Δείγμα ελέγχου (Testing)	Άθροισμα τετραγώνων των σφαλμάτων	78,647
	Σχετικό σφάλμα	0,395

Για τον **Π.Σ. Νέστο** τα χαρακτηριστικά του τελικού μοντέλου που επιλέχθηκε είναι:

α) Η παράμετρος εισόδου στάθμη νερού παρουσιάζει τη μεγαλύτερη σημαντικότητα, της τάξεως 0,473, ακολουθεί η παράμετρος θερμοκρασία νερού με τιμή 0,383 και τέλος η ηλεκτρική αγωγιμότητα της οποίας η σημαντικότητα ισούται με 0,144 (πίν. 3.44). Συγκρίνοντας τις σημαντικότητες των παραμέτρων εισόδου για τους δύο σταθμούς παρατηρούμε μια διαφοροποίηση στη συμβολή της κάθε παραμέτρου στη διαμόρφωση του μοντέλου. Στον Π.Σ. Νέστο η τιμή του διαλυμένου οξυγόνου διαμορφώνεται κυρίως από τις τιμές των παραμέτρων στάθμη νερού και θερμοκρασία νερού ενώ στον Π.Σ. Παγονέρι κυρίως από τις τιμές της θερμοκρασίας νερού.

Πίνακας 3.44: Σημαντικότητες μεταβλητών εισόδου για τον Π.Σ. Νέστου.

Τ.Σ. Νέστου	Σημαντικότητα	Κανονικοποιημένη Σημαντικότητα
Στάθμη Νερού	0,473	100,0%
Ηλεκτρική Αγωγιμότητα	0,144	30,4%
Θερμοκρασία Νερού	0,383	81,0%

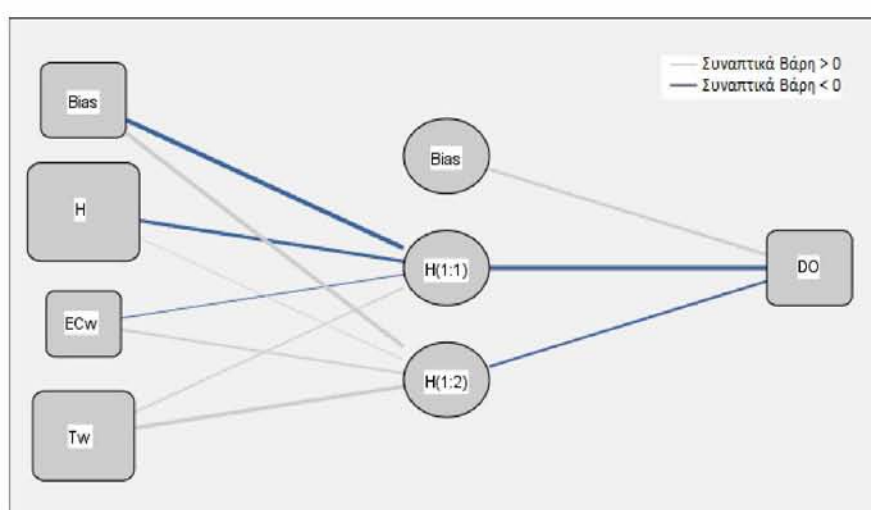
Στο σταθμό Νέστο η στάθμη εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τον τρόπο λειτουργίας του Υ/Η στο Θησαυρό και στην Πλατανόβρυση. Μάλιστα έχουν παρατηρηθεί χαμηλές θερμοκρασίες τους καλοκαιρινούς μήνες στη ροή του Νέστου, που οφείλονται

στην άντληση νερού από το μόνιμο ψυχρό υπολίμνιο της λίμνης του Θησαυρού. Συνεπώς έμμεσα εξαρτάται και στην περίπτωση του Π.Σ. Νέστος από τη θερμοκρασία με την ακόλουθη αλληλουχία. α) Άντληση ύδατος με χαμηλή θερμοκρασία λόγω λειτουργίας του Υ/Η έργου, β) διοχέτευση της ποσότητας αυτής στο Νέστο, γ) αύξηση της στάθμης κατάντη, δ) αυξημένες τιμές DO.

β) Στον πίνακα 3.45 παρουσιάζονται τα βέλτιστα συναπτικά βάρη (Synaptic weights) και οι μεροληψίες (Bias) του μοντέλου, ενώ στο σχήμα 3.70 παρουσιάζεται το διάγραμμα του νευρωνικού δικτύου.

Πίνακας 3.45: Εκτίμηση παραμέτρων Π.Σ. Νέστο.

Τ.Σ. Παγονέρι		Εκτιμώμενα Βάρη		
		Κρυφό Επίπεδο		Επίπεδο Εξόδου
		H(1:1)	H(1:2)	DO
Παράμετροι εισόδου (Input Layer)	(Bias)	-2,729	2,551	
	H	-1,903	0,026	
	ECw	-0,272	0,572	
	Tw	0,446	2,166	
Κρυφό επίπεδο (Hidden Layer)	(Bias)			1,521
	H(1:1)			-3,668
	H(1:2)			-1,198



Συνάρτηση ενεργοποίησης κρυφού επιπέδου: Σιγμοειδής
Συνάρτηση ενεργοποίησης επιπέδου εξόδου: Ταυτοτική

Σχήμα 3.70: Διάγραμμα νευρωνικού δικτύου Π.Σ. Νέστος.

γ) Στον πίνακα 3.46 αναγράφονται τα αθροίσματα τετραγώνων των σφαλμάτων και των σχετικών σφαλμάτων των δειγμάτων εκπαίδευσης και πιστοποίησης του μοντέλου που επιλέχθηκε για τον Π.Σ. Νέστο. Συγκρίνοντάς τα με τα αντίστοιχα στατιστικά του Π.Σ. Παγονέρι (πιν. 3.43), παρατηρείται μια μικρή διαφορά στα αθροίσματα τετραγώνων των δειγμάτων εκπαίδευσης, ενώ η διαφορά είναι σχεδόν ασήμαντη μεταξύ των δειγμάτων ελέγχου. Αυτό σημαίνει ότι η προσαρμογή των δύο μοντέλων, στα δείγματα ελέγχου είναι περίπου η ίδια στους δύο σταθμούς, συνεπώς και η εκτίμηση του διαλυμένου οξυγόνου είναι εξίσου ικανοποιητική.

Πίνακας 3.46: Στατιστικά του νευρωνικού δικτύου του Π.Σ. Νέστος.

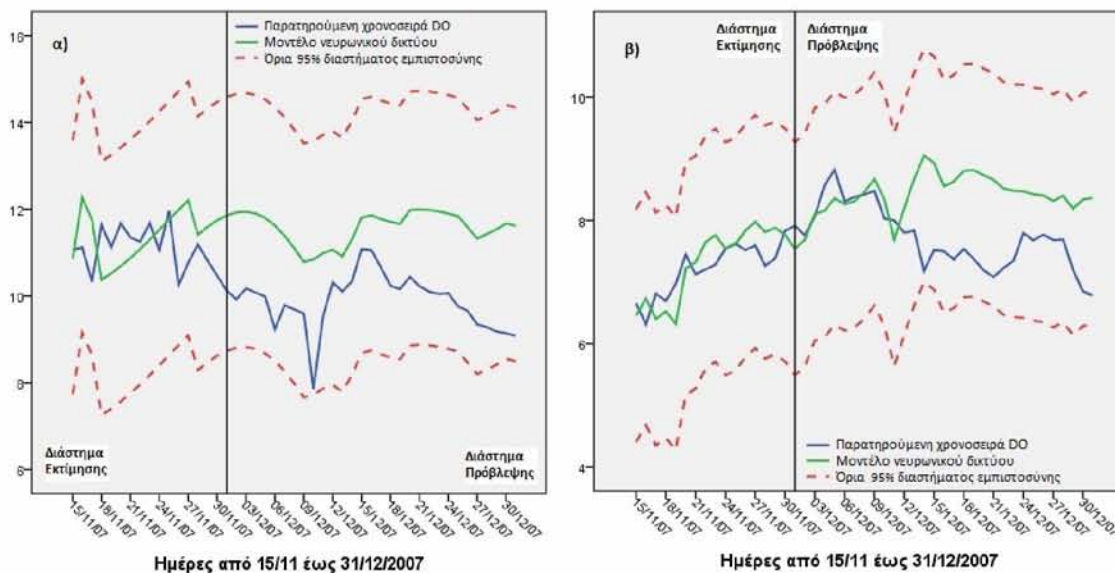
Δείγμα εκπαίδευσης (Training)	Άθροισμα τετραγώνων των σφαλμάτων (Sum of Squares Error)	267,820
	Σχετικό σφάλμα (Relative Error)	0,525
Δείγμα ελέγχου (Testing)	Άθροισμα τετραγώνων των σφαλμάτων	80,287
	Σχετικό σφάλμα	0,405

Τα δύο παραπάνω μοντέλα ελέγχθηκαν και ως προς την ικανότητα πρόβλεψής τους. Για το σκοπό αυτό έγινε πρόβλεψη των τιμών του διαλυμένου οξυγόνου του τελευταίου μήνα δηλαδή των 31 τελευταίων μετρήσεων των δεδομένων και σύγκριση τους με τις παρατηρούμενες τιμές. Παράλληλα σε κάθε περίπτωση υπολογίστηκε το 90% και 95% διάστημα εμπιστοσύνης (Confidence Interval).

Στο σχήμα 3.71 παρουσιάζονται τα γραφήματα για τους Π.Σ. (α) Παγονέρι και (β) Νέστο και το 95% διάστημα εμπιστοσύνης, εύρους 5,82 και 3,78 αντίστοιχα. Καταγράφονται οι τιμές των παρατηρούμενων και εκτιμώμενων τιμών του διαλυμένου οξυγόνου και τα όρια του διαστήματος εμπιστοσύνης για το χρονικό διάστημα από 15 Νοεμβρίου έως 31 Δεκεμβρίου 2007. Στο διάστημα από 15 έως 30 Νοεμβρίου παρουσιάζεται η προσαρμογή του νευρωνικού δικτύου, ενώ από 1 Δεκεμβρίου αρχίζει η περίοδος πρόβλεψης.

