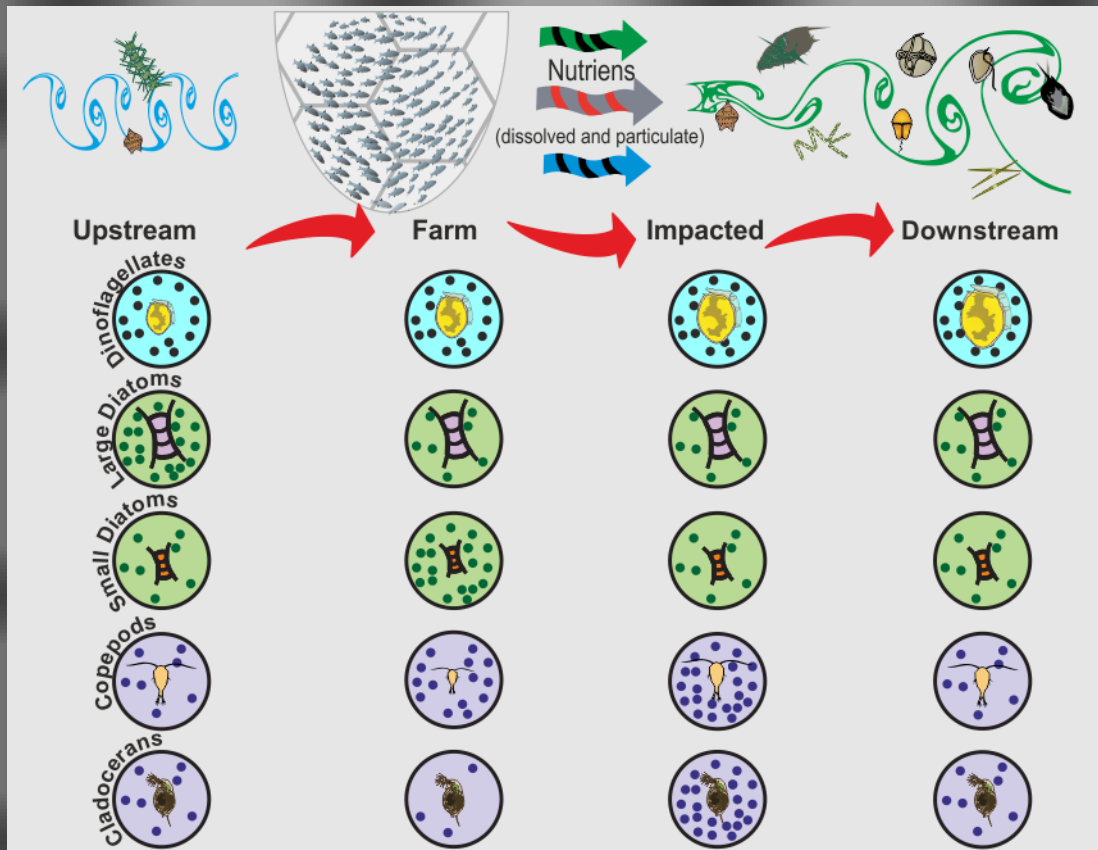


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΛΟΓΙΑΣ

Απόκριση των πλαγκτονικών κοινοτήτων στην προσθήκη θρεπτικών: Εποχιακή μελέτη στο πεδίο και εφαρμογή μαθηματικών μοντέλων

Plankton community response to nutrient enrichment, a field and modeling study



Τατιάνα Μ. Τσαγκαράκη

Διδακτορική διατριβή

Ιούνιος 2013

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΛΟΓΙΑΣ

Απόκριση των πλαγκτονικών κοινοτήτων στην προσθήκη θρεπτικών:
Εποχιακή μελέτη στο πεδίο και εφαρμογή μαθηματικών μοντέλων
Plankton community response to nutrient enrichment, a field and modeling
study

Τατιάνα Μ. Τσαγκαράκη
Διδακτορική διατριβή
Ιούνιος 2013

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή:

Καρακάσης Ιωάννης
Πήττα Παρασκευή
Λύκα Κωσταντία

Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή:

Καρακάσης Ιωάννης
Πήττα Παρασκευή
Λύκα Κωσταντία
Κεντούρη Μαρουδιώ
Πετυχάκης Γεώργιος
Παπαθανασίου Ευάγγελος
Ζερβάκης Βασίλειος

Πρόλογος

Η πορεία μου σε αυτήν την διατριβή δεν ήταν αυτή που περίμενα, δηλαδή ρόδινη, αλλά συζητώντας με υποψήφιους διδάκτορες διαπίστωσα ότι ο καθένας στην διατριβή του φέρνει και χάνει κάτι από τον εαυτό του, όπως σε πολλές δουλειές που κάνουμε. Νόμιζα ότι το διδακτορικό είναι μια μοναχική διαδικασία, και είναι σε πολλά σημεία, αλλά παράλληλα συνειδητοποιώ ότι όσο μοναχική και να ήταν, η παρουσία και η συμβολή πολλών ανθρώπων ήταν καταλυτική.

Οι άνθρωποι που έχουν λιγότερη σχέση με την διατριβή είναι οι γονείς μου, παρόλα αυτά τους ευχαριστώ πρώτους και καλύτερους που μου έδωσαν όλες τις ευκαιρίες στην ζωή μου να κάνω αυτό που ήθελα. Με έμαθαν ανάμεσα στα άλλα να είμαι ανεξάρτητη, να έχω το θάρρος της γνώμης μου και να μην κάνω πίσω παρά μόνο αν είναι επιλογή μου. Οι φίλοι μου θα σχολιάσουν ότι αυτά αποτελούν και πηγή μερικών από τα πολλά ελαττώματά μου, αλλά φυσικά θα τους αγνοήσω και θα πω ότι αυτά τα στοιχεία με βοήθησαν να ολοκληρώσω την δουλειά αυτή, έστω και με καθυστέρηση...

Αυτός που με έβαλε πρώτος στην διαδικασία να σκεφτώ το διδακτορικό είναι ο Γ. Πετυχάκης, ο οποίος με κάλεσε μια μέρα στο γραφείο του και μου είπε πως στο πρόγραμμα από το οποίο πληρωνόμουν υπάρχει δυνατότητα να κάνω ένα διδακτορικό. Δεν ξέρω ποιος από τους δυο μας το μετάνιωσε πρώτος, αλλά ο Γιώργος σαν συνεργάτης και φίλος με στηρίζει έκτοτε. Έχει αφιερώσει πολλές ώρες για να μου μάθει πράγματα, να με βοηθήσει να καταλάβω αλλά και να ακούσει τις ανησυχίες και τους προβληματισμούς μου (την γκρίνια δηλαδή). Επίσης μου έχει μεταφέρει, λίγο, την μεθοδικότητα του και την σημασία στην λεπτομέρεια. Μπορεί να μην εφαρμόζω πλήρως αυτά που έχω μάθει δουλεύοντας μαζί του, κάποια στιγμή όμως μπορεί και να τα καταφέρω. Του οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ και εύχομαι να μπορέσω να του ανταποδώσω σύντομα τον χρόνο και κόπο που έχει επενδύσει στην «περίπτωσή» μου.

Επίσης σημαντική ήταν η συμβολή του «συγκάτοικου», καλού φίλου και συνεργάτη Μ. Τσαπάκη. Ο Μανώλης από την αρχή της πορείας μου στο ΙΘΑΒΙΚ και μετέπειτα στο ΕΛΚΕΘΕ μου έχει δείξει, με έχει στηρίξει και με έχει βοηθήσει συνεχόμενα όλα αυτά τα χρόνια. Ο Μανώλης με έχει ανεχθεί και συμβουλευσει σε αρκετές δυσκολίες σαν φίλος και σαν συνάδελφος πάντα πρόθυμα, πάντα διακριτικά και κάνοντας το να μοιάζει εύκολο και φυσικό με την αισιοδοξία που τον χαρακτηρίζει. Επίσης τον ευχαριστώ για όλα τα πρωινά ξυπνήματα στα οποία εξαναγκάστηκε και για την επιμονή του να γίνουν οι δουλειές όπως

πρέπει. Η απουσία του στις ελάχιστες δειγματοληψίες που δεν μπόρεσε να συμμετάσχει ήταν αισθητή.

Οι εργασίες πεδίου ήταν ένα σημαντικό κομμάτι της διατριβής και για έναν χρόνο νομίζω ότι ο εξοπλισμός δεν βγήκε καθόλου από τα κουτιά του απλά μεταφερόταν από την Λέσβο, στην Κύπρο, στο Ηράκλειο με όλα τα δυνατά μέσα μεταφοράς, ακόμα και ως χειραποσκευή. Το ίδιο συνέβαινε και για τα δείγματα νερού, γεγονός που με οδήγησε κάποια φορά έξαλλη στο γραφείο του αερολιμενάρχη στην Λέσβο προσπαθώντας να του εξηγήσω πόσο σημαντικό ήταν να μην ξεπαγώσουν τα δείγματα μου (πολύ γρήγορα κατάλαβα και την ματαιότητα αλλά αυτό είναι μια άλλη ιστορία).

Στις εργασίες αυτές βοήθησαν πολλοί συνεργάτες και συνάδελφοι χωρίς τους οποίους η δουλειά αυτή δεν θα ήταν δυνατή. Η συμμετοχή του Γ. Κακαγιάννη και του Β. Ζερβάκη σε πολλές από τις δειγματοληψίες ήταν πολύτιμη, όπως και η βοήθεια τους στην Λέσβο και οι πολύτιμες πληροφορίες και τα δεδομένα που προέκυψαν από την δουλειά τους. Επίσης στις εργασίες πεδίου και στην ανάλυση δειγμάτων ήταν σημαντική η βοήθεια και οι συμβουλές του Κ. Φραγκούλη παρά την επιμονή μου να του περιορίζω συνεχώς τον χώρο που είχε διαθέσιμο στις κούτες τις δειγματοληψίας..

Στις εργασίες πεδίου συμμετείχαν επίσης ο Δ. Ποδάρας και η Σ. Ζιβάνοβιτς τους οποίους ευχαριστώ για την βοήθεια τους και την συμβολή τους όποτε αυτή χρειάστηκε. Οφείλω επίσης να ευχαριστήσω τον Γ. Γριπιώτη, διευθυντή της Ιχθυοκαλλιέργειας στην Λέσβο, ο οποίος ήταν πάντα πρόθυμος να διαθέσει τα πλωτά του μέσα, τους χώρους και το προσωπικό του, προκειμένου να γίνει η δουλειά. Ευχαριστώ επίσης τον Κ. Ξυπτερά που, επίσης πάντα πρόθυμος, φρόντιζε να έχουμε χώρο να εργαστούμε και τον καπεταν Γιώργο, χωρίς τις γνώσεις του οποίου ειδικά η δειγματοληψία τον Ιανουαρίου δεν θα ήταν δυνατή. Όλο το προσωπικό ήταν πάντα διαθέσιμο και πρόθυμο να βοηθήσει όσο εμείς ήμασταν έτοιμοι να αντιμετωπίσουμε τις, συχνά αντίξοες, καιρικές συνθήκες.

Η Μ. Αργυρού και η Θ. Σάμμα από το τμήμα αλιείας στην Κύπρο μας φιλοξένησαν επίσης πάντα πρόθυμα και μας διέθεσαν του χώρους, τον εξοπλισμό και τα πλωτά τους μέσα προκειμένου να δουλέψουμε, ενώ παράλληλα συνέβαλλαν και στην λύση προβλημάτων. Επιπλέον από το τμήμα αλιείας στην Κύπρο ξεχώρισε με την βοήθειά του ο κύριος Γιώργος ο οποίος με την πείρα του και την επιμέλεια του, αλλά και την όρεξη του για δουλειά, μας εντυπωσίασε όλους.

Στην Κύπρο πολλές φορές την δειγματοληψία «έσωσε» ο Α. Πέτρου ο οποίος με την επιμονή του βοήθησε όταν οι καιρικές συνθήκες φαινόταν ότι θα ακύρωναν την

δειγματοληψία. Ο Αντώνης ήταν παρών και στο πλευρό μας από τα άγρια χαράματα που ξεκινούσαμε για να προλάβουμε τον καιρό, μέχρι και το βράδυ με την ξενάγηση στα σοκάκια της Λευκωσίας και στις καλύτερες γωνιές για φαγητό και τον ευχαριστώ για τις συμβουλές του, την εξεύρεση λύσεων και για την φιλοξενία του.

Οι αναλύσεις των δειγμάτων έγιναν στα εργαστήρια του ΕΛΚΕΘΕ και ήταν πολύτιμη η βοήθεια των Ε. Δαφνομήλη και Σ. Ζιβάνοβιτς στις αναλύσεις των θρεπτικών και όλων των εργασιών που είχαν να κάνουν με χημικές αναλύσεις, όπως επίσης και του συνάδελφου Σ. Ηλιάκη στην Αθήνα που ανέλυσε τα δείγματα διαλυμένου οργανικού άνθρακα.

Χωρίς την βοήθεια και την συμβολή του Κ. Τσιάρα οι προσομοιώσεις του μοντέλου δεν θα ήταν δυνατές. Τον ευχαριστώ για τις πολλές ώρες που έχει αφιερώσει εξηγώντας μου πράγματα από το τηλέφωνο, την επιμέλεια του και συνέπεια στην δουλειά και την βοήθεια του στο να κατανοήσω πώς δούλευε το πρόγραμμα που επεξεργαζόμουν. Το ίδιο ισχύει και για τον Μ. Κορρέ που επίσης πάντα με συνέπεια φρόντιζε να έχουμε τις προγνώσεις των ρευμάτων για τις ημερομηνίες και ώρες που χρειαζόταν.

Η τριμελής επιτροπή της διατριβής αυτής, δηλαδή η κα. Λύκα, η κα. Πήττα και ο κ. Καρακάσης, με καθοδήγησε με υπομονή και συνέπεια και ευχαριστώ ιδιαίτερα τον επιβλέποντα μου κ Ι. Καρακάση για τις συμβουλές του, την υποστήριξη και την εμπιστοσύνη που δείχνει στο πρόσωπο μου όλα αυτά τα χρόνια. Επίσης ιδιαίτερο ευχαριστώ οφείλω στην κ. Π. Πήττα η οποία μοιράστηκε απλόχερα μαζί μου τις γνώσεις τις και, στα πλαίσια της συνεργασίας μας, μου έδωσε όλες τις ευκαιρίες (και ήταν πολλές) να μάθω περισσότερα και να (προσπαθήσω να) γίνω καλύτερη στην δουλειά μου. Εκτός αυτού η Βιβή μου έχει σταθεί και ως φίλη με κατανόηση, υποστήριξη αλλά και έχει δείξει υπέρμετρη υπομονή (ειδικά στην φάση των διορθώσεων, όπου πιστεύω ότι πολλές φορές θα σκέφτηκε να μου φέρει το κείμενό «καπέλο») και διάθεση να βοηθήσει πολύ παραπάνω από ότι απαιτούσαν οι περιστάσεις.

Μέσα από την διαδικασία του διδακτορικού και κατά την διάρκεια του έχασα πολλούς φίλους αλλά είχα και την τύχη να γνωρίσω καινούριους. Από τους φίλους που δεν έχασα είναι ο Κ. Μπλαβάκης. Τον ευχαριστώ που ήταν παρών, ειδικά όταν χρειάστηκε, και φυσικά για την συνεχή φιλία του όλα τα χρόνια που γνωριζόμαστε. Επίσης συνεχής παραμένει και η φιλία των Ε. Σχισμένου, Μ. Γιαννουλάκη, Μ. Πηρουνάκη και Σ. Ίσαρη (έστω και από μακριά δυστυχώς). Η στήριξη τους σε καλές και άσχημες στιγμές ήταν πολύτιμη είτε στο γραφείο, είτε στο «πειρατικό» αλλά και οπουδήποτε άλλου. Είναι αυτοί που έχουν ακούσει περισσότερες φορές από εμένα τη φράση «Και γιατί δεν τα παρατάω να ησυχάσω;;» και

όμως κάθε φορά μου έδιναν κουράγιο και συμβουλές σαν να το έλεγα πρώτη φορά. Ιδιαίτέρως δε ευχαριστώ τον Σ. Σωμαράκη ο οποίος μου έχει λύσει πολλές επιστημονικές απορίες αργά το απόγευμα όταν κανείς άλλος δεν ήταν διαθέσιμος να τις ακούσει και ότι μου έχει εξηγήσει (πάντα πρόθυμα) το έχω καταλάβει (ή έτσι νομίζω τουλάχιστον). Η Ε. Αποστολάκη έχει σταθεί δίπλα μου και σε εργασίες πεδίου και σαν φίλη και η κριτική της, αν και αυστηρή, είναι συχνά εύστοχη αλλά σπάνια ευπρόσδεκτη...όμως την ευχαριστώ που επιμένει να κάνει την κριτική της και πολλές φορές η αφαιρετικότητα της με έχει βγάλει από καταστάσεις που εγώ θεωρούσα περίπλοκες. Το τελευταίο ευχαριστώ το φύλαξα για τον Ν. Νικολιουδάκη. Ο Νίκος με έχει στηρίξει και βοηθήσει με ανιδιοτέλεια, συνέπεια και πείσμα, που τον χαρακτηρίζουν άλλωστε, και από την ώρα που η διατριβή μου συναντήθηκε μαζί του βελτιώθηκε σημαντικά και προπάντων τελείωσε, αν και ο ίδιος είμαι σίγουρη θα πει ότι αν δεν ήμουν τόσο «κέρατο» οι διαδικασίες θα είχαν συντομέψει ακόμα περισσότερο!

Πολλές φορές αναρωτήθηκα μήπως έχω χάσει το νόημα μιας και από τα πράγματα που απολαμβάνω περισσότερο στην δουλειά μου είναι οι φουρτουνιασμένες (και μη) θάλασσες συνοδευόμενες με μία μπύρα (ή ποτό της επιλογής μου) μετά το τέλος πολύωρης κουραστικής εργασίας, χαζεύοντας την θάλασσα. Όποτε έχανα το κουράγιο μου σκεφτόμουν ότι την διαδικασία την έκανα ακριβώς για αυτό, για να συναντήσω ακόμα περισσότερες φουρτουνιασμένες θάλασσες μπροστά μου στο μέλλον και μερικές ακόμα μπύρες στο τέλος κουραστικής δουλειάς...εύχομαι πολλές από αυτές τις «συναντήσεις» να τις κάνω και με τους ανθρώπους που στάθηκαν και συνέβαλλαν με τόσους τρόπους στην εργασία αυτή!

Περιεχόμενα

Περίληψη	3
Abstract	5
1 Εισαγωγή	7
1.1 Σκοπός και στόχοι	8
1.2 Εισαγωγή στις κύριες έννοιες	10
1.3 Συνοπτική δομή	17
2 Απόκριση του πλαγκτού στον εμπλουτισμό θρεπτικών από τις μονάδες ιχθυοκαλλιέργειας κατά την περίοδο θερμοστρωμάτωσης και μέγιστης παραγωγής	19
2.1 Εισαγωγή	19
2.2 Περιοχές μελέτης	19
2.3 Υλικά και μέθοδοι	20
2.3.1 Σχεδιασμός δειγματοληψίας και σταθμοί	20
2.3.2 Δειγματοληψία	21
2.3.3 Ανάλυση	21
2.3.4 Στατιστική ανάλυση	23
2.4 Αποτελέσματα Ιούλιος	24
2.4.1 Λέσβος	24
2.4.2 Κύπρος	30
2.4.3 Σύγκριση περιοχών	31
2.5 Συζήτηση	32
3 Εποχιακά πρότυπα και μεταβολές στην αφθονία και σύσταση των πλαγκτονικών κοινοτήτων ως αποτέλεσμα της προσθήκης διαλελυμένων και σωματιδιακών αλάτων από κλωβούς ιχθυοκαλλιέργειας	39
3.1 Εισαγωγή	39
3.2 Υλικά και μέθοδοι	39
3.2.1 Σύσταση εισροών από τα ιχθυοτροφεία στις περιοχές μελέτης	40
3.3 Αποτελέσματα	42
3.3.1 Λέσβος	42
3.3.2 Κύπρος	53
3.3.3 Σύγκριση περιοχών	57
3.4 Συζήτηση	61

4	Χρήση και επαλήθευση τρισδιάστατου βιογεωχημικού μοντέλου για την αποτίμηση των επιπτώσεων των ιχθυοκαλλιεργειών	67
4.1	Εισαγωγή	67
4.2	Υλικά και μέθοδοι	67
4.2.1	Περιοχές μελέτης	67
4.2.2	Περιγραφή υδροδυναμικού μοντέλου	68
4.2.3	Περιγραφή μοντέλου οικοσυστήματος	69
4.2.4	Ισοζύγιο μάζας	73
4.2.5	Δομή μοντέλου	75
4.3	Αποτελέσματα μοντέλου	77
4.3.1	Υδροδυναμικό μοντέλο και πόντιση παρασυρόμενων ρευματογράφων	77
4.3.2	Επαλήθευση μοντέλου	78
4.3.3	Οικολογία- Εφαρμογή σεναρίων	81
4.3.4	Ευαισθησία μοντέλου	86
4.4	Συζήτηση	89
5	Προσαρμογή τροφικών σχέσεων του τρισδιάστατου βιογεωχημικού μοντέλου για την αποτίμηση των επιπτώσεων των ιχθυοκαλλιεργειών στην Ν. Λέσβο	91
5.1	Εισαγωγή	91
5.2	Υλικά και μέθοδοι	91
5.3	Αποτελέσματα προσομοίωσης	92
5.3.1	Βιομάζα λειτουργικών ομάδων πλαγκτού	92
5.3.2	Ταχύτητα και διεύθυνση ρεύματος στην περιοχή εφαρμογής του μοντέλου	101
5.3.3	Σύγκριση εποχιακών αποτελεσμάτων πεδίου με προγνώσεις του ΒΓΧ μοντέλου	102
5.3.4	Συσχετίσεις μεταξύ λειτουργικών ομάδων	104
5.4	Συζήτηση	105
6	Γενική συζήτηση	109
6.1	Προοπτικές και συμπεράσματα	115
7	Βιβλιογραφία	119

Περίληψη

Εξετάστηκαν οι αλλαγές στην σύσταση των πλαγκτονικών πληθυσμών ως προς την απόκρισή τους στον εμπλουτισμό με θρεπτικά από τις ιχθυοκαλλιέργειες. Η μελέτη διεξήχθη σε αποστάσεις από ιχθυοτροφεία στο Βόρειο Αιγαίο και στα νότια παράλια της Κύπρου, σε τρεις διαφορετικές εποχές. Και οι δύο περιοχές ήταν εκτεθειμένες, με έντονο υδροδυναμικό καθεστώς και συλλέχτηκαν δείγματα κατάντη και ανάντη της κύριας διεύθυνσης του ρεύματος. Δόθηκε ιδιαίτερο βάρος σε αυτό καθώς η επιλογή των σταθμών γινόταν επιτόπου με παρασυρόμενους ρευματογράφους. Εξετάστηκαν φυσικοχημικές παράμετροι καθώς και δείγματα όλων των πλαγκτονικών ομάδων από βακτήρια έως και μεσοζωοπλαγκτόν. Παράλληλα, προσαρμόστηκε στις τοπικές συνθήκες και εφαρμόστηκε στις δύο περιοχές ένα τρισδιάστατο βιογεωχημικό μοντέλο (ΒΓΧ) του κατώτερου τροφικού πλέγματος, προκειμένου να αποτυπωθεί η πορεία των θρεπτικών που εκλύονται και να αποτιμηθεί αν οι αλλαγές που προκύπτουν με βάση τις προβλέψεις του, περιγράφουν το σύστημα ικανοποιητικά. Με το μοντέλο εφαρμόστηκαν και σενάρια, για να εκτιμηθούν επιπτώσεις με πιθανές μελλοντικές συνθήκες και προσαρμόστηκαν οι τροφικές σχέσεις ώστε να είναι αντιπροσωπευτικές της περιοχής. Τα αποτελέσματα από την Κύπρο έδειξαν ότι οι αλλαγές στο τροφικό πλέγμα οφείλονται κυρίως σε εποχιακές διακυμάνσεις και μόνο η αφθονία των βακτηρίων ήταν σημαντικά υψηλότερη στους σταθμούς κοντά στους ιχθυοκλωβούς τον Ιούλιο, ενώ την ίδια εποχή η αφθονία των διατόμων ήταν χαμηλότερη. Η προσομοίωση του ΒΓΧ μοντέλου για την περιοχή της Κύπρου ήταν ικανοποιητική, η σύγκριση των τιμών που προέκυψαν από την προσομοίωση του συστήματος με μετρήσεις πεδίου και από την βιβλιογραφία έδειξαν ότι οι εκτιμήσεις του μοντέλου ήταν εντός αυτού του εύρους τιμών. Οι αλλαγές που προέβλεψε το μοντέλο ως αποτέλεσμα των εισροών ήταν μικρές. Με την εφαρμογή του σεναρίου διπλασιασμού της δυναμικής των ιχθυοκαλλιεργειών το μοντέλο προέβλεψε αύξηση της βιομάζας των βακτηρίων στην περιοχή κοντά στους κλωβούς. Στην Λέσβο, μετρήθηκαν στο πεδίο σημαντικές αλλαγές στο τροφικό πλέγμα τον Απρίλιο και τον Ιούλιο. Παρά τις διαφορές στην ταχύτητα και την διεύθυνση του ρεύματος, οι περισσότερες αλλαγές εντοπίστηκαν στην ίδια απόσταση, 100 m κατάντη από το ιχθυοτροφείο. Τον Ιούλιο τα αποτελέσματα έδειξαν αυξημένη αφθονία σε βακτήρια, νανομαστιγωτά και μεσοζωοπλαγκτόν σε συνδυασμό με μείωση στην αφθονία διατόμων, καθώς και αύξηση στο ποσοστό μεγάλων δινωμαστιγωτών και

βλεφαριδωτών κατάντη του ιχθυοτροφείου. Τον Απρίλιο, που επικρατούσαν και συνθήκες άνθησης στην περιοχή, τα βακτήρια μειώθηκαν σημαντικά στα 100 m κατάντη ενώ στην ίδια απόσταση ήταν αυξημένη η αφθονία των διατόμων. Η αφθονία των δινομαστιγιωτών αυξήθηκε κατάντη των κλωβών όπως επίσης και συνολικά το μικροπλαγκτόν. Τα αποτελέσματα του ΒΓΧ μοντέλου στην Λέσβο ήταν εντός του εύρους τιμών που μετρήθηκαν στο πεδίο. Οι προσομοιώσεις και η εφαρμογή σεναρίων έδειξαν διαφοροποιήσεις μόνο σε παραμέτρους θρεπτικών αν και η διακριτότητα του μοντέλου ήταν πολύ υψηλή. Σε προσομοίωση με μηδενική κυκλοφορία φάνηκε περισσότερο η επίδραση του ιχθυοτροφείου με αύξηση στο πικοπλαγκτόν και το μεσοζωοπλαγκτόν αλλά όχι στο μικροφυτοπλαγκτόν. Οι προσαρμογές που έγιναν στο τροφικό πλέγμα συνέβαλαν σημαντικά στην καλύτερη αποτύπωση του συστήματος και της επίδρασης της μονάδας. Συνοψίζοντας, το πρότυπο αλλαγής φάνηκε να είναι παρόμοιο, αλλά διαφορετικής έκτασης, και στις δύο περιοχές. Η διεύθυνση και η ταχύτητα του ρεύματος έχουν καταλυτικό ρόλο στην ανίχνευση διαφορών και η απόκριση του πλαγκτού στον εμπλουτισμό ήταν πιο εμφανής σε ενδιάμεσες αποστάσεις από τους κλωβούς. Η χρήση ΒΓΧ μοντέλου ανέδειξε τις ομάδες που επηρεάζονται και περιέγραψε το σύστημα ικανοποιητικά ενώ αναδείχθηκαν και οι βελτιώσεις που επιδέχεται. Εκτός από την σημασία των αποτελεσμάτων ως προς τις αλληλεπιδράσεις των ιχθυοτροφείων με το περιβάλλον, τα αποτελέσματα μπορούν να συνδράμουν στην αποτίμηση της απόκρισης των βιοκοινοτήτων σε διαταραχές σε ένα δυναμικό περιβάλλον.

Abstract

Responses of water column plankton communities to nutrient enrichment through fish farming were examined. The study was carried out at distances from fish farm cages located in the northern Aegean and in southern Cyprus, during three different seasons. Both areas were exposed with strong hydrodynamic conditions and samples were taken upstream and downstream from fish cages. Current direction and velocity were taken into account and station selection was made using in situ drifters. Physical and chemical variables were examined along with analysis of samples for all plankton groups from bacteria to mesozooplankton. At the same time, a three dimensional biogeochemical model was modified to local conditions and applied in order to identify the fate of nutrients released from the fish farm and to evaluate if the changes that the model predicted describe the simulated system adequately. Scenarios were also applied using the model in order to evaluate impacts under future conditions and, after sample analysis was complete, the model food matrix was modified and the model was run again in an effort to better describe the simulated areas. Results from Cyprus showed that changes in the plankton community were mostly seasonal. The cage presence affected the bacteria and diatom abundance which were higher (bacteria) and lower (diatoms) near the farm cages in July. The model simulation for Cyprus was satisfactory as the comparison of field results with model outputs showed that the model was within the range of values measured in the field. The changes, as a response to the farm presence, predicted by the model were limited. When farm production was doubled, which was one of the scenarios implemented, the model predicted increased bacterial biomass close to the farm cages in Cyprus. In Lesvos, significant changes were measured in the field in April and July. Despite differences in current velocity and direction, most changes were measured at the same distance downstream from the farm cages, at 100 m. In July results showed increased bacteria, nanoflagellate and mesozooplankton abundance, in conjunction with a decrease in diatom abundance and an increase in the abundance of large dinoflagellate and ciliate cells downstream from the cages. In April the sampling took place during a diatom bloom in the wider area, bacteria abundance was significantly lower 100 m downstream and diatom abundance peaked at the same distance. Dinoflagellate abundance increased downstream from the cages and so did the total microplankton abundance. Predictions of the biogeochemical model in Lesvos were within the range

observed in the field; however the simulation showed differences only for dissolved nutrients downstream from the cages, even though the resolution was quite high. The sensitivity run of the model, where transport was set to zero, showed the effects of the fish farm clearly although the model predicted an increase in microzooplankton and mesozooplanton biomass, but no increase in microphytoplankton. The changes applied to the food matrix greatly improved model performance and better simulation of the farm environment was achieved. In summary, the pattern of change was similar albeit of different magnitude between areas and seasons. Current velocity and direction were very important for the detection of changes downstream from the farm and plankton response to nutrient enrichment was maximized at intermediate distances from the farm. The use of the biogeochemical model highlighted the groups most likely to be affected by the fish farm effluents and simulated the system satisfactorily. Apart from the importance of the results regarding the interactions of fish farms with the environment, results can also assist evaluation of community response to perturbations in a dynamic environment.

1 Εισαγωγή

Οι αλληλεπιδράσεις των ιχθυοκαλλιεργειών με το περιβάλλον είναι μια θεματική ενότητα που έχει συζητηθεί εκτενώς στην βιβλιογραφία (Silvert, 1992; Pearson & Black, 2001; Tett, 2008). Οι ανάγκες αυξημένης παραγωγής σε συνδυασμό με τις τεχνολογικές βελτιώσεις στις υποδομές, οδηγούν τους ιχθυοκλωβούς τα τελευταία χρόνια σε περισσότερο εκτεθειμένες περιοχές όπου η ανανέωση των υδάτων είναι πιο γρήγορη όπως, κατά συνέπεια, και η διασπορά των εκροών (Pearson & Black, 2001). Η μεταφορά σε πιο εκτεθειμένες και ολιγοτροφικές περιοχές επάγει την ελάττωση των επιπτώσεων (Holmer, 2010). Ενώ η ιχθυοκαλλιέργεια δεν συνδέεται πλέον συχνά με την πρόκληση ανθήσεων τοξικών ειδών (Arzul, 2001; Smayda, 2006), σε αρκετές μελέτες έχει επισημανθεί ότι στην στήλη του νερού, υπάρχει περιορισμένη κατανόηση των διεργασιών μέσω των οποίων τα θρεπτικά επηρεάζουν την δομή και την λειτουργία του πελαγικού οικοσυστήματος (Pearson & Black, 2001; Sara, 2007a; Holmer et al, 2008).

Οι περισσότερες μελέτες στη Μεσόγειο καταλήγουν ότι τα επίπεδα θρεπτικών που απελευθερώνονται στη στήλη του νερού από τα ιχθυοτροφεία είναι υψηλά και συνεπώς μπορούν να επηρεάσουν τον περιβάλλοντα χώρο τους. Όμως, οι πιθανές αλλαγές που επιφέρουν στο οικοσύστημα δεν μπορούν να εντοπιστούν με ευκολία, αν και αποτελεί παραδοχή ότι υπάρχουν πολλές βιοτικές και αβιοτικές παράμετροι που επηρεάζονται σημαντικά από την ιχθυοκαλλιέργεια (Gowen & Bradbury, 1987; Pearson & Black, 2001; Tett, 2008). Είναι σύνηθες δε, παρά τις διεξοδικές εργασίες πεδίου, να μην ανιχνεύονται συχνά αυξημένα θρεπτικά κοντά σε ιχθυοκλωβούς στη Μεσόγειο (Pitta et al, 1999; La Rosa et al, 2002; Pitta et al, 2005).

Οι αλλαγές στα επίπεδα των θρεπτικών μπορεί να μην έχουν φανεί ξεκάθαρα σε πολλές από τις υπάρχουσες μελέτες, όμως η μελέτη των επιπτώσεών τους στο τροφικό πλέγμα έχει δείξει αύξηση της πρωτογενούς παραγωγής (Dalsgaard & Krause Jensen, 2006) και μεταφορά σε υψηλότερα τροφικά επίπεδα (Pitta et al, 2009). Παράλληλα, μελέτες σε επίπεδο ευρύτερης περιοχής έχουν δείξει ενδιαφέροντα αποτελέσματα, από εποχιακές ή μικρές διαφορές (Maldonado, 2005; Yucel-Gier et al, 2008), μέχρι αύξηση της βιομάζας του φυτοπλαγκτού ή της αφθονίας συγκεκριμένων ομάδων του πλαγκτονικού συστήματος (Sara et al, 2011; Skejik, 2012).

Συγχρόνως, υπάρχει και εξέλιξη στην χρήση των μαθηματικών μοντέλων που εφαρμόζονται σε περιβάλλον ιχθυοκαλλιέργειών. Η συμβολή των μαθηματικών ομοιωμάτων (εφεξής και μοντέλων) στην κατανόηση των επιπτώσεων των ιχθυοκαλλιέργειών στο περιβάλλον είναι σημαντική και τα μαθηματικά μοντέλα χρησιμοποιούνται συστηματικά για την χωροθέτηση και την πρόβλεψη επιπτώσεων σε πολλές περιοχές (Henderson et al, 2001; Silvert & Crome, 2001). Και σε αυτόν τον τομέα, η ανάπτυξη της τεχνολογίας έχει διευρύνει τις διαθέσιμες δυνατότητες (Rose et al, 2010), με αποτέλεσμα να υπάρχει πολύ μεγαλύτερη επιλογή στο πόσο περίπλοκο θέλουμε να είναι ένα μαθηματικό μοντέλο, με γνώμονα τα επιστημονικά ερωτήματα και τις ανάγκες του χρήστη (Allen & Fulton, 2010). Η δυνατότητα αυτή συχνά οδηγεί και στην χρήση πιο περίπλοκων μοντέλων οικοσυστήματος προκειμένου να περιγραφεί το σύστημα και οι επιπτώσεις των υδατοκαλλιέργειών (Dowd, 2005; Wild-Allen et al, 2010; Forrestal et al, 2012). Επιπλέον, η χρήση των end-to-end μαθηματικών μοντέλων, που επιχειρούν να συμπεριλάβουν όλα τα επιμέρους κομμάτια του οικοσυστήματος (Travers et al, 2007; Rose et al, 2010), είναι αναμενόμενο ότι θα ενσωματώσει και τις υδατοκαλλιέργειες στην προσομοίωση του θαλάσσιου συστήματος.

1.1 Σκοπός και στόχοι

Για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής συνδυάστηκαν αποτελέσματα από την μελέτη του τροφικού πλέγματος στο πεδίο (κεφάλαια 2&3) και εφαρμόστηκε ένα τρισδιάστατο (εφεξής και 3Δ), οικολογικό/ βιογεωχημικό (εφεξής και ΒΓΧ) μοντέλο του κατώτερου τροφικού πλέγματος, προκειμένου να αξιολογηθεί αν μπορεί να εφαρμοστεί σε περιβάλλον ιχθυοκαλλιέργειών και να μελετηθεί η απόκρισή του σε δεδομένη σημειακή πηγή θρεπτικών (κεφάλαια 4&5).

Ο στόχος της παρούσας διατριβής ήταν η μελέτη των επιπτώσεων της επαναλαμβανόμενης και συνεχούς προσθήκης θρεπτικών από τις ιχθυοκαλλιέργειες στην στήλη του νερού. Οι ιχθυοκαλλιέργειες αντιμετωπίστηκαν ως πηγή θρεπτικών σε ένα δυναμικό, ολιγοτροφικό περιβάλλον. Μελετήθηκε πώς τα θρεπτικά επηρεάζουν τους οργανισμούς στην στήλη του νερού, πόσο μεγάλη δύναται να είναι η ζώνη επιρροής σε σχέση με την πηγή των θρεπτικών, σε ποιες ομάδες του πλαγκτού εντοπίζεται η αλλαγή και αν οι αλλαγές, συνδυαστικά ή μεμονωμένα, μπορούν να επηρεάσουν την ευρύτερη περιοχή.

