

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

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

**« Μοντέλα χωρικής κατανομής της ποιότητας των υδάτων στην λίμνη
Κάρλα με χρήση GIS»**



Χρυσώ Α. Ζήσου

ΒΟΛΟΣ 2012

**« Μοντέλα χωρικής κατανομής της ποιότητας των υδάτων στην λίμνη Κάρλα με
χρήση GIS»**

Αφιερώνεται

Στην αδερφή μου Δανάη

και στους γονείς μου,

Αχιλλέα και Ελένη

για την συνεχή, αδιάλειπτη

και πολύτιμη στήριξη τους.

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

- 1) **Άρης Ψιλοβίκος**, Επίκουρος Καθηγητής, Αειφορική Διαχείριση Υδατικών Πόρων, Τμήμα Γεωπονίας Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, *Επιβλέπων*,
- 2) **Ιφιγένεια Κάγκαλου**, Επίκουρη Καθηγήτρια, Υδρολογία, Λιμνολογία και Ποταμολογία, Τμήμα Γεωπονίας Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, *Μέλος*,
- 3) **Ηρακλής Χαλκίδης**, Λέκτορας, Διαχείριση Υδατικών Πόρων με Έμφαση στην Κίνηση του Νερού στο Έδαφος, Τμήμα Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, *Μέλος*.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών «Αειφορική Διαχείριση Υδατικού Περιβάλλοντος» του Τμήματος Γεωπονίας, Ιχθυολογίας & Υδάτινου Περιβάλλοντος της Σχολής Γεωπονικών Επιστημών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Το θέμα της μεταπτυχιακής διατριβής είναι «Μοντέλα χωρικής κατανομής της ποιότητας των υδάτων στην λίμνη Κάρλα με χρήση GIS».

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της μεταπτυχιακής μου διατριβής, Επίκουρο Καθηγητή κ. Άρη Ψιλοβίκο, για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου, αλλά και για την πολύτιμη βοήθεια του και την διαρκή υποστήριξη του, σε όλα τα στάδια της διατριβής, τόσο κατά την διεξαγωγή του πειράματος, όσο και κατά την συγγραφή της παρούσας εργασίας. Τον ευχαριστώ βαθύτατα, όχι μόνο για τις συμβουλές του σε επιστημονικό επίπεδο, και την δυνατότητα που μου παρείχε να ασχοληθώ με ένα αντικείμενο πραγματικού ενδιαφέροντος, αλλά και για την φιλική και ευχάριστη διάθεση που συνέθεσε ένα άριστο επίπεδο συνεργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα λοιπά μέλη της εξεταστικής επιτροπής μου, την Επίκουρη Καθηγήτρια κα. Ιφιγένεια Κάγκαλου, καθώς και τον Λέκτορα κ. Ηρακλή Χαλκίδη για την καλή διάθεση, το χρόνο που διέθεσαν και τις πολύτιμες συμβουλές που μου προσέφεραν στην συγγραφή της συγκεκριμένης εργασίας.

Θερμά ευχαριστώ τον κ. Παπανίκο Νίκο, για την πολύτιμη βοήθειά του στα διάφορα στάδια των εργασιών υπαίθρου και στις επιτόπιες μετρήσεις που ελήφθησαν με τη βοήθειά του. Του εύχομαι καλή δύναμη στον δύσκολο αγώνα του.

Θερμά ευχαριστώ την Καθηγήτρια κα. Μαρία Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη της Σχολής Γεωπονικών Σπουδών, του Τμήματος Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού

περιβάλλοντος, για την παραχώρηση του φορητού πολυόργανου της Horiba (Water quality Checker model U-10), χωρίς το οποίο δεν θα ήταν εφικτές οι μετρήσεις των φυσικοχημικών παραμέτρων του νερού.

Παράληψη θα ήταν, αν δεν ευχαριστούσα για την πολύτιμη βοήθεια τους, την Πρόεδρο του Φορέα Διαχείρισης της Κάρλας κα Ιφιγένεια Κάγκαλου, η οποία είναι και μέλος της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής και τον υποψήφιο Διδάκτορα Παντελή Σιδηρόπουλο του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, για το υλικό με το οποίο με προμήθευσαν για την συγγραφή της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας.

Επίσης, οι θερμές ευχαριστίες μου αποτείνονται στην προπτυχιακή φοιτήτρια Ζωή Σταμπουλή και στην υποψήφια Διδάκτορα Νίκη Ματζαφλέρη για την παροχή βιβλιογραφικού υλικού καθώς και για την υποστήριξη και καθοδήγηση τους κατά την διάρκεια διεξαγωγής των πειραμάτων μου.

Θερμά ευχαριστώ επίσης, τον συνάδελφο κ. Στάθη Κωστακόπουλο για την εγκατάσταση του προγράμματος ArcMap 10, καθώς και για τις πολύτιμες συμβουλές του στην λειτουργία του προγράμματος, κάτι που δε θα ήταν εφικτό εάν δε μας παραχωρούσε δωρεάν ο κ. Άδωνις Κοντός τρεις δίμηνες άδειες, τον οποίο επίσης και ευχαριστώ θερμά.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον προπτυχιακό φοιτητή Ηλία Σπανό για την υποστήριξη και την πολύτιμη βοήθεια του στην διάρκεια των δειγματοληψιών μου, αλλά και στην οικογένεια μου για την αμέριστη συμπαράσταση, βοήθεια και προ πάντων κατανόηση και ανοχή καθ' όλο το χρονικό διάστημα των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή, η οποία διεξήχθη στο πλαίσιο του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας από το τμήμα Γεωπονίας, Ιχθυολογίας κα Υδάτινου Περιβάλλοντος, στόχο είχε αρχικά να κατανοηθούν κάποιες βασικές έννοιες. Ενώ κάποιες βασικές μορφές ζωής διαβιώνουν σε ρυπασμένα και ενίοτε μολυσμένα νερά, οι περισσότεροι οργανισμοί χρειάζονται καλής ποιότητας ύδατα προκειμένου να αναπτυχθούν. Η ποιότητα των επιφανειακών υδάτων, επηρεάζεται από τον τύπο και την ποσότητα ποικίλων διαθέσιμων και διαλυμένων ουσιών. Μερικές από αυτές τις ουσίες εμφανίζονται φυσικά, ενώ άλλες προέρχονται από τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες.

Η παρακολούθηση της ποιότητας των υδάτων στις λίμνες, είναι ένα αναπόσπαστο μέρος της διαχείρισης των υδατικών πόρων. Διασφαλίζει την αειφορική χρήση του νερού και επιτρέπει την ανίχνευση των επιδράσεων από ανθρωπογενείς επιρροές. Η παρακολούθηση των λιμνών παρέχει έγκαιρη προειδοποίηση της υποβάθμισης του οικοσυστήματος που προκύπτει από την ανάμιξη εισροών, την προσθήκη θρεπτικών, την απορροή των ιζημάτων και την υπερβολική χρήση των πόρων. Παρακολουθώντας τις μεταβολές των φυσικών, χημικών και βιολογικών παραμέτρων της λίμνης, μπορούμε να έχουμε έγκυρη ανίχνευση και αποκλεισμό των βλαβερών ουσιών χωρίς συνέπειες.

Η παρακολούθηση της ποιότητας των υδάτων σε λίμνες, παράκτιες περιοχές και σε ποτάμια, απαιτείται από εθνικούς Νόμους και Οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Το κύριο αντικείμενο αυτών των κανονισμών είναι να αποτραπεί και να ελεγχθεί η ρύπανση του περιβάλλοντος. Η περιβαλλοντική παρακολούθηση είναι μία από τις

μεθόδους που συνεισφέρουν στην επίτευξη αυτού του στόχου. Η Οδηγία Πλαίσιο 2000/60/EC της Ευρωπαϊκής Ένωσης, συνηγορεί σε αυτήν την πολιτική, προσπαθώντας να επιτύχει “καλή ποιοτική κατάσταση” σε όλα τα υδάτινα σώματα, μέχρι το 2015.

Η προσομοίωση λιμνών είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη και συνεχώς πιο δημοφιλής μέθοδος για την μελέτη πολύπλοκων συστημάτων. Τα μοντέλα ποιότητας νερού, βρίσκουν εφαρμογή σε διάφορους τομείς όπως είναι η εκπόνηση σχεδίων δράσης, ο υπολογισμός της συνεισφοράς διαφορετικών παραγόντων στην αλλαγή της ποιότητας του νερού, στην προσέγγιση μιας μελλοντικής ανάπτυξης και στο πως θα επιδράσει στους υδατικούς πόρους και τέλος για επιστημονικούς σκοπούς.

Στην συνέχεια, στόχος της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, ήταν η εποχιακή παρακολούθηση των πιο αντιπροσωπευτικών φυσικοχημικών παραμέτρων του νερού, σε επιλεγμένα σημεία δειγματοληψίας στη λίμνη Κάρλα. Η λίμνη Κάρλα ή Βοιβηίς, όπως ήταν γνωστή κατά την αρχαιότητα, αποτελούσε τον δεύτερο μεγαλύτερο υγροβιότοπο της Ελλάδας. Μια σειρά από επιβλαβή φαινόμενα, όπως ήταν η διακυμάνσεις στην στάθμη της λίμνης, οι εκτεταμένες πλημμύρες της περιοχής, η ελονοσία που αποτελούσε μάλιστα και άλλα, οδήγησαν στην ολική αποξήρανση της λίμνης το 1962.

Οι τρομακτικές επιπτώσεις που ακολούθησαν ήταν τόσο κοινωνικές, όσο και περιβαλλοντικές. Απόρροια όλων των ανωτέρω, ήταν η επανασύσταση ταμιευτήρα 38.000 στρεμμάτων στο χαμηλότερο τμήμα της πρώην λίμνης Κάρλας, ο οποίος σήμερα βρίσκεται στο στάδιο της επαναπλήρωσης.

Από τις αναλύσεις προέκυψε ότι οι παράμετροι οι οποίοι μετρήθηκαν με το φορητό όργανο κυμάνθηκαν ως εξής, η θερμοκρασία μεταξύ 7 και 31,4 °C, το

διαλυμένο οξυγόνο μεταξύ 2,85 και 8,32 mg/l, η αγωγιμότητα μεταξύ 2,6 και 3,2 mS/cm, η θολερότητα μεταξύ 14,8 και 148,6, το pH 7,43 και 8,73 και τέλος η αλατότητα 0,11 με 0,18 ‰. Οι αναλύσεις του εργαστηρίου έδειξαν ότι οι τιμές των νιτροδών κυμάνθηκαν μεταξύ 0,005 και 0,134 mg/l, των νιτρικών 0,05 και 1,35 mg/l, των αμμωνιακών μεταξύ 0,029 και 0,661 mg/l, των ορθοφωσφορικών από 0,006 μέχρι 0,180 mg/l και τέλος της χλωροφύλλης-α από 184,107 μέχρι 381,179675 mg/m³.

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων που προέκυψαν από τις δειγματοληψίες, εισήχθησαν σε περιβάλλον Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) και η ανάλυση τους, οδήγησε σε μια σειρά συμπερασμάτων που αφορούν τις συγκεντρώσεις των φυσικοχημικών παραμέτρων, την εποχιακή και χωρική διακύμανσή τους. Για την προστασία της λίμνης, μια σειρά προτάσεων διατυπώθηκαν, με κύρια την ανάγκη να λειτουργήσει άμεσα ένα δίκτυο συστηματικής παρακολούθησης της ποιότητας των υδάτων, με μετρήσεις κύριων παραμέτρων και *in situ* αλλά και μέσω τηλεμετρικών σταθμών, με σκοπό την άμεση επέμβαση στο οικοσύστημα σε περίπτωση εμφάνισης ακραίων φαινομένων.

Η νέα λίμνη Κάρλα είναι ένας πολύ σημαντικός υδροβιότοπος, όχι μόνο εξαιτίας της επανασύστασής της στην περιοχή της πρώην λίμνης Κάρλας, όσο και για την χρήση την οποία προορίζεται, γι' αυτό και χρήζει άμεσης παρακολούθησης των αβιοτικών όσο και των βιοτικών της παραμέτρων.

Λέξεις κλειδιά: Λίμνη Κάρλα, ποιότητα νερού, παρακολούθηση, μοντέλο προσομοίωσης, αειφορική διαχείριση.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	3
1.1. Γενικά.....	3
1.2. Η Σημασία των Εσωτερικών Υδάτων.....	6
1.3. Η Ποιότητα των Υδάτων.....	10
1.4. Η Οδηγία 2000/60/ΕΕ.....	14
1.4.1. Τύποι Ταξινόμησης της Οικολογικής Κατάστασης των Λιμνών.....	16
1.4.2. Η Ελληνική Νομοθεσία για τη Ποιότητα των Επιφανειακών Υδάτων	18
2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	21
2.1. Η Παρακολούθηση (monitoring) των Λιμνών	21
2.2. Η Μοντελοποίηση των Λιμνών.....	24
2.2.1. Εισαγωγή.....	24
2.2.2. Μοντέλα Ποιότητας Υδάτων	27
2.3. Μοντέλα Χωρικής Προσομοίωσης με την Χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS).....	30
2.3.1. Εισαγωγή.....	30
2.3.2. Το ArcGIS 10.....	32
2.3.3. Μέθοδοι Παρεμβολής.....	33
2.4. Περιοχή Μελέτης.....	36
2.4.1. Ανάμεσα στον Μύθο και την Πραγματικότητα	39

2.4.2.	Η Αποξήρανση της Λίμνης	40
2.4.3.	Η Ανασύσταση της Λίμνης Κάρλας	43
2.5.	Μετρήσεις Πεδίου και Μέθοδοι Δειγματοληψίας της Λίμνης Κάρλας.....	48
2.5.1.	Σημεία και Συχνότητα Δειγματοληψίας	48
2.5.2.	Διαδικασία Δειγματοληψίας.....	50
2.5.3.	Ποσοτικός Προσδιορισμός των Παραμέτρων.....	51
3.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	55
3.1.	Γραφήματα των Παραμέτρων	55
3.2.	Δισδιάστατα Διαγράμματα Χωρικής Παρεμβολής με GIS.....	65
4.	ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	96
5.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	110
5.1.	Συμπεράσματα αποτελεσμάτων	110
5.2.	Προτάσεις.....	113
6.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	124
7.	ABSTRACT.....	129

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Γενικά

Οι λίμνες παρέχουν ενδιαιτήματα για όλων των ειδών τους οργανισμούς, όπως είναι τα βακτήρια, οι μύκητες, τα φύκη, το πλαγκτόν, τα ψάρια, τα αμφίβια, τα ερπετά τα πουλιά και τα θηλαστικά. Κάποιες από αυτές υποστηρίζουν ακόμα και μεγάλους αριθμούς απειλούμενων ειδών καθώς και ενδημικών ειδών (Mays 1996).

Οι περισσότερες από τις ανθρώπινες κοινότητες που περιβάλλουν τις λίμνες, εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την βιοποικιλότητα και τις φυσικές διεργασίες των λιμνών, για να καλύψουν τις ανάγκες σε πόσιμο νερό, τρόφιμα και γενικά τον τρόπο ζωής τους. Πολλοί από τους φτωχότερους ανθρώπους στον κόσμο, εξαρτώνται εξολοκλήρου από την βιοποικιλότητα του γλυκού νερού για τις ανάγκες τους σε πρωτεΐνες. Αρκετές είναι επίσης και οι χώρες που το μεγαλύτερο ποσοστό σε πόσιμο νερό το προμηθεύονται από λίμνες (Wetzel 2006).

Η λίμνη Κάρλα, η οποία αποτελεί και το αντικείμενο της παρούσης εργασίας, ήταν γνωστή κατά την αρχαιότητα (2.500 π.Χ) με το όνομα Βοιβής. Η Βοιβήδα (Φοίβη – Βοίβη), ή Κερκινίτης, ή Κάρλα, ή Κάρλα Σου, ή Κάρλα Γκιόλ, ο “Βάλτος” για τους ντόπιους, πορεύτηκε μαζί με τους παραλίμνιους ανθρώπους ανάμεσα στον μύθο και την πραγματικότητα.

Οι διακυμάνσεις της στάθμης, οι πλημμύρες της περιοχής, η δημιουργία περισσότερων γεωργικών εκτάσεων, η μείωση των αλιευμάτων και η ανάγκη για περιορισμό των επιδημιών ελονοσίας συνετέλεσαν στην ολική αποξήρανση της λίμνης το 1962 παρά τις σχετικές μελέτες που δεν προέβλεπαν κάτι τέτοιο. Με την

αποξήρανση της λίμνης φάνηκαν οι τρομακτικές επιπτώσεις από τη μη ολοκλήρωση του έργου, το οποίο προέβλεπε την κατασκευή ταμιευτήρα 64.700 στρεμμάτων.

Οι επιπτώσεις από την αποξήρανση του δεύτερου σε μέγεθος υδροβιότοπου της Ελλάδας, είναι τόσο περιβαλλοντικές όσο και κοινωνικές (Π.Ο.Κα.Μα.Κε.Βε. 2010):

- Ραγδαία πτώση της υπόγειας υδροφορίας,
- Εισχώρηση του θαλάσσιου μετώπου στον ευρύτερο χώρο της περιοχής της Κάρλας,
- Ρύπανση και επιπτώσεις στην πανίδα και στην χλωρίδα της περιοχής,
- Καταστροφή γεωτρήσεων και ξήρανση πηγών μεταξύ των οποίων και η Υπέρεια Κρήνη στο Βελεστίνο,
- Αλλαγές στο μικροκλίμα της περιοχής και
- Αδυναμία υδροδότησης πόλεων και οικισμών.

Απόρροια όλων των ανωτέρω και μετά από έντονες διαμαρτυρίες του τοπικού πληθυσμού, ήταν η κατασκευή ταμιευτήρα 38.000 στρεμμάτων στο χαμηλότερο τμήμα της πρώην λίμνης Κάρλας κοντά στο χωριό Κανάλια, καθώς και η δημιουργία του Φορέα Διαχείρισης της Περιοχής Οικοανάπτυξης Κάρλας – Μαυροβουνίου – Κεφαλόβρυσου – Βελεστίνου.

Η ανασύσταση της λίμνης Κάρλας αναδεικνύει το πρόβλημα της αειφορικής διαχείρισης των υδατικών πόρων που είναι άρρηκτα συνδεδεμένοι με το ευρύτερο εθνικό και παγκόσμιο πρόβλημα της προστασίας του περιβάλλοντος με παράλληλο σεβασμό στην πολιτισμική μας κληρονομιά.

Η διατριβή αυτή έχει τους εξής βασικούς άξονες και στόχους:

- Την κατανόηση της σημαντικότητας των εσωτερικών υδάτων,

- Την περιγραφή της έννοιας της ποιότητας των λιμναίων οικοσυστημάτων,
- Την σπουδαιότητα και την αναγκαιότητα της παρακολούθησης των λιμνών,
- Την εισαγωγή της έννοιας της προσομοίωσης ως εργαλείο ανάλυσης της ποιότητας των λιμναίων οικοσυστημάτων,
- Τη χρήση του GIS ως μέσου ανάλυσης και παρουσίασης των αποτελεσμάτων,
- Την αποτύπωση της τωρινής κατάστασης του φυσικού περιβάλλοντος της λίμνης Κάρλας,
- Την εισαγωγή όλων των χωρικών στοιχείων που προκύπτουν από τα ποιοτικά δεδομένα της λίμνης και για τις συγκεκριμένες θέσεις μέτρησης σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους – εποχές του έτους, με αποτέλεσμα την δημιουργία ισοποσοτικών καμπυλών για όλες τις ποιοτικές παραμέτρους,
- Τη σύγκριση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων,
- Την εξαγωγή συμπερασμάτων αποτίμησης για την υφιστάμενη οικολογική κατάσταση της λίμνης και
- Την διατύπωση προτάσεων για την αειφορική διαχείριση και παρακολούθηση της ποιότητας του υδάτινου δυναμικού της.

Η λίμνη Κάρλα θεωρείται ένα πολύ σημαντικό υδάτινο οικοσύστημα, τόσο από άποψη βιοποικιλότητας (Natura site, GR1420004), όσο και από την άποψη της ανασύστασης της στην περιοχή της πρώην λίμνης Κάρλας. Οι βιβλιογραφικές αναφορές που είναι διαθέσιμες για την νεοσύστατη λίμνη Κάρλα, περιορίζονται στον τομέα της

υδρολογίας σε επίπεδο λεκάνης απορροής και της προσομοίωσης οικολογικών μοντέλων (Laspidou *et al.* 2011; Kokkinos & Loukas 2010; Vasiliades *et al.* 2009; Παπανίκος 2008; Loukas *et al.* 2007; Loukas *et al.* 2005; Bilas & Katsavounis 2004; Zalidis *et al.* 2004; Moustaka *et al.* 2002; Kaiser *et al.* 1997; Gerakis 1992), της ιστορικής της εξέλιξης (Μπαρτζώκα-Τσιόμπρα & Ψύλλος 2011; Τζιάτζιος 2010), στους τύπους των οικοτόπων και της πανίδας (Οικονομου *et al.* 2010; Gerakis & Koutrakis 1996) και τέλος στο ζήτημα των υδραυλικών έργων (Ψιλοβίκος 1996; Παπανίκος *και συν.* 2009).

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή είναι η πρώτη προσπάθεια αποτίμησης της ποιότητας των υδάτων με χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) μετά την ανασύσταση της Λίμνης Κάρλας. Οι πιο πρόσφατες μελέτες πάνω σε θέματα ποιότητας έγιναν από τους Papadimitriou *et al.* (2011) με έμφαση στην διερεύνηση ευτροφικών συνθηκών και στην εμφάνιση μικροκυστίνων και στην παρουσίαση των κυριότερων μεταβλητών του ευτροφισμού από τον Sidiropoulo *et al.* (2011) με έμφαση στην λιμνολογική ιστορία της λίμνης και στο οικολογικό προφίλ της. Η προηγούμενη γενικευμένη προσπάθεια αποτίμησης της ποιότητας των υδάτων της λίμνης Κάρλας πραγματοποιήθηκε από τον Παπανίκο (2008). Όλες οι παραπάνω μελέτες χρησιμοποιήθηκαν ως βιβλιογραφία για την συγγραφή της παρούσας διατριβής.

1.2. Η Σημασία των Εσωτερικών Υδάτων

Η αναζήτηση του ανθρώπου για μια καλύτερη χρησιμοποίηση του νερού είναι τόσο παλιά όσο και η ανθρωπότητα η ίδια. Η κατανόηση του, για τα φαινόμενα που συνδέονται με την εμφάνιση του νερού στην φύση, είναι σχετικά πρόσφατη και σχεδόν πριν από 150 χρόνια ήταν μάλλον περιορισμένη. Παρόλα αυτά, ο άνθρωπος έχει

προσπαθήσει να προσφέρει αξιόπιστες εξηγήσεις για τις φυσικές υδρολογικές διεργασίες, σε αντίστοιχο επίπεδο εξειδίκευσης ανάλογα με την χρονική περίοδο (Mays 1996).

Το σύνολο του νερού πάνω στην Γη βρίσκεται σε μια κατάσταση δυναμικής ισορροπίας μεταξύ των τριών φάσεων του, δηλαδή της υγρής, της στερεάς και της αέριας και συγχρόνως σε μια κατάσταση διαρκούς κυκλοφορίας, περιοδικά μεταβαλλόμενης, που είναι γνωστή ως υδρολογικός κύκλος (Εικ. 1).

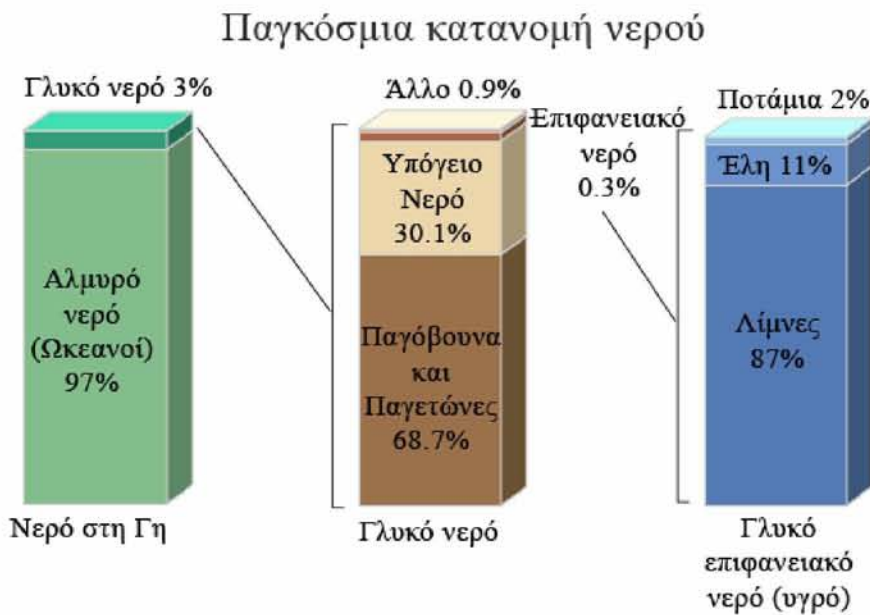


Εικόνα 1: Ο υδρολογικός κύκλος (Πηγή: USGS 2011)

Το νερό είναι μια μοναδική ουσία. Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά της Γης είναι η αφθονία του, που εκτείνεται στο 71% της γήινης επιφάνειας μέχρις ενός μέσου βάθους 3.800 m. Περισσότερο από το 99% αυτής της αχανούς υδρόσφαιρας αποτίθεται στις ωκεάνιες κοιλότητες. Οι σχετικώς μικρές ποσότητες νερού που περιέχονται σε

λίμνες γλυκέων υδάτων και σε ποταμούς παραπλανούν ως προς τη θεμελιώδη σπουδαιότητα τους στη διατήρηση και επιβίωση της χερσαίας ζωής (Wetzel 2006).

Από τα συνολικά $1.386 \cdot 10^6 \text{ km}^3$ του νερού στη Γη, περισσότερο από το 96% είναι αλμυρό. Επίσης, το 68% του γλυκού νερού είναι δεσμευμένο σε πάγο και παγετώνες. Ακόμα ένα 30% του γλυκού νερού βρίσκεται σε υπόγειους υδροφορείς. Το επιφανειακό γλυκό νερό που βρίσκεται σε ποτάμια και λίμνες είναι συνολικά 93.100 km^3 και αντιπροσωπεύει περίπου το 1/150 του 1% του συνολικού νερού στη Γη. Παρόλα αυτά, τα ποτάμια και οι λίμνες είναι οι βασικές πηγές νερού για την κάλυψη των ανθρώπινων αναγκών (Εικ. 2).



Εικόνα 2: Παγκόσμια κατανομή νερού (Πηγή: USGS 2011)

Δεν υπάρχει κανένας παγκόσμιος ορισμός για την λίμνη. Το Διεθνές Γλωσσάρι της Λιμνολογίας (International Glossary of Hydrology) εν συντομία δηλώνει, ότι η λίμνη είναι ένα «εσωτερικό σώμα ύδατος υπολογίσιμου μεγέθους». Η Οδηγία Πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης (2000/60/EC), έχει ορίσει την λίμνη ως «ένα σώμα στάσιμων

εσωτερικών επιφανειακών υδάτων». Το Παράρτημα II της Οδηγίας Πλαίσιο, έχει καθορίσει επίσης με κάποιο τρόπο το ελάχιστο μέγεθος που μπορεί να έχει μια λίμνη, το οποίο θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη να είναι τα 0.5 Km². Σύμφωνα με την UNESCO και τον WMO, μια λιμνοδεξαμενή είναι ένα «σώμα νερού, είτε φυσικό είτε τεχνητό, που χρησιμοποιείται για αποθήκευση, εξαιτίας κανονισμών και του ελέγχου των υδατικών πόρων». Σε πολλές περιπτώσεις, ο όρος δεξαμενή χρησιμοποιείται σαν συνώνυμο για τις τεχνητές λίμνες (UN/ECE 2003). Οι λίμνες είναι γεωμορφολογικές οντότητες με αρχή, εξέλιξη και τέλος μέσα στον γεωλογικό χρόνο.

Ένα ποσοστό περίπου 40% του συνολικού όγκου των γλυκών υδάτων παγκοσμίως περιέχεται σε μεγάλες λιμναίες λεκάνες. Ωστόσο, οι περισσότερες φυσικές και τεχνητές λίμνες είναι πολύ μικρότερων διαστάσεων και είναι συγκεντρωμένες στις υποαρκτικές και εύκρατες περιοχές του Βορείου Ημισφαιρίου. Οι περισσότερες από τα εκατομμύρια των λιμνών είναι σχετικά αβαθείς, συνήθως <10m (Wetzel 2006).

Μπορεί τα ύδατα της ενδοχώρας (εσωτερικά ύδατα) να καλύπτουν ένα μικρό μόνο μέρος της επιφάνειας της γης (2%), ωστόσο η σημαντικότητά τους παραμένει αναμφισβήτητη. Μια ασφαλής και πόσιμη ποσότητα νερού είναι κρίσιμη για την ζωή του ανθρώπου όπως την γνωρίζουμε. Όλοι οι μεγάλοι οικισμοί οι καλλιέργειες και οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες ιστορικά, δημιουργήθηκαν δίπλα σε ποτάμια και λίμνες (Malina 1996).

Οι λίμνες, έχουν υποστεί υποβάθμιση της οικολογικής τους κατάστασης, εξαιτίας της ανεξέλεγκτης ανάπτυξης οικισμών αλλά και των γεωργικών εκμεταλλεύσεων. Για τον λόγο αυτό χρήζουν εφαρμογής μέτρων εξυγίανσης και αναβάθμισης καθώς αποτελούν σημαντικούς οικότοπους. Η διατήρησή τους επηρεάζει την περαιτέρω οικονομική ανάπτυξη των περιοχών με ποικίλες δραστηριότητες. Η διαχείριση των

υδατικών πόρων, αποτελεί την αναγκαία επιστημονική βάση για την διαχείριση των λιμναίων και ποτάμιων συστημάτων (Ματζαφλήρη 2007).

Η ποσοστιαία κατανομή του συνολικού υδατικού όγκου του πλανήτη είναι ένας καταρχήν δείκτης του μεγέθους και της σοβαρότητας του προβλήματος της διαχείρισης των υδατικών πόρων, αφού όπως προκύπτει από τις σχετικές εκτιμήσεις το νερό που τελικά μπορεί να αξιοποιηθεί για την κάλυψη των αναγκών, αποτελεί ένα ελάχιστο ποσοστό του συνόλου. Αν σκεφτούμε το πρόβλημα μακροπρόθεσμα, με την λογική δηλαδή της «Αειφόρου» ή αλλιώς «Βιώσιμης» Ανάπτυξης του περιβάλλοντος, σύμφωνα με τις αρχές της οποίας το κριτήριο της ανάπτυξης είναι η διατήρηση και συνέχιση της ζωής στον πλανήτη, τότε η συνολική ποσότητα του διαθέσιμου γλυκού νερού γίνεται ακόμα μικρότερη (Παπανίκος 2008).

1.3. Η Ποιότητα των Υδάτων

Το νερό είναι μια αναγκαιότητα για όλους τους ζωντανούς οργανισμούς. Ενώ κάποιες βασικές μορφές ζωής διαβιώνουν σε ρυπασμένα νερά, οι περισσότεροι οργανισμοί χρειάζονται νερό καλής ποιότητας προκειμένου να αναπτυχθούν και να επιβιώσουν. Η ποιότητα των επιφανειακών υδάτων, επηρεάζεται από τον τύπο και την ποσότητα ποικίλων διαθέσιμων και διαλυμένων ουσιών στο περιβάλλον. Σε γενικές γραμμές, μεγάλες ποσότητες συγκεντρώσεων αυτών των ουσιών, συνεπάγονται συνήθως με φτωχής ποιότητας ύδατα. Μερικές από αυτές τις ουσίες εμφανίζονται φυσικά, ενώ άλλες προέρχονται από τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Μερικές πηγές αυτών των δραστηριοτήτων είναι η γεωργία, οι υδατοκαλλιέργειες, η βιομηχανία και η αστικοποίηση, οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν φαινόμενα όπως αυτό του ευτροφισμού καθώς και άλλες επιπτώσεις στην ποιότητα του ύδατος (Koronen 2006).

Οι άνθρωποι έχουν προκαλέσει έναν τεράστιο αντίκτυπο στο περιβάλλον, εκμεταλλευόμενοι το γεγονός ότι μπορεί να διατηρηθεί σε μακροπρόθεσμη βάση. Σαν αποτέλεσμα των παραβιάσεων που προκλήθηκαν, οι πόροι των γλυκών υδάτων που είναι πιο εύκολοι στην πρόσβαση (π.χ. ποτάμια και λίμνες) και οι οποίοι αποτελούν μόλις το 0.26% των γλυκών υδάτων στην γη, απειλούνται τώρα από πολλά είδη ρύπανσης και οικολογικής διαταραχής (Heinonen *et al.* 2000).

Οι κυριότεροι ρυπαντές των επιφανειακών υδάτων, είναι:

- α) οι θρεπτικές ουσίες (φωσφόρος, άζωτο),
- β) τα απορρυπαντικά,
- γ) οι υδρογονάνθρακες,
- δ) η όξινη βροχή,
- ε) τα βαρέα μέταλλα και τοξικά στοιχεία (Ag, As, Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Se, Zn) και
- στ) τα αιωρούμενα στερεά.

Τα βαρέα μέταλλα και τα τοξικά στοιχεία προέρχονται τόσο από φυσικές διεργασίες (αποσάθρωση πετρωμάτων), όσο και από ανθρωπογενείς δραστηριότητες (λύματα, απόβλητα, λιπάσματα, μεταλλεία, κ.α).

Η λίμνη αποτελεί ένα ξεχωριστό οικοσύστημα, αρκετά πολύπλοκο και μπορεί να ανταποκριθεί διαφορετικά με γνώμονα την ποιότητα του νερού. Γενικά, η οικολογική κατάσταση ενός τέτοιου συστήματος, επιδεικνύει διαφορετική ελαστικότητα στις πιέσεις των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων. Στα λιμναία οικοσυστήματα λαμβάνοντας υπόψη τα υδρολογικά και λιμνολογικά στοιχεία, θα μπορούσαν να περιγραφούν και να μελετηθούν ως μεμονωμένα:

- α) η λεκάνη απορροής,

- β) οι δυναμικές διεργασίες που αναπτύσσονται στο οικοσύστημα,
- γ) οι παράγοντες εξωτερικών πιέσεων,
- δ) η διαχειριστική δράση και
- ε) η συλλογή των δεδομένων των διεργασιών αποτίμησης (Ματζαφλήρη 2007).

Αντίθετα με τα ταχέως κινούμενα νερά των ποταμών, τα νερά παραμένουν στις λίμνες για μήνες ή και χρόνια και για το λόγο αυτό είναι πιο εύκολο να ρυπανθούν. Η ποιότητα των υδάτων στις λίμνες, μπορεί γρήγορα να υποβαθμιστεί εάν οι ανθρώπινες δραστηριότητες ενταθούν και υπάρξει αύξηση του πληθυσμού στη λεκάνη απορροής γύρω τους. Η υποβάθμιση του περιβάλλοντος στις λίμνες είναι πλέον ένα παγκόσμιο θέμα.

Ο ανθρωπογενής ευτροφισμός αποτελεί σημαντικό πρόβλημα για τις πεδινές λίμνες της εύκρατης ζώνης, που υποβαθμίζονται ραγδαία τις τελευταίες δεκαετίες. Η γεωργία αναπτύσσεται συχνά χωρίς σχεδιασμό και πρόβλεψη για τις επιπτώσεις της εντατικοποίησης της στους υδάτινους αποδέκτες. Έτσι δημιουργείται διπλό πρόβλημα, με τις αυξημένες απαιτήσεις για νερό ύδρευσης και τις αυξημένες απορροές λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων (Παναγιωτίδης 2008). Στο πρόβλημα έρχεται να προστεθεί η αστική και η βιομηχανική ρύπανση επιδεινώνοντας την κατάσταση.

Ωστόσο, ο ανθρωπογενής ευτροφισμός δεν είναι μια μη αντιστρεπτή υποβάθμιση του οικοσυστήματος, ούτε μοιραία μια πηγή προβλημάτων. Η διαχείριση του οικοσυστήματος μπορεί να δώσει λύσεις στα προβλήματα ή ακόμα και να αντλήσει οφέλη, αρκεί να συνδυαστούν αρμονικά οι γνώσεις του αβιοτικού περιβάλλοντος, των οργανισμών και οι μεταξύ τους σχέσεις με αυτές της τεχνολογίας (Παναγιωτίδης 2008).

Η ποιοτική κατάσταση μια λίμνης, μπορεί να περιγραφεί από πολλές μεταβλητές, αλλά οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι δείκτες είναι οι εξής:

α) φυσικοχημικοί, όπως το pH, το διαλυμένο οξυγόνο (DO), η αγωγιμότητα, το άζωτο, ο φώσφορος, η χλωροφύλλη, το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD) και το βιολογικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD).

β) μικροβιολογικοί, όπως η ολική περιεκτικότητα σε μικρόβια (TPC), καθώς και η παρουσία δυνητικά παθογόνων μικροοργανισμών όπως τα κολοβακτηρίδια (CF) και τα κολοβακτηριοειδή (FC) και

γ) βιολογικοί, όπως η ιχθυοπανίδα, τα μακροφυτά κ.λ.π. (Mladenov *et al.* 2005).

Η πρόληψη είναι ο πλέον αποτελεσματικός τρόπος προστασίας των επιφανειακών υδάτων και του εδάφους. Αν αυτό δεν καταστεί δυνατόν, τότε λαμβάνονται μέτρα περιορισμού της ρύπανσης και απορρύπανσης. Στα προληπτικά μέτρα περιλαμβάνονται μια σειρά από Οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, μέσω των οποίων επιδιώκεται η υγεία των πολιτών, η διατήρηση των υδατικών οικοσυστημάτων και η προστασία του περιβάλλοντος γενικότερα.

Η προστασία και η διατήρηση της ποιότητας του νερού θεωρείται πρωταρχικής σημασίας για τη διαχείριση των υδατικών πόρων και όχι μόνο για τους προφανείς λόγους, της περιβαλλοντικής προστασίας και της διατήρησης της οικολογικής ισορροπίας. Θεωρείται σημαντική διότι η προστασία και η διατήρηση της ποιότητας του νερού, σε ανεκτά επίπεδα, αποτελεί την απαραίτητη προϋπόθεση για την κάλυψη της ζήτησης και την ικανοποίηση των αναγκών. Αυτός είναι και ο λόγος που στην σύγχρονη νομοθεσία, η ρύπανση του νερού λογίζεται ως μια ακόμη ανταγωνιστική με τις υπόλοιπες δραστηριότητες χρήση, αφού και πρακτικά έχει τη δυνατότητα να δεσμεύει τους υδατικούς πόρους και να εμποδίζει την περαιτέρω αξιοποίησή τους (Παπανίκος 2008).

Οι μετρήσεις ποιότητας του νερού είναι βασικές για να περιγραφεί η συγκρισιμότητα των δεδομένων που αποκτούνται παγκοσμίως και αποτελούν τη βάση για σωστές αποφάσεις σε σχέση με τη διαχείριση των υδατικών πόρων, αντικείμενα παρακολούθησης, βιολογική ποιότητα κλπ. Επιπλέον, για τη σωστή διαχείριση μιας λίμνης πρέπει να διαθέτουμε, μεταξύ άλλων, πληροφορίες για τη μορφομετρία της, την ποιότητα του νερού, τις αλληλεπιδράσεις του νερού με το βυθό, τις πηγές ρύπανσης και το κλίμα.

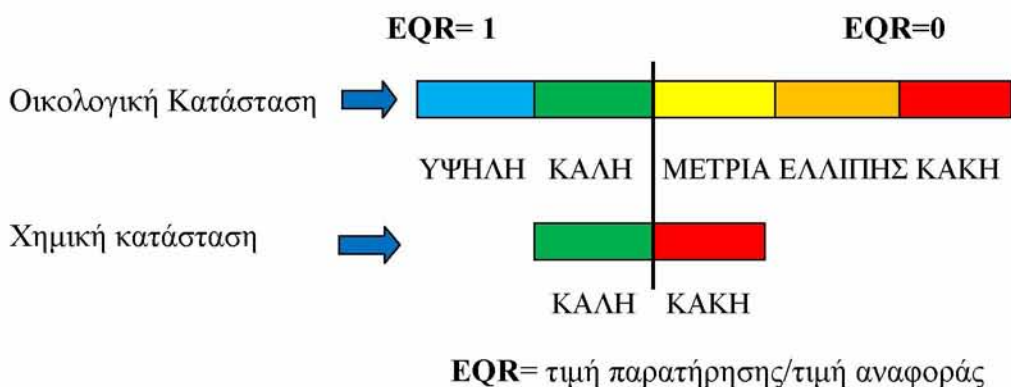
1.4. Η Οδηγία 2000/60/ΕΕ

Σε συνθήκες ταχέως μεταβαλλόμενου κλίματος και αύξησης των ανθρωπογενών επιδράσεων στα παράκτια και εσωτερικά ύδατα, υπάρχει επείγουσα ανάγκη βελτίωσης της αποτελεσματικότητας των μεθόδων παρακολούθησης. Η ανάγκη για ενοποιημένη παρακολούθηση, έφερε ως αποτέλεσμα την Οδηγία Πλαίσιο για τα ύδατα της Ευρωπαϊκής Ένωσης 2000/60/ΕΕ η οποία προβλέπει την αποκατάσταση και την προστασία των υδατικών συστημάτων από την περαιτέρω υποβάθμιση. Για τον λόγο αυτό, διάφορα βιολογικά ποιοτικά στοιχεία θα πρέπει να παρακολουθούνται για να μπορέσει να περιγραφεί η παρούσα κατάσταση του υδάτινου οικοσυστήματος (Alikas *et al.* 2010).

Σκοπός της Οδηγίας είναι η διατήρηση ή η επαναφορά (με κατάλληλα μέτρα) της “καλής κατάστασης” (οικολογικής ή/και χημικής) όλων των υδάτινων σωμάτων έως το 2015. Η εφαρμογή της Οδηγίας απαιτεί την εκπόνηση ενός μεγάλου αριθμού προπαρασκευαστικών ενεργειών, βημάτων και μελετών με σκοπό την επίτευξη του παραπάνω στόχου, που θα οδηγήσουν τελικά στην υιοθέτηση ενός ενιαίου Σχεδίου Διαχείρισης. Το Σχέδιο Διαχείρισης θα δίνει πληροφορίες για όλα τα ύδατα, τους

περιβαλλοντικούς στόχους γι' αυτό και τα μέτρα που πρέπει να ληφθούν ώστε να επιτευχθεί καλή ποιότητα υδάτων.

Η ταξινόμηση ενός τύπου υδάτινου σώματος από πλευράς οικολογικής ποιότητας γίνεται μέσω της σύγκρισης των τιμών που παρατηρούνται (monitoring) με τις τιμές αναφοράς του τύπου αυτού. Η απόκλιση που παρουσιάζει ένα σώμα από τις Συνθήκες Αναφοράς χαρακτηρίζεται από το λόγο μεταξύ της τιμής που αντιστοιχεί στις Συνθήκες Αναφοράς προς τη τιμή που παρουσιάζει το υπό εξέταση υδάτινο σύστημα. Ο λόγος αυτός ονομάζεται Λόγος Οικολογικής Ποιότητας (EQR) (Σχ. 1).



Σχήμα 1: Κατηγοριοποίηση σύμφωνα με τον λόγο οικολογικής ποιότητας.

Συνοψίζοντας για τα λιμναία ύδατα είναι αναγκαίο να ελέγχονται:

- Η ποιότητα των υδάτων και το μέγεθος της ρύπανσης
- Η ύπαρξη ευτροφισμού και το μέτρο του, εάν παρατηρείται
- Η υδρολογία της λίμνης και το ισοζύγιο νερού
- Η οικολογία του φυτοπλαγκτού των λιμνών.

Το Πρόγραμμα Παρακολούθησης στα πλαίσια της Οδηγίας 2000/60/ΕΕ αποτελεί διαγνωστικό εργαλείο της κατάστασης των υδάτινων σωμάτων. Εισάγει για πρώτη φορά την έννοια της οικολογικής κατάστασης των υδάτινων σωμάτων μέσω της χρήσης

βιολογικών ποιοτικών στοιχείων σε συνδυασμό με φυσικοχημικές παραμέτρους. Το Πρόγραμμα Παρακολούθησης εφαρμόζεται καθ' όλη την διάρκεια των εξαετών διαχειριστικών κύκλων της Οδηγίας. Είναι μια συνεχής διαδικασία που επανεξετάζεται και επικαιροποιείται σε κάθε διαχειριστικό κύκλο βάσει της αξιολόγησης των αποτελεσμάτων του (Παπαργηγόριου 2010).

Η Οδηγία Πλαίσιο 2000/60/ΕΕ διαιρεί το πρόγραμμα παρακολούθησης στους τρεις ακόλουθους τύπους:

- α) Εποπτική Παρακολούθηση,
- β) Επιχειρησιακή Παρακολούθηση,
- γ) Διερευνητική Παρακολούθηση.

Τα προγράμματα Εποπτικής Παρακολούθησης, αφορούν κατά κύριο λόγο υδατικά σώματα που δεν βρίσκονται σε κίνδυνο να μην επιτύχουν τον στόχο της Οδηγίας. Τα προγράμματα Επιχειρησιακής Παρακολούθησης, αφορούν τον προσδιορισμό της κατάστασης σωμάτων που έχουν χαρακτηριστεί ότι κινδυνεύουν να μην επιτύχουν τους περιβαλλοντικούς στόχους που θέτει η Οδηγία Πλαίσιο. Τέλος, τα προγράμματα Διερευνητικής Παρακολούθησης, είναι ειδικά σχεδιασμένα προγράμματα για τον εντοπισμό πηγών συγκεκριμένου τύπου ρύπανσης (Ματζαφλέρη 2007).

1.4.1. Τύποι Ταξινόμησης της Οικολογικής Κατάστασης των Λιμνών

Υπάρχουν πολλοί τύποι ταξινόμησης της οικολογικής κατάστασης των λιμνών μερικοί από τους οποίους παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Σύμφωνα με τον USEPA (2000), ως γενικός κανόνας μπορεί να θεωρηθεί ότι οι λίμνες με συγκεντρώσεις ολικού φωσφόρου μικρότερες από 10 μg/l είναι ολιγοτροφικές ενώ λίμνες με ολικό φώσφορο πάνω από 100 μg/l είναι υπερτροφικές.