Παρατηρούμε ότι και στις δύο περιπτώσεις οι παρατηρούμενες τιμές βρίσκονται εξολοκλήρου μέσα στο διάστημα εμπιστοσύνης για όλη την περίοδο πρόβλεψης ενώ κάποιες από αυτές, οι περισσότερες προς το τέλος της περιόδου πρόβλεψης, παρουσιάζουν μια τάση προσέγγισης των παρατηρούμενων τιμών προς το κάτω όριο του διαστή-

ματος εμπιστοσύνης πράγμα το οποίο σημαίνει ότι αυξάνοντας το συντελεστή εμπιστοσύνης (μικρότερο εύρος διαστήματος) υπάρχει πιθανότητα οι παρατηρούμενες τιμές να βρεθούν εκτός διαστήματος, ουσιαστικά δηλαδή η πρόβλεψη να μην είναι αποδεκτή.

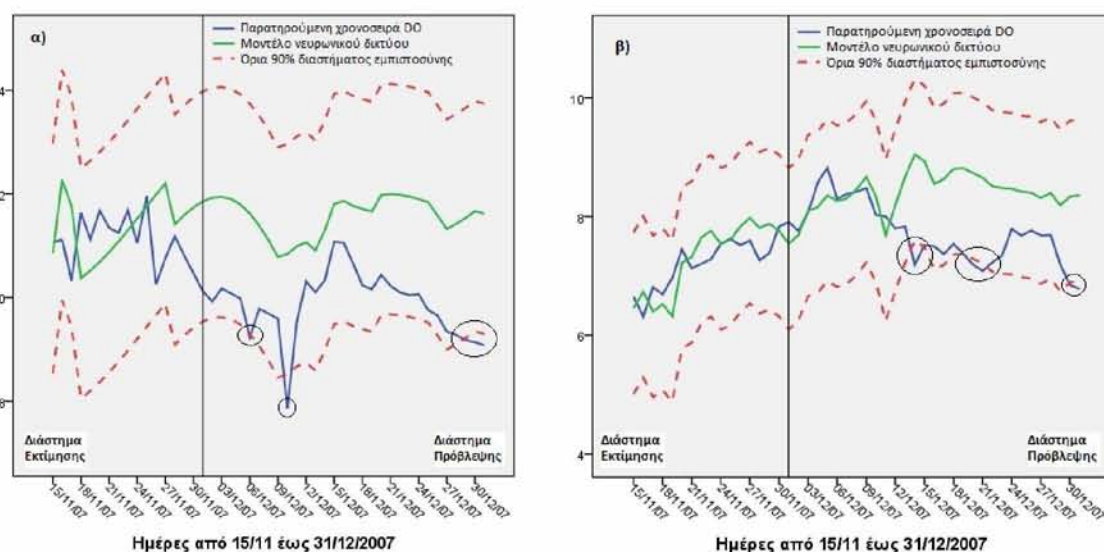


Σχήμα 3.71: Παρατηρούμενες και προβλεπόμενες ημερήσιες τιμές της παραμέτρου διαλυμένο οξυγόνο, για 95% διάστημα εμπιστοσύνης, για τους σταθμούς α) Παγονέρι και β) Νέστο.

Για να ελεγχθεί λοιπόν κατά πόσο οι ακραίες κυρίως τιμές του διαλυμένου οξυγόνου θα παραμείνουν εντός των ορίων του διαστήματος, υπολογίστηκε και το 90% διάστημα εμπιστοσύνης. Στο σχήμα 3.72 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα γραφήματα για τους Π.Σ. (α) Παγονέρι και (β) Νέστο. Τα γραφήματα αναφέρονται στο ίδιο χρονικό διάστημα και για τις ίδιες παρατηρούμενες και προβλεπόμενες τιμές. Το εύρος των διαστημάτων εμπιστοσύνης είναι αντίστοιχα 4,44 και 2,73.

Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση αυτή υπάρχουν παρατηρήσεις και στους δύο σταθμούς που βρίσκονται εκτός διαστήματος εμπιστοσύνης. Συγκεκριμένα για τον Π.Σ. Παγονέρι στις 6 Δεκεμβρίου του 2007 παρατηρείται μια μέτρηση η οποία είναι οριακά εκτός του διαστήματος εμπιστοσύνης, στις 10/12/2007 καταγράφεται μια απότομη μείωση της τιμής του διαλυμένου οξυγόνου η οποία είναι εκτός του δ.ε. και οι τελευταίες μετρήσεις των ημερών 29, 30 και 31 βρίσκονται και αυτές εκτός.

Για τον Π.Σ. Νέστο η πρώτη μέτρηση που βρίσκεται εκτός του δ.ε. καταγράφεται στις 14 Δεκεμβρίου του 2007. Η μέτρηση στις 19/12/2007 βρίσκεται επί του κάτω ορίου, ενώ οι τιμές των δύο επόμενων ημερών (20 και 21/12) βρίσκονται εκτός του δ.ε. Οι τελευταίες ημέρες του μήνα 30 και 31 βρίσκονται και αυτές εκτός του δ.ε.



Σχήμα 3.72: Παρατηρούμενες και προβλεπόμενες ημερήσιες τιμές της παραμέτρου διαλυμένο οξυγόνο για 90% διάστημα εμπιστοσύνης για τους σταθμούς α) Παγονέρι και β) Νέστο.

Συγκρίνοντας τα διαστήματα εμπιστοσύνης των σταθμών Παγονέρι και Νέστο, παρατηρούμε ότι το εύρος των δ.ε. του Π.Σ. Παγονέρι και για τους δύο συντελεστές εμπιστοσύνης είναι μεγαλύτερο από αυτό του Π.Σ. Νέστου. Μια διαφορά που επίσης επισημαίνεται μεταξύ των δύο σταθμών είναι η πολύ ικανοποιητική πρόβλεψη των πρώτων 10-11 ημερών του διαστήματος πρόβλεψης για το σταθμό Νέστο σε σχέση με το Παγονέρι. Οι διαφοροποιήσεις αυτές οφείλονται στο ότι οι μετρήσεις στο σταθμό Παγονέρι παρουσιάζουν μεγαλύτερη μεταβλητότητα, απότομες και αιχμηρές κορυφές, πράγμα το οποίο δημιουργεί μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ παρατηρούμενων και εκτιμώμενων βάσει του μοντέλου τιμών σε σχέση με το σταθμό Νέστο και μεγαλύτερου εύρους διάστημα εμπιστοσύνης.

Συνοψίζοντας, τα νευρωνικά δίκτυα τα οποία κατασκευάστηκαν με σκοπό την αξιολόγηση και πρόβλεψη της ποιότητας των υδάτων στους συγκεκριμένους σταθμούς μετρήσεων, είναι ικανοποιητικά για διάστημα εμπιστοσύνης 95% και πρόβλεψη 30 ημερών. Στην περίπτωση όμως που ο συντελεστής εμπιστοσύνης γίνει 90%, το ποσοστό «αποτυχημένων» προβλέψεων είναι μεγαλύτερο του επιτρεπόμενου σύμφωνα με το συντελεστή εμπιστοσύνης, με πιθανό αποτέλεσμα την αδυναμία πρόβλεψης ακραίων φαινομένων ή απότομων αλλαγών των τιμών της παραμέτρου και αδυναμία χαρακτηρισμού του μοντέλου ως «ανεπιφύλακτα ικανοποιητικού».

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το αντικείμενο της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η προσαρμογή Στοχαστικών Μοντέλων Προσομοίωσης στην Ποιότητα των Επιφανειακών Υδάτων στον ποταμό Νέστο. Βασικός σκοπός είναι η εφαρμογή γραμμικών και μη γραμμικών, μονοδιάστατων και διδιάστατων στοχαστικών μοντέλων, η μεταξύ τους σύγκριση και η δυνατότητα χρήσης τους για εκτίμηση μελλοντικών τιμών.

Τα δεδομένα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν αφορούν μετρήσεις από τρεις τηλεμετρικούς σταθμούς επιλεγμένους έτσι ώστε να καλύπτεται ο ποταμός σε όλη του την έκταση, άνω μέσο και κάτω ρου. Οι σταθμοί αυτοί αποτέλεσαν σημεία τηλεμετρικής παρακολούθησης συγκεκριμένων ποσοτικών και ποιοτικών παραμέτρων, με καθημερινή συχνότητα για τέσσερα (4) έτη, από τις αρχές του 2004 έως τα τέλη του 2007. Χρησιμοποιήθηκαν είκοσι δύο (22) χρονοσειρές δεδομένων, με μέγεθος δείγματος μεγαλύτερο των 1400 τιμών. Με τον τρόπο αυτό έγινε μία εμπειρισταωμένη συνολική μελέτη και αξιολόγηση του ποταμού.

Εφαρμόστηκαν συνολικά είκοσι τέσσερα (24) μοντέλα, από τα οποία:

- 1) οκτώ (8) ARIMA,
- 2) επτά (7) Transfer Function και
- 3) εννέα (9) Νευρωνικά δίκτυα.

Εκτός των στοχαστικών μοντέλων εφαρμόστηκε:

- 1) έλεγχος τάσεων με προσαρμογή ευθείας ελαχίστων τετραγώνων και έλεγχος Dickey-Fuller (ADF),
- 2) έλεγχος προσαρμογής κατανομών (Test Kolmogorov-Smirnov)
- 3) ανάλυση συσχετίσεων (μέθοδος προλεύκανσης και έλεγχος αιτιότητας κατά Granger) και
- 4) ανάλυση αυτοσυσχετίσεων και διασυσχετίσεων.

Ακόμη για την αξιολόγηση των παραμέτρων χρησιμοποιήθηκαν θηκογράμματα, πίνακες συχνότητων και διάφορα άλλα εργαλεία της περιγραφικής στατιστικής. Τέλος, για την αξιολόγηση των μοντέλων χρησιμοποιήθηκαν γνωστά μέτρα της στατιστικής.

4.1 Αναλυτικά Συμπεράσματα

Αναλυτικά τα αποτελέσματα των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν και τα οποία καλύπτουν τις τρεις βασικές περιοχές του ποταμού, περιγράφονται παρακάτω:

Για την περίπτωση του **Βορείου Δικτύου** αναλύθηκαν οι παράμετροι: Στάθμη νερού, Ηλεκτρική αγωγιμότητα, Διαλυμένο οξυγόνο, pH, Θερμοκρασία νερού και Θερμοκρασία αέρα. Εκτιμήθηκαν οι δειγματικές παράμετροι της εμπειρικής κατανομής (μέση τιμή, διασπορά, τυπική απόκλιση, διάμεσος, μέγιστη και ελάχιστη τιμή) με τη βοήθεια της περιγραφικής στατιστικής.