Τέθηκαν τα ακόλουθα ερωτήματα:

1. Την θερμή περίοδο της μέγιστης παροχής τροφής και ιχθυοπαραγωγής σε ολιγοτροφικές περιοχές, διαφοροποιείται η πλαγκτονική σύσταση της μάζας του νερού που διαπερνά τους κλωβούς; Σε τι συνίσταται η διαφοροποίηση και σε πόση απόσταση από τους κλωβούς είναι ανιχνεύσιμη; (Κεφ. 2)
2. Στις ίδιες αποστάσεις από τους κλωβούς και κατά την κατεύθυνση του ρεύματος, υπάρχουν παράμετροι που επηρεάζονται από τα ιχθυοτροφεία και σε άλλες εποχές; Υπερισχύει το εποχιακό ή/και χωρικό πρότυπο της λειτουργίας των ιχθυοκαλλιέργειών; (Κεφ. 3)
3. Μπορεί ένα τρισδιάστατο οικολογικό μοντέλο να εφαρμοστεί με επιτυχία προκειμένου να γίνει αποτίμηση των επιπτώσεων στο ευρύτερο σύστημα; Πόσο επεκτείνεται η ζώνη επιρροής και πώς επηρεάζεται από το υδροδυναμικό καθεστώς της περιοχής; (Κεφ. 4)
4. Προσαρμόζοντας τις τροφικές σχέσεις στο μοντέλο, τι συμπεράσματα μπορούμε να βγάλουμε για τον ρόλο των λειτουργικών ομάδων στην ροή της ενέργειας από τα θρεπτικά στο ευρύτερο σύστημα; Ποιές ομάδες ευνοούνται περισσότερο από τις εκροές θρεπτικών, θεωρώντας την ιχθυοκαλλιέργεια ως αποκλειστική τοπική πηγή θρεπτικών στο σύστημα; (Κεφ. 5)

Στην διάρκεια της παρούσας διατριβής:

- 1) Οι επιπτώσεις των θρεπτικών που εκλύονται από τα ιχθυοτροφεία στην στήλη του νερού, μελετήθηκαν σε διάφορες αποστάσεις από τους ιχθυοκλωβούς, για πρώτη φορά στην βιβλιογραφία ακολουθώντας τις μάζες του νερού όπως αυτές διέρχονται μέσα από τους κλωβούς (ανάντη και κατάντη) και όχι σε αποστάσεις πάνω σε μία διατομή, αυθαίρετα χαραγμένη
- 2) Για πρώτη φορά στην βιβλιογραφία, μελετήθηκαν οι επιπτώσεις στο σύνολο των οργανισμών του πλαγκτονικού τροφικού πλέγματος, από τα βακτήρια ως και το μεσοζωοπλαγκτόν και έγινε δυνατόν να βρεθούν σχέσεις μεταξύ των διαφόρων συστατικών του πελαγικού, μικροβιακού, τροφικού πλέγματος, κάτω από τις ιδιαίτερες συνθήκες που επικρατούν σε μία πηγή συνεχούς παροχής θρεπτικών (τα ιχθυοτροφεία) σε ένα ιδιαίτερα ολιγοτροφικό περιβάλλον (της Ανατολικής Μεσογείου)

- 3) Το φαινόμενο μελετήθηκε, για πρώτη φορά στην βιβλιογραφία, με τον ίδιο τρόπο και στο ίδιο βάθος, σε όλες τις εποχές του έτους, δηλαδή σε διαφορετικές συνθήκες φυσικού, χημικού και βιολογικού περιβάλλοντος αφενός και σε διαφορετικές συνθήκες έντασης εκτροφής, δηλαδή παροχής θρεπτικών στο περιβάλλον, αφετέρου
- 4) Συνδυαστικά με τα παραπάνω το φαινόμενο προσεγγίστηκε, για πρώτη φορά στην βιβλιογραφία, και με την χρήση τρισδιάστατου βιογεωχημικού μοντέλου του κατώτερου τροφικού πλέγματος που περιελάμβανε την ιχθυοκαλλιέργεια ως σημειακή πηγή θρεπτικών και χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία του πλαγκτού που μετρήθηκαν στο πεδίο για να τροποποιηθούν κατάλληλα παράμετροι του μοντέλου

1.2 Εισαγωγή στις κύριες έννοιες

Προκειμένου να είναι περισσότερο κατανοητά τα θέματα που καλύπτει η παρούσα διατριβή είναι απαραίτητο να παρατεθούν επιπλέον στοιχεία για τα κύρια τμήματά της. Αυτά συνοψίζονται στις εξής ενότητες: α) διαμόρφωση του ολιγοτροφισμού στην Μεσόγειο, β) τάσεις και δυναμική στο κατώτερο τροφικό πλέγμα στην Μεσόγειο, γ) ανάπτυξη του κλάδου των υδατοκαλλιεργειών και της μελέτης των περιβαλλοντικών τους επιπτώσεων στην Μεσόγειο, δ) δομή και χρήση του βιογεωχημικού (BGX) μοντέλου και ε) χρήση μοντέλων στην ιχθυοκαλλιέργεια.

α) Διαμόρφωση του ολιγοτροφισμού στην Μεσόγειο: Ολιγοτροφικό χαρακτηρίζεται ένα περιβάλλον στο οποίο η ποσότητα των θρεπτικών είναι χαμηλή. Εκτός από τις συγκεντρώσεις θρεπτικών, αυτό επεκτείνεται και στα επίπεδα χλωροφύλλης και πρωτογενούς παραγωγής, όλα εκ των οποίων είναι χαμηλά στην Μεσόγειο σε σχέση με άλλες θάλασσες (Siokou et al, 2010 και περιεχόμενες αναφορές).

Ο ολιγοτροφισμός στην Μεσόγειο αποδίδεται στην ανταλλαγή μαζών νερού που λαμβάνει χώρα στα στενά του Γιβραλτάρ. Εκεί εισέρχονται μάζες επιφανειακού νερού με χαμηλές συγκεντρώσεις θρεπτικών από τον Ατλαντικό και εξέρχονται μάζες νερού εμπλουτισμένες σε θρεπτικά από τα βαθύτερα στρώματα της Μεσογείου (Huertas et al, 2012). Ο έντονος ολιγοτροφισμός στην ανατολική Μεσόγειο έχει επίσης αποδοθεί στην κυκλοφορία καθώς έχει παρατηρηθεί ότι, μέσω των στενών της Σικελίας, εισέρχονται μάζες νερού του Ατλαντικού στις οποίες έχουν ήδη καταναλωθεί τα θρεπτικά στην δυτική λεκάνη. Παράλληλα, εξέρχονται μάζες νερού από βαθύτερα στρώματα τα οποία έχουν εμπλουτιστεί με θρεπτικά (Wu & Haines,

1998; Emeis et al, 1996), αλλά λόγω της κυκλοφορίας δεν παραμένουν στην ανατολική λεκάνη. Αυτό έχει ως συνέπεια, ο ολιγοτροφισμός να αυξάνεται από τη δύση προς την ανατολή (Ribera d' Alcala et al, 2003; Huertas et al, 2012) αλλά και τοπικά, από το Αιγαίο πέλαγος έως το Κρητικό, από βορρά προς νότο (Ignatiades et al, 2002). Η Λεβαντίνη, θεωρείται το πλέον ολιγοτροφικό κομμάτι της λεκάνης, χαρακτηριζόμενο και ως υπέρ -ολιγοτροφικό (Bar-Zeev et al, 2011). Τους πύθους μήνες, ιδιαίτερα μετά τον σχηματισμό του θερμοκλινούς, το φαινόμενο του ολιγοτροφισμού εντείνεται στα επιφανειακά στρώματα εφόσον η απουσία ανάμιξης δεν εισάγει νέα θρεπτικά στο σύστημα. Αντίθετα με τους ωκεανούς, όπου περιοριστικός παράγοντας της βιολογικής παραγωγικότητας είναι το άζωτο (Oviatt et al, 1995), ο ολιγοτροφισμός στη Μεσόγειο φαίνεται ότι οφείλεται στον περιορισμό από φωσφόρο. Ο υπάρχων περιορισμός έχει περιγραφεί διεξοδικά από τους Krom et al (1991), Thingstad & Rassoulzadegan (1999) και Krom et al (2010), που έχουν δείξει επίσης ότι στην περιοχή κυριαρχούν τα μικρά κύτταρα και είδη φυτοπλαγκτού. Πρέπει να σημειωθεί όμως, ότι σχετικά με τον περιορισμό της παραγωγικότητας από φωσφόρο στην Μεσόγειο, υπάρχουν αποτελέσματα που δείχνουν ότι προκαλείται από διεργασίες στην δυτική λεκάνη, καθώς τα νερά του Ατλαντικού που εισρέουν, δεν φαίνεται να έχουν χαμηλά επίπεδα φωσφόρου (Huertas et al, 2012).

Μολονότι η συνολική παραγωγή παραμένει χαμηλή στη Μεσόγειο (Turley, 1999), υπάρχουν διάσπαρτες επιμέρους περιοχές με υψηλότερη παραγωγικότητα όπου εισροές από ποτάμια (π.χ. βόρεια Αδριατική, Turley, 1999) και εισροές από άλλες υδάτινες μάζες (π.χ. βόρειο Αιγαίο, Siokou-Frangou et al, 2002) παρέχουν θρεπτικά στο σύστημα. Αυτές οι περιοχές είναι δυνητικά πύ ευαίσθητες στην προσθήκη θρεπτικών και ο μικροβιακός βρόχος συχνά αντικαθίσταται από την γραμμική τροφική αλυσίδα (φυτοπλαγκτόν-ζωοπλαγκτόν-ψάρια) (Thingstad & Sakshaug, 1990; Siokou-Frangou et al, 2010).

β) Τάσεις και δυναμική στο κατώτερο τροφικό πλέγμα στην Μεσόγειο: Ως κατώτερο τροφικό πλέγμα ορίζονται οι οργανισμοί που βρίσκονται ανάμεσα στα βακτήρια και το μεσοζωοπλαγκτόν. Η δομή του πλαγκτού στην ανατολική Μεσόγειο είναι σημαντικό κομμάτι των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της περιοχής. Ο Azon (1991) χαρακτήρισε την περιοχή ως θαλάσσια έρημο λόγω της χαμηλής συγκέντρωσης χλωροφύλλης στα επιφανειακά νερά, η οποία απαντάται κυρίως στο

πικοφυτοπλαγκτόν. Η χαμηλή βιομάζα δεν περιορίζει την ποικιλότητα, η οποία θεωρείται υψηλή σε σύγκριση με την επιφάνεια και τον όγκο της Μεσογείου (Bianchi and Mori, 2000).

Η χαμηλή πρωτογενής παραγωγή της ανατολικής λεκάνης συνυπάρχει με μετατόπιση προς μια βιοκοινότητα όπου τα περισσότερα θρεπτικά ανακυκλώνονται στον μικροβιακό βρόχο (Azam, 1983; Turley, 1999), φαινόμενο το οποίο εξηγεί εν μέρει και την χαμηλή παραγωγή σε ψάρια στην περιοχή. Ο μικροβιακός βρόχος κυριαρχεί στις ολιγοτροφικές περιοχές έναντι της κλασσικής τροφικής αλυσίδας όπου η ενέργεια μεταφέρεται από μεγαλύτερα κύτταρα φυτοπλαγκτού στο μεσοζωοπλαγκτόν και κατόπιν στα ψάρια. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι το πικο- και νανο-πλαγκτόν υπερτερούν σε παραγωγικότητα έναντι των μεγαλύτερων σε μέγεθος ομάδων. Στο μικροβιακό τροφικό πλέγμα, τα βλεφαριδωτά αποτελούν τον συνδετικό κρίκο με τα υψηλότερα τροφικά επίπεδα, μεταφέροντας την ενέργεια στο μεσοζωοπλαγκτόν και τα ψάρια. Η διαδικασία αυτή παρακάμπτει άλλες ομάδες, κυρίως τα διάτομα και τα δινομαστιγωτά.

Το καθεστώς που επικρατεί στη Μεσόγειο έχει φυσικά και εποχιακές διακυμάνσεις, ως προς την δομή της τροφικής αλυσίδας, που εξηγεί εκτενώς ο Cushing (1989). Συνοπτικά, ο μικροβιακός βρόχος επικρατεί στις πύο ολιγοτροφικές περιοχές, ειδικά κατά την περίοδο της θερμοστρωμάτωσης της υδάτινης στήλης κατά τους θερμούς μήνες. Η διαδοχή του πλαγκτού χαρακτηρίζεται από τρεις φάσεις, οι οποίες ακολουθούν τις εποχιακές διακυμάνσεις. Η διαδοχή ξεκινά από την περίοδο της ανάμιξης της υδάτινης στήλης (χειμώνας), περίοδο κατά την οποία παρατηρούνται συνθήκες άνθησης όπου κυριαρχούν τα μικρά διάτομα και μαστιγωτά. Περνάει στην περίοδο κατά την οποία η θερμοκρασία και η ηλιακή ακτινοβολία αυξάνονται (άνοιξη) και τα διάτομα εξακολουθούν να βρίσκονται σε περίοδο αύξησης ενώ γένη όπως το *Chaetoceros* κυριαρχούν αλλά παράλληλα αυξάνονται και τα δινομαστιγωτά. Τέλος, η διαδοχή καταλήγει στις περιόδους στρωμάτωσης της στήλης όπου λίγα διάτομα επιβιώνουν και κυριαρχούν περισσότερο τα δινομαστιγωτά (Margalef, 1967) και το νανο- και πικοπλαγκτόν.

γ) Ανάπτυξη του κλάδου των υδατοκαλλιεργειών και της μελέτης των περιβαλλοντικών τους επιπτώσεων στη Μεσόγειο: Μια επιπλέον, τοπική, πηγή θρεπτικών στην περιοχή είναι οι ιχθυοκαλλιέργειες. Ο τομέας έχει ανθίσει τις

τελευταίες δεκαετίες και αναμένεται να συνεχίσει να αναπτύσσεται λαμβάνοντας υπόψη την συνεχιζόμενη εξάρτηση των αγορών από πρωτεΐνη προερχόμενη από τα ψάρια (Duarte et al, 2009; FAO, 2012a). Το λαβράκι (*Dicentrarchus labrax*) και η τσιπούρα (*Sparus aurata*) είναι τα πιο ευρέως καλλιεργούμενα είδη στην Μεσόγειο και η βιομηχανία παραγωγής τους έχει ετήσιο μέσο όρο ανάπτυξης 17%. Το 2004, η συνολική παραγωγή των δύο αυτών ειδών αποτελούσε το 85% τη συνολικής παραγωγής ιχθύων στην Μεσόγειο (Cardia & Lovatelli, 2007). Η Ελλάδα είναι η χώρα με την μεγαλύτερη παραγωγή σε τσιπούρα και λαβράκι στην περιοχή, την ακολουθούν η Τουρκία, η Αίγυπτος, η Ιταλία και η Ισπανία (FAO, 2012b). Η παραγωγή των προαναφερθέντων ειδών στην Ελλάδα το 2010 ήταν περίπου 100.000 τόνοι, αλιευμένοι από περίπου 330 ιχθυοκαλλιέργειες που λειτουργούν κατά μήκος της εκτεταμένης ακτογραμμής της χώρας (Yeroulanos, 2010).

Οι υδατοκαλλιέργειες συνεχίζουν να αναπτύσσονται πιο γρήγορα από οποιονδήποτε άλλο τομέα ζωικής παραγωγής, με ετήσιο ρυθμό αύξησης 9% από το 1970, σε σύγκριση με 1% αύξηση που είχε η αλιεία και 3% οι χερσαίες μονάδες ζωικής παραγωγής. Ο τομέας αναμένεται ότι θα συνεχίσει να αναπτύσσεται σε αυτόν τον αιώνα, μιας και οι θαλάσσιες υδατοκαλλιέργειες είναι η μόνη πηγή παραγωγής ζωικής πρωτεΐνης που δεν εξαρτάται από την κατανάλωση υδάτινων πόρων (Duarte, 2009). Όπως στα περισσότερα συστήματα παραγωγής τροφής, οι υδατοκαλλιέργειες έχουν και αρνητικές επιπτώσεις που επιβάλλεται να διατηρούνται μέσα σε κοινωνικά αποδεκτά πλαίσια. Η αλόγιστη ανάπτυξη εμπεριέχει κινδύνους και για τον ίδιο τον τομέα που περιλαμβάνουν μείωση της παραγωγής και αυξημένη θνησιμότητα.

Στην Μεσόγειο, οι επιπτώσεις των υδατοκαλλιεργειών στο οικοσύστημα αφορούν κυρίως την υποβάθμιση των ιζημάτων γύρω από τους κλωβούς (Karakassis et al, 2000; Kalantzi & Karakassis, 2006), την υποβάθμιση σε λειμώνες Ποσειδωνίας (Holmer et al, 2008; Apostolaki et al, 2009) και αλλαγές στην αφθονία και βιομάζα ιχθύων σε μέσης κλίμακας αποστάσεις (Machias et al., 2005). Έχουν εκφραστεί επίσης ανησυχίες ότι τα ιχθυοτροφεία προκαλούν αλλαγές σε οικολογικές διεργασίες και επηρεάζουν τα επίπεδα βιοποικιλότητας των μαζών νερού ακόμα και σε μεγάλες αποστάσεις από αυτές (Sara, 2007a). Τέλος, μία από τις πιο μεγάλης εμβέλειας επιπτώσεις των ιχθυοκαλλιεργειών προέρχεται από την καλλιέργεια σαρκοφάγων

ψαριών, των οποίων οι απαιτήσεις σε τροφή από ιχθυάλευρα ασκεί τεράστια πίεση στα ιχθυαποθέματα ορισμένων ειδών (Naylor et al, 2000).

Ενώ η ποσότητα των θρεπτικών που εκλύονται από τις ιχθυοκαλλιέργειες είναι υψηλή (Holby & Hall, 1991; Dosdat, 1996; Islam, 2005; Karakassis et al, 2005), έχει αποδειχθεί δύσκολο να ανιχνευθούν στο πεδίο (Pitta et al, 1999; La Rosa et al, 2002; Pitta et al, 2005; Yucel-Gier et al, 2008). Αυτό έχει αποδοθεί κυρίως σε περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως η ταχεία διάχυση των θρεπτικών (Gowen & Bradbury, 1987). Πιο πρόσφατα, από τους Pitta et al (2009) δείχτηκε ότι τα θρεπτικά που εκλύονται από την μονάδα αφομοιώνονται πολύ γρήγορα στο τροφικό πλέγμα, ενώ στη συνέχεια μέσω αυξημένης θήρευσης στο φυτοπλαγκτόν, τα θρεπτικά μεταφέρονται γρήγορα σε υψηλότερα τροφικά επίπεδα.

Η μεταφορά των παρεχόμενων θρεπτικών στα υψηλότερα τροφικά επίπεδα έχει επίσης δειχθεί μέσω της αυξημένης βιομάζας ψαριών κοντά σε ζώνες ιχθυοκαλλιεργείων (Machias et al, 2004; Machias et al, 2005), της αύξησης των ιχθυαποθεμάτων στην ευρύτερη περιοχή των ιχθυοκαλλιεργείων (Machias et al, 2006; Arechavala-Lopez et al, 2011), της χρήσης των περιοχών κοντά στους ιχθυοκλωβούς ως περιοχής εγκατάστασης από τα ιχθύδια (Fernandez-Jover et al, 2009) και ακόμα και της αύξησης της αφθονίας των μεγαλύτερων θηρευτών όπως τα δελφίνια (Piroddi et al, 2011). Τα αποτελέσματα αυτά ρίχνουν φως σε μια πλευρά των αλληλεπιδράσεων που έχουν οι ιχθυοκαλλιέργειες με το περιβάλλον που μέχρι τώρα έχει ανεπαρκώς μελετηθεί. Παρόλα αυτά τα ευρήματα, οι αλλαγές στην δομή του πλαγκτού εξακολουθούν να είναι δύσκολο να ανιχνευθούν, με τις υπάρχουσες μελέτες να βρίσκουν αλλαγές που σχετίζονται περισσότερο με την εποχικότητα, παρά με την παρουσία των ιχθυοκαλλιεργείων (Yucel-Gier et al, 2008; Skejic et al, 2010). Οι Pearson & Black (2001) σημειώνουν ότι σπάνια έχει επιτευχθεί η συσχέτιση μεταξύ των θρεπτικών που απελευθερώνει μια μονάδα και μιας βιολογικής απόκρισης. Επίσης, δεν συνηθίζεται να αποδίδονται αλλαγές μεγάλης κλίμακας στα ιχθυοτροφεία, λόγω της αδυναμίας να συνδεθεί ο εμπλουτισμός σε θρεπτικά με αυτές τις αλλαγές. Σε μια επισκόπησή του, ο Sara (2007b) σημειώνει ότι οι επιπτώσεις των ιχθυοκαλλιεργείων στην στήλη του νερού συχνά παραβλέπονται, παρόλο που οι αλλαγές στην ροή των θρεπτικών μπορεί να προκαλέσουν και αλλαγές στις οικολογικές διεργασίες σε πολύ μεγαλύτερη κλίμακα.

δ) Δομή και χρήση του βιογεωχημικού μοντέλου: Ένα βιογεωχημικό μοντέλο, σαν αυτό που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διατριβή, περιγράφει, με την μορφή μαθηματικών εξισώσεων, φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες. Οι φυσικές διεργασίες περιλαμβάνουν την κίνηση των υδάτινων μαζών, την μεταφορά και την διάχυση, οι χημικές διεργασίες περιλαμβάνουν την ροή των ανόργανων και οργανικών σωματιδιακών και διαλυμένων θρεπτικών στο σύστημα και οι βιολογικές διεργασίες, την ροή ενέργειας στο τροφικό πλέγμα (Fennel & Neumann, 2004). Τα ΒΓΧ μοντέλα χρησιμοποιούνται ευρέως για την αποτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε ομάδες του πλαγκτού και οι ομάδες αυτές διαχωρίζονται μέσα στο μοντέλο με βάση το μέγεθος και τον λειτουργικό τους ρόλο (Blackford, 2004). Η τρισδιάστατη δομή βασίζεται στην σύζευξη με αντίστοιχο υδροδυναμικό μοντέλο, το οποίο διεγείρεται από ατμοσφαιρικά κλιματολογικά δεδομένα ανέμου και επιφανειακής θερμοκρασίας και αλατότητας. Κάθε ομάδα διεργασιών μπορεί να περιγραφεί (πάντα με την μορφή εξισώσεων), με περισσότερη ή λιγότερη λεπτομέρεια, στο μαθηματικό μοντέλο, γεγονός που εξαρτάται κυρίως από το επιστημονικό ερώτημα που πρέπει να απαντηθεί. Η απλότητα ή πολυπλοκότητα ενός μοντέλου δεν σχετίζεται με την ποιότητα των αποτελεσμάτων, όπως επίσης και δεν είναι πάντα ζητούμενο, ένα μοντέλο να απεικονίζει με λεπτομέρεια όλα τα επιμέρους τμήματα ενός δυναμικού συστήματος. Το ζητούμενο είναι να αποφεύγεται η υπερβολική λεπτομέρεια αλλά και η υπεραπλούστευση στα μοντέλα οικοσυστήματος (Allen & Fulton, 2010). Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη είναι εξέλιξη του European Regional Seas Ecosystem Model (ERSEM) (Baretta et al, 1995). Οι βιολογικές συνιστώσες του χωρίζονται σε λειτουργικές ομάδες, οι οποίες περιγράφονται μέσω διεργασιών φυσιολογίας (αναπνοή, κατάποση, απέκκριση, έκκριση) και πληθυσμών (αύξηση, μετανάστευση, θνησιμότητα) (Baretta et al, 1995; Travers et al, 2007).

Όταν αναφέρεται λοιπόν ότι χρησιμοποιήθηκε τρισδιάστατο ΒΓΧ μοντέλο σημαίνει ότι οι περιοχές μελέτης χωρίστηκαν σε ένα τρισδιάστατο πλέγμα το οποίο κατασκευάζεται λαμβάνοντας υπόψη τα βαθυμετρικά δεδομένα της εκάστοτε περιοχής. Το τρισδιάστατο πλέγμα αποτελείται στο κατακόρυφο επίπεδο από 25 επιμέρους τμήματα, τα οποία εξαρτώνται από τη βαθυμετρία της περιοχής μελέτης, ενώ στο οριζόντιο επίπεδο από το βαθμό επιθυμητής διακριτότητας (δεκάδες, εκατοντάδες ή χιλιάδες μέτρα). Μέσα σε κάθε επιμέρους δομικό κομμάτι του

πλέγματος (εφεξής «κουτί») επιλύονται όλες οι εξισώσεις του ΒΓΧ μοντέλου σε κάθε χρονικό βήμα. Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης στη συνέχεια μπορεί να εκφραστεί ως μέση τιμή για την χρονική περίοδο (π.χ. μέση μηνιαία τιμή) και βάθος (π.χ. επιφανειακό στρώμα) που επιλέγει ο χρήστης για κάθε χημική ή βιολογική παράμετρο.

ε) Χρήση μοντέλων στην ιχθυοκαλλιέργεια: Μερικοί από τους λόγους για τους οποίους είναι σκόπιμο να προσεγγισθεί με την χρήση μαθηματικών μοντέλων η ιχθυοκαλλιέργεια περιλαμβάνουν την συλλογή πληροφορίας για περιβαλλοντικά θέματα, τον σχεδιασμό στρατηγικών παρακολούθησης και την διαδικασία κατανόησης της λειτουργίας ενός συγκεκριμένου συστήματος (Silvert & Cromeu, 2001).

Είναι διαθέσιμα μια σειρά από μοντέλα που περιγράφουν διαφορετικά καλλιεργούμενα είδη, συνθήκες και περιβάλλοντα ενώ διαφορετικές προσεγγίσεις στις αλληλεπιδράσεις των ιχθυοκαλλιεργειών με το περιβάλλον έχουν εφαρμοστεί προκειμένου να αντιμετωπιστούν συγκεκριμένα θέματα (Henderson et al, 2001; Tett et al, 2003; Stigebrandt et al, 2004; Magill et al, 2006).

Τα υπάρχοντα μοντέλα παρέχουν σημαντικές πληροφορίες και υποστήριξη σε αποφάσεις αλλά συχνά περιορίζονται από έλλειψη οικοσυστημικής προσέγγισης, περιορισμένες αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ομάδων και περιορισμένη κλίμακα. Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι ιχθυοκαλλιέργειες και οι επιπτώσεις τους εισάγονται στο σύστημα μέσω των κατωτέρων τροφικών επιπέδων, όπου το φυτοπλαγκτόν και τα βακτήρια ασκούν την κυρία επιρροή στις διεργασίες, είναι σημαντικό οποιοδήποτε μοντέλο χρησιμοποιηθεί να περιλαμβάνει με λεπτομέρεια τις ομάδες αυτές και τις κύριες διεργασίες που τις διέπουν. Αυτός ήταν και ο κύριος λόγος που επιλέχθηκε το συγκεκριμένο μοντέλο. Έτσι, οι επιπτώσεις εκτιμήθηκαν και σε μεγαλύτερη κλίμακα, λαμβάνοντας υπόψη ότι η διάχυση των θρεπτικών μπορεί να επηρεάσει σημεία έξω από την εγγύς στο ιχθυοτροφείο περιοχή. Όπως συμπεραίνεται και από τους Wild-Allen et al (2009), η χρήση ΒΓΧ μοντέλων μπορεί να συμβάλει σημαντικά στην σύνθεση της λειτουργίας των οικοσυστημάτων όπου δραστηριοποιούνται ιχθυοκαλλιέργειες.

1.3 Συνοπτική δομή

Με δεδομένα τα παραπάνω και για να απαντηθούν τα ερωτήματα που τέθηκαν στην παρούσα διατριβή, επιλέχθηκαν δύο περιοχές ιχθυοκαλλιεργητικής δραστηριότητας στην ανατολική Μεσόγειο που περιγράφονται στο **κεφάλαιο 2**. Στο **κεφάλαιο 2**, απαντάται το ερώτημα πώς διαφοροποιείται η σύνθεση των βιοκοινοτήτων στη στήλη του νερού ως αποτέλεσμα της προσθήκης διαλελυμένων θρεπτικών από τους ιχθυοκλωβούς, κατά την εποχή της μέγιστης ιχθυοκαλλιεργητικής δραστηριότητας. Μετρήθηκε η αφθονία και η βιομάζα όλων των τροφικών επιπέδων από τα βακτήρια μέχρι και το μεσοζωοπλαγκτόν στους σταθμούς δειγματοληψίας προκειμένου να διαπιστωθεί αν είναι διαφορετική η απόκριση των πλαγκτονικών κοινοτήτων στις δύο περιοχές, όσο και τις αλλαγές στην σύσταση της τροφικής αλυσίδας, κοντά και μακριά από τους ιχθυοκλωβούς. Στο **κεφάλαιο 3**, διερευνήθηκε αν οι επιπτώσεις των ιχθυοκαλλιεργειών περιορίζονται σε συγκεκριμένες εποχές και κατά πόσο η υφιστάμενη κατάσταση επηρεάζει την έκταση επιρροής της ιχθυοκαλλιέργειας όπου αυτό ήταν ανιχνεύσιμο. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ενώ η εποχική διακύμανση καθορίζει κυρίως την κατανομή των βιοκοινοτήτων, η παρουσία της ιχθυοκαλλιέργειας μπορεί να επιφέρει αλλαγές στην στήλη του νερού, χωρίς να επηρεάζεται το γενικότερο εποχιακό πρότυπο. Στην πιο oligοτροφική περιοχή (Κύπρος) και από τις παραμέτρους που μετρήθηκαν, φάνηκε ότι η επίδραση της παροχής θρεπτικών αποσβένεται γρήγορα. Στο **κεφάλαιο 4**, εξετάστηκε αν το επιλεγμένο βιογεωχημικό μοντέλο ανταποκρίνεται ικανοποιητικά στην περιγραφή της αλληλεπίδρασης του ιχθυοτροφείου με το περιβάλλον και εξετάστηκαν σενάρια με πιο έντονη την παρουσία του ιχθυοτροφείου (αύξηση παραγωγής) και με απουσία του από το σύστημα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το επιλεγμένο μοντέλο έχει την δυνατότητα να περιγράψει το σύστημα και τις αλληλεπιδράσεις με το πλαγκτόν, συσχετίζεται καλά με τις βασικές παραμέτρους του πεδίου αλλά και ότι στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι απαραίτητη η υψηλή διακριτικότητα προκειμένου να αποτυπωθούν αυτές οι επιδράσεις. Επίσης και με την χρήση του ΒΓΧ μοντέλου παρατηρήθηκε ότι η ανταπόκριση της πιο oligοτροφικής περιοχής φαίνεται να είναι (παραδόξως) μικρότερη. Τέλος, στο **κεφάλαιο 5**, οι τροφικές σχέσεις στο μοντέλο διαμορφώθηκαν έτσι ώστε να ανταποκρίνονται στην υφιστάμενη κατάσταση σε μία από τις περιοχές μελέτης, όπως αυτή μετρήθηκε κατά τις εργασίες πεδίου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ποιές λειτουργικές ομάδες επηρεάζονται περισσότερο από την

ιχθυοκαλλιέργεια και τις αλλαγές στην δομή της στήλης του νερού, παρουσία της. Επίσης φάνηκε ότι η προσαρμογή με βάση τα δεδομένα από την περιοχή συνέβαλε στην καλύτερη αποτύπωση του συστήματος από το ΒΓΧ μοντέλο.

Το κύριο πλεονέκτημα της διατριβής αυτής είναι ότι η διερεύνηση των επιπτώσεων των ιχθυοκαλλιεργειών στην στήλη του νερού βασίστηκε σε μία διπλή προσέγγιση που περιελάμβανε αφενός μετρήσεις στο πεδίο για ένα ευρύτατο φάσμα οργανισμών και αφετέρου χρήση 3Δ μοντέλων. Με αυτόν τον τρόπο κατέστη δυνατό να διαπιστωθούν αλλαγές στην στήλη του νερού, για το σύνολο των οργανισμών που μελετήθηκαν. Οι επιπτώσεις που εντοπίστηκαν, συντείνουν στο συμπέρασμα ότι οι ιχθυοκαλλιέργειες επηρεάζουν την στήλη του νερού στην γύρω περιοχή τους. Το εύρος και ο βαθμός επιρροής τους ποικίλλει χωρικά και χρονικά.

2 Απόκριση του πλαγκτού στον εμπλουτισμό θρεπτικών από τις μονάδες ιχθυοκαλλιέργειας κατά την περίοδο θερμοστρωμάτωσης και μέγιστης παραγωγής

2.1 Εισαγωγή

Στόχος του παρόντος κεφαλαίου ήταν να αποτυπωθεί μια ολοκληρωμένη εικόνα των αλλαγών στην δομή του πλαγκτού στην περιοχή γύρω από τις ιχθυοκαλλιέργειες, την περίοδο θερμοστρωμάτωσης, συμπεριλαμβάνοντας ένα ευρύ πλέγμα μεγεθών και τροφικών ρόλων, από τα βακτήρια έως το μεσοζωοπλαγκτόν, ως απόκριση στα αυξημένα θρεπτικά. Το εύρος των οργανισμών που μελετήθηκαν μας παρέχει χρήσιμη πληροφορία για το πώς κοινότητες, που είναι προσαρμοσμένες σε ολιγοτροφικές συνθήκες, ανταποκρίνονται στην προσθήκη θρεπτικών σε εκτεθειμένες παράκτιες περιοχές της Ανατολικής Μεσογείου.

2.2 Περιοχές μελέτης

Κύπρος: Η περιοχή μελέτης στην Κύπρο είναι μέρος μιας ΠΟΑΥ (Περιοχή Οργανωμένης Ανάπτυξης Υδατοκαλλιεργειών) που χωροθετήθηκε το 2006. Το πλησιέστερο λιμάνι (Βασιλικό) και η περιοχή γύρω του έχουν κυρίως βιομηχανική χρήση (εργοστάσια παραγωγής ρεύματος και τσιμέντου). Όταν πραγματοποιήθηκαν οι δειγματοληψίες (2008) λειτουργούσαν τρία ιχθυοτροφεία με διαφορετική δυναμικότητα στην περιοχή. Τα καλλιεργούμενα είδη ήταν η τσιπούρα και το λαβράκι. Το 2008, το ιχθυοτροφείο 1 (εφεξής Farm 1) είχε ετήσια παραγωγή 100 τόνους, το ιχθυοτροφείο 2 (εφεξής Farm 2) ήταν το μεγαλύτερο στην περιοχή με ετήσια παραγωγή 700 τόνους και το ιχθυοτροφείο 3 (εφεξής Farm 3) είχε παραγωγή 300 τόνους. Όλα τα ιχθυοτροφεία ήταν σε λειτουργία στην περιοχή πριν το 2000 και τα ιχθυοτροφεία 2 και 3 είχαν αδειοδοτηθεί να διπλασιάσουν την ετήσια παραγωγή τους. Το ελάχιστο βάθος στο πλέγμα που ελήφθησαν δείγματα ήταν τα 20μ και το μέγιστο 60μ.

Λέσβος: Στην Λέσβο υπήρχε ένα ιχθυοτροφείο σε λειτουργία το οποίο βρίσκεται στα νότια παράλια της Ν. Λέσβου, στο ακρωτήριο Αγριλιά. Το ελάχιστο βάθος της περιοχής είναι 10μ ενώ το βαθύτερο σημείο είναι στα 70μ. Το ιχθυοτροφείο βρίσκεται αρκετά κοντά στην ξηρά αλλά, η περιοχή, λόγω του έντονου υδροδυναμικού καθεστώτος,

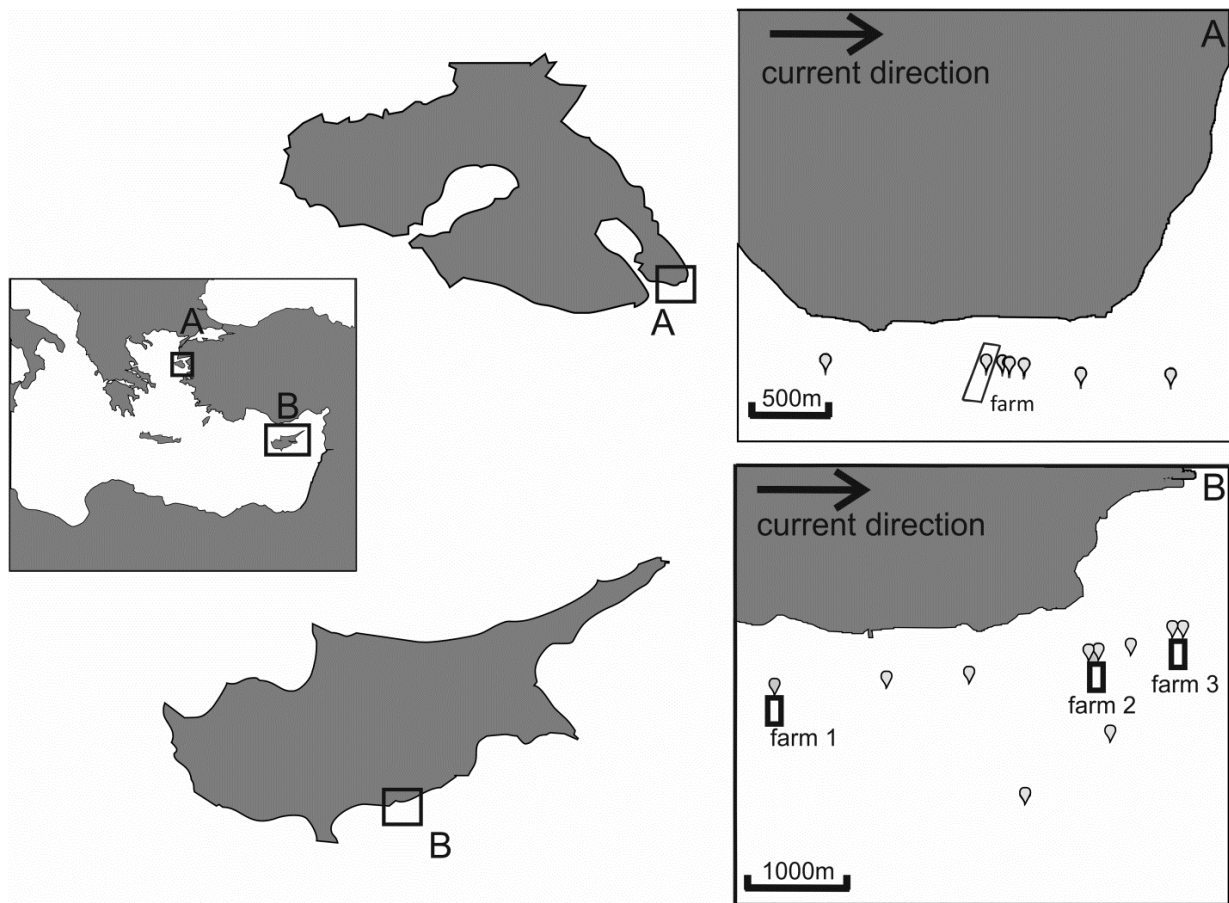
θεωρείται εκτεθειμένη. Η ετήσια παραγωγή όταν πραγματοποιήθηκαν οι εργασίες πεδίου (2008) ήταν 600 τόνοι.