Στον Πίνακα 2, φαίνονται τα κριτήρια τα οποία χρησιμοποιούνται από τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης, για τον καθορισμό της κατάστασης του ευτροφισμού στις λίμνες, ενώ στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται τα κριτήρια που χρησιμοποιεί η Ελλάδα. Μέχρι στιγμής ο πιο αποδεκτός τύπος ταξινόμησης έχει αναπτυχθεί από τον Οργανισμό Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (ΟΟΣΑ) (OECD 1982).

Πίνακας 1: Περίληπτικά οι πιο διαδεδομένοι τύποι ταξινόμησης της οικολογικής κατάστασης των λιμνών (Ματζαφλέρη 2007).

Τροφική ταξινόμηση λιμνών							
Μεταβλητή	Υπερ-ολιγοτροφική	Ολιγοτροφική	Ολιγο-μεσοτροφική	Μεσοτροφική	Μεσο-ευτροφική	Ευτροφική	Υπερ-ευτροφική
Ολικός φώσφορος (μg/l)	-	<10	-	10-35	-	35-100	>100
	<4	4-10	-	10-20	20-35	35-100	>100
	-	<10	-	10-20	-	>20	-
	-	<5	-	10-30	-	-	>100
	<5	-	5-10	-	10-30	30-100	>100
	-	<10	-	10-30	-	-	>100
Χλωροφύλλη- α	-	<2,5	-	2,5-8	-	8-25	>25
	-	<4	-	4-10	-	>10	-
	0,01-0,5	0,3-3	-	2-15	-	10-500	-
	-	<3,5	-	3,5-9	-	9,1-25	>25
Διαφάνεια (m)	-	>6	-	3-6	-	<1,5	-
	-	>4	-	2-4	-	<2	-
	-	>4	-	2-4	-	1-2,1	<1
TN (μg/l)	-	<350	-	350-650	-	651-1,200	>1,200
	< 1-250	-	250-600	-	500-1,100	-	500->15,000
Ανόργανο άζωτο (μg/l)	<200	-	200-400	-	300-650	500-1,500	>1,500
Οργανικό άζωτο (μg/l)	<200	-	200-400	-	400-700	700-1,200	>1,200
Οξυγόνο κορεσμού στο υπολίμνιο %	-	>80	-	10-80	-	<10	-
TOC (Total organic carbon) Ολικός οργανικός άνθρακας (mg/l)	-	<1-3	-	<1-5	-	5-30	-
DOC (Dissolved organic carbon (mg/l)	-	2	-	3	-	10	-

Πίνακας 2: Ταξινόμηση βάσει των ορίων της κατάστασης ευτροφισμού σε Ευρωπαϊκές χώρες.

Παράμετρος	Μονάδες	Αγγλία	Ιρλανδία	Γαλλία	Ισπανία	Ιταλία
TP	(μg/l)	>50	>25	-	>30	Συνθήκες Αναφοράς
Χλωροφύλλη-α (μέσος όρος)	(μg/l)	-	-	>60	>8	>10
Χλωροφύλλη-α (μέγιστη τιμή)	(μg/l)	>30	>35	-	>25	>20
Διαφάνεια	(m)	<3	-	-	<3	<3

Πίνακας 3: Σύστημα ταξινόμησης των λιμνών στην Ελλάδα.

Φυσικοχημικοί παράμετροι	Ευτροφισμός	Μεσοτροφικές συνθήκες	Ολιγοτροφικές συνθήκες
	Συχνότητα παραμετρικών τιμών*		
	Συχνά	Συνήθως	Σπάνια
Κοντά στην επιφάνεια (επιλίμνιο)			
Χλωροφύλλη (μg/l)	>10	2 έως 10	<2
Νιτρικά ιόντα	>0,05	0,01 -0,05	<0,01
Φωσφορικά ιόντα	>0,05	0,01 -0,05	<0,01
Κοντά στον πυθμένα υπολίμνιο			
Οξυγόνο κορεσμού (%)	~ 0 (ανοξικές συνθήκες την καλοκαιρινή περίοδο)	0-100	0-100
Συγκέντρωση οξυγόνου (mg/l)	<4	4-7	>7
Υδάτινη στήλη			
Διαφάνεια δίσκος του Secchi	<2	2-5	>5

*Σημείωση: Συχνά 8-9 δείγματα, Συνήθως 5-6 δείγματα, Σπάνια 1-2 δείγματα

1.4.2. Η Ελληνική Νομοθεσία για τη Ποιότητα των Επιφανειακών Υδάτων

Οι οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης έχουν επηρεάσει τις τελευταίες δεκαετίες τόσο την οικονομική ανάπτυξη όσο και την εθνική νομοθεσία. Η ισχύουσα ελληνική και ευρωπαϊκή νομοθεσία σχετικά με την προστασία του περιβάλλοντος και την διασφάλιση της ποιότητας και ποσότητας των εσωτερικών υδάτων παρατίθεται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4: Ισχύουσα Ελληνική και Ευρωπαϊκή Νομοθεσία για την προστασία του περιβάλλοντος και την διασφάλιση ποιότητας των εσωτερικών υδάτων.

Νόμος	Σκοπός	Περιγραφή
Νόμος 1650/86 για την προστασία του περιβάλλοντος	Προστασία επιφανειακού και υπόγειου νερού. Προσδιορισμός της επιθυμητής και επιτρεπόμενης ποιότητας των φυσικών υδάτινων σωμάτων	Απαιτεί παρακολούθηση σε εθνικό επίπεδο
Νόμος 1739/87 για την διαχείριση των υδάτινων πόρων	Διατύπωση της πολιτικής διαχείρισης των υδάτινων πόρων.	Δημιουργεί ένα δίκτυο οργάνωσης και σωστής διαχείρισης των υδάτινων πόρων χωρίζοντας την χώρα σε 14 υδάτινες περιφέρειες. Ιδρύει ελέγχους παρακολούθησης και μέτρα προστασίας του περιβάλλοντος
Οδηγία 75/440/ΕΟΚ Σχετικά για την ποιότητα του νερού που προορίζεται για πόσιμο	Μείωση της ρύπανσης των υδάτινων σωμάτων και την προστασία της ανθρώπινης υγείας καθορίζοντας τα όρια τιμών του νερού που προορίζεται για πόσιμο.	Το επιφανειακό νερό χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες (Α1,Α2 και Α3), κάθε μια σχετίζεται με κατάλληλες μεθόδους διαχείρισης. Τα επιθυμητά όρια για το πόσιμο νερό προσδιορίζουν την υλοποίηση των αντίστοιχων μεθόδων.
Οδηγία 76/564/ΕΟΚ Σχετικά με τα όρια των ρυπογόνων ουσιών	Με ίωση των ρυπογόνων ουσιών και κυρίως των τοξικών.	Δημιουργεί μια λίστα τοξικών ουσιών με τα επιτρεπτά όρια.
Οδηγία 91/271/ΕΟΚ Σχετικά με την διαχείριση των αστικών λυμάτων	Προστασία του υδατικού περιβάλλοντος, ιδιαίτερα των ευαίσθητων περιοχών, απο την εναπόθεση αστικών λυμάτων τα οποία δεν έχουν επεξεργαστεί ικανοποιητικά.	Καθορίζει κατευθυντήριες γραμμές και χρονικά όρια, για την κατασκευή των σωλήνων αποχέτευσης και του ποσοστού διαχείρισης των αστικών αποβλήτων σύμφωνα με τον πληθυσμό, την ευαισθησία της περιοχής και την επαναχρησιμοποίηση της λάσπης. Επίσης δίδονται οδηγίες για την διαχείριση βιομηχανικών αποβλήτων. Απαιτεί παρακολούθηση της ποιότητας του νερού που αφήνεται στον τελικό υδάτινο αποδέκτη αλλά και της παραγόμενης υδάτινης λάσπης.
Οδηγία 91/676/ΕΟΚ Σχετική με την προστασία των υδάτινων σωμάτων από την ρύπανση που προέρχεται αγροτικές εκμεταλλεύσεις	Μείωση της υφιστάμενης ρύπανσης και την παρεμπόδιση μελλοντικής ρύπανσης του εδάφους και των επιφανειακών νερών από τα νιτρικά, τα οποία προέρχονται από τις αγροτικές δραστηριότητες	Απαιτεί πρόγραμμα παρακολούθησης των νιτρικών και νιτροδών ιόντων τόσο στα επιφανειακά νερά όσο και στα υπόγεια νερά.
Οδηγία 2000/60/ΕΟΚ Καθορίζει ένα δίκτυο υδάτινης πολιτικής για τα κράτη μέλη	Καθορισμός ενός δικτύου υδάτινης πολιτικής για την προστασία των επιφανειακών, παράκτιων και υπόγειων υδάτων.	Καθορίζει το δίκτυο της διαχείρισης των υδάτινων σωμάτων σε επίπεδο λεκάνης απορροής ποταμού. Προτείνει προγράμματα παρακολούθησης. Ορίζει στρατηγικές ενάντια στην ρύπανση με γνώμονα την αειφορική διαχείριση τους.
Υπουργική Απόφαση Υ2/2600/2001-	Καθορισμός ποιότητας πόσιμου νερού	Απαιτεί πρόγραμμα παρακολούθησης συγκεκριμένων παραμέτρων.

ΦΕΚ 892/11-7-2001		
Υπουργική Απόφαση 15782/1849-ΦΕΚ 797 25 Ιουνίου 2001	Καθορισμός των κατευθυντήριων και οριακών τιμών ποιότητας των νερών των Λιμνών Βεγορίτιδος και Πετρών και του ποταμού Σουλού.	Απαιτεί Ειδικό Πρόγραμμα μείωσης της ρύπανσης με καθορισμό των κατευθυντήριων και οριακών τιμών ποιότητας των νερών απο απόρριψης ορισμένων επικίνδυνων ουσιών.
Διυπουργική Απόφαση ΦΕΚ 438B,3-7-86	Καθορισμός προτύπων διαβίωσης ψαριών των γλυκών υδάτων	Απαιτεί πρόγραμμα παρακολούθησης συγκεκριμένων παραμέτρων.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. Η Παρακολούθηση (monitoring) των Λιμνών

Η κατάσταση της ποιότητας του νερού είναι ένα σύνθετο αποτέλεσμα φυσικών και ανθρωπογενών δραστηριοτήτων καθώς και των μεταξύ τους αλληλεπιδράσεων στον χρόνο και τον χώρο. Ο σκοπός της παρακολούθησης των ποιοτικών και ποσοτικών παραμέτρων των υδάτινων οικοσυστημάτων (πηγές, ρέματα, ποτάμια, λίμνες, φιορδ, εκβολές παράκτιων και θαλασσινών νερών), είναι η προσέγγιση και η εκτίμηση της περιβαλλοντικής τους κατάστασης και τάσης (Psilonikos *et al.* 2006).

Ένα καλά σχεδιασμένο σύστημα παρακολούθησης μπορεί να αποτελέσει την βάση και να καθορίσει την επιτυχία ή την αποτυχία των δράσεων αποκατάστασης και ακόμα να καθορίσει τις πιθανές αποδεκτές δράσεις για την αναπροσαρμογή. Τα προγράμματα παρακολούθησης λειτουργούν για την προστασία των επιφανειακών, υπόγειων και παράκτιων υδάτων. Πολιτικές για το νερό έχουν καθοριστεί και στρατηγικές αειφορικής διαχείρισης έχουν προταθεί έναντι της ποιοτικής και ποσοτικής υποβάθμισης των υδατικών οικοσυστημάτων (Matzafleri *et al.* 2009).

Η παρακολούθηση των υδατικών οικοσυστημάτων έχει γίνει ένα πολύτιμο εργαλείο, το οποίο διευκολύνει την αξιολόγηση της φύσης και την έκταση της ρύπανσης, καθώς και την αποτελεσματικότητα των μέτρων ελέγχου της ρύπανσης, τις τάσεις της ποιότητας των υδάτων και τέλος την ιεράρχηση των προσπαθειών ελέγχου της (Odermatt *et al.* 2008).

Ο κύριος στόχος του δικτύου παρακολούθησης της ποιότητας του νερού, είναι να παρασχεθεί επαρκής πληροφόρηση για την εκτίμηση της πίεσης, που εισάγεται από την

ρύπανση και την εντατική γεωργία και η οποία διατίθεται στα επιφανειακά ύδατα (Chalkidis *et al.* 2004).

Οι μεθοδολογίες των τεχνικών παρακολούθησης είναι πολυάριθμες. Αυτές κυμαίνονται από δοκιμές που μπορούν να εκτελεστούν κατά καιρούς από άτομα με μικρή εκπαίδευση, σε πλήρη κλίμακα επαγγελματικών αναλύσεων των φυσικών, χημικών και βιολογικών παραμέτρων ενός οικοσυστήματος μια λίμνης. Η τεκμηρίωση, επεξεργασία και διατήρηση των δεδομένων που συλλέγονται, είναι κρίσιμα στάδια ενός αποτελεσματικού προγράμματος παρακολούθησης. Η συλλογή ιστορικών δεδομένων και η συγκρότηση χρονοσειρών, είναι πολύ χρήσιμη στην εκτίμηση αλλαγών στο οικοσύστημα, εφόσον υπάρχει καλός σχεδιασμός δειγματοληψίας και εκτέλεσης.

Για να μπορούν να προκύψουν συμπεράσματα στο κατά πόσο οι συνθήκες που επικρατούν σε μια λίμνη βελτιώνονται ή επιδεινώνονται απαιτείται ένα μεγάλο χρονικό διάστημα παρακολούθησης. Η συχνότητα συλλογής δειγμάτων εξαρτάται από τα προς εξέταση χαρακτηριστικά του ύδατος. Η συχνότητα μπορεί να είναι καθημερινή, εβδομαδιαία, μηνιαία, εποχική ακόμα και σε ετήσια βάση. Πολλοί παράμετροι κυμαίνονται σε καθημερινή, εποχιακή ή σε ετήσια βάση, γι' αυτό και είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη και η φυσική διακύμανση κατά την εξέταση των δεδομένων που συλλέγονται. Για παράδειγμα, η θερμοκρασία του νερού μιας λίμνης μεταβάλλεται ελάχιστα με βάση την παρακολούθηση μέρας προς μέρας, ενώ υπάρχει σημαντική μεταβολή σε εποχική κλίμακα (Wisconsin DNR 2004).

Η παρακολούθηση των λιμνών παρέχει έγκαιρη προειδοποίηση της υποβάθμισης του οικοσυστήματος που προκύπτει από την ανάμιξη εισροών, την προσθήκη θρεπτικών, την απορροή των ιζημάτων και την υπερβολική χρήση των πόρων. Παρακολουθώντας τις αλλαγές πολλών από τις φυσικές, χημικές και βιολογικές

παραμέτρους της λίμνης, μπορούμε να έχουμε έγκυρη ανίχνευση και αποκλεισμό των βλαβερών ουσιών χωρίς συνέπειες και διατήρηση του οικοσυστήματος.

Προκειμένου η παρακολούθηση λιμνών να είναι αποτελεσματική, πρώτα πρέπει να συλλέγονται πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση της λίμνης, έτσι ώστε οι αλλαγές να είναι αναγνωρίσιμες. Μια βασική καταγραφή μπορεί να συμβεί κατά την διάρκεια ενός έτους ή και περισσότερο, ή σε περίπτωση που η λίμνη έχει προηγουμένως μελετηθεί, πληροφορίες από προηγούμενες μελέτες μπορούν να συγκεντρωθούν για να δημιουργηθεί μια εικόνα του οικοσυστήματος. Συχνά, είναι διαθέσιμα περιορισμένα δεδομένα, έτσι, ένα πρόγραμμα παρακολούθησης πρέπει να ορίζεται με λίγες βασικές μόνο πληροφορίες για την λίμνη (Froeblich 2005).

Το δίκτυο παρακολούθησης περιλαμβάνει δύο τύπους:

- Έναν **εκτατικό** κατά τον οποίο εμπεριέχονται πολλοί σταθμοί δειγματοληψίας αλλά λαμβάνονται λίγα δείγματα ετησίως, στα οποία αναλύονται λίγοι παράμετροι και η διάρκεια του είναι από 1 έτος έως 3-4 έτη.
- Έναν **εντατικό** κατά τον οποίο περιλαμβάνονται περισσότεροι σταθμοί (ανάλογα με την περιοχή μελέτης), πολλά ετήσια δείγματα, τουλάχιστον 12, τα οποία πραγματοποιούνται για χρόνια (Kristensen & Bogestrand 1996, Ματζαφλέρη 2007).

Οι παράμετροι οι οποίοι μετρούνται είναι χωρισμένοι στις παρακάτω κατηγορίες:

- **Βασικοί παράμετροι**, όπως: θερμοκρασία νερού, pH, αγωγιμότητα, διαλυμένο οξυγόνο, δυναμικό οξειδοαναγωγής, αλατότητα και
- **Συμπληρωματικοί παράμετροι**, όπως: θολότητα, δείκτες οργανικής ρύπανσης, δείκτες ευτροφισμού, δείκτες αλκαλικότητας, ιόντα, βαρέα μέταλλα, οργανικοί

μικρορυπαντές, ραδιενεργοί δείκτες, μικροβιολογικοί δείκτες και βιολογικοί δείκτες (Wisconsin DNR 2004).

2.2. Η Μοντελοποίηση των Λιμνών

2.2.1. Εισαγωγή

Για να προχωρήσουν από την περιγραφή στην εξήγηση, οι επιστήμονες χρησιμοποιούν τα μοντέλα. Η λέξη μοντέλο έχει διαφορετικές έννοιες. Στην επιστημονική χρήση, η ιδέα του μοντέλου είναι μια εξιδανικευμένη παρουσίαση ενός μέρους της πραγματικότητας, που έχει δομηθεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να δείξει ορισμένα χαρακτηριστικά της. Το μαθηματικό μοντέλο, είναι το μαθηματικό σύστημα που αντιπροσωπεύει μια πραγματική οντότητα ή κατάσταση. Οι ιδιότητες της πραγματικότητας μετασχηματίζονται σε αριθμούς, σχέσεις και εξισώσεις (Κουτσόπουλος 2005).

Τα μαθηματικά μοντέλα χρησιμοποιούνται τα τελευταία χρόνια στην ανάλυση των σύνθετων προβλημάτων ποιότητας του νερού των υδατικών συστημάτων και στη διαχείριση των υδατικών πόρων. Τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιούνται τόσο για τον προσδιορισμό της σχέσης που υπάρχει ανάμεσα στα φορτία ρύπανσης και τη διαμορφούμενη ποιότητα του νερού, όσο και για την πρόβλεψη των μελλοντικών μεταβολών της ποιότητας του νερού που αναμένονται από μια ορισμένη διαχείριση του νερού των υδροσυστημάτων και των εισροών τους. Χρησιμοποιούνται επίσης, για την εκτίμηση της πιο σημαντικής από τις παραμέτρους (θερμοκρασία, παροχή, φορτία, ταχύτητα αντιδράσεων κτλ) (Αντωνόπουλος 2010).

Η προσομοίωση είναι η τεχνική μίμησης ενός πραγματικού συστήματος, όπως αυτό εξελίσσεται στο χρόνο. Τα μοντέλα προσομοίωσης (simulation models) είναι το

σύνολο υποθέσεων για την λειτουργία του συστήματος, εκφρασμένων υπό μορφή μαθηματικών ή λογικών σχέσεων μεταξύ των αντικειμένων του συστήματος και συνήθως κωδικοποιημένων σε πρόγραμμα υπολογιστή. Έχοντας ένα φυσικό σύστημα που πρέπει να προσομοιώσουμε με το κατάλληλο μοντέλο, θα πρέπει να αναζητήσουμε κατάλληλα εργαλεία για τον σκοπό αυτό (Ματζαφλήρη 2007).

Τα μοντέλα αποτελούν βασικά εργαλεία στις επιστήμες διαχείρισης του νερού και της προστασίας του περιβάλλοντος. Χρησιμοποιούνται και έχουν σημαντικό ρόλο (Αντωνόπουλος 2011):

- ❖ Στον προσδιορισμό προτεραιοτήτων στην διαχείριση των υδατικών πόρων,
- ❖ Στη διαμόρφωση πολιτικής,
- ❖ Στη λειτουργία των έργων αξιοποίησης,
- ❖ Στην έρευνας τους,
- ❖ Στη συλλογή δεδομένων,
- ❖ Στον προσδιορισμό των κλιματικών επιπτώσεων και
- ❖ Πολλών άλλων.

Η ταξινόμηση τώρα των μαθηματικών μοντέλων γίνεται σε δύο κατηγορίες:

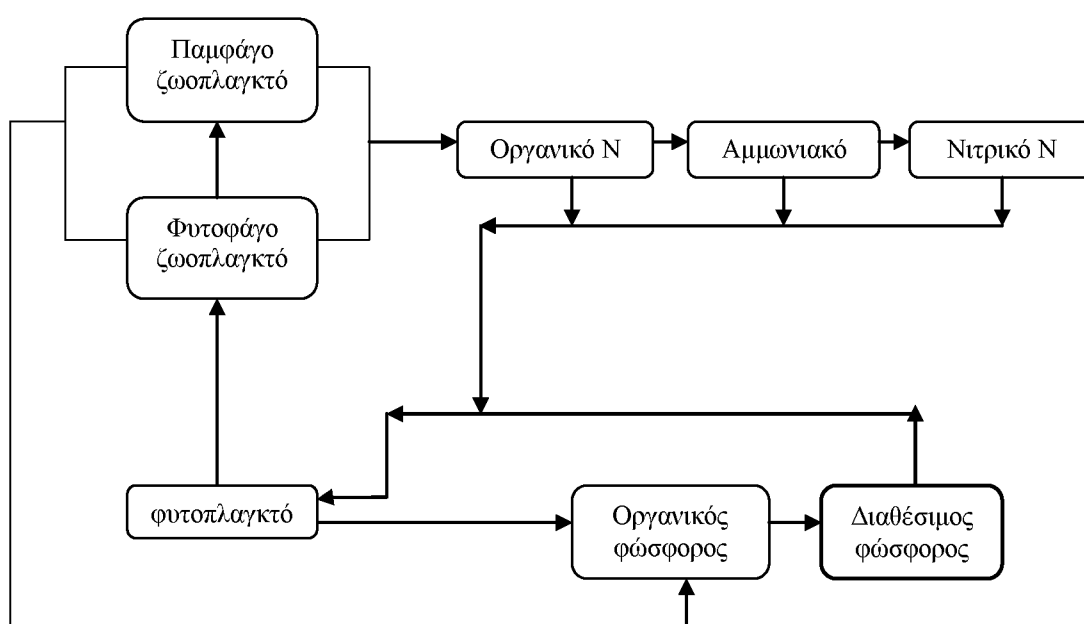
- Η πρώτη, είναι τα μοντέλα που χαρακτηρίζονται ως **μοντέλα υδρολογικής λεκάνης**, που μπορούν να εκτιμήσουν τα φορτία ρύπανσης από σημειακές και μη σημειακές πηγές ρύπανσης. Τα μοντέλα αυτά βασίζονται στις υδρολογικές διαδικασίες και το ισοζύγιο μάζας στη λεκάνη απορροής και στα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά της λεκάνης, στα οποία περιλαμβάνονται οι χρήσεις γης, η εδαφολογία, η τοπογραφία, οι χρήσεις νερού και οι παροχές λυμάτων από αστικές και βιομηχανικές δραστηριότητες (Αντωνόπουλος 2011).

- Η δεύτερη, περιλαμβάνει τα μοντέλα που αναφέρονται ως *μοντέλα του αποδέκτη* και χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των επιπτώσεων των φορτίων ρύπανσης στον αποδέκτη, τις μεταβολές των ποιοτικών παραμέτρων, των βιοτικών και αβιοτικών στοιχείων του. Αυτά βασίζονται στα χαρακτηριστικά μεταφοράς μάζας του αποδέκτη, στα οποία περιλαμβάνεται η παροχή, η μορφολογία του αποδέκτη και των ορίων, οι παράμετροι επαναερισμού και διασποράς και οι διαδικασίες των μετασχηματισμών των ουσιών και ρύπων μέσα στον αποδέκτη (Mallet 2002).

Στις λίμνες υπάρχουν βιοτικά και αβιοτικά στοιχεία που βρίσκονται σε μεγάλη αλληλεπίδραση μεταξύ τους. Οι χωροχρονικές μεταβολές των στοιχείων αυτών στα οικοσυστήματα των λιμνών περιγράφονται μαθηματικά από τις εξισώσεις του ισοζυγίου μάζας και ενέργειας. Στις εξισώσεις αυτές οι διαδικασίες των μετασχηματισμών των στοιχείων, της παραγωγής και της φθοράς τους, περιγράφονται με όρους προσθήκης και αφαίρεσης. Το σύνθετο σύστημα των ποιοτικών διαφοροποιήσεων περιλαμβάνει τις εξισώσεις των αβιοτικών ποιοτικών παραμέτρων (άζωτο, φώσφορος, διαλυμένο οξυγόνο) και των βιοτικών παραμέτρων (φυτοπλαγκτόν και ζωοπλαγκτόν). Στο Σχήμα 2 παρουσιάζονται διαγραμματικά οι αλληλεπιδράσεις βιοτικών και αβιοτικών παραμέτρων σε ένα απλοποιημένο οικοσύστημα των λιμνών. Το σύστημα των εξισώσεων επιλύεται με μια από τις μεθόδους των πεπερασμένων διαφορών ή των πεπερασμένων στοιχείων (Stefan *et al.* 1993, Αντωνόπουλος 2010, Antonopoulos & Gianniou 2003).

Τα μαθηματικά μοντέλα των λιμνών μπορεί να είναι μοντέλα μόνο της θερμοκρασίας και της στρωμάτωσης του νερού με τα οποία προσομοιώνονται οι

εποχικές μεταβολές της θερμοκρασίας του νερού σε σχέση με τις μεταβολές της θερμοκρασίας του αέρα ή μοντέλα ποιότητας του νερού και πιο ολοκληρωμένα μοντέλα της οικολογίας του οικοσυστήματος των λιμνών (Αντωνόπουλος 2011). Τα τελευταία μπορούν, εκτός της θερμοκρασίας, να περιγράψουν τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των λιμνών και τα βιολογικά τους όπως το φυτοπλαγκτόν, το ζωοπλαγκτόν και τα ψάρια.



Σχήμα 2: Διάγραμμα βασικών αλληλεπιδράσεων μεταξύ αβιοτικών και βιοτικών παραμέτρων μιας λίμνης.

2.2.2. Μοντέλα Ποιότητας Υδάτων

Ένα μοντέλο ποιότητας υδάτων, μπορεί να είναι ένα πρόγραμμα στον υπολογιστή, ή μια συλλογή εξισώσεων ή απλά μια θεωρητική βάση, στην οποία γίνονται οι υπολογισμοί. Ένα πρόβλημα για την μελέτη των οικοσυστημάτων μιας λίμνης, είναι στην πραγματικότητα η πολυπλοκότητα τους, όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω. Μπορούμε να δούμε πάρα πολλούς παράγοντες, αλλά είναι δύσκολο να διακρίνουμε

τους ουσιώδεις. Στην περίπτωση αυτή, τα μοντέλα ποιότητας υδάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη χρήση κάποιων παραδοχών με σκοπό τη μείωση του ποσού των δεδομένων που πρέπει να ληφθούν υπόψη (Usali & Ismail 2010), τα οποία σε σπάνιες περιπτώσεις είναι ταυτόχρονα όλα διαθέσιμα.

Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι μοντέλων ποιότητας υδάτων και για το λόγο αυτό ταξινομούνται με διάφορους τρόπους ανάλογα με τα κριτήρια που εμπλέκονται. Μπορούν να ταξινομηθούν με βάση το **χρόνο** και έτσι έχουμε τα **δυναμικά** μοντέλα, τα **σταθερά** μοντέλα και τα **μεταβατικά** μοντέλα. Ένας άλλος τρόπος είναι βάση της **μαθηματικής** τους δομής, όπου έχουμε τα **εμπειρικά** και τα **μηχανιστικά** μοντέλα. Επίσης, μπορούν να ταξινομηθούν σε σχέση με τον **προσανατολισμό** τους σε μοντέλα **μεταφοράς μάζας** και **οικολογικά μοντέλα**, αλλά και **βάση αποτελέσματος** σε **αιτιοκρατικά/ντετερμινιστικά** και **πιθανολογικά/στοχαστικά μοντέλα**. Τέλος, μια ακόμη ταξινόμηση γίνεται βάση της **διάστασης** όπου έχουμε τα **τριδιάστατα**, τα **δισδιάστατα**, τα **μονοδιάστατα** και τα **μηδενικής διάστασης μοντέλα** (Ματζαφλήρη 2007).

Ένα μοντέλο ποιότητας υδάτων αποτελείται από δύο μέρη: το πρώτο αφορά την επίλυση του υδραυλικού προβλήματος και το δεύτερο της ποιότητας του νερού με τις διεργασίες μεταφοράς μάζας. Οι αρχές του ισοζυγίου λαμβάνονται υπόψη στο τμήμα της υδραυλικής, ενώ οι αρχές της κινητικής και της στοιχειομετρίας στο τμήμα της ποιότητας υδάτων. Στα μοντέλα ποιότητας υδάτων, το σύστημα της λίμνης χαρακτηρίζεται με καταστατικές μεταβλητές όπως η θερμοκρασία, οι διαφορετικές συγκεντρώσεις και οι διαφορετικές βιομάζες. Το σύστημα επηρεάζεται από δυναμικές λειτουργίες. Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των διαφορετικών καταστατικών μεταβλητών και των παραγόντων που τους επηρεάζουν είναι διαδικασίες του μοντέλου. Στις

εξισώσεις που περιγράφουν τις διαδικασίες, υπάρχουν συντελεστές και άλλες σταθερές που ονομάζονται παράμετροι (MacKay *et al.* 2009).

Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί σκοποί για τους οποίους εφαρμόζονται τα μοντέλα ποιότητας υδάτων. Συχνά, χρησιμοποιούνται για την προσέγγιση μιας μελλοντικής ανάπτυξης και στο πώς αυτή θα επιδράσει στους υδατικούς πόρους, όπως είναι για παράδειγμα το φαινόμενο του ευτροφισμού. Εφαρμογή βρίσκουν επίσης, στην εκπόνηση σχεδίων διαχείρισης, αλλά και στον υπολογισμό της συνεισφοράς διαφορετικών παραγόντων στη μεταβολή της ποιότητας του ύδατος. Τέλος, μοντέλα ποιότητας υδάτων χρησιμοποιούνται ευρέως για επιστημονικούς σκοπούς (Heinonen *et al.* 2000).

Αν η υδρολογική μοντελοποίηση και παρακολούθηση μπορέσουν να χρησιμοποιηθούν ολοκληρωμένα, υποστηρίζουν η μια την άλλη. Στην πράξη, αυτό σημαίνει ότι οι αξιόπιστες χρονοσειρές μιας συγκεκριμένης παραμέτρου, που αποτελούν τα δεδομένα της παρακολούθησης, μπορούν να συγκριθούν με τα αποτελέσματα που δίνει ένα μοντέλο προσομοίωσης για αυτή τη συγκεκριμένη χρονοσειρά, εφόσον μπορεί να προσομοιωθεί. Επιπλέον, τα δεδομένα παρακολούθησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ρυθμίσουν (calibration) ορισμένες από τις σταθερές του μοντέλου προσομοίωσης, έτσι ώστε να ανταποκρίνεται καλύτερα στην πραγματικότητα και να θεωρείται αξιόπιστο. Σε όσες περισσότερες περιπτώσεις μελέτης χρησιμοποιείται επιτυχώς ένα μοντέλο και αναλόγως με το γεωγραφικό εύρος των περιοχών και την τελική επιτυχή εφαρμογή του, χαρακτηρίζεται ως «global model» σε αντιδιαστολή με τον όρο «local model» (Ψιλοβίκος, 2005). Τελικά, οι έγκυρες χρονοσειρές σε συνδυασμό με τα ενημερωμένα και ρυθμισμένα μοντέλα μπορούν να

οδηγήσουν σε μια βελτιωμένη κατανόηση του υδατικού ισοζυγίου και επιπλέον σε πιο αποδοτικά προγράμματα παρακολούθησης (UN/ECE 2003).

2.3. Μοντέλα Χωρικής Προσομοίωσης με την Χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS).

2.3.1. Εισαγωγή

Τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (Geographic Information System – GIS) είναι ένα ισχυρό σύνολο εργαλείων για την συλλογή, αποθήκευση, ανάλυση ανά πάσα στιγμή, μετασχηματισμό και απεικόνιση χωρικών στοιχείων του πραγματικού κόσμου. Σαν αποτέλεσμα ένα GIS χαρακτηρίζεται από τις παρακάτω δυνατότητες:

- Αρχικά, μπορεί να αποθηκεύσει, να διαχειριστεί και να ενσωματώσει ένα μεγάλο όγκο χωρικών στοιχείων.
- Έπειτα, αποτελεί το πιο κατάλληλο εργαλείο χωρικής ανάλυσης, εστιαζόμενο ειδικά στην χωρική διάσταση των στοιχείων.
- Τέλος, αποτελεί ένα πολύ αποτελεσματικό μηχανισμό για την επίλυση χωρικών προβλημάτων μέσα από την οργάνωση, διαχείριση και μετασχηματισμό μεγάλου όγκου στοιχείων με τέτοιο τρόπο που η πληροφορία να είναι προσιτή σε όλους τους χρήστες (Hillier 2011).

Τα GIS έχουν σαν κυρίαρχο στόχο τον χωρικό σχεδιασμό, χρησιμοποιούνται δηλαδή μέσα από πολλές προσεγγίσεις στην διατύπωση και αξιολόγηση των πολιτικών και προγραμμάτων που αναφέρονται στο φυσικό ή περιβαλλοντικό σχεδιασμό, από τοπικό μέχρι και εθνικό επίπεδο. Σαν αποτέλεσμα, τα συστήματα αυτά σαν τμήματα μιας ολοκληρωμένης προσέγγισης, μολονότι απαιτούν διαχείριση της βάσης δεδομένων, κυρίως διαθέτουν μια σειρά από εργαλεία για τον μετασχηματισμό των

στοιχείων, αναγκαίων για την επίλυση συγκεκριμένων προβλημάτων (Κουτσόπουλος 2005).

Έχουν τρία βασικά συστατικά τα οποία βρίσκονται σε συνεχή ισορροπία και αλληλεξάρτηση. Τα τρία αυτά μέρη είναι τα μηχανήματα – υλικό (hardware), οι αλγόριθμοι – λογισμικό (software) και τα διαθέσιμα (resourceware). Πρέπει να σημειωθεί ότι η καταγιστική πρόοδος που παρατηρείται κυρίως στα δύο πρώτα συστατικά ενός GIS, καθιστά κάθε συζήτηση για συγκεκριμένα υπολογιστικά συστήματα ή λογισμικά χωρίς νόημα.

Τα γεωγραφικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται από το GIS συλλέγονται από υπάρχοντες χάρτες, αεροφωτογραφίες, δορυφόρους και άλλες πηγές. Στην συνέχεια για να γίνουν τα δεδομένα συμβατά με τον υπολογιστή λαμβάνει χώρα η ψηφιοποίηση. Με την διαδικασία της ψηφιοποίησης επιτυγχάνεται μια μετατροπή η οποία επιτρέπει την περαιτέρω λειτουργία της αποθήκευσης, ανάκτησης και ανάλυσης των δεδομένων από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Οι χάρτες που παράγονται από το GIS τυπικά εμφανίζονται στην οθόνη του υπολογιστή και τυπώνονται σε χαρτί. Το GIS επεξεργάζεται και άλλες μορφές γραφικών, όπως είναι τα αυτοματοποιημένα σε περιβάλλον CAD (Συστήματα Χωρικής Απεικόνισης – Computer Aided Design). Έτσι το GIS είναι κάτι περισσότερο από ένα σύστημα δημιουργίας χαρτών. Είναι ένα σύνθετο εργαλείο που παρέχει στους χρήστες του τη δυνατότητα να ερμηνεύσουν και να εκτιμούν σωστά μια διαμορφωμένη κατάσταση λαμβάνοντας πλήρη πληροφόρηση (ESRI, ARC-VIEW 1996).

Με την χρήση του δίνονται απαντήσεις σε γεωγραφικά και χωρικά προβλήματα. Τα εισερχόμενα δεδομένα προς επεξεργασία, η ανάλυση τους και το εξαγόμενο

αποτέλεσμα είναι η απάντηση του προβλήματος. Ο σκοπός της συλλογής των δεδομένων για το GIS είναι (Ματζαφλέρη 2007):

1. Η καταγραφή μιας ορισμένης γεωγραφικής περιοχής
2. Η εξέταση διάφορων υποθέσεων και η κατασκευή μοντέλων.

Η τεχνολογία των GIS χρησιμοποιείται σε πλήθος εφαρμογών, για κάθε ζήτημα ανάλυσης και σχεδιασμού, όπου η παράμετρος “γεωγραφικός χώρος” υπεισέρχεται άμεσα ή έμμεσα (ζητήματα χωροταξίας, αστικής και περιφερειακής ανάλυσης και σχεδιασμού, διαχείριση φυσικών πόρων, οικολογικών ερευνών, κτηματολογίου κ.α). Τα πλεονεκτήματα από την χρήση των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών είναι περιληπτικά τα παρακάτω:

- Δυνατότητα γεωγραφικής ανάλυσης των πληροφοριών
- Δυνατότητα ηλεκτρονικής χαρτογράφησης και παρουσίασης θεματικών χαρτών
- Δυνατότητα διεπιστημονικής εργασίας
- Δυνατότητα ένταξης μεθόδων μαθηματικής επεξεργασίας των πληροφοριών στα GIS καθώς και στα μοντέλα προσομοίωσης.

2.3.2. Το ArcGIS 10

Το ArcGIS 10 και η επέκταση του Spatial Analyst εξασφαλίζει εργαλεία για τα χωρικά δεδομένα τα οποία εφαρμόζουν στατιστική θεωρία και τεχνικές μοντελοποίησης για τα αναφερόμενα χωρικά δεδομένα.

Η θερμοκρασία, το υψόμετρο και οι συγκεντρώσεις ρυπογόνων ουσιών είναι τύποι δεδομένων οι οποίοι μπορούν να περιγραφούν από τις επιφάνειες. Κάθε κελί με κουκίδες – raster αντιπροσωπεύει μια μονάδα μέτρησης όπως τη σχέση του κελιού από

σημείο με καθορισμένη τιμή μέτρησης. Επειδή δεν είναι πρακτικό να λαμβάνονται οι τιμές για κάθε κελί τύπου raster, από τιμές σε διάφορα σημεία δειγματοληψιών εξάγονται οι ενδιάμεσες τιμές χρησιμοποιώντας τα εργαλεία παρεμβολής του ArcGIS Spatial Analyst .

Το GIS παρέχει όλα τα μέσα για την διαχείριση, σύνθεση και ανάλυση των δεδομένων. Το ArcGIS Spatial Analyst (Χωρικός Αναλυτής) παρέχει ένα σύνολο εργαλείων για την ανάλυση και την μοντελοποίηση των χωρικών δεδομένων. Ένα σύνολο σημείων τα οποία εκπροσωπούν μεταβολές στο ανάγλυφο του εδάφους, στον πληθυσμό, ή στο περιβάλλον μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να απεικονίσει τη συνέχεια και την διαφορετικότητα που παρατηρείται διαμέσου μιας επιφάνειας με τα εργαλεία της παρεμβολής. Αυτές οι μεταβολές μπορούν να εξαχθούν στον γεωγραφικό χώρο. Η μορφολογία και τα χαρακτηριστικά αυτών των μεταβολών μπορούν να περιγραφούν. Η ικανότητα να δημιουργηθούν επιφάνειες από μια σειρά δεδομένων από σταθμούς δειγματοληψίας κάνει την παρεμβολή δυναμική και χρήσιμη (Johnston *et al.* 2001).

2.3.3. Μέθοδοι Παρεμβολής

Η μελέτη μιας λιμναίας περιοχής προϋποθέτει σε πολλές περιπτώσεις την ύπαρξη πληροφορίας όσον αφορά στη χωρική κατανομή μιας σειράς παραμέτρων (π.χ. θερμοκρασίας, αλατότητας, κλπ). Στην περίπτωση που για την υπό μελέτη περιοχή υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα πεδίου από ένα σύνολο σταθμών δειγματοληψίας, υπάρχει η δυνατότητα εκτίμησης της χωρικής κατανομής οποιασδήποτε παραμέτρου στα πλαίσια ενός GIS, χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες μεθόδους. Μεταξύ των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή της σημειακής πληροφορίας σε συνεχή πληροφορία επιφάνειας, είναι και οι μέθοδοι παρεμβολής (Κίτσιου 2005).

Οι διαφορετικές μέθοδοι παρεμβολής σχεδόν πάντα παράγουν διαφορετικά αποτελέσματα. Υπάρχουν δύο κατηγορίες τεχνικών παρεμβολής, η αιτιοκρατική – ντετερμινιστική και η γεωστατιστική. Οι τεχνικές αιτιοκρατικής παρεμβολής δημιουργούν επιφάνειες βασισμένες σε μετρημένα σημεία ή μαθηματικούς τύπους. Μέθοδοι όπως αυτή της Αντιστρόφου Βαρύνουσας Απόστασης (Inverse Distance Weighted Interpolation Method – IDW) βασίζεται στην έκταση της ομοιότητας των κελιών ενώ μέθοδοι όπως η μέθοδος Τάσης (αγγλική ορολογία) ταιριάζουν ένα επίπεδο επιφάνειας που καθορίζεται από μαθηματικές συναρτήσεις. Η γεωστατιστική παρεμβολή όπως η μέθοδος Βέλτιστης Παρεμβολής (Kriging) βασίζεται στην στατιστική και αποτελεί βελτιωμένη μέθοδο πρόβλεψης μοντέλων επιφάνειας καθώς περιλαμβάνει κριτήρια πρόβλεψης της βεβαιότητας και της ακρίβειας των προβλέψεων με στατιστικά κριτήρια (Ματζαφλέρη 2007).

Το ArcGIS 10 και η επέκταση του Spatial Analyst προσφέρουν αρκετά εργαλεία παρεμβολής που μπορεί να περιγράψουν και να καλύψουν μια επιφάνεια από σημειακά δεδομένα. Οι μέθοδοι των Δεικτών (Pointerp) και της Φυσικής Γεινίασης (Natural Neighbors), ενσωματώθηκαν στις μεθόδους της Αντιστρόφου Βαρύνουσας Απόστασης (IDW), της προσαρμογής Σπληνών (Spline) και της Βέλτιστης παρεμβολής (Kriging). Κάθε μέθοδος χρησιμοποιεί διαφορετική προσέγγιση για να καθορίσει τις τιμές των εξαγόμενων κελιών. Η πιο ενδεδειγμένη μέθοδος εξαρτάται από την διανομή των σημείων δειγματοληψίας και το φαινόμενο το οποίο μελετάται.

Στην παρούσα διατριβή θα ασχοληθούμε με τις αιτιοκρατικές μεθόδους παρεμβολής και συγκεκριμένα με την μέθοδο της Αντιστρόφου Βαρύνουσας Απόστασης (IDW) και την μέθοδο Σπληνών (Spline), οι οποίες και περιγράφονται αναλυτικά παρακάτω.

2.3.3.1. Μέθοδος της Αντιστρόφου Βαρύνουσας Απόστασης (IDW)

Η μεθοδολογία IDW είναι αναγκαίο να χρησιμοποιείται όταν τα σημεία δειγματοληψιών είναι αρκετά πυκνά για να καλύψουν την έκταση ολόκληρης της επιφάνειας. Η μέθοδος IDW καθορίζει την τιμή των κελιών με γραμμικό σταθμικό συνδυασμό επίδρασης των σημείων. Η προσδιοριζόμενη επιρροή είναι μια συνάρτηση της απόστασης ενός εισαγόμενου σημείου από την θέση του εξαγόμενου κελιού. Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση τόσο μικρότερη επίδραση έχει στην τιμή του εξαγόμενου κελιού. Συνεπώς εκτιμά ότι κάθε σημείο δειγματοληψίας έχει μια τοπική επίδραση και η επίδραση αυτή μειώνεται σε απόσταση από το σημείο. Ο χρήστης καθορίζει τον αριθμό των σημείων ή όλα τα σημεία μέσα σε μια καθορισμένη ακτίνα και προάγει την διαδικασία υπολογισμού των τιμών. Στην IDW παρεμβολή η δύναμη ποικίλει αν και συνήθως η ευρύτερα χρησιμοποιούμενη προεπιλεγμένη τιμή είναι 2 (Κίτσιου 2005, Ψιλοβίκος και συν. 2006). Αυξάνοντας τη δύναμη δίδεται μεγαλύτερη επιρροή στα κοντινά σημεία, ενώ μειώνοντας την δύναμη δίδεται μεγαλύτερη επιρροή στα απομακρυσμένα σημεία. Η ακτίνα έρευνας μπορεί να οριστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να καθορίζεται ο υπολογισμός μέσω των σημείων. Επίσης μπορεί να προστεθούν barriers για να περιορίσουν την χρήση των σημείων δειγματοληψίας από την μια πλευρά ως την άλλη (π,χ κορυφογραμμές, ποτάμια κλπ.) (Hillier 2011).

2.3.3.2. Μέθοδος των Σπληνών (Splines)

Η μέθοδος των Σπληνών υπολογίζει τις τιμές χρησιμοποιώντας μια μαθηματική συνάρτηση η οποία ελαχιστοποιεί τις συνολικές καμπύλες της επιφάνειας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα σε μια επίπεδη επιφάνεια οι καμπύλες να περνούν ακριβώς μέσα από

τα σημεία δειγματοληψιών. Μπορεί να προβλέψει ράχες και κοιλάδες στα δεδομένα και είναι η καλύτερη μέθοδος αντιπροσώπευσης σε επιφάνειες χωρίς απότομες διακυμάνσεις-αιχμές.

Υπάρχουν δυο τύποι διαφοροποίησης των σπληνών ο “ομαλός” και “ο τεντωμένος”. Μια ομαλή σπλήνα ενσωματώνει την πρώτη παράγωγο (κλίση), την δεύτερη παράγωγο (ρυθμός αλλαγής της κλίσης) και την τρίτη παράγωγο (ρυθμός αλλαγής της δεύτερης παραγώγου) ελαχιστοποιώντας τους υπολογισμούς. Αν και ο “τεντωμένος” τύπος χρησιμοποιεί μόνο την πρώτη και την δεύτερη παράγωγο, περιλαμβάνει περισσότερα σημεία στους υπολογισμούς των σπληνών, έτσι κατά συνήθεια δημιουργεί ομαλότερες επιφάνειες αλλά αυξάνει τον χρόνο υπολογισμού (Childs 2004).