Τα γραφήματα και τα θηκογράμματα των χρονοσειρών χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο προσαρμογής της κάθε παραμέτρου στην κανονική κατανομή και για την ύπαρξη παράτυπων σημείων. Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της προλεύκανσης και η συνάρτηση διασυσχέτισης, για τον εντοπισμό της χρονικής υστέρησης, μεταξύ της επίδρασης της θερμοκρασίας του αέρα σε αυτήν του νερού. Το test Kolmogorov-Smirnov εφαρμόστηκε για τον έλεγχο προσαρμογής των δεδομένων στην κανονική και λογαριθμοκανονική κατανομή και τέλος, ελέγχθηκαν οι παράμετροι ως προς την ύπαρξη τάσης.

Οι συνήθεις έλεγχοι που εφαρμόζονται για τη διερεύνηση ύπαρξης τάσης σε υδρολογικές παραμέτρους, είναι η προσαρμογή ευθείας και ο έλεγχος Spearman. Στη παρούσα διατριβή χρησιμοποιήθηκε: α) η προσαρμογή ευθείας και β) ο επαυξημένος έλεγχος Dickey-Fuller (ADF), με χρήση του στατιστικού πακέτου MatLab. Ο επαυξημένος έλεγχος Dickey-Fuller είναι ένας έλεγχος διερεύνησης ύπαρξης μοναδιαίας ρίζας και μη στασιμότητας σε μια χρονοσειρά ο οποίος έχει ελάχιστα χρησιμοποιηθεί σε ελληνικούς ποταμούς και είναι η πρώτη φορά που εφαρμόζεται στον ποταμό Νέστο. Διαχωρίζει τη μη στασιμότητα σε γραμμική και στοχαστική τάση.

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα για τον άνω ρου: όλες οι παράμετροι παρουσιάζουν έντονες διακυμάνσεις, με αρκετές ακραίες χαμηλές και υψηλές τιμές, με αιχμηρές κορυφές και έντονη ασυμμετρία. Ως προς τον έλεγχο προσαρμογής, μόνο η παράμετρος διαλυμένο οξυγόνο ακολουθεί κανονική κατανομή, σε στάθμη σημαντικότητας 1%. Ως προς την τάση, οι παράμετροι στάθμη νερού και διαλυμένο οξυγόνο παρουσιάζουν αρνητική γραμμική τάση, ενώ η ηλεκτρική αγωγιμότητα θετική γραμμική τάση. Στοχαστική τάση παρουσιάζουν μόνο η θερμοκρασία νερού και αέρα.

Κύριο χαρακτηριστικό του **Κεντρικού Δικτύου** αποτελεί ο ταμιευτήρας του Θησαυρού, η κατασκευή του οποίου διαφοροποίησε τις συνθήκες της περιοχής, αλλά και

του δέλτα του ποταμού. Στα πρώτα στάδια λειτουργίας του όπως αναφέρθηκε, παρουσιάστηκαν προβλήματα στην υδάτινη στήλη γεγονός το οποίο καθιστά αναγκαία τη συνεχή αξιολόγηση της κατάστασης του ταμιευτήρα και του τρόπου λειτουργίας του ταμιευτήρα ως φυσική βαθιά λίμνη.

Οι παράμετροι οι οποίες αναλύθηκαν στα τέσσερα διαφορετικά βάθη είναι: διαλυμένο οξυγόνο, pH και θερμοκρασία νερού. Εφαρμόστηκε ανά έτος η περιγραφική στατιστική, κατασκευάστηκαν τα σχετικά γραφήματα και βάσει αυτών έγινε σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών βαθών. Ακόμη, έγινε έλεγχος ύπαρξης τάσης με προσαρμογή ευθείας ελαχίστων τετραγώνων και του ADF test και βάσει των αποτελεσμάτων που προέκυψαν έγινε αξιολόγηση της υδάτινης στήλης του ταμιευτήρα.

Η τεχνητή λίμνη του Θησαυρού είναι μία μονομικτική λίμνη, με την αναστροφή των υδάτων να καταγράφεται μία φορά ετησίως κατά τους μήνες Φεβρουάριο – Μάρτιο. Τον υπόλοιπο χρόνο παρουσιάζει ισχυρή στρωμάτωση, δημιουργώντας τρία στρώματα (επιλίμνιο, μεταλίμνιο, υπολίμνιο). Βάσει της θερμοκρασίας στα διάφορα βάθη και της μεταβολής του πάχους του θερμοκλινούς κατά τη διάρκεια του έτους, μπορεί να χαρακτηριστεί ως βαθιά λίμνη. Κατά την περίοδο Μαρτίου έως Απριλίου και από τα μέσα Ιουνίου ως τα μέσα Ιουλίου, καταγράφονται υψηλές τιμές διαλυμένου οξυγόνου οι οποίες οφείλονται στο φαινόμενο της φωτοσύνθεσης λόγω της ανάπτυξης του φυτοπλαγκτού.

Τα τελευταία χρόνια έχει γίνει αποδεκτό από την επιστημονική κοινότητα ότι η μοντελοποίηση, η πρόβλεψη και η ανάλυση των χρονοσειρών των ποιοτικών παραμέτρων, αποτελεί σημαντικό εργαλείο για τη λήψη αποφάσεων σε θέματα διαχείρισης υδατικών πόρων και υδρολογικών κινδύνων. Προς το σκοπό αυτό **για να ελεγχθεί η προβλεπτική ικανότητα** των γραμμικών και μη γραμμικών στοχαστικών μοντέλων σε ημερήσιες μετρήσεις, προσαρμόστηκαν στην παράμετρο διαλυμένο οξυγόνο και για κάθε βάθος (1, 20, 40 και 70m), ARIMA, Transfer Function και Neural Networks μοντέλα. Για την κατασκευή των TF μοντέλων ως μεταβλητή εισόδου χρησιμοποιήθηκε η θερμοκρασία νερού, διαδικασία η οποία απαιτεί πρώτα την προσαρμογή τεσσάρων (4) ARIMA μοντέλων στην παράμετρο T_w για κάθε βάθος.

Στη συνέχεια για κάθε ένα από τα δώδεκα (12) συνολικά μοντέλα έγινε πρόβλεψη 1, 2, 3, 5 και 10 βήμα μπροστά, για χρονικό διάστημα 20 ημερών και συγκρίθηκαν τα μοντέλα μεταξύ τους χρησιμοποιώντας 4 διαφορετικά στατιστικά μέτρα. Στην περίπτωση του 1m βάθους ορίστηκαν 95% διαστήματα εμπιστοσύνης και κατασκευάστηκαν

διαγράμματα διασποράς μεταξύ προβλεπόμενων και παρατηρούμενων τιμών διαλυμένου οξυγόνου.

Από τη σύγκριση των στατιστικών μέτρων έγινε φανερό ότι τα ARIMA μοντέλα μπορούν να προταθούν ως μοντέλα βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης, δηλαδή για 1, 2 και 3 βήματα μπροστά. Σε κάποιες περιπτώσεις που τα TF μοντέλα έκαναν καλύτερη πρόβλεψη, η διαφορά με τα ARIMA ήταν ελάχιστη και δεδομένου ότι τα τελευταία είναι απλούστερα στην κατασκευή τους, προτείνονται. Για μεσοπρόθεσμη πρόβλεψη, δηλαδή πρόβλεψη πέντε και περισσότερες μέρες προτείνονται τα Transfer Function μοντέλα.

Σε δεύτερη φάση έγινε προσπάθεια, χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις του διαλυμένου οξυγόνου στο σταθμό του 1m και τα στοχαστικά μοντέλα, **να καταργηθούν οι αισθητήρες μέτρησης στα 20, 40 και 70m**. Κίνητρο της σκέψης αυτής αποτέλεσε το οικονομικό όφελος, το οποίο θα προκύψει από την πρακτική εφαρμογή της έρευνας. Για το σκοπό αυτό κατασκευάστηκαν τρία (3) TF και 3 ANN μοντέλα, με μεταβλητή εισόδου τη χρονοσειρά του 1m και μεταβλητές εξόδου τις χρονοσειρές των 20, 40 και 70m τα οποία συγκρίθηκαν μεταξύ τους.

Βάσει των αποτελεσμάτων η αρχική σκέψη κατάργησης αισθητήρων έδειξε να μην είναι εφικτή, καθώς η προβλεπτική ικανότητα των μοντέλων δεν ήταν ικανοποιητική. Βέβαια τα παραπάνω στοχαστικά μοντέλα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τη συμπλήρωση κενών, τα οποία δημιουργούνται όταν κάποιος από τους αισθητήρες μέτρησης πάθει βλάβη. Σε αυτή την περίπτωση τα μοντέλα δείχνουν να είναι ικανά να συμπληρώσουν τα κενά, ίσως και ικανότερα από τις γνωστές μεθόδους παρεμβολής, γεγονός που χρειάζεται περαιτέρω έρευνα.

Συνεχίζοντας στα κατάντη του ποταμού, στο **Νότιο Δίκτυο**, αναλύθηκαν οι παράμετροι: στάθμη νερού, ηλεκτρική αγωγιμότητα, διαλυμένο οξυγόνο, pH, Redox, θερμοκρασία νερού και αέρα. Ακολουθώντας την ίδια στατιστική ανάλυση με το βόρειο δίκτυο, εξήχθησαν τα ακόλουθα συμπεράσματα.

Για τον έλεγχο προσαρμογής των δεδομένων σε πιθανοθεωρητικές κατανομές, το test Kolmogorov-Smirnov έδειξε ότι καμία από τις παραμέτρους που ελέγχθηκαν δεν ακολουθεί κανονική ή λογαριθμοκανονική κατανομή σε στάθμη σημαντικότητας 5%, ενώ σε σ.σ. 1% οριακά προσαρμόζονται οι παράμετροι διαλυμένο οξυγόνο και θερμοκρασία αέρα.

Επίσης, ο έλεγχος ύπαρξης τάσης γραμμικής ή στοχαστικής οδήγησε στα εξής αποτελέσματα: οι παράμετροι στάθμη νερού και διαλυμένο οξυγόνο παρουσιάζουν αρνητι-

κή γραμμική τάση, ενώ οι παράμετροι ηλεκτρική αγωγιμότητα, θερμοκρασία νερού και αέρα παρουσιάζουν θετική γραμμική τάση. Οι παράμετροι Redox και pH εμφανίζουν στοχαστική τάση.

Εκείνο που χαρακτηρίζει τις παραμέτρους του νοτίου δικτύου είναι ότι έχουν αμβλυνθεί οι μεγάλες διακυμάνσεις και οι αιχμηρές κορυφές, με αποτέλεσμα οι τιμές των παραμέτρων να παρουσιάζονται ομαλότερες με μικρότερο εύρος και διασπορά. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τις παραμέτρους στάθμη και θερμοκρασία νερού.