Οι δειγματοληψίες και στις δύο περιοχές πραγματοποιήθηκαν τον Ιανουάριο, Απρίλιο και Ιούλιο του 2008 στην Λέσβο και τον Φεβρουάριο, Μάιο και Ιούλιο του 2008 στην Κύπρο.

2.3 Υλικά και μέθοδοι

2.3.1 Σχεδιασμός δειγματοληψίας και σταθμοί

Προκειμένου να ληφθούν δείγματα από την ίδια μάζα νερού, καθώς αυτή διαπερνά το ιχθυοτροφείο, δόθηκε έμφαση στην παρακολούθηση της διεύθυνσης του ρεύματος. Χρησιμοποιήθηκαν παρασυρόμενοι ρευματογράφοι (Davis, 1982; Zervakis et al, 1999) και εφαρμόστηκε υδροδυναμικό μοντέλο και στις δύο περιοχές. Η διαδικασία και τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν περιγράφονται λεπτομερώς στους Tsagaraki et al (2011). Στην Λέσβο, η δειγματοληψία έγινε ακολουθώντας την ροή του ρεύματος που έδειξαν οι παρασυρόμενοι ρευματογράφοι που ποντίστηκαν την ημέρα της δειγματοληψίας. Ελήφθησαν δείγματα νερού μέσα στα όρια του ιχθυοτροφείου καθώς και σε αποστάσεις 80, 100, 200 και 500 μέτρων κατάντη του ιχθυοτροφείου. Έγινε δειγματοληψία και σε δύο σταθμούς αναφοράς, έναν ανάντη της κατεύθυνσης του ρεύματος (εφεξής και cu) και έναν κατάντη (εφεξής και cd) (Εικ. 2.1). Στην Κύπρο, χρησιμοποιήθηκε η διεύθυνση και η ταχύτητα του ρεύματος που προέβλεπε το επιχειρησιακό μοντέλο CYCOFOS (Cyprus Coastal Ocean Forecasting and Observing System, <http://www.oceanography.ucy.ac.cy/cycofos/>). Τα δείγματα ελήφθησαν στους κλωβούς των τριών ιχθυοτροφείων (5 σταθμοί δειγματοληψίας) και σε σταθμούς αναφοράς (5 σταθμοί δειγματοληψίας) που φαίνονται στην Εικόνα 2.1.



Εικόνα 2.1. Περιοχή ιχθυοτροφείων και σταθμοί δειγματοληψίας στην Λέσβο (A) και στην Κύπρο (B)

2.3.2 Δειγματοληψία

Ελήφθησαν δείγματα από δύο βάθη σε κάθε σταθμό (0 και 15 μ) με χρήση φιάλης Niskin. Το νερό χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση διαλελυμένων και σωματιδιακών θρεπτικών, χλωροφύλλης, βακτηρίων, νανομαστιγωτών και μικροπλαγκτού. Η θερμοκρασία και η αλατότητα μετρήθηκαν με CTD τύπου SBE-16. Το μεσοζωοπλαγκτόν συλλέχθηκε με κατακόρυφες σύρσεις (0-20μ) με χρήση διχτυού WP2, με μάτι 200μm και εφοδιασμένου με ροόμετρο.

2.3.3 Ανάλυση

Τα δείγματα για μέτρηση της συγκέντρωσης χλωροφύλλης διηθήθηκαν σε Glass Fiber Filters (GFF) και καταψύχθηκαν μέχρι την ανάλυση, οπότε εκχυλίστηκαν σε 90%

ακετόνη για 24 ώρες και μετρήθηκαν με φθοριόμετρο Turner σύμφωνα με τους Yentsch & Menzel (1963). Τα δείγματα για ανάλυση διαλελυμένων θρεπτικών συντηρήθηκαν με χλωροφόρμιο (αμμωνία, φωσφορικά), καταψύχθηκαν (πυριτικά, νιτρικά, νιτρώδη) και στη συνέχεια αναλύθηκαν σύμφωνα με τους Strickland & Parsons (1972), πλην της αμμωνίας που αναλύθηκε σύμφωνα με τους Ivancic & Deggobis (1984). Τα σωματιδιακά θρεπτικά αναλύθηκαν σε φίλτρα GFF με X-Ray fluorescence με χρήση του Bruker AXE S4 Pioneer WDXRF. Ο διαλελυμένος οργανικός άνθρακας (DOC) μετρήθηκε σε διπλά δείγματα νερού, σφραγισμένα σε γυάλινες αμπούλες με φλόγιστρο το συντομότερο δυνατόν, οι οποίες προηγουμένως είχαν παραμείνει σε κλίβανο (480°C) για 12 ώρες με προσθήκη 2.5N HCL ώστε το pH τους να είναι περίπου 2. Η ανάλυση των δειγμάτων έγινε με χρήση αυτόματου αναλυτή ολικού οργανικού άνθρακα (Shimadzu TOC-5000), σύμφωνα με τους Sugimura & Suzuki (1988).

Τα δείγματα για μέτρηση βακτηρίων και νανομαστιγωτών ελήφθησαν σε τριάδες και συντηρήθηκαν με εξουδετερωμένη φορμόλη (τελική συγκέντρωση 2%), κατόπιν, βάφτηκαν με DAPI (Porter & Feig, 1980) και φιλτραρίστηκαν σε polycarbonate φίλτρα, με πόρο 0.2 και 0.6 μm αντίστοιχα. Μετρήθηκαν με μικροσκόπιο φθορισμού Olympus BX 90.

Τα δείγματα για μέτρηση μικροπλαγκτού συντηρήθηκαν με όξινο Lugol (τελική συγκέντρωση 4%) και αναλύθηκαν σύμφωνα με τον Utermohl (1931) σε ανάστροφο μικροσκόπιο (Olympus IX70), εξοπλισμένο με σύστημα επεξεργασίας εικόνας, αφού είχε προηγηθεί καθίζηση των κυττάρων επί 24 ώρες.

Τα διάτομα, δινομαστιγωτά, γυμνά βλεφαριδωτά και κωδωνοειδή αναγνωρίστηκαν σε επίπεδο γένους και, όταν αυτό ήταν δυνατόν, σε επίπεδο είδους. Τα γυμνά δινομαστιγωτά *Gyrodinium* και *Gymnodinium*, που δεν ήταν δυνατό να προσδιοριστούν, ομαδοποιήθηκαν στο επίπεδο οικογένειας, δηλαδή τα Gymnodiniaceae.

Οι διαστάσεις (μήκος και πλάτος) κάθε ατόμου που ανήκε στα προαναφερθέντα φύλα μετρήθηκαν χρησιμοποιώντας το λογισμικό Image J και τους αποδόθηκε αντίστοιχο γεωμετρικό σχήμα με βάση τους Hillebrand et al (1999) και Olenina et al (2006). Με βάση το σχήμα αυτό, υπολογίστηκε ο άνθρακας, χρησιμοποιώντας τους συντελεστές που

περιγράφονται στους Davidson et al (2002). Ο τροφικός ρόλος αποδόθηκε σε κάθε ομάδα/ είδος με βάση τους Tomas (ed.) (1997) και Olenina et al (2006). Επιπλέον, η πιο πρόσφατη βιβλιογραφία αναγνωρίζει ότι τα περισσότερα δινωμαστιγωτά είναι μικτότροφα ακόμα και αν διαθέτουν χλωροπλάστες (Du Yoo et al, 2009). Κατά συνέπεια, όλα τα είδη δινωμαστιγωτών θεωρήθηκαν δυνητικά ετερότροφα και ομαδοποιήθηκαν με το μικροζωοπλαγκτό, όπως και στους Loder et al (2011).

Τα δείγματα μεσοζωοπλαγκτού συντηρήθηκαν με 4% εξουδετερωμένη φορμόλη. Το μισό δείγμα χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό ξηρής βιομάζας (DW), αφού τα δείγματα ξηράθηκαν στους 60 °C για 24 ώρες. Στο άλλο μισό, ένα υποδείγμα γνωστού όγκου σαρώθηκε με σύστημα ανάλυσης εικόνας (Image-pro plus 6.0), ώστε να προσδιοριστεί η αφθονία και το μέγεθος των αφθονότερων ποσοτικά ομάδων.

2.3.4 Στατιστική ανάλυση

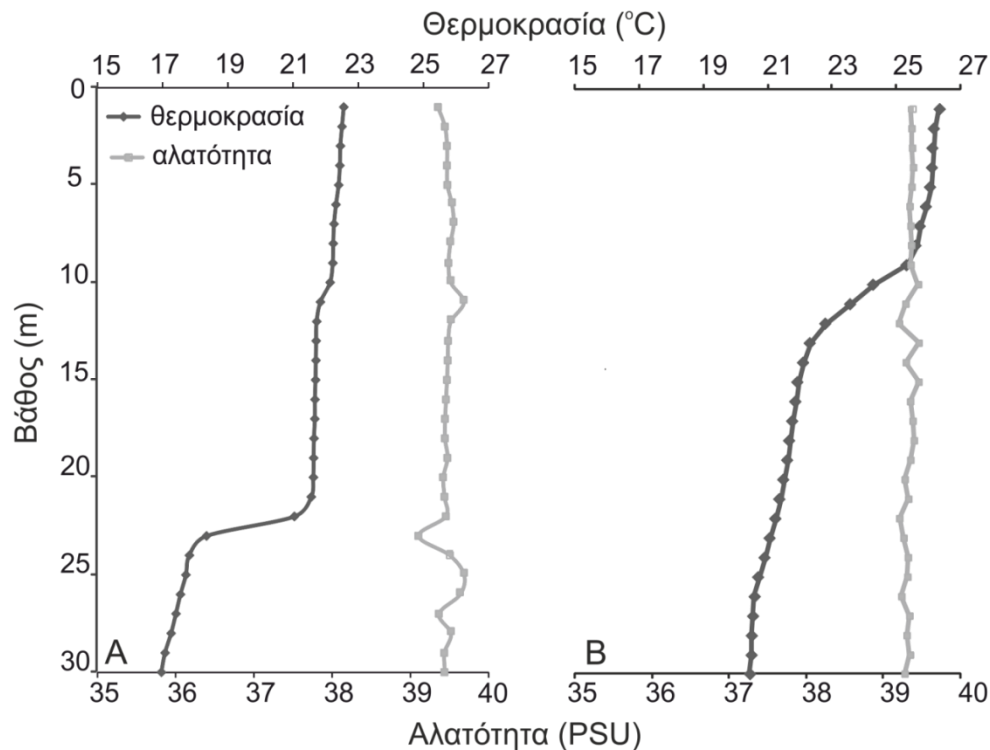
Σε όλα τα δείγματα εφαρμόστηκε ανάλυση διασποράς (ANOVA) και εφαρμόστηκαν τα post-hoc τεστ Bonferonni ή Student Neuman Keuls, όπου αυτό κρίθηκε απαραίτητο. Χρησιμοποιώντας είδη μικροπλαγκτού ανδ σταθμό υπολογίστηκαν οι δείκτες ποικιλότητας Margalef, Pielou και ο αναμενόμενος αριθμός ειδών (ES100). Στην Λέσβο, ως παράγοντας χρησιμοποιήθηκε η απόσταση από το ιχθυοτροφείο και στην Κύπρο, όλοι οι σταθμοί κοντά στις μονάδες ομαδοποιήθηκαν και αντίστοιχα ομαδοποιήθηκαν όλοι οι σταθμοί μακριά από αυτές. Στην Λέσβο, ομαδοποιήθηκαν οι τιμές από τα δύο βάθη δειγματοληψίας, μιας και τα δεδομένα του CTD έδειξαν ότι η στήλη παρέμενε αναμειγμένη μέχρι τα 15 μέτρα. Στην Κύπρο, χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα επιφανειακά δείγματα, καθώς το CTD έδειξε ότι η στήλη ήταν στρωματοποιημένη πάνω από το δεύτερο βάθος. Για την σύγκριση μεταξύ των περιοχών, χρησιμοποιήθηκαν όλα τα δείγματα, από όλους τους σταθμούς, ανεξάρτητα βάθους και απόστασης.

2.4 Αποτελέσματα Ιούλιος

2.4.1 Λέσβος

2.4.1.1 Φυσικές παράμετροι

Στην Λέσβο, η μέση επιφανειακή θερμοκρασία και αλατότητα ήταν 22.5 °C και 39 PSU (Practical Salinity Units) αντίστοιχα (Εικ 2.2Α). Η στήλη ήταν στρωματοποιημένη, με το θερμοκλινές βαθύτερα από τα 20μ. Η μέση ταχύτητα του ρεύματος στην Λέσβο, την ημέρα και ώρα της δειγματοληψίας, ήταν 20 cm sec⁻¹ με κατεύθυνση από την δύση προς την ανατολή.



Εικόνα 2.2. Κατακόρυφη κατανομή μέσης θερμοκρασίας και αλατότητας στην Λέσβο (A) και την Κύπρο (B)

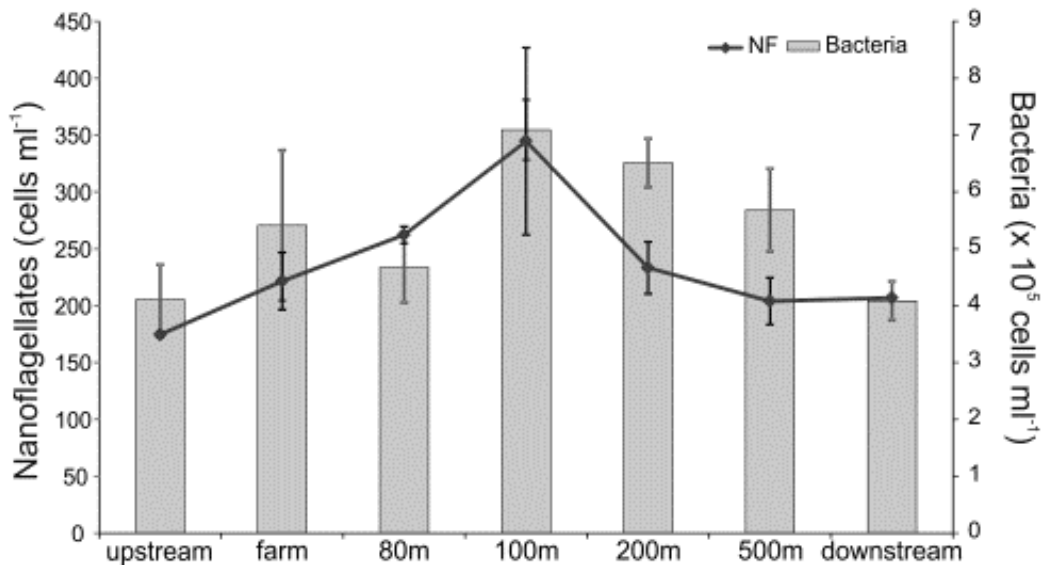
2.4.1.2 Χλωροφύλλη, διαλελυμένα και σωματιδιακά θρεπτικά

Η χλωροφύλλη, οι φαιοχρωστικές και τα σωματιδιακά και διαλελυμένα θρεπτικά δεν έδειξαν στατιστικά σημαντικές αλλαγές μεταξύ των σταθμών δειγματοληψίας. Η μόνη εξαίρεση ήταν ο λόγος χλωροφύλλης προς τις φαιοχρωστικές, ο οποίος ήταν σημαντικά

χαμηλότερος στους σταθμούς 100 και 200 m κατάντη ($p < 0.001$) σε σχέση με όλους τους υπόλοιπους σταθμούς. Ο λόγος ήταν σημαντικά υψηλότερος και στους δύο σταθμούς αναφοράς ($p < 0.001$) καθώς και στους κλωβούς.

2.4.1.3 Αφθονία πικο- και νανοπλαγκτού

Η αφθονία των βακτηρίων (πικο-) και των νανομαστιγωτών (νανοπλαγκτόν) εξετάστηκαν ανάντη και κατάντη των κλωβών (Εικ. 2.3). Για τα βακτήρια, η ANOVA έδειξε σημαντικές διαφορές μεταξύ των σταθμών ($p < 0.001$). Ο σταθμός 100 m κατάντη είχε σημαντικά μεγαλύτερη αφθονία βακτηρίων ($\sim 7 \times 10^5$ cells. ml^{-1}) από ό,τι όλοι οι υπόλοιποι σταθμοί, πλην του σταθμού 200 m κατάντη. Οι σταθμοί αναφοράς ανάντη και κατάντη είχαν σημαντικά μικρότερη αφθονία ($p < 0.001$, $\sim 4 \times 10^5$ cells. ml^{-1}) σε σύγκριση με τους σταθμούς 100, 200 και 500 m κατάντη. Παρόμοια τάση παρατηρήθηκε για τα νανομαστιγωτά, δηλ. βρέθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των σταθμών ($p < 0.005$). Ο σταθμός 100 m κατάντη παρουσίασε την μεγαλύτερη αφθονία από ό,τι όλοι οι υπόλοιποι σταθμοί (516 cells. ml^{-1}).



Εικόνα 2.3. Αφθονία βακτηρίων και νανομαστιγωτών (NF) (cells ml^{-1}) στην Λέσβο

2.4.1.4 Σύσταση κοινότητας μικροπλαγκτού- συχνότητα κατανομής μεγεθών

Το κυρίαρχο γένος μικροπλαγκτού στην Λέσβο ήταν το διάτομο *Hemiaulus*, το οποίο παρατηρήθηκε σε όλους τους σταθμούς, και ήταν ιδιαίτερα άφθονο στους σταθμούς αναφοράς. Η αφθονία του ήταν σημαντικά υψηλότερη ($5400 \text{ cells l}^{-1}$) στον σταθμό αναφοράς ανάντη του ιχθυοτροφείου από ό,τι σε όλους τους άλλους σταθμούς ($p < 0.005$). Άλλα άφθονα γένη διατόμων ήταν τα *Nitzschia* και *Guinardia*, δεν παρατηρήθηκαν όμως στατιστικά σημαντικές διαφορές στην αφθονία και την βιομάζα τους μεταξύ των σταθμών. Στα δινομαστιγωτά, τα γένη *Gyrodinium* και *Gymnodinium* ήταν τα περισσότερο άφθονα και δεν παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές αλλαγές μεταξύ των σταθμών για αυτά τα γένη. Τα βλεφαριδωτά ανήκαν κυρίως στα γένη *Strombidium* και *Tontonia*.

Σε ό,τι αφορά την σύσταση του μικροπλαγκτού, η αφθονία των ειδών (Margalef species richness) σε κάθε σταθμό εμφάνισε στατιστικά σημαντικές διαφορές ($p < 0.05$) μεταξύ του σταθμού αναφοράς ανάντη και όλων των σταθμών κατόντη του ιχθυοτροφείου. Η ποικιλότητα ανάντη του ιχθυοτροφείου ήταν 6.7 του δείκτη Margalef, ενώ κυμάνθηκε μεταξύ 8.1 και 10.5 σε όλους τους υπόλοιπους σταθμούς χωρίς να υπάρχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ τους. Το ίδιο ισχύει και για τον δείκτη ομοιομορφίας των ειδών, Pielou ($p < 0.001$), ο οποίος ήταν χαμηλότερος στον σταθμό αναφοράς ανάντη (0.47) από ό,τι σε όλους τους υπόλοιπους σταθμούς (0.75-0.92). Ο αναμενόμενος αριθμός ειδών (ES100) στον σταθμό αναφοράς ανάντη ήταν 20.6, και ήταν χαμηλότερος στον σταθμό αναφοράς ανάντη ($p < 0.01$) σε σχέση με τους υπόλοιπους σταθμούς που είχαν αναμενόμενο αριθμό ειδών μεταξύ 29 και 42.

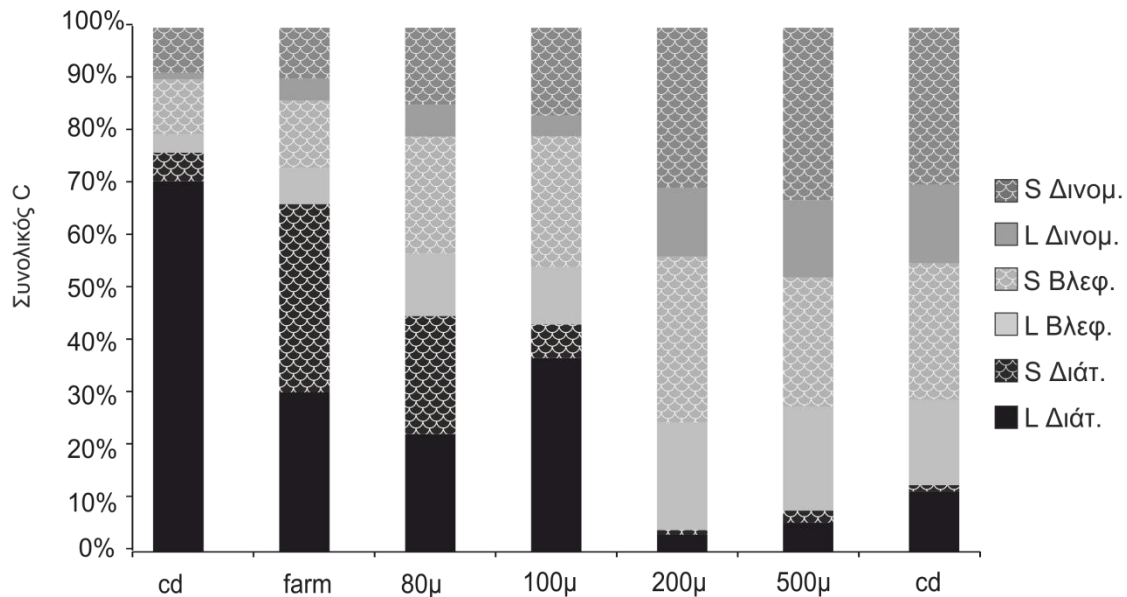
Αναλύθηκε επίσης η κατανομή βάσει μεγέθους για τα διάτομα, δινομαστιγωτά και βλεφαριδωτά. Στην Λέσβο, η αφθονία των κωδωνοειδών ήταν πολύ χαμηλή (< 50 άτομα ανά λίτρο συνολικά) και συνεπώς δεν χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση. Τα άτομα από όλες τις ομάδες διαχωρίστηκαν με βάση την ισοδύναμη σφαιρική τους διάμετρο (ESD) και χωρίστηκαν σε δύο ομάδες, τα μικρά ($< 20 \mu\text{m ESD}$) και τα μεγάλα ($> 20 \mu\text{m ESD}$) κύτταρα. Στην κατηγορία των μεγάλων, το 95% των κυττάρων ήταν μεταξύ 20 και 40 $\mu\text{m ESD}$. Και στους δύο σταθμούς αναφοράς, η κοινότητα των διατόμων αποτελούνταν από κύτταρα πάνω από 20 $\mu\text{m ESD}$. Μόλις 7 και 9% των κυττάρων διατόμων

κατατάχθηκαν στην κατηγορία μικρών, στον σταθμό αναφοράς ανάντη και κατάντη, αντίστοιχα. Στον σταθμό του ιχθυοτροφείου και σε 80 m κατάντη, η εικόνα αυτή ήταν τελείως διαφορετική. Η αφθονία των μικρών κυττάρων αυξήθηκε και η κοινότητα είχε διαιρεθεί ως προς την αφθονία σε δύο περίπου ισοδύναμα μέρη, μεταξύ μικρών και μεγάλων κυττάρων. Στα 100 m κατάντη, η αφθονία των μεγάλων αυξήθηκε πάλι σε 85% της συνολικής αφθονίας και το ποσοστό των μεγάλων παρέμεινε μεγαλύτερο από των μικρών, σε όλους τους σταθμούς κατάντη του ιχθυοτροφείου. Τα μικρά δινομαστιγωτά ήταν πίο άφθονα σε όλους τους σταθμούς, όμως, η αφθονία των μεγάλων δινομαστιγωτών αυξήθηκε κατάντη του ιχθυοτροφείου, από 13% που ήταν στον ανάντη σταθμό αναφοράς, σε περίπου 30% σε όλους τους σταθμούς κατάντη. Εξαίρεση αποτέλεσε ο σταθμός 100 m κατάντη όπου η αύξηση ήταν μικρότερη, συγκεκριμένα 19%. Για τα βλεφαριδωτά, η συνεισφορά των μικρών κυττάρων στην συνολική αφθονία ήταν μεγαλύτερη σε όλους τους σταθμούς. Φάνηκε ότι τα μεγαλύτερα κύτταρα αυξήθηκαν σε αφθονία κατάντη του ιχθυοτροφείου. Στον ανάντη σταθμό αναφοράς τα μεγάλα βλεφαριδωτά αποτελούσαν το 25% των κυττάρων που μετρήθηκαν και το ποσοστό αυτό αυξήθηκε στο 45%, 500 m κατάντη του ιχθυοτροφείου.

Το μέγεθος των ατόμων που μετρήθηκαν χρησιμοποιήθηκε επίσης για να διαπιστωθεί αν το μέγεθος των πίο άφθονων γενών από κάθε ομάδα διαφοροποιήθηκε σε σχέση με την απόσταση από τους κλωβούς. Τα Gymnodiniaceae έδειξαν σημαντική διαφοροποίηση στην κατανομή μεγεθών ($p < 0.001$). Το post-hoc τεστ Student-Neuman-Keuls ομαδοποίησε τους σταθμούς σε δύο ομοιογενή υποσύνολα, το ένα υποσύνολο περιλαμβάνει τον ανάντη σταθμό αναφοράς και τους σταθμούς 100 και 500 m κατάντη και το δεύτερο υποσύνολο περιλαμβάνει το ιχθυοτροφείο και τους σταθμούς 80, 200 και 500 m καθώς και τον σταθμό αναφοράς κατάντη. Η μέση ESD των Gymnodiniaceae ήταν σημαντικά χαμηλότερη στον ανάντη σταθμό αναφοράς και στα 100 m κατάντη και ήταν 13.8 μm ($p < 0.005$). Σε όλους τους άλλους σταθμούς εκτός από τα 500 m, αυτή η ομάδα είχε υψηλότερη μέση ESD από 16 έως 16.7 μm .

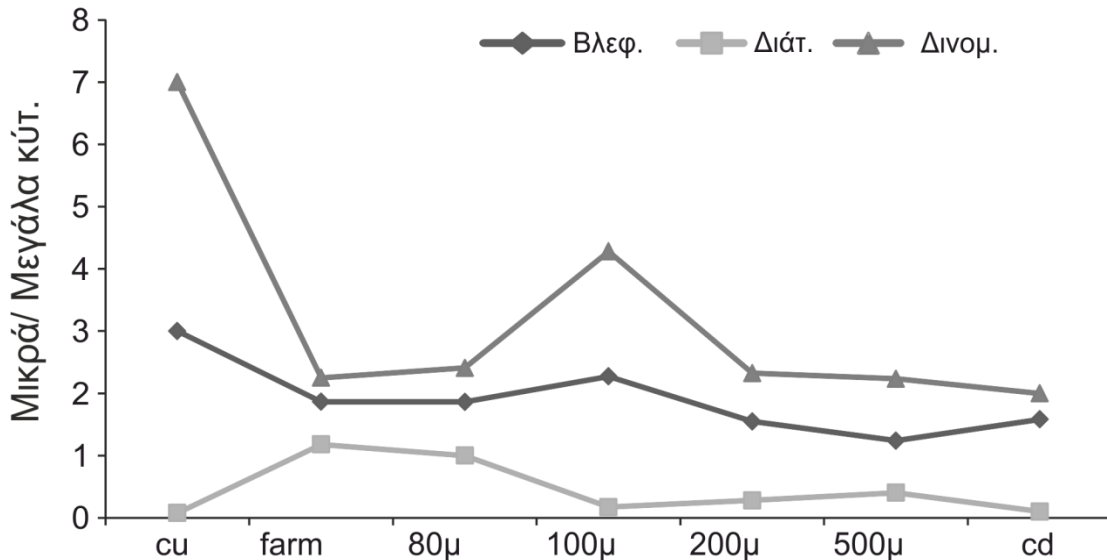
Η ποσοστιαία συνεισφορά σε άνθρακα κάθε ομάδας στον συνολικό άνθρακα του μικροπλαγκτού φαίνεται στην Εικόνα 2.4. Τα μεγάλα διάτομα κυριαρχούσαν στην βιομάζα στον ανάντη σταθμό αναφοράς και αντικαταστάθηκαν από μικρότερα διάτομα

στο ιχθυοτροφείο αλλά εξακολούθησαν να υπερτερούν σε βιομάζα άνθρακα. Η συνεισφορά των διατόμων στην συνολική βιομάζα άρχισε να μειώνεται στα 80μ κατάντη και παρέμεινε χαμηλή μέχρι και τον σταθμό αναφοράς. Τα βλεφαριδωτά αύξησαν την συνεισφορά τους στην συνολική βιομάζα κατάντη του ιχθυοτροφείου, αλλά και το μέγεθός τους και το ίδιο φάνηκε και για τα δινωμαστιγωτά, αν και η αύξηση στα μεγαλύτερα κύτταρα εμφανίστηκε πιο μακριά από τους κλωβούς.



Εικόνα 2.4. Ποσοστιαία συνεισφορά των επιμέρους ομάδων μικροπλαγκτού στον συνολικό άνθρακα μικροπλαγκτού ανά σταθμό στην Λέσβο (S: κύτταρα < 20μm ESD, L: κύτταρα > 20μm ESD. Δινομ: Δινωμαστιγωτά, Βλεφ: Βλεφαριδωτά, Διάτ: Διάτομα)

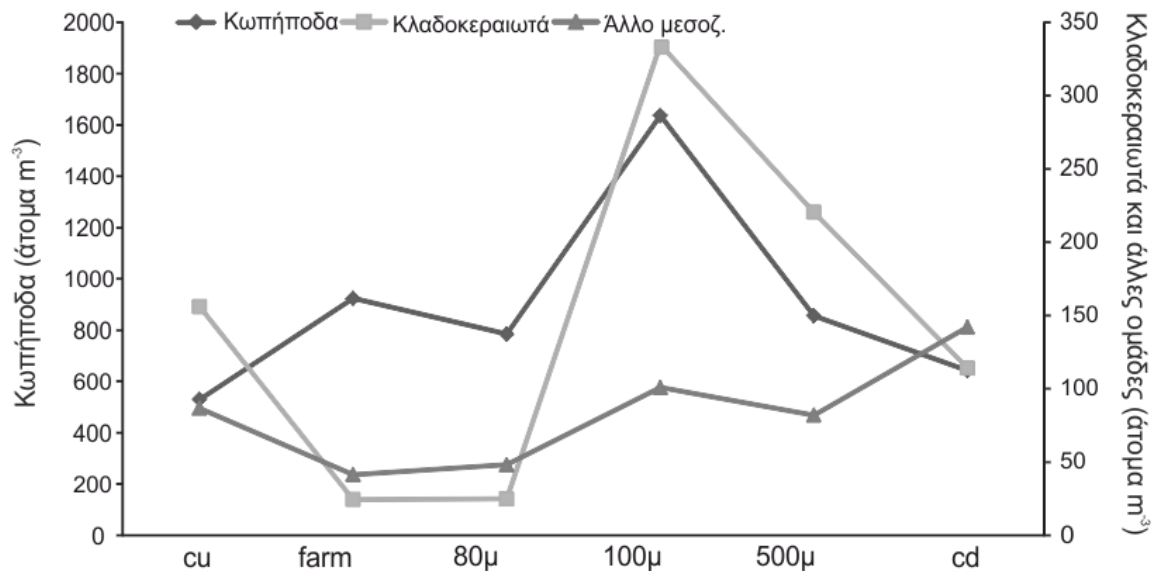
Τέλος, ο λόγος αφθονίας μικρών/ μεγάλων κυττάρων για αυτές τις ομάδες έδειξε ένα ενδιαφέρον πρότυπο. Τα βλεφαριδωτά και τα δινωμαστιγωτά εμφάνισαν την ίδια τάση στο λόγο μικρών/ μεγάλων κυττάρων σε όλους τους σταθμούς (Εικ. 2.5). Τα διάτομα εμφάνισαν διαφορετικό πρότυπο, το οποίο φαίνεται να συσχετίζεται αντιστρόφως με το πρότυπο του μικροζωοπλαγκτού, ιδιαίτερα των δινωμαστιγωτών.



Εικόνα 2.5. Λόγος αφθονίας μικρών (<20 μm ESD) προς μεγάλα (>20 μm ESD) κύτταρα μικροπλαγκτού ανά σταθμό στην Λέσβο (Βλεφ: Βλεφαριδωτά, Διάτ: Διάτομα, Δινομ: Δινομαστιγωτά)

2.4.1.5 Σύσταση κοινότητας μεσοζωοπλαγκτού- Κατανομή μεγεθών

Η αφθονία και η βιομάζα του μεσοζωοπλαγκτού έδειξαν αύξουσα τάση κοντά στους κλωβούς σε σχέση με τους υπόλοιπους σταθμούς. Η βιομάζα διπλασιάστηκε από 10.17 σε 20.79 mg ξηρού βάρους m^{-3} ανάντη του ιχθυοτροφείου και στον σταθμό των κλωβών αντίστοιχα. Το μέγιστο εμφανίστηκε στα 80μ κατάντη και ήταν 20.94 mg ξηρού βάρους m^{-3} και από το σημείο εκείνο άρχισε να μειώνεται ενώ η απόσταση από το ιχθυοτροφείο μεγάλωνε, φτάνοντας στα 8.87 mg ξηρού βάρους m^{-3} στον σταθμό αναφοράς κατάντη. Είχε επίσης ενδιαφέρον η μείωση, σχεδόν κατά μία τάξη μεγέθους, της αφθονίας των κλαδοκεραιωτών (που ήταν η δεύτερη σε αφθονία ομάδα μετά τα κωπήποδα) από >100 άτομα m^{-3} ανάντη του ιχθυοτροφείου σε <25 άτομα m^{-3} στους κλωβούς και στα 80μ κατάντη και η επαναφορά της αφθονίας στα >100 άτομα m^{-3} σε πίο απομακρυσμένους σταθμούς (Εικ. 2.6). Το αντίστροφο πρότυπο παρατηρήθηκε για τα κωπήποδα, τα οποία διπλασιάστηκαν στα 100 μ κατάντη και επανήλθαν στις τιμές του σταθμού αναφοράς ανάντη, σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Δεν παρατηρήθηκε μεγάλη διαφοροποίηση στην κατανομή μεγεθών μεταξύ των σταθμών, εκτός από το ότι τα μικρότερα είδη μετρήθηκαν στον σταθμό 100μ κατάντη (με μέγεθος ~570 μm για τα κωπήποδα και κλαδοκεραιωτά).



Εικόνα 2.6. Αφθονία κωπήποδων, κλαδοκεραιωτών και άλλου μεσοζωοπλαγκτού (άτομα m⁻³) ανά σταθμό στην Λέσβο

2.4.2 Κύπρος

2.4.2.1 Φυσικές παράμετροι

Η μέση θερμοκρασία στην Κύπρο ήταν 26.3°C και η μέση αλατότητα 39 PSU (Εικ. 2B). Παρατηρήθηκε στρωμάτωση στην στήλη του νερού και το θερμοκλίνας ήταν αρκετά κοντά στην επιφάνεια, σε βάθος λιγότερο από 10μ. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του υδροδυναμικού μοντέλου, η μέση ταχύτητα του ρεύματος ήταν 0.15 m sec⁻¹ και η διεύθυνση του επιφανειακού ρεύματος ήταν από την δύση προς την ανατολή.

2.4.2.2 Πικοπλαγκτόν

Η αφθονία των βακτηρίων στην Κύπρο ήταν σημαντικά χαμηλότερη ($p < 0.05$) στους σταθμούς αναφοράς από ό,τι στις μονάδες κατά 20%.