2.4. Περιοχή Μελέτης

Η λίμνη Κάρλα με την πλούσια ιχθυοπαραγωγή, υπήρξε χώρος πολιτιστικής εξέλιξης και ανάπτυξης, ενός μοναδικού τρόπου ζωής των ανθρώπων που ασχολούνταν με την αλιεία. Οι κάτοικοι των γύρω με αυτήν χωριών διαιώνισαν αυτόν τον τρόπο ζωής, μέχρι την αποξήρανση της λίμνης (Εικ. 3).

Η λεκάνη της Κάρλας σχηματίστηκε από ένα τεκτονικό βύθισμα, που συνέβη κατά το Πλειόκαινο ή Πλειστόκαινο, στην περιοχή μεταξύ Λάρισας και Βελεστίου. Το βύθισμα αυτό πληρώθηκε αργότερα με λιμναία ιζήματα και προσχώσεις που προήλθαν από την αποσάθρωση των γύρω οροσειρών. Μέσα στο βύθισμα σχηματίστηκε και η λίμνη Κάρλα (Μπαρτζώκα-Τσιόμπρα & Ψύλλος 2011).

Η λίμνη καταλάμβανε το νοτιότερο άκρο της υδρογεωλογικής λεκάνης στο νοτιοανατολικό τμήμα της Θεσσαλικής πεδιάδας μέχρι το 1962. Δεν ήταν μόνο ένας

από τους σημαντικότερους υγροτόπους στην Ελλάδα, αλλά και ένας φυσικός ταμιευτήρας, ο οποίος παρείχε σημαντική αποθήκευση νερού. Η λεκάνη επιφανειακής απορροής και τα νερά του Πηνειού τροφοδοτούσαν την λίμνη με μεγάλες ποσότητες νερού (Moustaka *et al.* 2002).

Ο Πηνειός, ήταν η πιο σημαντική πηγή εισροής, ενώ η απορροή από την περιοχή της λεκάνης απορροής σε συνδυασμό με τις πηγές (Κανάλια, Ασμάκι) και τα προσωρινά ρέματα (ανατολικής και νότιας πλευράς) τροφοδοτούσαν επίσης την λίμνη.

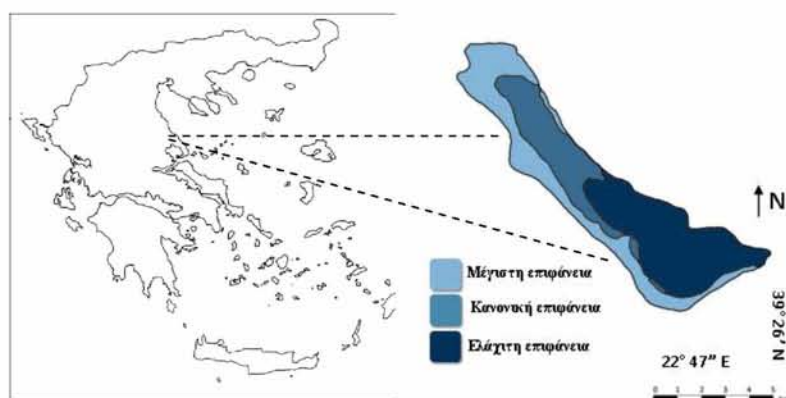


Εικόνα 3: Αλιείς στην πρώην λίμνη Κάρλα. (Πηγή: Changing Landscapes _ Mediterranean Sensitive Areas Design _ Volos 2011)

Όσο αναφορά τον λιμνολογικό χαρακτήρα της πρώην λίμνης Κάρλας, ο Ανανιάδης το 1956 την ταξινόμησε ως ευτροφική, με χαμηλή διαφάνεια, με κακή ποικιλία ειδών και συχνή εμφάνιση ανθίσεων φυτοπλαγκτού (Papadimitriou *et al.* 2011). Αντίστοιχα φαινόμενα ευτροφισμού, έχουν παρατηρηθεί από τα τέλη της δεκαετίας του '60 – αρχές δεκαετίας του '70 και στη λίμνη Καστοριάς (Ψιλοβίκος 2011) με βάση παλαιότερες αναφορές (Γερασίμου και συν. 1970) αναδεικνύοντας έτσι το πρόβλημα του

ευτροφισμού, ένα αρκετά διαχρονικό φαινόμενο που οφείλεται τόσο σε φυσικούς, όσο κυρίως σε ανθρωπογενείς παράγοντες.

Η έκταση που κάλυπτε πριν από τις πρώτες επεμβάσεις στην περιοχή κυμαίνονταν, από 45.000 έως 180.000 στρέμματα με μικρά βάθη τα οποία, όπως αναφέρεται σε μελέτες που έχουν υλοποιηθεί, ευνοούσαν την ανάπτυξη πλούσιου φυτοβένθους και υψηλούς ρυθμούς πρωτογενούς παραγωγής σε βιομάζα που αποτελούσε τροφή για ποικιλία ζωικών οργανισμών, τα οποία απαντούσαν σε μεγάλη πυκνότητα πληθυσμών. Το μικρό βάθος της λίμνης, ευνοούσε επίσης την ανάπτυξη υδρόβιας βλάστησης η οποία δημιουργούσε ευνοϊκές συνθήκες για την διαβίωση της πανίδας στην λίμνη (Εικ. 4) (Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. 2002).



Εικόνα 4: Χάρτης της λίμνης Κάρλας (Η φωτογραφία δεξιά δείχνει την επαναπλήρωση της λίμνης) (Πηγή: Οίκοπομου *et al.* 2010)

Για τους παραπάνω λόγους, η λίμνη Κάρλα θεωρούνταν από τις πιο σημαντικές οικολογικά λίμνες της χώρας και αποτελούσε σημαντικό οικονομικό πόρο των παρακάρλιων οικισμών με μέση ιχθυοπαραγωγή 900 τπ/έτος, όταν όλη η ιχθυοπαραγωγή εσωτερικών υδάτων στην Ελλάδα ανέρχεται περίπου σε 12.000 τόνους το χρόνο (Μπαρτζώκα-Τσιόμπρα & Ψύλλος 2011).

2.4.1. Ανάμεσα στον Μύθο και την Πραγματικότητα

Η λίμνη Βοιβηίς, που πιθανόν πήρε το όνομα της από την πόλη Βοιβή, αρχαία πόλη της Θεσσαλίας που ήταν κοντά στα Κανάλια κατά την αρχαιότητα ή από τη Βοιβήδα, νύμφη της μυθολογίας, ή Κερκινίτις, ή Κάρλα κατά τον μεσαίωνα, ή Κάρλα Σου ή Κάρλα Γκιόλ όπως συνήθιζαν να την αναφέρουν κατά την περίοδο της τουρκοκρατίας, ο “Βάλτος” για τους ντόπιους, πορεύτηκε μαζί με τους παραλίμνιους ανθρώπους ανάμεσα στον μύθο και την πραγματικότητα (Κε.Με.Βο. 2006).

Πιστεύεται ότι προήλθε από σεισμούς οι οποίοι δημιούργησαν ρήγμα στα σημερινά Τέμπη και χωρίστηκε η Όσσα με τον Όλυμπο, οπότε και βρήκε διέξοδο προς την θάλασσα ο Πηνειός και η περιοχή αποστραγγίστηκε. Παρόλα αυτά απόμεινε η μεγάλη λίμνη Νεσσωνίς και η Βοιβηίς μικρότερη και πλησιέστερα στα παράλια (e-Karla 2004).

Στα παράλια της ζούσαν οι Κένταυροι, των οποίων η σύγκρουση στη λίμνη με τους Λαπίθες, απεικονίζεται στα Ελγίνεια Μάρμαρα (Εικ. 5). Την συναντάμε σε πολλούς μυθολογικούς κύκλους όπως στον Τρωικό πόλεμο, όπου ο Εύμηλος, γιος του Άδμητου, βασιλιά των Φερών, με 11 πλοία από τις πόλεις Φερές, Βοιβή, Γραφύρες και Ιωλκό θα ξεκινήσει για τον πόλεμο και στην Αργοναυτική εκστρατεία, όπου η περιοχή Κολχίδα θα αποτελέσει το ορμητήριο της Αργούς (Μπαρτζώκα-Τσιόμπρα & Ψύλλος 2011).

Την έχουν υμνήσει ο Όμηρος, ο Πίνδαρος, ο Στράβωνας κ.α. Ο τόπος συνδέθηκε με τον θεό Απόλλωνα, το “Φοίβο”, που στην περιοχή ερωτεύτηκε την όμορφη Κυρήνη, την καλλονή Δάφνη και με την Κορωνίδα γέννησε το φημισμένο γιατρό της αρχαιότητας, Ασκληπιό. Η Βοιβήδα αποτέλεσε πέρασμα ή καταφύγιο για πολλούς ημίθεους και ήρωες όπως ο Θησέας, ο Ηρακλής, οι Αμαζόνες, στην πορεία τους για τις διάφορες περιπέτειες τους. Στην περιοχή επίσης κατά των 19^ο αιώνα έζησαν και δραστηριοποιήθηκαν οι Άνθιμος Γαζής και Ρήγας Φεραίος (Τζιάτζιος 2010).



Εικόνα 5: Η Κενταυρομαχία, όπως απεικονίζεται στις μετώπες του Παρθενών (Πηγή: Παπανίκος 2008).

2.4.2. Η Αποξήρανση της Λίμνης

Οι διακυμάνσεις της στάθμης της λίμνης ήταν έντονες κατά την διάρκεια των προϊστορικών χρόνων, αποτέλεσμα των διαφόρων προσχώσεων σε αυτή. Κατά το 1938 με 1939 πραγματοποιείται η πρώτη οριοθέτηση του ανώτερου (48,50μ) και κατώτερου (47,30μ) υψόμετρου της στάθμης με το Ν. 5800/33, ενώ κατά τα επόμενα έτη έλαβε χώρα νέος περιορισμός της έκτασης της λίμνης απόρροια των αντιπλημμυρικών αναχωμάτων στον ποταμό Πηνειό. Το μέγιστο βάθος της από 5,5 μέτρα που ήταν πριν το 1940 μειώθηκε στα 2 μέτρα το 1950-55 (Π.Ο.Κα.Μα.Κε.Βε. 2010).

Οι πλημμύρες των εδαφών της περιοχής, που δημιούργησαν περιοδικές καταστροφές των καλλιεργειών και συνετέλεσαν στην δημιουργία παθογενών εδαφών λόγω της συγκέντρωσης των αλάτων και στην διάδοση της ελονοσίας, καθώς και η ανάγκη για δημιουργία περισσότερων γεωργικών εκτάσεων μαζί με την μείωση των αλιευμάτων οδήγησαν στην ολική αποξήρανση της λίμνης το 1962 (Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. 2002).

Στο σχεδιασμό των αρχικών μελετών δεν προβλεπόταν η ολική αποξήρανση της λίμνης, αλλά η διατήρηση 64.700 στρεμμάτων όπου θα παρέμεναν ως ταμιευτήρας. Αντιθέτως, το 1962 οδηγήθηκε η Κάρλα σε ολική αποξήρανση, η οποία και ολοκληρώθηκε το 1964. Η πράξη αυτή οδήγησε σε αύξηση του εισοδήματος λόγω της παραγωγής στην πεδιάδα της Κάρλας, οφειλόμενη όχι μόνο στην αύξηση των καλλιεργούμενων περιοχών και της μείωσης των ζημιών από τις πλημμύρες, αλλά και λόγω της υψηλότερης ενδυνάμωσης των αγροοικοσυστημάτων (Τζάτζιος 2010).

Η ανάπτυξη αυτή δεν κράτησε για μεγάλο χρονικό διάστημα, καθώς η άρδευση επεκτάθηκε σχεδόν σε όλες τις καλλιεργούμενες εκτάσεις. Η προέλευση του νερού άρδευσης προερχόταν από βαθιές γεωτρήσεις. Αποτέλεσμα ήταν, οι ψαράδες να χάσουν τις δουλειές τους και τα λιγοστά ψάρια που παράμεναν να θεωρούνταν ακατάλληλα για ανθρώπινη τροφή (Εικ. 6). Οι σταθερές πτώσεις της στάθμης των υπόγειων νερών, είχαν ως αποτέλεσμα, το υψηλής ποιότητας νερό ύδρευσης που προερχόταν από τις γεωτρήσεις, να συμπληρώνεται από χαμηλής ποιότητας νερό που προερχόταν από υδραντλίες που το απορροφούσαν από το μικρό υγρότοπο και από τις διάφορες τάφρους κατά την περίοδο του καλοκαιριού.



Εικόνα 6: Η αποξήρανση της λίμνης Κάρλας (Πηγή: Karla News 2011).

Η άντληση ήταν πλέον ανεξέλεγκτη. Τα αγροοικοσυστήματα έχασαν την ποικιλία των καλλιεργειών τους και επήλθε ζημία λόγω της αύξησης του παγετού στις καλλιέργειες. Τέλος οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις στην Λάρισα διοχέτευαν μεγάλους όγκους των μη επεξεργασμένων αποβλήτων τους στις αποχετευτικές τάφρους (Zalidis & Gerakis 1999).

Η αποξήρανση της λίμνης προκάλεσε τη δημιουργία πλήθους προβλημάτων στην περιφέρεια όπως (Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. 2002):

- Εξαιρετικά δυσμενείς επιπτώσεις στην χλωρίδα, την πανίδα και τα οικοσυστήματα,
- Υποβάθμιση της αισθητικής του τοπίου,
- Εξάντληση των αποθεμάτων του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα λόγω υπεράντλησης για κάλυψη των αδρευτικών απαιτήσεων,
- Επιβάρυνση της ποιότητας των υπόγειων νερών λόγω εντατικοποίησης των γεωργικών εκμεταλλεύσεων στην περιοχή της πρώην λίμνης,
- Επιπτώσεις στην ποιότητα των εδαφικών πόρων (ρωγματώσεις, καθιζήσεις, παθογενή εδάφη, κλπ),
- Εξαφάνιση της αλιείας, ενός τομέα εξαιρετικά δυναμικού στην περιοχή,
- Εμφάνιση πληθυσμιακής συρρίκνωσης των ασθενέστερων οικονομικά οικισμών (π.χ. Κανάλια),
- Όξυνση των ακραίων κλιματικών φαινομένων.

Ένα μεγάλο μέρος των προβλημάτων που αντιμετωπίζει σήμερα η περιοχή, προήλθαν από την απώλεια των πολύτιμων λειτουργιών του μοναδικού αυτού υγροβιότοπου, όπως είναι:

- Η απομάκρυνση και η μετατροπή των θρεπτικών στοιχείων

- Η παγίδευση των πλημμυρικών νερών
- Ο εμπλουτισμός των υπόγειων υδροφορέων
- Η αποθήκευση του νερού στην επιφάνεια της λίμνης και υπογείως για άρδευση
- Η κατακράτηση των ιζημάτων και των τοξικών ουσιών
- Η αποθήκευση και ελευθέρωση της θερμότητας
- Η δέσμευση της ηλιακής ακτινοβολίας
- Η στήριξη των τροφικών αλυσίδων (Gerakis *et al.* 1992, Ζαλίδης και συν. 1995,

Μουστάκα 2002)

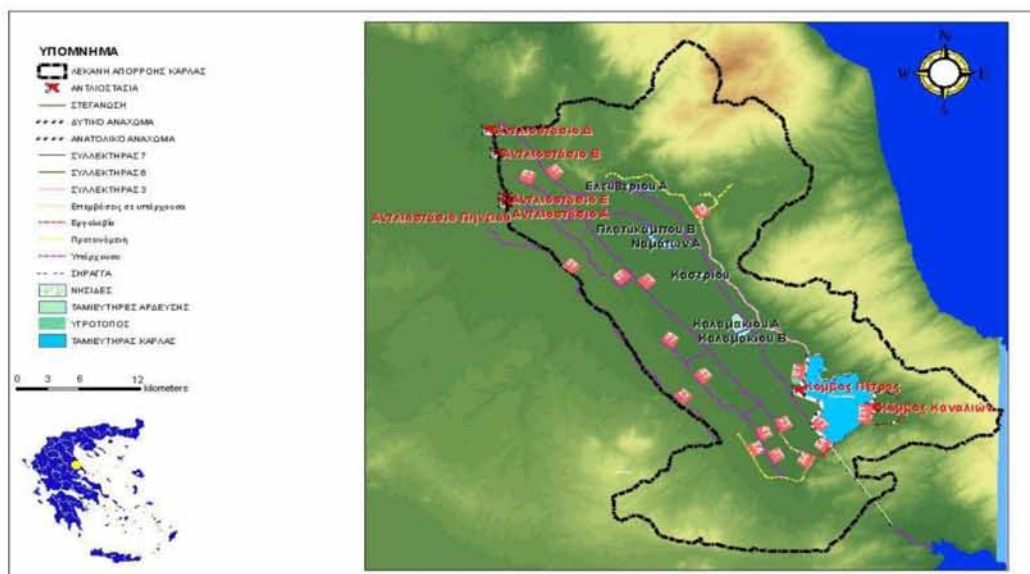
2.4.3. Η Ανασύσταση της Λίμνης Κάρλας

2.4.3.1. Οι Λόγοι και οι Στόχοι του Έργου Ανασύστασης

Η επαναδημιουργία της λίμνης Κάρλας και η αποκατάσταση των υδροτοπικών λειτουργιών της και η ανάδειξη της περιβαλλοντικής αξίας της λίμνης συζητείται και σχεδιάζεται εδώ και τουλάχιστον είκοσι χρόνια. Σε όλη αυτή την περίοδο, οι στόχοι της επαναδημιουργίας, τα τεχνικά χαρακτηριστικά και ο τρόπος λειτουργίας του ταμιευτήρα καθώς και η προτεινόμενη διαχείριση της ευρύτερης περιοχής, δεν ήταν πάντοτε ταυτόσημοι. Οι επιπτώσεις που προήλθαν από την αποξήρανση της λίμνης, όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, έφεραν σύμπνοια απόψεων όλων των εμπλεκόμενων φορέων για την επαναδημιουργία μέρους τουλάχιστον της λίμνης (Παπανίκος 2008).

Οι κυριότεροι λόγοι που οδήγησαν στην επαναδημιουργία της Κάρλας ήταν οι εξαιρετικά δυσμενείς επιπτώσεις που επέφερε η αποξήρανση στην χλωρίδα, την πανίδα και στα οικοσυστημικά χαρακτηριστικά της περιοχής. Η ποιότητα και η ποσότητα των υπόγειων υδατικών πόρων που εξαφανίστηκαν από τις υπεραντλήσεις με την εξάντληση του υπόγειου υδροφορέα, ήταν ένας ακόμα λόγος, όπως επίσης και η

ποιότητα των υδάτων του Παγασητικού Κόλπου, ο οποίος δέχεται σήμερα το σύνολο του ρυπαντικού φορτίου από την περιοχή της Κάρλας. Επιπλέον, μερικοί ακόμα σημαντικοί λόγοι όπως η υποβάθμιση της ποιότητας των εδαφικών πόρων, η απώλεια ενός τομέα της πρωτογενούς παραγωγής όπως είναι η αλιεία, η πληθυσμιακή συρρίκνωση των ασθενέστερων οικονομικά οικισμών και τέλος η όξυνση των ακραίων κλιματικών φαινομένων συνέβαλλαν και αυτοί στην τελική απόφαση του έργου για τη επαναδημιουργία τμήματος της τέως λίμνης Κάρλας (Εικ. 7) (Μπαρτζώκα-Τσιόμπρα & Ψύλλος 2011).



Εικόνα 7: Χάρτης τεχνικών κύριων έργων (Πηγή: Μπαρτζώκα – Τσιόμπρα & Ψύλλο 2011).

Στόχοι της επανασύστασης είναι:

- να αναβαθμίσει τη δυναμική οικολογική και περιβαλλοντική ισορροπία με την δημιουργία μιας μεγάλης υγροτοπικής έκτασης,
- να παρέχει επαρκή προστασία από τις πλημμύρες στην περιοχή,

- να αποκαταστήσει την ποιότητα και την ποσότητα των υποβαθμισμένων υδάτων του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, ο οποίος προμηθεύει εν μέρει με νερό την πόλη του Βόλου,
- να δημιουργήσει προϋποθέσεις για ορθή διαχείριση του αναδημιουργημένου οικοσυστήματος και των διαθέσιμων υδατικών πόρων και τέλος
- να δημιουργήσει υποδομές και ευνοϊκές συνθήκες για την πραγματοποίηση νέων, συμβατών με τη βιώσιμη ανάπτυξη, δραστηριοτήτων και απασχόλησης (Moustaka *et al.* 2002).

2.4.3.2. Τωρινή Κατάσταση

Σήμερα, έχουν τεθεί σε λειτουργία και τα πέντε αντλιοστάσια του Πηνειού για την τροφοδότηση της Λίμνης Κάρλας από τα νερά του Πηνειού, τα οποία θα λειτουργούν κατά τους χειμερινούς και εαρινούς μήνες, έτσι ώστε να παροχετεύονται στη λίμνη οι χειμερινές και εαρινές απορροές του Πηνειού. Οι κύριες εισοδοί τροφοδοσίας από τον Πηνειό είναι (Μπαρτζώκα-Γσιόμπρα & Ψύλλος 2011):

– Η είσοδος από αντλιοστάσιο στην τοποθεσία Καραούλι στη Λάρισα, όπου το νερό οδηγείται στη Διώρυγα 2Δ, μετά στην 6Τ, στην 7Τ, στην 2Τ και τέλος καταλήγει στη Ν.Δ. είσοδο του ταμιευτήρα, όπου συμβάλει και ο Συλλεκτήρας Σ4. Η θέση του αντλιοστασίου στο Καραούλι βρίσκεται πλησίον της εξόδου του αγωγού που διαθέτει τα επεξεργασμένα λύματα ο βιολογικός καθαρισμός της Λάρισας. Η Διώρυγα 2Δ είναι τραπεζοειδής υπενδεδυμένος ανοιχτός αγωγός, ενώ οι Τάφροι και ο Συλλεκτήρας Σ4 είναι χωμάτινες τάφροι, οι οποίες σε κάποια σημεία τους έχουν διευθετηθεί ενώ σε κάποια όχι. Έχουν σχήμα τραπεζοειδές και φέρουν αρκετή βλάστηση, γεγονός που απαιτεί συχνό καθαρισμό.

– Η είσοδος από τον ποταμό Ασμάκι ή Τάφρος T8 μετά στη 1T και καταλήγει στον αντλιοστάσιο DP1 στην Ανατολική είσοδο του ταμιευτήρα στον κόμβο Πέτρα. Το αντλιοστάσιο DP1 έχει δυναμικότητα $24 \text{ m}^3/\text{s}$. Η τάφρος 1T είναι τραπεζοειδής χωμάτινος ανοιχτός αγωγός διευθετημένος στο μεγαλύτερο μήκος του. Λόγω της εμφάνισης της βλάστησης απαιτείται συχνός καθαρισμός.

Μέσω λοιπόν αυτών των 2 κύριων εισόδων συνεχίζεται η επαναπλήρωση της λίμνης Κάρλας με στόχο τα $141,14 * 10^6 \text{ m}^3$, τα οποία αντιστοιχούν στην Ανώτατη Στάθμη Άρδευσης υψομέτρου 48,8 m, όπου και θα μπορεί πλέον να ξεκινήσει η λειτουργία της άρδευσης. Στις 25/5/2011 το ύψος στάθμης ήταν στα 46,17 όπου αντιστοιχούσε σε $50 * 10^6 \text{ m}^3$ περίπου.

Στην παρούσα φάση αφού έχουν ολοκληρωθεί τα Έργα για την Κατασκευή του Ταμιευτήρα και τα αντίστοιχα για την τροφοδοσία του από τον Πηνειό, τα υπό κατασκευή έργα είναι:

- Η ολοκλήρωση κατασκευής των Συλλεκτήρων Σ3, Σ4, Σ6 και Σ7, ύστερα από κάποια προβλήματα που προέκυψαν όσον αφορά την Αρχαιολογία, την εξεύρεση πόρων. Ιδιαίτερης σημασίας χρήζει η μείωση του μήκους του συλλεκτήρα Σ4. Ο λόγος είναι ότι πλέον τα απορρέοντα ύδατα από τον ορεινό όγκο του Χαλκοδόμιου Όρους, όπως αυτά καταλήγουν μέσω του υδροκρίτη στην ΝΔ κάμφο, δεν θα συγκεντρώνονται στο Συλλεκτήρα Σ6 για την επαναπλήρωση του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, αφού σε αυτήν την περιοχή προβλέπεται η εγκατάσταση των νέων γεωτρήσεων ύδρευσης της ΔΕΥΑΜΒ.
- Η κατασκευή έργων μεταφοράς και διανομής νερού Λίμνης Κάρλας «Α΄ Φάση» και αφορά ουσιαστικά την κατασκευή του δικτύου άρδευσης για 92.500 στρέμματα. Με τα προβλεπόμενα έργα μεταφοράς και διανομής νερού θα

εξυπηρετηθούν 84.400 στρέμματα συνολικά και σύμφωνα με τους περιβαλλοντικούς όρους των συγκεκριμένων έργων η ποσότητα νερού που θα διατίθεται ετησίως από τη λίμνη Κάρλα για άρδευση δεν πρέπει να υπερβαίνει τα $46 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

- Η κατασκευή έργων ενίσχυσης της ύδρευση της μείζονος περιοχής Βόλου «Α΄ Φάση», όπου αφορά τη διάνοιξη των πρώτων 28 νέων γεωτρήσεων από τις 40 προβλεπόμενες και την αντικατάσταση των 5 παλαιών που ήδη υπήρχαν.
- Καθαρισμός Τάφρων 7Τ και 2Τ.
- Η κατασκευή των έργων ανάδειξης περιβάλλοντος της Λίμνης Κάρλας, που αφορούν τις αναγκαίες υποδομές ήπιας τουριστικής ανάδειξης και τις απαραίτητες φυτοτεχνικές παρεμβάσεις.

Τα έργα που δεν έχουν ξεκινήσει ακόμα είναι:

- Η κατασκευή έργων μεταφοράς και διανομής νερού Λίμνης Κάρλας «Β΄ Φάση» και αφορά ουσιαστικά την επέκταση του δικτύου άρδευσης της «Α΄ Φάσης» για 15.500 στρέμματα.
- Η κατασκευή έργων ενίσχυσης της ύδρευση της μείζονος περιοχής Βόλου «Β΄ Φάση», όπου αφορά τη διάνοιξη των υπολειπόμενων 17 νέων γεωτρήσεων. Τονίζεται δε πως η πλήρης εκμετάλλευση όλων των γεωτρήσεων θα γίνει μετά από δέκα περίπου χρόνια λειτουργίας του δικτύου άρδευσης, όπου θα αναμένεται η ανύψωση της στάθμης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα να πιάσει τα επιθυμητά επίπεδα.
- Η κατασκευή συμπληρωματικών αντιπλημμυρικών έργων και έργων ορεινής υδρονομίας στο πεδινό και ημιπεδινό των λεκανών της Αγιάς, του Καλαμακίου, των Καναλιών και της Κερασιάς.

Στις 23 Μαρτίου 2011 ο Φορέας Διαχείρισης της Περιοχής Οικοανάπτυξης Κάρλας – Μαυροβουνίου – Κεφαλόβρυσου – Βελεστίνου, στελεχώθηκε με επιστημονικό προσωπικό και προσωπικό φύλαξης. Σκοπός της δημιουργίας του είναι η προστασία, η διατήρηση και διαχείριση της φύσης και του τοπίου, ως φυσικής κληρονομιάς και πολύτιμου εθνικού πόρου σε τμήματα της περιοχής Κάρλας – Μαυροβουνίου – Κεφαλόβρυσου – Βελεστίνου.

Στη Περιοχή Προστασίας Οικοτόπων και Ειδών Κα.Μα.Κε.Βε περιλαμβάνονται και οι περιοχές με την επωνυμία «Κάρλα – Μαυροβούνι – Κεφαλόβρυσο Βελεστίνου – Νεοχώρι» με κωδικούς:

- I. GR 1420004 (SCI) «Όρος Μαυροβούνι»,
- II. GR 1420006 (SPA), «Περιοχή ταμιευτήρων πρώην Λίμνης Κάρλας»,
- III. GR 1430007 (SPA) & «Περιοχή Θεσσαλικού Κάμπου»
- IV. GR 1420011 (SPA), του Ευρωπαϊκού Οικολογικού Δικτύου NATURA 2000

και οι οποίες έχουν ενταχθεί και στον εθνικό μας κατάλογο (άρθρο 9, παρ. 6 ν. 3937/2011).

2.5. Μετρήσεις Πεδίου και Μέθοδοι Δειγματοληψίας της Λίμνης Κάρλας

2.5.1. Σημεία και Συχνότητα Δειγματοληψίας

Η επιλογή των ακριβών θέσεων των σημείων δειγματοληψίας προσδιορίστηκαν με καταγραφή των γεωγραφικών στιγμάτων με φορητό Global Position System (GPS). Ο καθορισμός των σταθμών δειγματοληψίας έγινε αξιοποιώντας προηγούμενο δίκτυο σταθμών που πραγματοποιήθηκαν το έτος 2010 στους 3 από τους 4 σταθμούς δειγματοληψίας, με σκοπό την εποχική και χρονική σύγκριση των αποτελεσμάτων. Ο

τέταρτος σταθμός, προστέθηκε εξαιτίας της γεωγραφικής του θέσης, ώστε να ελεγχθεί το φορτίο της ρύπανσης που εισέρχεται απευθείας στην λίμνη από τις εκπλήσσεις των γεωργικών εδαφών, καθώς στο συγκεκριμένο σημείο δεν υπάρχουν αναχώματα (Εικ. 8).



Εικόνα 8: Θέσεις δειγματοληψίας στην λίμνη Κάρλα. (Πηγή: GIS KTIMANET 2007-2009).

Η συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων μας, έγινε μελετώντας προγενέστερα δεδομένα προερχόμενα από την δημοσιευμένη εργασία της Paradimitriou *et al.* (2011) στο 12^ο Διεθνές Συνέδριο για τις Περιβαλλοντικές Επιστήμες και την Τεχνολογία και από την μεταπτυχιακή διατριβή του Παπανίκου (2008) η οποία υλοποιήθηκε στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών

του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Έτσι προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα από τρεις εποχικές παρακολουθήσεις στη διάρκεια των ετών 2007, 2010 και 2011.

2.5.2. Διαδικασία Δειγματοληψίας

Η διαδικασία είχε ως σκοπό την εφαρμογή ενός προγράμματος δειγματοληψιών για τον έλεγχο της ποιότητας των επιφανειακών υδάτων της λίμνης Κάρλας με την ανάλυση φυσικοχημικών παραμέτρων. Τα πρότυπα που χρησιμοποιήθηκαν για την σύνταξη της διαδικασίας είναι τα ISO 8466-1, DIN 38402.

Τα νερά στα σημεία της δειγματοληψίας, εμφάνιζαν ικανοποιητική ανάμιξη, δεν παρουσίαζαν έντονους στροβιλισμούς, αλλά παρουσίαζαν σημειακά, έντονη εμφάνιση πράσινης βιομάζας και άνθησης φυτοπλαγκτού. Επιπρόσθετα τα σημεία βρίσκονταν σε απόσταση ενός μέτρου από την όχθη και το βάθος δειγματοληψίας ήταν τα 30 με 40 cm. Γινόταν προσεκτική συλλογή των δειγμάτων έτσι ώστε να αποφεύγεται η συλλογή μαζί με το δείγμα φερτών υλικών (π.χ. φύλλα, ζώφια κλπ.). Οι φιάλες δεν ήταν εντελώς γεμάτες, για να μπορεί να γίνεται ανάδευση του δείγματος.

Ο χρόνος δειγματοληψίας επιλέγονταν με βάση τα ακόλουθα κριτήρια:

- Να μην είχαν προηγηθεί έντονες βροχοπτώσεις ή πλημμύρες,
- Να μην υπήρχε σημαντική θερμοκρασιακή μεταβολή τις τελευταίες δύο μέρες πριν την δειγματοληψία.

Με την συλλογή τους τα δείγματα τοποθετούνταν, αν δεν αναλυόταν άμεσα, στην κατάψυξη.

Η διήθηση των δειγμάτων του νερού γινόταν μέσω φίλτρων τύπου Whatman GF/C 0.45 μm για την απομάκρυνση του σωματιδιακού υλικού από το νερό και την κατακράτηση του σε κωνικές φιάλες γινόταν χωρίς καθυστέρηση στο εργαστήριο.

2.5.3. Ποσοτικός Προσδιορισμός των Παραμέτρων

Η μέτρηση των φυσικοχημικών παραμέτρων (θερμοκρασία, αλατότητα, pH, θολότητα, διαλυμένο οξυγόνο) έγινε στο πεδίο με φορητό όργανο της Horiba (Water quality Checker model U-10). Το Horiba U-10 ελέγχει την ποιότητα του νερού στο πεδίο με επιτόπια μέτρηση (Εικ. 9).



Εικόνα 9: Πολυαισθητήρας Horriba (Water Quality Checker Model U-10)

Είναι εύκολο στη χρήση του, λειτουργεί με ένα μπουτόν που μεταφέρει τον κέρσορα στη παράμετρο του ποιοτικού μεγέθους του νερού που θέλουμε να μετρήσουμε και αυτόματα μας δίνει τη μέτρηση. Έχει την δυνατότητα μέτρησης έξι παραμέτρων όπως: α) Θερμοκρασία, β) pH, γ) διαλυμένο οξυγόνο, δ) ηλεκτρική αγωγιμότητα, ε) θολότητα και στ) αλατότητα.

Το U-10 χαρακτηρίζεται από ισχυρούς αισθητήρες που το καθιστούν ικανό να πάρει ιδιαίτερα αξιόπιστα στοιχεία ποιότητας νερού απλά και γρήγορα(Εικ. 10).

pH: Ο αισθητήρας του pH είναι γυάλινο ηλεκτρόδιο τύπου κασέτας και δεν απαιτεί καμία συντήρηση. Μπορεί πολύ απλά και εύκολα να αντικαθίσταται. Τιμές από 0-14 pH.

Αγωγιμότητα (EC_w – mS/cm): Ο αισθητήρας μέτρησης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας είναι ένα ηλεκτρόδιο ανθεκτικό και δίνει αξιόπιστα και σταθερά στοιχεία ακόμα και σε υψηλές συγκεντρώσεις. Μετρά αυτόματα από 0-1 mS/cm, 1-10 mS/cm και 10-100 mS/cm.

Διαλυμένο οξυγόνο (DO – mg/l): Το οξυγόνο εισέρχεται στην υδάτινη μάζα όπου υπάρχει διεπιφάνεια αέρα νερού και απομακρύνεται με βιολογικές αερόβιες διεργασίες. Απαιτεί τακτική συντήρηση έτσι ώστε να ρυθμίζεται το όργανο και οι μετρήσεις να αντιπροσωπεύουν τις πραγματικές τιμές. Εύρος τιμών από 0-20 mg/l.



Εικόνα 10: Αισθητήρες μέτρησης φυσικοχημικών παραμέτρων.

Θολερότητα (Turbidity – NTU): Ο αισθητήρας είναι απρόσβλητο ηλεκτρόδιο. Η Θολερότητα σχετίζεται με την ποσότητα των αιωρούμενων στερεών που προκαλούν σκέδαση των ακτινών μιας διερχόμενης δέσμης φωτός και δίνουν στο νερό νεφελώδη

όψη. Η μονάδα μέτρησης της θολερότητας είναι το NTU (Nephelometric Turbidity Units – NTU).

Θερμοκρασία νερού (T – °C): Θερμική αντίσταση. Μπορεί να μετρήσει από 0-50 °C. Χρησιμοποιείται και αυτό αυτοματοποιημένα όπως οι μετρήσεις του pH και της αγωγιμότητας.

Αλατότητα (Salinity – ‰): Η συνολική ποσότητα των διαλυμένων ουσιών και υπολογίζεται από την αγωγιμότητα. Το εύρος μέτρησης είναι από 0 έως 40 ‰.

Για τον ποσοτικό προσδιορισμό της περιεκτικότητας των δειγμάτων σε νιτρικά ($\text{NO}_3\text{-N}$), νιτρώδη ($\text{NO}_2\text{-N}$), αμμωνιακά ιόντα ($\text{NH}_4\text{-N}$) καθώς και σε ορθοφωσφορικά ιόντα ($\text{PO}_4\text{-P}$), πραγματοποιήθηκε με φασματοφωτόμετρο τύπου Spectroquant Merck με αντιδραστήρια της ίδιας εταιρίας Merck KGaA σύμφωνα με τις προδιαγραφές της (Spectroquant Test: 1.09713.0001, 1.14848.0001, 1.14776.0001, 1.14752.0001). Ο προσδιορισμός της χλωροφύλλης (Chla) έγινε με φασματοφωτόμετρο τύπου UV-Visible.

Ο προσδιορισμός των νιτρικών ιόντων ($\text{NO}_3\text{-N}$) έγινε με την μέθοδο αναγωγής καδμίου, των νιτρωδών ιόντων με την μέθοδο σουλφανιλικού οξέος ($\text{NO}_2\text{-N}$), των αμμωνιακών ιόντων ($\text{NH}_4\text{-N}$) με τη μέθοδο Nessler και ο προσδιορισμός των ορθοφωσφορικών ιόντων ($\text{PO}_4\text{-P}$) έγινε με την μέθοδο του ασκορβικού οξέος. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων εκφράστηκαν σε mg/l.

Ο προσδιορισμός της χλωροφύλλης (Chl-a), έγινε με βάση την παρακάτω διαδικασία. Σε ηθμό Buchner υπό κενό, διηθήθηκαν 300 ml δείγματος σε φίλτρο Whatman GF/C 0,45 μm . Στα τελευταία 100 ml προστέθηκε στο δείγμα 1 ml υπέρκορου διαλύματος MgCO_3 . Στην συνέχεια, έγινε αφαίρεση του φίλτρου από τον ηθμό και τοποθέτηση του σε δοκιμαστικό σωλήνα διπλωμένο. Τέλος, προστέθηκαν 10

ml Ακετονικού διαλύματος και τοποθετήθηκε στο ψυγείο για 18 ώρες. Η διαδικασία για τον προσδιορισμό της χλωροφύλλης ολοκληρώθηκε με μέτρηση της απορρόφησης της σε τέσσερα διαφορετικά μήκη κύματος $\lambda = 630, 647, 664$ και 750 nm , μηδενίζοντας το φασματοφωτόμετρο με ακετονικό διάλυμα ως τυφλό. Ο υπολογισμός της χλωροφύλλης έγινε με την βοήθεια της παρακάτω εξίσωσης:

$$\text{Ca}(\text{mg/l}) = 11,85(\text{OD}664) - 1,54(\text{OD}647) - 0,08(\text{OD}630) \quad (1)$$

Όπου: $\text{OD}664 = \text{measured OD}664 - \text{measured OD}750$

$\text{OD}647 = \text{measured OD}647 - \text{measured OD}750$

$\text{OD}630 = \text{measured OD}630 - \text{measured OD}750$

Χρησιμοποιώντας τον παρακάτω τύπο έχουμε:

$$\text{Chl} - a = \text{Ca} * \text{Vextr} / \text{Vsample} \quad (2)$$

Όπου: $\text{Vextr} = 10\text{ml}$

$\text{Vsample} = \text{ο όγκος που διηθήθηκε σε } \text{m}^3$

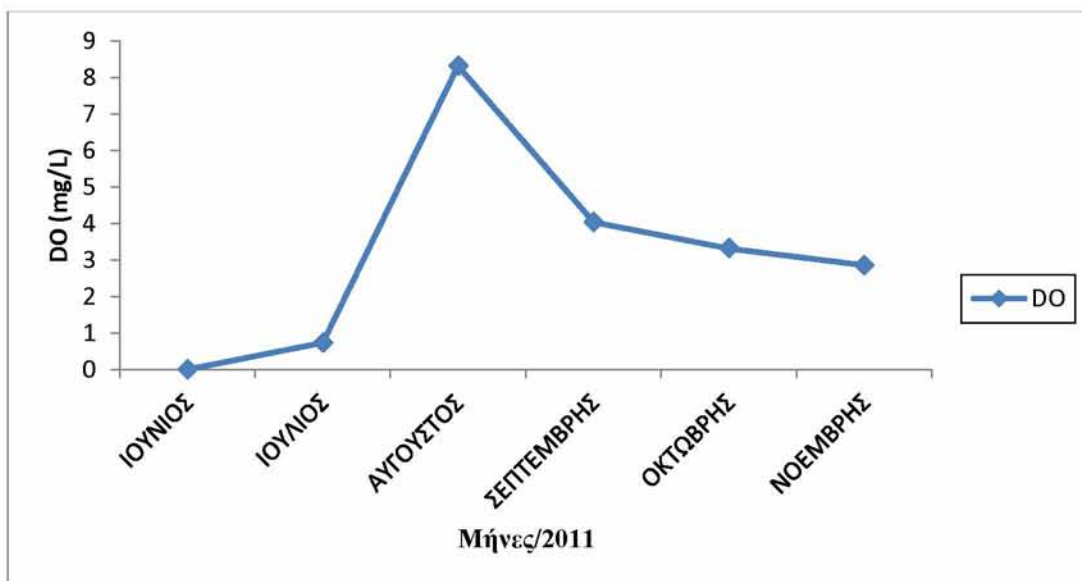
Η μονάδα μέτρησης είναι mg/m^3 .

Οι παραπάνω μέθοδοι προσδιορισμού που υποστηρίζονται με την χρήση του φασματοφωτομέτρου, συγκαταλέγονται στις εγκεκριμένες μεθόδους ανάλυσης APHA *et al.* (2000).

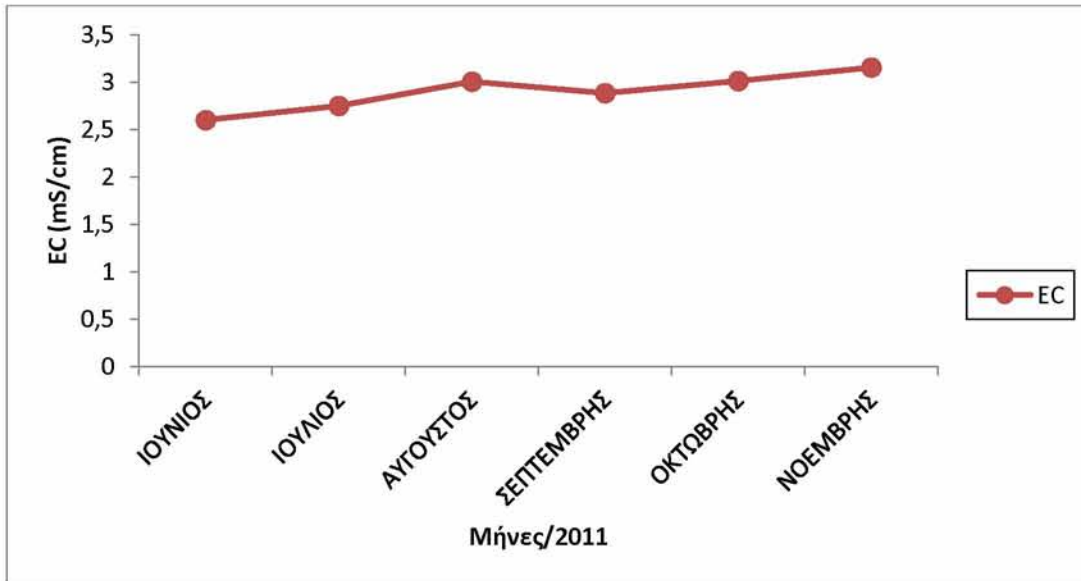
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1. Γραφήματα των Παραμέτρων

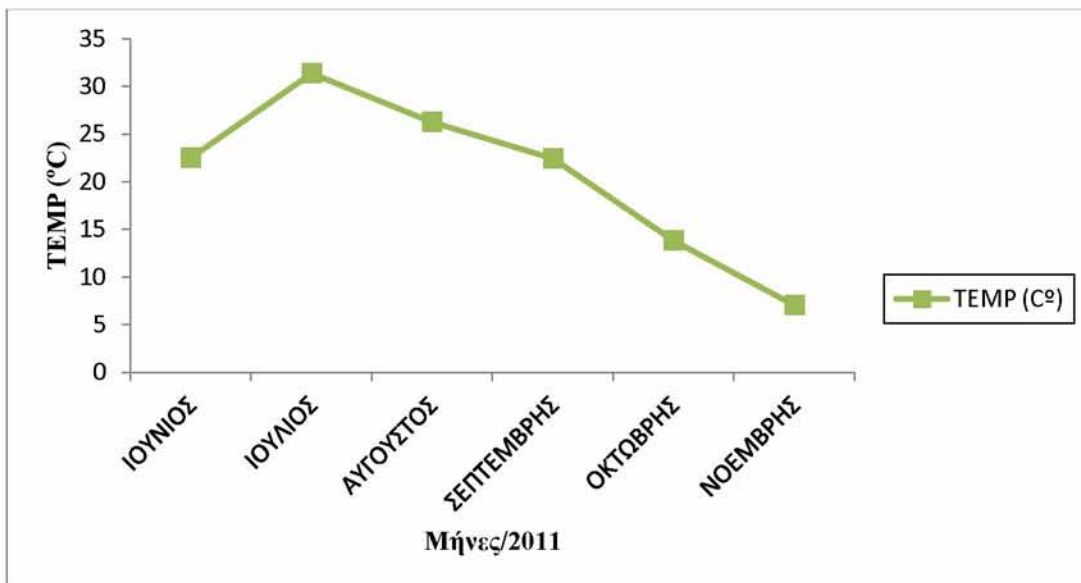
Παρακάτω παρουσιάζονται τα γραφήματα των μέσων τιμών των φυσικοχημικών παραμέτρων που μετρήθηκαν στους σταθμούς δειγματοληψίας από τον Ιούνιο του 2011 μέχρι τον Νοέμβρη του 2011.