Για την παράμετρο στάθμη νερού το συμπέρασμα είναι ότι σε ποσοτικό τουλάχιστον επίπεδο, υπάρχει ένας εξορθολογισμός των ποσοτήτων του νερού που φτάνουν στο δέλτα, ώστε και να μην πλημμυρίζει το χειμώνα και να διατηρείται η ζωή το καλοκαίρι, με εξασφάλιση ελάχιστης στάθμης. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη συγκράτηση υδάτων από τα φράγματα του Θησαυρού και της Πλατανόβρυσης. Πρόβλημα βέβαια παραμένει η κατακράτηση φερτών υλών στις φραγμαλίμνες, η οποία στερεί το δέλτα από τα υλικά αυτά που είναι ευεργετικά για τις καλλιέργειες και ανασταλτικά για την παράκτια διάβρωση.

Η θερμοκρασία του νερού που φτάνει στο δέλτα, συγκρινόμενη με αυτή του αέρα, εμφανίζεται με ασυνήθιστα χαμηλές τιμές για τους θερινούς μήνες, γεγονός που αποτελεί πρόβλημα, καθώς οι χαμηλές αυτές θερμοκρασίες δεν προσεγγίζουν τις φυσικές τιμές. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών οι ΥΗΣ σταθμοί στα ανάντη, χρησιμοποιούνται για τις αυξημένες ανάγκες του δικτύου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, οπότε από το ταμιευτήρα Θησαυρού, αντλείται νερό από τα βαθύτερα στρώματα, περίπου 30 έως 60m, δηλαδή από το μόνιμο ψυχρό υπολίμνιο.

Σε γενικές γραμμές το ανθρωπογενώς τροποποιημένο υδατικό σύστημα του Νέστου ανταποκρίνεται θετικά στις νέες αλλαγές του φυσικού περιβάλλοντος. Η λειτουργία του αναρρυθμιστή φράγματος του Τεμένους, θα είχε ιδιαίτερα θετικά αποτελέσματα, τόσο για την αναρρύθμιση της θερμοκρασίας, όσο και για την περαιτέρω αναρρύθμιση των ποσοτήτων νερού.

Ολοκληρώνοντας την παρούσα εργασία παραθέτουμε **τα συμπεράσματα της σύγκρισης** των μετρήσεων των κοινών παραμέτρων των σταθμών Παγονέρι και Νέστου, με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων για την ποιότητα και την ποσότητα των υδάτων, που εισέρχονται στον Ελλαδικό χώρο και εκβάλλουν στο Θρακικό πέλαγος, την

επίδραση του συστήματος φραγμάτων και ταμιευτήρων του κεντρικού δικτύου στην ενδοορεινή κοιλάδα και τέλος την προσαρμογή μοντέλων ANN για πρόβλεψη συγκεκριμένων παραμέτρων της ποιότητας των υδάτων.

Από τη στατιστική ανάλυση, τη σύγκριση των γραφημάτων και των θηκογραμμάτων για κάθε παράμετρο στους δύο σταθμούς, γίνεται αντιληπτό ότι η εμπειρική κατανομή των παραμέτρων του Π.Σ. Νέστου έχει εξομαλυνθεί, το εύρος έχει ελαττωθεί και το πλήθος των ακραίων τιμών έχει μειωθεί σημαντικά.

Το γεγονός αυτό οφείλεται στη λειτουργία των φραγμάτων Θησαυρού και Πλατανόβρυσης τα οποία συγκρατούν τις πλημμυρικές παροχές του ποταμού Νέστου κατά τους χειμερινούς μήνες και συμβάλλουν στη συνεχή παροχή νερού κατά τους θερινούς μήνες. Η εξομάλυνση αυτή τείνει να αμβλύνει τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές της παροχής που καταγράφονταν πριν την κατασκευή των μεγάλων φραγμάτων, καθώς κατά τη διάρκεια κυρίως των χειμερινών μηνών, οι μέγιστες κορυφές των πλημμυρών είναι πιο ήπιες, συμβάλλοντας έτσι στην πρόληψη των πλημμυρών του δέλτα.

Επίσης κατά τους καλοκαιρινούς μήνες η στάθμη του νερού είναι συνεχώς συμβάλλοντας στην αναβάθμιση του φυσικού περιβάλλοντος του δέλτα, όπου πριν την κατασκευή των φραγμάτων οι παροχές ήταν ελάχιστες, μη ικανές να διατηρήσουν την υδρόβια ζωή.

Ο έλεγχος αυτοσυσχετίσεων έδειξε ότι οι χρονοσειρές των παραμέτρων του Π.Σ. Νέστου, παρουσιάζουν ισχυρότερες αυτοσυσχετίσεις, πράγμα το οποίο ενισχύει την άποψη ότι οι χρονοσειρές των παραμέτρων του Νέστου εμφανίζονται περισσότερο ομαλοποιημένες ως προς τις αιχμές τους.

Επίσης, έγινε έλεγχος συσχετίσεων μεταξύ των παραμέτρων κάθε σταθμού, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της προλεύκανσης και την υπό συνθήκη αιτιότητα κατά Granger. Σύμφωνα με τη μέθοδο της προλεύκανσης προσαρμόστηκαν ARIMA μοντέλα σε κάθε παράμετρο κάθε σταθμού και υπολογίστηκε ο σ.σ. κατά Pearson μεταξύ των χρονοσειρών των σφαλμάτων μετά τη προσαρμογή των μοντέλων στις παραμέτρους κάθε σταθμού. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα συσχετισμένες είναι οι ίδιες παράμετροι και στους δύο σταθμούς. Διαφοροποίηση υπάρχει στις σημαντικότητες των ελέγχων των συσχετίσεων μεταξύ των παραμέτρων του Νέστου, οι οποίες εμφανίζονται πολύ πιο ισχυρές, οδηγώντας σε ένα πιο ξεκάθαρο αποτέλεσμα σχετικά με τις συσχετίσεις μεταξύ των παραμέτρων.

Το κριτήριο της υπό συνθήκη αιτιότητας κατά Granger ανήκει στη θεωρία των πολυδιάστατων χρονοσειρών, είναι μια προχωρημένη μέθοδος ανίχνευσης κατευθυνόμε-

νων συσχετίσεων μεταξύ δύο χρονοσειρών, λαμβάνοντας όμως υπόψη την επίδραση των υπολοίπων παραμέτρων. Ως προς το γενικό συμπέρασμα της ύπαρξης ή μη, υπό συνθήκη αιτιότητας, οι δύο σταθμοί δεν διαφέρουν σημαντικά, όμως και εδώ οι σημαντικότητες του ελέγχου στον Π.Σ. Νέστο είναι πιο ισχυρές.

Η ανάλυση συσχετίσεων κρίθηκε αναγκαία για την κατασκευή νευρωνικών δικτύων με μεταβλητή εξόδου το διαλυμένο οξυγόνο και μεταβλητές εισόδου τις παραμέτρους που εκτιμήθηκε ότι επηρεάζουν τη συγκεκριμένη παράμετρο, δηλαδή τη στάθμη νερού, την ηλεκτρική αγωγιμότητα και τη θερμοκρασία νερού. Ως διάστημα πρόβλεψης ορίστηκε το διάστημα των τελευταίων 30 ημερών για το οποίο κατασκευάστηκε 95% διάστημα εμπιστοσύνης. Όλες οι παρατηρούμενες τιμές και για τους δύο σταθμούς βρέθηκαν εντός του δ.ε., με ελάχιστες να πλησιάζουν το κατώτερο άκρο του. Έτσι κατασκευάστηκε και το 90% δ.ε. για να ελεγχθεί εάν κυρίως οι ακραίες τιμές παραμένουν εντός του διαστήματος. Πράγματι στην περίπτωση αυτή ένα ποσοστό 10 έως 12% των παρατηρούμενων τιμών βρέθηκε εκτός του διαστήματος εμπιστοσύνης.

Συμπερασματικά η χρήση των ANN μοντέλων για τον σκοπό για τον οποίο κατασκευάστηκαν, δηλαδή την αξιολόγηση και την πρόβλεψη συγκεκριμένων παραμέτρων της ποιότητας των υδάτων, θεωρείται επιτυχής όταν χρησιμοποιείται 95% δ.ε., ενώ για 90% δ.ε. συνιστάται η εφαρμογή τους με επιφύλαξη.

4.2 Συνεισφορά της διατριβής

Η παρούσα διατριβή περιέχει αποτελέσματα που έχουν δημοσιευθεί σε διεθνή περιοδικά και συνέδρια σχετικά με την προστασία και διαχείριση του υδάτινου περιβάλλοντος και την εφαρμογή μεθόδων ανάλυσης και προσομοίωσης χρονοσειρών περιβαλλοντικών παραμέτρων, με χρήση προηγμένων μεθόδων στατιστικής για την ανάλυση χρονοσειρών. Στοιχεία που έχουν αναλυθεί και παρουσιασθεί στη διδακτορική διατριβή είναι:

- α) Η σύγκριση του άνω και κάτω ρου του ποταμού με χρήση στοχαστικών μοντέλων, αποτελεί ένα άλλο ενδιαφέρον κομμάτι της παρούσης διδακτορικής διατριβής.
- β) Η προσαρμογή στοχαστικών μοντέλων σε όλη την υδάτινη στήλη του ταμειυτήρα του Θησαυρού με στόχο την κατάργηση αισθητήρων για οικονομικά οφέλη, αποτελεί καινοτόμο ιδέα.
- γ) Οι χρονοσειρές οι οποίες αναλύθηκαν αποτελούν ημερήσιες καταγραφές ποιοτικών και ποσοτικών παραμέτρων των υδάτων του ποταμού Νέστου για διάστημα τεσσά-

ρων ετών, είναι μοναδικές και είναι η πρώτη φορά που χρησιμοποιείται για στατιστική ανάλυση τόσο ενημερωμένο και πυκνό δείγμα ημερήσιων μετρήσεων σε αριθμό μεγαλύτερο των 1400 τιμών.