2.4.2.3 Σύσταση κοινότητας μικροπλαγκτού- συχνότητα κατανομής μεγέθους

Τα κυρίαρχα γένη στην Κύπρο ήταν τα δινομαστιγωτά *Gymnodinium* και *Gyrodinium*. Άλλα άφθονα γένη ήταν τα διάτομα *Hemiaulus* και *Navicula* αν και δεν παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές στην αφθονία κανενός από τα κυρίαρχα γένη. Σε

επίπεδο ομάδας, η βιομάζα των διατόμων ήταν σημαντικά χαμηλότερη στις μονάδες ($p < 0.05$), χωρίς η αφθονία να παρουσιάσει σημαντικές διαφορές.

Ο δείκτης ποικιλότητας Margalef δεν έδειξε σημαντικές διαφορές μεταξύ των σταθμών, η υψηλότερη ποικιλότητα παρατηρήθηκε στο ιχθυοτροφείο 3, που είχε και την μεγαλύτερη παραγωγή, με τιμή 12.4. Όμως, ο συνολικός αριθμός κυττάρων μικροπλαγκτού ήταν σημαντικά υψηλότερος στις μονάδες ($p < 0.05$).

Η κατανομή μεγεθών στην Κύπρο δεν έδειξε σημαντικές διαφορές μεταξύ μικρών και μεγάλων κυττάρων. Το ποσοστό μικρών κυττάρων ήταν υψηλότερο για όλους τους σταθμούς, περίπου 85% της συνολικής αφθονίας. Εξαίρεση αποτέλεσαν τα δινομαστιγωτά που αυξήθηκαν, κατά 10% στους σταθμούς των μονάδων, στο 35% της συνολικής αφθονίας. Παρατηρήθηκαν επίσης διαφορές στα μεγέθη των διατόμων όπου τα κύτταρα, με ESD μεγαλύτερη από 20 μικρόμετρα, ήταν περισσότερα στους σταθμούς αναφοράς (61%) από ό,τι στις μονάδες (50%), σε σχέση με τα μικρά κύτταρα.

2.4.2.4 Βιομάζα μεσοζωοπλαγκτού

Η βιομάζα του μεσοζωοπλαγκτού δεν εμφάνισε κάποιο πρότυπο σε σχέση με τους κλωβούς, η μέση βιομάζα ήταν 5.55 mg ξηρού βάρους m^{-3} .

2.4.3 Σύγκριση περιοχών

Προκειμένου να αξιολογηθούν τα γενικότερα χαρακτηριστικά των περιοχών μελέτης το καλοκαίρι, κρίθηκε αναγκαία και η σύγκριση μεταξύ των δύο περιοχών. Αυτό περιελάμβανε όλους τους σταθμούς που χρησιμοποιήθηκαν στις στατιστικές αναλύσεις των δύο περιοχών. Η χλωροφύλλη ήταν σημαντικά χαμηλότερη στην Κύπρο ($p < 0.001$) όπως επίσης και τα φωσφορικά ($p < 0.01$). Τα πυριτικά και το συνολικό διαλελυμένο άζωτο ήταν σημαντικά περισσότερα στην Κύπρο ($p < 0.001$). Η βιομάζα των βλεφαριδωτών ($p < 0.01$) και διατόμων ($p < 0.05$) ήταν σημαντικά υψηλότερη στην Λέσβο ενώ στην Κύπρο ήταν σημαντικά μεγαλύτερη η αφθονία των δινομαστιγωτών ($p < 0.05$). Η συνολική αφθονία του μικροπλαγκτού ήταν σημαντικά μεγαλύτερη στην Λέσβο ($p < 0.05$) και τέλος, και η ποικιλότητα με βάση τον δείκτη Margalef και ο αναμενόμενος αριθμός ειδών (ES100) ήταν μεγαλύτεροι στην Κύπρο ($p < 0.05$). Η βιομάζα του

μεσοζωοπλαγκτού ήταν μεγαλύτερη στην Λέσβο. Από την κατανομή μεγεθών φάνηκε ότι τα μικρά βλεφαριδωτά αποτελούν 84% του συνολικού πληθυσμού στην Κύπρο, ενώ στην Λέσβο το ποσοστό αυτό είναι 64% και δεν παρατηρήθηκε μεγάλη διαφοροποίηση μεταξύ του μεγέθους των δινομαστιγιωτών και διατόμων μεταξύ των δύο περιοχών.

2.5 Συζήτηση

Σε μια επισκόπηση της βιβλιογραφίας για τις επιπτώσεις των υδατοκαλλιιεργειών στην στήλη του νερού, ο Sara (2007) καταλήγει ότι ο τύπος του οικοσυστήματος φαίνεται να είναι ένας από τους πλέον καθοριστικούς παράγοντες για τις αλλαγές που παρατηρούνται. Θα περίμενε κανείς να βρει περισσότερες επιπτώσεις σε ένα ημίκλειστο σύστημα με περιορισμένο ρυθμό ανανέωσης του νερού. Οι περιοχές μελέτης, που ήταν και οι δύο εκτεθειμένες με σχετικά μεγάλη ταχύτητα ρεύματος, έδειξαν ότι η τροφική κατάσταση και η σύσταση της βιοκοινότητας παίζουν επίσης σημαντικό ρόλο στις διαφορές που καταγράφονται.

Η σύγκριση μεταξύ των περιοχών και αποστάσεων από τους κλωβούς δείχνει την απόκριση της πλαγκτονικής κοινότητας σε διαφορετικές κλίμακες. Η απόκριση που παρατηρήθηκε, υπογραμμίζει ένα θέμα που έχει θιγεί από πολλούς συγγραφείς στο παρελθόν, ότι η γνώση της υδρογραφίας της περιοχής είναι απαραίτητη προκειμένου να ανιχνευθούν αλλαγές στην στήλη του νερού, ιδιαίτερα σε εκτεθειμένες περιοχές (Maldonado et al, 2005; Sara et al, 2006). Στην παρούσα μελέτη υπήρξε η δυνατότητα τα ρεύματα να μετρηθούν σε πραγματικό χρόνο και έτσι να γίνει δειγματοληψία σε μάζα νερού με την βεβαιότητα ότι η μάζα αυτή είχε διαπεράσει τους κλωβούς, ιδιαίτερα στην περιοχή της Λέσβου. Αποδείχτηκε ότι λόγω της υψηλής ταχύτητας των ρευμάτων, το να θεωρηθεί ο σταθμός των κλωβών καλλιέργειας ως επηρεασμένος δεν ήταν ορθή προσέγγιση και αντίθετα φάνηκε ότι οι ενδιάμεσοι σταθμοί ήταν εκείνοι που έδειξαν σημάδια επιπτώσεων στις παραμέτρους που μετρήθηκαν. Τα συμπεράσματα αυτά συμφωνούν και με τους Sara et al (2006) και Sara (2007a, και περιεχόμενες αναφορές) που βρήκαν, από τα πρότυπα διασποράς από μονάδες ιχθυοκαλλιέργειας, ότι οι μεγαλύτερες επιπτώσεις εντοπίζονται 100 με 300 m κατάντη των κλωβών και, ανάλογα με την ταχύτητα του ρεύματος, μπορούν να φτάσουν σε ακόμα μεγαλύτερες αποστάσεις. Αυτό το πρότυπο παρατηρήθηκε και στην Λέσβο με την απόσταση να είναι μεταξύ 100

και 500 m κατάντη. Πιθανόν αυτή η απόσταση να είναι μεγαλύτερη, λαμβάνοντας υπόψη ότι παρατηρήθηκε συσσώρευση θρεπτικών και σε σημεία απομακρυσμένα από το ιχθυοτροφείο (Tsagaraki et al, 2011).

Συγκρίνοντας τις δύο περιοχές, είναι προφανές ότι η Κύπρος είναι περισσότερο ολιγοτροφική και περιορισμένη σε φωσφόρο από ό,τι η Λέσβος. Αυτό φαίνεται και από τα επίπεδα φωσφόρου που είναι χαμηλότερα στην Κύπρο, αλλά και από την αυξημένη διαθεσιμότητα αζώτου και πυριτικών. Η Κύπρος παρουσιάζει μεγαλύτερη αφθονία σε δινομαστιγωτά, ενώ η Λέσβος έχει περισσότερα διάτομα και βλεφαριδωτά. Και οι δύο βιοκοινότητες φαίνεται να αποτελούνται κυρίως από μικρά άτομα με διάμετρο κάτω από 20 μικρόμετρα, με μεγαλύτερο ποσοστό μικρών να απαντάται στην Κύπρο. Παρόλη την χαμηλότερη αφθονία μικροπλαγκτού, ο δείκτης ποικιλότητας Margalef έδειξε ότι αυτή ήταν υψηλότερη στην Κύπρο. Αυτό μας φέρνει αντιμέτωπους με το «παράδοξο του πλαγκτού» (Hutchinson, 1961) που, εν συντομία, θέτει το ερώτημα πως μια περιοχή με περιορισμένους πόρους, μπορεί να υποστηρίξει ένα μεγαλύτερο εύρος οργανισμών σε αντίθεση με την αρχή του ανταγωνιστικού αποκλεισμού, που βασίζεται στην υπόθεση ότι μέσω του ανταγωνισμού για περιορισμένους πόρους επικρατούν εν τέλει λιγότερα είδη. Τα αποτελέσματα είναι σε συμφωνία με τους Ignatiades et al (2009) που βρήκαν μεγαλύτερη ποικιλότητα στις πλαγκτονικές κοινότητες στην λεκάνη της Ανατολικής Μεσογείου, αποδίδοντας το εύρημα αυτό στην ύπαρξη μεγαλύτερου αριθμού θώκων που απαντώνται σε αυτό το πιά ζεστό και με μεγαλύτερη αλατότητα περιβάλλον.

Είναι εμφανές από τα αποτελέσματα ότι η επιρροή της ιχθυοκαλλιέργειας στον περιβάλλοντα χώρο, είναι πιά έντονη στην Λέσβο. Θα περίμενε κανείς το αντίθετο, καθώς η Κύπρος είναι πιά περιορισμένη σε φωσφόρο, συνεπώς τα θρεπτικά που εκλύουν τα ιχθυοτροφεία θα έπρεπε να κινούν μία πιά άμεσα ανιχνεύσιμη απόκριση στο σύστημα. Επιπλέον, η ταχύτητα του ρεύματος στην Λέσβο ήταν μεγαλύτερη κατά την περίοδο της δειγματοληψίας, άρα και ο ρυθμός απομάκρυνσης των θρεπτικών, δυσκολεύοντας έτσι την ανίχνευση διαφορών μεταξύ των σταθμών. Μια πιθανή εξήγηση για την απόκριση της βιοκοινότητας που παρατηρήθηκε και στις δύο περιοχές είναι οι χρόνοι παραμονής του φωσφόρου στο σύστημα. Οι Zohary & Robarts (1998) βρήκαν πολύ βραχύ χρόνο παραμονής του φωσφόρου, της τάξης των 2-3 ωρών, στην Λεβαντίνη ο οποίος

οφείλονταν επί το πλείστον στην δραστηριότητα των βακτηρίων. Με βάση άλλα αποτελέσματα από την Ανατολική Μεσόγειο, ο χρόνος παραμονής του φωσφόρου στο σύστημα είναι λιγότερο από 5 ώρες και σε κάποιες περιπτώσεις φτάνει και τα δύο λεπτά (Ivancic et al, 2012). Αποτελέσματα από ένα πείραμα προσθήκης φωσφόρου στο σύστημα στην Λεβαντίνη οδήγησαν στην διατύπωση μηχανισμών πρόσληψης που δεν αλληλοαναιρούνται (Krom et al, 2005; Thingstad et al, 2005), αλλά μπορούν να εξηγήσουν την μετατόπιση της ενέργειας στα υψηλότερα τροφικά επίπεδα. Ο ένας μηχανισμός, που έχει παρατηρηθεί και σε γλυκά νερά από τους Kerner et al (2003), ονομάστηκε «trophic bypass», και σύμφωνα με αυτόν ο φωσφόρος μεταφέρεται κατευθείαν στους θηρευτές μέσω των βακτηρίων παρακάμπτοντας το φυτοπλαγκτόν. Ο δεύτερος μηχανισμός είναι το «tunneling», όπου ο φωσφόρος απορροφάται σε περίσσεια από τα βακτήρια αλλά και από μεγαλύτερο πλαγκτόν, προκαλώντας αλλαγές στην ποιότητα διαθέσιμης τροφής για τους θηρευτές, αλλάζοντας την στοιχειομετρική σύσταση του θηράματος. Αυτός ο μηχανισμός επίσης έχει παρατηρηθεί σε γλυκό νερό όπου ο Heesen (1992) βρήκε ότι η βιομάζα του μεσοζωοπλαγκτού συσχετίζεται καλύτερα με τον σωματιδιακό φωσφόρο παρά με την βιομάζα του φυτοπλαγκτού ή της χλωροφύλλης. Φαίνεται ότι και στις δύο περιοχές οι αλλαγές που παρατηρήθηκαν κοντά στις ιχθυοκαλλιέργειες, μπορούν να αποδοθούν και σε διεργασίες που έχουν να κάνουν με τους προαναφερθέντες μηχανισμούς. Στην Κύπρο, τα βλεφαριδωτά και τα δινωμαστιγωτά μπορεί να υποκαθιστούν το μεσοζωοπλαγκτόν μιας και συχνά είναι πίο αποτελεσματικοί θηρευτές ιδιαίτερα στις μικρότερες κατηγορίες μεγέθους (Sherr & Sherr, 2007; Jeong et al, 2010) και εμφανίζονται περισσότερο άφθονα κλιμακωτά από το βόρειο Αιγαίο στις νοτιότερες περιοχές της ανατολικής Μεσογείου (Siokou-Frangou et al, 2002; Ignatiades et al, 2009). Στην Λέσβο, λόγω της υψηλότερης συγκέντρωσης θρεπτικών και τη δυναμική της εκεί κοινότητας του πλαγκτού, η απόκριση αυτή απεικονίστηκε πίο έντονα.

Αν και δεν παρατηρούνται συχνά αλλαγές στην αφθονία των βακτηρίων κοντά σε κλωβούς ιχθυοκαλλιέργειας, στην παρούσα μελέτη αυτό μετρήθηκε και στις δύο περιοχές. Παρόλα αυτά, οι Hobbie & Cole (1984), Alongi et al (2003), Maldonado et al (2005) και Pitta et al (2005) μέτρησαν περισσότερα βακτήρια σε περιοχές όπου είχαν προστεθεί θρεπτικά. Παρόμοια απόκριση παρατήρησε και ο Weisse (1991), ο οποίος

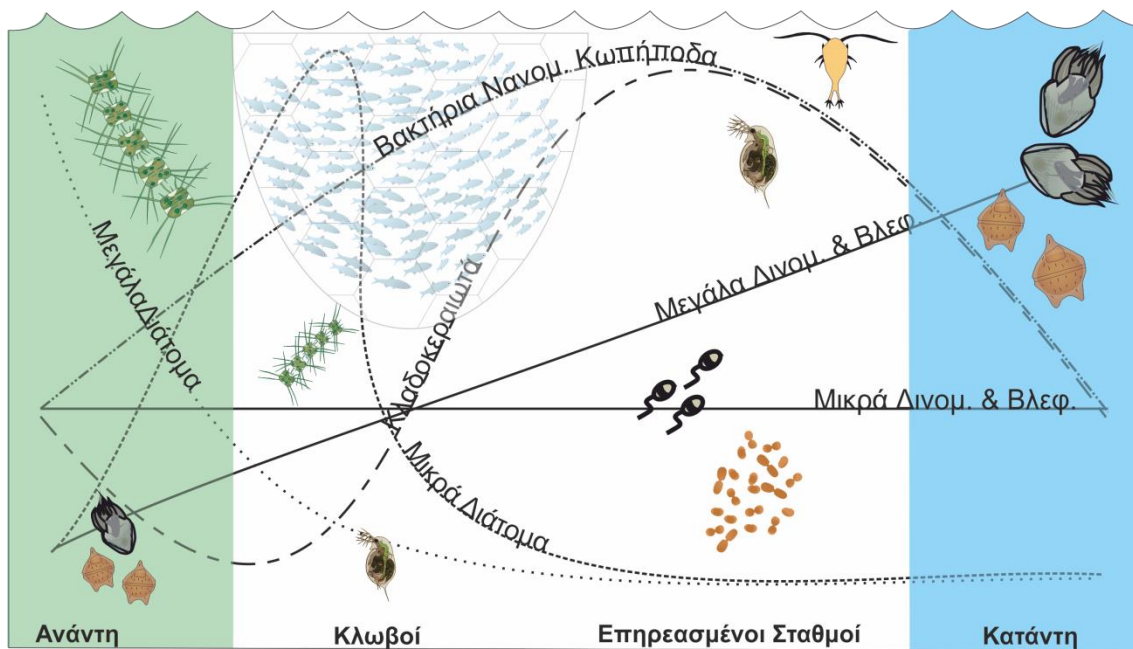
πρότεινε ότι η αυξημένη αφθονία των βακτηρίων που παρατήρησε οδηγεί εν τέλει στην επικράτηση της γραμμικής τροφικής αλυσίδας. Τα αποτελέσματα και από τις δύο περιοχές ωθούν στο συμπέρασμα ότι υπάρχει κοινή απόκριση στην προσθήκη θρεπτικών από ιχθυοκαλλιέργειες σε oligοτροφικές περιοχές. Αυτή συνίσταται σε μια άμεση απόκριση ορισμένων ομάδων (νανοπλαγκτόν, πικοπλαγκτόν και μεσοζωοπλαγκτόν) στην προσθήκη θρεπτικών (tunneling) και μια αύξηση στο μέγεθος του μικροζωοπλαγκτού το οποίο εκμεταλλεύεται τις διαθέσιμες πηγές τροφής (bypass). Παρόμοια αποτελέσματα από την Μεσόγειο αναφέρονται στους La Rosa et al (2002), Pitta et al (2005, 2009) και Dalsgaard (2006).

Με βάση τις παραμέτρους που μετρήθηκαν στην παρούσα μελέτη, επιχειρήθηκε να απεικονιστεί η πλαγκτονική κοινότητα κοντά και πιο μακριά από τους κλωβούς, η οποία απεικονίζεται γραφικά στην Εικόνα 2.7. Η κοινότητα ανάντη του ιχθυοτροφείου είναι τυπική των oligοτροφικών συνθηκών στην περιοχή το καλοκαίρι. Η βιομάζα (ως περιεχόμενος άνθρακας) του μικροπλαγκτού κυριαρχείται από μεγάλα διάτομα και μικρά κύτταρα μικροζωοπλαγκτού. Το επικρατές γένος *Hemiaulus* είναι γνωστό για την ικανότητα που έχει να αξιοποιεί συνθήκες με χαμηλά θρεπτικά (Werner, 1977). Συγχρόνως, αν και τα δινόμαστιγωτά θεωρούνται κύριοι θηρευτές των διατόμων (Calbet & Landry, 2004), συχνά θηρεύουν επιλεκτικά (Umani & Beran, 2003; Lawrence & Menden-Deuer, 2012), με την διατροφή τους να μην περιλαμβάνει απαραίτητα διάτομα ακόμα και αν αυτά είναι διαθέσιμα.

Στους κλωβούς και στον σταθμό 80μ κατάντη, η αφθονία του πικοπλαγκτού αυξάνεται, η συνεισφορά των διατόμων στην βιομάζα του μικροπλαγκτού αρχίζει να μειώνεται και συγχρόνως τα μικρά διάτομα υπερτερούν των μεγάλων διατόμων ως προς την βιομάζα σε άνθρακα. Η συνεισφορά των βλεφαριδωτών (μεγάλων και μικρών) στην συνολική βιομάζα αυξάνεται ενώ δεν συμβαίνει το ίδιο για τα δινόμαστιγωτά, των οποίων η πληθυσμιακή αύξηση φαίνεται να καθυστερεί σε αυτούς τους σταθμούς. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς, κάτω από τις ίδιες συνθήκες διαθεσιμότητας θρεπτικών, τα βλεφαριδωτά έχει δείχτει ότι αυξάνονται πιο γρήγορα από ό,τι δινόμαστιγωτά του ίδιου μεγέθους (Neuer & Cowles, 1995; Strom & Morello, 1998). Από την άλλη, η αφθονία των κλαδοκεραιωτών μειώνεται σχεδόν κατά μία τάξη μεγέθους, παρόλο που η ομάδα

αυτή είναι πολύ καλός θηρευτής του πικοφυτοπλαγκτού σε σχέση με άλλες ομάδες μεσοζωοπλαγκτού (Atienza et al, 2006), καταναλώνοντας συνήθως λεία κάτω από 10 μm ESD (Hansen et al, 1994). Συνεπώς, η δραστική μείωση στην αφθονία τους είναι πιο πιθανό να προέρχεται είτε από top down control, ενδεχομένως από νεαρά (άγρια) ιχθύδια που είναι γνωστό ότι χρησιμοποιούν τους κλωβούς ως καταφύγιο (Jover-Fernandez et al 2009), είτε από αυξημένο ανταγωνισμό με τα κωπήποδα που επιλέγουν ως προς το μέγεθος της τροφής, όταν αυτή είναι διαθέσιμη (Kleppel, 1993; Sommer & Stibor, 2002), σε αντίθεση με τα κλαδοκεραιοτά που τρέφονται αποκλειστικά μέσω διήθησης (Sommer & Stibor, 2002).

Στους σταθμούς με την μεγαλύτερη επίπτωση, παρατηρήθηκε η μεγαλύτερη αφθονία σε βακτήρια, νανομαστιγωτά, κλαδοκεραιοτά και κωπήποδα (trophic bypass). Συγχρόνως, σε αυτήν την απόσταση, η συνεισφορά σε άνθρακα των μεγάλων βλεφαριδωτών και δινωμαστιγωτών συνέχισε να αυξάνεται (tunneling), αν και ο λόγος μικρών/μεγάλων κυττάρων ήταν υψηλότερος από ό,τι σε όλους τους άλλους σταθμούς. Παρόμοια εικόνα παρουσιάζει και ο σταθμός 200μ κατάντη. Η συνεισφορά μεγαλύτερων βλεφαριδωτών και δινωμαστιγωτών είναι μεγαλύτερη σε αυτές τις αποστάσεις, μια τάση που συνεχίστηκε μέχρι και τον σταθμό αναφοράς κατάντη του ιχθυοτροφείου, αν και η αφθονία του πικοπλαγκτού και μεσοζωοπλαγκτού επιστρέφει στα επίπεδα που βρισκόταν πριν περάσει ο όγκος νερού από την μονάδα. Συνολικά, φαίνεται ότι κατάντη του ιχθυοτροφείου, το ετερότροφο κομμάτι κυριαρχεί στην βιομάζα υποδεικνύοντας ενδεχόμενη μετατόπιση από τον μικροβιακό βρόχο προς την γραμμική τροφική αλυσίδα.



Εικόνα 2.7. Εννοιολογικό διάγραμμα των αλλαγών που παρατηρήθηκαν στην βιομάζα της πλαγκτονικής κοινότητας σε αποστάσεις από τους κλωβούς ανάντη και κατάντη του ρεύματος στην Λέσβο (Δινομ.: Δινομαστιγωτά, Βλεφ.: Βλεφαριδωτά, Νανομ.: Νανομαστιγωτά)

Στην προσπάθεια να ερμηνευτούν τα αποτελέσματα, είναι χρήσιμο να έχει κανείς υπόψη ότι η συγκέντρωση οποιασδήποτε ουσίας που εκλύεται, είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης από την πηγή της. Συνεπώς, οι βιοκοινότητες στα δείγματα που αναλύθηκαν από τους ενδιάμεσους σταθμούς, περιμένουμε ότι έχουν «επωαστεί» περισσότερο χρόνο σε συνθήκες με αυξημένα θρεπτικά, αρκετό ώστε οι αλλαγές να είναι μετρήσιμες περισσότερο από ό,τι κοντά στην περιοχή απελευθέρωσης των θρεπτικών. Συγχρόνως, σε αυτές τις αποστάσεις, η μάζα νερού δεν έχει «αραιώσει» αρκετά ώστε η σύνθεσή της να καταστεί ίδια με τον μη επηρεασμένο όγκο νερού.

Οι αλλαγές στην σύσταση της βιοκοινότητας φαίνονται και από την ποικιλότητα που παρατηρήθηκε στους σταθμούς δειγματοληψίας. Η περιοχή κοντά στα ιχθυοτροφεία υποστηρίζει μεγαλύτερη ποικιλότητα στο μικροπλαγκτόν. Σε αυτή την περίπτωση, περισσότερα είδη μπόρεσαν να εκμεταλλευτούν το μικροπεριβάλλον που δημιουργείται γύρω από τους κλωβούς. Το φαινόμενο αυτό έρχεται σε αντίθεση με ό,τι έχει παρατηρηθεί στο ίζημα γύρω από ιχθυοκαλλιέργειες, όπου έχει καταγραφεί σημαντική

απώλεια ποικιλότητας (Kalantzi & Karakassis, 2006). Επίσης, έρχεται σε αντίθεση με άλλες περιπτώσεις, όπου η προσθήκη θρεπτικών στην στήλη του νερού συχνά οδηγεί σε μονοειδική άνθηση (Coale et al, 1996; Kiorboe et al, 1998; Egge et al 2009). Η υπόθεση ενδιάμεσης διατάραξης (intermediate disturbance hypothesis, Grime, 1973; Dial & Roughgarden, 1998) μπορεί ενδεχομένως να εξηγήσει τις αλλαγές που παρατηρούνται κοντά στα ιχθυοτροφεία. Πολύ απλά, η υπόθεση αυτή προβλέπει ότι η παροδική ή μέσης κλίμακας διατάραξη σε ένα σύστημα αυξάνει την ποικιλότητα. Επιπλέον, ο Tilman (1996) παρατηρεί ότι η διαφοροποίηση δρα ως μηχανισμός που διασφαλίζει ότι κάποια είδη θα μπορέσουν να αποσβέσουν την απόκριση άλλων ειδών σε παρεμβολές και αλλαγές.

Αφήνοντας την δομή της κοινότητας κατά μέρος, παραμένει γεγονός ότι η βιοκοινότητα παρουσία του ιχθυοτροφείου αλλάζει και ότι οι αλλαγές αυτές συνεχίζουν να είναι εμφανείς κατάντη των κλωβών και ως το υψηλότερο τροφικό επίπεδο που μετρήθηκε στην παρούσα μελέτη. Έτσι, έχουμε και περισσότερες ενδείξεις για τον τρόπο με τον οποίο μεταφέρεται η ενέργεια για να καταλήξει σε νεαρά (Fernandez-Jover et al, 2009) και ενήλικα (Bacher et al, 2012) ψάρια κοντά στους κλωβούς, αλλά και σε συναθροίσεις άγριων ψαριών σε μεσοκλίμακες (Machias et al, 2004), όπως επίσης και σε θηρευτές ανώτατου τροφικού επιπέδου σε ακόμα μεγαλύτερες χωρικές κλίμακες (Piroddi et al, 2011).

3 Εποχιακά πρότυπα και μεταβολές στην αφθονία και σύσταση των πλαγκτονικών κοινοτήτων ως αποτέλεσμα της προσθήκης διαλελυμένων και σωματιδιακών αλάτων από κλωβούς ιχθυοκαλλιέργειας

3.1 Εισαγωγή

Η διακύμανση των θρεπτικών και η εποχιακή κατανομή του πλαγκτού κοντά στα ιχθυοτροφεία είναι πληροφορίες που βοηθούν να κατανοήσουμε ποιές διεργασίες καθοδηγούνται από εποχιακούς παράγοντες και ποιές επηρεάζονται περισσότερο από την παρουσία της ιχθυοκαλλιέργειας. Παράλληλα, μπορεί να διαπιστωθεί αν το πρότυπο που παρατηρείται όταν επικρατεί θερμοστρωμάτωση, συνεχίζει να υφίσταται όταν η στήλη αναμιγνύεται και η παροχή θρεπτικών από την ιχθυοκαλλιέργεια και η θερμοκρασία μειώνονται. Για τον λόγο αυτό έγινε και η περαιτέρω σύγκριση μεταξύ εποχών και αποστάσεων προκειμένου να διαπιστωθεί αν οι αλλαγές που επιφέρει η ιχθυοκαλλιέργεια, ειδικά στην περίπτωση της Λέσβου, είναι εμφανείς και σε άλλες εποχές, όπως την άνοιξη που έχουμε άνθηση του φυτοπλαγκτού στο Βόρειο Αιγαίο και τον χειμώνα όπου η στήλη είναι αναμειγμένη και υπάρχει μεγαλύτερη παροχή θρεπτικών κυρίως λόγω των εισροών από ποτάμια .

3.2 Υλικά και μέθοδοι

Ο σχεδιασμός της δειγματοληψίας και οι αποστάσεις από τις οποίες ελήφθησαν δείγματα περιγράφονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 2. Στην Κύπρο οι σταθμοί δειγματοληψίας ήταν ίδιοι σε όλες τις εποχές. Στην Λέσβο ακολουθήθηκε η φορά του ρεύματος σε κάθε δειγματοληψία, όπως αυτή καταγράφηκε από τους παρασυρόμενους ρευματογράφους και προβλέφθηκε από το υδροδυναμικό μοντέλο. Συνεπώς, ενώ οι αποστάσεις από τους κλωβούς ήταν ίδιες, η κατεύθυνση του πλέγματος σταθμών διέφερε κατά περίπτωση. Διευκρινιστικά υπενθυμίζεται ότι οι σταθμοί δειγματοληψίας ήταν: εντός της περιοχής των κλωβών (εφεξής και farm), στα 80, 100 200 και 500 μέτρα κατάντη της διεύθυνσης του ρεύματος και σε δύο σταθμούς αναφοράς κατάντη (εφεξής και cd) και ανάντη (εφεξής και cu) της διεύθυνσης του ρεύματος. Η στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων περιγράφεται στο κεφάλαιο δύο (ενότητα 2.3.4).

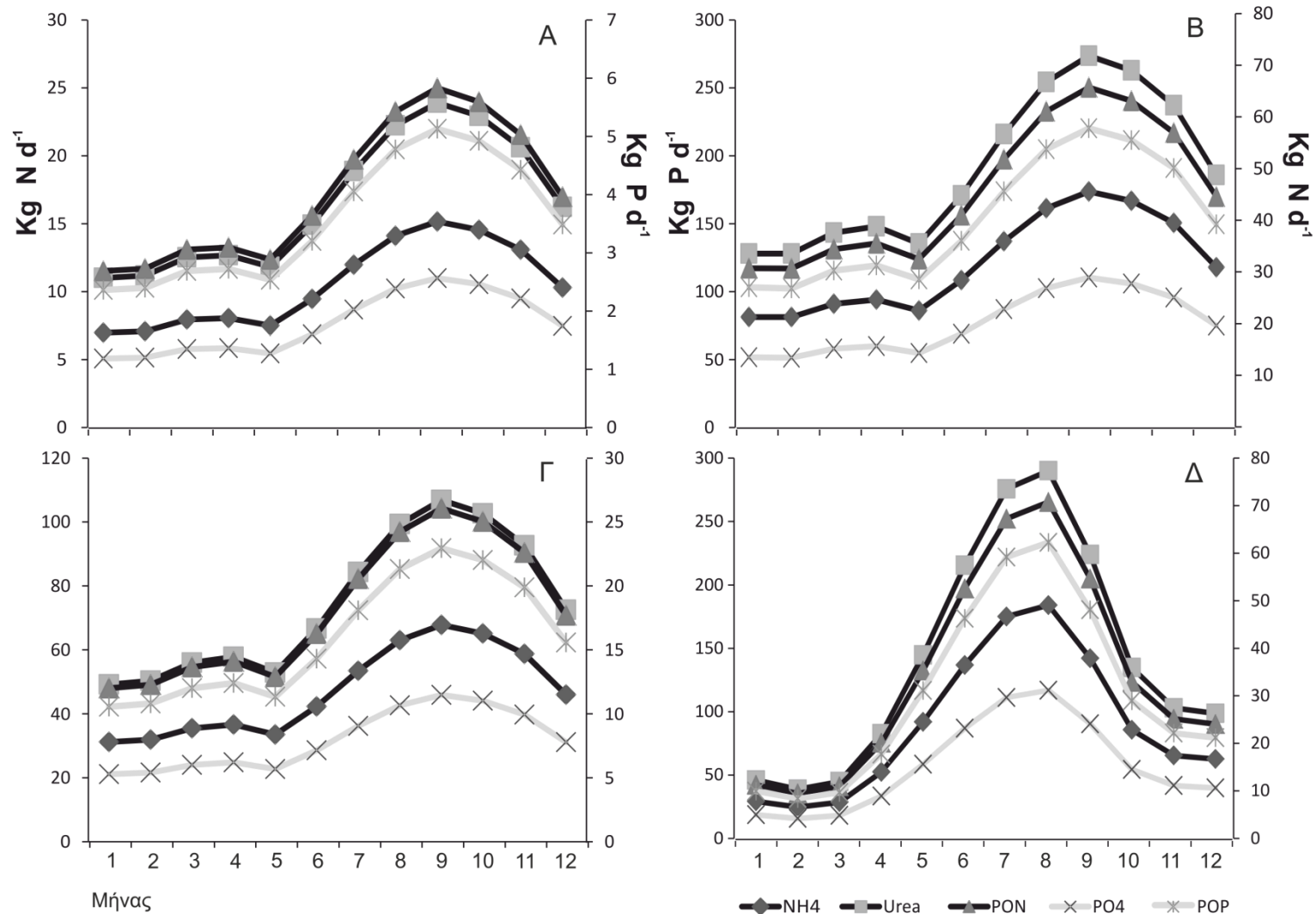
3.2.1 Σύσταση εισροών από τα ιχθυοτροφεία στις περιοχές μελέτης

Τα δεδομένα παροχής τροφής σε ημερήσια ή εβδομαδιαία βάση συλλέχθηκαν από όλες τις μονάδες στην περιοχή μελέτης. Αυτό είχε ως στόχο και τον υπολογισμό των εισροών που ήταν απαραίτητο να λάβει υπόψη του το μοντέλο αλλά και την γενικότερη εκτίμηση του τι προστίθεται στο σύστημα σε τακτά χρονικά διαστήματα. Η εκτροφή των ψαριών διαφοροποιούνται ανάλογα με την εποχή, καθώς η κατανάλωση τροφής σχετίζεται κυρίως με την θερμοκρασία και το μέγεθος του ψαριού. Η αύξηση της θερμοκρασίας συνεπάγεται μεγαλύτερη κατανάλωση τροφής (Jobling, 1998), συνεπώς η ποσότητα και συχνότητα παροχής τροφής αυξάνεται τους θερινούς μήνες.

Έγινε συλλογή των δεδομένων εκτροφής από τις μονάδες στην περιοχή μελέτης (Τσαπάκης, 2008) και υπολογίστηκε η ημερήσια διακύμανση παροχής θρεπτικών (ισοζύγιο μάζας) που περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφ. 4. Η μέση ημερήσια παρεχόμενη τροφή ανά μήνα φαίνεται στον Πίνακα 3.1 και η μέση μηνιαία παροχή θρεπτικών (N, P) μέσω της τροφής φαίνεται στην Εικόνα 3.1. Στα υπό μελέτη ιχθυοτροφεία, η χορήγηση της τροφής λάμβανε χώρα 1-2 φορές την ημέρα τους χειμερινούς μήνες και 2-3 φορές τους θερινούς.