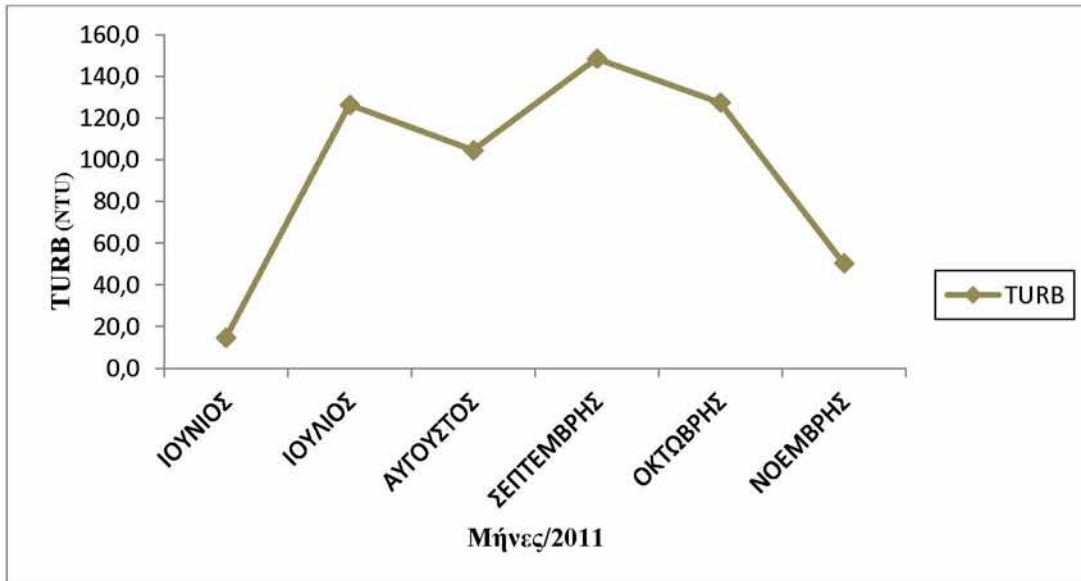
Εικόνα 11: Γράφημα μέσης τιμής διακύμανσης του Διαλυμένου Οξυγόνου (DO) κατά την διάρκεια των μηνών Ιουνίου – Νοεμβρίου 2011.



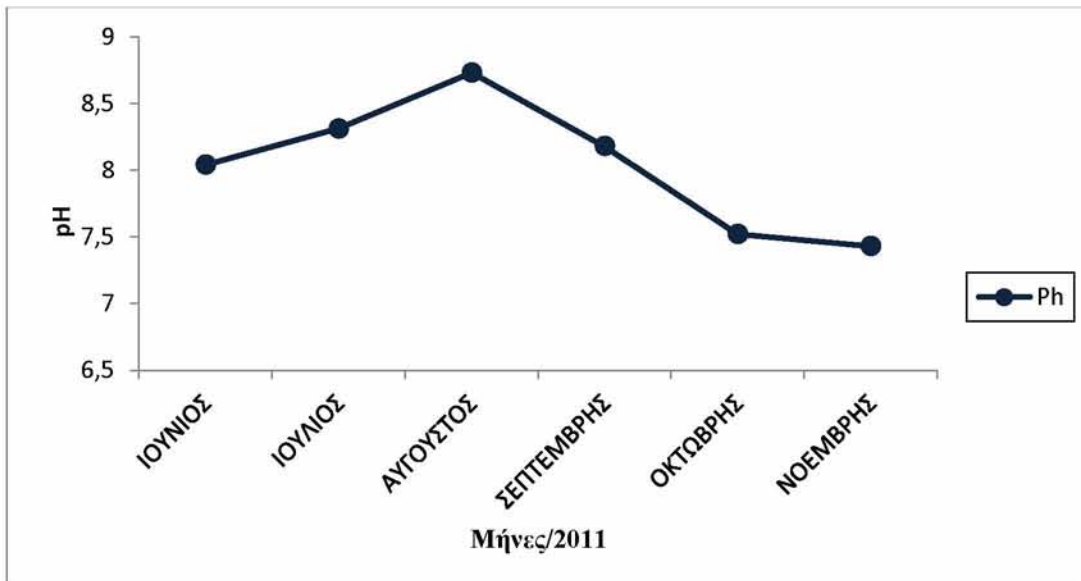
Εικόνα 12: Γράφημα μέσης τιμής διακύμανσης της Αγωγιμότητας (EC) κατά την διάρκεια των μηνών Ιουνίου – Νοεμβρίου 2011.



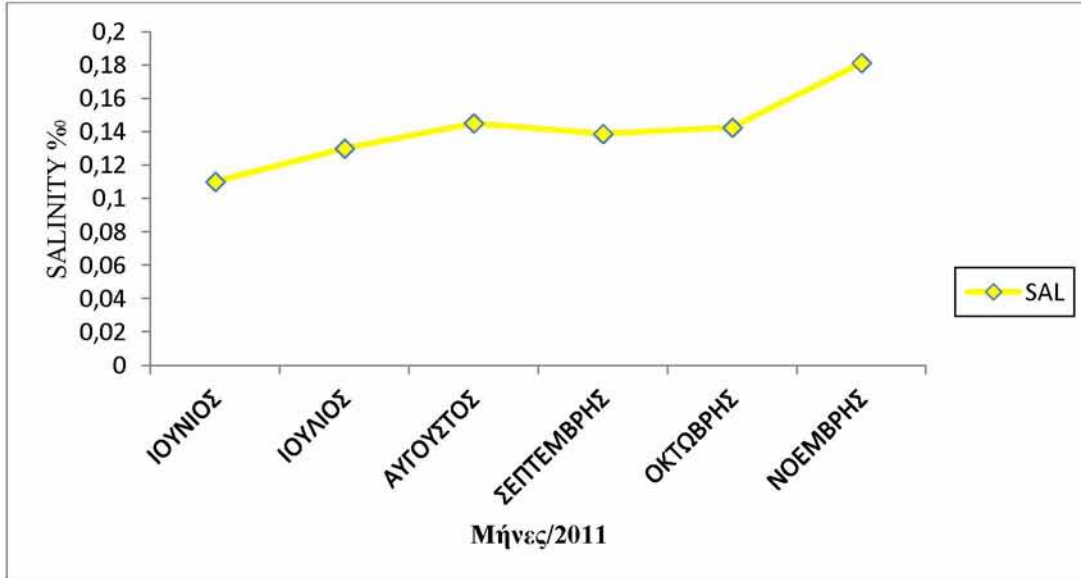
Εικόνα 13: Γράφημα μέσης τιμής διακύμανσης της Θερμοκρασίας (°C) κατά την διάρκεια των μηνών Ιουνίου – Νοεμβρίου 2011.



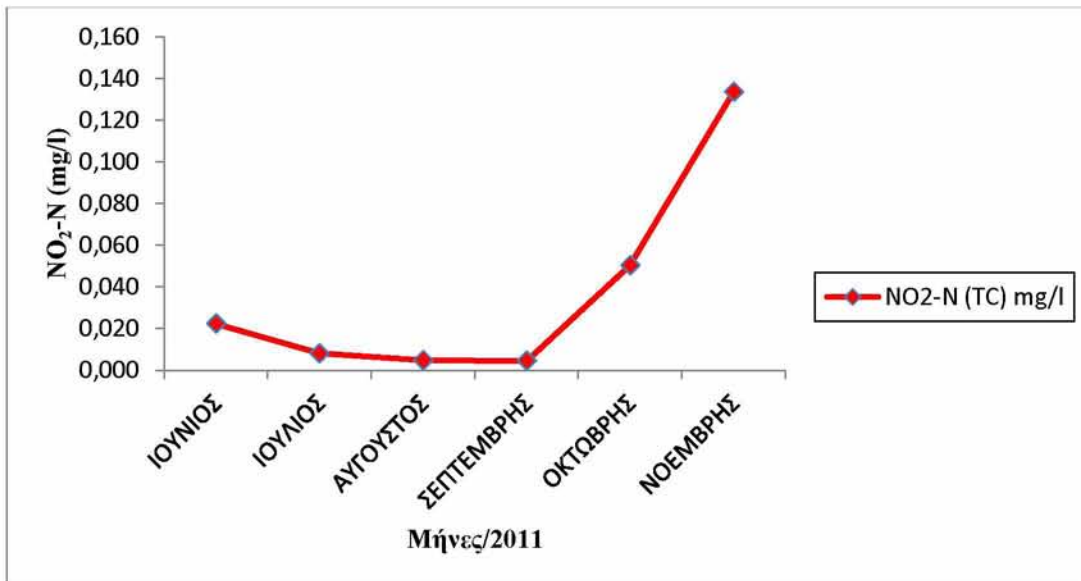
Εικόνα 14: Γράφημα διακύμανσης της μέσης τιμής της Θολερότητας κατά την διάρκεια των μηνών Ιουνίου – Νοεμβρίου 2011.



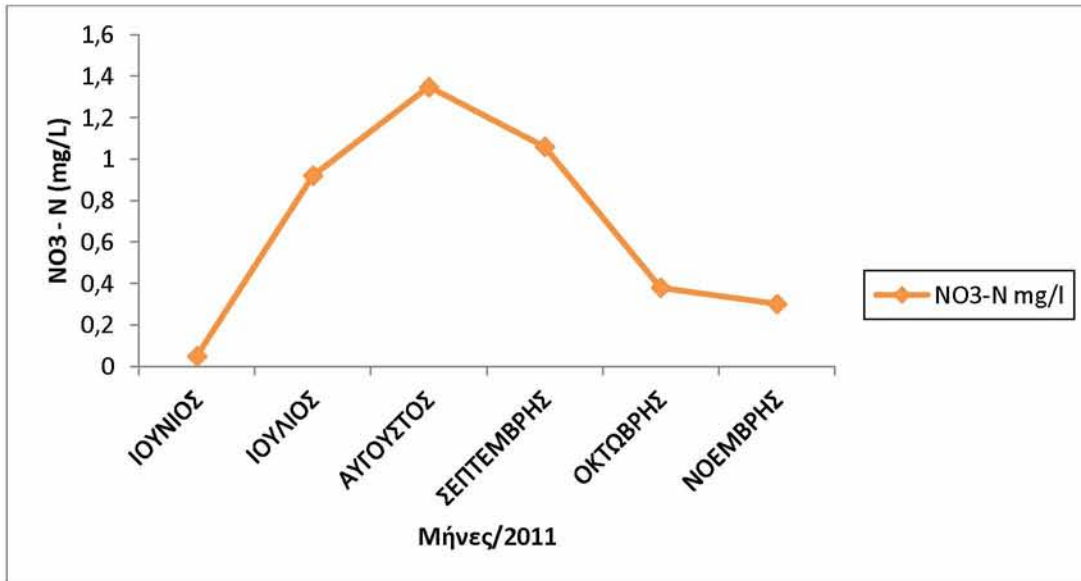
Εικόνα 15: Γράφημα μέσης τιμής διακύμανσης του Ph κατά την διάρκεια των μηνών Ιουνίου – Νοεμβρίου 2011.



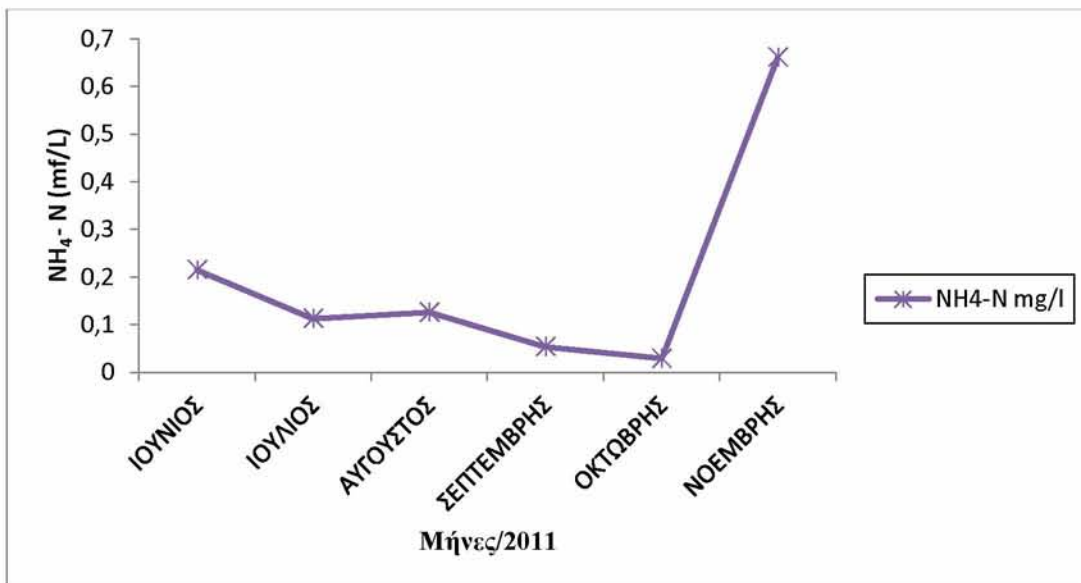
Εικόνα 16: Γράφημα μέσης τιμής διακύμανσης της αλατότητας (SAL) κατά την διάρκεια των μηνών Ιουνίου – Νοεμβρίου 2011.



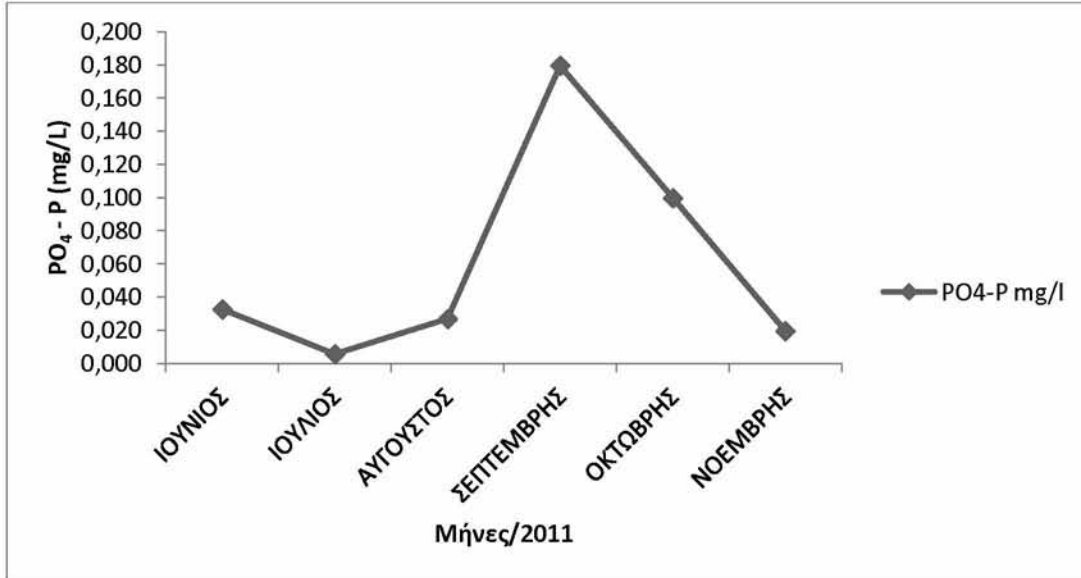
Εικόνα 17: Γράφημα μέσης τιμής διακύμανσης των νιτρικών ιόντων (NO₂-N mg/l) κατά την διάρκεια των μηνών Ιουνίου – Νοεμβρίου 2011.



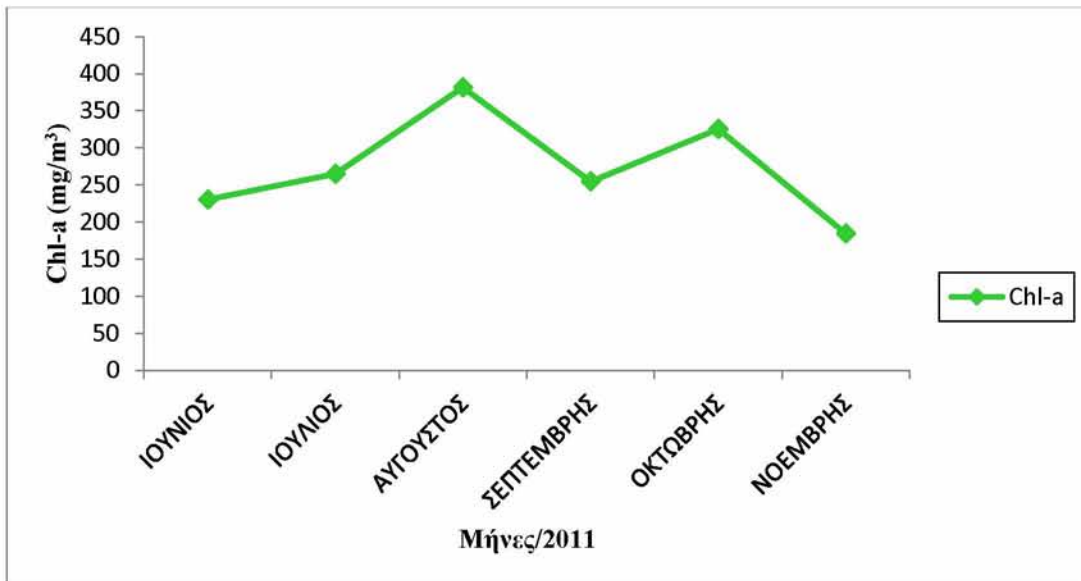
Εικόνα 18: Γράφημα μέσης τιμής διακύμανσης των νιτρικών ιόντων (NO₃-N mg/l) κατά την διάρκεια των μηνών Ιουνίου – Νοεμβρίου 2011.



Εικόνα 19: Γράφημα διακύμανσης της μέσης τιμής των αμμωνιακών ιόντων (NH₄-N) κατά την διάρκεια των μηνών Ιουνίου – Νοεμβρίου 2011.

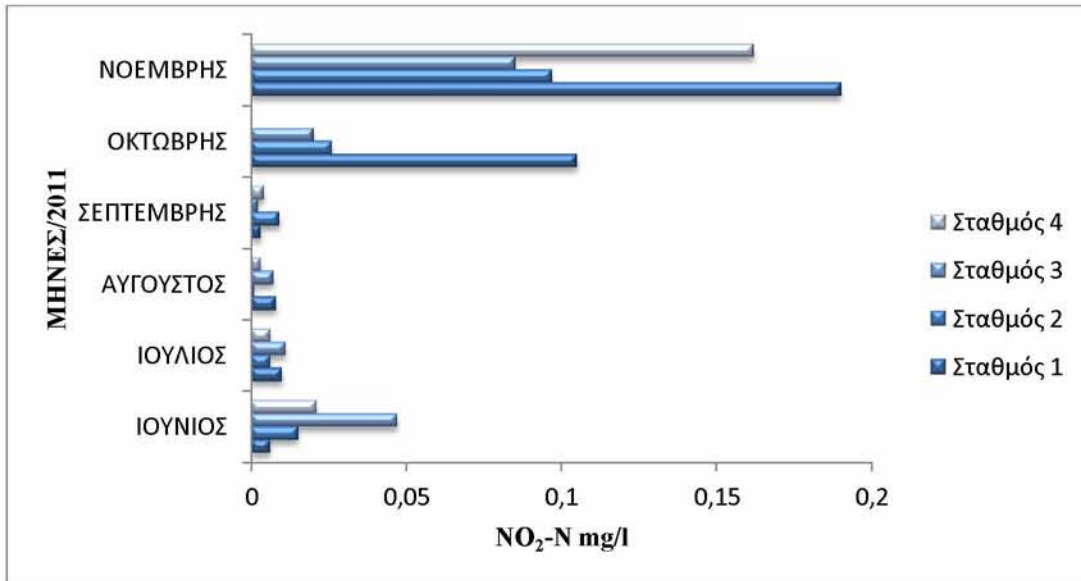


Εικόνα 20: Γράφημα διακύμανσης της μέσης τιμής των ορθοφωσφορικών ιόντων (PO₄-P) κατά την διάρκεια των μηνών Ιουνίου – Νοεμβρίου 2011.

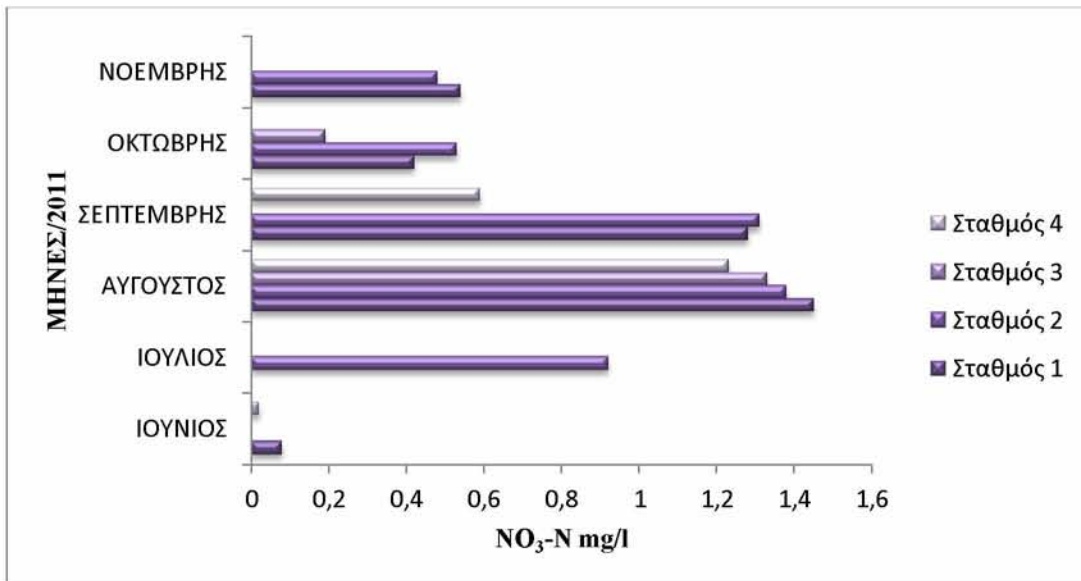


Εικόνα 21: Γράφημα διακύμανσης της μέσης τιμής της χλωροφύλλης (Chl-a) κατά την διάρκεια των μηνών Ιουνίου – Νοεμβρίου 2011.

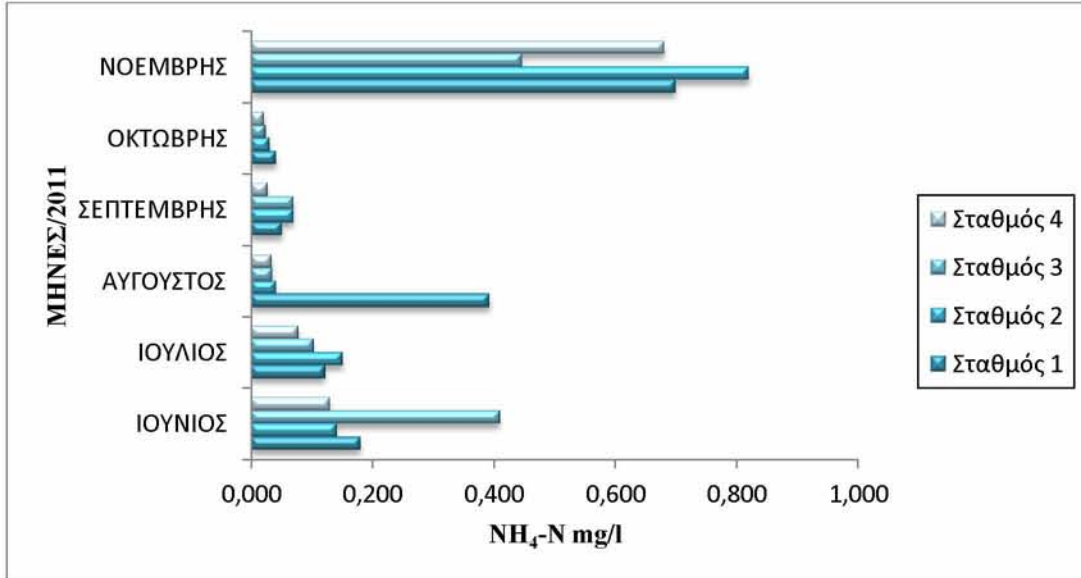
Στην συνέχεια εμφανίζονται γραφικά τα συγκριτικά αποτελέσματα της εποχικής παρακολούθησης από τον Ιούνιο έως τον Νοέμβριο του 2011 και για τους τέσσερις σταθμούς δειγματοληψίας.



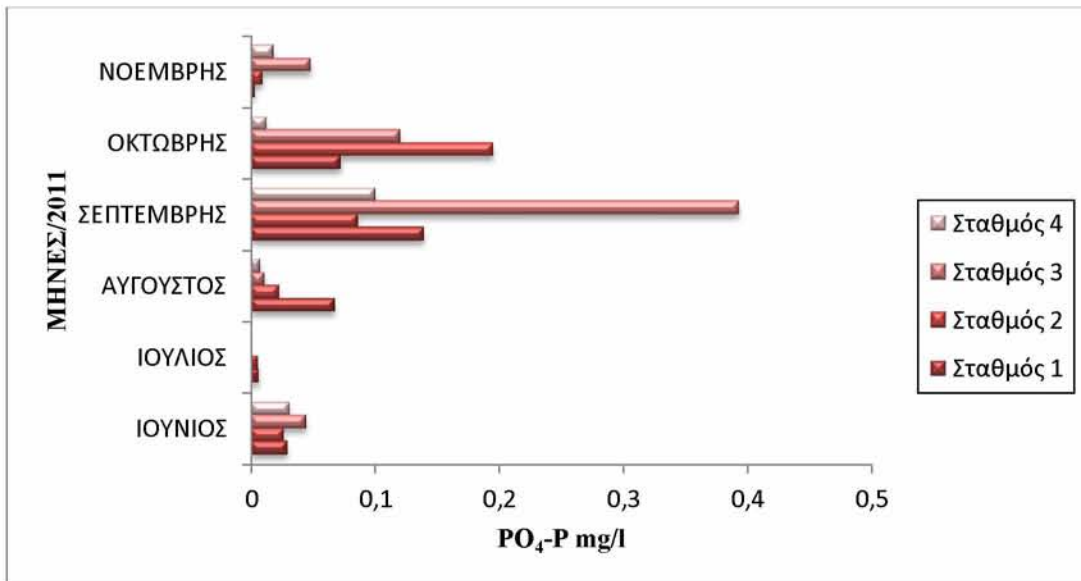
Εικόνα 22: Εποχική διακύμανση των νιτρωδών ιόντων ($\text{NO}_2 - \text{N}$) από τον μήνα Ιούνιο μέχρι τον Νοέμβρη του 2011.



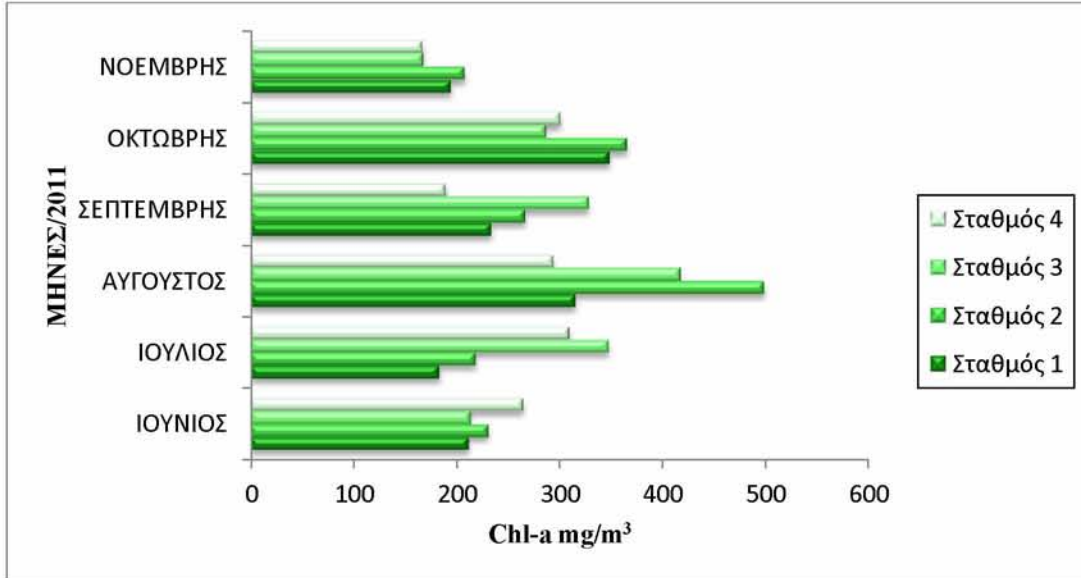
Εικόνα 23: Εποχική διακύμανση των νιτρικών ιόντων ($\text{NO}_3 - \text{N}$) από τον μήνα Ιούνιο μέχρι τον Νοέμβρη του 2011.



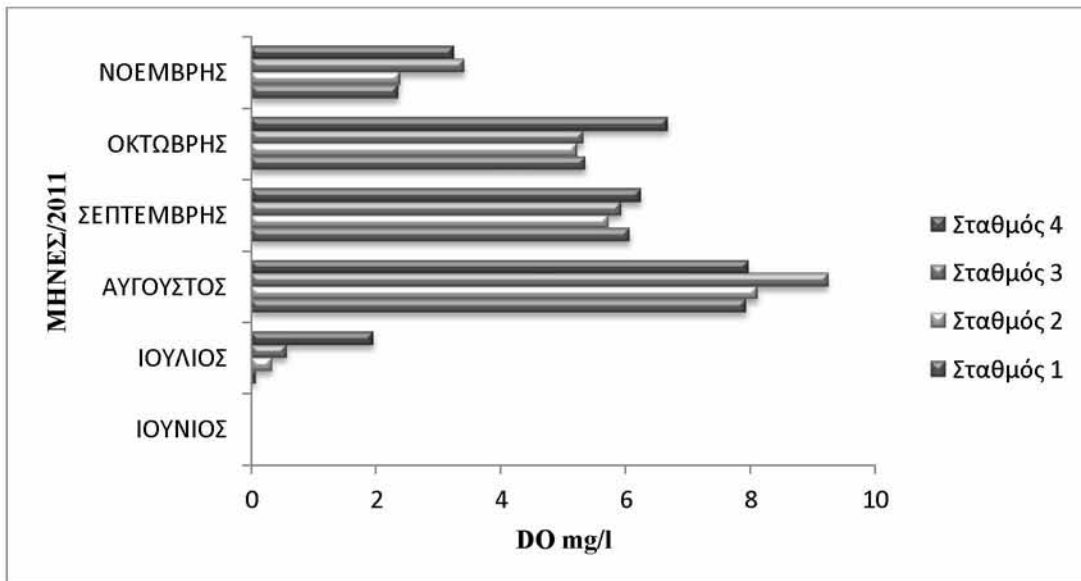
Εικόνα 24: Εποχική διακύμανση των αμμωνιακών ιόντων ($\text{NH}_4 - \text{N}$) από τον μήνα Ιούνιο μέχρι τον Νοέμβρη του 2011.



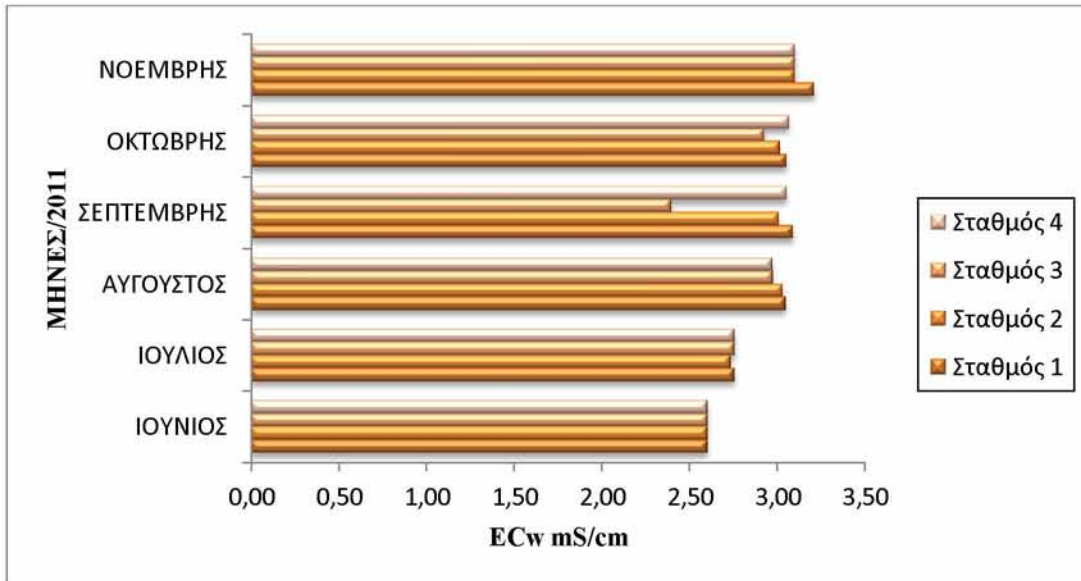
Εικόνα 25: Εποχική διακύμανση των ορθοφωσφορικών ιόντων ($\text{PO}_4 - \text{P}$) από τον μήνα Ιούνιο μέχρι και τον Νοέμβρη του 2011.



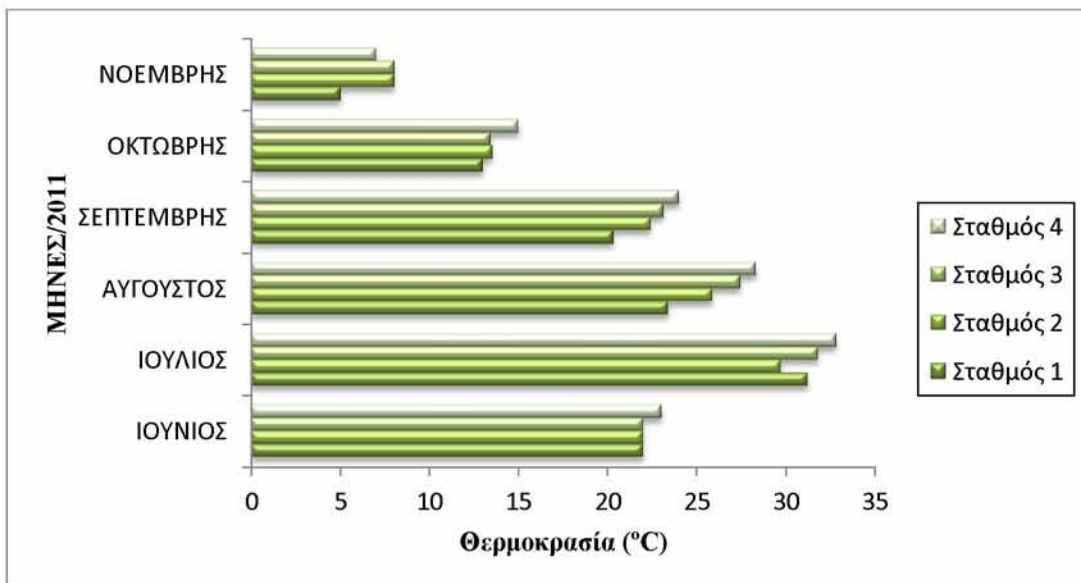
Εικόνα 26: Εποχική διακύμανση της χλωροφύλλης – α (Chl-a) από τον μήνα Ιούνιο μέχρι και τον Νοέμβρη του 2011.



Εικόνα 27: Εποχική διακύμανση του διαλυμένου οξυγόνου (DO) από τον μήνα Ιούνιο μέχρι και τον Νοέμβρη του 2011.



Εικόνα 28: Εποχική διακύμανση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (ECw) από τον μήνα Ιούνιο μέχρι και τον Νοέμβρη του 2011.



Εικόνα 29: Εποχική διακύμανση της Θερμοκρασίας (°C) από τον μήνα Ιούνιο μέχρι και τον Νοέμβρη του 2011.

3.2. Δισδιάστατα Διαγράμματα Χωρικής Παρεμβολής με GIS

Για τον προσδιορισμό της χωρικής κατανομής των παραμέτρων της ποιότητας των υδάτων για την λίμνη Κάρλα, επιλέχθηκαν δύο προσδιοριστικοί αλγόριθμοι παρεμβολής, οι οποίοι αναλυτικά έχουν ως εξής:

A) **Ο αλγόριθμος “Splines” (Παρεμβολή Σπληνών):** Είναι ένας αλγόριθμος με τον οποίο παρεμβάλλεται μια επιφάνεια ελάχιστης κυρτότητας μέσω των σημείων παρεμβολής. Αυτό γίνεται με την προσαρμογή τοπικών πολυωνυμικών εκφράσεων παρεμβολής μικρού βαθμού σε ένα συγκεκριμένο αριθμό κοντινών σημείων παρεμβολής οι οποίες διέρχονται από τα σημεία δειγματοληψίας. Η μέθοδος δίνει καλύτερα αποτελέσματα για τις επιφάνειες με ήπια κλίση του μεγέθους στο οποίο αναφέρονται, όπως το ύψος στάθμης του νερού, ή οι συγκεντρώσεις ρύπανσης. Δεν είναι κατάλληλη εάν υπάρχουν μεγάλες διακυμάνσεις της κλίσης των μεγεθών, επειδή δεν μπορεί να υπερανυψώσει τις υπολογισμένες τιμές (Matzafleri *et al.* 2009).

B) **Ο αλγόριθμος “IDW” (Αντιστρόφου Βαρόνουσας Απόστασης):** Σύμφωνα με τον αλγόριθμο αυτό, για την υπό μελέτη περιοχή κατασκευάζεται ένας κανάβος, όπου για κάθε σημείο του γίνεται μια τοπική εκτίμηση βασισμένη στα γειτονικά σημεία δειγματοληψίας. Η συλλογή των παρεμβλημένων τιμών του κανάβου δημιουργεί μια εκτίμηση της χωρικής κατανομής των τιμών. Ο απλούστερος τρόπος για την επιλογή των σημείων δειγματοληψίας που θα χρησιμοποιηθούν στην παρεμβολή, είναι να συμπεριληφθούν όλα τα σημεία στην παρεμβολή των σημείων τομής του κανάβου. Η μέθοδος είναι ανεξάρτητη από τον αριθμό των επιλεγμένων σημείων δειγματοληψίας και η παρεμβολή γίνεται με βάση τη σχέση (Childs 2004):

$$f(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n w(d_i) \cdot z_i}{\sum_{i=1}^n w(d_i)} \quad (4)$$

Όπου,

$f(x,y)$ η προσομοιωμένη τιμή της υπό εξέταση παραμέτρου στο σημείο (x,y) ,

$w(d_i)$ η συνάρτηση βάρους,

z_i η μετρημένη τιμή της παραμέτρου στο σημείο i ,

d_i η απόσταση του σημείου i από το σημείο (x,y) .

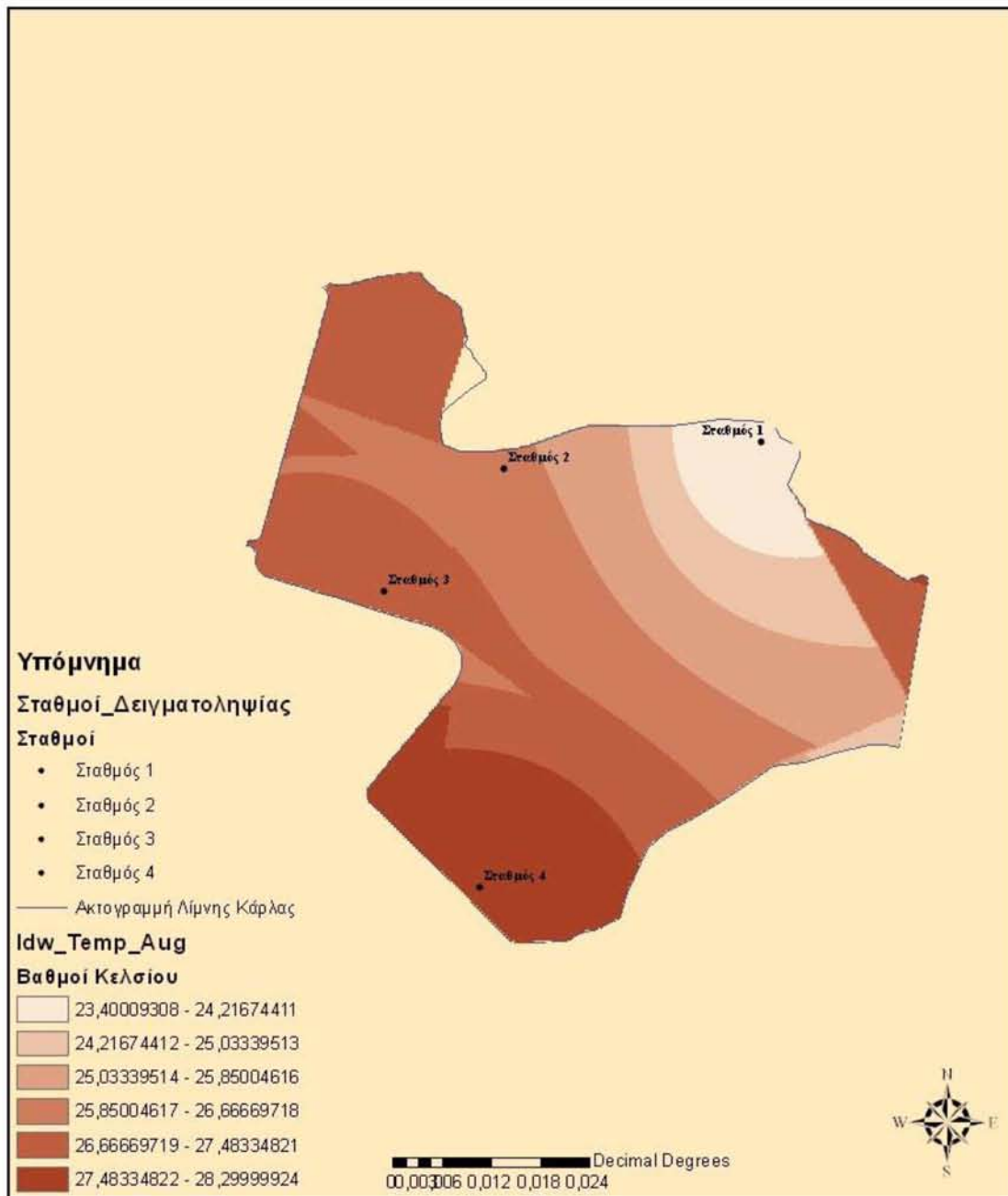
Η τιμή του εκθέτη λαμβάνεται συνήθως 1 ή 2 (Κίτσιου 2005), ενώ για την περίπτωση της λίμνης της Κάρλας, χρησιμοποιήθηκε ο συντελεστής 2.

Το δίκτυο των θέσεων δειγματοληψίας αποτελούνταν από 4 σημεία την περίοδο Ιουνίου – Νοεμβρίου του 2011. Οι συντεταγμένες των θέσεων αυτών, έχουν βρεθεί με την βοήθεια του Παγκόσμιου Συστήματος Προσδιορισμού Θέσης (GPS – Global Position System) σύμφωνα με το Εθνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987 (ΕΓΣΑ '87). Οι συντεταγμένες των σημείων δίνονται στον Πίνακα 5 που ακολουθεί:

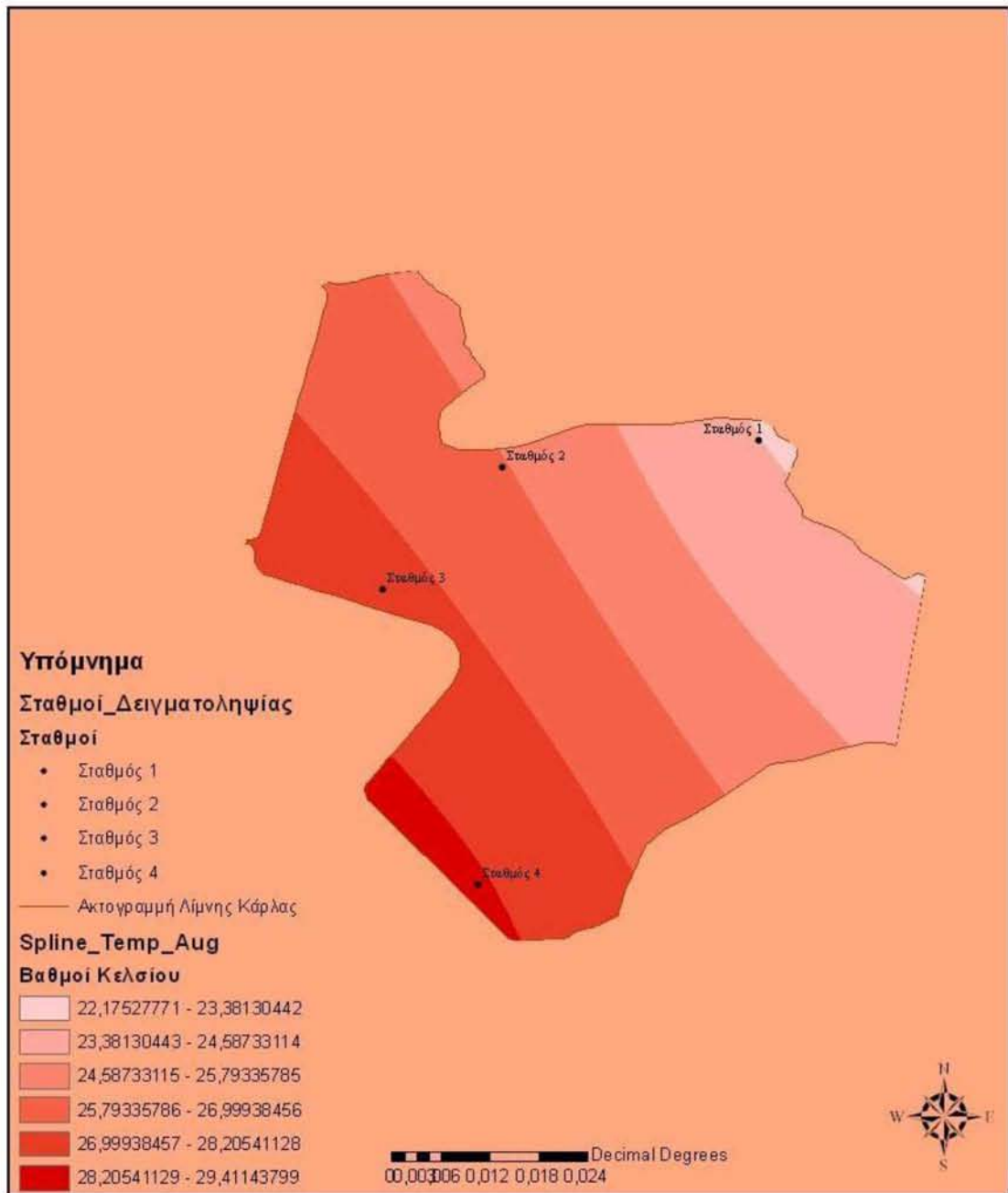
Πίνακας 5: Οι συντεταγμένες των σημείων δειγματοληψίας στο σύστημα ΕΓΣΑ '87.