- δ) Η χρήση πολυδιάστατων μοντέλων χρονικών σειρών, γραμμικών και μη γραμμικών (TF και ANN μοντέλων), καθώς επίσης και η σύγκρισή τους με τα ARIMA μοντέλα με σκοπό την αξιολόγηση της προβλεπτικής τους ικανότητας, αποτελεί πρωτότυπη εφαρμογή για δεδομένα του ποταμού Νέστου, από ένα ολοκληρωμένο δίκτυο monitoring, συντηρημένο, διατηρημένο και αποτελεσματικό, σε ημερήσιο επίπεδο.
- ε) Το κριτήριο της υπό συνθήκη αιτιότητας κατά Granger ανήκει στη θεωρία των πολυδιάστατων χρονοσειρών, είναι μια προχωρημένη μέθοδος ανίχνευσης κατευθυνόμενων συσχετίσεων μεταξύ δύο χρονοσειρών, λαμβάνοντας όμως υπόψη την επίδραση των υπολοίπων παραμέτρων. Έχει εφαρμοστεί κυρίως σε οικονομικά δεδομένα, ενώ η εφαρμογή της σε υδρολογικά δεδομένα Ελληνικών ποταμών αποτελεί πρωτοτυπία.
- στ) Τέλος, η εφαρμογή του επαυξημένου ελέγχου μη στασιμότητας Dickey – Fuller (ADF) σε υδρολογικά δεδομένα αποτελεί ένα πρωτότυπο σημείο της παρούσης διατριβής.

4.3 Μελλοντική Έρευνα

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται σύντομα μερικές ιδέες για μελλοντικές επεκτάσεις πάνω στο ερευνητικό πεδίο της διατριβής.

Η χρήση δεδομένων που να καλύπτουν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα και για περισσότερες παραμέτρους δίνει τη δυνατότητα εκτίμησης σύνθετων μοντέλων, καλύτερης προβλεπτικής ικανότητας και εξαγωγής ακριβέστερων συμπερασμάτων για την ποιοτική και ποσοτική κατάσταση των υδάτων του ποταμού. Το πρόβλημα των χαμένων τιμών σε υδρολογικά δεδομένα είναι πολύ σημαντικό και έχει αρκετές πτυχές που επιδέχονται επιπλέον έρευνα. Η χρήση νευρωνικών δικτύων ή άλλων στοχαστικών μοντέλων (χαοτικά), μπορεί να βοηθήσει προς αυτή την κατεύθυνση.

Ένας από τους στόχους στην περίπτωση της τεχνητής λίμνης του Θησαυρού ήταν η κατάργηση των αισθητήρων στα 20, 40 και 70m, για οικονομικό όφελος. Μια δεύτερη σκέψη για την ικανοποίηση του στόχου, θα μπορούσε να είναι η κατάργηση των αισθη-

τήρων μόνο στα μεγαλύτερα βάθη των 40 και 70m. Γεγονός το οποίο μπορεί να πραγματοποιηθεί με χρήση στοχαστικών μοντέλων που να εκτιμούν τις μετρήσεις στα μεγαλύτερα βάθη χρησιμοποιώντας αυτές του 1 και των 20m.

Εξίσου σημαντική θεωρείται και η εκτίμηση διαστημάτων εμπιστοσύνης στα μοντέλα νευρωνικών δικτύων με τη μέθοδο της επαναδειγματοληψίας. Με τον τρόπο αυτό μπορούν να εκτιμηθούν ακριβέστερα διαστήματα εμπιστοσύνης, ώστε να έχουμε καλύτερη εκτίμηση πρόβλεψης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική

1. Αλμπανάκης Κ., Ψιλοβίκος Αρ., Μαργώνη Σ., Υφαντής Β. (2001) Συμβολή των συστημάτων REMOS στην παρακολούθηση παλιρροϊκών φαινομαίων και στη διαχείριση παράκτιων περιοχών. Πρακτικά του 10^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Ιχθυολόγων με τίτλο: Διαχείριση και αειφορική ανάπτυξη υδάτινων και παραυδάτινων περιοχών, σελ. 411-414, Χανιά.
2. Αλμπανάκης Κ. (2007) Μαθήματα ωκεανογραφίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, κεφ. 4, σελ. 1-43.
3. Αντωνόπουλος Β.Ζ. (2003) Υδραυλική Περιβάλλοντος και ποιότητα Επιφανειακών Υδάτων. Εκδόσεις Γιαχούδη Θεσσαλονίκη.
4. Αντωνόπουλος Β.Ζ. (2010) Υδραυλική Περιβάλλοντος και ποιότητα Επιφανειακών Υδάτων. Εκδόσεις Τζιόλα Θεσσαλονίκη.
5. Αντωνόπουλος Β., Τσιούρης Σ. (1991) Σχέσεις παροχής και ποιοτικών παραμέτρων του νερού στον ποταμό Αξιό. Πρακτικά II Συνεδρίου. Περιβαλλοντική Επιστήμη και Τεχνολογία, Μόλυβος σελ. 640-648.
6. Γεράκης Π.Α., Τσιούρης Σ. (1989) Σημειώσεις Προστασίας Περιβάλλοντος. Εκδόσεις Υπηρεσία Δημοσιευμάτων Α.Π.Θ.
7. Δαμιανού Χ., Κούτρας Μ. (1991) Εισαγωγή στη Στατιστική Μέρος II. Εκδόσεις Αθανασόπουλος – Παπαδάμης. Αθήνα.
8. Δέλτα Νέστου, (2011) Φορέας Διαχείρισης Δέλτα Νέστου-Βιστωνίδας-Ισμαρίδας, διαθέσιμο στη σελίδα:
http://www.fdnestosvistonis.gr/site/index.php?option=com_content&view=category&id=36&Itemid=118&lang=el (Πρόσβαση: 25-10-2011).
9. Ινστιτούτο Αλιευτικής Έρευνας – ΙΝΑΛΕ (2010) Άτλας Ιχθυοπανίδας του Νέστου.
10. Κοτοπούλη Μ., Ψιλοβίκος Αρ., Γκιτσάκης Ν., Σαπουντζής Μ., Δήμος Γ. (2009) Ανάλυση Χρονοσειράς Ύψους Βροχής του Βροχομετρικού Σταθμού Νεστορίου Καστοριάς με τη χρήση Ανατροφοδοτούμενου Μοντέλου Νευρωνικών Δικτύων. Υδροτεχνικά, Τόμος 18 – 19, σελ. 49 – 64.
11. Κουγιουμτζής Δ. (2012) Σημειώσεις στο μάθημα χρονοσειρές του μεταπτυχιακού προγράμματος: Στατιστική και Επιχειρησιακή Έρευνα, του μαθηματικού τμήματος ΑΠΘ.
12. Κυριακίδης Ι. (2004) Εκτίμηση της φυσικοχημικής κατάστασης και των τάσεων μακροπρόθεσμης μεταβολής του καθεστώτος των επιφανειακών υδατικών συστημάτων της Ελλάδας με ανάλυση των δεδομένων του Υπουργείου Γεωργίας Λίμνες-Ποτάμια. Διπλωματική Μεταπτυχιακή Διατριβή. Α.Π.Θ. Τμήμα Γεωπονίας.

13. Λαόπουλος Θ. (2007) Ανάπτυξη τηλεμετρικού δικτύου παρακολούθησης περιβαλλοντικών παραμέτρων των νερών των ορυχείων του λιγνιτικού κέντρου Δυτ. Μακεδονίας. (κωδ. 81730, Φορέας Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού, Επιτροπή Ερευνών ΑΠΘ, 2007).
14. Λαόπουλος Θ. και συν. (2007) Συντήρηση και τεκμηρίωση του τηλεμετρικού δικτύου REMOS στο Νέστο (κωδ. 80693, Φορέας Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού, Επιτροπή Ερευνών ΑΠΘ, 2007).
15. Λουκάς Α. (2007) Ποιότητα του νερού στους ταμιευτήρες. Συμπληρωματικές σημειώσεις για το μάθημα Φράγματα. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Πολυτεχνική Σχολή Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.
16. Λύκας Α. (2008) Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα - Εφαρμογές, Τεχνητή Νοημοσύνη Εφαρμογές. Τόμος Β, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.
17. Μαμάης Δ. (2008) Σημειώσεις μεταπτυχιακού μαθήματος: Ρύπανση υδάτινων οικοσυστημάτων Διεπιστημονικό – Διατμηματικό πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών (Δ.Π.Μ.Σ), με τίτλο: Περιβάλλον και Ανάπτυξη. Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
18. Μισοπολινός Ν. (1991) Προβληματικά Εδάφη, Μελέτη Πρόληψη Βελτίωση, Εκδόσεις Γιαχούδη, Θεσσαλονίκη, σελ. 43-117.
19. Νταρακάς Ε. (2010) Ποιοτικά χαρακτηριστικά και διεργασίες επεξεργασίας νερού. ΑΠΘ Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Υδραυλικής & Τεχνικής Περιβάλλοντος.
20. Παπαζαφειρίου Ζ., Αντωνόπουλος Β. (1991) Υδραυλική Περιβάλλοντος. Εκδόσεις Υπηρεσία Δημοσιευμάτων Α.Π.Θ.
21. Παπαμιχαήλ Δ.Μ. (2004) Τεχνική Υδρολογία Επιφανειακών Υδάτων. Θεσσαλονίκη.
22. Πατρίκιος Γ., Δρίτσα Α. (2009) Οι δρόμοι του νερού στην κοιλάδα του Νέστου: <http://www.greekscapes.gr/index.php/2010-01-21-16-47-29/enot/188.html> (Πρόσβαση: 9-7-2011)
23. Περιβάλλον: Το Δίκτυο NATURA 2000 και Προστατευόμενες περιοχές. Υπουργείο Περιβάλλοντος Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής <http://www.minenv.gr/1/12/121/12103/g1210300.html> (Πρόσβαση: 23-11-2011)
24. Σέντας Α., Ψιλοβίκος Αρ., Σαπουντζής Μ., Γκιτσάκης Ν. (2008) Εφαρμογή των Στοχαστικών Μοντέλων στις Μηνιαίες Μετρήσεις των Παραμέτρων των Υδάτων του Πηγειού Ποταμού. Πρακτικά του 2^{ου} Διεθνούς Συνεδρίου με τίτλο: Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Νερού και Αποβλήτων Μικρής Κλίμακας – SWAT'08, σελ. 457 – 462, Συγγραφείς : Ζουμπούλης, Κούγκολος, Σαμαράς, Σκιάθος, Μάιος 2008.
25. Σκουλικίδης Ν. (1997) Η περιβαλλοντική κατάσταση των ελληνικών ποταμών, στο Βιώσιμη Ανάπτυξη με την Περιβαλλοντική Αγωγή, ειδική έκδοση της Νομ. Αυτοδ. Αιτωλοακαρνανίας, ΥΠΕΧΩΔΕ, Μεσολόγγι.