Πίνακας 3.1. Μέση ημερήσια παρεχόμενη τροφή (kg d^{-1}) ανά μήνα στα ιχθυοτροφεία στις περιοχές μελέτης

Μήνας	Λέσβος	Farm 1 Κύπρος	Farm 2 Κύπρος	Farm 3 Κύπρος
Ιανουάριος	1531	358	4093	1600
Φεβρουάριος	1289	363	4063	1637
Μάρτιος	1488	407	4585	1820
Απρίλιος	2749	412	4734	1879
Μάιος	4829	385	4329	1718
Ιούνιος	7196	485	5460	2167
Ιούλιος	9204	614	6908	2742
Αύγουστος	9685	723	8140	3231
Σεπτέμβριος	7477	777	8757	3476
Οκτώβριος	4497	745	8410	3338
Νοέμβριος	3436	671	7591	3013
Δεκέμβριος	3286	528	5943	2359
Ιανουάριος	1531	358	5694	1600



Εικόνα 3.1. Διακύμανση των θρεπτικών που παρέχονται σε Kg N d⁻¹ (Αμμωνία: NH₄, Ουρία: Urea, Σωματιδιακό Οργανικό Άζωτο: PON) και Kg P d⁻¹ (Φωσφορικά: PO₄, Σωματιδιακός Οργανικός Φωσφόρος: POP) μέσω της μέσης ημερήσιας ποσότητας τροφής ανά μήνα στις υπό μελέτη μονάδες ιχθυοκαλλιέργειας. Α: Κύπρος- Farm 1, Β: Κύπρος- Farm 2, Γ: Κύπρος- Farm 3, Δ: Λέσβος

3.3 Αποτελέσματα

3.3.1 Λέσβος

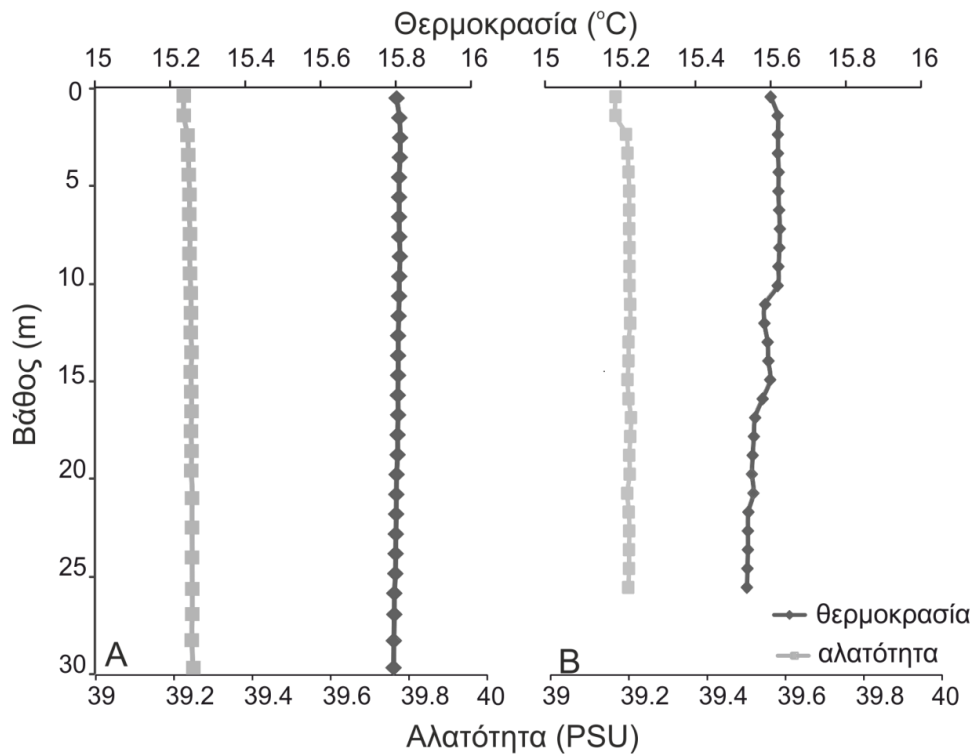
3.3.1.1 Φυσικές παράμετροι

Στην δειγματοληψία του Ιανουαρίου στην Λέσβο, η μέση θερμοκρασία του νερού ήταν 15.8°C και η μέση αλατότητα 39.25 PSU (Εικ. 3.2A). Η στήλη εμφάνισε πλήρη ομογενοποίηση και λόγω αυτής δεν αναμενόταν και μεγάλη διαφοροποίηση των ρευμάτων με το βάθος. Οι άνεμοι έπνεαν ιδιαίτερα ισχυροί, βορειοανατολικοί επί το πλείστον, με μέση ταχύτητα 16 m s^{-1} . Οι παρασυρόμενοι ρευματογράφοι (εφεξής και υδραετοί) που ποντίστηκαν, ακολούθησαν πορεία βορειοανατολική και η μέση ταχύτητα που καταγράφηκε ήταν 3 cm s^{-1} και η μέγιστη 10 cm s^{-1} . Η πρόγνωση του μοντέλου ήταν σωστή ως προς την διεύθυνση, παρόλα αυτά, ο υπολογισμός της ταχύτητας ήταν μεγαλύτερος, με μέγιστη ταχύτητα στο επιφανειακό στρώμα τα 24 cm s^{-1} (Εικ 3.3A). Αξίζει να σημειωθεί ότι η πολύ χαμηλή ταχύτητα του ρεύματος που καταγράφηκε εκείνη την εποχή αποδίδεται στο ότι οι υδραετοί ποντίστηκαν πολύ κοντά στους ιχθυοκλωβούς, με αποτέλεσμα, οι τελευταίοι να επιβραδύνουν την ταχύτητά τους.

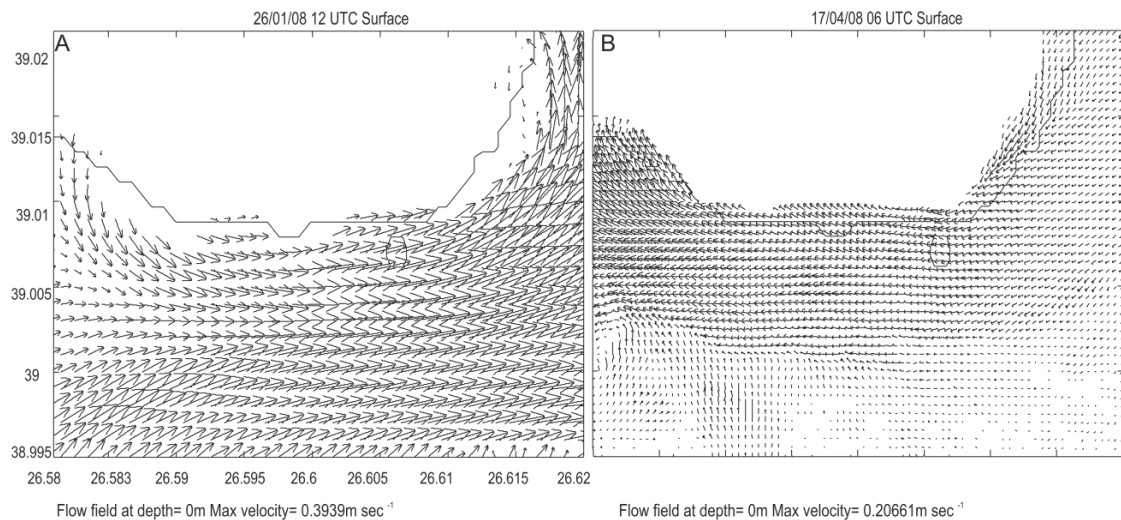
Παρόμοιες συνθήκες καταγράφηκαν τον Απρίλιο, η μέση θερμοκρασία ήταν 15.6°C και η μέση αλατότητα 39.25 PSU (Εικ. 3.2B). Η κατακόρυφη δομή της στήλης δείχνει ότι το θερμοκλινές έχει αρχίσει να σχηματίζεται, αν και η στήλη παραμένει σχετικά ομοιογενής. Οι άνεμοι έπνεαν νοτιοδυτικοί– νοτιοανατολικοί, με μέση ταχύτητα 10 m s^{-1} . Οι μετρήσεις των υδραετών έδειξαν ότι τα ρεύματα είχαν διεύθυνση βορειοδυτική, με ταχύτητα που δεν υπερέβαινε τα 10 cm s^{-1} , αλλά και πάλι, οι τιμές που καταγράφηκαν ήταν πολύ χαμηλότερες κοντά στους κλωβούς. Η πρόγνωση του μοντέλου έδειξε το ίδιο πρότυπο με αυτό που καταγράφηκε από τα ρευματομέτρα, με μέγιστη προβλεπόμενη ταχύτητα του ρεύματος επιφανειακά, τα 11 cm s^{-1} (Εικ. 3.3B).

Μιά πύο λεπτομερής ανάλυση των δεδομένων του CTD και των ρευματογράφων από τους Ζερβάκη και συν. (2008) έδειξε ότι τα νερά στην περιοχή μελέτης είναι κυρίως Λεβαντινής προέλευσης και χαρακτηρίζονται από γενικά υψηλή θερμοκρασία και αλατότητα. Τα αποτελέσματα επίσης έδειξαν ότι στην περιοχή αυτή η θαλάσσια μάζα κυριαρχεί και κινείται προς βορρά, καθορίζοντας και την διεύθυνση του ρεύματος

απουσία ισχυρών ανέμων. Όταν πνέουν μέτριοι ή ισχυροί άνεμοι, το ανεμογενές ρεύμα, το οποίο είναι και αρκετά ισχυρό, υπερτερεί και καθορίζει την πορεία των εκροών του ιχθυοτροφείου. Από την άλλη, η ύπαρξη των κλωβών επηρεάζει την κίνηση των μαζών νερού πολύ κοντά σε αυτούς, αφενός, ασκώντας τριβή και συνεπώς μειώνοντας την ταχύτητα κίνησης της μάζας νερού που τους διαπερνά και αφετέρου, μεταβάλλοντας την κατανομή θερμοκρασίας και αλατότητας λόγω της ισχυρής ανάμιξης στους κλωβούς.



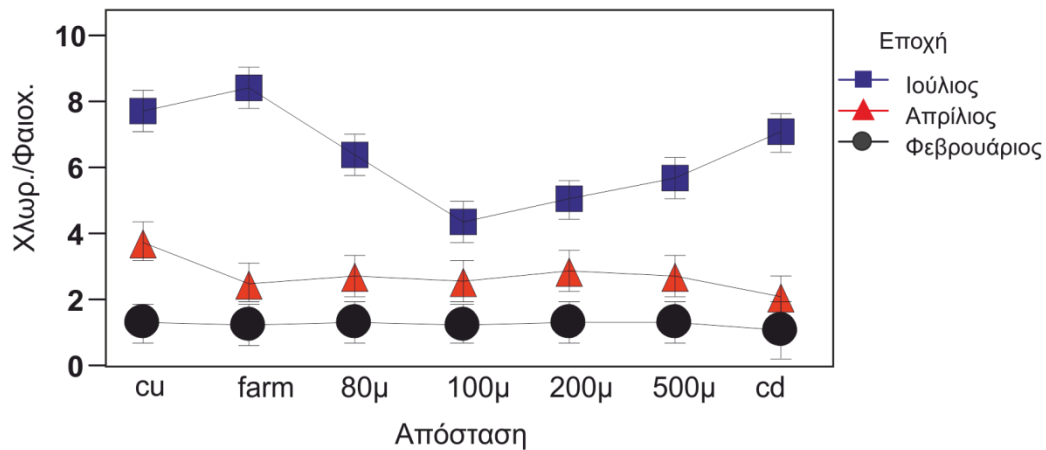
Εικόνα 3.2. Κατακόρυφη κατανομή μέσης θερμοκρασίας και αλατότητας στην Λέσβο τον Ιανουάριο (A) και τον Απρίλιο (B)



Εικόνα 3.3. Ταχύτητα και διεύθυνση του ρεύματος την ημέρα δειγματοληψίας στην Λέσβο τον Ιανουάριο (A) και τον Απρίλιο (B) σύμφωνα με την πρόγνωση του υδροδυναμικού μοντέλου

3.3.1.2 Χλωροφύλλη, διαλελυμένα και σωματιδιακά θρεπτικά

Τα αποτελέσματα της 2way ANOVA έδειξαν ότι η χλωροφύλλη και οι φαιοχρωστικές διαφέρουν σημαντικά μόνο ως προς την εποχή, με τις υψηλότερες τιμές χλωροφύλλης και φαιοχρωστικών να εμφανίζονται το χειμώνα ($p < 0.001$). Η μέση συγκέντρωση χλωροφύλλης ήταν 0.254 mg l^{-1} τον χειμώνα ενώ το καλοκαίρι και την άνοιξη ήταν 0.105 και 0.145 mg l^{-1} αντίστοιχα. Από την άλλη, ο λόγος χλωροφύλλης/ φαιοχρωστικών ήταν πιά χαμηλός τον χειμώνα από τις άλλες δύο εποχές ($p < 0.001$) ενώ το καλοκαίρι ήταν πιά υψηλός και από τον χειμώνα και από την άνοιξη. Η διακύμανση του λόγου χλωροφύλλης/ φαιοχρωστικών σε όλες τις εποχές και αποστάσεις από τους κλωβούς φαίνεται στην Εικόνα 3.4. Η αλληλεπίδραση εποχής και απόστασης από τους κλωβούς ήταν στατιστικά σημαντική για τον λόγο αυτό ($p < 0.001$) και το post-hoc test (Bonferroni) έδειξε ότι οι σταθμοί ομαδοποιούνται σε τέσσερις διακριτές ομάδες όπως αυτό φαίνεται από την κατακόρυφη ευθυγράμμιση στην στήλη «Ομοιογενείς ομάδες» στον Πίνακα 3.2.



Εικόνα 3.4. Διακύμανση του λόγου χλωροφύλλης (Χλωρ.)/ φαιοχρωστικών (Φαιοχ.) ανά εποχή και απόσταση από το ιχθυοτροφείο

Πίνακας 3.2. Ομοιογενείς ομάδες σταθμών όπως διαμορφώθηκαν για τον λόγο χλωροφύλλης/ φαιοχρωστικών, σύμφωνα με το τεστ Bonferroni

Απόσταση	Least Square Mean	Ομοιογενείς ομάδες
100μ	2.13	X
200μ	2.44	XX
500μ	2.60	XX
cd	2.78	XX
80μ	2.83	XX
farm	3.38	XX
cu	3.57	X

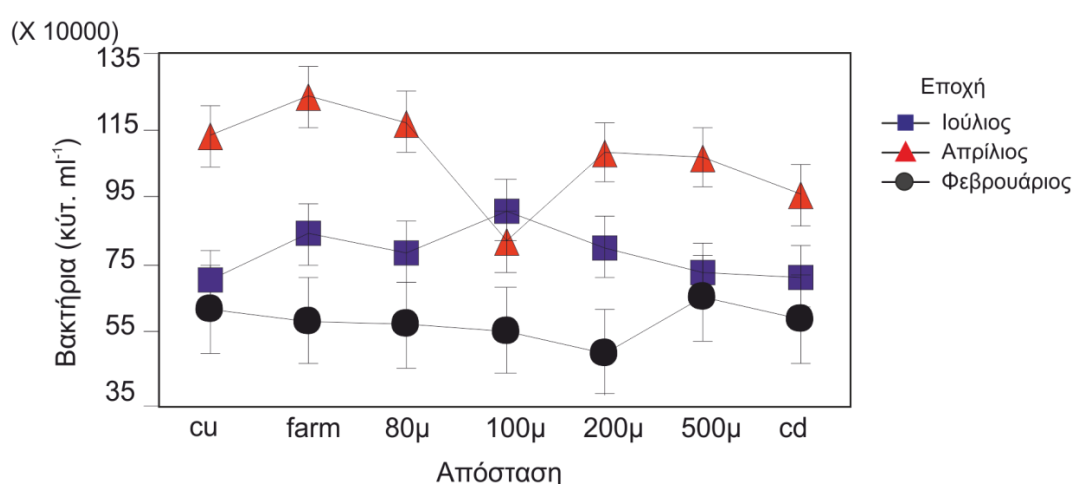
Τα φωσφορικά άλατα διέφεραν μόνο ως προς την εποχή και ήταν σημαντικά χαμηλότερα τον χειμώνα σε σχέση με την άνοιξη και το καλοκαίρι ($p < 0.001$) ενώ η αμμωνία είχε σημαντικά υψηλότερη συγκέντρωση μόνο το καλοκαίρι ($p < 0.001$), όπως παρατηρήθηκε και για τα πυριτικά ($p < 0.01$). Ως προς τα σωματιδιακά συστατικά που μετρήθηκαν, ο άνθρακας και ο φωσφόρος ήταν υψηλότερα την άνοιξη σε σχέση με τις άλλες δύο εποχές ($p < 0.001$), ενώ το σωματιδιακό άζωτο δεν παρουσίασε στατιστικά σημαντικές διαφορές. Ο λόγος αζώτου προς φωσφόρο διέφερε στατιστικά σημαντικά μόνο ως προς την εποχή και ήταν χαμηλότερος τον Απρίλιο σε σχέση με τον Ιούλιο και τον Ιανουάριο ($p < 0.001$). Ο διαλελυμένος οργανικός άνθρακας διέφερε στατιστικά σημαντικά μόνο ως προς την εποχή και ήταν σημαντικά υψηλότερος τον Ιούλιο.

Ως προς τις επιμέρους εποχές, τον Ιανουάριο, δεν παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές για την χλωροφύλλη και τα διαλελυμένα και σωματιδιακά θρεπτικά. Ο διαλελυμένος οργανικός άνθρακας ήταν σημαντικά υψηλότερος στον σταθμό των κλωβών σε σχέση με όλους τους υπόλοιπους σταθμούς (Kruskal Wallis test, $p < 0.05$)

Τον Απρίλιο, η χλωροφύλλη και οι φαιοχρωστικές δεν διέφεραν σημαντικά μεταξύ των αποστάσεων ενώ ο λόγος τους ήταν σημαντικά υψηλότερος στον σταθμό αναφοράς ανάντη ($p < 0.05$). Το συνολικό διαλελυμένο άζωτο (νιτρικά, νιτρώδη και αμμωνία) ήταν σημαντικά αυξημένο στον σταθμό των κλωβών ($p < 0.05$) σε σχέση με όλες τις άλλες αποστάσεις.

3.3.1.3 Αφθονία πικοπλαγκτού

Στις βιολογικές μεταβλητές, τα βακτήρια (πικοπλαγκτόν) διαφοροποιούνται σημαντικά και ως προς την εποχή και ως προς την απόσταση και η αλληλεπίδρασή τους ήταν στατιστικά σημαντική ($p < 0.001$). Η μεγαλύτερη αφθονία παρατηρήθηκε τον Απρίλιο, ακολουθούμενη από τον Ιούλιο ενώ οι χαμηλότερες αφθονίες παρατηρήθηκαν τον Ιανουάριο. Η διακύμανση της αφθονίας των βακτηριών ανά απόσταση και εποχή φαίνεται στην Εικόνα 3.5. Το post-hoc test Bonferroni έδειξε ότι οι σταθμοί ομαδοποιούνται σε δύο διακριτές ομάδες, όπως αυτό φαίνεται από την κατακόρυφη ευθυγράμμιση στην στήλη «Ομοιογενείς ομάδες» στον Πίνακα 3.3.



Εικόνα 3.5. Διακύμανση της αφθονίας των βακτηριών (cells ml^{-1}) ανά εποχή και απόσταση από τους ιχθυοκλωβούς

Πίνακας 3.3. Ομοιογενείς ομάδες σταθμών, όπως διαμορφώθηκαν για την αφθονία των βακτηρίων, σύμφωνα με το τεστ Bonferroni

Απόσταση	Least Square Mean	Ομοιογενείς ομάδες
cd	748499	X
100μ	759604	X
200μ	789287	XX
500μ	814490	XX
cu	820607	XX
80μ	843742	XX
farm	891364	X

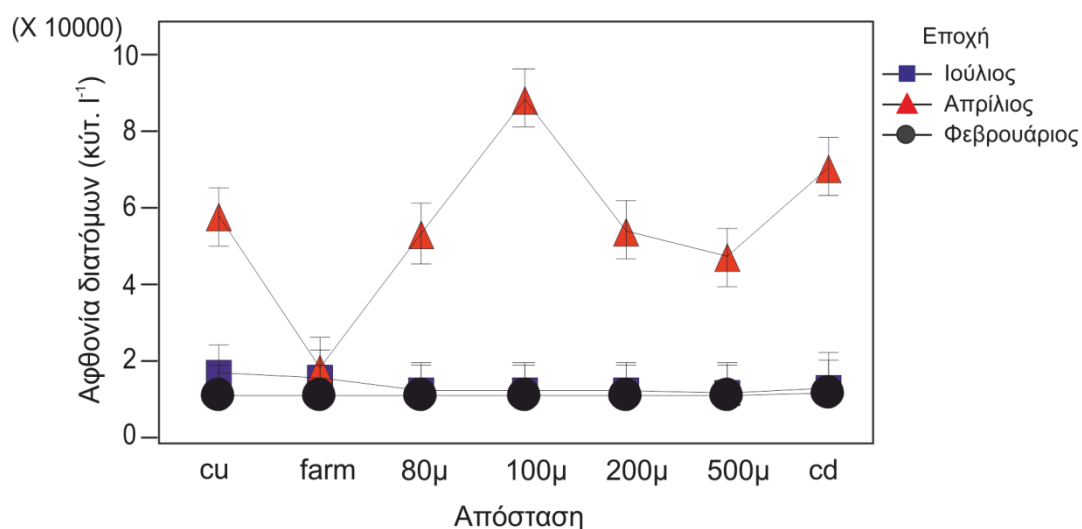
Η αφθονία των βακτηρίων τον Απρίλιο διέφερε στατιστικά σημαντικά ($p < 0.001$) μόνο ως προς τον σταθμό στα 100μ κατάντη σε σχέση με όλους τους άλλους σταθμούς πλην του σταθμού αναφοράς κατάντη. Τον Ιανουάριο, παρατηρήθηκε στατιστικά σημαντικά χαμηλότερη ($p < 0.01$) αφθονία στον σταθμό 200μ κατάντη σε σχέση με όλους τους υπόλοιπους σταθμούς.

3.3.1.4 *Αφθονία και σύσταση κοινότητας μικροπλαγκτού*

Η αφθονία των βλεφαριδωτών παρουσίασε στατιστικά σημαντικές διαφορές μόνο ως προς την εποχή ($p < 0.001$), με την μικρότερη αφθονία τον χειμώνα. Τα διάτομα παρουσίασαν στατιστικά σημαντικές διαφορές και μεταξύ των σταθμών και των εποχών ($p < 0.001$). Η αλληλεπίδραση των δύο παραγόντων ήταν επίσης στατιστικά σημαντική ($p < 0.001$). Ο μέσος όρος των διατόμων την άνοιξη ήταν διπλάσιος σε σχέση με το καλοκαίρι και σχεδόν δύο τάξεις μεγέθους υψηλότερος σε σχέση με τον χειμώνα, όπου παρατηρήθηκαν και οι χαμηλότερες αφθονίες. Η ανάλυση μεταξύ των αποστάσεων ομαδοποίησε τους σταθμούς σε τέσσερις ομοιογενείς ομάδες όπως φαίνεται από την κατακόρυφη ευθυγράμμιση στην στήλη «Ομοιογενείς ομάδες» που παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.4. Η διακύμανση της αφθονίας των διατόμων ανά εποχή και απόσταση φαίνεται στην Εικόνα 3.6.

Πίνακας 3.4. Ομοιογενείς ομάδες σταθμών, όπως διαμορφώθηκαν για την αφθονία των διατόμων, σύμφωνα με το τεστ Bonferroni

Απόσταση	Least square Mean	Ομοιογενείς ομάδες
farm	3530	X
500μ	10943	X
80μ	12884	XX
200μ	13083	XX
cu	15616	XX
cd	18290	XX
100μ	23352	X

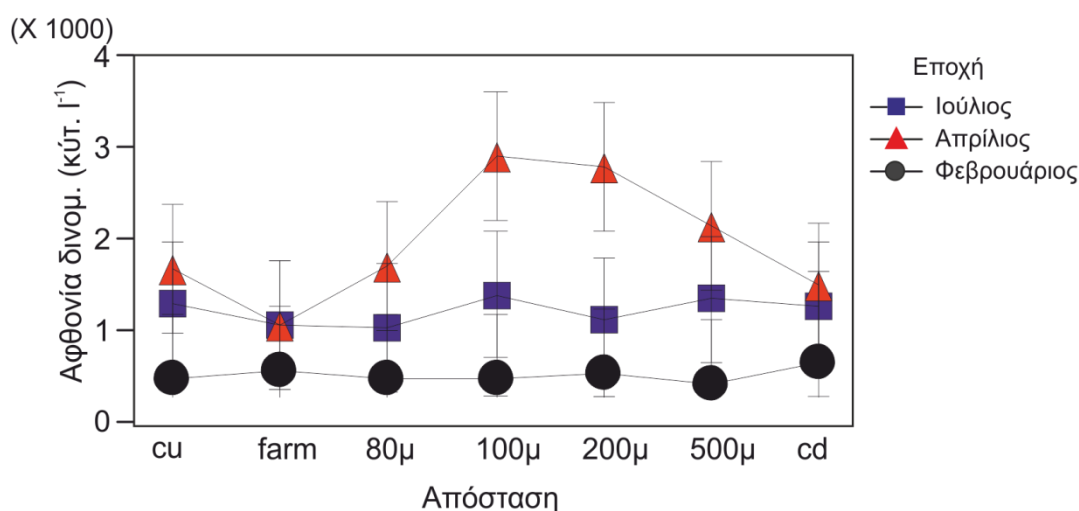


Εικόνα 3.6. Διακύμανση της αφθονίας των διατόμων (cells l^{-1}) ανά εποχή και απόσταση από τους ιχθυοκλωβούς

Η αφθονία των δινωμαστιγωτών ήταν επίσης στατιστικά σημαντική ως προς την εποχή, την απόσταση αλλά και την αλληλεπίδραση μεταξύ τους ($p < 0.05$). Τα δινωμαστιγωτά ήταν σημαντικά πιά άφθονα την άνοιξη από ό,τι τις άλλες δύο εποχές ($p < 0.05$), το καλοκαίρι η αφθονία ήταν επίσης σημαντικά υψηλότερη από ό,τι τον χειμώνα ($p < 0.05$). Η σύγκριση μεταξύ των αποστάσεων με το τεστ Bonferroni ομαδοποίησε τους σταθμούς σε δύο ομοιογενείς ομάδες όπως φαίνεται από την κατακόρυφη ευθυγράμμιση στην στήλη «Ομοιογενείς ομάδες» στον Πίνακα 3.5 και η διακύμανση της αφθονίας των δινωμαστιγωτών ανά εποχή και απόσταση φαίνεται στην Εικόνα 3.7.

Πίνακας 3.5. Ομοιογενείς ομάδες όπως διαμορφώθηκαν για την αφθονία των δινομαστιγωτών, σύμφωνα με το τεστ Bonferroni

Απόσταση	Least Square Mean	Ομοιογενείς ομάδες
farm	621	X
80μ	798	XX
cd	865	XX
cu	872	XX
500μ	1029	XX
200μ	1210	XX
100μ	1321	X



Εικόνα 3.7. Διακύμανση της αφθονίας των δινομαστιγωτών (διν. cells l⁻¹) ανά εποχή και απόσταση από τους ιχθυοκλωβούς

Ως προς την κοινότητα του μικροπλαγκτού, ο Απρίλιος ξεχώρισε καθώς τότε παρουσιάστηκε η μεγαλύτερη αφθονία στο μικροπλαγκτόν από ό,τι τις άλλες εποχές. Τα πιό άφθονα γένη διατόμων ήταν τα *Chaetoceros* και *Nitzschia*, των οποίων η αφθονία ήταν συχνά περίπου ίδια με το άθροισμα των ατόμων όλων των άλλων ειδών. Άλλα άφθονα γένη ήταν τα διάτομα *Guinardia*, *Rhizosolenia* καθώς και τα δινομαστιγωτά Gymnodiniales.

Στη συνέχεια, διερευνήθηκε, μέσω αναλύσεων ANOVA, η επίδραση του ιχθυοτροφείου σε διάφορες αποστάσεις, για κάθε δειγματοληπτική περίοδο, ξεχωριστά. Αναφορικά με τον Απρίλιο, η αφθονία των βλεφαριδωτών δεν παρουσίασε στατιστικά σημαντικές αλλαγές, μεταξύ των αποστάσεων από τους κλωβούς. Τα διάτομα παρουσίασαν στατιστικά σημαντικές διαφορές ως προς την αφθονία τους ανά απόσταση από τους κλωβούς ($p < 0.001$). Η χαμηλότερη μέση

αφθονία διατόμων ήταν στους κλωβούς (6495 cells Γ^{-1}) και η υψηλότερη στα 100 μέτρα απόσταση (69144 cells Γ^{-1}), σχεδόν μία τάξη μεγέθους δηλαδή πάνω από ό,τι στους κλωβούς. Το post hoc test Bonferroni έδειξε ότι οι σταθμοί κατανέμονται σε τέσσερις ομοιογενείς ομάδες όπως φαίνεται από την κατακόρυφη ευθυγράμμιση στην στήλη «Ομοιογενείς ομάδες» στον Πίνακα 3.6.

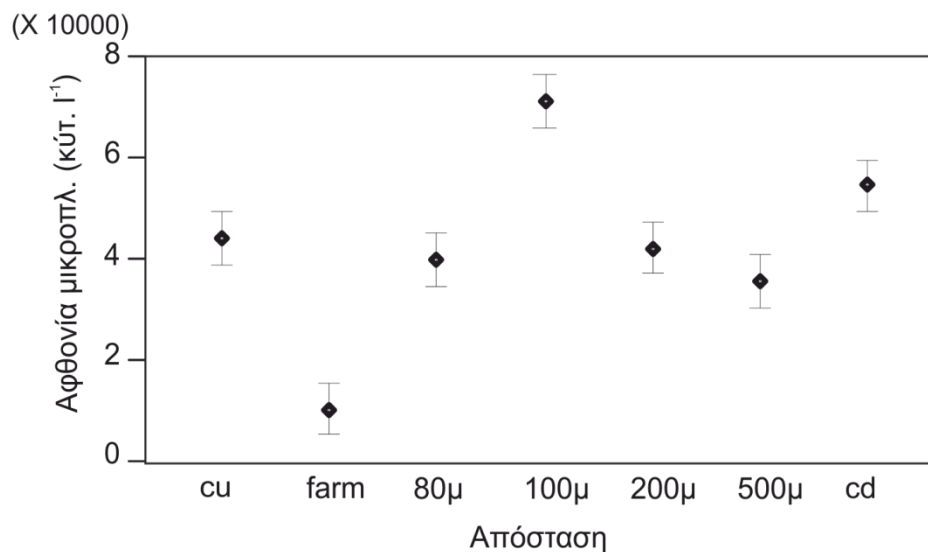
Πίνακας 3.6. Ομοιογενείς ομάδες όπως διαμορφώθηκαν για την αφθονία των διατόμων ανά απόσταση στην Λέσβο τον Απρίλιο, σύμφωνα με το τεστ Bonferroni

Απόσταση	Least Square Mean	Ομοιογενείς ομάδες
farm	6495	X
500μ	32035	X
80μ	37629	XX
200μ	38302	XX
cu	41659	XX
cd	53107	XX
100μ	69144	X

Παρόμοιο πρότυπο παρουσίασαν και τα δινομαστιγωτά ($p < 0.001$), η χαμηλότερη μέση τιμή ήταν στους κλωβούς (785 cells Γ^{-1}) και η υψηλότερη στα 100 μέτρα κατάντη (2640 cells Γ^{-1}). Συνολικά, το μικροπλαγκτόν παρουσίασε στατιστικά σημαντικές διαφορές στην αφθονία μεταξύ των σταθμών ($p < 0.001$) και κατανεμήθηκε σε τρεις ομοιογενείς ομάδες όπως φαίνεται από την κατακόρυφη ευθυγράμμιση στην στήλη «Ομοιογενείς ομάδες» στον Πίνακα 3.7. Η μέση αφθονία του μικροπλαγκτού ανά σταθμό φαίνεται στην Εικόνα 3.8. Η μέση αφθονία ανά ομάδα μικροπλαγκτού και απόσταση τον Απρίλιο φαίνονται στον Πίνακα 3.8.

Πίνακας 3.7. Ομοιογενείς ομάδες όπως διαμορφώθηκαν για την αφθονία των δινομαστιγωτών στην Λέσβο τον Απρίλιο, σύμφωνα με το τεστ Bonferroni

Απόσταση	Least Square Mean	Ομοιογενείς ομάδες
farm	8015	X
500μ	35275	X
80μ	39779	X
200μ	42182	X
cu	44359	X
cd	55487	XX
100μ	73244	X



Εικόνα 3.8. Μέση αφθονία του μικροπλαγκτού (μικροπλ. cells l⁻¹) ανά απόσταση στην Λέσβο τον Απρίλιο

Πίνακας 3.8. Μέση αφθονία ανά ομάδα μικροπλαγκτού (cells l⁻¹) σε κάθε απόσταση από τους κλωβούς στην Λέσβο τον Απρίλιο

Σταθμός	Γυμνά Βλεφαριδωτά	Διάτομα	Δινομαστιγωτά	Κωδωνοειδή
cu	1100	41659	1400	200
farm	635	6495	785	100
80μ	570	37629	1450	130
100μ	1340	69144	2640	120
200μ	1100	38302	2540	240
500μ	1240	32035	1880	120
cd	1060	53107	1220	100

Τον Ιανουάριο, όπως προαναφέρθηκε, η αφθονία του μικροπλαγκτού ήταν χαμηλότερη σε σχέση με τις άλλες εποχές. Η πιο άφθονη ομάδα ήταν τα βλεφαριδωτά και από αυτά, τα άτομα που ανήκαν στο γένος *Strombidium*, ακολουθούμενα από τα δινομαστιγωτά, με πιο άφθονη την οικογένεια Gymnodiniales. Επίσης, δεν παρατηρήθηκαν κωδωνοειδή σε κανένα από τα δείγματα που αναλύθηκαν. Στο μικροπλαγκτόν δεν παρατηρήθηκε καμιά στατιστικά σημαντική αλλαγή σε σχέση με την απόσταση από το ιχθυοτροφείο.

Τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης και η μέση τιμή ανά εποχή παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 3.9.

Πίνακας 3.9. Αποτελέσματα 2-WAY ANOVA για τις παραμέτρους που μετρήθηκαν στην Λέσβο και μέσες τιμές ανά εποχή (*= p<0.05, **= p<0.01, ***= p<0.001)

Παράμετρος	Εποχή	Απόσταση	Εποχή X Απόσταση	Μέση τιμή Χειμώνα	Μέση τιμή Άνοιξη	Μέση τιμή Καλοκαίρι
Χλωρ. (μg l ⁻¹)	***	ns	ns	0.25	0.14	0.10
Φαιοχ. (μg l ⁻¹)	***	ns	ns	0.34	0.07	0.04
Χλωρ./Φαιοχ.	***	***	***	0.73	2.14	5.57
PO ₄ (μM)	***	ns	ns	0.07	0.14	0.13
NH ₄ (μM)	***	ns	ns	0.61	0.67	2.5
SiO ₂ (μM)	**	ns	ns	-	0.42	0.61
Σωματιδιακός C (μM)	***	ns	ns	4.75	7.42	5.28
Σωματιδιακός P (μM)	***	ns	ns	0.04	0.07	0.047
N/P	***	ns	ns	10.81	8.71	12.53
DOC (μM)	*	ns	ns	81.9	89.35	106.09
Βακτ. (cells ml ⁻¹)	***	***	***	575466	1105730	782415
Βλεφ. (cells l ⁻¹)	***	ns	ns	364	1006	767
Διάτομα (cells l ⁻¹)	***	***	***	131	39767	1973
Δινομ. (cells l ⁻¹)	*	***	*	235	1702	942

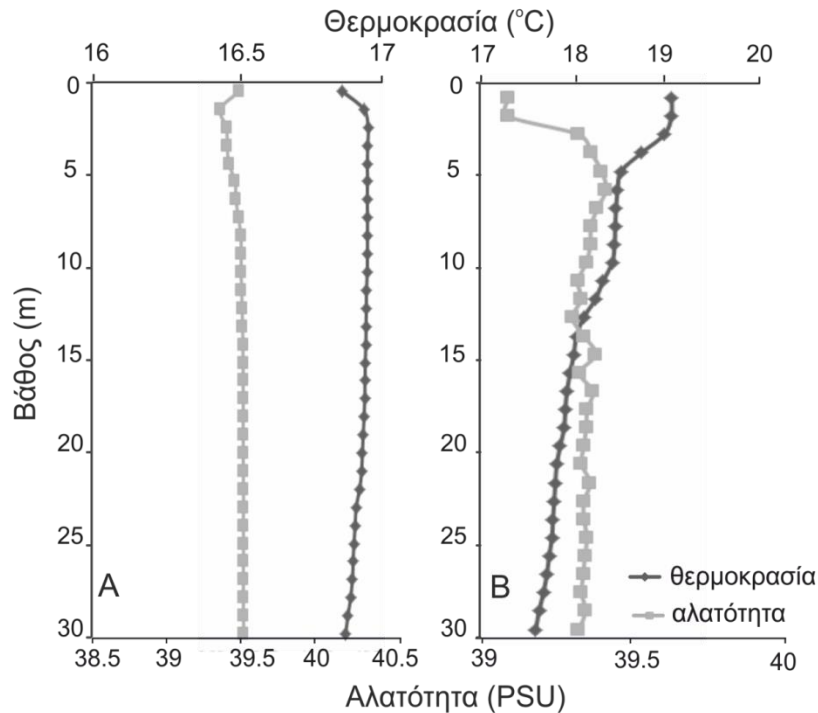
3.3.1.5 Αφθονία, βιομάζα και σύσταση κοινότητας μεσοζωοπλαγκτού- Κατανομή μεγεθών

Η αφθονία του μεσοζωοπλαγκτού τον Ιανουάριο δεν κατέστη δυνατόν να μετρηθεί σε όλους τους σταθμούς. Μετρήθηκε σε 2 σταθμούς ανάντη και 2 κατάντη των κλωβών. Κοντά στους κλωβούς, η αφθονία του μεσοζωοπλαγκτού ήταν χαμηλότερη από ό,τι στους υπόλοιπους σταθμούς (173 ind m⁻³) και υψηλότερη ανάντη και κατάντη αυτών (733 και 736 ind m⁻³ αντίστοιχα). Η κοινότητα αποτελούνταν κυρίως από κωπήποδα και δεν μετρήθηκαν καθόλου κλαδοκεραιωτά, ενώ η μέση βιομάζα ήταν υψηλότερη από ό,τι όλες τις άλλες εποχές. Κοντά στους κλωβούς, η βιομάζα ήταν 2.26 mg C m⁻³ ενώ στον σταθμό αναφοράς ανάντη, η βιομάζα ήταν 5.59 mg C m⁻³. Τον Απρίλιο, η αφθονία του μεσοζωοπλαγκτού δεν παρουσίασε εμφανείς διαφορές σε σχέση με τους κλωβούς, η αφθονία κατά μέσο όρο ήταν 417 ind m⁻³ και η βιομάζα 0.65 mg C m⁻³. Τον Ιούλιο, όπως έχει συζητηθεί και στο Κεφ. 2, το μεσοζωοπλαγκτόν παρουσίασε ελάχιστο στους κλωβούς και μέγιστο στα 100 m κατάντη. Η μέση αφθονία ήταν μεγαλύτερη τον Ιούλιο αλλά η μέση βιομάζα ήταν υψηλότερη τον Ιανουάριο. Τον Ιούλιο ήταν η μόνη εποχή που μετρήθηκαν κλαδοκεραιωτά στα δείγματα μεσοζωοπλαγκτού, ενώ ήταν απόντα τις άλλες εποχές.