Σημεία Δειγματοληψίας	Συντεταγμένες	
	X	Y
Σταθμός 1	39,511	22,843
Σταθμός 2	39,508	22,812
Σταθμός 3	39,493	22,797
Σταθμός 4	39,457	22,809

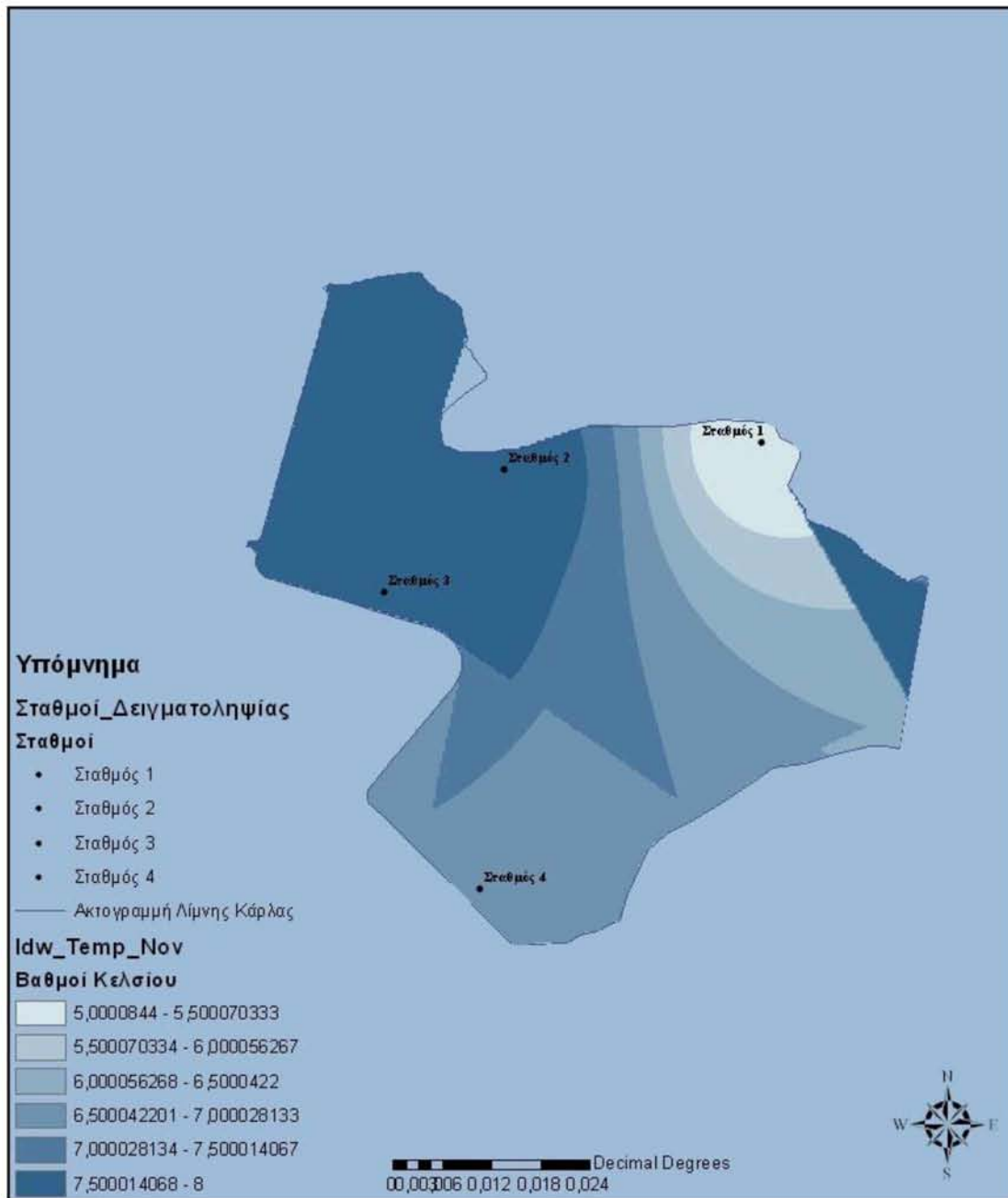
Στην συνέχεια παρατίθενται οι χάρτες κλίμακας 1: 50.000 που προκύπτουν από την εφαρμογή των μεθόδων IDW και Splines για τους μήνες Αύγουστο και Νοέμβρη του 2011. Συγκριτικά η μέθοδος Splines αποδεικνύεται ως η πιο κατάλληλη σε σχέση με την μέθοδο IDW όπως αναλυτικά θα εξηγηθεί στην συνέχεια.



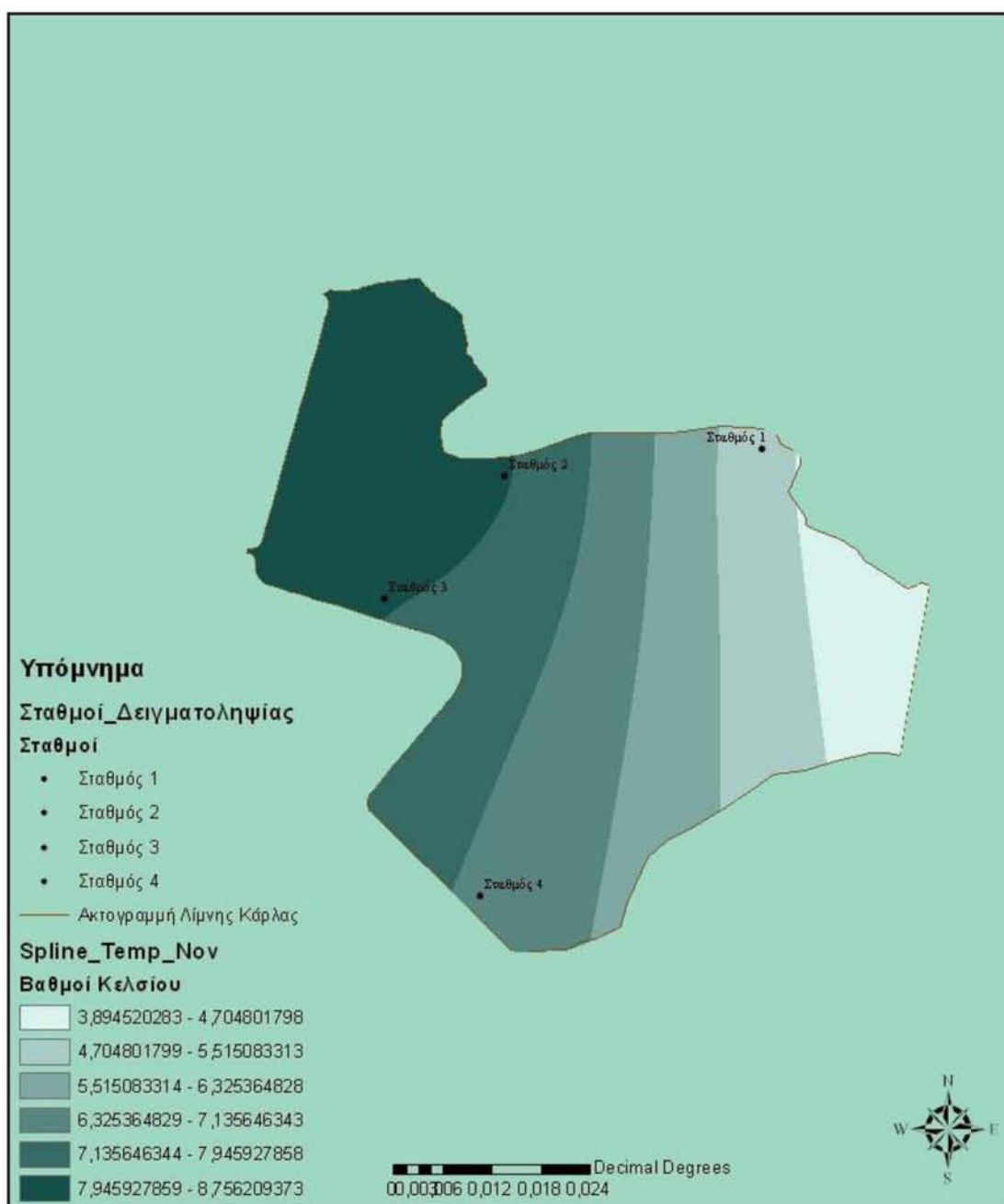
Εικόνα 44: Χάρτης επιφανειακής Θερμοκρασίας για το μήνα Αύγουστο του 2011 με την μέθοδο IDW.



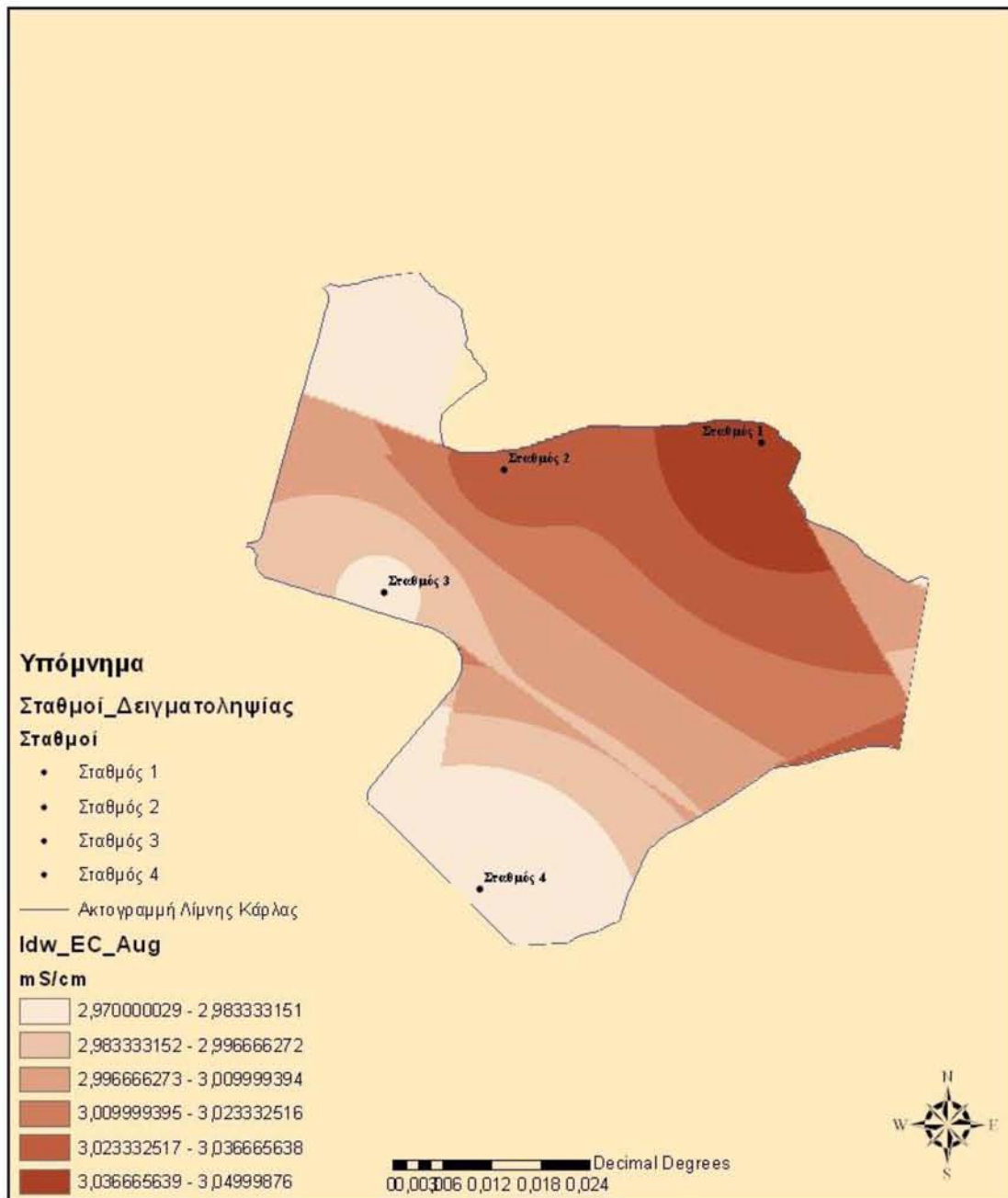
Εικόνα 45: Χάρτης επιφανειακής Θερμοκρασίας για το μήνα Αύγουστο του 2011 με την μέθοδο Splines



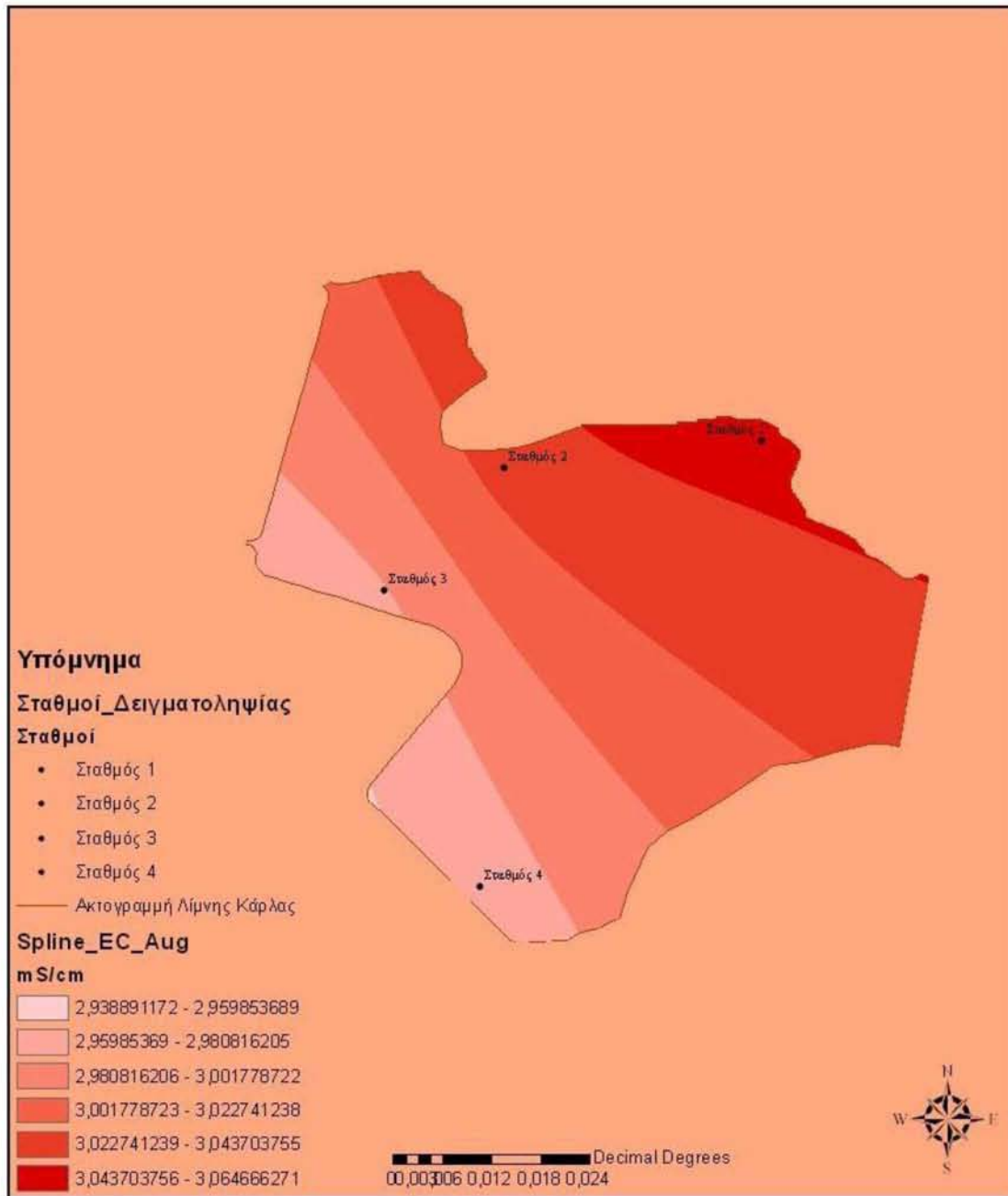
Εικόνα 46: Χάρτης επιφανειακής Θερμοκρασίας για το μήνα Νοέμβρη του 2011 με την μέθοδο IDW



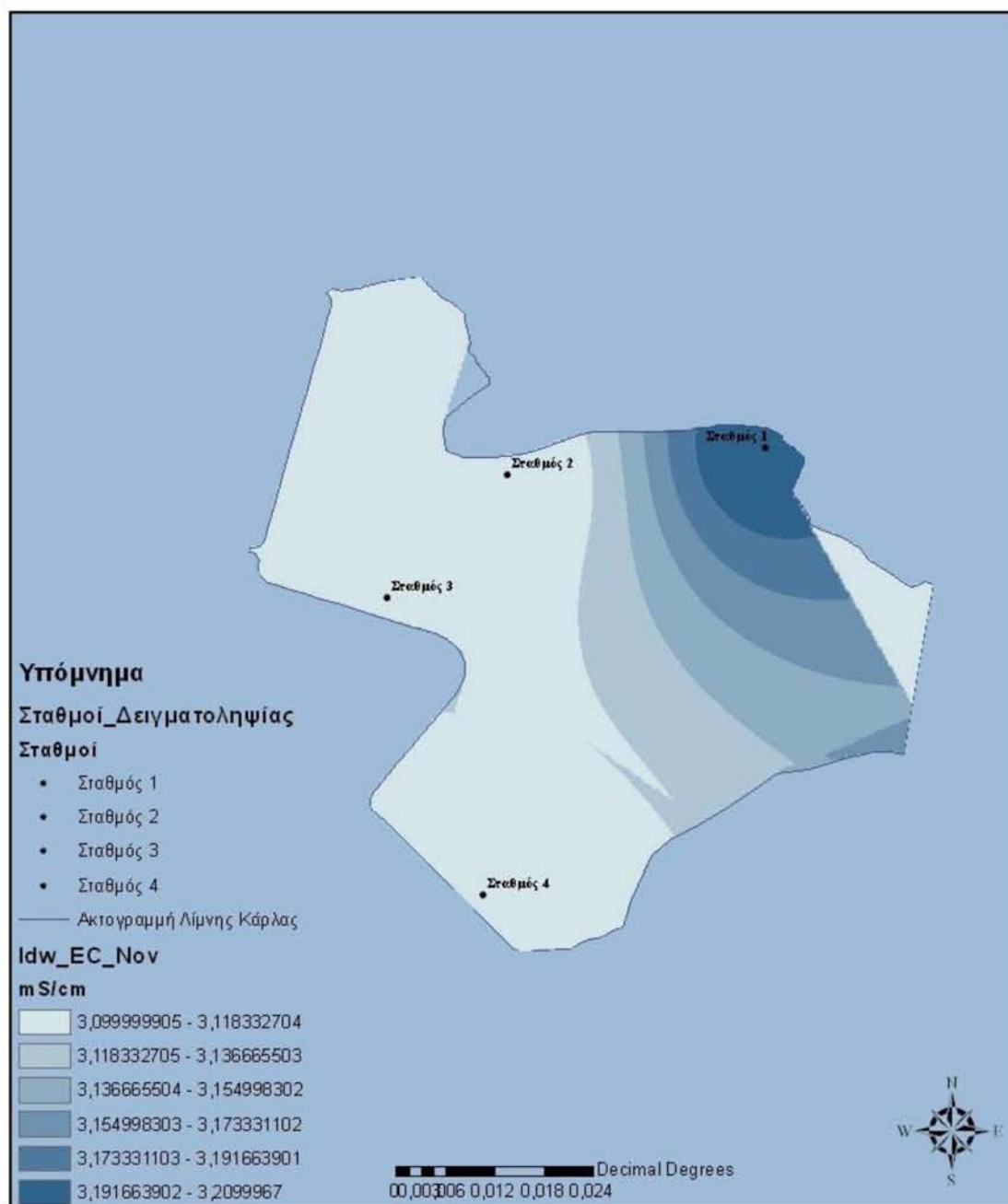
Εικόνα 47: Χάρτης επιφανειακής Θερμοκρασίας για το μήνα Νοέμβρη του 2011 με την μέθοδο Splines



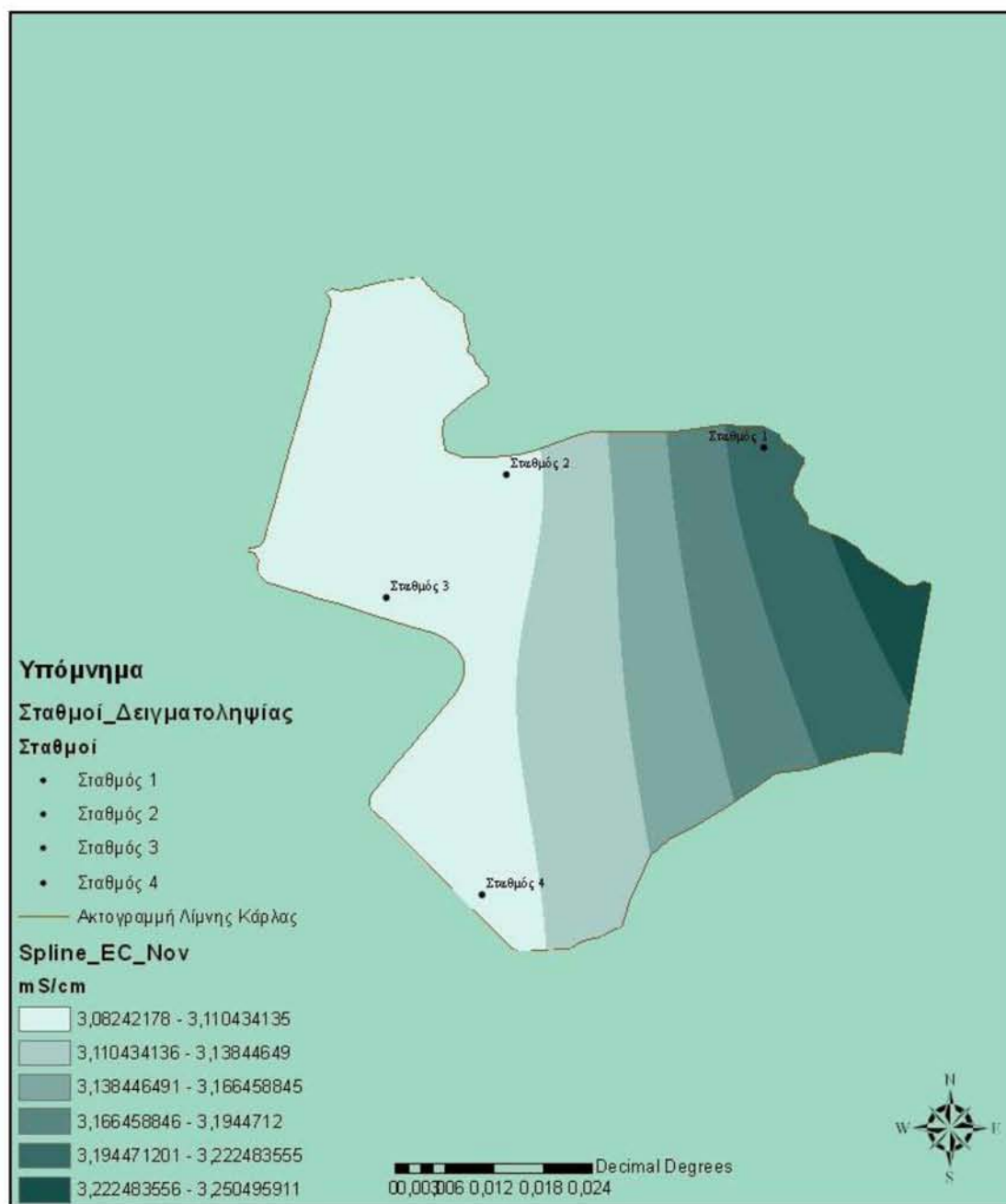
Εικόνα 48: Χάρτης Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας για το μήνα Αύγουστο του 2011 με τη μέθοδο IDW



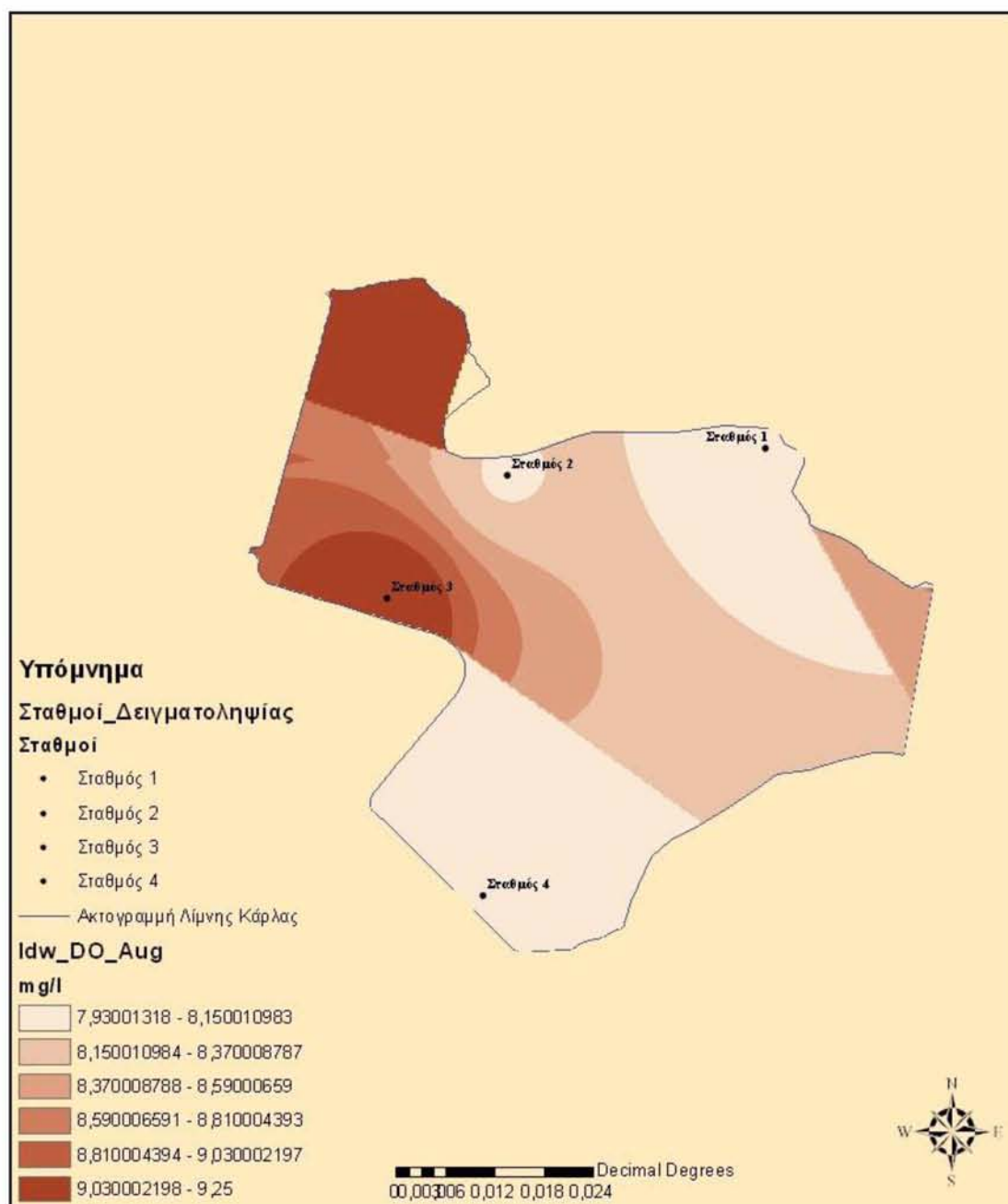
Εικόνα 49: Χάρτης Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας για το μήνα Αύγουστο του 2011 με τη μέθοδο Splines



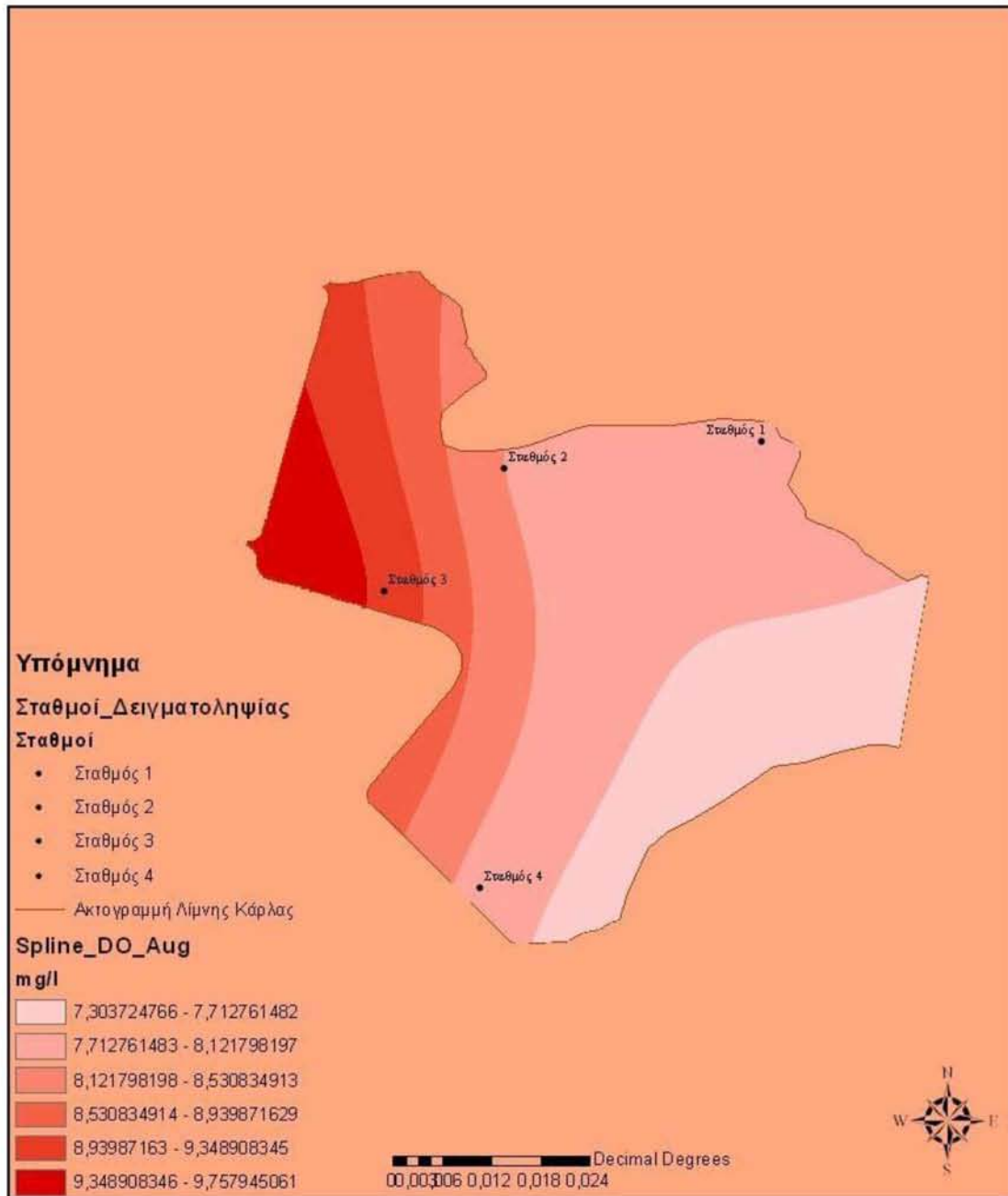
Εικόνα 50: Χάρτης Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας για το μήνα Νοέμβρη του 2011 με τη μέθοδο IDW



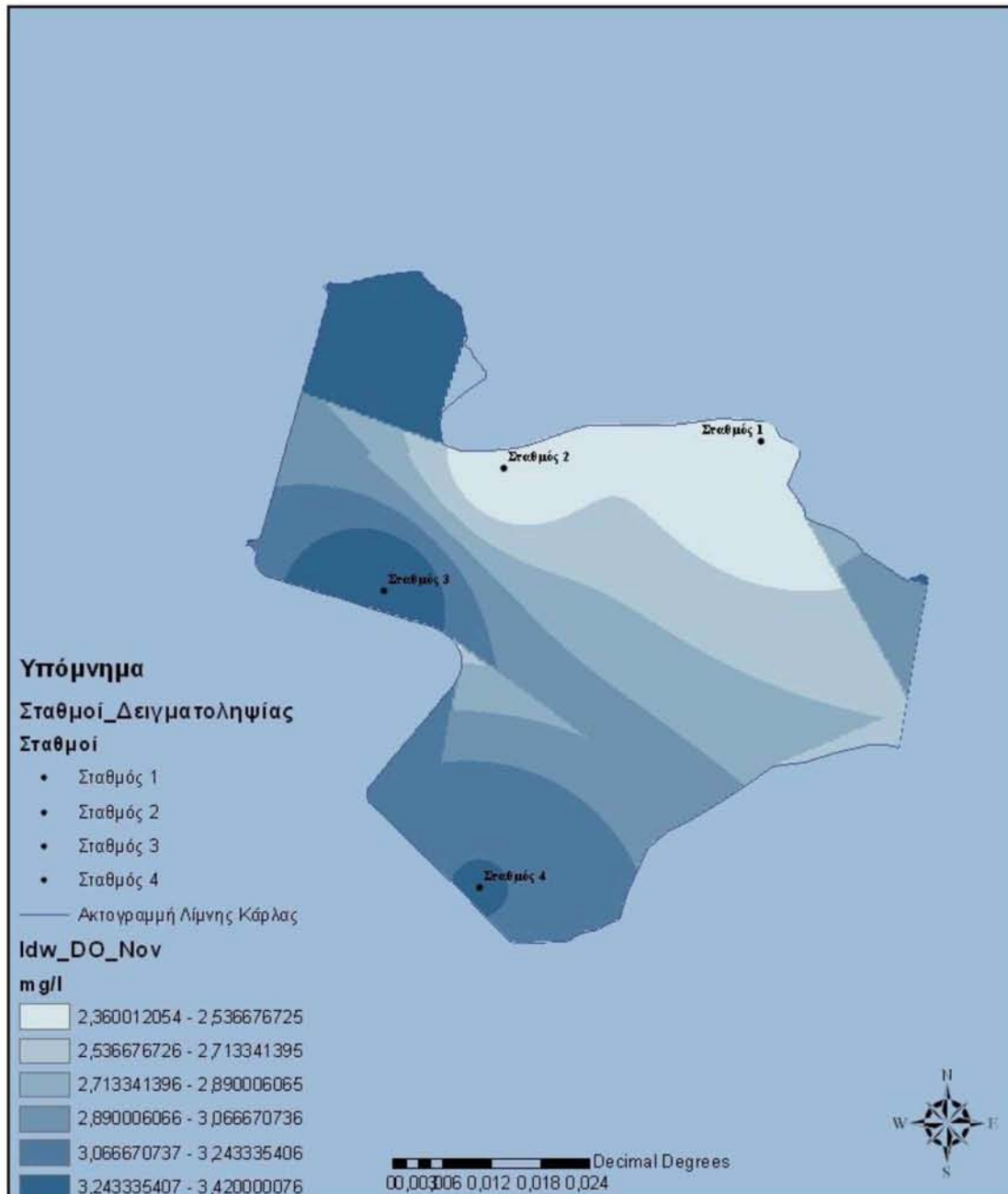
Εικόνα 51: Χάρτης Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας για το μήνα Νοέμβρη του 2011 με τη μέθοδο Splines



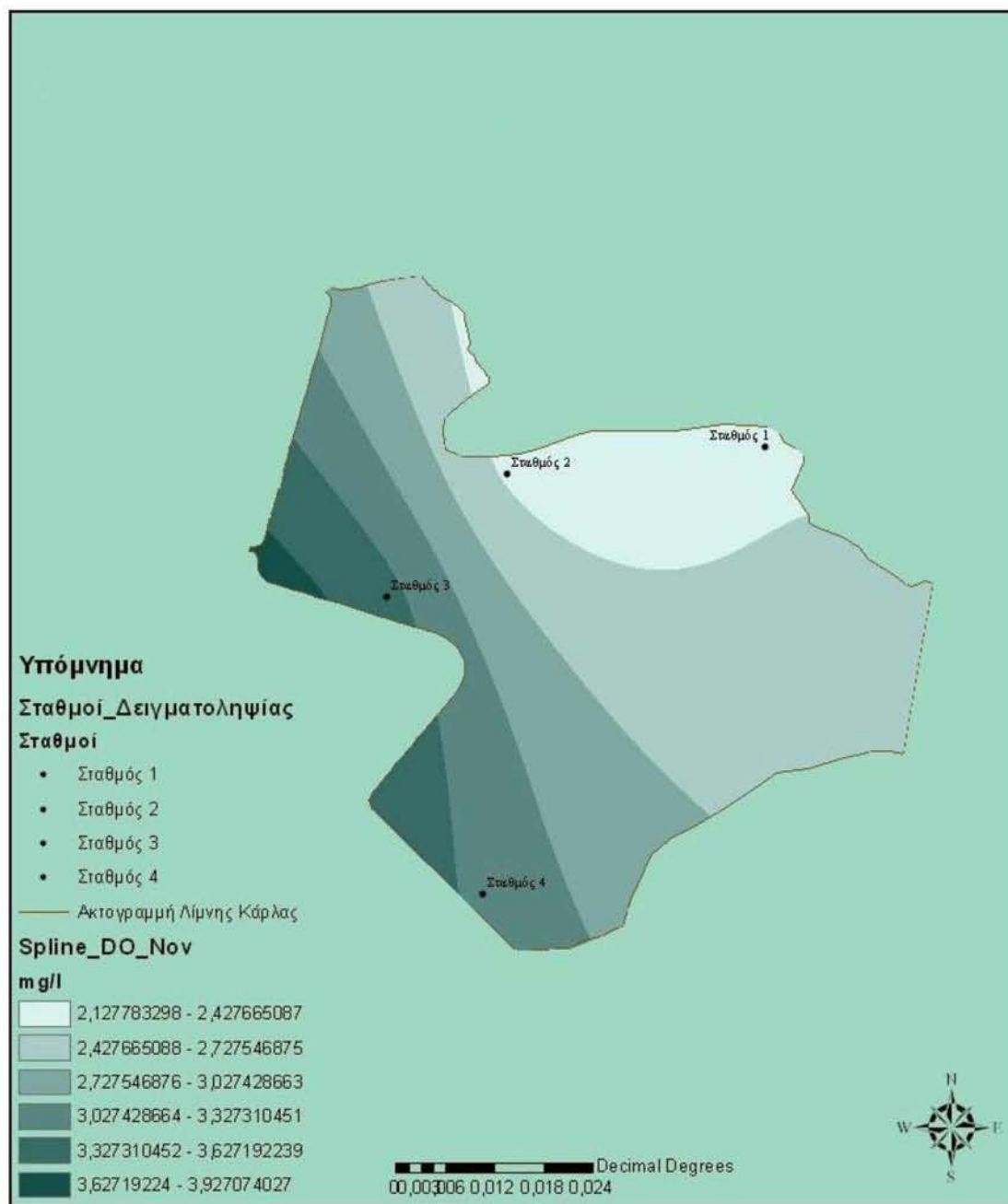
Εικόνα 52: Χάρτης Διαλυμένου Οξυγόνου για το μήνα Αύγουστο του 2011 με τη μέθοδο IDW



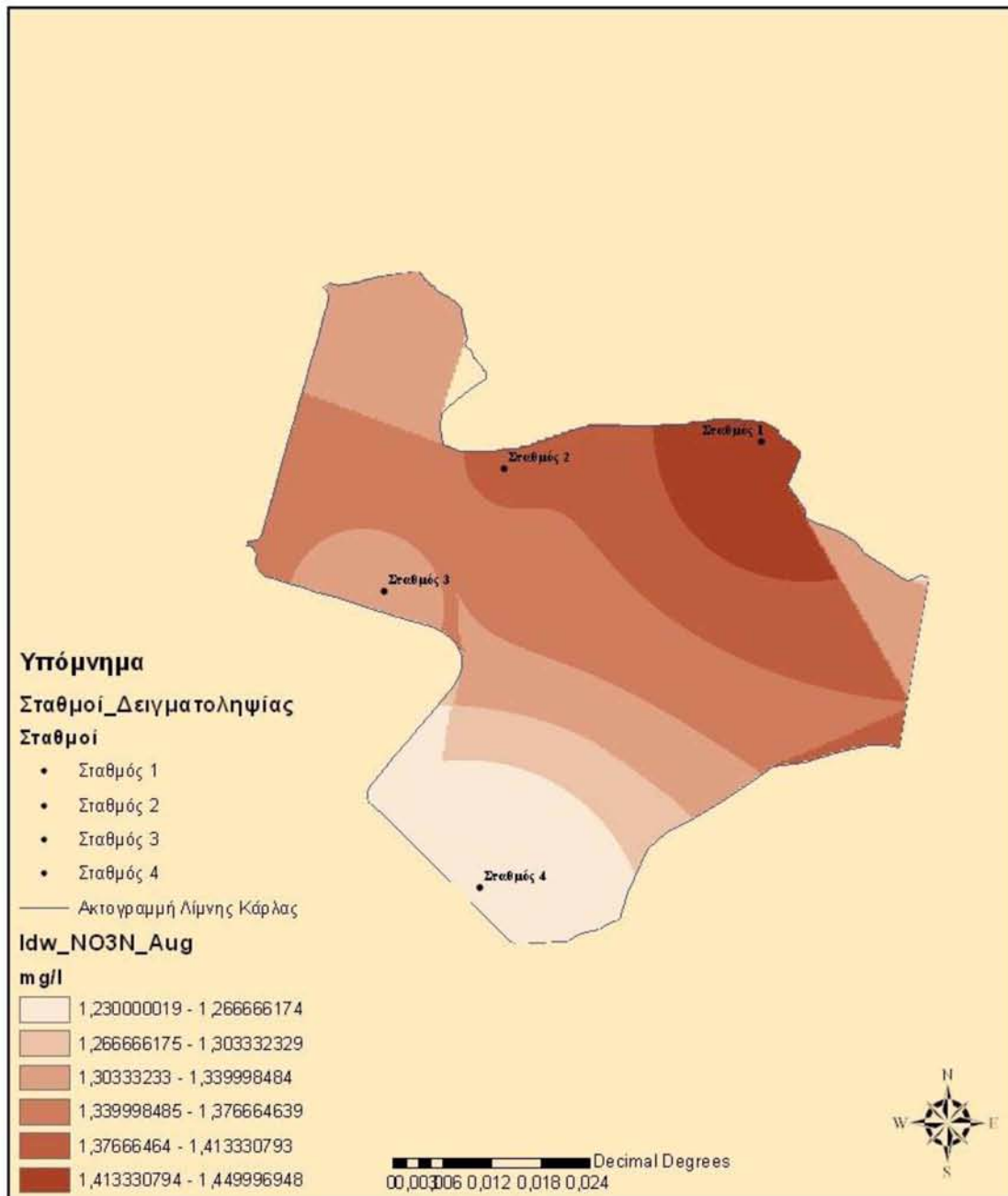
Εικόνα 53: Χάρτης Διαλυμένου Οξυγόνου για το μήνα Αύγουστο του 2011 με τη μέθοδο Splines



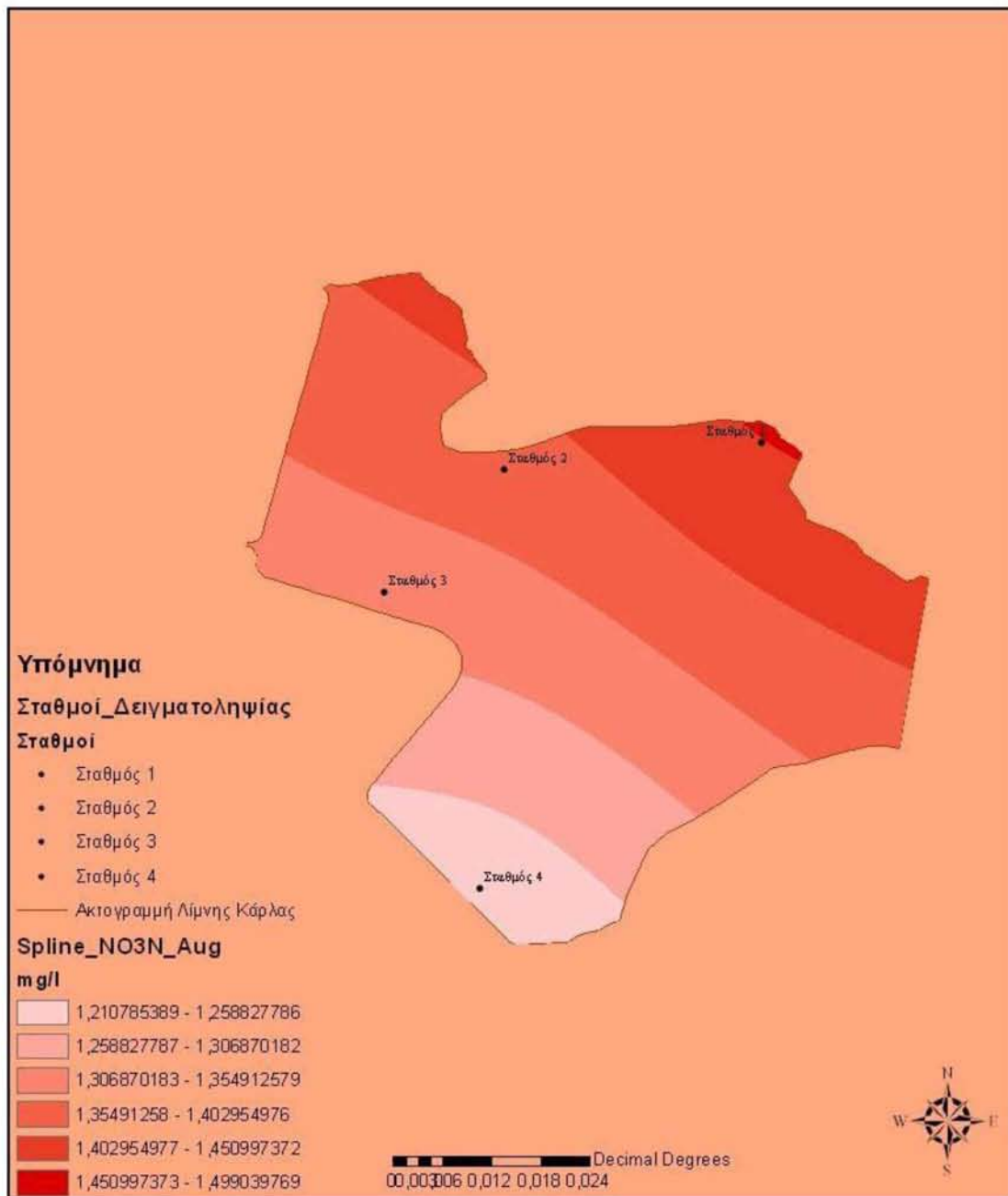
Εικόνα 54: Χάρτης Διαλυμένου Οξυγόνου για το μήνα Νοέμβρη του 2011 με τη μέθοδο IDW