26. Τζαφέστας Σ.Γ. (2002) Υπολογιστική Νοημοσύνη. Τόμος Α: Μεθοδολογίες, Αθήνα.
27. Χάρτες. Geo Strategy (2010) available at: <http://www.geostrategy.gr/greece.html> (Πρόσβαση: 21-10-2011).
28. Ψιλοβίκος Α. (1990) Προστασία και Διαχείριση των Ελληνικών Υδροτόπων. Μεταβολές στους Ελληνικούς υδροτόπους κατά τον Εικοστό αιώνα: Οι περιπτώσεις των εσωτερικών υδάτων της Μακεδονίας και των ποτάμιων Δέλτα των ακτών του Αιγαίου και του Ιονίου Πελάγους. Πρακτικά συνάντησης εργασίας για τους Ελληνικούς Υδροτόπους, Θεσσαλονίκη 17-21 Απριλίου 1989.
29. Ψιλοβίκος Α. και συν. (1999) Έρευνα παρακολούθησης των διεργασιών του ποτάμιου συστήματος του Νέστου μέσω της εγκατάστασης και λειτουργίας πειραματικού αυτοματοποιημένου τηλεμετρικού δικτύου και έρευνα της δυναμικής ισορροπίας των φερτών υλών (κωδ. 7288, Φορέας ΔΑΥΕ – ΔΕΗ, Επιτροπή Ερευνών ΑΠΘ, 1997 – 1999).
30. Ψιλοβίκος Α. και συν. (2001) Έρευνα του προβλήματος του ευξεινισμού της τεχνητής λίμνης Θησαυρού στον ποταμό Νέστο και έκλυσης υδρόθειου στο σταθμό παραγωγής ΥΗΣ Θησαυρού (κωδ. 7730, Φορέας ΔΑΥΕ – ΔΕΗ, Επιτροπή Ερευνών ΑΠΘ, 1999-2001).
31. Ψιλοβίκος Α. και συν. (2001) Εκπόνηση ερευνητικού προγράμματος για την έρευνα κατασκευής, εγκατάσταση και λειτουργία δικτύου περιβαλλοντικών παραμέτρων στην ενδοορεινή κοιλάδα του Νέστου (κωδ. 20164, Φορέας ΔΑΥΕ – ΔΕΗ, Επιτροπή Ερευνών ΑΠΘ, 2001).
32. Ψιλοβίκος Α. και συν. (2002) Εκπόνηση ερευνητικού προγράμματος για την έρευνα κατασκευής, εγκατάσταση και λειτουργία δικτύου περιβαλλοντικών παραμέτρων στην ενδοορεινή κοιλάδα του Νέστου. Ερευνητικό Πρόγραμμα της επιτροπής Ερευνών του ΑΠΘ, κωδ. 20164, Φορέας Ανάθεσης ΔΑΥΕ – ΔΕΗ.
33. Ψιλοβίκος Α. και συν. (2003) Εκπόνηση ερευνητικού έργου για την έρευνα κατασκευής, εγκατάστασης και λειτουργίας σταθμού περιβαλλοντικών παραμέτρων στον κύριο ρου του ποταμού Νέστου (κωδ. 20957, Φορέας Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού, Επιτροπή Ερευνών ΑΠΘ, 2003).
34. Ψιλοβίκος Α. και συν. (2004) Συντήρηση και τεκμηρίωση στο τηλεμετρικό δίκτυο «REMOS» στο δέλτα του ποταμού Νέστου. (κωδ. 9908, Φορέας Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού, Επιτροπή Ερευνών ΑΠΘ, 2004).
35. Ψιλοβίκος Α. (2005) Η συμβολή της παρακολούθησης (monitoring) στην ορθολογική διαχείριση και την πρόληψη περιβαλλοντικών κινδύνων στο διασυνοριακό ποταμό Νέστο. Η προοπτική για την εφαρμογή της Οδηγίας 2000/60. Υδροτεχνικά, Τόμος 15, σελ. 87-102.

Αγγλική

36. Ahmad Sh., Khan I., Parida B. (2001) Performance of stochastic approaches for forecasting river water quality. *Water Research*, 35(18):4261–4266.
37. Akaike H. (1978) A Bayesian analysis of the minimum AIC procedure. *Ann. Inst. Stat. Math.* 30A:9–14.
38. Albanakis K., Mitrakas M., Moustaka-Gouni M., Psilovikos A. (2001) Determination of the environmental parameters that influence sulphide formation in the newly formed Thesaurus reservoir, in Nestos River, Greece. *Fresenius Environmental Bulletin*, 10(6):566-571.
39. Anastassopoulos K. (2006) Treatment of big landslides affecting construction of Thissavros hydroelectric project. *Proceedings of Hydro 2006, Maximizing the Benefits of Hydropower, 2006, Porto Carras, Greece. Paper 6.05.*
40. Antonopoulos V. (1995) in: Tsakiris G. (Ed.), *Water Resources: I. Technical Hydrology*, Symmetria Athens, 1995 (in Greek).
41. Antonopoulos V., Papamichail D. (1990) Stochastic Analysis of Water Quality Parameters in Ptolemais Stream (Solou). *Proceedings of Symp. on Chemicals in the Environment, Molivos*, pp. 194-205 (in Greek).
42. Antonopoulos V., Papamichail D., Mitsiou K. (2001) Statistical and trend analysis of water quality and quantity data for the Strymon River in Greece. *Hydrology and Earth System Sciences*, 5(4):679–691.
43. Antonopoulos V.Z., Papamichail D.M. (2002) Trend Analysis of Water Quality Parameters for two Transboundary Rivers in Northern Greece. *6th International Conference on the Protection and Restoration of the Environment, Skiathos Island, Greece*, pp. 83-90.
44. Apostolou A., Koutrakis M., Pehlivanov L., Vassilev M., Stefanov T., Velkov B. (2010) Notes of the Fish Fauna Composition of Mesta (Nestos) River in Regard to Management and Conservation. *Acta Zoologica Bulgarica*. 62(3): 271-276.
45. Argyropoulos D., Ganoulis J. (1992) Stochastic simulation of Axios River water quality by use of ARIMA modeling. *Proceedings of the 5th Congress of Hellenic Hydrotechnical Association (EYE) Larissa*, (in Greek), pp. 124-131.
46. Argiropoulos D., Papachristou E., Ganoulis J. (1994) Statistical assessment of water pollution in the Aegean rivers: the case of Nestos. *Sixth meeting of the regional agency for the environment, Provence-Alpes-Cote d' Azur, France.*
47. Argiropoulos D., Ganoulis J., Papachristou E. (1996) Water quality assessment of the Greek part of Nestos (Mesta) River in: Ganoulis J., et al. (Eds.) *Transboundary Water Resources Management: Institutional and Engineering Approaches. NATO ASI SERIES, Partnership Sub-Series 2. Environment, Vol. 7, Springer-Verlag, Heidelberg, Germany*, pp. 427-438.

48. Ayers R.S, Westcot D.W. (1994) Water quality for agriculture. Irrigation and Drainage paper, FAO, 3rd Edition, Rome.
49. Bartlett M.S (1946) On the theoretical specification of sampling properties of autocorrelated time series, *Journal Royal Stat. Soc.* B8, 27
50. Bassiliades N., Antoniadis I.P., Hatzikos E., Vlahavas I., Koutitas C. (2009) An intelligent system for monitoring and predicting water quality. European conference of the Czech Presidency of the Council of the EU Towards and Environment. pp. 534-542
51. Benyahya L., Hilaire A.S., Quarda B.M.J.T., Bobee B., Nedushan B.A. (2007) Modelling of water temperature based on stochastic approaches: case study of the Deschutes River. *Journal of Environmental Engineering Science* 6, pp. 437-438.
52. Box G.E.P., Pierce D.A. (1970) Distribution of residual autocorrelations in autoregressive – integrated moving average time series models. *Journal American Statistical Association* 64, pp. 1509
53. Box G., Jenkins G. (1976) *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. Holden Day, London.
54. Box G., Jenkins G., Reinsel G. (1994) *Time series analysis, Forecasting and Control*. Prentice-Hall Inc., Third Edition, pp. 598.
55. Boskidis I., Gikas G.D., Sylaios G.K., Pisinaras V., Petalas C., Tsihrintzis V.A. (2008) Modeling of a large, complex river basin: the lower Nestos river case, PROTECTION 2008, Proceedings of Protection and Restoration of the Environmental IX, Kefalonia, Greece.
56. Boskidis I., Gikas G.D., Pisinaras V., Tsihrintzis V.A. (2010) Spatial and temporal changes of water quality, and SWAT modeling of Vosvozis river basin, North Greece. *Journal Environmental Science and Health Part A.* 45(11):1421-40.
57. Boskidis I., Gikas G.D., Sylaios G.K., Tsihrintzis V.A. (2012) Hydrologic and Water Quality Modeling of Lower Nestos River Basin. *Water Resources Management*, 1:29.
58. Bricker O.P., Jones B.F. (1995) Main factors affecting the composition in natural waters in B. Salbu, E. Steinnes (eds). *Trace elements in natural waters*. Boca Raton, CRC Press.
59. Chatfield C. (2004) *The Analysis of Time Series An Introduction*. Chapman & Hall/CRC, 5th Edition.
60. Choleev I., Baltakov G. (1989) Basic features of the late Cenozoic evolution of the Mesta valley system on Bulgaria territory, *proc. Int. Conf. Geographica Rhodopia*, Sofia, Bulgaria, 1:14–17.
61. Christophoridis A., Stamatis N., Orfanidis S. (2007) Sediment heavy metals of a Mediterranean coastal lagoon: Agiasma, Nestos Delta, Eastern Macedonia (Greece). *Transitional Waters Bulletin*, 4:33-43.