3.3.2 Κύπρος

3.3.2.1 Φυσικές παράμετροι

Στην Κύπρο τον Φεβρουάριο, η μέση θερμοκρασία ήταν 16.9°C ενώ η μέση αλατότητα 39.3 PSU ενώ η στήλη του νερού εμφανίστηκε πλήρως αναμιγμένη μέχρι και τα 30μ (Εικ. 3.9A). Η πόντιση των παρασυρόμενων ρευματομέτρων έδειξε ότι η διεύθυνση του ρεύματος ήταν ανατολική, με πολύ υψηλή ταχύτητα, η οποία κατά τόπους, έφτασε και τα 40 cm s⁻¹ ενώ πιο κοντά στην ακτή, η ταχύτητα μειώθηκε και κατά μέσο όρο ήταν 10.2 cm s⁻¹. Οι άνεμοι έπνεαν αρκετά ασθενείς, βόρειοι και στην συνέχεια δυτικοί, με μέση ταχύτητα 3 m s⁻¹. Τον Μάιο, η μέση θερμοκρασία ήταν 18.1°C και η μέση αλατότητα 39.3 PSU (Εικ. 3.9B), και σε αυτήν την περίπτωση φαίνεται ότι η στήλη ήταν αρκετά ομογενοποιημένη ενώ το θερμοκλίνας είχε αρχίσει να σχηματίζεται. Η ταχύτητα των ρευμάτων ήταν κατά μέσο όρο 8-10 cm s⁻¹ με κατεύθυνση βόρεια-βορειοανατολική, ενώ οι άνεμοι την ημέρα της δειγματοληψίας ξεκίνησαν πάλι από βόρειοι καταλήγοντας σε νότιους, με μέση ταχύτητα 6 m s⁻¹. Γενικά, όπως συμπεραίνουν οι Ζερβάκης και συν. (2008), η ημερήσια διακύμανση των ανέμων ήταν έντονη, με ενίσχυση των ανέμων τοπικά μετά το μεσημέρι, σε όλες τις περιόδους δειγματοληψίας. Τα νερά στην περιοχή ήταν επίσης Λεβαντινής προέλευσης, με πολύ έντονα ρεύματα, ιδιαίτερα όταν λόγω των ανέμων, οι δομές της ανοιχτής θάλασσας πλησίαζαν προς την ακτή. Στην ίδια μελέτη φάνηκε ότι και στην Κύπρο, η παρουσία των ιχθυοκλωβών επηρεάζει την κυκλοφορία, στην άμεσα εφραπτόμενη περιοχή τους.

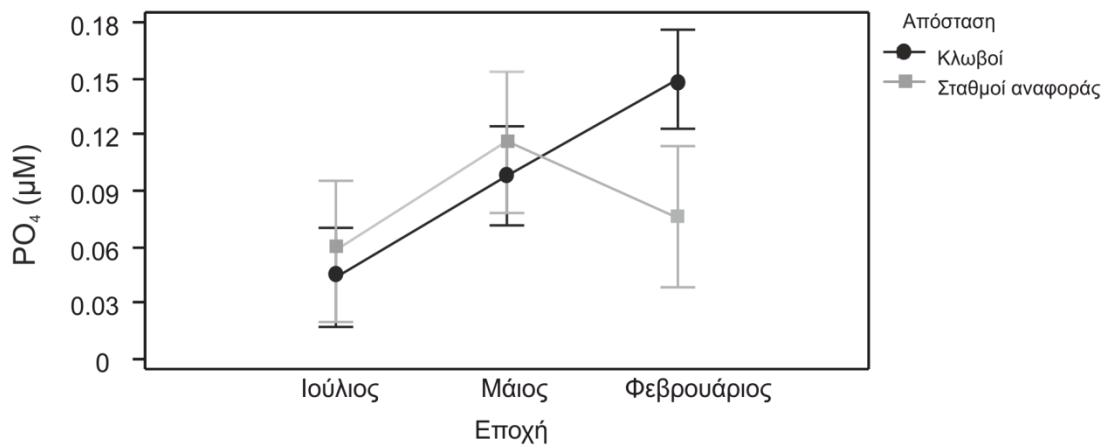


Εικόνα 3.9. Κατακόρυφη κατανομή μέσης θερμοκρασίας και αλατότητας στην Κύπρο τον Φεβρουάριο (Α) και τον Μάιο (Β)

3.3.2.2 *Θρεπτικά άλατα και χλωροφύλλη*

Οι τιμές της χλωροφύλλης και των φαιοχρωστικών στην Κύπρο φάνηκε να διαφέρουν στατιστικά σημαντικά μόνο ως προς την εποχή ($p < 0.001$) και ήταν υψηλότερες τον Φεβρουάριο σε σχέση με τις άλλες δύο εποχές. Ο λόγος μεταξύ των δύο ήταν στατιστικά σημαντικός ως προς την εποχή ($p < 0.05$), όπου ήταν χαμηλότερος τον Ιούλιο.

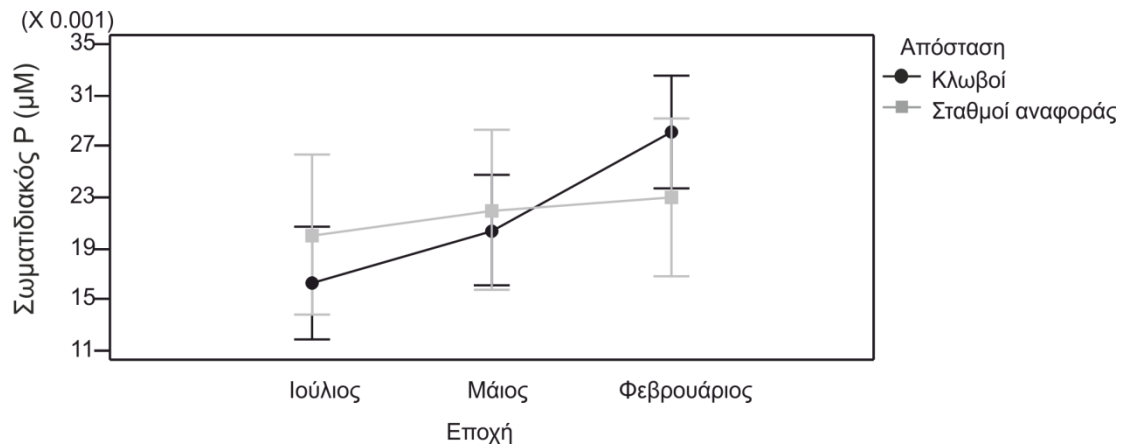
Ο διαλελυμένος φωσφόρος παρουσίασε στατιστικά σημαντικές διαφορές ως προς την εποχή ($p < 0.05$) και την αλληλεπίδραση εποχής και απόστασης ($p < 0.01$) και η συγκέντρωσή του ήταν υψηλότερη τον Φεβρουάριο και τον Μάιο σε σχέση με τον Ιούλιο. Ο φωσφόρος ήταν σημαντικά υψηλότερος κοντά στις μονάδες μόνο τον Φεβρουάριο, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.10.



Εικόνα 3.10. Μέση συγκέντρωση φωσφορικών ανά εποχή και απόσταση στην Κύπρο

Η συγκέντρωση των νιτρικών και της αμμωνίας διαφοροποιήθηκε μόνο ως προς την εποχή και τα νιτρικά ήταν υψηλότερα τον Φεβρουάριο ($p < 0.05$), ενώ η αμμωνία ήταν χαμηλότερη τον Ιούλιο ($p < 0.01$). Για τα πυριτικά, στατιστικά σημαντική ήταν μόνο η αλληλεπίδραση των παραγόντων ($p < 0.05$), τον Φεβρουάριο η συγκέντρωσή τους ήταν υψηλότερη στους σταθμούς αναφοράς σε σχέση με τα ιχθυοτροφεία (Πιν. 3.11).

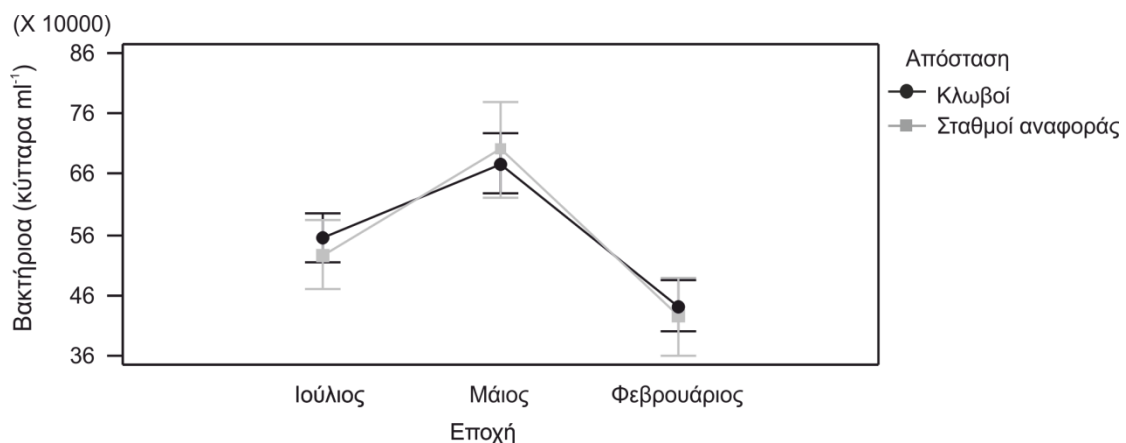
Η συγκέντρωση του σωματιδιακού άνθρακα ήταν σημαντικά υψηλότερη τον Μάιο ($p < 0.01$) ενώ του σωματιδιακού φωσφόρου τον Φεβρουάριο από ό,τι τις άλλες περιόδους (Πιν 3.11). Ο σωματιδιακός φωσφόρος ήταν επίσης υψηλότερος στους σταθμούς των κλωβών σε σχέση με τους σταθμούς αναφοράς ($p < 0.05$) (Εικ. 3.11), η αλληλεπίδραση των δύο παραγόντων ήταν στατιστικά σημαντική ($p < 0.01$). Από την άλλη, ο λόγος σωματιδιακού αζώτου προς τον σωματιδιακό φωσφόρο διέφερε σημαντικά μόνο ως προς την εποχή ($p < 0.05$) και ήταν χαμηλότερος τον Φεβρουάριο.



Εικόνα 3.11. Μέση συγκέντρωση σωματιδιακού φωσφόρου ανά εποχή και απόσταση στην Κύπρο

3.3.2.3 Αφθονία πίκο- και μικροπλαγκτού, σύσταση κοινότητας μικροπλαγκτού

Η αφθονία των βακτηρίων ήταν μεγαλύτερη τον Μάιο ($p < 0.001$), ακολουθούμενη από την αφθονία τον Ιούλιο, με την μικρότερη αφθονία να παρουσιάζεται τον Φεβρουάριο (Εικ. 3.12). Η αλληλεπίδραση μεταξύ εποχής και απόστασης ήταν στατιστικά σημαντική ($p < 0.05$) (Πιν 3.10).



Εικόνα 3.12. Μέση αφθονία βακτηρίων (cells ml^{-1}) ανά εποχή και απόσταση στην Κύπρο

Η αφθονία των βλεφαριδωτών ήταν υψηλότερη τον Απρίλιο ($p < 0.01$), χωρίς σημαντικές διαφορές ως προς την απόσταση. Η αφθονία των διατόμων δεν διέφερε σημαντικά ως προς κάποιον από τους παράγοντες. Τα δινομαστιγωτά εμφάνισαν διαφορετικό πρότυπο, η αφθονία τους τον Ιούλιο και τον Μάιο ήταν υψηλότερη από τον Φεβρουάριο ($p < 0.001$). Ο λόγος δινομαστιγωτών-διατόμων διέφερε σημαντικά μεταξύ όλων των εποχών. Η υψηλότερη τιμή αντιστοιχούσε στις αφθονίες του Ιουλίου, ακολουθούμενη από τον λόγο του Μαΐου με την χαμηλότερη τιμή στην σχέση των δύο, τον Φεβρουάριο.

Συνολικά, το μικροπλαγκτόν ήταν πίο άφθονο τον Ιούλιο και τον Μάιο σε σχέση με τον Φεβρουάριο ($p < 0.001$). Η επιμέρους στατιστική ανάλυση μεταξύ των αποστάσεων στην Κύπρο δεν έδειξε άλλες στατιστικά σημαντικές διαφορές.

Το μικροπλαγκτόν στην Κύπρο, τον Φεβρουάριο απαρτιζόταν κυρίως από βλεφαριδωτά, τα περισσότερα από τα οποία ανήκαν στο γένος *Strombidium* ενώ η κοινότητα των διατόμων απαρτιζόταν από κύτταρα που ανήκαν σε πολλά διαφορετικά γένη χωρίς να υπερτερεί κάποιο αριθμητικά, εκτός από το γένος *Chaetoceros*. Τα δινομαστιγωτά αποτελούνταν κυρίως από την οικογένεια Gymnodiniales. Παρόμοια εικόνα επικρατούσε και τον Μάιο, με μόνη διαφορά ότι στα διάτομα δεν παρατηρήθηκε κάποιο επικρατές είδος, τα άτομα που μετρήθηκαν ανήκαν σε πολλά διαφορετικά γένη.

Τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης και η μέση τιμή των στατιστικά σημαντικών μετρηθέντων παραμέτρων ανά εποχή στην Κύπρο παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 3.10.

Πίνακας 3.10. Αποτελέσματα 2-WAY ANOVA για τις παραμέτρους που μετρήθηκαν στην Κύπρο και μέσες τιμές (MT) ανά εποχή (*= $p < 0.05$, **= $p < 0.01$, ***= $p < 0.001$)

Παράμετρος	Εποχή	Απόσταση	Εποχή x Απόσταση	Μέση τιμή- Χειμώνας	Μέση τιμή Άνοιξη	Μέση τιμή Καλοκαίρι
Χλωρ. ($\mu\text{g l}^{-1}$)	***	ns	ns	0.14	0.069	0.055
Φαιοχ. ($\mu\text{g l}^{-1}$)	***	ns	ns	0.031	0.018	0.018
Χλωρ./Φαιοχ.	*	ns	ns	4.75	4.23	3.18
PO ₄ (μM)	***	ns	**	0.050	0.106	0.112
NO ₃ (μM)	*	ns	ns	1.33	0.63	0.67
NH ₄ (μM)	**	ns	ns	0.99	0.98	0.48
SiO ₂ (μM)	ns	ns	*	1.59	1.39	1.36
Σωματιδιακός C (μM)	**	ns	ns	2.47	3.47	2.77
Σωματιδιακός P (μM)	***	*	*	0.025	0.021	0.018
N/P	*	ns	ns	11.5	15.9	15.9
Βακτ. (cells ml ⁻¹)	***	*	*	448804	659329	517083
Βλεφ. (cells l ⁻¹)	**	ns	ns	835	1256	655
Δινομ. (cells l ⁻¹)	***	ns	ns	175	901	1230
Συν.μικροπλ. (cells l ⁻¹)	***	ns	ns	1340	2413	2206

3.3.3 Σύγκριση περιοχών

Όλοι οι σταθμοί από τις δύο περιοχές συγκρίθηκαν, ανεξάρτητα από την απόσταση από τους κλωβούς, προκειμένου να εκτιμηθούν οι διαφορές μεταξύ τους συνολικά.

3.3.3.1 Χειμώνας

Τον Ιανουάριο, η χλωροφύλλη και οι φαιοχρωστικές ήταν υψηλότερα στην Λέσβο αλλά ο λόγος των δύο ήταν σημαντικά υψηλότερος στην Κύπρο. Τα φωσφορικά, η αμμωνία και όλα τα σωματιδιακά θρεπτικά ήταν σημαντικά υψηλότερα στην Κύπρο τον χειμώνα. Η αφθονία των βακτηρίων ήταν υψηλότερη στην Λέσβο, όμως τα βλεφαριδωτά και τα διάτομα ήταν πύο άφθονα στην Κύπρο. Συνολικά, η αφθονία του μικροπλαγκτού ήταν μεγαλύτερη στην Κύπρο. Οι παράμετροι για τις οποίες οι διαφορές ήταν στατιστικά σημαντικές μεταξύ των περιοχών και η μέση τιμή ανά περιοχή παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.11.

Πίνακας 3.11. Μέση τιμή ανά περιοχή και επίπεδο σημαντικότητας για την διαφορά μεταξύ των στατιστικά σημαντικών παραμέτρων στην Κύπρο και την Λέσβο τον Ιανουάριο

Παράμετρος	Περιοχή	Μέση τιμή	F	p
Χλωρ. ($\mu\text{g l}^{-1}$)	Κύπρος	0.14	54.9	0.000
	Λέσβος	0.26		
Φαιοχ. ($\mu\text{g l}^{-1}$)	Κύπρος	0.03	317.3	0.000
	Λέσβος	0.35		
Χλωρ./Φαιοχ.	Κύπρος	4.76	495	0.000
	Λέσβος	0.74		
PO_4 (μM)	Κύπρος	0.12	9	0.007
	Λέσβος	0.07		
NH_4 (μM)	Κύπρος	1.07	14.5	0.001
	Λέσβος	0.61		
Σωματιδιακός C (μM)	Κύπρος	2.50	60.0	0.000
	Λέσβος	4.79		
Σωματιδιακό N (μM)	Κύπρος	0.3	53.0	0.000
	Λέσβος	0.5		
Σωματιδιακός P (μM)	Κύπρος	0.026	30.0	0.000
	Λέσβος	0.043		
Βακτ. (cells ml^{-1})	Κύπρος	436,306	17.1	0.000
	Λέσβος	603,053		
Βλεφ. (cells l^{-1})	Κύπρος	745	12.3	0.002
	Λέσβος	370		
Διάτομα (cells l^{-1})	Κύπρος	360	73.0	0.000
	Λέσβος	126		
Δινομ./Διάτ.	Κύπρος	0.258	11.4	0.003
	Λέσβος	0.727		
Κωδωνοειδή (cells l^{-1})	Κύπρος	24	24.3	0.000
	Λέσβος	0		
Συν. μικροπλ. (cells l^{-1})	Κύπρος	1289	19.9	0.000
	Λέσβος	721		

3.3.3.2 Άνοιξη

Τον Απρίλιο, μεταξύ των δύο περιοχών και κατά μέσο όρο, η Λέσβος εμφάνισε στατιστικά σημαντικά υψηλότερες τιμές για την χλωροφύλλη, τις φαιοχρωστικές, τα φωσφορικά, τον σωματιδιακό άνθρακα, άζωτο και φωσφόρο, τα βακτήρια, τα διάτομα, τα δινομαστιγωτά, τα κωδωνοειδή και συνεπώς το συνολικό μικροπλαγκτόν. Η Κύπρος εμφάνισε σημαντικά υψηλότερες τιμές για τον λόγο χλωροφύλλης/φαιοχρωστικών, τον λόγο αζώτου/φωσφόρου και τον λόγο δινομαστιγωτών/βλεφαριδωτών. Οι παράμετροι για τις οποίες οι διαφορές ήταν στατιστικά σημαντικές μεταξύ των περιοχών και η μέση τιμή ανά περιοχή παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.12.

Πίνακας 3.12. Μέση τιμή ανά περιοχή και επίπεδο σημαντικότητας για την διαφορά μεταξύ των στατιστικά σημαντικών παραμέτρων στην Κύπρο και την Λέσβο τον Απρίλιο

Παράμετρος	Περιοχή	Μέση τιμή	F	p
Χλωρ. ($\mu\text{g l}^{-1}$)	Κύπρος	0.07	63.6	0.000
	Λέσβος	0.15		
Φαιοχ. ($\mu\text{g l}^{-1}$)	Κύπρος	0.02	74.8	0.000
	Λέσβος	0.07		
Χλωρ./Φαιοχ.	Κύπρος	3.91	12.5	0.002
	Λέσβος	2.14		
PO_4 (μM)	Κύπρος	0.10	18.0	0.000
	Λέσβος	0.15		
SiO_2 (μM)	Κύπρος	1.41	258.2	0.000
	Λέσβος	0.43		
Σωματιδιακός C (μM)	Κύπρος	3.57	39.8	0.000
	Λέσβος	7.43		
Σωματιδιακό N (μM)	Κύπρος	0.34	13.6	0.001
	Λέσβος	0.64		
Σωματιδιακός P (μM)	Κύπρος	0.02	53.9	0.000
	Λέσβος	0.07		
N/P	Κύπρος	16.0	16.6	0.000
	Λέσβος	8.7		
Βακτήρια (cells ml^{-1})	Κύπρος	684710	35.4	0.000
	Λέσβος	1071088		
Διάτομα (cells l^{-1})	Κύπρος	286	48.0	0.000
	Λέσβος	39768		
Δινομ. (cells l^{-1})	Κύπρος	961	10.7	0.003
	Λέσβος	1702		
Δινομ./Διάτ.	Κύπρος	0.9	8.8	0.008
	Λέσβος	1.8		
Κωδωνοειδή (cells l^{-1})	Κύπρος	40	13.7	0.001
	Λέσβος	144		
Συν. μικροπλ. (cells l^{-1})	Κύπρος	2508	46.6	0.000
	Λέσβος	42621		

3.3.3.3 Καλοκαίρι

Οι διαφορές μεταξύ των περιοχών τον Ιούλιο, έχουν συζητηθεί με λεπτομέρεια στο Κεφάλαιο 2. Παρατίθεται εδώ ο αντίστοιχος συνοπτικός πίνακας (Πιν. 3.13) για σύγκριση.

Πίνακας 3.13. Μέση τιμή ανά περιοχή και επίπεδο σημαντικότητας για την διαφορά μεταξύ των στατιστικά σημαντικών παραμέτρων στην Κύπρο και την Λέσβο τον Ιούλιο

Παράμετρος	Περιοχή	Μέση τιμή	F	p
Χλωρ. ($\mu\text{g l}^{-1}$)	Κύπρος	0.05	14.1	0.001
	Λέσβος	0.11		
Φαιοχ. ($\mu\text{g l}^{-1}$)	Κύπρος	0.02	24.1	0.000
	Λέσβος	0.05		
Χλωρ./Φαιοχ.	Κύπρος	3.03	32.0	0.000
	Λέσβος	5.58		
PO_4 (μM)	Κύπρος	0.04	44.3	0.000
	Λέσβος	0.14		
NH_4 (μM)	Κύπρος	0.52	32.4	0.000
	Λέσβος	2.51		
Διαλελυμένο N (μM)	Κύπρος	1.32	10.5	0.004
	Λέσβος	0.70		
SiO_2 (μM)	Κύπρος	1.37	68.8	0.000
	Λέσβος	0.61		
Σωματιδιακός C (μM)	Κύπρος	2.76	80.0	0.000
	Λέσβος	11.43		
Σωματιδιακό N (μM)	Κύπρος	0.241	44.2	0.000
	Λέσβος	0.992		
Σωματιδιακός P (μM)	Κύπρος	0.016	42.1	0.000
	Λέσβος	0.049		
N/P	Κύπρος	15	9.5	0.005
	Λέσβος	20		
Βακτήρια (cells ml^{-1})	Κύπρος	440353	7.3	0.012
	Λέσβος	536466		
Βιομάζα βλεφ. (pgC l^{-1})	Κύπρος	340269	64.0	0.000
	Λέσβος	879410		
Βιομάζα διατ. (pgC l^{-1})	Κύπρος	173776	6.3	0.018
	Λέσβος	980381		
Βιομάζα κωδωνοειδών (pgC l^{-1})	Κύπρος	364232	11.4	0.002
	Λέσβος	86222		
Διάτομα (cells l^{-1})	Κύπρος	324	7.5	0.011
	Λέσβος	1973		
Δινομ. (cells l^{-1})	Κύπρος	1289	4.9	0.035
	Λέσβος	943		
Συν. μικροπλ. (cells l^{-1})	Κύπρος	2302	4.5	0.044
	Λέσβος	3747		

Συνολικά, φαίνεται ότι την άνοιξη και το καλοκαίρι, η χλωροφύλλη στην Λέσβο ήταν υψηλότερη όπως επίσης και ο διαθέσιμος φωσφόρος. Τον χειμώνα, για αυτές τις παραμέτρους, υψηλότερες τιμές εμφανίστηκαν στην Κύπρο.

Τα σωματιδιακά θρεπτικά ήταν υψηλότερα στην Λέσβο, σε όλες τις εποχές δειγματοληψίας. Ο λόγος αζώτου/φωσφόρου ήταν χαμηλότερος στην Κύπρο, το καλοκαίρι ενώ την άνοιξη είναι χαμηλότερος στην Λέσβο. Η αφθονία των βακτηρίων είναι υψηλότερη στην Λέσβο, σε όλες τις περιόδους δειγματοληψίας. Από την άλλη, η αφθονία των διατόμων ήταν μεγαλύτερη την άνοιξη και το καλοκαίρι στην Λέσβο, αλλά τον χειμώνα ήταν στην Κύπρο. Γενικά, η αφθονία του μικροπλαγκτού ήταν μεγαλύτερη τον χειμώνα στην Κύπρο ενώ στην Λέσβο την άνοιξη και το καλοκαίρι, με την μεγαλύτερη διαφορά να εμφανίζεται την άνοιξη όπου η αφθονία ήταν κατά μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη.

3.4 Συζήτηση

Τα αποτελέσματα από τις εποχιακές μετρήσεις, σε κάθε περιοχή, έδειξαν ποιές παράμετροι επηρεάζονται από την εποχή, ποιές από την απόσταση από τους κλωβούς αλλά και ποιά είναι η επίδραση της εποχής σε κάθε επίπεδο απόστασης.

Στην Λέσβο, παρατηρήθηκαν αλλαγές που συσχετίζονται με την απόσταση από τους κλωβούς στις βιολογικές μεταβλητές αλλά όχι στα θρεπτικά. Ενώ τα επίπεδα χλωροφύλλης και φαιοχρωστικών ήταν υψηλότερα τον χειμώνα, ο λόγος των δύο την ίδια εποχή ήταν χαμηλότερος. Η χαμηλή αφθονία του μικροφυτοπλαγκτού τον χειμώνα, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η υψηλή χλωροφύλλη οφείλεται στην επικράτηση του πύκο- και νανοπλαγκτού. Η επίσης υψηλή συγκέντρωση φαιοχρωστικών υποδηλώνει την ενδεχόμενη έντονη θήρευση στα φυτοπλαγκτονικά κύτταρα (Fuchs et al, 2002). Παράλληλα, τα θρεπτικά έδειξαν υψηλότερες συγκεντρώσεις τις περιόδους κατά τις οποίες σχηματιζόταν και που υπήρχε θερμοστρωμάτωση (Απρίλιος και Ιούλιος αντίστοιχα). Ενώ η ανάμιξη των υδάτινων μαζών τον χειμώνα αναμένεται να αυξάνει την παροχή θρεπτικών στο σύστημα, στην περίπτωση της Λέσβου, φαίνεται ότι αυτά είχαν ήδη καταναλωθεί την περίοδο της δειγματοληψίας. Αναφορικά με το καθεστώς θρεπτικών και χλωροφύλλης, μπορούμε επίσης να παρατηρήσουμε ότι η περιοχή αποκλίνει κάπως από τα εποχιακά πρότυπα. Είναι εμφανές ότι η παρουσία του ιχθυοτροφείου έχει κάποια επίδραση στην Λέσβο, ως συνδυαστικό αποτέλεσμα της αύξησης της παροχής τροφής και της αύξησης της θερμοκρασίας στην περιοχή.

Στις περιόδους που η αφθονία των βακτηρίων ήταν υψηλότερη (Απρίλιος, Ιούλιος), το πρότυπο που παρατηρήθηκε σε σχέση με την απόσταση ήταν διαφορετικό. Όπως έχει συζητηθεί και στο Κεφ 2, το μέγιστο της αφθονίας των βακτηρίων τον Ιούλιο παρατηρήθηκε στον σταθμό 100 μ κατάντη, ενώ τον Απρίλιο, στην ίδια απόσταση, παρατηρήθηκε η ελάχιστη αφθονία. Είναι επομένως προφανές ότι σε αυτόν τον σταθμό, η αφθονία των βακτηρίων επηρεάστηκε περισσότερο από την παρουσία των κλωβών και λιγότερο από τις εποχιακές διακυμάνσεις.

Ως προς το μικροπλαγκτόν, η πολύ χαμηλή αφθονία τον Ιανουάριο δεν ήταν αναμενόμενη. Η ανάμιξη της στήλης, το φώς και το έντονο υδροδυναμικό καθεστώς συσχετίζονται με την χειμωνιάτικη άνθηση (Krom et al, 2004, Siokou et al 2010). Το πρότυπο που παρατηρήθηκε τον Ιανουάριο σχετίζεται περισσότερο με συνθήκες που απαντώνται αμέσως μετά το τέλος μιας άνθησης πλαγκτού (χαμηλή συγκέντρωση θρεπτικών και αφθονία μικροφυτοπλαγκτού σε συνδυασμό με αυξημένο μικροζωοπλαγκτόν). Συγχρόνως, η χλωροφύλλη ήταν υψηλότερη, γεγονός που σημαίνει ότι η βιομάζα της χλωροφύλλης απαρτιζόταν από μικρότερα κύτταρα (πικο- και νανο- πλαγκτόν) εφόσον η αφθονία του μικροφυτοπλαγκτού ήταν χαμηλή. Παράλληλα, την ίδια περίοδο, τα βλεφαριδωτά ήταν η πιο άφθονη ομάδα μικροπλαγκτού. Σε συνθήκες μετα-άνθησης, είναι σύνηθες η χλωροφύλλη να κατανέμεται στο φωτοσυνθετικό πικο- και νανο- πλαγκτόν και η θήρευση από το μικροζωοπλαγκτόν να είναι πιο έντονη (Pommier et al, 2009; Gutierrez-Rodriguez et al 2010).

Τα διάτομα ήταν σημαντικά πιο άφθονα τον Απρίλιο, με την μέση τιμή τους να είναι διπλάσια εκείνης του Ιουλίου και μία τάξη μεγέθους πιο άφθονα από τον Ιανουάριο, επιπλέον όμως, φαίνεται ότι επηρεάζονται, εκτός από την εποχή, και από την ιχθυοκαλλιέργεια, καθώς στους κλωβούς, η αφθονία τους μειώνεται απότομα και τις δύο εποχές. Η μέγιστη αφθονία διατόμων τον Απρίλιο παρατηρήθηκε στον σταθμό 100 μ κατάντη ενώ τον Ιούλιο στην ίδια απόσταση αυξήθηκε η συνεισφορά των μικρών κυττάρων.

Το καλοκαίρι, στα διάτομα παρατηρήθηκε η έντονη παρουσία γένους (*Hemiaulus*) που είναι γνωστό ότι εκμεταλλεύεται καλύτερα τις ολιγοτροφικές συνθήκες (Werner, 1977) ενώ την άνοιξη, η μεγαλύτερη αφθονία παρατηρήθηκε σε γένη που γενικώς συσχετίζονται με ανοιξιάτικες ανθήσεις και αυξημένη παροχή θρεπτικών. Παρόμοια

αποτελέσματα με το πρότυπο που παρατηρήθηκε την άνοιξη βρήκαν και στην Θάλασσα του Alboran οι Arin et al (2000), όπου την εποχή με τα περισσότερα θρεπτικά, τα επικρατέστερα είδη ανήκαν στα γένη *Chaetoceros* και *Pseudonitzschia*. Ομοίως, στον κόλπο του Iskenderun στην Νοτιοανατολική ακτή της Τουρκίας, και κατά τον μήνα Ιούλιο, επικρατέστερο γένος διατόμων ήταν το *Hemiaulus*, ενώ τον Απρίλιο, το γένος *Chaetoceros* (Polat & Isik, 2002). Γενικώς, τα δύο επικρατέστερα γένη διατόμων του Απριλίου, συχνά συσχετίζονται με ανθήσεις και σε άλλες θάλασσες (Reynolds 2006) καθώς επίσης και σε περιβάλλον ιχθυοκαλλιέργειας (Skejik et al 2012). Παράλληλα όμως, όπως έχει αναφερθεί, στην παρούσα μελέτη, η επιρροή του ιχθυοτροφείου ήταν εμφανής στα διάτομα που εμφάνισαν σημαντικά μικρότερες αφθονίες κοντά στους κλωβούς, ενώ ο σταθμός 100 μ κατάντη έμοιαζε περισσότερο με τους δύο σταθμούς αναφοράς από ό,τι με όλους τους άλλους σταθμούς. Το πρότυπο που παρατηρήθηκε στα διάτομα κοντά στους κλωβούς μάλλον δεν μπορεί να αποδοθεί σε θήρευση που υπέστησαν από το μικροζωοπλαγκτόν, καθώς η αφθονία του τελευταίου δεν ήταν αυξημένη στους κλωβούς. Όμως, η μειωμένη αφθονία των διατόμων στους κλωβούς τον Απρίλιο, μπορεί να συσχετίζεται με αύξηση στο μεσοζωοπλαγκτόν, όπως και το καλοκαίρι. Επίσης, μπορεί να οφείλεται στην κυκλοφορία του νερού ανάμεσα στους κλωβούς. Τα διάτομα ευνοούνται από την τύρβη και την έντονη κίνηση του νερού (Peters et al 2006), ενώ, όπως παρατηρήθηκε με την χρήση των παρασυρόμενων ρευματομέτρων, η ροή μειώνεται σημαντικά κοντά στους κλωβούς, οι οποίοι φαίνεται ότι δημιουργούν γύρω τους ένα ιδιαίτερο ρευματικό καθεστώς. Το καθεστώς αυτό περιγράφεται για ένα ιχθυοτροφείο σολομού στην Νορβηγία από τον Lolland (1993) αλλά και πειραματικά, τουλάχιστον, φαίνεται ότι οι κλωβοί επηρεάζουν την διάχυση των θρεπτικών (Gansel et al, 2012).

Στα δινωμαστιγωτά, η αφθονία ήταν και πάλι μεγαλύτερη τον Απρίλιο, φάνηκε όμως ότι η επίδραση της εποχής αφορούσε περισσότερο τους σταθμούς 100 και 200 m κατάντη του ιχθυοτροφείου αφού στους σταθμούς αναφοράς και στους κλωβούς δεν υπήρχαν στατιστικά σημαντικές διαφορές ανάμεσα στις εποχές. Στους σταθμούς κατάντη παρατηρήθηκε αύξηση των δινωμαστιγωτών σε σχέση με τους κλωβούς. Τον Ιούλιο, στους ίδιους σταθμούς, ενώ η αφθονία δεν διέφερε σημαντικά, αυξήθηκε η συμμετοχή των μεγάλων κυττάρων. Η αφθονία των δινωμαστιγωτών και η έντονη παρουσία των Gymnodiniales, τα οποία θεωρούνται κυρίως ετερότροφα, οδηγεί στο

συμπέρασμα ότι η αυξημένη παρουσία τους κοντά στους κλωβούς σχετίζεται με την αυξημένη ποσότητα λείας. Τα γυμνά δινομαστιγωτά έχει δειχθεί σε αρκετές περιοχές ότι μπορούν να εκμεταλλευτούν την άνθηση διατόμων (Hansen, 1991, Sherr & Sherr, 2007). Μεταξύ της ομάδας των δινομαστιγωτών στην περιοχή της Λέσβου, τα γυμνά δινομαστιγωτά ήταν πιά άφθονα σε όλους τους σταθμούς. Η επικράτησή τους στην περιοχή της Λέσβου ήταν αναμενόμενη καθώς τα γυμνά ετερότροφα δινομαστιγωτά είναι πιά αποτελεσματικοί θηρευτές σε σχέση με τα θωρακισμένα γένη (Hansen, 1991, Sherr & Sherr, 2007).

Αντίθετα με τα βλεφαριδωτά, τα ετερότροφα δινομαστιγωτά έχουν την δυνατότητα να θηρεύουν οργανισμούς, ίδιου ή μεγαλύτερου μεγέθους από τα ίδια, λόγω των μορφολογικών τους χαρακτηριστικών (Hansen, 1992, Sherr & Sherr 2007, Jeong et al 2010). Ενώ οι πληθυσμοί των βλεφαριδωτών αυξάνονται πιά γρήγορα όταν η τροφή αυξάνεται (Fenchel 1968), έχουν την δυνατότητα να θηρεύουν κύτταρα που δεν ξεπερνούν σε μέγεθος το 45% της διαμέτρου του στόματός τους (Johnson, 1986). Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι ένα από τα μεγαλύτερα βλεφαριδωτά (*Favella ehrenbergii*), με στοματική διάμετρο 80 μm , μπορεί να θηρεύσει κύτταρα μέχρι και 35 μm (Hansen, 1991). Συνεπώς, τα ετερότροφα δινομαστιγωτά μπορούν να ανταγωνιστούν τα βλεφαριδωτά σε αρκετές περιπτώσεις, ειδικά όταν οι αλλαγές στο τροφικό πλέγμα οδηγούν προς μια σύνθεση που απαρτίζεται από μεγαλύτερα διάτομα και δινομαστιγωτά.