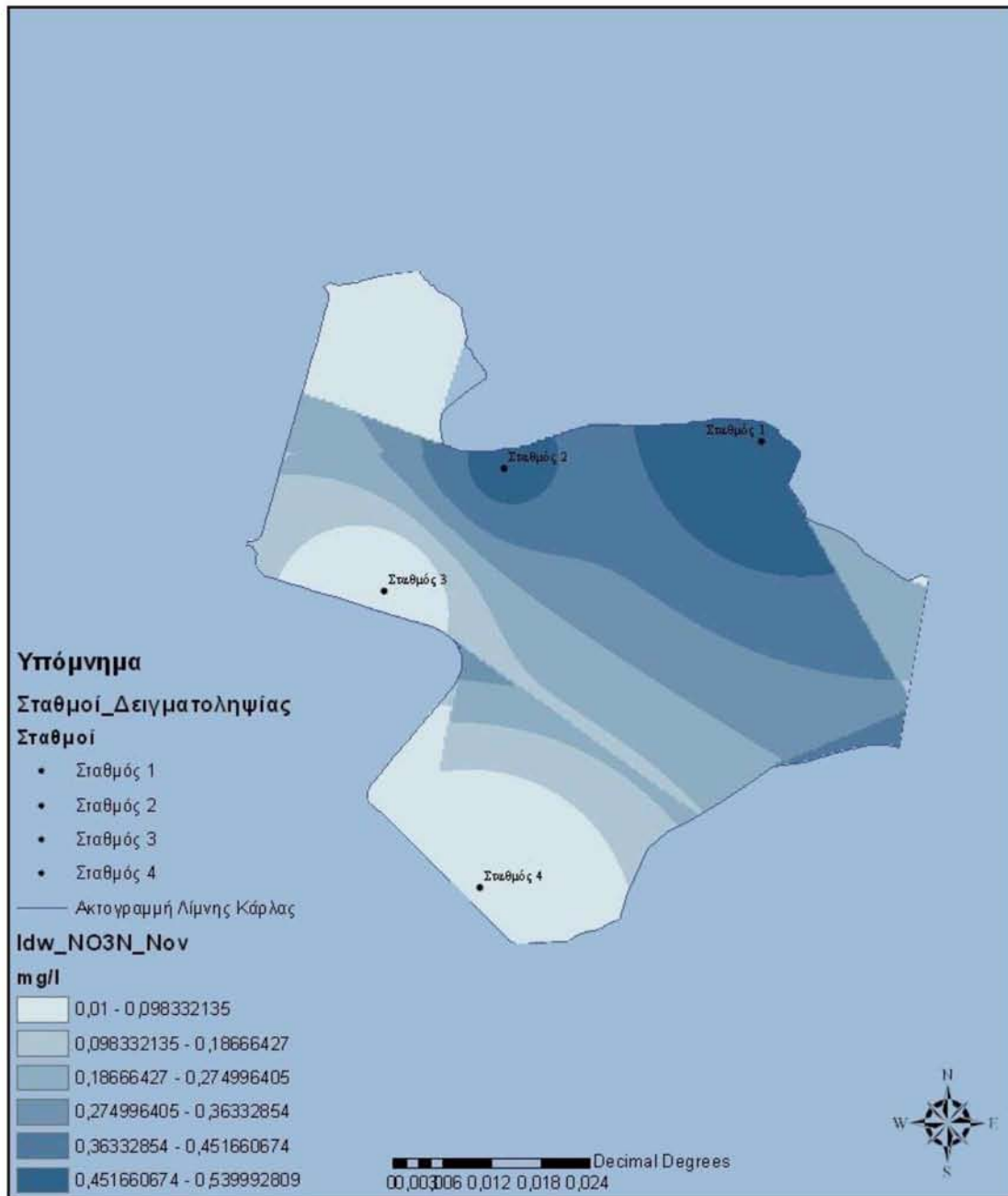
Εικόνα 55: Χάρτης Διαλυμένου Οξυγόνου για το μήνα Νοέμβρη του 2011 με τη μέθοδο Splines



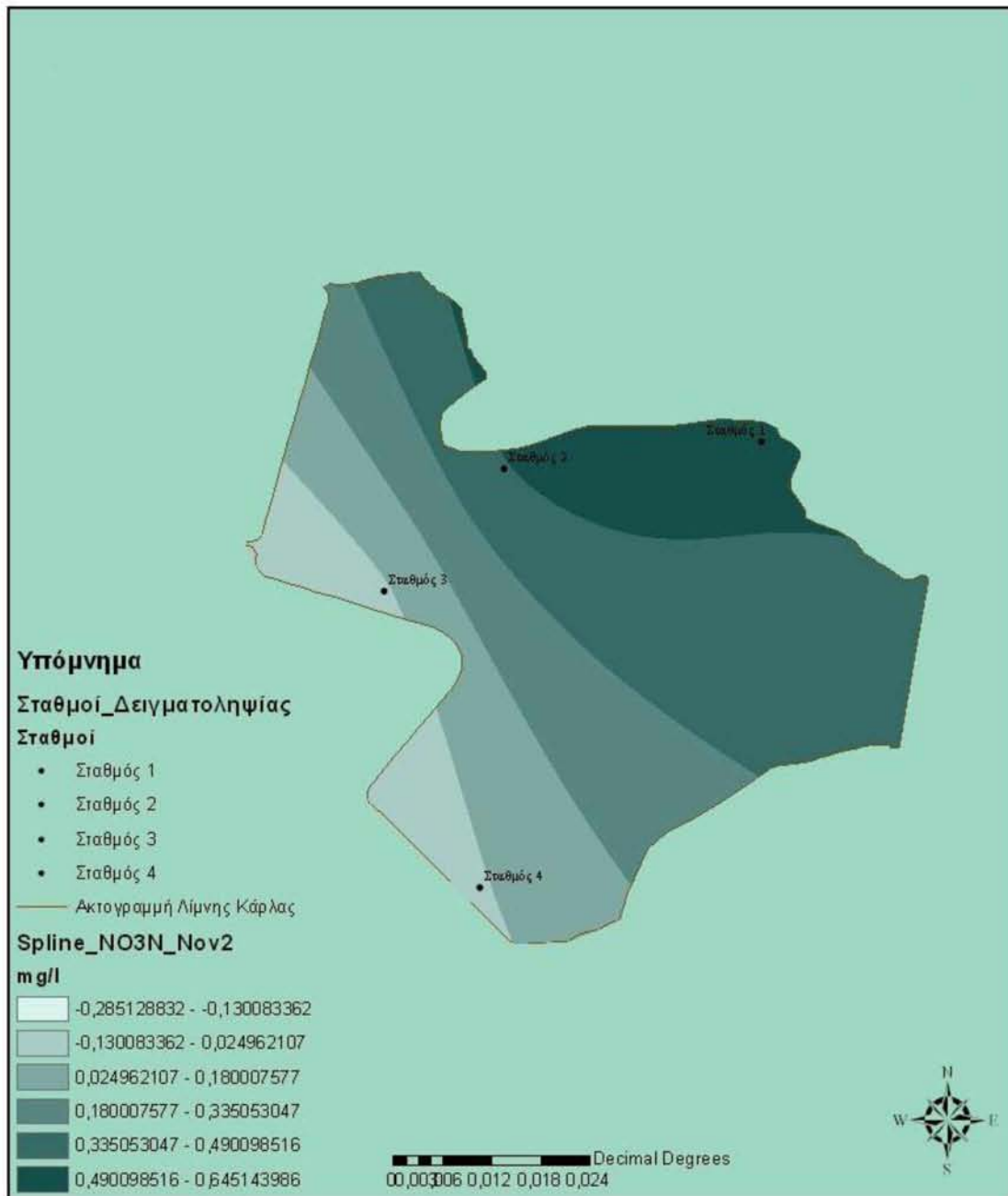
Εικόνα 56: Χάρτης Νιτρικών Ιόντων για το μήνα Αύγουστο του 2011 με τη μέθοδο IDW



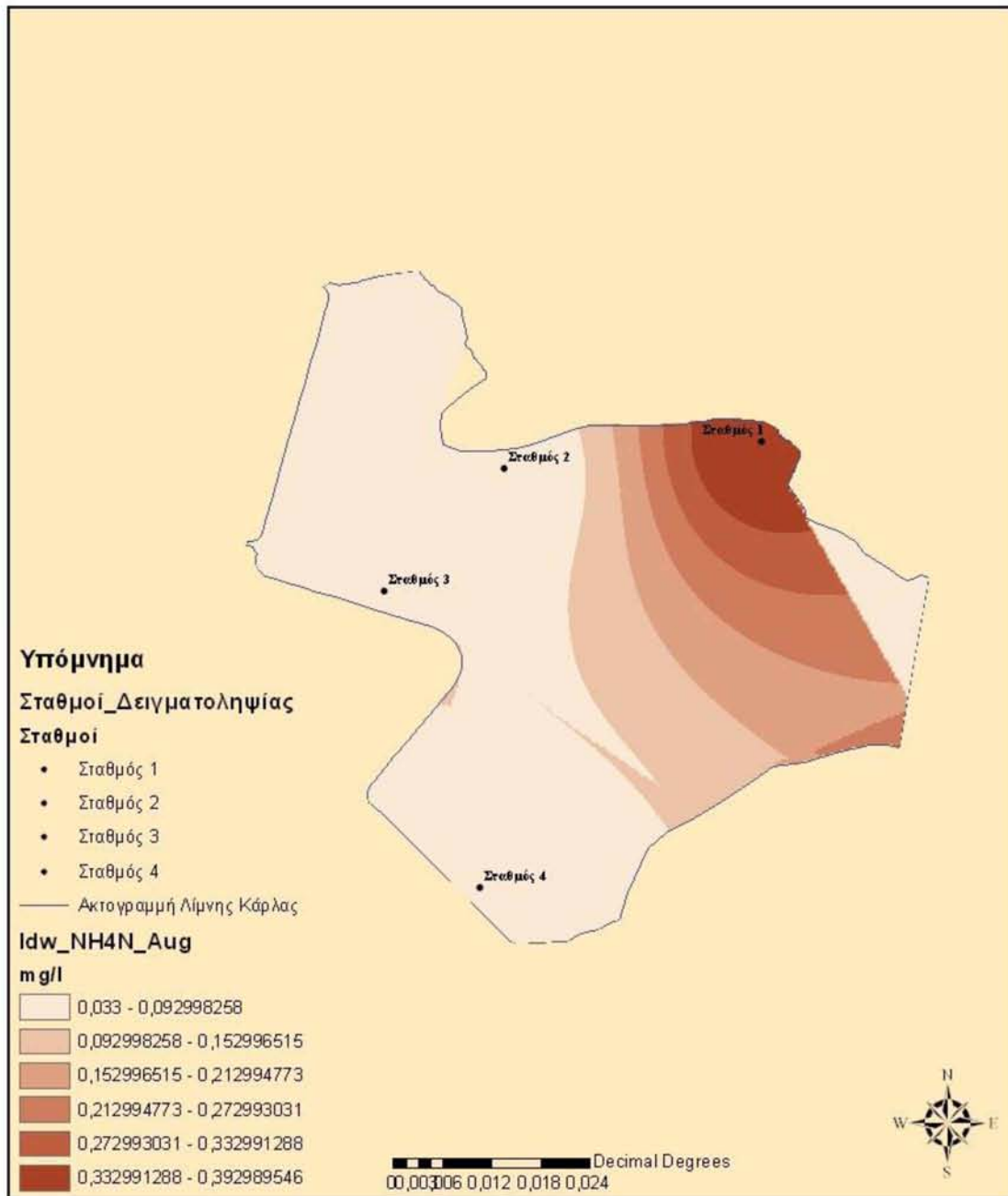
Εικόνα 57: Χάρτης Νιτρικών Ιόντων για το μήνα Αύγουστο του 2011 με τη μέθοδο Splines



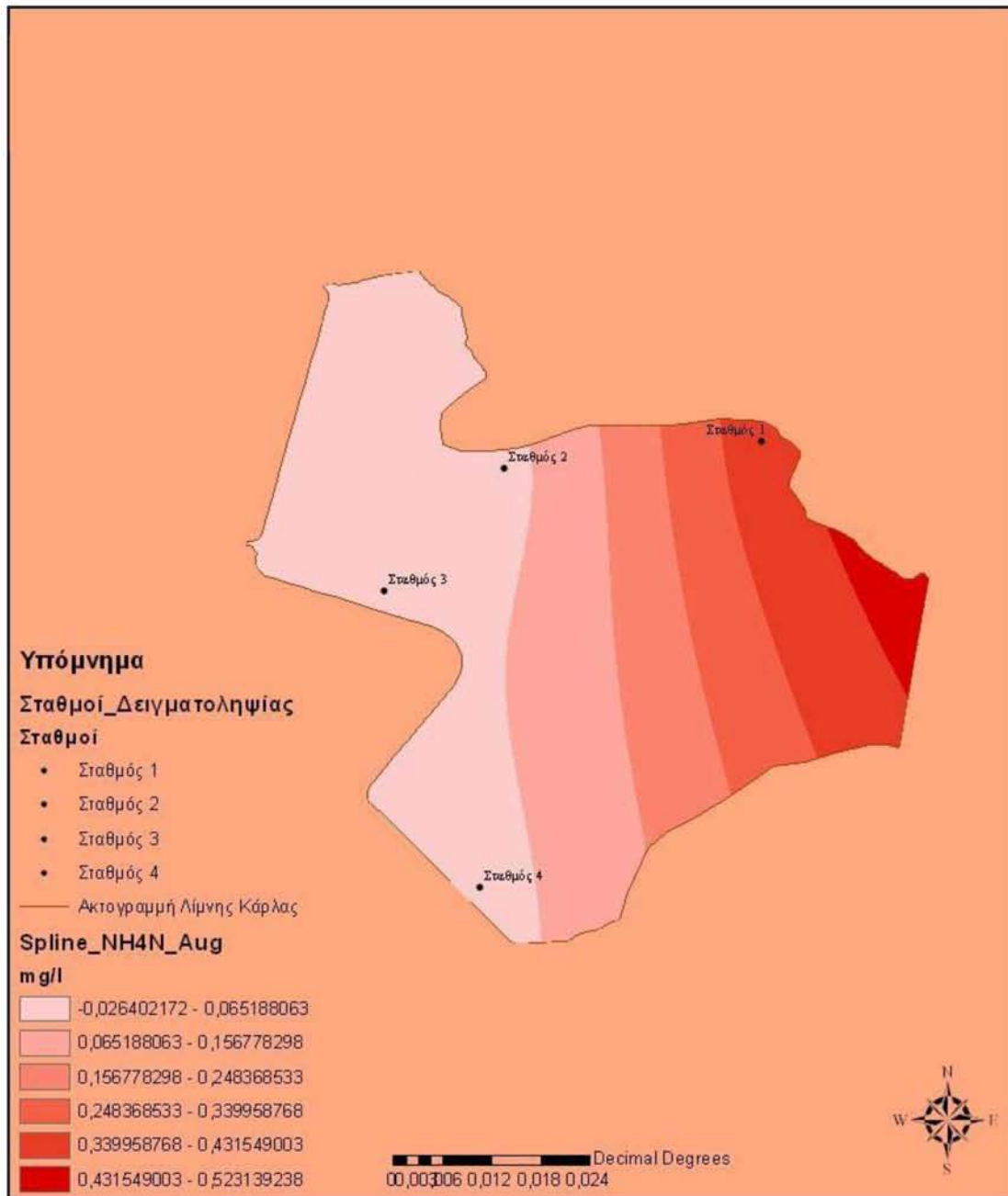
Εικόνα 58: Χάρτης Νιτρικών Ιόντων για το μήνα Νοέμβρη του 2011 με τη μέθοδο IDW



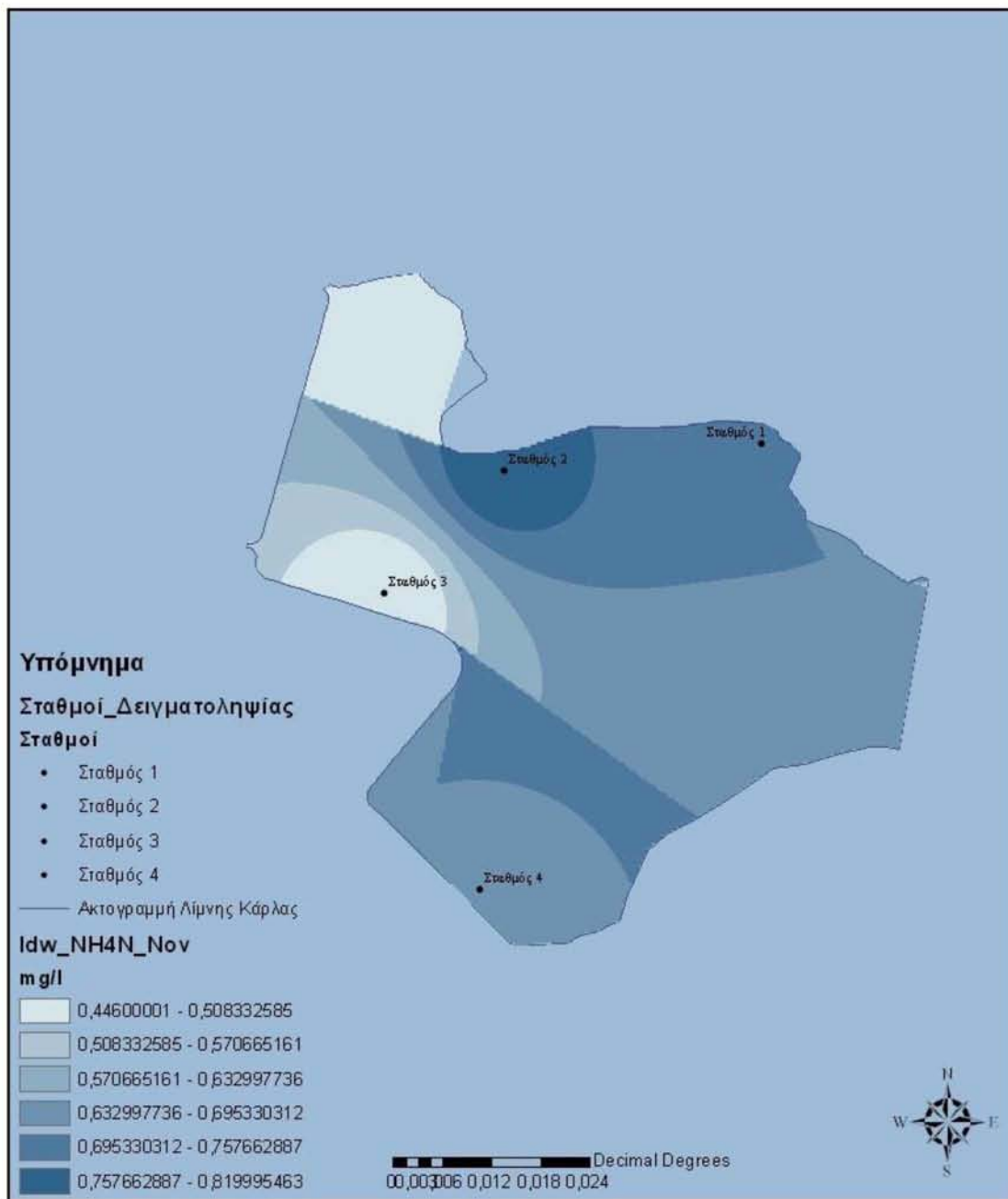
Εικόνα 59: Χάρτης Νιτρικών Ιόντων για το μήνα Νοέμβρη του 2011 με τη μέθοδο Splines



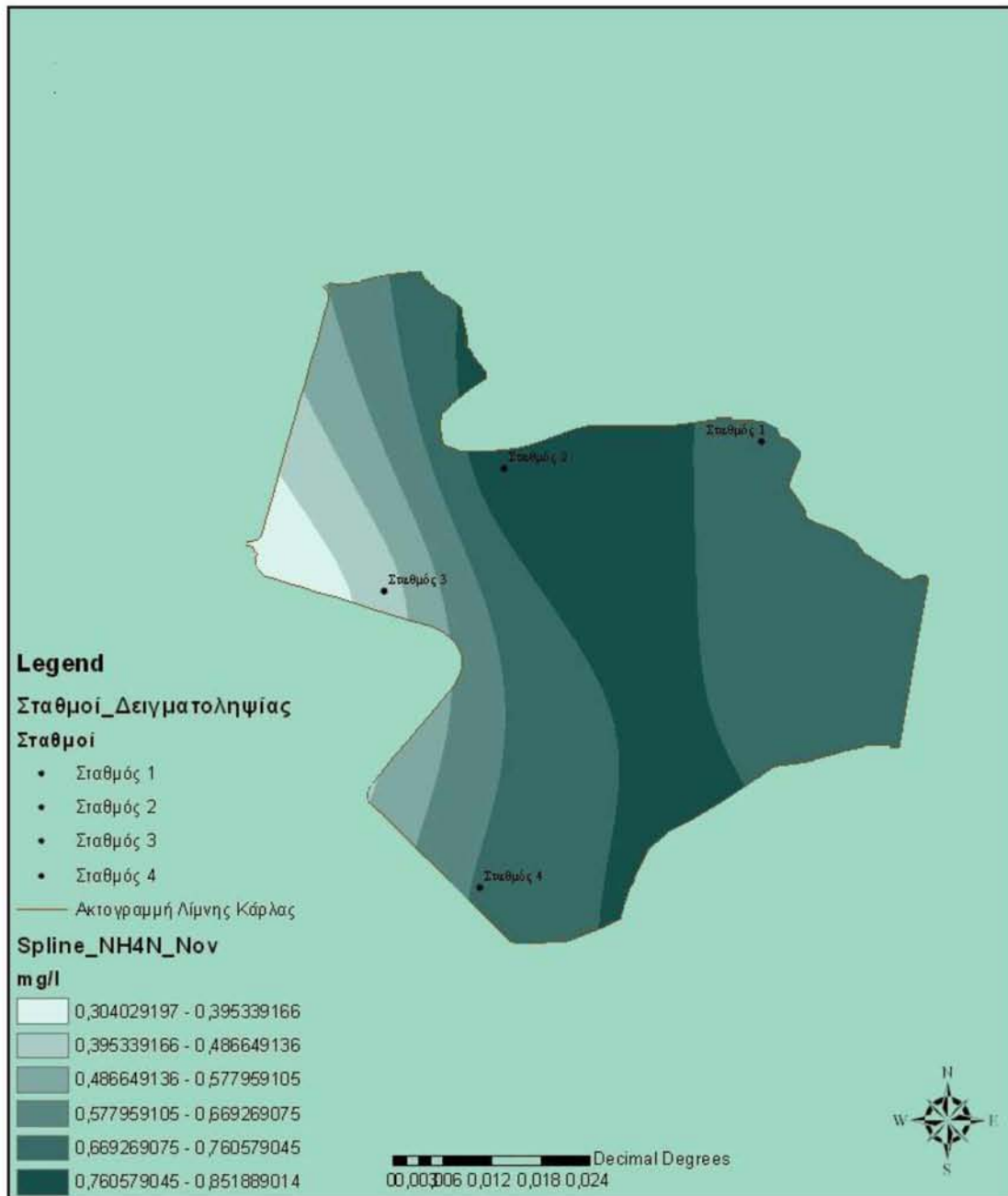
Εικόνα 60: Χάρτης Αμμωνιακών Ιόντων για το μήνα Αύγουστο του 2011 με τη μέθοδο IDW



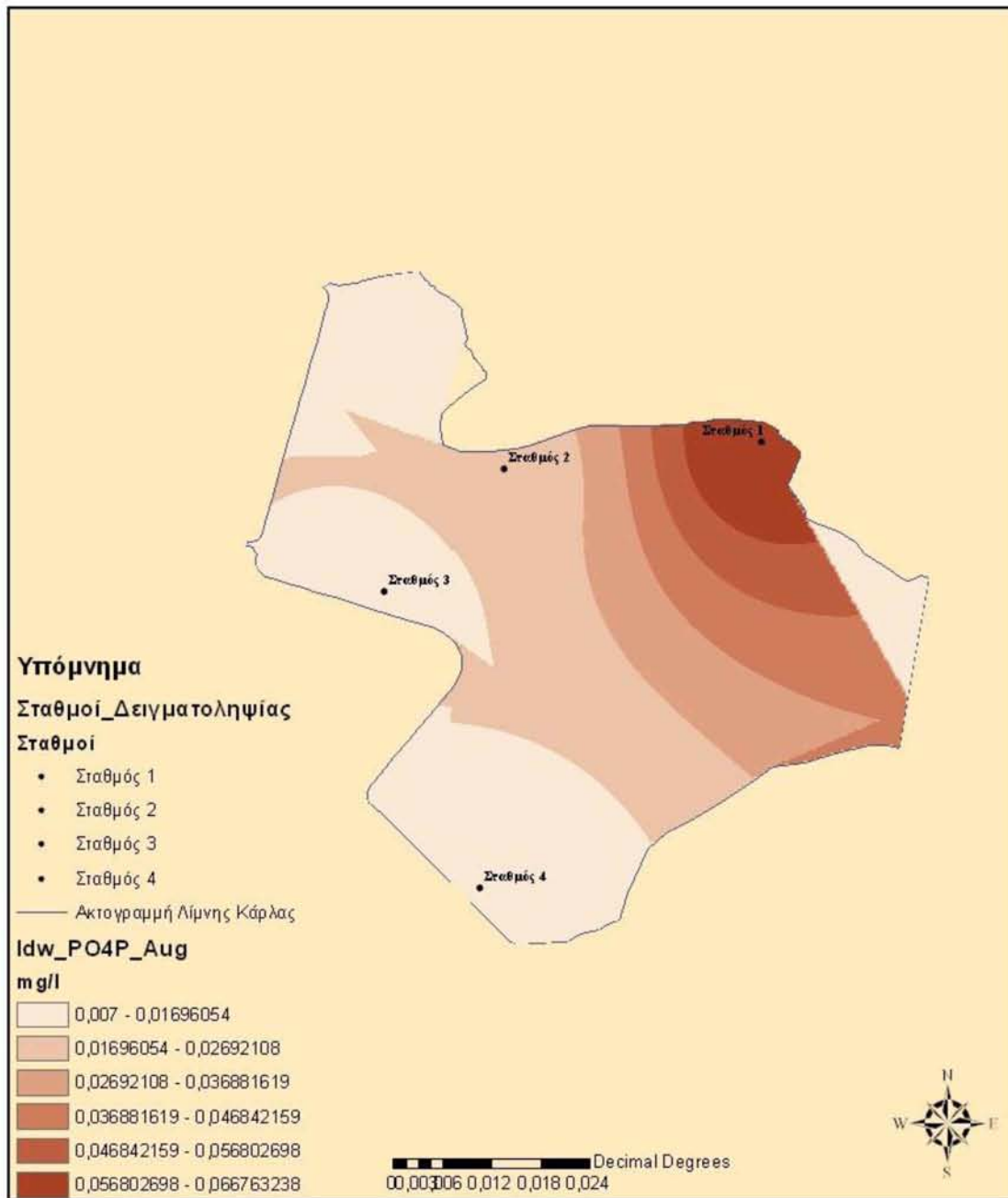
Εικόνα 61: Χάρτης Αμμωνιακών Ιόντων για το μήνα Αύγουστο του 2011 με τη μέθοδο Splines



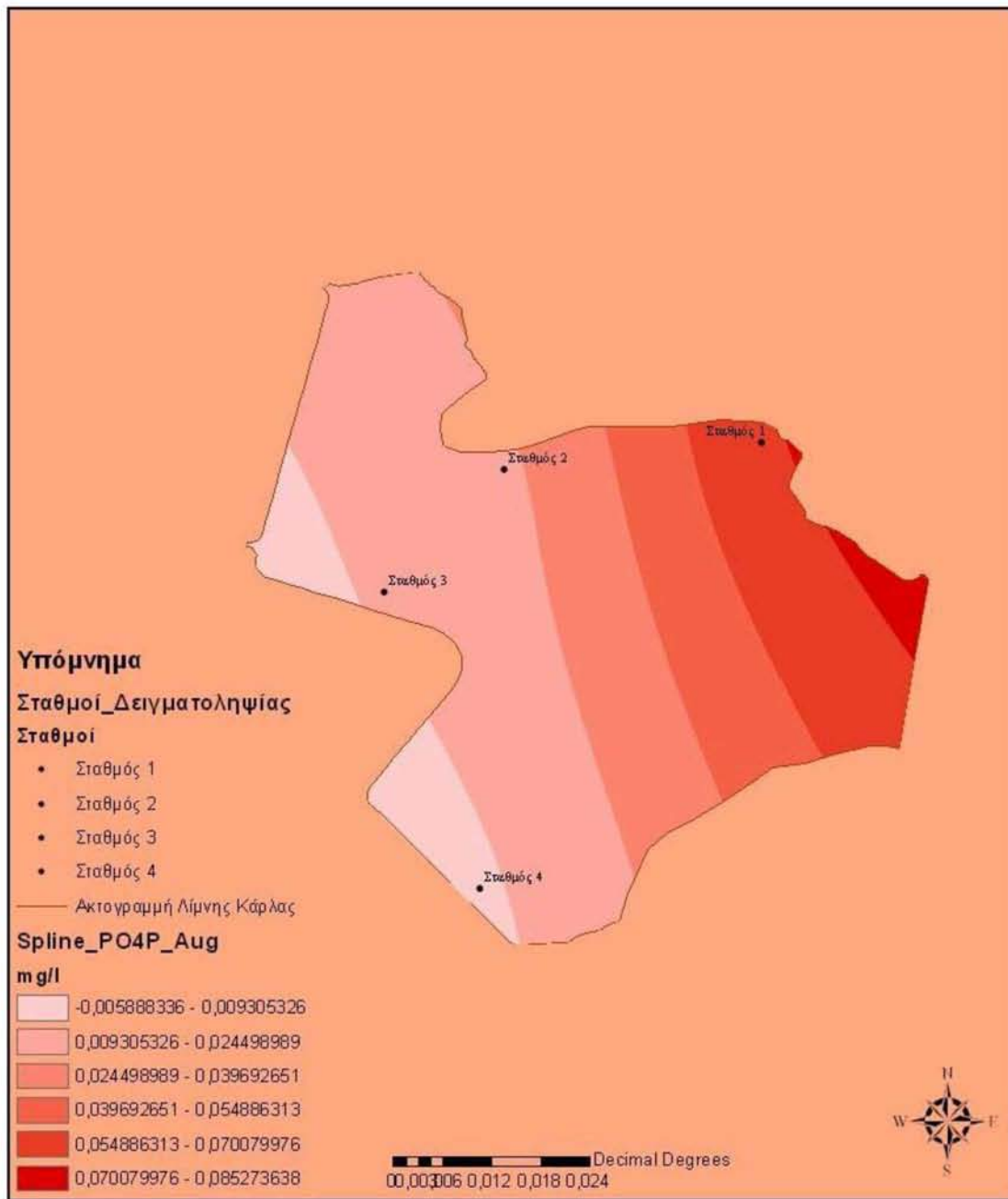
Εικόνα 62: Χάρτης Αμμωνιακών Ιόντων για το μήνα Νοέμβρη του 2011 με τη μέθοδο IDW



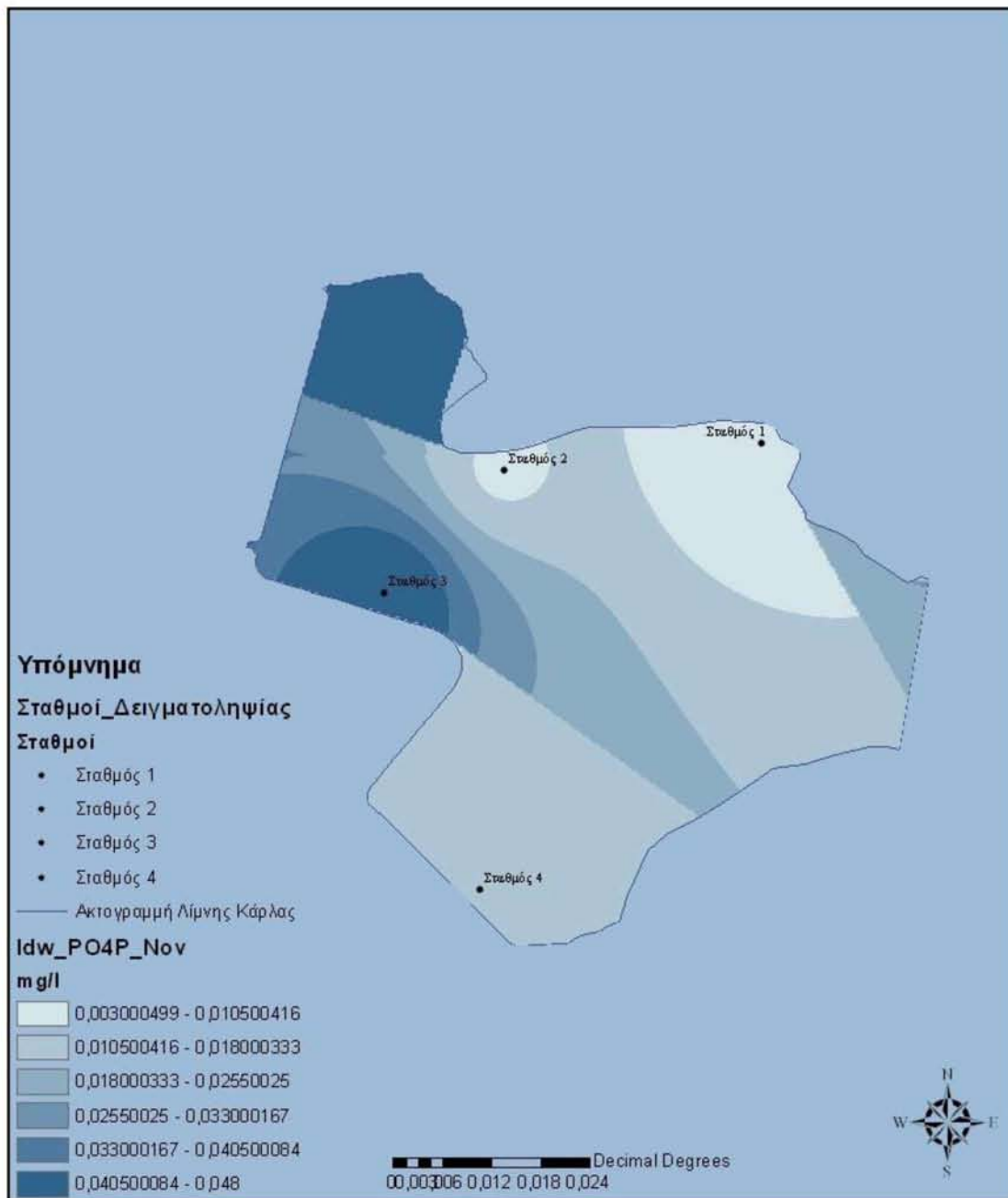
Εικόνα 63: Χάρτης Αμμωνιακών Ιόντων για το μήνα Νοέμβρη του 2011 με τη μέθοδο Splines



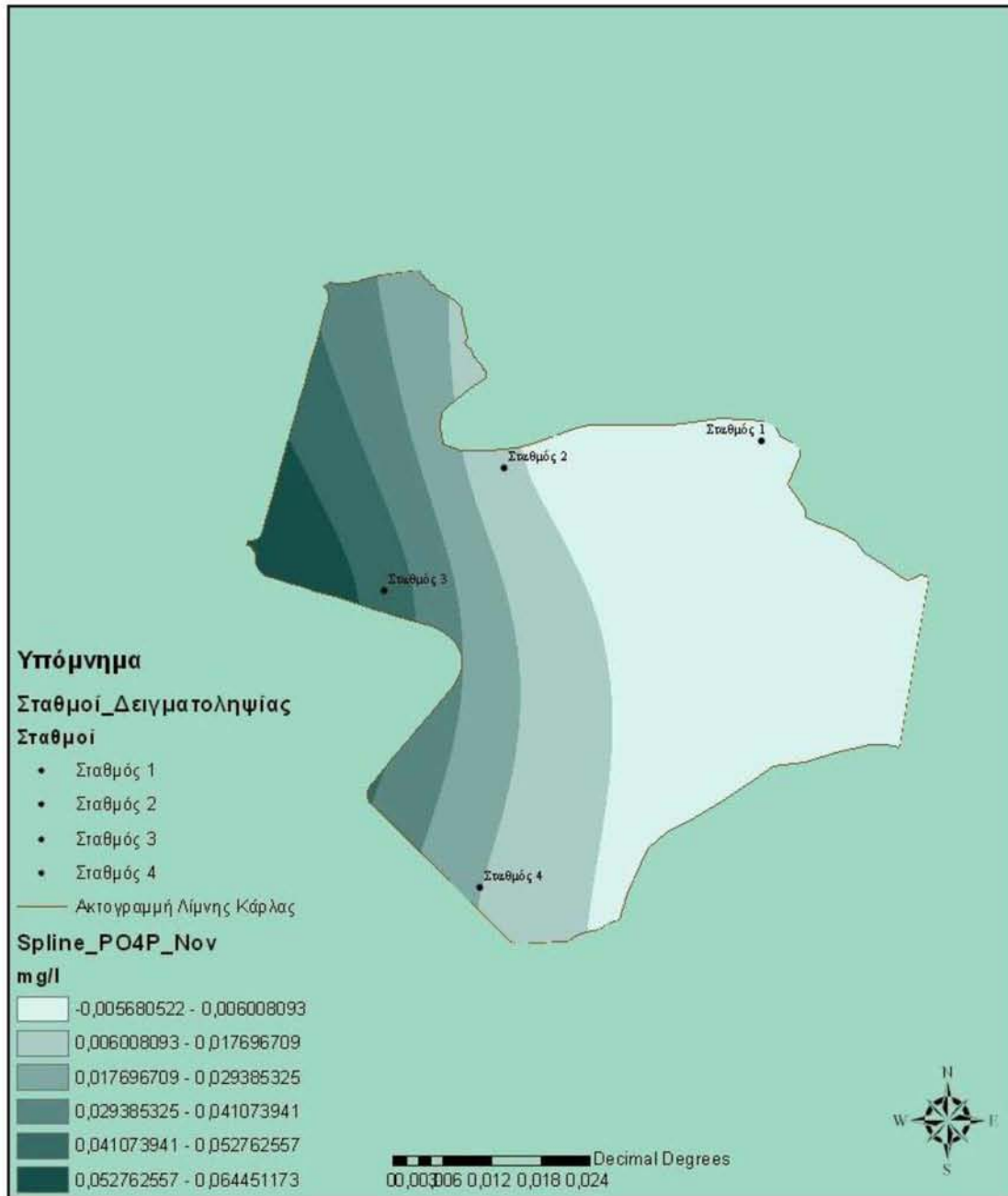
Εικόνα 64: Χάρτης Ορθοφωσφορικών Ιόντων για το μήνα Αύγουστο του 2011 με τη μέθοδο IDW



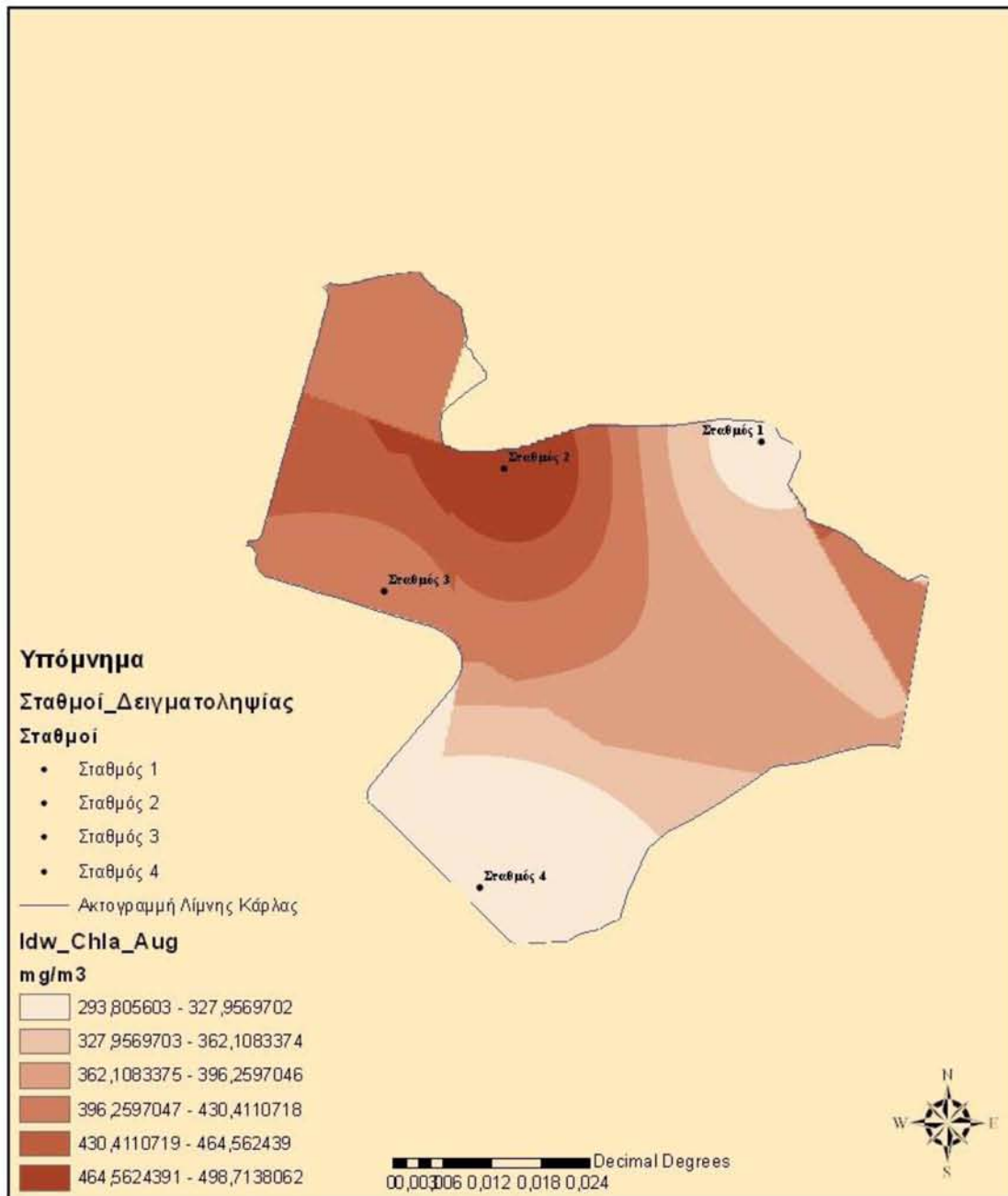
Εικόνα 65: Χάρτης Ορθοφωσφορικών Ιόντων για το μήνα Αύγουστο του 2011 με τη μέθοδο Splines



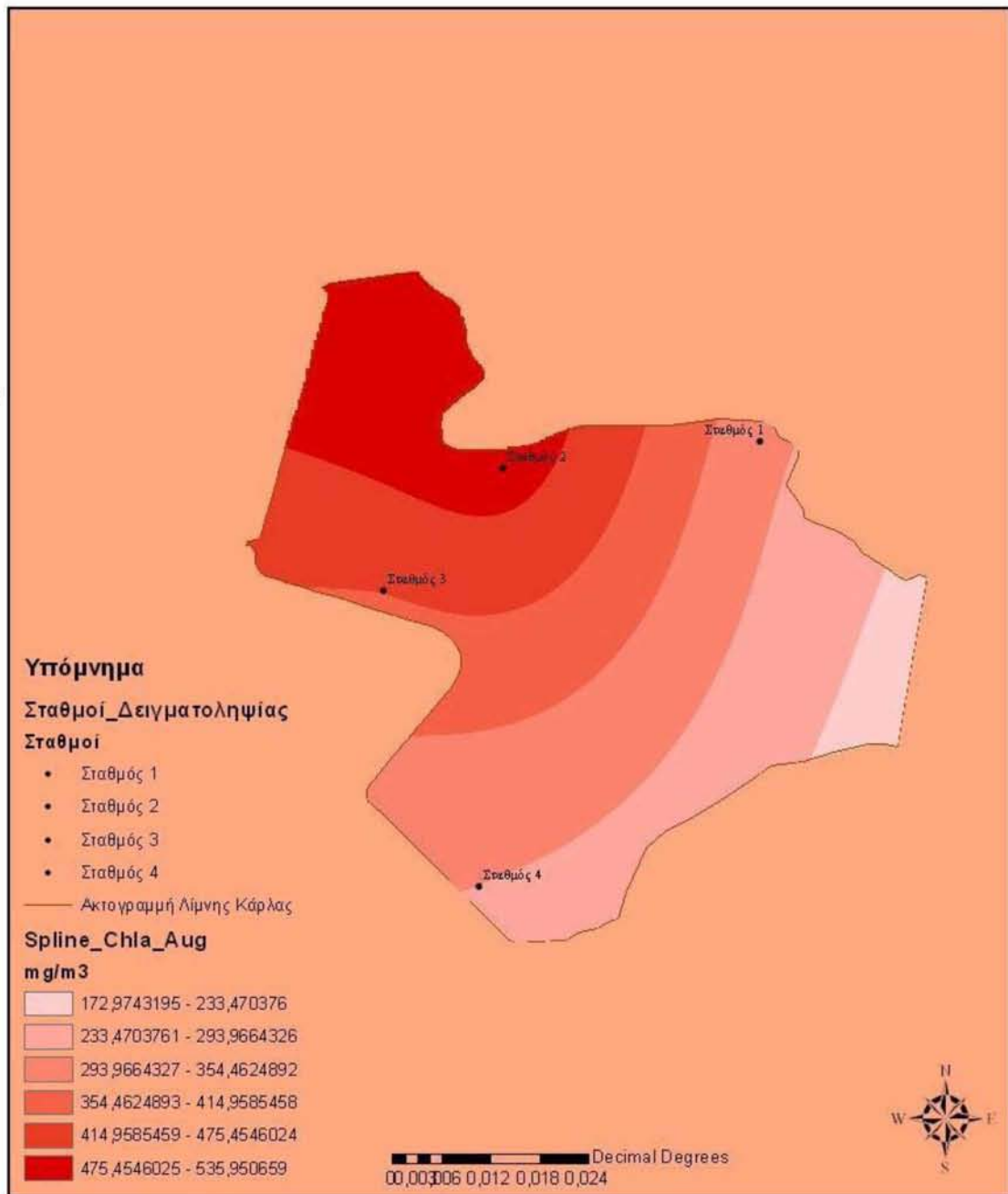
Εικόνα 66: Χάρτης Ορθοφωσφορικών Ιόντων για το μήνα Νοέμβρη του 2011 με τη μέθοδο IDW