62. Darken P., Zipper C., Holtzman G., Smith E. (2002) Serial correlation in water quality variables: Estimation and implications for the trend analysis. *Water Resources Research*, 38(7):1117.
63. Diamantopoulou M.J., Antonopoulos V.Z., Papamichail D.M. (2005) The use of Neural Network Technique for the Prediction of Water Quality Parameters of Axios River in Northern Greece. *EWRA European Water*, (11)12:55-62.
64. Diamantopoulou M., Antonopoulos V., Papamichail D. (2007) Cascade correlation artificial neural networks for estimating missing monthly values of water quality parameters in rivers. *Water Resources Management*, 21:649-662.
65. Dickey D.A., Fuller W.A. (1979) Distribution of the Estimators for Autoregressive Time Series with a Unit Root. *Journal of the American Statistical Association*. 74:427-431.
66. Dimou D., Gikas G.D., Tsihrintzis V.A. (2011) Water quantity monitoring of Lissos, North Greece. *Proceedings of the 3rd International Cemepe & Secotex Conference Skiathos, June 19-24, ISBN 978-960-6865-43-5.*
67. Dorffner G. (1996) Neural Networks for Time Series Processing. *Neural Network World*. 4: 447-468.
68. Durdu Omer Faruk (2010) A hybrid neural network and ARIMA model for water quality time series prediction. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 23:586-594.
69. Economidis P.S., Koutrakis E.T., Apostolou A., Vassilev M., Pehlivanov L. (2009) *Atlas of River Nestos Fish Fauna*. Prefectural Authority of Drama – Kavala – Xanthi, Kavala, Greece, pp. 182.
70. European Community (EC) (2000) Directive 2000/60/EC of the European parliament and of the council of 23 October 2000 establishing a framework for community action in the field of water policy. *Official Journal of the European Communities L327*, pp. 1-72.
71. Gerakis A., Kalburtji K. (1998) Agricultural activities affecting the functions and values of Ramsar wetland sites of Greece. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 70(2-3):119-128.
72. Geweke J. (2010) Measurement of Linear Dependence and Feedback between Multiple Time Series. *Journal of the American Statistical Association*, 77(378):304-313.
73. Gibbons J.D. (1997) *Nonparametric methods for quantitative analysis*. American Sciences, Press Ohio, 3rd Edition.
74. Gikas G.D., Tsihrintzis V.A., Akratos C.S., Haralambidis G. (2009) Water quality trends in Polyphytos reservoir, Aliakmon River, Greece. *Environmental Monitoring and Assessment*, 149(1-4):163-181.

75. Granger C.W.J. (1969) Investigating causal relations by econometric models and cross-spectral methods. *Econometrica*, 37(3):424–438.
76. Guo H.C., Liu L., Huang H. (2003) A Stochastic Water Quality Forecasting System for the Yiluo River. *Journal of Environmental Informatics*, 1(2):18-32.
77. Hal Borland (2003) *Beyond Your Doorstep: A Handbook to the Country*. Publisher, The Lyons Press, 1st edition.
78. Haykin S. (2009) *Neural Networks and Learning Machines*. 3rd Edition, Pearson Education.
79. Helsel D.R., Hirsch R.M. (1992) *Statistical Methods in Water Resources*. Techniques of Water-Resources Investigations of the USGS Bok 4, Chapter A3.
80. Hirsch R.M., Slack J.R., Smith R.A. (1982) Techniques of Trend Analysis for Monthly Water Quality Data. *Water Resources Research*, 18(1): 107-121.
81. Hirsch R.M., Alexander R.B., Smith R.A. (1991) Selection of Methods for the Detection and Estimation of Trend in Water Quality. *Water Resources Research*, 27(5): 803-813.
82. International Organization for Standardization (2011) <http://www.iso.org/iso/home.html> (Πρόσβαση: 23-11-2011).
83. Kahya E., Kalayci S. (2004) Trend analysis of streamflow in Turkey. *Journal of Hydrology*, 289:128-144.
84. Kendall M.G. (1970) *Rank correlation methods* (4th ed.). London: Griffin. ISBN 978-0-852-6419-96. OCLC 136868
85. Knill O. (2009) *Probability Theory and Stochastic Processes with Applications*. Overseas Press.
86. Koutroumanidis Th., Sylaios G., Zafeiriou E., Tsihrintzis V. (2009) Genetic modeling for the optimal forecasting of hydrologic time-series: Application in Nestos River. *Journal of Hydrology*, 368(1-4):156-164.
87. Kurunc A., Yurekli K., Cevik O. (2004) Performance of two stochastic approaches for forecasting water quality and stream flow data from Yesilirmak River, Turkey. *Environmental Modelling and Software*, 20:1195–1200.
88. Lehmann A., Rode M. (2000) Long-term behavior and cross-correlation water quality analysis of the river Elbe, Germany. *Water Research*, 35(9):2153–2160.
89. Lekkas D., Baltas E., Onof C. (2001) River flood forecasting with a transfer function model. 7th International Conference on Environmental Science and Technology, Ermoupolis, Syros Island, Greece.
90. Lekkas D., Onof C., Lee M., Baltas E. (2004) Application of artificial neural networks for flood forecasting. *Global Nest*, 6(3):205-211.

91. Lessin G., Raudsepp U. (2000) Water quality assessment using intergraded modelling and monitoring in Narva Bay. Gulf of Finland. *Environmental Modeling and Assessment*, 11:315-332.
92. Ljung G.M., Box G.E. (1978) On a measure of lack of fit in time series models. *Biometrika*, 65(2), pp 297-303.
93. Loukas A. (2010) Surface water quantity and quality assessment in Pinios River, Thessaly, Greece. *Desalination*, 250(1):266-273.
94. Mann B. H. (1945) Nonparametric Tests Against Trend. *Econometrica* 13:3, pp. 245-259
95. Mantzafleri N., Psilovikos Ar., Mplanta A. (2009) Water Quality Monitoring and Modeling in Lake Kastoria, using GIS. *Assessment and Management of Pollution Sources. Water Resources Management*, Vol 23, No 15, pp. 3221 – 3254. DOI: 10.1007/s11269-009-9461-4.
96. Margoni S. (2007) Remote Environmental Monitoring System (R.E.MO.S.) for water quality and quantity assessment in Agiasma Lagoon – River Nestos Delta. *Proceedings of 1st Secotex and Cemepe Conference, Skiathos, Greece*, pp. 721–726.
97. Margoni S., Psilovikos Ar. (2010) Sustainable management of Agiasma Lagoon–River Nestos delta—Using R.E.MO.S. daily monitoring data of water quality and quantity parameters. Trends, assessments, and natural hazards for the years 2000–2002. *Desalination*, 250(1):287–296.
98. Marques de Sa J.P. (2007) *Applied Statistics using SPSS, Statistica, MATLAB and R. 2nd Edition*. Springer – Verlag, Heidelberg, Berlin.
99. McCulloch W.S., Pitts W.H. (1943) A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5:115-133.
100. Mitsiou K.A., Antonopoulos, V.Z., Papamichail, D.M. (1999) Statistical Analysis of Water Quality Parameters Time Series of Strymon River. *Hydrotechnika*, 9: pp. 59-74 (in Greek).
101. Moustaka–Gouni M., Albanakis K., Mitrakas M., Psilovikos A. (2000) Planktic autotrophs and environmental conditions in the newly-formed hydroelectric Thesaurus reservoir, Greece. *Archiv. Hydrobiol.*, 149(3):507–526.
102. Mylopoulos Y., Kolokytha E., Kampragou E., Vagiona D. (2008) A Combined Methodology for Transboundary River Basin Management in Europe. Application in the Nestos–Mesta catchment area. *Water Resources Management* 22(8):1101-1112.
103. Najah A., Elshafie A., Karim O.A., Jaffer O. (2009) Prediction of Johor River Water Quality Parameters Using Artificial Neural Networks. *European Journal of Scientific Research*, 28(3):422-435.

104. Nakova E., Linnebank F., Bredeweg B., Salles P., Uzunov Y. (2009) The river Mesta case study: A qualitative model of dissolved oxygen in aquatic ecosystems. *Ecological Informatics*, 4(5-6):339-357
105. National Ministerial Decree, 46399/1352 (FEK 438B/03–07–1986), (1986). Requested Quality of Surface Waters Appropriated for Drinking, Swimming, Living Conditions of Fish in Fresh Waters, Mollusks Fishery and Aquaculture, Sampling Methods and Frequency and Analysis of the Surface Waters Appropriated for Drinking, Keeping the Orders of the EC Legislations 75/440/EC, 76/160/EC, 78/659/EC, 79/923/EC and 79/869/EC.
106. Nash H.R., Sutcliffe J.V. (1970) River flow forecasting using stochastic models. *Stochastic Environmental Research Risk Assessment* 19:326-339.
107. Norgaard M., Ravn O., Poulsen K., Hansen L.K. (2003) *Neural Networks for Modelling and Control of Dynamic Systems*. Springer – Verlag London Limited 2000, 3rd printing 2003.
108. Palani S., Liong S.Y., Tkalich P (2008) An ANN application for water quality forecasting. *Marine Pollution Bulletin* 56, pp. 1586-1597.
109. Papamichail D.M., Papazafiriou Z.G. (1990) Simulation of the Monthly Streamflows Data of the Venetikos River using Seasonal Stochastic Models. *Proceedings of the 4th Hellenic Conference of Hydrotechnical Association, Iraklio Crete*, pp. 119-132 (in Greek).
110. Pisinaras V., Petalas C., Gemitzi A., Tsihrintzis V.A. (2007) Water quantity and quality monitoring of Kosynthos River, North-Eastern Greece, *Global NEST Journal*, 9(3):259-268.
111. Psilovikos A., Vavliakis E., Langalis T. (1988) Natural and anthropogenic processes of the recent evolution of Nestos delta. *Bulletin of Geological Society of Greece*, 20:313–324.
112. Psilovikos Ant., Vavliakis E. (1989) Contribution to the evolution of the river Nestos valley in the Greek territory. *Geographica Rhodopica*. 1, pp. 26–36.
113. Psilovikos A. and Collaborators (1999) Monitoring research of the natural processes of the fluvial system of Nestos River by the construction and operation of a pilot automated telemetric network. Research of the dynamic balance of the suspended soils. Technical Report-research program, Department of Physical and Environmental Geography. Aristotle Univ. of Thessaloniki. pp. 1–4.
114. Psilovikos A. and Collaborators (2003) Maintenance and documentation of the R.E.M.O.S. network of river Nestos. Technical Report – Research Program, Department of Physical and Environmental Geography, Aristotle Univ. of Thessaloniki, pp. 1–10.