Παρόμοιες αλλαγές στην δομή του μικροπλαγκτού παρατηρήθηκαν και σε ένα ιχθυοτροφείο στην Αδριατική (Skejik et al, 2010). Στην συγκεκριμένη περιοχή, μετρήθηκε αυξημένη συγκέντρωση αμμωνίας και υψηλότερες αφθονίες δινομαστιγωτών, ειδικά γυμνών, κοντά στο ιχθυοτροφείο σε σχέση με τον σταθμό αναφοράς. Και σε εκείνη την περιοχή, η αφθονία των βακτηρίων ήταν υψηλότερη κοντά στους κλωβούς σε κάποιες από τις περιόδους δειγματοληψίας, ειδικά δε τον Ιούνιο. Η συγκέντρωση της χλωροφύλλης ήταν υψηλότερη κοντά στους κλωβούς τους καλοκαιρινούς μήνες, όπως και η πρωτογενής παραγωγή και αφθονία του φυτοπλαγκτού. Και σε αυτήν την περίπτωση, η ποικιλότητα ήταν αυξημένη στους κλωβούς. Τα παραπάνω ευρήματα καταδεικνύουν ότι οι αλλαγές που παρατηρήθηκαν στην παρούσα μελέτη δεν περιορίζονται στις συγκεκριμένες περιοχές μελέτης.

Δεδομένα από την ίδια περιοχή (Skejik et al 2012) έδειξαν ότι τα διάτομα είχαν μεγαλύτερη αφθονία τους χειμερινούς μήνες, ενώ τις περιόδους στρωμάτωσης κυριαρχούσαν κυρίως τα δινομαστιγωτά. Αν και οι συγγραφείς καταλήγουν ότι οι κύριες διαφορές οφείλονται σε εποχιακές διακυμάνσεις παρά στην επιρροή του ιχθυοτροφείου, τα αποτελέσματα από την μελέτη αυτή έχουν κοινά σημεία με την περιοχή της Λέσβου. Παρόμοιες μετρήσεις έγιναν το 2001-2002, στο ίδιο ιχθυοτροφείο στην Λέσβο από τους Pitta et al (2005), σε συνδυασμό με μετρήσεις σε άλλες ιχθυοκαλλιέργειες στο Αιγαίο. Η μελέτη αυτή έδειξε σημαντικά μεγαλύτερη συγκέντρωση χλωροφύλλης κοντά στους κλωβούς, όπως επίσης και αφθονία βακτηρίων και ετερότροφων νανομαστιγωτών, ενώ οι περισσότερες από τις αλλαγές παρουσιάστηκαν τον Σεπτέμβριο. Ενώ η περίοδος δειγματοληψίας και οι σταθμοί δεν συμπίπτουν, αφενός υπάρχουν ενδείξεις παρόμοιες με το πρότυπο που παρατηρήθηκε στην παρούσα μελέτη και αφετέρου το εύρος τιμών μεταξύ των οποίων κυμαίνονται οι μετρήσεις το 2001-2002 είναι επίσης παρόμοιο.

Στη διάρκεια της παρούσας μελέτης, η αφθονία του μεσοζωοπλαγκτού μετρήθηκε για πρώτη φορά σε σχέση με ιχθυοκλωβούς. Η αυξημένη βιομάζα που παρατηρήθηκε τον Ιανουάριο συνάδει με την υπόθεση ότι στην Λέσβο, την περίοδο εκείνη, επικρατούσαν συνθήκες μετα-άνθησης, καθώς η απόκριση του μεσοζωοπλαγκτού στις αλλαγές της βιομάζας μικροπλαγκτού καθυστερεί από μία έως δύο εβδομάδες λόγω του πύο αργού ρυθμού ανάπτυξης της ομάδας αυτής. Συνεπώς, η αύξηση στο μεσοζωοπλαγκτό παρατηρείται συνήθως αφού έχει τελειώσει η άνθηση (Brohee et al 1989; Frangoulis 2002). Η απουσία των κλαδοκεραιωτών τον Ιανουάριο και τον Απρίλιο ήταν αναμενόμενη, καθώς η ομάδα αυτή εμφανίζεται κυρίως το καλοκαίρι (Siokou et al 2010).

Τα δεδομένα από την Κύπρο είναι πύο δύσκολο να ερμηνευτούν. Ο κύριος λόγος στον οποίο αποδίδεται αυτό είναι οι γρήγορες διεργασίες χάρη στον εξαιρετικά ολιγοτροφικό χαρακτήρα της περιοχής. Επιπλέον, έπαιξε ρόλο η ώρα δειγματοληψίας, η οποία, λόγω των ισχυρών ανέμων που έπνεαν στην περιοχή μετά το μεσημέρι, καθιστώντας την χρήση των διαθέσιμων σκαφών αδύνατη, είχε ως αποτέλεσμα όλα τα δείγματα να λαμβάνονται πύο νωρίς το πρωί, πριν χορηγηθεί η ημερήσια τροφή. Συνεπώς, είναι πύο πιθανό, οι εκροές της προηγούμενης ημέρας να είχαν απορροφηθεί από το σύστημα ή/και να είχαν εξαπλωθεί σημαντικά.

Στην Κύπρο, οι αλλαγές που παρατηρήθηκαν ήταν επί το πλείστον εποχιακές, φάνηκε δηλαδή ότι τα διαθέσιμα θρεπτικά ήταν περισσότερα τους θερμότερους μήνες, με αποτέλεσμα να αυξάνεται και η αφθονία των δινομαστιγωτών και βλεφαριδωτών στην περιοχή. Αντίθετα, η αφθονία των διατόμων δεν φάνηκε να αλλάζει, γεγονός που ενισχύει την άποψη ότι το μεγαλύτερο μέρος των θρεπτικών κινείται εντός του μικροβιακού βρόχου. Η αφθονία των βακτηρίων ήταν μεγαλύτερη στους ιχθυοκλωβούς τον Ιούλιο και είχε αυξητική τάση κοντά στους κλωβούς και τον Μάιο. Παράλληλα όμως, παρατηρήθηκαν αλλαγές σε σχέση με τους σταθμούς αναφοράς και σε αβιοτικές παραμέτρους την περίοδο ανάμιξης κοντά στους κλωβούς. Το καθεστώς ολιγοτροφίας που κυριαρχεί στην Κύπρο είναι προφανές ότι έχει την δυνατότητα να αποσβαίνει ταχύτερα τις εισροές θρεπτικών από τους ιχθυοκλωβούς και οι εποχιακές διακυμάνσεις των επιπέδων των θρεπτικών καθορίζουν τον χαρακτήρα της ευρύτερης περιοχής, ακόμα και πολύ κοντά στους ιχθυοκλωβούς. Είναι χαρακτηριστικό δε ότι, την εποχή που τα θρεπτικά στην γενικότερη περιοχή είναι περισσότερα σε σχέση με τις άλλες περιόδους (τον Φεβρουάριο), παρουσιάζονται και σημαντικά αυξημένες τιμές σε κάποιες μεταβλητές κοντά στους κλωβούς, ενώ αυτό δεν μετρήθηκε στο πλαγκτόν που φαίνεται να ευνοείται περισσότερο κατά τις περιόδους που η θερμοκρασία αυξάνεται.

Συμπερασματικά, και στις δύο περιοχές φαίνεται ότι τα ιχθυοτροφεία επηρεάζουν την γύρω περιοχή τους. Σε επιβεβαίωση όσων έχουν δειχθεί από προγενέστερες μελέτες, οι επιπτώσεις σπάνια φαίνονται στις χημικές παραμέτρους, ενώ, όπως βρέθηκε, οι βιολογικές παράμετροι αποτελούν καλύτερο δείκτη για το εύρος και την ζώνη επιρροής του ιχθυοτροφείου στην στήλη του νερού. Από την άλλη, είναι προφανές ότι και το μέγεθος και η φύση της ζώνης επιρροής εξαρτώνται και από μια σειρά άλλων χαρακτηριστικών που σχετίζονται με το ευρύτερο δυναμικό περιβάλλον όπου βρίσκονται οι ιχθυοκαλλιέργειες.

4 Χρήση και επαλήθευση τρισδιάστατου βιογεωχημικού μοντέλου για την αποτίμηση των επιπτώσεων των ιχθυοκαλλιέργειών

4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο στόχος ήταν να εξεταστεί με την χρήση ΒΓΧ μοντέλου η διάχυση των θρεπτικών που εκλύονται από ιχθυοκαλλιέργειες και να αποτιμηθούν οι αλλαγές που τυχόν προκύπτουν στα χημικά και βιολογικά χαρακτηριστικά της στήλης του νερού. Οι επιπτώσεις που παρατηρήθηκαν στο οικοσύστημα αξιολογήθηκαν με βάση την κλίμακα και την σημασία τους. Εξετάστηκαν επίσης σενάρια με διαφορετικά επίπεδα παραγωγής για κάθε περιοχή.

Η προσέγγιση που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είχε δύο στόχους: α) την αναπαραγωγή και ανάλυση των επιπτώσεων των υδατοκαλλιέργειών στα κατώτερα τροφικά επίπεδα και β) τον προσδιορισμό της απαραίτητης κλίμακας και χωρικής ανάλυσης ώστε κατόπιν το μοντέλο να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο διαχειριστικών προσομοιώσεων για τις περιοχές αυτές. Ο δεύτερος στόχος θεωρείται ιδιαίτερα σημαντικός καθώς οι προσομοιώσεις και η εκτίμηση των αποτελεσμάτων είναι μια χρονοβόρος διαδικασία η οποία απαιτεί σημαντική υπολογιστική ισχύ σήμερα.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι διεργασίες που σχετίζονται με την πρωτογενή παραγωγή συνδέονται άμεσα με μηχανικές διεργασίες (π.χ. κυματισμός), η ακριβής αποτύπωση της κατεύθυνσης των ρευμάτων, είναι προϋπόθεση για την αξιόπιστη απεικόνιση των κατώτερων τροφικών επιπέδων. Το ΒΓΧ μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε, έχει εφαρμοστεί με επιτυχία σε μια σειρά περιοχών στην Ανατολική Μεσόγειο (Petihakis et al, 2002; Triantafyllou et al, 2003) και στην παρούσα εφαρμογή του περιλαμβάνει την προσομοίωση του ιχθυοτροφείου ως πηγής θρεπτικών στο σύστημα.

4.2 Υλικά και μέθοδοι

4.2.1 Περιοχές μελέτης

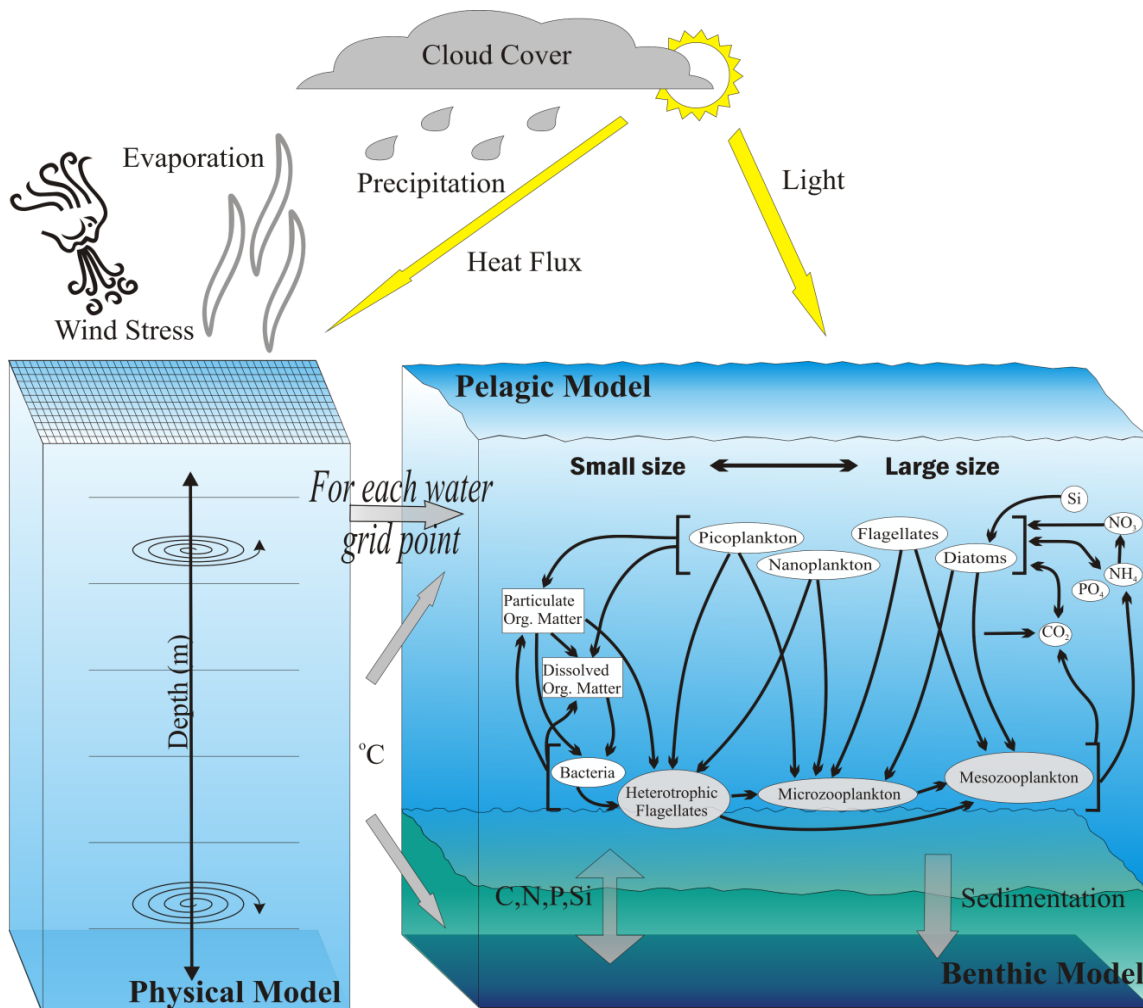
Το μοντέλο εφαρμόστηκε στις δύο περιοχές μελέτης και για την επαλήθευσή του συλλέχθηκαν δείγματα νερού με φιάλη Niskin, η επιλογή των σταθμών βασίστηκε σε μετρήσεις παρασυρόμενων ρευματομέτρων στην Λέσβο, έτσι ώστε να ακολουθηθεί η

κατεύθυνση του κύριου ρεύματος που διαπερνά το ιχθυοτροφείο (12 σταθμοί) και σε ένα πλέγμα σταθμών (25) στην Κύπρο προκειμένου να καλυφθούν η περιοχή του ιχθυοτροφείου και η ευρύτερη περιοχή.

Στα δείγματα νερού έγινε ανάλυση διαλελυμένων θρεπτικών σύμφωνα με τους Strickland & Parsons (1972) για τα φωσφορικά, τους Ivancic & Deggobis (1984) για την αμμωνία και χλωροφύλλης σύμφωνα με τους Yentsch & Menzel (1963). Τα δείγματα μεσοζωοπλαγκτού αναλύθηκαν σύμφωνα με το πρωτόκολλο που περιγράφουν οι Frangoulis et al (2010).

4.2.2 Περιγραφή υδροδυναμικού μοντέλου

Το υδροδυναμικό μοντέλο βασίζεται στο Princeton Ocean Model (POM, Blumberg & Mellor, 1987) που έχει χρησιμοποιηθεί σε επίπεδο θαλάσσιας λεκάνης αλλά και σε παράκτιες εφαρμογές και έχει περιγραφεί εκτενώς στην βιβλιογραφία (π.χ. Galperin & Mellor (1990); Mellor & Ezer (1991)). Ένα αναλυτικό εγχειρίδιο για χρήστες είναι διαθέσιμο στην ιστοσελίδα του μοντέλου: <http://www.aos.princeton.edu/WWWPUBLIC/htdocs.pom>. Το POM έχει εφαρμοστεί ενδεικτικά σε επίπεδο Μεσογείου Θάλασσας (π.χ. Zavatarelli & Mellor, 1995; Drakopoulos & Lascaratos, 1997; Horton et al, 1997), στην Αδριατική (Zavatarelli & Pinardi, 1995), στη Λεβαντίνη (Lascaratos & Nittis, 1998), στην Ανατολική Μεσόγειο (Korres & Lascaratos, 2003) και στο βόρειο Αιγαίο (Kourafalou & Barboroulos, 2003). Το μοντέλο χρησιμοποιεί σύστημα συντεταγμένων Σ το οποίο ορίζει τον κατακόρυφο κατακερματισμό της στήλης του νερού σε 25 επίπεδα Σ λαμβάνοντας υπόψη τη βαθυμετρία της περιοχής [βλ. Εισαγωγή. 1.2. (δ) Δομή και χρήση του βιογεωχημικού μοντέλου]. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει μεγαλύτερη διακριτικότητα σε παράκτιες περιοχές. Οι παράμετροι που προβλέπει το μοντέλο είναι η θερμοκρασία, αλατότητα, ταχύτητα ρεύματος, ύψος θάλασσας και τυρβώδης κινητική ενέργεια (π.χ. κυματισμός). Η οριζόντια διάχυση υπολογίζεται με βάση τον σχηματισμό Smagorinsky (Smagorinsky, 1963; Mellor & Blumberg, 1985) ενώ η κάθετη διάχυση υπολογίζεται σύμφωνα με το σχήμα τύρβης Mellor-Yamada-2.5 (Mellor & Yamada, 1982) το οποίο λαμβάνει υπόψη παράγοντες όπως η ανεμογενής ανάμιξη και η σταθεροποίηση που προκαλείται από τη στρωμάτωση. Ένα σχηματικό διάγραμμα του συζευγμένου υδροδυναμικού-ΒΓΧ μοντέλου φαίνεται στην Εικόνα 4.1.

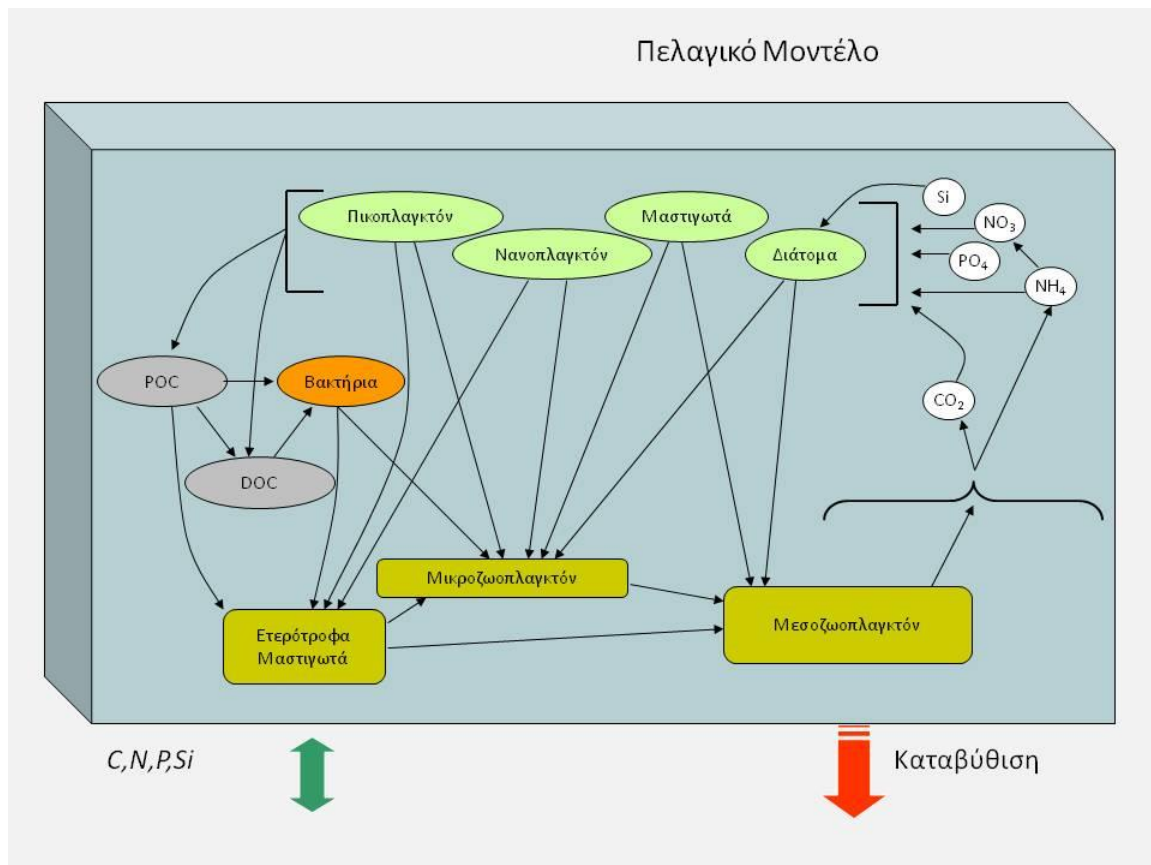


Εικόνα 4.1. Σχηματικό διάγραμμα του συζευγμένου υδροδυναμικού- βιογεωχημικού μοντέλου όπου φαίνονται οι λειτουργικές ομάδες (σε πλαίσια) και οι τροφικές σχέσεις (με βέλη)

4.2.3 Περιγραφή μοντέλου οικοσυστήματος

Το μοντέλο του οικοσυστήματος είναι προέκταση του European Regional Seas Ecosystem Model (ERSEM) (Baretta et al, 1995) και είναι προσαρμοσμένο στο σύστημα της ανατολικής Μεσογείου (Petihakis et al, 2002; Petihakis et al, 2005; Petihakis et al, 2007). Το μοντέλο έχει περιγραφεί εκτενώς στην βιβλιογραφία (Triantafyllou et al, 2001; Petihakis et al, 2002; Triantafyllou et al, 2003; Blackford et al, 2004; Petihakis et al, 2005) και περιλαμβάνει φυσικές, βιολογικές και χημικές διεργασίες που λειτουργούν εντός και μεταξύ των λειτουργικών ομάδων που περιέχονται. Στις λειτουργικές ομάδες,

όλοι οι σημαντικοί μηχανισμοί από άποψη φυσιολογίας (πρόσληψη άνθρακα, αναπνοή, έκκριση, απέκκριση) και πληθυσμού (αύξηση, μετανάστευση και θνησιμότητα) αντιπροσωπεύονται από ροές άνθρακα και θρεπτικών (οργανικό υλικό, λόγος C:N:P:Si). Οι λειτουργικές ομάδες διαφοροποιούνται μεταξύ τους με βάση την παραμετροποίηση των προαναφερθέντων μηχανισμών. Κάθε λειτουργική ομάδα περιλαμβάνει οργανισμούς που διέπονται από παρόμοιες βιογεωχημικές και οικολογικές λειτουργίες και χωρίζονται σε τρεις κύριες κατηγορίες: παραγωγοί, καταναλωτές και αποδομητές. Διαχωρίζονται περαιτέρω ανάλογα με το μέγεθος και τις τροφικές σχέσεις μεταξύ θηράματος και θηρευτή. Οι τροφικές σχέσεις απεικονίζονται λεπτομερώς για το πελαγικό τροφικό πλέγμα στην Εικ.4.2.



Εικόνα 4.2. Σχηματικό διάγραμμα του πελαγικού βιογεωχημικού μοντέλου όπου παρουσιάζονται οι λειτουργικές ομάδες (σε πλαίσια) και οι τροφικές σχέσεις (με βέλη)

Οι τροφικές σχέσεις κάθε λειτουργικής ομάδας του μοντέλου μπορούν να προσαρμοστούν στα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του υπό μελέτη οικοσυστήματος καθορίζοντας ένα πίνακα τροφικών σχέσεων (Πιν. 4.1).

Πίνακας 4.1. Τροφικές προτιμήσεις των λειτουργικών ομάδων των θηρευτών στο μοντέλο. Τα Z4 , Z5 & Z6 αντιστοιχούν στο μεσοζωοπλαγκτόν, μικροζωοπλαγκτόν και τα ετερότροφα νανομαστιγωτά ενώ τα P1, P2, P3, P4 και B1 στα διάτομα, νανοφυτοπλαγκτόν, πικοφυτοπλαγκτόν, αυτότροφα δινομαστιγωτά και βακτήρια, αντίστοιχα

Θηρευτές	Θήραμα							
	P1	P2	P3	P4	Z4	Z5	Z6	B1
Z4	0.8	-	-	0.8	0.5	-	0.8	-
Z5	1.0	0.6	0.2	1.0	-	1.0	1.0	0.6
Z6	-	0.5	1.0	-	-	-	0.2	1.0

Για παράδειγμα, στον Πιν. 4.1 τα διάτομα (P1) και τα αυτότροφα δινομαστιγωτά (P4) θηρεύονται ως επί το πλείστον από το μικροζωοπλαγκτόν (Z5) ενώ το νανοφυτοπλαγκτόν (P2) και το πικοφυτοπλαγκτόν (P3) θηρεύονται από τα ετερότροφα νανομαστιγωτά (Z6) και το μικροζωοπλαγκτόν (Z5). Τα βακτήρια (B1) δρουν ως αποδομητές και ανταγωνίζονται με το φυτοπλαγκτόν για ανόργανα θρεπτικά. Οι κύριοι θηρευτές τους είναι τα ετερότροφα νανομαστιγωτά (Z6) ενώ ένα μικρό κλάσμα τους καταναλώνεται και από το μικροζωοπλαγκτόν (Z5). Τα ετερότροφα νανομαστιγωτά (Z6) θηρεύονται από το μικροζωοπλαγκτόν (Z5) και το μεσοζωοπλαγκτόν (Z4) το οποίο επίσης θηρεύει το μικροζωοπλαγκτόν (Z5). Μια συνολική θνησιμότητα επιβάλλεται στο μεσοζωοπλαγκτόν για να δικαιολογήσει την μη υπολογισμένη θήρευση από ανώτερα τροφικά επίπεδα που δεν περιλαμβάνονται στο μοντέλο.

Η καταβύθιση του νεκρού οργανικού υλικού απομακρύνει θρεπτικά από την στήλη του νερού, ενώ μέρος από αυτά επιστρέφει στην στήλη μέσω της ανοργανοποίησης. Μερικές από τις κύριες παραμέτρους και οι αρχικές τους τιμές, όπως χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εφαρμογή παρατίθενται στον Πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2: Παράμετροι του μοντέλου για την μεταβλητή X (δηλαδή P1, P2, P3 P4, B1, Z4, Z5, Z6) και την διάσταση i (C, N, P, Si)

Parameter	P1	P2	P3	P4	B1	Z6	Z5	Z4
Environmental effects								
Characteristic Q10	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Half oxygen saturation (mmol O ² m ⁻³)					0.3125	7.812	7.812	7.812
Uptake								
max. specific at 10°C (d ⁻¹)	2.0	2.5	3.0	1.5	4.0	2.0	1.2	0.5
Half saturation value						45	45	40
Selectivity						20	5	1
Loss rates								
Excreted fraction of uptake	0.2	0.2	0.2	0.2		0.5	0.5	0.5
Nutrient-lysis rate	0.05	0.05	0.05	0.05				
Nutrient-lysis rate under Si limitation	0.1							
Assimilation efficiency					0.6	0.4	0.5	0.6
Assimilation efficiency at low temp					0.2			
Respiration								
Rest resp. at 10°C (d ⁻¹)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.1	0.02	0.02	0.02
Activity respiration	0.1	0.25	0.25	0.25				
Nutrient Dynamics								
Min N/C ratio (mol gC ⁻¹)	0.00687	0.00687	0.00687	0.00687				
Min P/C ratio (mol gC ⁻¹)	0.4288E-3	0.4288E-3	0.4288E-3	0.4288E-3				
Max. N/C ratio (mol gC ⁻¹)					0.0126	0.016	0.016	
Max. P/C ratio (mol gC ⁻¹)					0.0007	0.001	0.001	
Redfield N/C ratio (mol gC ⁻¹)	0.0126	0.0126	0.0126	0.0126				
Redfield P/C ratio (mol gC ⁻¹)	0.7862E-3	0.7862E-3	0.7862E-3	0.7862E-3				
Multiple fact min N/C and P/C ratio	1.0	1.0	1.0	1.0				
Multiple fact max. N/C and P/C ratio	2.0	2.0	2.0	2.0				
Max. Si/C ratio (mol gC ⁻¹)	0.03							
Affinity for nutrients (mg C ⁻¹ d ⁻¹)	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025				
Sedimentation								
Nutrient Limitation for Sedimentation	0.7	0.75	0.75	0.75				
Sinking Rate (m day ⁻¹)	5.0	0.0	0.0	5.0				
Mortality								
Oxygen dependent mortality rate (d ⁻¹)						0.25	0.25	0.25
Temperature independent mortality(d ⁻¹)					0.05	0.05	0.05	0.05

Οι βιογεωχημικές παράμετροι αντιμετωπίζονται ως αδρανείς μεταβλητές που ορίζονται από την οριζόντια μεταφορά και την διάχυση. Έτσι η συγκέντρωση της κάθε παραμέτρου μπορεί να θεωρηθεί ως το γινόμενο μιας «υδροδυναμικής» και μιας «βιολογικής» μεταβολής

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -U \frac{\partial C}{\partial x} - V \frac{\partial C}{\partial y} - W \frac{\partial C}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_H \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \sum BF$$

όπου τα U, V, W είναι τα πεδία ταχύτητας, A_H είναι ο συντελεστής οριζόντιου ιξώδους (όπως προκύπτει από το σχηματισμό Smagorinsky) και K_H ο κάθετος συντελεστής ανάμιξης δίνης (Mellor – Yamada), που προέρχονται από το υδροδυναμικό μοντέλο.

$\sum BF$ είναι η ολική βιοχημική ροή που υπολογίζεται από το βιογεωχημικό μοντέλο. Τα δύο μοντέλα ενσωματώνονται ταυτόχρονα και η παραπάνω εξίσωση λύνεται για κάθε βιογεωχημική παράμετρο σε κάθε βήμα χρόνου.

4.2.4 Ισοζύγιο μάζας

Επειδή τα θρεπτικά που ελευθερώνει ένα ιχθυοτροφείο διαλύονται σχετικά γρήγορα στη στήλη του νερού η ποσοτικοποίηση τους είναι πολύ δύσκολη. Με την κατασκευή του ισοζυγίου μάζας υπολογίζονται οι εισροές θρεπτικών στο σύστημα. Τα ισοζύγια μάζας υπολογίζονται με βάση τον τύπο τροφής που παρέχεται στα ψάρια και κάποια χαρακτηριστικά των ψαριών (πχ. βάρος, κατανάλωση τροφής) για πληθώρα καλλιεργούμενων ειδών. Τα σολομοειδή (Holby & Hall 1991; Holby et al 1992), η τσιπούρα (Kaushik 1998; Lupatsch & Kissil 1998) και το λαβράκι (Lemarie et al, 1998; Tsarakis et al, 2006) περιλαμβάνονται σε αυτά τα είδη.

Οι εισροές αζώτου και φωσφόρου που παρέχονται μέσω της τροφής χρησιμοποιούνται για να υπολογιστεί η ποσότητα που απορροφούν τα ψάρια και η ποσότητα που αποβάλλεται σε διαλελυμένη (ουρία, αμμωνία, φωσφορικά) και σωματιδιακή μορφή (τροφή, περιττώματα). Οι Lupatsch & Kissil (1998) και Tsarakis et al (2006) υπολόγισαν ότι το μεγαλύτερο μέρος αζώτου που παρέχεται αποβάλλεται σε διαλελυμένη μορφή ως

ουρία (41%) και αμμωνία (26%), ενώ οι απώλειες σε φωσφόρο είναι περίπου το 22% του συνολικού φωσφόρου που παρέχεται στα ψάρια. Τα σωματιδιακά θρεπτικά που αποβάλλονται αποτελούνται επί το πλείστον από φωσφόρο σε ποσοστό 44% ενώ οι απώλειες σε σωματιδιακό άζωτο είναι το 10% του παρεχόμενου. Περίπου 5% της τροφής που δεν καταναλώνεται καταναλώνεται από ψάρια έξω από τους κλωβούς ή συνεισφέρει στο οργανικό φορτίο του ιζήματος κάτω από τους κλωβούς.

Η εκτίμηση των ποσοτήτων θρεπτικών που απελευθερώνονται από τα ιχθυοτροφεία στην παρούσα μελέτη έγινε χρησιμοποιώντας υπολογισμούς ποσότητας διαλελυμένων και σωματιδιακών θρεπτικών από τα παραπάνω ισοζύγια μάζας, συνυπολογίζοντας δεδομένα ταΐσματος από τα ιχθυοτροφεία στις περιοχές μελέτης (Πιν. 4.3).

Πίνακας 4 3. Υπολογισμοί των ετήσιων εκροών (tones yr^{-1}) από τα 4 ιχθυοτροφεία που μελετήθηκαν

	NH4	Urea	PON	PO4	POP	POC
Λέσβος	33.4	52.7	12.8	5.7	11.3	90.4
Farm 1	3.4	5.3	1.3	0.6	1.1	9.2
Farm 2	38.2	60.2	14.7	6.5	12.9	103.3
Farm 3	15.1	23.9	5.8	2.6	5.1	41

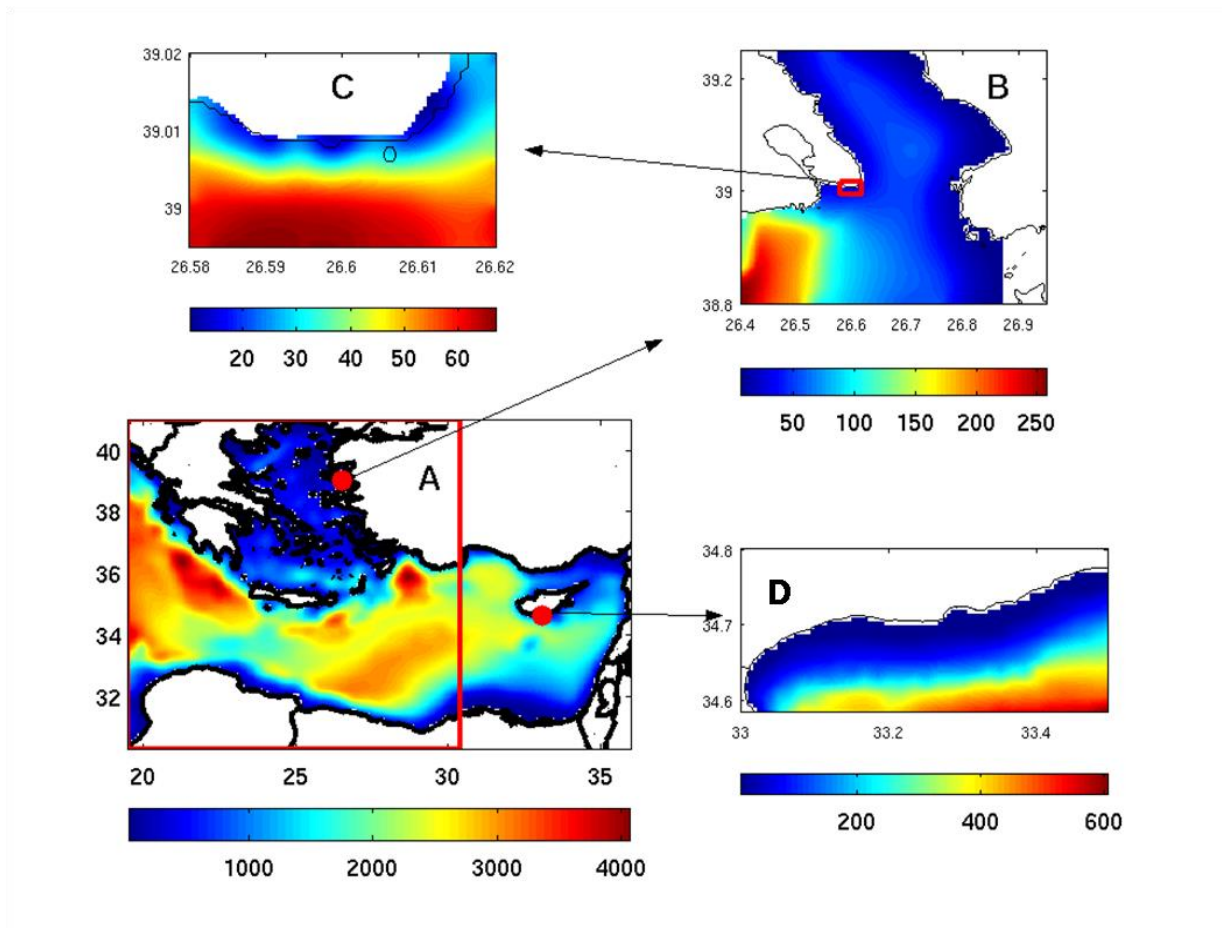
Οι εβδομαδιαίες εισροές αμμωνίας (συμψηφισμένη με την ουρία), φωσφορικών και σωματιδιακού οργανικού αζώτου και φωσφόρου υπολογίστηκαν και μετατράπηκαν σε μονάδες του μοντέλου (mM s^{-1}).

Οι τιμές στον Πίνακα 4.3 αρχικά φαίνονται αρκετά υψηλές, γι αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι οι εισροές σε άζωτο και φωσφόρο στην Μεσόγειο, προερχόμενες από ιχθυοτροφεία, είναι ένα πολύ μικρό ποσοστό σε σχέση με τις εισροές από άλλες πηγές όπως η ατμοσφαιρική και χερσαία απόθεση και οι ανθρωπογενείς πηγές. Ανάλογα με το ποια εκτίμηση χρησιμοποιείται, έχει υπολογιστεί ότι η ετησία αύξηση σε άζωτο και φωσφόρο που προέρχεται από τις ιχθυοκαλλιέργειες στην Μεσόγειο είναι 0.01% των συνολικών εισροών (Karakassis et al 2005).