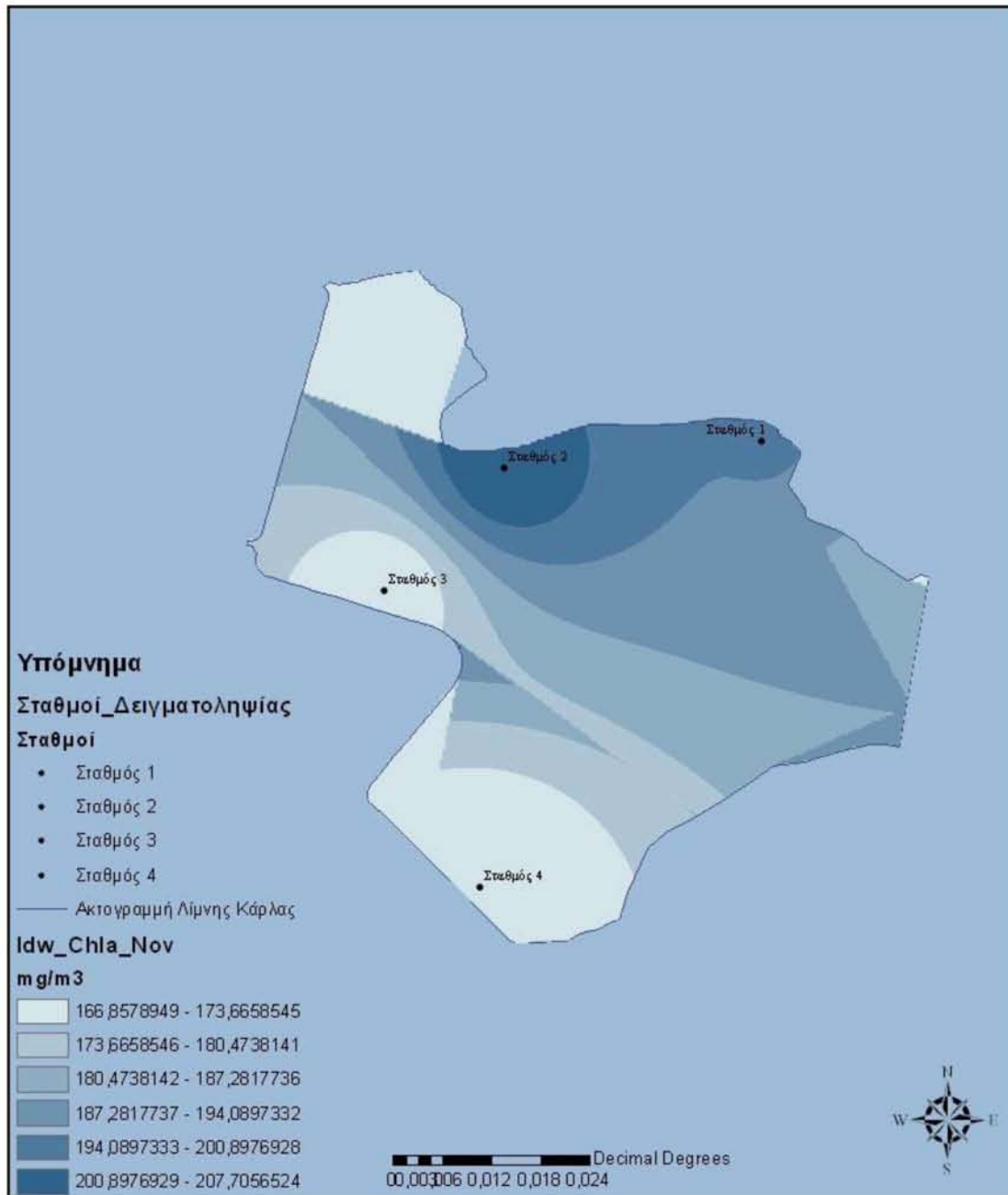
Εικόνα 67: Χάρτης Ορθοφωσφορικών Ιόντων για το μήνα Αύγουστο του 2011 με τη μέθοδο Splines



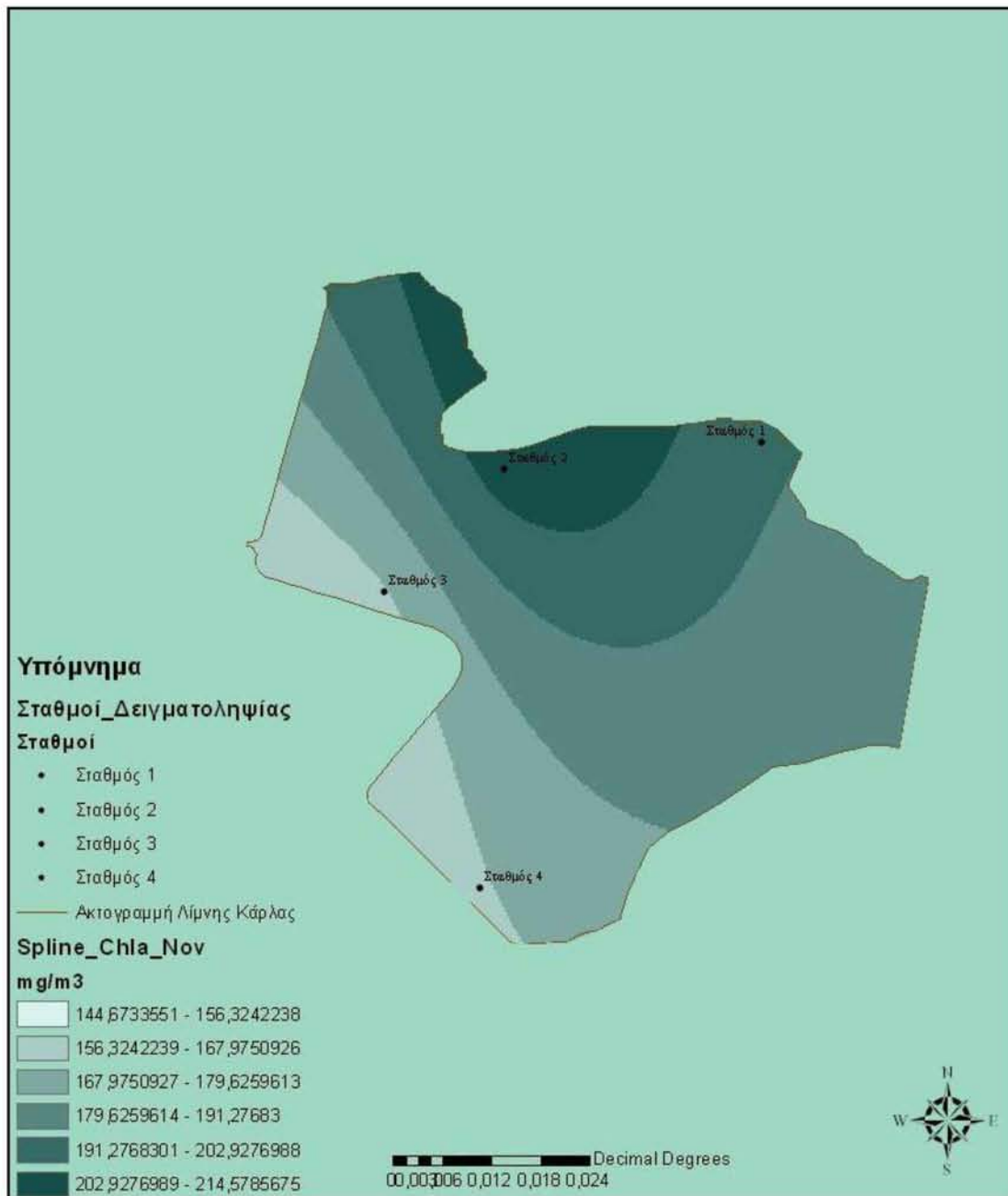
Εικόνα 68: Χάρτης Χλωροφύλλης-α για το μήνα Αύγουστο του 2011 με τη μέθοδο IDW



Εικόνα 69: Χάρτης Χλωροφύλλης-α για το μήνα Αύγουστο του 2011 με τη μέθοδο Splines



Εικόνα 70: Χάρτης Χλωροφύλλης-α για το μήνα Νοέμβρη του 2011 με τη μέθοδο IDW



Εικόνα 71: Χάρτης Χλωροφύλλης-α για το μήνα Νοέμβρη του 2011 με τη μέθοδο Splines

4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Τα σημεία δειγματοληψίας που αφορούν την παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή είναι τέσσερα. Υπάρχουν όμως για το 2010, δεδομένα για τους τρεις από τους τέσσερις σταθμούς εντός της λίμνης. Για το 2007, υπάρχουν επίσης διαθέσιμα δεδομένα μετρήσεων φυσικοχημικών παραμέτρων σε διαφορετικά σημεία από τα σημεία της παρούσης εργασίας. Τα παραπάνω δεδομένα, θα χρησιμοποιηθούν με σκοπό την εποχιακή σύγκριση των αποτελεσμάτων των τωρινών μετρήσεων.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των μέσων τιμών των αναλύσεων, όπως προέκυψαν από τα παραπάνω διαγράμματα, από τον Ιούνιο μέχρι και τον Νοέμβρη του 2011, σε διάστημα δηλαδή ενός εξαμήνου, διαπιστώνουμε ότι η θερμοκρασία (Εικ. 13), κυμάνθηκε από 7 °C η ελάχιστη, η οποία σημειώθηκε κατά τον μήνα Νοέμβρη, ενώ η μέγιστη τον μήνα Ιούλιο στους 31,4 °C. Οι μετρήσεις, πραγματοποιούνταν κατά τις ίδιες πρωινές ώρες καθ' όλη την δειγματοληπτική περίοδο για να υπάρξει ομοιογένεια και σύγκριση των τιμών στο ίδιο χρονικό διάστημα.

Οι τιμές της θερμοκρασίας κατά το έτος 2010 και σε περίοδο έξι μηνών από τον Ιούνιο μέχρι και τον Νοέμβρη, σύμφωνα με την Papadimitriou *et al.* (2011), κυμάνθηκαν η ελάχιστη στους 13 °C τον Νοέμβρη, ενώ η μέγιστη καταγράφηκε τον Ιούλιο αγγίζοντας τους 35,5 °C.

Παρατηρούμε ότι οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές των θερμοκρασιών συμπίπτουν εποχικά, με διαφορές μόνο στην διακύμανση της τιμής. Η διαφορά τον Νοέμβριο του 2011 σε σχέση με τον Νοέμβρη του 2010 είναι κατά 8 βαθμούς χαμηλότερη, γεγονός που οφείλεται στις αρκετά χαμηλές για την εποχή τιμές θερμοκρασιών του αέρα που καταγράφηκαν εκείνη την περίοδο γενικά σε όλη την χώρα. Η διαφορά στην υψηλότερη

τιμή που καταγράφηκε στα δύο έτη περιορίζεται στους 4,1 °C με τον Ιούλιο του 2011 να έχει την χαμηλότερη.

Συγκρίνοντας της διακυμάνσεις της θερμοκρασίας στο αντίστοιχο διάστημα των έξι μηνών, από τον Ιούνιο μέχρι τον Νοέμβρη του 2007, ο Παπανίκος (2008) κατέγραψε στην διάρκεια των δειγματοληψιών του, την χαμηλότερη τιμή θερμοκρασίας τον Νοέμβριο στους 12 °C, ενώ την υψηλότερη τον Ιούλιο στους 34 °C. Συμπερασματικά, προκύπτει ότι στη διάρκεια της δική μας παρακολούθησης, η λίμνη αγγίζει τις μέγιστες τιμές της σε θερμοκρασία τον Ιούλιο, ενώ οι χαμηλότερες τιμές καταγράφονται στο τέλος του φθινοπώρου και το ξεκίνημα του χειμώνα.

Το διαλυμένο οξυγόνο κυμάνθηκε από 2,85 mg/l τον Νοέμβρη του 2011, όπου σημείωσε την χαμηλότερη τιμή του και 8,32 mg/l κατά τον Αύγουστο 2011, η οποία ήταν και η υψηλότερη που παρατηρήθηκε (Εικ. 11). Τον μήνα Ιούνιο δεν πραγματοποιήθηκε μέτρηση του διαλυμένου οξυγόνου, καθώς ο αισθητήρας του πολυόργανου με το οποίο γινόντουσαν οι μετρήσεις, ήθελε συντήρηση η οποία και έγινε. Τον Ιούλιο, επιχειρήθηκε ξανά η μέτρηση του, όπου πάλι τα αποτελέσματα δεν ήταν τα αναμενόμενα, καθώς ο αισθητήρας εμφάνισε ξανά πρόβλημα. Από τον Αύγουστο όμως μέχρι και τον Νοέμβρη οι μετρήσεις που ακολούθησαν πραγματοποιήθηκαν χωρίς περαιτέρω προβλήματα.

Κατά το έτος 2010 οι τιμές του διαλυμένου οξυγόνου έφτασαν στην χαμηλότερη τον Οκτώβριο με τιμή 3,3 mg/l και την υψηλότερη τον Νοέμβρη, 7,2 mg/l. Το 2007 οι χαμηλότερη τιμή καταγράφηκε τον Ιούλιο, 5,6 mg/l ενώ η υψηλότερη τον Νοέμβρη που η τιμή του έφτασε τα 12,5 mg/l. Στην σύγκριση των αποτελεσμάτων παρατηρούμε ότι οι τιμές του 2007 με του 2010 είναι σχετικά πιο κοντά, με την τιμή του διαλυμένου οξυγόνου να αυξάνει βαθμιαία από το φθινόπωρο προς τον χειμώνα. Το 2011 όμως οι

τιμές διαφέρουν, αφού τον Νοέμβρη καταγράφεται η χαμηλότερη τιμή με διαφορά 4,75 mg/l χαμηλότερα από τις τιμές του 2010 και 11,65 mg/l χαμηλότερα από τις τιμές του 2007. Οι χαμηλές τιμές διαλυμένου οξυγόνου, συμβαδίζουν με υψηλές τιμές θερμοκρασίας και το αντίστροφο, εκτός από τις περιπτώσεις του αρχικού σταδίου του ευτροφισμού.

Οι τιμές του pH που καταγράφηκαν την περίοδο του 2011 ήταν χωρίς χαρακτηριστικές εποχικές διακυμάνσεις με την χαμηλότερη τον Νοέμβρη 7,43 και την υψηλότερη τον Αύγουστο 8,73 (Εικ. 15). Χωρίς χαρακτηριστικές διακυμάνσεις, ήταν και οι αντίστοιχες μετρήσεις του 2010 με εύρος τιμών μεταξύ 8,2 και 9,2 καθώς και οι μετρήσεις του 2007 με τιμές που κυμάνθηκαν μεταξύ 8 και 9,2. Η αύξηση του pH κατά τους καλοκαιρινούς μήνες δικαιολογείται από την αύξηση του φυτοπλαγκτού. Χαμηλές τιμές pH καταγράφονται σε νερά με μεγάλες συγκεντρώσεις οργανικών, ενώ υψηλές σε ευτροφικά νερά.

Η τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (Εικ. 12), κυμάνθηκαν και αυτές χωρίς ιδιαίτερες διακυμάνσεις με την χαμηλότερη τιμή τον Ιούνιο στις 2,6 mS/cm και την υψηλότερη τον Νοέμβρη στις 3,2 mS/cm. Το 2010, η τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας πήρε την υψηλότερη τιμή της τον Αύγουστο, στις 4,9 mS/cm και την χαμηλότερη τον Ιούνιο στις 3,6 mS/cm. Το ίδιο χρονικό διάστημα το έτος 2007 η ηλεκτρική αγωγιμότητα κατέγραψε την χαμηλότερη τιμή της τον Ιούνιο στις 1,72 mS/cm και την υψηλότερη στις 6 mS/cm τον Νοέμβριο. Σε συζήτηση που έλαβε χώρα κατά την ημερίδα της 21^{ης} Οκτωβρίου 2011, που συνδιοργανώθηκε από το Φορέα Διαχείρισης της Κάρλας και το ΤΕΕ Μαγνησίας, αναφέρθηκαν και παλαιότερες καταγραφές των τιμών της ηλεκτρικής αγωγιμότητας της τάξης των 3–4 mS/cm.

Οι τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας που καταγράφονται όλα αυτά τα χρόνια στην λίμνη Κάρλα είναι αρκετά υψηλές, με μία πτωτική τάση να καταγράφεται το 2011. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει την υψηλή αλατότητα των εδαφών γύρω από τη στραγγιστική τάφρο και τον ταμιευτήρα, αλλά και την πιθανή διείσδυση του θαλασσινού νερού, το οποίο αντλείται από τις υφιστάμενες μεγάλου βάθους γεωτρήσεις για την άρδευση των καλλιεργειών, το γεγονός αυτό συνηγορείτε και από τις τιμές της αλατότητας (Παπανίκος 2008).

Η αλατότητα στα ύδατα των τριών σταθμών κατά το έτος 2011, έδειξε αρκετά υψηλές τιμές παρουσιάζοντας μία ελάχιστη καθοδική τάση με τις τιμές του 2007. Το 2011, η υψηλότερη τιμή αλατότητας σημειώθηκε τον Νοέμβρη αγγίζοντας το 0,18‰ και η χαμηλότερη τον Ιούνιο φτάνοντας το 0,11‰ (Εικ. 16). Το αντίστοιχο διάστημα στο 2007 η αλατότητα κυμάνθηκε από 0,10‰ τον Ιούνιο και έφτασε το 0,22‰ τον Νοέμβρη.

Το νερό που υπάρχει στην λίμνη κατά τους χειμερινούς μήνες είναι υψηλής αλατότητας, με αποτέλεσμα να καταστεί ακατάλληλο για άρδευση. Αυτό συμβαίνει διότι ο ταμιευτήρας βρίσκεται στο τέλος του δικτύου διπλής δράσης (αρδευτικό και ταυτόχρονα στραγγιστικό), με αποτέλεσμα να λαμβάνει τα περισσότερο επιβαρυμένα ύδατα. Η ποιότητα του νερού της λίμνης εξαρτάται κατά πολύ από το ύψος της ετήσιας βροχόπτωσης καθώς και από την ποσότητα του νερού που προέρχεται από τον Πηνειό. Τις χρονιές που υπάρχουν χαμηλές βροχές κατά τη διάρκεια του χειμώνα, η αναλογία του νερού καλής ποιότητας που εισέρχεται στο σύστημα είναι χαμηλή και η επαναπλήρωση του ταμιευτήρα εξαρτάται σχεδόν εξ' ολοκλήρου από το χαμηλής ποιότητας νερό στράγγισης που διακινείται μέσα από το σύστημα (Σακελλαρίου – Μακραντωνάκη και συν. 1998).

Οι μέσες τιμές της θολερότητας για την χρονική περίοδο του 2011 που μελετήθηκε (Εικ. 14), σημείωσαν τιμές από 14,8 NTU που ήταν και η χαμηλότερη τον μήνα Ιούνιο μέχρι 148,6 NTU τον Σεπτέμβρη που ήταν και η υψηλότερη. Το 2007 η θολερότητα έδειξε μικρές εποχικές διακυμάνσεις με χαμηλότερη τιμή τον Ιούλιο στους 32 NTU και την υψηλότερη τον Ιούνιο στους 60 NTU. Η τάση που καταγράφεται είναι πολύ ανοδική με τις τιμές σχεδόν να τριπλασιάζονται, αλλά αυτό έχει πολλές φορές καθαρά τοπικό – παροδικό χαρακτήρα που πιθανόν να οφείλεται σε θολούρα είτε λόγω αιωρούμενων στερεών είτε λόγω έκρηξης φυτοπλαγκτού.

Μελετώντας τις αυξομειώσεις των νιτρικών, παρατηρούμε ότι όσον αναφορά τις τιμές τους για το 2011, κυμάνθηκαν από 0,005 mg/l τον Αύγουστο, που ήταν και η χαμηλότερη τιμή μέχρι και 0,134 mg/l, καταγράφοντας την υψηλότερη τιμή τους τον Νοέμβρη (Εικ. 17). Κατά το έτος 2010 στο αντίστοιχο διάστημα μετρήσεων τα νιτρικά σημείωσαν τιμές που κυμάνθηκαν από 0,003 mg/l τον Μάιο μέχρι 0,06 mg/l τον Οκτώβρη. Γενικά οι συγκεντρώσεις των νιτρικών ιόντων $\text{NO}_2\text{-N}$ διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα και θεωρούνται ως μία πολύ ευμετάβλητη παράμετρος μεταξύ των νιτρικών και της αμμωνίας για να μπορέσουμε να αποφανθούμε με βεβαιότητα.

Τα νιτρικά ιόντα $\text{NO}_3\text{-N}$ (Εικ. 18), παρουσίασαν μια αυξητική τάση από τον Ιούνιο του 2011 όπου σημείωσαν το χαμηλότερο ποσοστό τους 0,05 mg/l, φτάνοντας στο μέγιστο τους τον Αύγουστο, καταγράφοντας τιμή 1,35 mg/l. Το 2010 τα νιτρικά ιόντα κυμάνθηκαν μεταξύ 0,26 mg/l και 0,8 mg/l όπου άγγιξαν την μέγιστη τιμή τους τον Νοέμβρη. Οι υψηλές συγκεντρώσεις των νιτρικών κατά την διάρκεια του καλοκαιριού του 2011, δικαιολογούνται απόλυτα, αν λάβουμε υπόψη την χαμηλή στάθμη της λίμνης. Επίσης παρατηρούμε μια αύξηση τους σε σχέση με τις τιμές του 2010. Τα νιτρικά ιόντα

βρέθηκαν σε υψηλά επίπεδα και κατά την διάρκεια του έτος 2007 καταγράφοντας τιμές από 0,88 mg/l μέχρι 4 mg/l.

Η συγκέντρωση των αμμωνιακών ιόντων NH₄-N παρουσίασε μια μείωση στις τιμές της το 2011 σε σχέση με τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις του 2010. Έτσι, το 2010 οι συγκεντρώσεις των αμμωνιακών διακυμάνθηκαν από 0,38 mg/l μέχρι 1,99 mg/l τους καλοκαιρινούς μήνες. Κατά το έτος 2011 τώρα, οι τιμές των αμμωνιακών ιόντων διατηρήθηκαν σε χαμηλά επίπεδα τους καλοκαιρινούς μήνες το οποίο οφείλεται στην ανάπτυξη του φυτοπλαγκτού που δεσμεύει άζωτο. Ενώ από τον Οκτώβρη που καταγράφηκε η χαμηλότερη τιμή του 0,029 mg/l, ξεκινούν οι διαδικασίες αποσύνθεσης της οργανικής ύλης και οι συγκεντρώσεις του οξυγόνου είναι χαμηλές, τα αμμωνιακά ιόντα αυξάνουν (Εικ. 19). Πράγματι, τον Νοέμβρη καταγράφηκε η υψηλότερη τιμή των αμμωνιακών η οποία έφτασε τα 0,661 mg/l, γεγονός το οποίο επιβεβαιώνεται από την πολύ χαμηλή συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου τον ίδιο μήνα.

Τα ορθοφωσφορικά άλατα κυμάνθηκαν το 2011 από 0,006 mg/l η ελάχιστη τιμή η οποία σημειώθηκε τον Ιούλιο, έως 0,180 mg/l η μέγιστη τιμή που σημειώθηκε τον Σεπτέμβριο, η οποία δικαιολογείται από την δυναμική των φυκών και την απελευθέρωση εσωτερικού φορτίου φωσφόρου υπό συνθήκες χαμηλής συγκέντρωσης οξυγόνου (Ματζαφλέρη 2007) (Εικ. 20). Το έτος 2010 οι τιμές των ορθοφωσφορικών κυμάνθηκαν από 0,07 mg/l που ήταν και η χαμηλότερη, φτάνοντας στο μέγιστο τους τον Ιούλιο με τιμή 3,17 mg/l.

Οι μετρήσεις της χλωροφύλλης-α (Chl-a) για το έτος 2011, κυμάνθηκαν μεταξύ 184,107 mg/m³ όπου σημείωσαν την χαμηλότερη τιμή τον Νοέμβρη και 381,180 mg/m³ τον Αύγουστο (Εικ. 21). Το 2010 οι τιμές της χλωροφύλλης-α διακυμάνθηκαν μεταξύ 77,970 mg/m³ ελάχιστη τιμή τον Νοέμβρη και 525,240 μέγιστη τον Ιούλιο.

Παρατηρούμε ότι ακολουθείται η ίδια εποχική διακύμανση με τα ποσοστά του 2011 να σημειώνουν ελαφριά πτώση, αλλά και μία ομοιομορφία στην κατανομή χωρίς ακραίες τιμές όπως καταγράφηκε το 2010. Σύμφωνα με τον Δείκτη Κατάστασης Ευτροφισμού (TSI) του Carlson (1977) που υπολογίστηκε για τη Κάρλα, βάση των μέσων τιμών των συγκεντρώσεων της χλωροφύλλης-α, για την περίοδο Ιουνίου του 2011 με Νοεμβρίου του 2011 και ο οποίος βρέθηκε 60,6 με την βοήθεια της εξίσωσης:

$$TSI(Chl-a)=10*[6-(2,04-0,68LnChl-a)/Ln2], \quad (3)$$

την κατάτασσει στις ευτροφικές λίμνες. Σε αντίθεση το 2010 σύμφωνα με την Papadimitriou *et al.* (2010) ο TSI ήταν 85,8 κατατάσσοντας την λίμνη στις υπερτροφικές. Οι τιμές της χλωροφύλλης που μετρήθηκαν το 2011 από τις αντίστοιχες του 2010, φαίνεται να είναι χαμηλότερες γεγονός που δεν πρέπει να μας καθησυχάζει καθώς μπορεί να είναι τυχαίες ή να μην επαναλαμβάνονται σε βάθος χρόνου.

Συγκρίνοντας τώρα, εποχικά τα αποτελέσματα των αναλύσεων από τον Ιούνιο του 2011 μέχρι και τον Νοέμβρη του 2011, όπως φαίνεται και από τα παραπάνω διαγράμματα, σε διάστημα δηλαδή 6 μηνών διαπιστώνουμε ότι η θερμοκρασία κυμάνθηκε από 5 βαθμούς η ελάχιστη που σημειώθηκε τον μήνα Νοέμβρη στο σταθμό 1 και η μέγιστη σημειώθηκε τον Ιούλιο στους 32,8 βαθμούς στον σταθμό 4 (Εικ. 29).

Το διαλυμένο οξυγόνο κυμάνθηκε από 9,25 mg/l η οποία ήταν και η μέγιστη στον σταθμό 3 και παρατηρήθηκε τον Αύγουστο, έως 2,36 mg/l στο σταθμό 1 τον μήνα Νοέμβρη (Εικ. 27). Τον Νοέμβρη η περιεκτικότητα του διαλυμένου οξυγόνου ήταν χαμηλή λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών που επικρατούσαν εκείνη την περίοδο. Οι τιμές του διαλυμένου οξυγόνου τον Ιούνιο και τον Ιούλιο δεν συμπεριλαμβάνονται στα

αποτελέσματα καθώς οι τιμές που ελήφθησαν ήταν λανθασμένες λόγω προβλήματος του οργάνου μέτρησης.

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC_w) παρουσίασε ομοιομορφία στις μετρήσεις (Εικ. 28), χωρίς ιδιαίτερες εποχικές διακυμάνσεις, με τιμές που κυμάνθηκαν από 2,40 mS/cm στον σταθμό 3 τον Σεπτέμβρη, η οποία είναι και η χαμηλότερη τιμή που καταγράφηκε, έως 3,21 mS/cm τον μήνα Σεπτέμβρη στον σταθμό 1.

Τα νιτρικά ιόντα (NO_3-N) παρουσίασαν μέγιστα και ελάχιστα ποσοστά κατά την διάρκεια της εξάμηνης παρακολούθησης. Ποσοστά πολύ μικρότερα του 0,10 mg/l σημειώθηκαν κατά τον μήνα Ιούνιο και στους 4 σταθμούς με την μικρότερη καταγραφή στον σταθμό 4, 0,02 mg/l. Τα μεγαλύτερα ποσοστά καταγράφηκαν τον μήνα Αύγουστο και στους 4 σταθμούς χωρίς ιδιαίτερες διακυμάνσεις ανά σταθμό, με τον σταθμό 1 να καταγράφει την μεγαλύτερη, 1,45 mg/l (Εικ. 23).

Οι συγκεντρώσεις των νιτρωδών ιόντων (NO_2-N), διατηρήθηκαν σε γενικές γραμμές σε χαμηλά επίπεδα. Τα χαμηλότερα σημειώθηκαν από τον Ιούλιο έως και τον Σεπτέμβρη, ενώ από τον Οκτώβρη παρατηρείται αυξητική τάση η οποία κορυφώνεται τον Νοέμβρη όπου καταγράφεται η υψηλότερη τιμή 0,190 mg/l. Η χαμηλότερη τιμή σημειώθηκε τον Αύγουστο 0,001mg/l στο σταθμό 2 (Εικ. 22).

Η συγκέντρωση των αμμωνιακών ιόντων (NH_4-N) διατηρήθηκε σε χαμηλά επίπεδα τους καλοκαιρινούς μήνες, σημειώνοντας ακόμα χαμηλότερες τους μήνες Σεπτέμβρη και Οκτώβρη. Η χαμηλότερη καταγράφηκε τον Οκτώβρη σημειώνοντας τιμή 0,021 mg/l στο σταθμό 4. Τον Αύγουστο παρότι παρατηρούμε χαμηλά ποσοστά, ο σταθμός 1 παρουσίασε μια ακραία τιμή καταγράφοντας συγκέντρωση 0,393 mg/l. Τα χαμηλά επίπεδα τιμών κατά τους καλοκαιρινούς μήνες οφείλονται πιθανόν από την δέσμευση του αζώτου από το φυτοπλαγκτόν που αναπτύσσεται. Τα υψηλότερα ποσοστά στις

συγκεντρώσεις των αμμωνιακών καταγράφηκαν τον Νοέμβρη με τον σταθμό 1 να σημειώνει και πάλι την υψηλότερη τιμή με 0,699 mg/l. Οι τιμές αυτές δικαιολογούνται από τα πολύ χαμηλά ποσοστά του διαλυμένου οξυγόνου τον μήνα Νοέμβρη (Εικ. 24).

Όπως διαπιστώθηκε και από τα παραπάνω τα ποσοστά των νιτρωδών στο συνολικό ανόργανο άζωτο (DIN, Dissolved Inorganic Nitrogen) ήταν τα λιγότερο σημαντικά. Τα νιτρώδη, δεν μπορούν να αξιολογηθούν εμπειριστατωμένα, γιατί είναι μια πολύ ασταθής κατάσταση μεταξύ των νιτρικών και των αμμωνιακών. Στον αντίποδα, τα ποσοστά των νιτρικών επικράτησαν καθώς συγκέντρωσαν το μεγαλύτερο ποσοστό στο συνολικό ανόργανο άζωτο, με δεύτερες τις συγκεντρώσεις των αμμωνιακών ιόντων. Σύμφωνα με την Papadimitriou *et al.* (2011) το αντίστοιχο διάστημα το έτος 2010 τα ποσοστά των αμμωνιακών ιόντων ήταν αυτά που επικρατούσαν στον συνολικό ανόργανο άζωτο, με τα νιτρικά να ακολουθούν και τα νιτρώδη να μην συγκεντρώνουν αξιόλογα ποσοστά στο ισοζύγιο. Όταν επικρατούν ποσοστιαία τα αμμωνιακά ιόντα έναντι των νιτρικών ενδεχομένως να έχουμε συνθήκες πολύ χαμηλών συγκεντρώσεων διαλυμένου οξυγόνου.

Τα ορθοφωσφορικά άλατα σημείωσαν τις χαμηλότερες τιμές τους τον μήνα Ιούλιο όπου καταγράφηκαν τιμές σχεδόν μηδενικές στους σταθμούς 3 και 4. Τον Σεπτέμβρη παρατηρήθηκαν τα υψηλότερα ποσοστά σε αμμωνιακά ιόντα με την τιμή στον σταθμό 3 να φτάνει τα 0,393 mg/l, τιμές οι οποίες δικαιολογούνται από την δυναμική των φυκών (Εικ. 25).

Η τιμή της χλωροφύλλης κυμάνθηκε από 166,8579 mg/m³ η οποία σημειώθηκε στον σταθμό 4 τον μήνα Νοέμβρη, έως 498,7158 mg/m³ τον μήνα Αύγουστο στον σταθμό 4. Γενικά οι συγκεντρώσεις της χλωροφύλλης δεν παρουσίασαν πολλές ακραίες τιμές και διατηρήθηκαν σε υψηλά επίπεδα κατά τους θερινούς μήνες (Εικ. 26).

Γενικά κατά την διάρκεια των δειγματοληψιών, το επίπεδο της στάθμης της λίμνης έπεφτε σταδιακά. Από τον Ιούνιο, όπου βρισκόταν σε υψηλό επίπεδο και τα νερά της λίμνης ήταν καθαρά, τον Ιούλιο η στάθμη άρχισε να πέφτει και τα νερά της λίμνης είχαν την εικόνα του ευτροφισμού, με μεγάλη συσσώρευση στις όχθες της λίμνης από παχύ πράσινο στρώμα. Τον Αύγουστο η στάθμη της λίμνης συνέχιζε την πτωτική της πορεία και τα ύδατα εμφάνιζαν σε διάφορους σταθμούς αυξημένα επίπεδα πράσινης βιομάζας (Εικ. 30), γεγονός που αποτυπώνεται και στις αναλύσεις, αφού ο Αύγουστος έδωσε τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις χλωροφύλλης-α.



Εικόνα 30: Εμφανείς συγκεντρώσεις πράσινης βιομάζας τον Αύγουστο στη Κάρλα.

Τον Σεπτέμβρη, η πτώση της λίμνης ήταν πολύ αισθητή, καθώς την εμφάνιση τους έκαναν και νησίδες στο κέντρο της λίμνης. Η παρουσία της πράσινης βιομάζας δεν ήταν τόσο εμφανής. Τον μήνα Οκτώβρη το επίπεδο της στάθμης της λίμνης συνεχίζει να παραμένει σε πολύ χαμηλά επίπεδα και παρατηρείται και πάλι το φαινόμενο των ρυπασμένων νερών με μεγάλη συσσώρευση στις όχθες και κυρίως στον σταθμό 2 και 4. Τον Νοέμβρη, παρότι τα νερά φαίνονταν να είναι διαυγή, το επίπεδο της στάθμης είχε πέσει αισθητά με την δημιουργία αρκετών νησίδων σε όλο το μήκος της λίμνης (Εικ. 40,41).



Εικόνα 40: Η στάθμη της λίμνης τον Σεπτέμβρη του 2011 με αισθητή πτώση.



Εικόνα 41: Η δημιουργία νησίδων σε όλο το μήκος της λίμνης Κάρλας τον Νοέμβρη του 2011.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μέσω του προγράμματος ArcGIS 10, εισήχθη ο χάρτης της ευρύτερης περιοχής της Ελλάδας, ο οποίος προέκυψε από τον διαδικτυακό τόπο του Κτηματολογίου Α.Ε., το οποίο βρίσκεται σε πιλοτική λειτουργία, από ορθοφωτογραφίες που προέκυψαν από φωτοληψίες περιόδου 2007 έως 2009 και περιλαμβάνουν το σύνολο της Ελληνικής Επικράτειας. Αφού πραγματοποιήθηκε η

απαραίτητη γεωαναφορά, ψηφιοποιήθηκε η ακτογραμμή της λίμνης Κάρλας και εισήχθησαν τα σημεία δειγματοληψίας με βάση τις συντεταγμένες τους.

Στην συνέχεια με το πρόγραμμα excel της Microsoft δημιουργήθηκε μια βάση στην οποία περιλήφθηκαν όλες οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν από τον Ιούνιο μέχρι τον Νοέμβριο του 2011.

Με το πρόγραμμα ArcMap και την επέκταση Spatial Analyst προέκυψαν οι παραπάνω ισοποσοτικοί – ισορροπτικοί δισδιάστατοι χάρτες της λίμνης Κάρλας.

Οι χάρτες εμφανίζουν την γεωγραφική κατανομή των πιο σημαντικών παραμέτρων που μετρήθηκαν στην λίμνη Κάρλα και οι οποίοι είναι: η θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$), το διαλυμένο οξυγόνο (DO, Dissolved Oxygen), η ηλεκτρική αγωγιμότητα (ECw), νιτρικά ιόντα ($\text{NO}_3 - \text{N}$), τα αμμωνιακά ιόντα ($\text{NH}_4 - \text{N}$), τα ορθοφωσφορικά ιόντα ($\text{PO}_4 - \text{P}$) και η χλωροφύλλη-α (Chl – a).

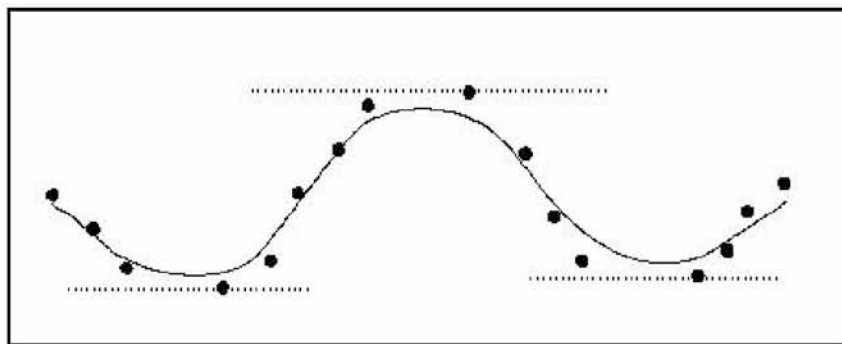
Η επιλογή στρατηγικά διασκορπισμένων θέσεων σημείων για συλλογή δειγμάτων και η χρήση μεθόδων χωρικής παρεμβολής για να οριστούν εκτιμημένες αξίες σε περισσότερες από μερικές θέσεις, καθιστά εύκολη και με μικρότερο κόστος την διαδικασία συλλογής δειγμάτων σε μία περιοχή μελέτης, όπου η επιλογή και η συλλογή δειγμάτων σε πολλές θέσεις δειγματοληψίας θα ήταν και δαπανηρή και χρονοβόρα.

Οι μέθοδοι παρεμβολής κάνουν κάποιες υποθέσεις για το πώς να καθορίσουν καλύτερα εκτιμημένες τιμές. Με βάση τα φαινόμενα, οι τιμές αντιπροσωπεύουν και τον καλύτερο τρόπο με τον οποίο τα σημεία δειγμάτων κατανέμονται και διαφορετικοί αλγόριθμοι χωρικής προσομοίωσης, θα παράγουν τις καλύτερες εκτιμήσεις σχετικά με τις πραγματικές τιμές. Ανεξάρτητα από την παρεμβολή που κάθε φορά επιλέγεται, όσο περισσότερα είναι τα σημεία εισαγωγής και όσο μεγαλύτερη είναι η κατανομή τους, τόσο πιο αξιόπιστα είναι τα αποτελέσματα.

Οι μέθοδοι που εφαρμόστηκαν είναι η μέθοδος της Αντιστρόφου Βαρύνουσας Απόστασης (IDW, Inverse Distance Weighted) και η μέθοδος των Σπληνών (Splines – RBF). Η μέθοδος Kriging, δεν επιλέχθηκε καθώς προηγούμενες μελέτες έδειξαν ότι δεν λειτουργεί λόγω μικρού αριθμού σταθμών δειγματοληψιών, αφού χρειάζεται τουλάχιστον 10 σταθμούς για να εκτελεστεί η μέθοδος.

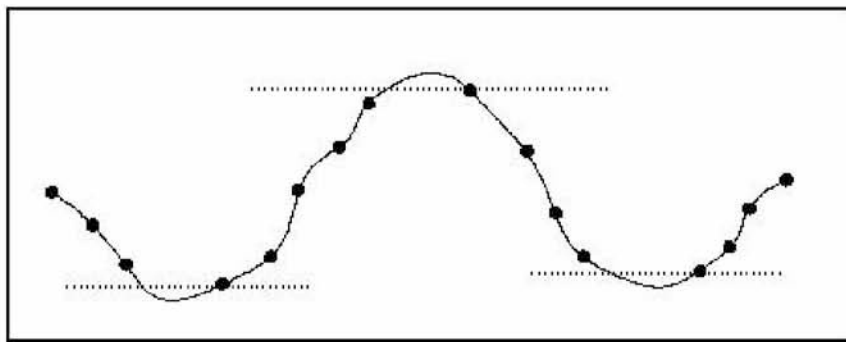
Η μέθοδος Αντιστρόφου Βαρύνουσας Απόστασης (IDW) υποθέτει ότι κάθε σημείο εισόδου έχει μια τοπική επίδραση που μειώνεται με την απόσταση. Υπολογίζει τα σημεία που βρίσκονται πιο κοντά στην επεξεργασία των κυττάρων καλύτερα από εκείνα που βρίσκονται πιο μακριά. Ένας συγκεκριμένος αριθμός σημείων ή όλα τα σημεία εντός συγκεκριμένης ακτίνας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να καθοριστεί η τιμή για κάθε θέση. Η χρήση της μεθόδου αυτής προϋποθέτει ότι η μεταβλητή που χαρτογραφείται μειώνει την επιρροή της όσο αυξάνει η απόσταση από τη θέση του δείγματος (Εικ. 42) (Childs 2004).

Η μέθοδος των Σπληνών (Spline Interpolation) εκτιμά τιμές χρησιμοποιώντας μια μαθηματική συνάρτηση η οποία ελαχιστοποιεί την συνολική κυρτότητα της επιφάνειας, με αποτέλεσμα την δημιουργία μιας πιο ομαλής επιφάνειας που περνάει ακριβώς μέσα από τα σημεία εισόδου.



Εικόνα 42: Η επιφάνεια παρεμβολής, που υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την τεχνική ενός κινητού μέσου, είναι μικρότερη από την τοπική μέγιστη τιμή και μεγαλύτερη από την τοπική ελάχιστη τιμή.

Ταιριάζει μια μαθηματική συνάρτηση με ένα συγκεκριμένο αριθμό από τα κοντινότερα σημεία εισόδου, ενώ διέρχεται από τα σημεία δειγματοληψίας (Johnston *et al.* 2001). Υπάρχουν δύο μέθοδοι Σπληνών: Η μέθοδος Τακτοποίησης, που δημιουργεί μια ομαλή, βαθμιαία αλλαγή στην επιφάνεια με τιμές που μπορεί να βρισκονται έξω από το φάσμα των σημείων δειγματοληψίας (Εικ. 43).



Εικόνα 43: Η εφαρμογή της μεθόδου τακτοποίησης των Σπληνών επιτρέπει σε μία επιφάνεια να υπέρ και υπό χτυπήσει τη περιοχή των δεδομένων των δειγμάτων.

Η μέθοδος Έντασης συντονίζει την ακαμψία της επιφάνειας σύμφωνα με τον χαρακτήρα του διαμορφωμένου φαινομένου. Στην μέθοδο αυτή όσο μεγαλύτερο το βάρος τόσο πιο εκτεταμένη η επιφάνεια που παράγεται. Τόσο η μέθοδος της τακτοποίησης όσο και της έντασης, μπορούν να βελτιωθούν περαιτέρω με τον καθορισμό του αριθμού των σημείων που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του κάθε κυττάρου παρεμβολής. Όσο περισσότερα τα σημεία εισόδου που έχουν καθοριστεί, τόσο περισσότερο κάθε κύτταρο επηρεάζεται από τα απομακρυσμένα σημεία και τόσο πιο ομαλή η επιφάνεια που προκύπτει.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1. Συμπεράσματα αποτελεσμάτων

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή, είχε πολλαπλούς στόχους, οι οποίοι επιγραμματικά περιγράφονται στα παρακάτω:

1. Τη συστηματική παρακολούθηση των φυσικοχημικών παραμέτρων της λίμνης Κάρλας σε μηνιαία βάση κατά την περίοδο Ιουνίου – Νοεμβρίου για το έτος 2011.
2. Το σχεδιασμό δισδιάστατων χαρτών με το σύστημα γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών (ArcMap 10) και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων που αφορούν το τέλος του καλοκαιριού και το τέλος του φθινοπώρου το 2011,
3. Την εξαγωγή συμπερασμάτων για την υφιστάμενη τροφική κατάσταση της λίμνης και τέλος,
4. Τη διατύπωση προτάσεων για την αειφορική διαχείριση της ποιότητας των υδάτων στην λίμνη Κάρλα.

Αρχικά, για τη λίμνη Κάρλα δεν υπήρχαν επαρκείς χρονοσειρές δεδομένων αφού ούτε ο Φορέας Διαχείρισης της Περιοχής Οικοανάπτυξης Κάρλας – Μαυροβουνίου – Κεφαλόβρυσου – Βελεστίνου είχε ξεκινήσει το πρόγραμμα τακτικής παρακολούθησης. Έτσι τα αποτελέσματα της παρούσης παρακολούθησης μας παρέχουν ενδεικτικές χρονοσειρές δεδομένων παρελθόντων ετών που προέρχονται από τους Papadimitriou *et al.* (2011) και Παπανίκο (2008).

Οι παραπάνω μελέτες χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσης μεταπτυχιακής διατριβής ώστε να μπορέσει να γίνει μια εποχική σύγκριση στα αποτελέσματα της τωρινής παρακολούθησης στο αντίστοιχο διάστημα μετρήσεων.