115. Psilovikos Ant., Albanakis K., Margoni S., Psilovikos Ar., Makrygiorgos C. (2003) Some Data of the Operation of “REMOS” System in Nestos Delta for the Quantitative and Qualitative Monitoring of Water Resources after the Dam Construction. Proceedings of the 3rd Hellenic Conference of Agriculture Engineering (in Greek), Thessaloniki, Greece, pp. 257–264.
116. Psilovikos A. (2004) Maintenance and Documentation of “REMOS” Telemetric Monitoring Network in River Nestos, for the 2nd Semester of 2004 (in Greek). Technical Report, Department of Physical & Environmental Geography, Aristotle Univ. of Thessaloniki.
117. Psilovikos A., Margoni S., Psilovikos A. (2005) Monitoring water quality parameters of the Transboundary River Nestos. American. Journal of Applied Science, 2(4):759–762.
118. Psilovikos Ar., Margoni S., Psilovikos A. (2006) Simulation and trend analysis of the water quality monitoring daily data in Nestos River Delta. Contribution to the sustainable management and results for the years 2000–2002. Environmental Monitoring and Assessment, 116(1–3):543 – 562.
119. Psilovikos Ar., Sentas A. (2009) Comparison and Assessment of the Monitoring Data of two R.E.MO.S. Stations in Nestos and Pagoneri for the Year 2004. The Base for an Integrated Water Management. Desalination, 248(1–3):1016–1028.
120. Psilovikos Ar., Sentas A., Sahanidis C., Laopoulos T. (2009) R.E.MO.S. network in lignite mines in Western Macedonia, Greece. Assessment of the results for the year 2008. Proceedings of the 2nd International Conference on Environmental Management, Engineering, Planning and Economics (CEMEPE) 2009, Vol II, pp. 731 – 736, Mykonos, Greece, June 2009.
121. Psilovikos Ar., Sentas A., Sahanidis C., Laopoulos T. (2011) Simulation and Trend Analysis of r.e.mo.s. Water Quality and Quantity Data in Lignite Mines of Western Macedonia–Greece, for the Years 2007-2009. Desalination and Water Treatment, Vol 33, pp 44 – 52.
122. Quenouille M.H. (1949) Approximate tests of correlation in time-series. Journal Royal Statistical Society, B11 68-84.
123. Schwarz G. (1978) Estimating the dimension of a model. Annals of Statistics, 6, pp 461–464.
124. Sentas A., Margoni S., Albanakis K. (2008) Statistical Research and Assessment of Water Quality Parameters of “REMOS” Telemetric Monitoring Station in River Nestos Delta for the Year 2004 (in Greek). Proceedings of the 2nd International Conference titled: Small Scale Water & Waste Treatment, Skiathos, Greece, 1, 463-468.

125. Sentas A., Psilovikos A. (2010) Comparison of ARIMA and Transfer Function (TF) Models in Water Temperature Simulation in Dam – Lake Thesaurus, Eastern Macedonia, Greece. Proceedings International Symposium: Environmental Hydraulics, Athens, Greece, June 23-25, pp 929-934.
126. Sentas A., Psilovikos A. (2012) Dissolved oxygen assessment in Dam-Lake Thesaurus using stochastic modeling. Proceedings International Conference: Protection and Restoration of the Environment XI, Thessaloniki, Greece, July 2012, pp 1573-1582.
127. Seth Anil K. (2010) A MATLAB toolbox for Granger causal connectivity analysis. *Journal of Neuroscience Methods*, 186:262-273.
128. Sheng Yue, Pilon P., Phinney B., Cavadias G. (2001) Patterns of trend in Canadian streamflow. 58th Eastern snow conference. Ottawa, Ontario, Canada.
129. Silva A.P.A., Moulin S.L. (2000) Confidence intervals for neural networks based shortterm load forecasting. *IEEE Trans. Power Systems*, 15(4):1191-1196.
130. Simeonov V., Stratis J.A., Samara C., Zachariadis G., Voutsas D., Anthemidis A., Sofoniou M., Kouimtzis Th. (2003) Assessment of the surface water quality in Northern Greece, *Water Research*, 37:4119-4124.
131. Skoulikaris Ch., Ganoulis J., J.M. Monget. (2009) Impact of Climate Change on River Water Flow: The Case of the Transboundary Mesta/Nestos River between Bulgaria and Greece. 33rd International Association of Hydraulic Engineering and Research (IAHR) Biennial Congress, Vancouver, British Columbia, 9-14 August 2009, 1108-1115.
132. Smith K. (1981) The prediction of river water temperature. *Hydrologic Science Bull.* 26:19-32.
133. Smith D., Maasdam R. (1994) New Zealand's National River Water Quality Network 1. Design and physico - chemical characterisation *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 28(1):19-35.
134. Soufi R., Varadinova E., Uzunov Y. (2005) Relation of the Bulgarian Biotic Index to the standardized Indices for Water quality assessment of the river Mesta (SW Bulgaria). *Comp. rend. Academic Bulgaria Science*, 57(8): 83-86
135. Spearman C. (1904) The proof and measurement of association between two things. *American Journal Psychology*. 15: 72–101.
136. Stednick J.D. (1991) *Widland Water Quality Sampling and Analysis*. Academic Press, Inc., San Diego.
137. Walker G. (1931) On periodicity in series of related terms. *Proceedings of the Royal Society*, A131, pp. 518.
138. Wang H., Gao Y. (2010) Elman's Recurrent Neural Network Applied to Forecasting the Quality of Water Diversion in the Water Source of Lake Taihu. *International Conference on Biology, Environment and Chemistry IPCBEE*, Singapore.

139. Ward J.V. (1985) Thermal characteristics of running waters. *Hydrobiologia*, 125:31-46.
140. Wei William S. (2005) *Time Series Analysis: Univariate and Multivariate Methods*, 2nd Edition.
141. Wetzel Robert G. (2006) *Λιμνολογία και Ποτάμια Οικοσυστήματα*. Εκδόσεις Κωσταράκη, Αθήνα 2006.
142. World Health Organization - WHO (1984). *Guidelines for Drinking-Water Quality*, Vol. 1. Recommendations, Vol. 2. Health Criteria and Other Supporting Information, World Health Organization, Geneva.
143. WWF Ελλάς (2009) *Ελληνική Ορνιθολογική Εταιρία και Ελληνική Εταιρία Περιβάλλοντος και Πολιτισμού. Ελληνικοί Υγρότοποι Ραμσάρ: Αξιολόγηση Προστασίας και Διαχείρισης*. Αθήνα, Φεβρουάριος 2009.
144. Uzunov Y., Nuttle T., Nakova E., Varadinova E. (2006) Dissolved oxygen in the river Mesta (Bulgaria): a case study for qualitative modelling of sustainable development. *Proceedings of the Twentieth International Workshop on Qualitative Reasoning*. 10-12 July 2006 Hanover, New Hampshire, USA.
145. Uzunov Y., Nakova E., Varadinova E. (2006) Textual description of River Mesta case study. STREP project cofunded by the European Commission within the Sixth Framework Programme (2002 – 2006), Project Deliverable Report D6.3.1.
146. Yi Myeong – Jae., Kang – Kun L. (2004) Transfer function-noise modelling of irregularly observed groundwater heads using precipitation data. *Journal of Hydrology*, (288):272–287.
147. Yule G.U. (1927) On a method of investigating periodicities in disturbed series, with special references to Wolfer's sunspot numbers. *Phil. Trans.* A226, 267.
148. Yurekli K., Kurunc A., Ozturk F. (2005) Application of linear stochastic models to monthly flow data of Kelkit Stream. *Ecological Modelling*, 183: 67–75.

ABSTRACT

Water is an irreplaceable good for all kinds of existence. As a good in abundance, the total amounts of water on earth remain stable in quantity and unalterable throughout the years. On the other hand, human action pollutes and wastes water, making it inappropriate for consumption. This results to the need of a sustainable management of water resources.

In the Greek reality, only the past few years' research has started to taking into account the preservation and protection of environment, being concerned about the qualitative and quantitative downgrading of aquatic systems. Controlling water condition requires a database that results from a systematic and monitoring of water parameters, so it becomes necessary to apply a long term monitoring system to control water condition.

The present thesis deals with data analysis derived from three (3) monitoring stations settled in the entire length of river Nestos. Its purpose is to extract useful informations for sustainable management of river water. Specifically the objectives are:

- 1) To observe the situation of the river cause from the anthropogenic changes after the construction and operation of Thesaurus and Platanovrisi dams (1997-2000).
- 2) The assessment of the information using time series analysis in water quality and quantity parameters and the identification of any extreme conditions occurring, such as floods, pollution etc.
- 3) The evaluation of resulting status and investigation of how the river recover to its first condition.
- 4) The evaluation and assessment of Thesaurus dam-lake, by analyzing data from different depths, we also check the possibility of removing the sensors placed in deeper depths, using the time series of 1m depth as an input time series for the simulation and forecasting of the time series deeper depths (20, 40 and 70m).

The northern network (Pagoneri remote station) is being evaluated with the use of descriptive statistic tools (measures of central tendency and variability, sampling frequency distribution, graphs and box plots). The checking of trend is performed with a) fitting a linear regression model and b) using the augmented Dickey – Fuller test. The checking of the fitting in normal, lognormal, exponential and uniform distribution is performed with the Kolmogorov – Smirnov test.

This resulted in useful conclusions for the quality and quantity of water that inflows from Bulgaria into Greece. The main characteristic of the parameters is that they present strong fluctuations, with several extreme lows and highs with sharp edges and asymmetries.

Applying the same statistical methods for the central network (Thesaurus R.S.) in four different depths (1, 20, 40 and 70 meters), we derived information of the artificial lake's status and operation in each deeper points. Likewise, stochastic models of time series are being fitted ARIMA, Transfer Function models and Artificial Neural Networks for the a) comparison of their forecasting ability for each of $m = 1, 2, 3, 5$ and 10 steps ahead and b) the possibility of the abolishment of sensors in lower depths. The analysis above led to the conclusion that the ARIMA models exhibit a better forecasting ability and the abolishment of sensors in deeper depths is possible only for the 20m sensors and needs further research for the sensors in 40 and 70m depth.

The same statistical analysis that was applied to the northern network (Pagoneri R.S.) is also applied to the southern network (Nestos R.S.). The southern site of the river, where its estuaries are located and many lagoons have been formed, presents special interest, as it is a very rich aquatic ecosystem that needs continuously monitoring and assessment. What characterizes the parameters of the southern network is that the strong fluctuations and the sharp edges have been smoothed and they have less range and variance.

By completing the present thesis, a comparison of measurements derived from the two RS, Pagoneri and Nestos, is being held. The descriptive statistics of each one parameter of R.S. Pagoneri are compared to the respective one of R.S. Nestos. A check of autocorrelations using Autocorrelation function (ACF) took place and a correlation analysis using a) Cross Correlation function (CCF) and b) the Granger conditional causality are being performed. Lastly, according to the conclusions of the correlation analysis, Artificial Neural Network models are fitted and their forecasting ability is being evaluated, by using 90% and 95% confidence levels.

The comparison of the two stations led to the conclusion that the values at R.S. Nestos have been smoothed and the number of the extreme values has been significantly decreased, due to the operation of the two dams. The use of the ANN models is considered successful for 95%, while for 90% is recommended with prejudice.

Further research can be held in four different aspects:

- 1) In using a bigger database with an extended number of parameters and measurements.
- 2) In using Artificial Neural Networks or other models (i.e. chaotic) for replacing missing values.
- 3) In the creation of new models in order to remove sensors located in deeper layers inside the dam lake.

Keywords: Stochastic models, river Nestos, hydrological parameters, water recourses, Artificial Neural Networks