Οι παράμετροι που παρακολουθήθηκαν είναι το pH, το διαλυμένο οξυγόνο, η αγωγιμότητα, η θολερότητα, η θερμοκρασία, η αλατότητα, τα νιτρικά ιόντα, τα νιτρώδη ιόντα, τα ορθοφωσφορικά ιόντα και τέλος η χλωροφύλλη α. Εφτά θεωρήθηκαν οι βασικότεροι παράμετροι:

- I. Η θερμοκρασία επιφάνειας
- II. Το διαλυμένο οξυγόνο στην επιφάνεια
- III. Η αγωγιμότητα επιφάνειας
- IV. Τα νιτρικά ιόντα
- V. Τα αμμωνιακά ιόντα
- VI. Τα ορθοφωσφορικά ιόντα
- VII. Η χλωροφύλλη-α

Για τις εφτά αυτές παραμέτρους σχεδιάστηκαν δισδιάστατοι χάρτες με την βοήθεια των γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών (ArcMap 10). Στην συνέχεια κατασκευάστηκαν χάρτες ισοποσοτικών καμπυλών για τους μήνες Αύγουστο 2011 και Νοέμβρη 2011.

Δύο μέθοδοι προσομοίωσης εφαρμόστηκαν και συγκρίθηκαν μεταξύ τους. Η μία είναι η μέθοδος της Αντιστρόφου Βαρύνουσας Απόστασης (IDW – Inverse Distance Weight) και η δεύτερη είναι η μέθοδος των Σπληνών (Splines Interpolation). Οι αλγόριθμοι και των δύο μεθόδων είναι προσδιοριστικοί – αιτιοκρατικοί και ύστερα από σύγκριση μεταξύ τους προέκυψε ότι η μέθοδος Splines είναι η πιο αξιόπιστη γιατί οι χάρτες των ισοποσοτικών καμπυλών παρεμβολής δίνουν πιο ομοιόμορφη κατανομή στην επιφάνεια της λίμνης και διέρχονται εγγύτερα από τα σημεία μέτρησης. Η μέθοδος IDW δεν μπορεί να αποδώσει με αξιοπιστία τις ισοποσοτικές καμπύλες των τεσσάρων σημείων με αποτέλεσμα να μην γίνεται ομοιόμορφη η κατανομή τους και να μη

δημιουργούνται τα χαρακτηριστικά μάτια ταύρου (bull eyes) γύρω από τα σημεία δειγματοληψίας. Το γεγονός αυτό, μπορεί να οφείλεται στον αριθμό των σημείων δειγματοληψιών που είναι τέσσερα, καθώς σε σύγκριση με παλαιότερες μελέτες, όπως της Ματζαφλήρη (2007) η μέθοδος IDW λειτουργούσε καλύτερα για τρία και για πέντε σημεία αντίστοιχα. Αποτέλεσμα ήταν, στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή η ντετερμινιστική μέθοδος Splines να μας δώσει μια πιο σαφή αποτύπωση της κατανομής των ισοποσοτικών καμπυλών των φυσικοχημικών παραμέτρων που εξετάστηκαν για την λίμνη Κάρλα.

Η εξέταση των παραπάνω φυσικοχημικών παραμέτρων και των συγκεντρώσεων τους οδήγησε στα παρακάτω συμπεράσματα:

- Με βάση τις τιμές τις χλωροφύλλης-α και το Δείκτη Ευτροφισμού του Carlson ο οποίος βρέθηκε 60,6, η λίμνη κατατάσσεται στις ευτροφικές. Το 2010 ο αντίστοιχος δείκτης είχε βρεθεί 85,8 με αποτέλεσμα η λίμνη να κατατάσσεται στις υπερτροφικές.
- Τα ποσοστά των νιτρικών στον συνολικό ανόργανο άζωτο επικράτησαν την χρονιά του 2011 σε σχέση με τα αμμωνιακά γεγονός που μπορεί να προέρχεται από τις χαμηλές συγκεντρώσεις οξυγόνου.
- Τα αμμωνιακά ($\text{NH}_4\text{-N}$), διατηρήθηκαν σε χαμηλά επίπεδα, τα οποία βρίσκονται κάτω από το ανώτερο επιτρεπτό όριο στις λίμνες, που είναι το 1 mg/l για την διαβίωση των ψαριών των γλυκών υδάτων, σημειώνοντας μια ακραία τιμή για το 2011 στα 0,393 mg/l στο σταθμό 1.
- Το διαλυμένο οξυγόνο διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα αλλά δεν έχει φτάσει ποτέ στο επίπεδο ανοξικών συνθηκών.

- Το pH της λίμνης σημείωσε πτώση από τα προηγούμενα χρόνια με αποτέλεσμα να παραμένει μέσα στα φυσικά όρια των λιμνών που είναι pH 5,5 – 8,5.
- Η ηλεκτρική αγωγιμότητα, παρότι σημείωσε πτώση στις τιμές του 2011 σε σχέση με τα προηγούμενα έτη, διατηρείται ακόμη σε υψηλά επίπεδα καθώς ξεπερνάει το ανώτερο επιτρεπτό όριο που είναι 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ και η ελάχιστη τιμή της είναι 2400 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

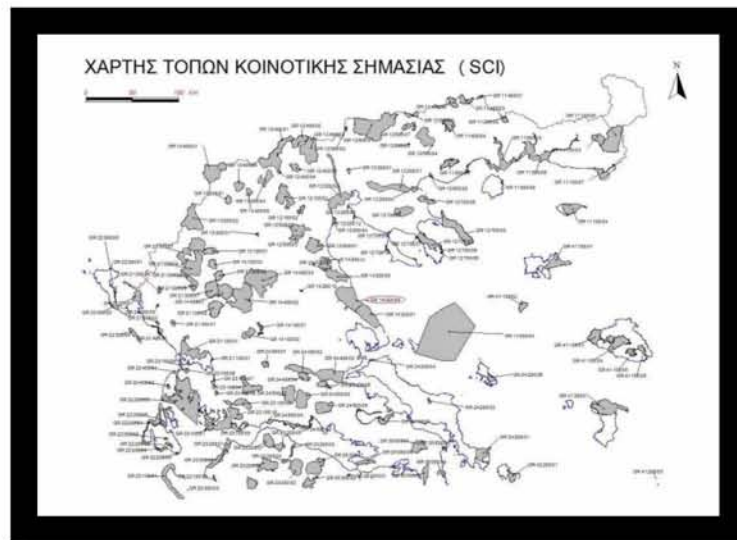
Σύμφωνα με τα παραπάνω καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η λίμνη της Κάρλας χαρακτηρίζεται ως μία ευτροφική λίμνη, με υψηλό φορτίο θρεπτικών σε σχέση με τον όγκο του νερού. Η υδάτινη στήλη παρουσιάζει μεγάλη θολερότητα η οποία αυξάνει με τα χρόνια το οποίο αποδεικνύει υψηλή βιολογική δραστηριότητα.

5.2. Προτάσεις

Λόγω της σημαντικής αξίας που έχει η διατήρηση της λίμνης Κάρλας έχει περιληφθεί στο δίκτυο των Ελληνικών Προστατευμένων Περιοχών. Επίσης, η λίμνη Κάρλα αποτελεί περιοχή Κοινοτικού ενδιαφέροντος του Πανευρωπαϊκού Οικολογικού Δικτύου Natura 2000 με τον κωδικό GR1420004 (Εικ. 72), καθώς θεωρείται πολύ σημαντικό οικοσύστημα και σε σχέση με την βιοποικιλότητα της αλλά και εξαιτίας του γεγονότος της ανασύστασης της στην περιοχή της πρώην λίμνης Κάρλας. Σύμφωνα και με την οδηγία 92/43 είναι αναγκαίο στην περιοχή αυτή να γίνει ειδικό διαχειριστικό σχέδιο, στο οποίο θα εξειδικεύονται συγκεκριμένες δράσεις και μέτρα διαχείρισης τα οποία θα στοχεύουν και θα πρέπει να διασφαλίζουν την καλή οικολογική κατάσταση διατήρησης των τύπων οικοτόπων (βλάστησης) και των ειδών χλωρίδας και πανίδας

που απαντούν στην περιοχή και αποτέλεσαν τους βασικούς λόγους για την ένταξη της περιοχής στο Δίκτυο.

Το ουσιαστικότερο εργαλείο για την λήψη αποφάσεων και την σωστή διαχείριση της λίμνης Κάρλας, αποτελεί η συστηματική παρακολούθηση της κατάστασης των υδάτων της λίμνης και του ευρύτερου φυσικού περιβάλλοντος. Η επαναλαμβανόμενη και συχνή παρακολούθηση καταμέτρησης διαφόρων φυσικοχημικών παραμέτρων, αλλά και κάποιων βιολογικών δεικτών είναι αναγκαίο να πραγματοποιείται σε αρκετά στρατηγικά σημεία στην λίμνη.



Εικόνα 72: Ο χάρτης του Πανευρωπαϊκού Οικολογικού Δικτύου Natura 2000 για τους Τόπους Κοινοτικής Σημασίας.

Ανάμεσα στις φυσικές, χημικές, βιολογικές και οικολογικές παραμέτρους που πρέπει να παρακολουθούνται με μετρήσεις διαφορετικής περιοδικότητας, υπάρχουν και κάποιες που μπορούν να παρακολουθούνται σε πραγματικό χρόνο και δίνουν μια γενικά ενδεικτική εικόνα της ποιότητας των υδάτων ανά πάσα στιγμή και οι οποίες μπορεί να

είναι το pH, η αγωγιμότητα, η επιφανειακή θερμοκρασία, το διαλυμένο οξυγόνο και η θολερότητα.

Οι παραπάνω παράμετροι παρακολούθησης, απαιτούνται και από την Οδηγία 2000/60 με βάση την κατευθυντήρια γραμμή της. Η οδηγία πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης δε βρίσκει εφαρμογή στην λίμνη Κάρλα καθώς επειδή δεν έχει ολοκληρωθεί η επανασύσταση της, δε θεωρείται υδάτινο σώμα (water body) αλλά ως υδρογεωμορφολογική μονάδα (hydrogeomorphic unit). Μόλις ολοκληρωθεί η ανασύσταση της λίμνης και η Οδηγία βρει εφαρμογή, η συστηματική παρακολούθηση θα είναι επιτακτικής ανάγκης να εφαρμοστεί.

Με κατάλληλη τεχνολογία, η οποία επιτρέπει την τηλεμετάδοση των δεδομένων και την ανάκτηση τους από οποιαδήποτε σημείο, είναι εφικτό να πραγματοποιούνται οι παραπάνω μετρήσεις. Η αυτογραφική παρακολούθηση μπορεί να βοηθήσει στη λήψη κατασταλακτικών ή προληπτικών μέτρων, όταν επεκταθεί από δίκτυο συλλογής δεδομένων, σε σύστημα ειδοποίησης, με την οριοθέτηση αποδεκτών τιμών των παραμέτρων στο λογισμικό το οποίο χρησιμοποιείται. Με την συλλογή και επεξεργασία των μετρήσεων, μπορεί να εκπονηθεί ειδικό πρόγραμμα μείωσης της ρύπανσης του νερού της λίμνης με καθορισμό κατευθυντήριων και οριακών τιμών ποιότητας νερού. Η επιλογή των παραμέτρων και των σημείων εγκατάστασης θέσεων σταθμών παρακολούθησης είναι αναγκαίο να γίνει βάση των δεδομένων και σε συνεργασία με τους φορείς της Τοπικής Αυτοδιοίκησης (Ψιλοβίκος, 2011).

Στην λίμνη Κάρλα, θα μπορούσαν να τοποθετηθούν δυο σταθμοί, στην νότια και ανατολική πλευρά της στα σημεία που δεν υπάρχουν αναχώματα, καθώς βρίσκονται σε απευθείας επαφή με την λίμνη και την εμπλουτίζουν με φορτία αζώτου και φωσφόρου από τις εκπλύσεις των καλλιεργούμενων εδαφών. Ένας ακόμα σταθμός στην ανατολική

και βόρεια πλευρά απέναντι από τον Συλλεκτήρα 3 και τέλος ένας σταθμός στην βόρεια και δυτική πλευρά μετά το αντλιοστάσιο έτσι ώστε να υπάρχει ένα δίκτυο συλλογής δεδομένων, οργανωμένο σε σύστημα τηλεμετάδοσης και ειδοποίησης. Με τον τρόπο αυτό οποιαδήποτε περιστατικό ρύπανσης από εξωτερική πηγή, θα έχει την άμεση δυνατότητα να αποδεικνύεται μέσω ενός δελτίου συναγερμού καθώς θα εντοπίζεται η οποιαδήποτε υπέρβαση στα αποδεκτά όρια.

Μέσω αυτού του δικτύου συστήματος εφαρμογής, και ενός συστήματος τηλεμέτρησης μέσω αυτόνομων ενεργειακά σταθμών, υπάρχει η δυνατότητα να παρακολουθούνται και να καταγράφονται οι ακόλουθοι παραμέτρων:

- ✚ Η στάθμη του νερού
- ✚ Η Θερμοκρασία
- ✚ Η ηλεκτρική αγωγιμότητα
- ✚ Η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου
- ✚ Το pH
- ✚ Η πυκνότητα του νερού
- ✚ Τα νιτρικά ιόντα
- ✚ Τα αμμωνιακά ιόντα
- ✚ Τα φωσφορικά ιόντα

Με βάση αυτή την εφαρμογή, θα συλλέγονται τα δεδομένα, οι χρονοσειρές αποτελεσμάτων, τα δελτία αξιολόγησης της ποιότητας σε εικοσιτετράωρη βάση και τα δελτία συναγερμών, όταν διαπιστώνεται η υπέρβαση των αποδεκτών ορίων. Με άλλα λόγια η εγκατάσταση των σταθμών σε κομβικά σημεία, μπορεί να δώσει πολύτιμη πληροφόρηση για τις διακυμάνσεις της ποιότητας των υδάτων, για τις περιοχές προέλευσης των ρυπαντικών φορτίων, και για το χρόνο εισροής τους στο υδάτινο

σύστημα. Όσο πιο πυκνό και εκτεταμένο είναι το δίκτυο των σταθμών μέσα στην λίμνη, τόσο πιο εποπτική και ακριβής είναι η παρακολούθηση της προέλευσης των ρυπαντικών φορτίων.

Οι παράμετροι που μετρούνται δεν είναι οι ίδιοι οι ρύποι, αλλά σχετίζονται με τους ρύπους που επιδρούν στην ποιότητα των υδάτων της λίμνης. Έτσι, απαραίτητο είναι ένα χρονικό διάστημα που από την μία πλευρά πρέπει να περιλαμβάνει, μια περίοδο αιχμής των ρυπογόνων δραστηριοτήτων και από την άλλη, να γίνει σε όσο το δυνατόν περισσότερα χρονικά σημεία η σύγκριση των αυτογραφικών μετρήσεων με πλήρεις χημικές αναλύσεις, ώστε να συσχετιστούν οι φυσικοχημικές παράμετροι με την σύσταση του νερού.

Η ερμηνεία και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων είναι αναγκαίο να ορίζεται από την ανάλογη κατηγορία αξιολόγησης ποιότητας του επιφανειακού νερού με στόχο πάντα την εξακρίβωση της οικολογικής κατάστασης της λίμνης και με στόχο την διατήρηση της καλής οικολογικής της κατάστασης.

Ένα τέτοιο σύστημα παρακολούθησης έπειτα από ένα χρόνο πλήρους πιλοτικής λειτουργίας του είναι σε θέση να δώσει πληροφορίες σχετικά με:

- Τα επίπεδα διακύμανσης των παραμέτρων ποιότητας υπό κανονικές συνθήκες και υπό συνθήκες πίεσης
- Την ταυτοποίηση των ρυπογόνων εστιών
- Την οικολογική κατάσταση της λίμνης κατά την χειμερινή περίοδο
- Την οικολογική κατάσταση της λίμνης κατά την καλοκαιρινή περίοδο όπου εμφανίζεται η άνθιση του φυτοπλαγκτού
- Την άμεση ειδοποίηση για οποιοδήποτε περιστατικό που δημιουργεί μια ραγδαία επιδείνωση των φυσικοχημικών παραμέτρων.

Βασικά, υπάρχουν δυο τρόποι με τους οποίους η βάση δεδομένων που δημιουργείται με ένα πρόγραμμα παρακολούθησης, μπορεί να αξιοποιηθεί. Σε ένα περιορισμένο αριθμό περιπτώσεων, οι αποφάσεις διαχείρισης, λαμβάνονται βασιζόμενες άμεσα στη μελέτη των αποτελεσμάτων της παρακολούθησης. Αυτές οι περιπτώσεις, μπορεί να είναι θέματα που αφορούν την δημόσια υγεία και ζητήματα προκαθορισμένων κριτηρίων ποιότητας.

Όμως τυπικά η χρήση των δεδομένων παρακολούθησης για την λήψη αποφάσεων είναι λιγότερο άμεση. Μια απλή μελέτη των δεδομένων από μόνη της δεν είναι αποτελεσματική, έτσι είναι αναγκαίο να κατανοηθεί η αλληλεπίδραση των σύνθετων διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα στο υδατικό οικοσύστημα της λίμνης και να προταθούν άμεσες διαχειριστικές ενέργειες όπως η δημιουργία κριτηρίων ποιότητας νερού. Τα δεδομένα είναι εφικτό να χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα ερευνών στήριξης αναλυτικών διεργασιών που σχεδιάζονται για να επιλύσουν ειδικά διαχειριστικά ζητήματα.

Η χρήση των δεδομένων παρακολούθησης μπορεί να οδηγήσει στην περαιτέρω ανάπτυξη χωρικών μοντέλων, όπως έγινε στην παρούσα εργασία με την βοήθεια του γεωγραφικού συστήματος πληροφοριών (GIS). Το μοντέλο θα αποτελέσει εργαλείο ανάλυσης το οποίο θα έχει την δυνατότητα πρόβλεψης της ανταπόκρισης του λιμναίου συστήματος σε διάφορα σενάρια πηγών ρύπανσης.

Με τον τρόπο αυτό, η συμπεριφορά του λιμναίου οικοσυστήματος σε τεχνικές απομάκρυνσης θρεπτικών ή τοξικών ουσιών, σημειακών ή μη σημειακών πηγών ρύπανσης, θα μπορεί να αποτιμηθεί και να εφαρμοστεί στη συνέχεια η πιο κατάλληλη τεχνική που μπορεί να επιλεγεί.

Η βάση των δεδομένων παρακολούθησης σε συνδυασμό με τα μοντέλα μπορεί να ποσοτικοποιήσει τη συνεισφορά των θρεπτικών τόσο από τις σημειακές όσο και από τις μη σημειακές πηγές ρύπανσης και στην συνέχεια να καθοριστούν οι περιορισμοί και οι κανόνες διαχείρισης.

Συμπερασματικά με τον σχεδιασμό και την ανάπτυξη ενός δικτύου συνεχούς ποιοτικής αλλά και ποσοτικής παρακολούθησης, προτείνεται αυτό να αποτελείται από πέντε ανεξάρτητους σταθμούς, οι οποίοι θα καταγράφουν μια σειρά παραμέτρων σε συνεχή βάση και θα απεικονίζουν την ποιοτική και ποσοτική κατάσταση της λίμνης. Οι καταγραφές θα μεταφέρονται μέσω τηλεπικοινωνιακού δικτύου σε πραγματικό χρόνο, σε προκαθορισμένους αποδέκτες-τελικούς χρήστες. Για τον καλύτερο σχεδιασμό σε πρώτη φάση θα ήταν προτιμότερο να συγκεντρωθούν υδρολογικά – υδρογεωμορφολογικά στοιχεία, χρήσεις γης, σημεία ρυπαντικής απειλής έτσι ώστε να προκύψουν οι καταλληλότερες θέσεις για την εγκατάσταση του δικτύου παρακολούθησης. Σε δεύτερη φάση υλοποίησης θα εγκατασταθεί το δίκτυο. Τα δεδομένα στην συνέχεια θα αποστέλλονται στους τελικούς χρήστες, οι οποίοι θα καθοριστούν και θα εκπαιδευτούν για επεξεργασία και αξιολόγηση. Μπορούν να προκύψουν δυναμικοί χάρτες όπου θα προσδιορίζονται οι ζώνες τρωτότητας και οι κυριότερες θέσεις ρυπαντικής απειλής.

Επίσης, εκτός από την παρακολούθηση και την αποτίμηση των αβιοτικών στοιχείων της ποιότητας του νερού, η παρακολούθηση της βιομάζας του φυτοπλαγκτού και της βιομάζας των μακρόφυτων είναι αναγκαία για την ταξινόμηση της οικολογικής κατάστασης της λίμνης. Η παρακολούθηση των πληθυσμών φυτοπλαγκτού γενικά βασίζεται στις μετρήσεις της βιομάζας, η οποία πετυχαίνεται με την μέτρηση της χλωροφύλλης-α αλλά και στην ταυτοποίηση των ειδών που την απαρτίζουν.

Η μέτρηση της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης-α μπορεί να προσδιοριστεί με τη μέθοδο της τηλεπισκόπισης μέσω δορυφόρου και το ίδιο μπορεί να γίνει για τον προσδιορισμό της εξάπλωσης των κοινοτήτων μακρόφυτων. Τα αποτελέσματα της τηλεπισκόπισης μπορεί να παρουσιαστούν με την χρήση των Γ.Σ.Π. Βέβαια με την μέθοδο της τηλεπισκόπισης δεν μπορεί να γίνει η ταυτοποίηση των ειδών και η σύνθεση της φυτοπλαγκτονικής κοινότητας. Η χλωροφύλλη-α είναι μια μέθοδος προσδιορισμού του φυτοπλαγκτού, καθώς υπάρχει σε όλα τα είδη. Όμως, το φυτοπλαγκτό περιέχει μια αναλογία επιπρόσθετων χρωματοφόρων ουσιών όπως οι καροτίνες και οι άλλες φυκοπρωτείνες πολλές από τις οποίες είναι ταξινομικά σημαντικές και για τις οποίες είναι αναγκαία περαιτέρω έρευνα. Γενικά η τεχνική της τηλεπισκόπισης είναι μια ευαίσθητη τεχνική παρακολούθησης των χωρικών και εποχικών αλλαγών της κατάστασης των κοινοτήτων των μακρόφυτων όπου επιτρέπει τη ταυτοποίηση της δυναμικής τους στα επιφανειακά στρώματα. Όσον αφορά τα βαθύτερα στρώματα είναι αναγκαίο να γίνονται δειγματοληψίες και εργαστηριακές μετρήσεις.

Οι χάρτες των δεδομένων που συλλέγονται μέσω των αυτογραφικών συστημάτων και αφορούν μικρό σχετικά αριθμό σε σταθμούς δειγματοληψίας, μπορούν να τοποθετηθούν στο Γ.Σ.Π., το οποίο είναι ένα εργαλείο αποτίμησης του τροφικού επιπέδου και της ποιότητας της λίμνης. Οι παραδοσιακές μέθοδοι συλλογής δεδομένων, αν και έχουν ακρίβεια, είναι δαπανηρές, χρονοβόρες και απαιτούν μεγάλη εργαστηριακή υποδομή. Όπου δεν υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας ενός πλήρους εξοπλισμένου εργαστηρίου, η χρήση τηλεμετρικών συστημάτων παρακολούθησης παρέχει συνεχόμενη ροή δεδομένων, η οποία μπορεί να αξιοποιείται άμεσα με το GIS. Το GIS έχει την δυνατότητα αποτίμησης της οικολογικής κατάστασης αλλά και της

πρόβλεψης της χωρικής εξάπλωσης των ρυπογόνων φορτίων με την χρήση μοντέλων παρεμβολής, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την διαχείριση της.

Ένα ακόμη πλεονέκτημα του Γ.Σ.Π. είναι η ταχύτητα του. Η εκτίμηση της οικολογικής κατάστασης της λίμνης μπορεί να θεμελιώνεται με την συλλογή ενός αριθμού παραμέτρων. Το Γ.Σ.Π. μπορεί να παρουσιάσει την διασπορά αυτών των παραμέτρων, αναλύοντας, αξιολογώντας και εξάγοντας σειρά συμπερασμάτων τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τις υπηρεσίες που λαμβάνουν αποφάσεις διαχειριστικών μέτρων.

Η παρουσία επίσης μικροκυστινών σύμφωνα με την Papadimitriou *et al.* (2011) στην λίμνη Κάρλα είναι πάνω από τα επιτρεπτά όρια που θεσπίζει ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (W.H.O) για το πόσιμο νερό κατά την διάρκεια των θερινών μηνών. Η συγκέντρωσή τους στην λίμνη Κάρλα επισημαίνει χαμηλό ρίσκο σε δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία.

Η παρουσία των μικροκυστινών στις προμήθειες του πόσιμου νερού και την άρδευση αποτελεί πιθανό κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία και στα γεωργικά προϊόντα τα οποία προορίζονται είτε για τα ζώα είτε για τον άνθρωπο. Στην Ελλάδα δεν υπάρχει νομοθεσία για την παρακολούθηση των κυανοβακτηρίων και των κυανοτοξινών, όπως σε άλλες χώρες οι οποίες ακολουθούν τις οδηγίες του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας.

Σε ότι αφορά τον έλεγχο του ευτροφισμού, μπορεί να γίνει με περιορισμό και έλεγχο του είδους και των ποσοτήτων των θρεπτικών αλάτων και ιδίως του φωσφόρου, ίσως αποτέλεσμα τόσο της μείωσης του όγκου του νερού, όσο και της απελευθέρωσης του από το πλούσιο ίζημα της λίμνης που κυρίως λαμβάνει χώρα σε υψηλές θερμοκρασίες (Papadimitriou *et al.* 2011).

Η λίμνη Κάρλα τώρα τροφοδοτείται με μεγάλες ποσότητες νερού, από τον Πηνειό που χαρακτηρίζεται από συνθήκες ευτροφισμού. Επιπλέον το ποτάμι ξεχειλίζει περιστασιακά και τα πλημμυρικά νερά τα οποία είναι πλούσια σε θρεπτικά συστατικά χύνονται στην Κάρλα. Το πρόβλημα αυτό θα λυθεί με την εκτροπή του Αχελώου ο οποίος θα εφοδιάζει την λίμνη με μεγάλες ποσότητες ύδατος. Επίσης θα πρέπει να ληφθούν μέτρα ώστε το νερό που έρχεται από τον Πηνειό να έρχεται από υψηλότερο σημείο με αποτέλεσμα το επιβαρυνόμενο φορτίο που εισέρχεται στην λίμνη να είναι μειωμένο.

Όπως έχει προκύψει μελετώντας άλλες λίμνες, είναι φανερό, ότι αρκετά χρόνια μπορεί να είναι αναγκαία να μεσολαβήσουν, μεταξύ της περιόδου που επιτεύχθηκε η μείωση των εισερχόμενων φορτίων και του χρόνου που θα είναι ορατή μια μείωση της βιομάζας του φυτοπλαγκτού. Καθόλη τη διάρκεια του απαιτούμενου αυτού χρόνου, είναι αναγκαίο να γίνεται μόνιμη παρακολούθηση των φορτίων του φωσφόρου, και της συγκέντρωσης του στη λίμνη, της βιομάζας του φυτοπλαγκτού και ιδιαίτερα των κυανοφυκών.

Συνήθως, μια τάση μείωσης της συγκέντρωσης του ολικού φωσφόρου στην λίμνη είναι η πρώτη ένδειξη απόκρισης στην μείωση των εξωτερικών φορτίων. Όμως χρειάζεται να περάσουν χρόνια για να επιτευχθεί μια μείωση του ολικού φωσφόρου κάτω από το όριο που είναι αποτελεσματικό για μείωση της βιομάζας του φυτοπλαγκτού.

Οι συνθήκες ευτροφισμού μαζί με τις υψηλές συγκεντρώσεις μικροκυστίνων που έχουν βρεθεί στην λίμνη Κάρλα αποδεικνύουν, ότι η παρακολούθηση της ποιότητας των υδάτων και των μικροκυστινών παράλληλα, είναι επιτακτική ανάγκη

προκειμένου να προστατέψουμε το ανακατασκευασμένου οικοσυστήματος και να αποφύγουμε πιθανές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία.

Το έργο αποκατάστασης της λίμνης Κάρλας, περιλαμβάνει μελλοντικές χρήσεις και υπηρεσίες, όπως είναι η άρδευση, η παροχή πόσιμου νερού σε συνδυασμό με την οικολογική λειτουργία των δραστηριοτήτων του υδροτόπου και της αναψυχής. Εφόσον, τα ύδατα της λίμνης εμφανίζουν τα παραπάνω χαρακτηριστικά προσοχή θα πρέπει να δοθεί στη παρακολούθηση της ποιότητας του νερού σε επίπεδο λεκάνης απορροής καθώς και στα λιμνολογικά χαρακτηριστικά του νέου οικοσυστήματος

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

A. Ελληνική Βιβλιογραφία

1. Αντωνόπουλος Β. (2010) Υδραυλική περιβάλλοντος και ποιότητα επιφανειακών υδάτων, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, σελ 409
2. Αντωνόπουλος Β. (2011) Μοντέλα και προσεγγίσεις προσομοίωσης της λειτουργίας των λιμνών. Καταλληλότητα για τις Πρέσπες. Ελληνική Υδροτεχνική Ένωση, Φορέας Διαχείρισης Πάρκου Πρεσπών, 30 Σεπτεμβρίου 2011, Πρέσπες
3. Ζαλίδης Γ. Χ., Ξ. Π. Δημητριάδης, Σ. Α. Χατζηγιαννάκης (1995) Ο ιδεότυπος της τέως λίμνης Κάρλας - Ως βάση αξιολόγησης των προταθείσων λύσεων κατασκευής του ομώνυμου ταμιευτήρα. Μουσείο Γουλανδρή Φυσικής Ιστορίας - Ελληνικό Κέντρο Βιοτόπων-Υγροτόπων.
4. Κίτσιου Δ. (2005) Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών. Εργαστηριακές Ασκήσεις, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Τμήμα Επιστημών της Θάλασσας, Μυτιλήνη 2005, σελ. 38
5. Κουτσόπουλος Κ. (2005) Γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών και ανάλυση χώρου, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, σελ. 401
6. Ματζαφλήρη Ν. Α. (2007) Χωρική προσομοίωση της ποιότητας των υδάτων της λίμνης Καστοριάς. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών, Τμήμα Γεωπονίας, Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
7. Μουστάκα Ε. (2002) Διαχείριση υδατικών πόρων της υπό ανασύστασης Λίμνης Κάρλας με χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών. Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, σελ.
8. Μπαρτζώκα – Τσιόμπρα Μ., Ψύλλος Ι. (2011) Ιστορική αναδρομή της υπό επανασύσταση λίμνης Κάρλας και επιχειρηματικό πλάνο για την ανάδειξη της περιοχής. Διπλωματική εργασία. Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, σελ. 256
9. Παναγιωτίδης Π. (2008) Τύποι υδάτινων οικοσυστημάτων. Επιστημονικές σημειώσεις, Διατμηματικό πρόγραμμα σπουδών, Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
10. Παπαρηγορίου Σ. (2010) Σχεδιασμός και εφαρμογή συστήματος παρακολούθησης ποιότητας επιφανειακών και υπόγειων νερών, σύμφωνα με τις Οδηγίες της Ε.Ε. Προσυνεδριακή HELECO, Περιφερειακό Τμήμα Ηπείρου ΤΕΕ. Ιωάννινα, Μάρτιος 2010.
11. Παπανίκος Ν. (2008) Ολοκληρωμένη διαχείριση των υδατικών πόρων στην υπό επανασύσταση λίμνη Κάρλα Θεσσαλίας. Μεταπτυχιακή διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
12. Παπανίκος Ν., Ψιλοβίκος Αρ., Σαπουντζής Μ., Ματσίωρη Σ. (2009) Τα έργα επανασύστασης και λειτουργίας της λίμνης Κάρλας (Θεσσαλία) και ο πολλαπλός σκοπός της. Πρακτικά του κοινού Συνεδρίου ΕΥΕ – ΕΕΔΥΠ, Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Πόρων σε Συνθήκες Κλιματικών Αλλαγών, Τόμος Ι, σελ. 59 – 66, Βόλος, Μάιος 2009.
13. Τζατζιος Γ. (2010) Λίμνη Κάρλα: Παρελθόν, Παρόν και Μέλλον. Προπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, σελ. 139

14. ΥΠΕΧΩΔΕ (2002). Γενική Διεύθυνση Περιβάλλοντος, Διεύθυνση Περιβαλλοντικού Σχεδιασμού, Τμήμα Διαχείρισης Φυσικού Περιβάλλοντος, Ειδική Περιβαλλοντική Μελέτη Κάρλας – Μαυροβούνιου – Κεφαλόβρυσου-Βελεστίνο, Τεύχος I & II, Αθήνα 2002.
15. Ψιλοβίκος Α. (2005) Η συμβολή της παρακολούθησης στην αιεφορική διαχείριση και την πρόληψη περιβαλλοντικών κινδύνων στο διασυνοριακό ποταμό Νέστο. Η προοπτική της εφαρμογής της Οδηγίας 2000/60. Υδροτεχνικά 15: 87-102.
16. Ψιλοβίκος Α. (2011) Έρευνα τεκμηρίωσης συστήματος παρακολούθησης και διαχείρισης λίμνης Καστοριάς. Ερευνητικό Πρόγραμμα, Φορέας Ανάθεσης Αναπτυξιακή Δυτικής Μακεδονίας – ΑΝ.ΚΟ. Α.Ε., Επιτροπή Ερευνών Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
17. Ψιλοβίκος Αντ. (1996) Εγγειοβελτιωτικά έργα και επιπτώσεις στο περιβάλλον. Πρακτικά 2^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου με τίτλο: Εγγειοβελτιωτικά έργα, Διαχείριση Υδατικών Πόρων, Εκμηχάνιση Γεωργίας, Τόμος Α, Σελ. 417 – 428, Λάρισα, Απρίλιος 1996.
18. Ψιλοβίκος Αρ., Φιλίππου Χρ., Μαργώνη Σ., Ματζαφλέρη Ν., Κούγκολος Αθ., (2006) Σύγκριση δυο αλγορίθμων χωρικής προσομοίωσης των ποιοτικών παραμέτρων των υδάτων της Λίμνης της Καστοριάς με τη χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών». Πρακτικά του 1ου Πανελληνίου Συνεδρίου με τίτλο : «Μονάδες Επεξεργασίας υγρών αποβλήτων μικρής κλίμακας», σελ. 25 – 32, Πορταριά Πηλίου.

B. Ξένη Βιβλιογραφία

19. Alikas K., Kangro K., Reinart A. (2010) Detecting cyanobacterial blooms in large north European lakes using the Maximum Chlorophyll Index. *Oceanologia*, 52 (2), 2010. Pp. 237-257.
20. Ananiadis CI. (1956) Limnological study of Lake Karla. *Bulletin Institute Oceanography* 1083:1-19.
21. Antonopoulos V., Gianniou S. (2003) Simulation of water temperature and dissolved oxygen distribution in Lake Vegoritis, Greece. *Ecological Modeling*, 160: 39 – 53
22. APHA, AWWA, WPCF (2000) Standard methods for the examination of water and wastewater, 20th edn. American Public Health Association, Washington DC.
23. Carlson R. (1977) A trophic state index. *Limnology and Oceanography*, Volume 22, Issue 2 (Mar., 1977), 361 – 369.
24. Chalkidis I., Papadimos D., Mertzianis Ch. (2004) Water quality and hydrological regime monitoring network. Greek Biotopo/Wetland Centre (EKBY). Thermi, Greece. 21p.
25. Childs C. (2004) Interpolating Surfaces in ArcGIS Spatial Analyst. Esri Education Services, ArcUser, July – September 2004.
26. ESRI, ARC-VIEW, (1996) Advanced Spatial Analysis using raster and vector data.
27. European Community (2000) Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the council of 23 October 2000 establishing a framework for the

- community action in the field of water policy. In official journal of the European Communities, 22-12-2000, L 327/1-72.
28. Froebrich J. (2005) New challenges in lake and river monitoring. *Freshwater Forum* 23 (2005), 155-165.
 29. Gerakis P.A. (1992) Conservation and management of Greek wetlands. *Proceedings of a Greek Wetlands Workshop held in Thessaloniki*.
 30. Gerakis P.A., Koutrakis E.T. (1996) *Greek Wetlands*. Greek Center for Biotopes – Wetlands (EKBY), Athens, Greece.
 31. Heinonen P., Ziglio G., Van der Beken A. (2000) Hydrological and limnological Aspects of Lake Monitoring. p 4-5, 212-214, 317-319.
 32. Hillier A. (2011) *Manual for working with ArcGIS 10*. University of Pennsylvania, School of Design, January 2011.
 33. Johnston K., Ver Hoef J.M., Krivoruchko K., Lucas N. (2001) *Using ArcGIS Geostatistical Analyst*, ESRI, United States of America, pp 306.
 34. Kokkinos K., Loukas A. (2010) Collaborative migration, coupling and simulation of water resources models through OpenMI. *Workshops on Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises*. DOI 10.1109/WETICE.2010.32.
 35. Koponen S. (2006) Remote sensing of water quality for Finnish lakes and coastal areas. Helsinki University of Technology, Department of Electrical and Communications Engineering, Laboratory of Space Technology, REPORT 67.
 36. Kristensen P., Bogestrand J. (1996) *Surface water quality monitoring*. European Topic Center on Inland Waters. National Environmental Research Institute, Denmark 1996.
 37. Loukas A., Mylopoulos N., Vasiliades L., Tarnanas H., Polykretis J., Dimitriou A. (2005) Sustainable water resources management in Pinios river and lake Karla basins, Thessaly, Greece. 6th International Conference. Menton, 7 – 10 September 2005.
 38. Loukas, A., Mylopoulos, N., Vasiliades L. (2007) A modeling system for the evaluation of water resources management scenarios in Thessaly, Greece. *Water Resources Management*, 21, 1673 –1702.
 39. MacKay M.D., Neale P.J., Arp C.D., De Senerpont Domis L.N., Fang X., Gal G., Johnk K.D., Kirillin G., Lenters J.D., Litchman E., MacIntyre S., Marsh P., Melack J., Mooij W.M., Peeters F., Quesada A., Schladow S.G., Schmid M., Spence C., Stokes S.L. (2009) Modeling lakes and reservoirs in the climate system. *Limnology and Oceanography*, 54(6, part 2), 2009, 2315-2329.
 40. Mallet J-R. (2002) *Geomodeling*. Applied Geostatistics series, Oxford University Press, New York, pp 600.
 41. Matzafleri N., Psilovikos Ar., Blanta A. (2009) Water quality monitoring and modeling in lake Kastoria, using GIS. *Assessment and Management of Pollution Sources*. *Water Resources Management*, DOI 10.1007/s11269-009-9431-4.
 42. Mays L. (1966) *Water resources handbook*. McGraw – Hill, United States, pp: 1100.
 43. Mladenov N., Strzepek K., Serumola O.M. (2005) Water quality assessment and modeling of an effluent-dominated stream, the Notwane River, Botswana. *Environmental Monitoring and Assessment* (2005) 109:97-121; DOI: 10.1007/s10661-005-5842-8.

44. Moustaka E., Mylopoulos N., Loukas A. (2002) Assessment of the restored lake Karla operation under different hydrological and water demand scenarios. Proceedings of the 6th International Conference of Protection and Restoration of the Environment; July 1 –July 5; Skiathos, Greece pp: 207-215.
45. Odermatt D., Heege T., Nieke J., Kneubuhler M., Itten K. (2008) Water quality monitoring for lake constance with a physically based algorithm for MERIS Data. *Sensors* 2008, 8, 4582-4599; DOI: 10.3390/s8084582.
46. Oikonomou A., Katsiapi M., Berillis P., Moustaka-Gouni M., Kormas K.A. (2010) Microbial gangs are taking over the water column of a reconstructed lake. 14th International Conference on Harmful Algal Blooms, Crete, 01-05/11/2010
47. Papadimitriou Th., Stampouli Z., Kagalou If. (2011) Preliminary results on the cyanotoxicity in the "new" Lake Karla (Thessaly-Greece). 12th International Conference on Environmental Science and Technology, Rhodes, Greece.
48. Psilovikos Ar., Margoni S., Psilovikos Ant. (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*, Vol. 116, No 1 – 3, pp 543 – 562.
49. Sidiropoulos P., Folia S., Mylopoulos N., Loukas A. (2008) «A coupled surface hydrology – lake – groundwater modeling framework for the lake Karla basin», PRE9: Protection and Restoration of the Environment, Kefalonia, Greece.
50. Stefan H.G., Hondson M., Fang X. (1993) Lake water level and water quality of lakes macro prespa and ochrid using radar altimetry and MERIS data. Proc. of the 2nd MERIS/(A)ATSR User Workshop, Frascati, Italy (ESA SP – 666, Noember 2008)
51. UN/ECE Working Group on Monitoring and Assessment (2003) Guidelines on monitoring and assessment of transboundary and international lakes. Part B: Technical guidelines. Finnish Environment Institute, Helsinki 2003.
52. United States Environmental Agency (USEPA) (2000) Nutrient criteria technical guidance manual lakes and reservoirs. Office of water, Office of Science and Technology, USEPA, Washington, D.C. EPA-822-B00-001.
53. Usali N., Ismail M.H. (2010) Use of remote sensing and GIS in monitoring water quality. *Journal of Sustainable Development*, Vol. 3, No. 3; September 2010.
54. Vasiliades L., Loukas A., Patsonas G. (2009) Evaluation of a statistical downscaling procedure for the estimation of climate change impacts on droughts. *Natural Hazards and Earth System Sciences* (9) pp 879-894.
55. W.H.O. (2003) Algae and cyanobacteria in fresh water. In: Guidelines for safe recreational water environments. Vol. 1: Coastal and fresh waters. World Health Organization, Geneva, Switzerland, pp. 136–158.
56. Wetzel R.G. (2006). *Λιμνολογία: Λιμναία και Ποτάμια Οικοσυστήματα*. Επιμέλεια μετάφρασης: Αθηνά Οικονόμου-Αμίλλη. Κωσταράκη Εκδόσεις, Αθήνα 2006.
57. Wisconsin DNR (2004) Water quality in Lake Winnebago Pool. A report prepared by the Wisconsin Department of Natural Resources in cooperation with the University of Wisconsin Extension and the Poygan Sportsmen's Club. DNR Publication Number FH – 229 – 04.

58. Zalidis G., Gerakis A. (1999) Research evaluating sustainability of watershed resources management through wetland functional analysis. *Environmental Management* Vol. 24, No. 2.
59. Zalidis G., Takavakoglou V., Panoras A., Bilas G., Katsavouni S. (2004) Re-establishing a sustainable wetland at former Lake Karla, Greece, using Ramsar restoration guidelines. *Environmental Management* 34:875-886.

C. Ηλεκτρονική Βιβλιογραφία

60. <http://www.boebes-karla.gr/sites/03.html> (Πρόσβαση 17/12/2010)
61. <http://www.fdkarlas.gr/history.htm> (Πρόσβαση 17/12/2010)
62. <http://www.e-karla.com/history/history.html> (Πρόσβαση 12/1/2011)
63. http://www.ekby.gr/ekby/el/EKBY_Natura2000_el.html (Πρόσβαση 12/1/2011)
64. <http://changinglandscapes-volos2011.blogspot.com/p/lake-karla.html>(Πρόσβαση 17/1/2011)
65. <http://www.karlanews.com/?cat=67> (Πρόσβαση 17/1/2011)
66. http://hellasga.com/gallery/v/gxenopoulos/C_GR/101_1250+Lake+Karla.JPG.html (Πρόσβαση 17/1/2011)
67. <http://www.usgs.gov/> (Πρόσβαση 20/1/2011)

7. ABSTRACT

This master thesis, which was held within the framework of the Postgraduate Program, at the University of Thessaly, by the Board of Agriculture, Ichthyology and Aquatic Environment, aimed initially to understand some basic meanings. While some basic life forms thrive even in polluted water, most organisms require access to water that is relatively clean. The quality of surface waters is affected by the type and the quantity of various suspended and dissolved substances. Some of the substances occur naturally while others originate from human activities.

Monitoring water quality of lakes is an integral part of the management of water resources. Ensures the sustainable use of water and allows the detection of the effects of anthropogenic influences. Lake monitoring may provide early warning signs of ecosystem degradation resulting from contaminant inputs, nutrient addition, sediment runoff, and overuse of the resource. By monitoring the physical, chemical, and biological status of a lake, changes to many aspects of the ecosystem can be detected quickly, and hopefully, harmful impacts can be eliminated before their consequences become unmanageable.

The monitoring of the quality of water in lakes, coastal areas and rivers is required by national laws and directives of the European Union. The main objective of these regulations is to prevent and control the pollution of the environment. Environmental monitoring is one of the methods that contribute to reaching this goal. The Water Framework Directive 2000/60/EC of the European Union, advocates in this policy, by trying to achieve “good quality status”, for all water bodies by 2015.

The simulation of lakes is a widely used and increasingly popular method for studying complex systems. The water quality models, find application in various fields

such as development of action plans, the calculation of the contribution of different factors on the change in water quality, in the approach of a future development and how these will impact on water resources and, finally, for scientific purposes.

Subsequently, the objective of this master thesis, was seasonally monitoring, focusing on physicochemical and biological parameters in selecting sampling – stations in Lake Karla. Lake Karla or Voiviis, as it was known in antiquity, was the second largest wetland in Greece. A number of harmful effects, as was the variation in lake level, the extensive flooding in the area, malaria as a scourge and others, led to the total drainage of the lake in 1962. The terrible consequences that followed was so social, as it was environmental. As a result, was to reconstruct a reservoir 38.000 kilometers in the lower part of the former Lake Karla, which is currently in the process of refilling.

Then followed, the results that came from the measurements were inserted in a GIS environment and the distribution of the parameters was figured in two dimensioned maps. Based on the results, a number of conclusions deriving, that concerns the seasonal and spatial variability, of the concentrations of physicochemical parameters.

For the protection of the lake, a series of proposals put forward, with the main need to work out a system of systematic monitoring of water quality by measuring key parameters in situ and via telemetry channels for immediate intervention in the ecosystem in the case of extreme events. The new Lake Karla is a very important wetland, not only because of the re – establishment in the former Lake Karla, but also for the use that intended, hence requires direct monitoring of abiotic and biotic parameters.

Key words: Lake Karla, water quality, monitoring, simulation model, sustainable management.