4.2.5 Δομή μοντέλου

Το συζευγμένο ΒΓΧ μοντέλο εφαρμόστηκε στις δύο περιοχές μελέτης που περιγράφονται παραπάνω και απεικονίζονται στην Εικόνα 4.3. Οι περιοχές εφαρμογής καλύπτουν τις συντεταγμένες 38.995 °N-39.02 °N & 26.58 °E-26.62 °E για την Αγριλιά Λέσβου (Εικ 4.3C) και 34.583 °N -34.802 °N & 33.00 °E - 33.494 °E για την περιοχή της Κύπρου (Εικ 4.3D). Στην περίπτωση της Λέσβου, για να περιγραφεί σωστά το ιχθυοτροφείο στο πλέγμα του μοντέλου απαιτούνταν υψηλή διακριτότητα. Για να επιτευχθεί αυτό εφαρμόστηκε διαδικασία υποκλιμάκωσης μέσω μιας σειράς ένθετων (nested) μοντέλων. Η διαδικασία υποκλιμάκωσης ξεκίνησε με ένα μοντέλο μέτριας διακριτότητας (3χλμ) της ανατολικής Μεσογείου (Εικ 4.3A) που παρέχει τις απαραίτητες οριακές συνθήκες (boundary conditions) στο μοντέλο υψηλής διακριτότητας (500μ) που καλύπτει όλη την νήσο Λέσβο (Εικ. 4.3B). Το τελευταίο, παρέχει τις οριακές συνθήκες για το πολύ υψηλής διακριτότητας μοντέλο (50μ) που τελικά χρησιμοποιήθηκε (Εικ. 4.3C) και καλύπτει την περιοχή του ιχθυοτροφείου. Λαμβάνοντας υπόψη ότι τα ιδιαίτερα τοπογραφικά χαρακτηριστικά μιας παράκτιας περιοχής επηρεάζουν σημαντικά την κυκλοφορία, χρησιμοποιήθηκε ηχοβολιστικό απλής δέσμης (echosounder) για την τοπογραφική απεικόνιση της περιοχής πριν εφαρμοστεί το μοντέλο. Έγινε επίσης προσομοίωση όλων των ένθετων μοντέλων (Αιγαίο, Λέσβος, Αγριλιά) για το 2008 χρησιμοποιώντας ωριαίες ροές προερχόμενες από το επιχειρησιακό ατμοσφαιρικό μοντέλο του ΠΟΣΕΙΔΩΝΑ με διακριτότητα 1/10° (Papadopoulos et al, 2002).

Για την Κύπρο, τα υδροδυναμικά πεδία υιοθετήθηκαν από την ημερήσια πρόβλεψη του επιχειρησιακού μοντέλου CYCOFOS (Cyprus Coastal Ocean Forecasting and Observing System) που έχει ανάλυση 500μ.



Εικόνα 4.3. Ισοκατανομή βάθους στις περιοχές προσομοίωσης όπου A: Μοντέλο μέτριας διακριτότητας, B: Μοντέλο υψηλής διακριτότητας Λέσβου, C: Μοντέλο πολύ υψηλής διακριτότητας Λέσβου και D: Μοντέλο υψηλής διακριτότητας Κύπρου

Η επιρροή του ιχθυοτροφείου παραμετροποιήθηκε εισάγοντας τα θρεπτικά στο επιφανειακό στρώμα των επιλεγμένων σημείων του πλέγματος (I, J), με τις απαραίτητες προσαρμογές αναφορικά με τις εισροές ανά μονάδα επιφάνειας:

$$C(I,J,1) = C(I,J,1) + DTI * flux(C) / (dz(1) * ART(I,J))$$

Όπου το C είναι το διαλελυμένο ή σωματιδιακό θρεπτικό στοιχείο που εισάγεται, το ART αντιπροσωπεύει ένα σημείο στο πλέγμα του μοντέλου, DTI είναι το βήμα χρόνου του μοντέλου, dz(1) είναι το μήκος του επιφανειακού στρώματος και flux(C) είναι ο ρυθμός εισροής της αντίστοιχης μεταβλητής. Το μοντέλο της Λέσβου συνδέεται με το μοντέλο του Αιγαίου προκειμένου να έχει την απαραίτητη δυναμική πληροφορία στα τρία ανοιχτά όρια του μοντέλου (δηλαδή την αλληλεπίδραση με τις θαλάσσιες μάζες

από βόρεια, νότια και δυτικά, βλ. Εικ. 4.3B) σε ωριαία βάση. Σε κάθε ανοιχτό όριο του ένθετου μοντέλου της Λέσβου, εφαρμόζεται διόρθωση ώστε οι τιμές όλων των παραμέτρων του μοντέλου να προέρχονται από τις προβλέψεις του ευρύτερου μοντέλου του Αιγαίου στα εφαπτόμενα σημεία. Αντίστοιχα, στο ένθετο μοντέλο της Αγριλιάς (Εικ. 4.3C) διορθώνονταν οι τιμές για τις οριακές συνθήκες και στα τέσσερα ανοιχτά του όρια από το μοντέλο της Λέσβου, σε ωριαία βάση.

4.3 Αποτελέσματα μοντέλου

4.3.1 Υδροδυναμικό μοντέλο και πόντιση παρασυρόμενων ρευματομέτρων

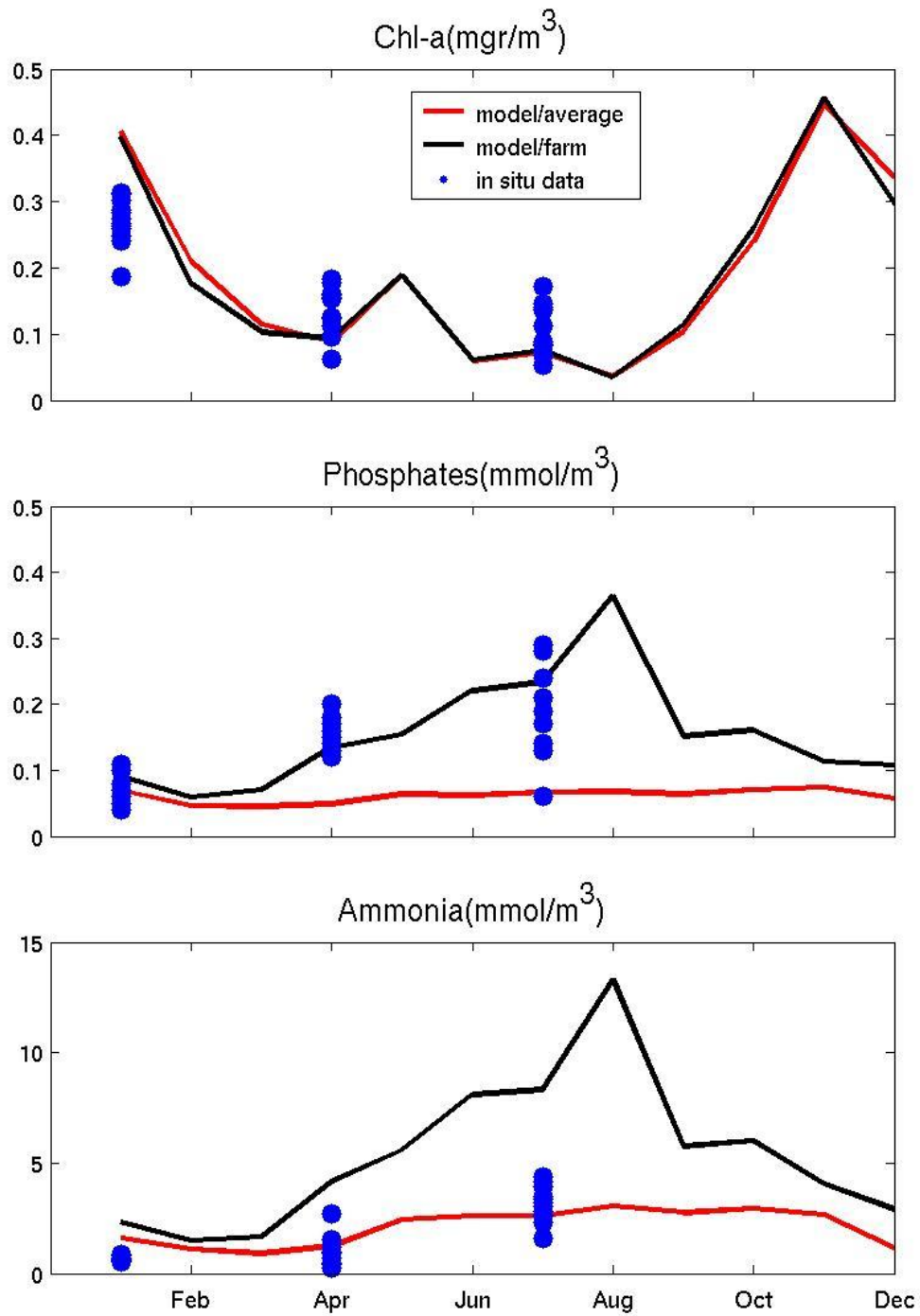
Η κυκλοφορία του νερού στην περιοχή των κλωβών κατά την διάρκεια των εργασιών πεδίου καταγράφηκε χρησιμοποιώντας παρασυρόμενους ρευματογράφους (Davis, 1982, Zervakis et al 2009). Μετά την πόντισή τους, ακολούθησε πόντιση CTD και δειγματοληψία στήλης νερού και κατόπιν επανάκτηση των παρασυρόμενων ρευματομέτρων.

Οι παρασυρόμενοι ρευματογράφοι χρησιμοποιήθηκαν σε τρεις δειγματοληψίες πεδίου, στην Αγριλιά Λέσβου και δύο στο Βασιλικό Κύπρου. Οι ρευματογράφοι ποντίστηκαν έτσι ώστε να καταγράφουν υποεπιφανειακά (2-3 μ βάθος) ρεύματα καθώς και βαθύτερα (10 μ). Στην Αγριλιά, οι ρευματομετρήσεις έδειξαν ότι το ρεύμα είναι κυρίως ανεμογενές με τα ρεύματα να εξαρτώνται κατά πολύ από την διεύθυνση των ανέμων. Όταν κυριαρχούσαν νότιοι άνεμοι η μεσημβρινή κυκλοφορία (βορράς-νότος) όριζε την κατεύθυνση του ρεύματος. Όταν κυριαρχούσαν έντονοι βόρειοι άνεμοι, τα δεδομένα υποδεικνύουν ότι δημιουργείται δίνη νότια του ακρωτηρίου Αγριλιά λόγω της παρουσίας ισχυρών νότιων ρευμάτων ανατολικά του ακρωτηρίου. Ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό που ήταν παρόν σε όλες τις δειγματοληψίες ήταν ότι η παρουσία των κλωβών είχε σημαντικό ρόλο στην ροή της υδάτινης μάζας και σε απόσταση μέχρι 200μ από αυτούς δημιουργώντας επιπλέον τριβή που είχε ως αποτέλεσμα την σημαντική μείωση της ταχύτητας του ρεύματος σε αυτές τις αποστάσεις από τους κλωβούς. Τα ρεύματα που μετρήθηκαν στην Αγριλιά ήταν αρκετά ισχυρά φτάνοντας τα 30 cm s^{-1} τον χειμώνα και 20 το καλοκαίρι, καταδεικνύοντας πολύ γρήγορη ανανέωση των υδάτινων μαζών στην περιοχή.

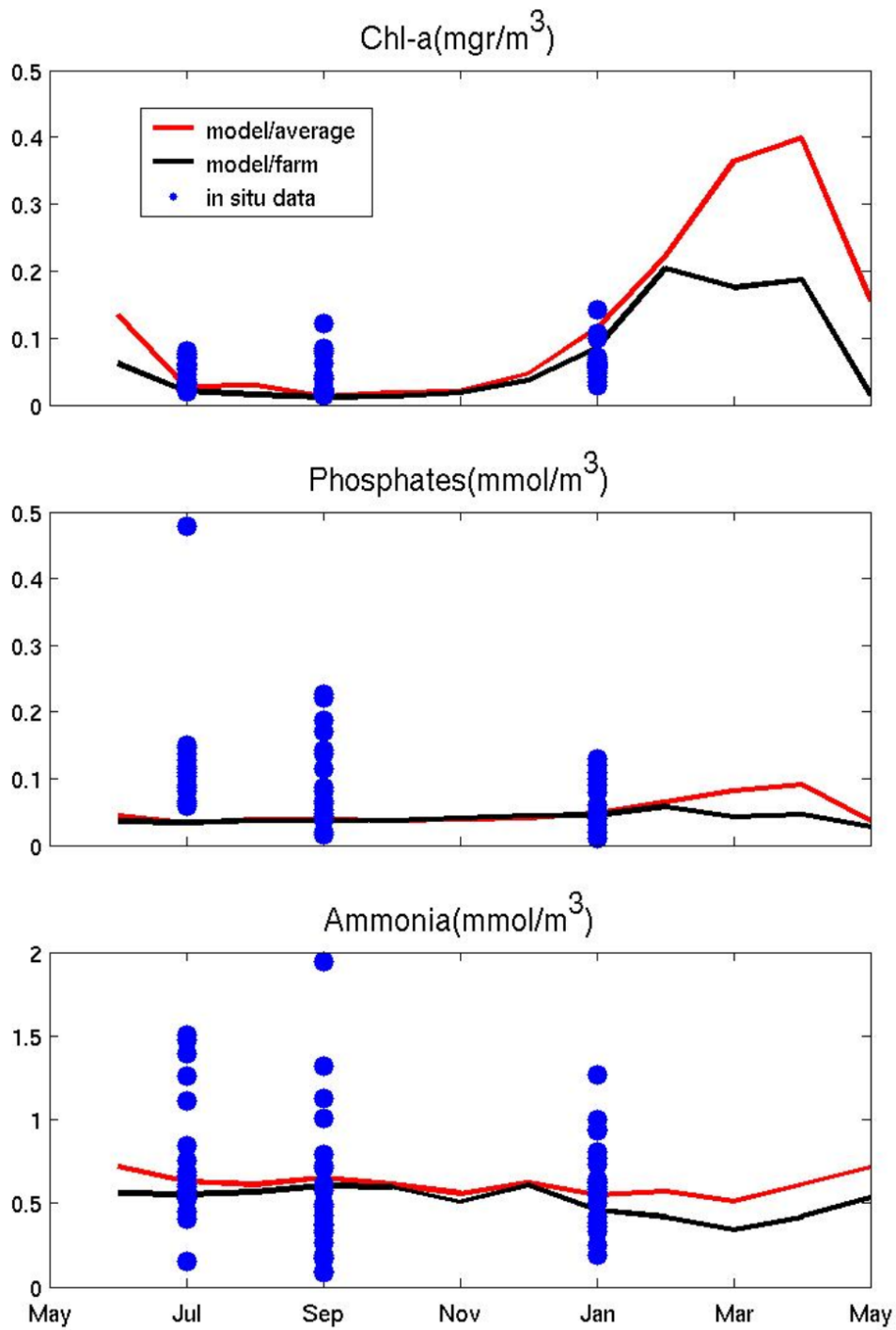
Στην Κύπρο η κυκλοφορία της περιοχής καθορίζεται από την υπεράκτια κυκλοφορία δηλαδή την παρουσία δύο πολύ ενεργητικών μηχανισμών, το μέσο-μεσογειακό ρεύμα και τον αντικυκλώνα που έχει κέντρο νότια-νοτιοανατολικά της Κύπρου και ορίζεται στην βιβλιογραφία ως κυκλώνας Shikmona (Robinson et al, 2001, Zodiatis et al, 1998, 2005). Τα ρεύματα που καταγράφηκαν στην περιοχή είναι συμβατά με την παρουσία των δύο προαναφερθέντων χαρακτηριστικών και συνεπώς η κατεύθυνση των ρευμάτων ήταν συνεχώς παράλληλη με την ακτογραμμή και προς τα βορειοδυτικά. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ταχύτητα των ρευμάτων στην μη παράκτια πλευρά των ιχθυοτροφείων τον Φεβρουάριο του 2008 ήταν 35 cm s^{-1} όπως αναφέρουν και οι Zodiatis et al (2005). Στην παράκτια πλευρά η ταχύτητα ήταν σημαντικά μικρότερη. Στην δειγματοληψία του Μαΐου 2008 τα ρεύματα είχαν πολύ μικρότερη ταχύτητα (10 cm s^{-1}) και η κατεύθυνση των ρευμάτων σε συνδυασμό με την κατανομή αλατότητας και θερμοκρασίας υποδηλώνει χαρακτηριστικά μαιάνδρων ανάβλυσης.

4.3.2 Επαλήθευση μοντέλου

Χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα πεδίου και από τις δύο περιοχές καθώς και βιβλιογραφικά δεδομένα για την αρχική επαλήθευση του μοντέλου. Στις Εικόνες 4.4 και 4.5 απεικονίζονται οι εποχιακές κατανομές της χλωροφύλλης, φωσφορικών ιόντων και αμμωνίας ως μέσος όρος της περιοχής, τιμές στο ιχθυοτροφείο και τιμές πεδίου στην Λέσβο (Εικ. 4.4) και την Κύπρο (Εικ. 4.5).



Εικόνα 4.4. Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου με τα αποτελέσματα πεδίου στην Λέσβο με τιμές από A: Χλωροφύλλη (Chl), B: Φωσφορικά (PO₄) και C: Αμμωνία (NH₄)



Εικόνα 4.5. Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου με τα αποτελέσματα πεδίου στην Κύπρο με τιμές από A: Χλωροφύλλη (Chl), B: Φωσφορικά (PO₄) και C: Αμμωνία (NH₄)

Στην Λέσβο το μοντέλο προβλέπει εποχιακή πτώση της χλωροφύλλης στην περιοχή χωρίς να φαίνονται διαφορές μεταξύ των κλωβών και της ευρύτερης περιοχής, οι τιμές του μοντέλου είναι μέσα στο εύρος τιμών που μετρήθηκαν στο πεδίο αν και φαίνεται ότι τους θερμούς μήνες του έτους το μοντέλο έχει την τάση να υποεκτιμά την χλωροφύλλη. Ο διαλελυμένος φωσφόρος και η αμμωνία, φάνηκε στο μοντέλο να παρουσιάζουν υψηλότερες συγκεντρώσεις κατά τους θερινούς μήνες. Ενώ τα φωσφορικά άλατα στο πεδίο είναι εντός του εύρους τιμών που προβλέπει το μοντέλο, η συγκέντρωση της αμμωνίας προβλέφθηκε υψηλότερη σε σύγκριση με τις τιμές πεδίου. Στην Κύπρο, το μοντέλο προέβλεψε πτώση της χλωροφύλλης τους θερινούς μήνες και οι τιμές ήταν εντός του εύρους που μετρήθηκαν στο πεδίο. Η αμμωνία και τα φωσφορικά ήταν και αυτά εντός του εύρους τιμών που μετρήθηκαν στο πεδίο όμως δεν παρατηρήθηκαν διαφορές σε σχέση με τα ιχθυοτροφεία όπως στην Λέσβο. Το μοντέλο προέβλεψε ότι η ετησία μέση βιομάζα του ζωοπλαγκτού (όπως αυτή εκφράζεται σε άνθρακα) είναι 2.2 mgC m^{-3} στην Αγριλιά και 0.3 mgC m^{-3} στην Κύπρο. Οι τιμές αυτές είναι σε συμφωνία με την βιομάζα που μετρήθηκε στο πεδίο και ήταν $0.46\text{-}2.79 \text{ mgC m}^{-3}$ στην Λέσβο και $0.1\text{-}0.87 \text{ mgC m}^{-3}$ στην Κύπρο.

4.3.3 Οικολογία- Εφαρμογή σεναρίων

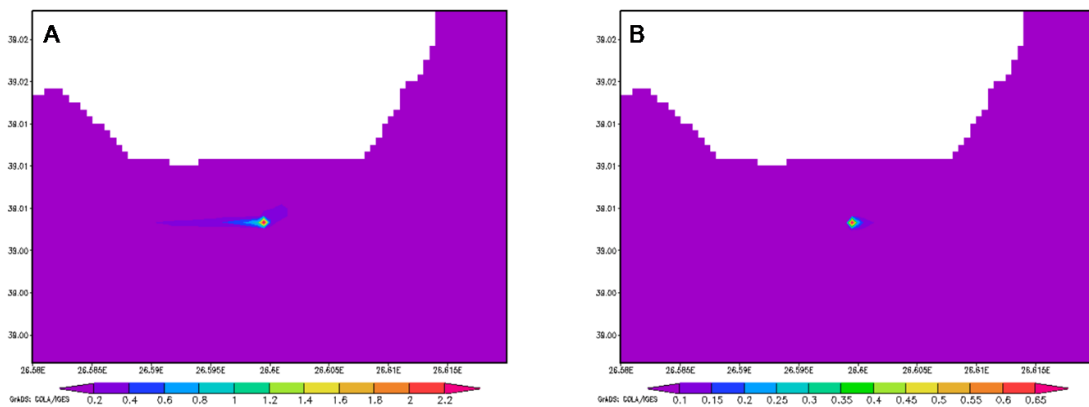
Οι δυνατότητες του μοντέλου εξετάστηκαν και με την εφαρμογή σεναρίων με έμφαση στις συνθήκες απουσία του ιχθυοτροφείου, την υφιστάμενη κατάσταση και αύξηση της παραγωγής. Το μοντέλο έτρεξε με τις τρεις αυτές συνθήκες ως εξής: α) χωρίς ψάρια (παρελθόν) β) υφιστάμενη κατάσταση (παρόν) και γ) διπλασιασμός παραγωγής (μέλλον). Τα αποτελέσματα από τα διαφορετικά σενάρια συγκρίθηκαν χρησιμοποιώντας τους μεταξύ τους λόγους.

4.3.3.1 Σύγκριση στην Λέσβο μεταξύ α) χωρίς ψάρια και β) υφιστάμενης κατάστασης

Στην Λέσβο, η σύγκριση μεταξύ των δυο σεναρίων έδειξε μικρές αλλαγές στην περιοχή κοντά στους κλωβούς ακόμα και όταν εφαρμόστηκε το πολύ υψηλής διακριτότητας πλέγμα (50μ). Τα δυνατά ρεύματα της περιοχής πιθανόν οδηγούν σε γρήγορη διάχυση και μεταφορά των εκλύσεων του ιχθυοτροφείου ακόμα και όταν διπλασιάστηκε η δυναμικότητά τους. Η επιρροή των κλωβών ήταν εμφανής σε ό,τι αφορά παραμέτρους

που σχετίζονται με την παρουσία ιχθυοκαλλιεργειών, δηλαδή στην αμμωνία, τον διαλελυμένο φωσφόρο, τον διαλελυμένο οργανικό άνθρακα και το σωματιδιακό υλικό. Μικρότερες αλλαγές προβλέπονται από το μοντέλο αναφορικά με την βιομάζα του φυτοπλαγκτού, του ζωοπλαγκτού και την βιομάζα των βακτηρίων.

Η διάχυση του διαλελυμένου φωσφόρου (Εικ. 4.6) και της αμμωνίας από το ιχθυοτροφείο προς την κατεύθυνση του κύριου ρεύματος ήταν εμφανής στο αποτέλεσμα του μοντέλου σε όλες τις εποχές, με τις χαμηλότερες τιμές να εμφανίζονται των χειμώνα (Εικ. 4.6A) και πιο διακριτές αλλαγές το καλοκαίρι (Εικ. 4.6B) και του φθινοπωρινούς μήνες. Αυτό συνδυάζεται με υψηλότερες θερμοκρασίες στο νερό, θερμοστρωμάτωση των υδάτινων μαζών και το μέγιστο της βιομάζας ψαριών μέσα στους κλωβούς. Η μέση συγκέντρωση φωσφορικών ήταν παρόμοια και στα δύο σενάρια ($0.03\text{-}0.12\text{ mM m}^{-3}$), η σύγκριση μεταξύ των δύο έδειξε τις διαφορές και το πρότυπο διάχυσης των θρεπτικών από τους κλωβούς. Η βιομάζα των βακτηρίων δεν φάνηκε να επηρεάστηκε από την παρουσία των κλωβών και οι τιμές που προέβλεψε το μοντέλο είναι μεταξύ 7 και 10 mgC m^{-3} με μικρές εποχιακές μεταβολές.

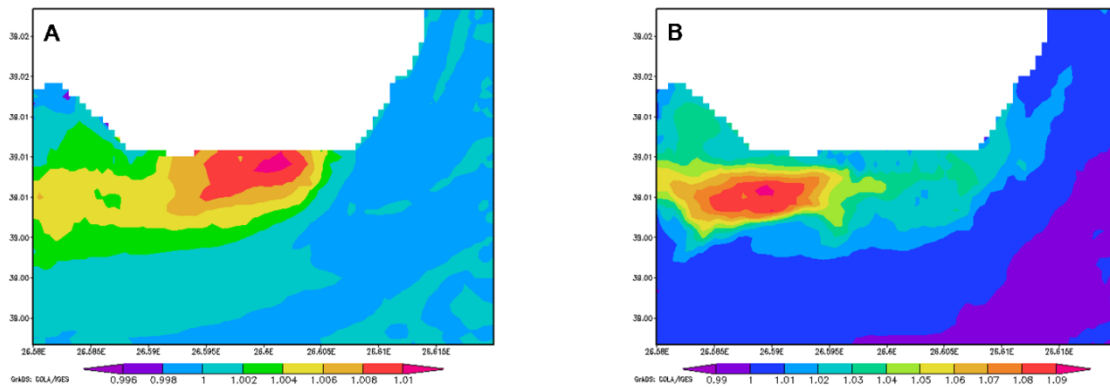


Εικόνα 4.6. Ισοκατανομή συγκέντρωσης διαλελυμένου φώσφορου (mM m^{-3}) στην Αγριλία. Προσομοίωση του σεναρίου (β) για τις περιόδους A: 1^η εβδομάδα Φεβρουαρίου (μέση εβδομαδιαία τιμή) και B: 1^η εβδομάδα του Ιουλίου (μέση εβδομαδιαία τιμή)

Η μέση τιμή της χλωροφύλλης στην περιοχή ήταν $0.04\text{-}0.45\text{ mg m}^{-3}$, οι υψηλότερες μέσες τιμές προβλέφθηκαν τον χειμώνα. Η διακύμανση της χλωροφύλλης ήταν παρόμοια

και στα δύο σενάρια όμως η σχετική διαφορά (λόγος) ήταν μεγαλύτερη την άνοιξη και το καλοκαίρι.

Η μέση βιομάζα του φυτοπλαγκτού κυμάνθηκε από 19-56 mgC m⁻³ συνυπολογίζοντας όλες τις αυτότροφες ομάδες. Την πιο σημαντική συνεισφορά στην βιομάζα του φυτοπλαγκτού φάνηκε να έχει το νανοφυτοπλαγκτόν (2-20 μm). Τα αποτελέσματα του μοντέλου έδειξαν τάση προς υψηλότερες μέσες τιμές στην βιομάζα του φυτοπλαγκτού τους θερινούς μήνες. Η διαφορά μεταξύ των σεναρίων ήταν μικρή, όμως φάνηκαν μικρές αλλαγές στην βιομάζα, με υψηλότερες τιμές προς την κατεύθυνση του ρεύματος τον χειμώνα (0.2-1%) (Εικ. 4.7A) και το καλοκαίρι (0.2-9%) (Εικ. 4.7B).



Εικόνα 4.7. Ισοκατανομή λόγου βιομάζας φυτοπλαγκτού (σενάριο β/ σενάριο α) στην Αγριλιά, Λέσβος για τις περιόδους A: 1^η εβδομάδα Φεβρουαρίου (μέση εβδομαδιαία τιμή) και B: 1^η εβδομάδα του Ιουλίου (μέση εβδομαδιαία τιμή)

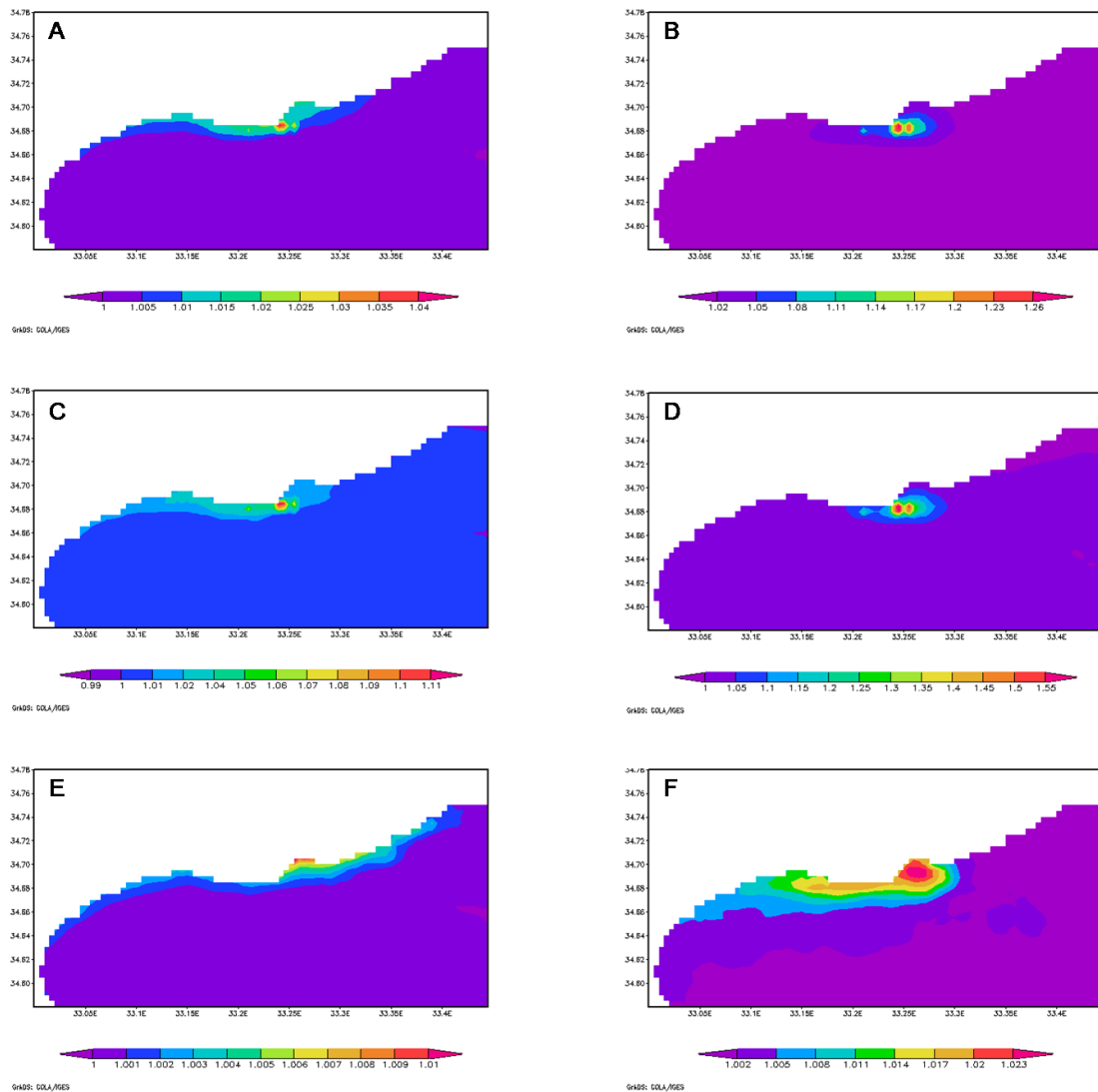
Οι λειτουργικές ομάδες των θηρευτών στο μοντέλο είχαν μέση ετήσια διακύμανση 13 με 25 mgC m⁻³, ενώ το μικροζωοπλαγκτόν (20-200μ) είχε την μεγαλύτερη συνεισφορά στην συνολική βιομάζα. Στο μεσοζωοπλαγκτόν δεν παρατηρήθηκαν διαφορές μεταξύ των σεναρίων σε καμία εποχή. Η πρόβλεψη του μοντέλου δείχνει ότι οι εκλύσεις του ιχθυοτροφείου ακολούθησαν κυρίως δύο κατευθύνσεις. Μια βορειοανατολικά όπου ομογενοποιούνται γρήγορα με το περιβάλλον και μια βορειοδυτικά όπου φαίνεται να συσσωρεύονται σε μια περιοχή σε απόσταση 5χλμ περίπου από το ιχθυοτροφείο. Διηθητικά αυτό θα μπορούσε να δημιουργήσει ένα σημείο όπου, παρά την μεγάλη του απόσταση από το ιχθυοτροφείο, οι επιπτώσεις θα είναι έντονες.

4.3.3.2 Σύγκριση στην Κύπρο μεταξύ των σεναρίων χωρίς ψάρια (α), υφιστάμενη κατάσταση (β) και διπλάσια παραγωγή (γ)

Στην Κύπρο, προκειμένου να υπάρχει συμβατότητα με το σύστημα πρόγνωσης CYCOFOS χρησιμοποιήθηκε πλέγμα μικρότερης διακριτότητας (500μ). Με αυτό το πλέγμα είναι πολύ πιθανόν να υποεκτιμήθηκαν οι επιπτώσεις των ιχθυοτροφείων, παρόλα αυτά η περιοχή παρουσίασε μια εικόνα πολύ διαφορετική από ότι η Λέσβος.

Στην Κύπρο ο διαλελυμένος φωσφόρος και η αμμωνία κυμάνθηκαν από 0.06 έως 0.14 mM m⁻³ και 0.2-1.2 mM m⁻³ αντίστοιχα εμφανίζοντας υψηλότερες μέσες τιμές κατά την θερμή περίοδο. Η σχετική αλλαγή των φωσφορικών μεταξύ των τριών σεναρίων ήταν από 0.05 έως 4% τον Φεβρουάριο (Εικ 4.8A) και από 2-26% τον Ιούλιο (Εικ. 4.8B). Οι αλλαγές στην αμμωνία ήταν πίο έντονες στην πρόγνωση του μοντέλου, με σχετική αύξηση 1-11% τον Φεβρουάριο (Εικ 4.8C) και 5-55% τον Ιούλιο (Εικ. 4.8D). Ο διπλασιασμός της δυναμικής των μονάδων (σενάριο γ) έδειξε ανάλογη απόκριση σε σχέση με το σενάριο β και για τις δύο παραμέτρους. Η μέση τιμή της βιομάζας των βακτηρίων κυμάνθηκε από 3.5 έως 7 mg C m⁻³. Τα ιχθυοτροφεία φάνηκε να επηρεάζουν την βιομάζα αυτή σε μικρό ποσοστό αφού αυξήθηκε ατην άμεσα εφραπτόμενη περιοχή κατά 0.5 έως 2% τους καλοκαιρινούς μήνες.

Η μέση τιμή χλωροφύλλης στην περιοχή κυμάνθηκε από 0.02 έως 0.4 mg C m⁻³. Οι σχετικές αλλαγές στην χλωροφύλλη ήταν μεταξύ 0.1 και 1% τον Φεβρουάριο (Εικ 4.8E) και 0.08 έως 2% τον Ιούλιο (Εικ 4.8F). Η βιομάζα του φυτοπλαγκτού στην ευρύτερη περιοχή κυμάνθηκε από 10-50 mg C m⁻³ με το ναοφυτοπλαγκτόν να έχει την μεγαλύτερη συνεισφορά σε αυτήν την βιομάζα. Ο λόγος αλλαγής για τα σενάριο β/α ήταν μεταξύ 0.2-12% την άνοιξη και 0.2-1% τον χειμώνα και το φθινόπωρο.



Εικόνα 4.8. Ισοκατανομή του λόγου του σεναρίου β/ σεναριο α στην Κύπρο. Πρόγνωση μοντέλου για A: Φωσφορικά- Φεβρουάριος, B: Φωσφορικά- Ιούλιος, C: Αμμωνία- Φεβρουάριος, D: Αμμωνία- Ιούλιος, E: Χλωροφύλλη- Φεβρουάριος, F: Χλωροφύλλη- Ιούλιος (μέσες μηνιαίες τιμές)

Η βιομάζα των θηρευτών κυμάνθηκε μεταξύ 5 και 20 mg C m^{-3} , με την υψηλότερη συνεισφορά σε αυτήν την βιομάζα από το μικροζωοπλαγκτόν, όμως, η κατανομή μεταξύ των ομάδων ήταν πίο ομοιόμορφη σε σχέση με το φυτοπλαγκτόν. Στους ετερότροφους οργανισμούς δεν παρατηρήθηκε σχεδόν καμία αλλαγή στην σχετική βιομάζα ούτε μεταξύ των σεναρίων ούτε μεταξύ των εποχών. Ο λόγος αλλαγής μεταξύ των σεναρίων

ήταν μεταξύ 0.2-0.5% στην ευρύτερη περιοχή με την μικρότερη σχετική αλλαγή τον χειμώνα. Ο διπλασιασμός της βιομάζας στους κλωβούς αύξησε την σχετική αλλαγή στο 2%.

Επιπλέον στην Κύπρο φαίνεται ότι, σε όλες τις εποχές σχεδόν, το σύνολο των επιρροών των ιχθυοτροφείων συγκεντρώνεται στον κόλπο του Βασιλικού που απέχει περίπου 2χλμ από το πλησιέστερο ιχθυοτροφείο ως αποτέλεσμα της μεταφοράς των θρεπτικών κατά μήκος της ακτής. Ενώ κοντά στις ιχθυοκαλλιέργειες το μοντέλο προβλέπει υψηλότερες συγκεντρώσεις θρεπτικών όσο αυξάνεται το τροφικό επίπεδο των οργανισμών οι αλλαγές φαίνεται να διαχέονται σε μεγαλύτερη απόσταση.

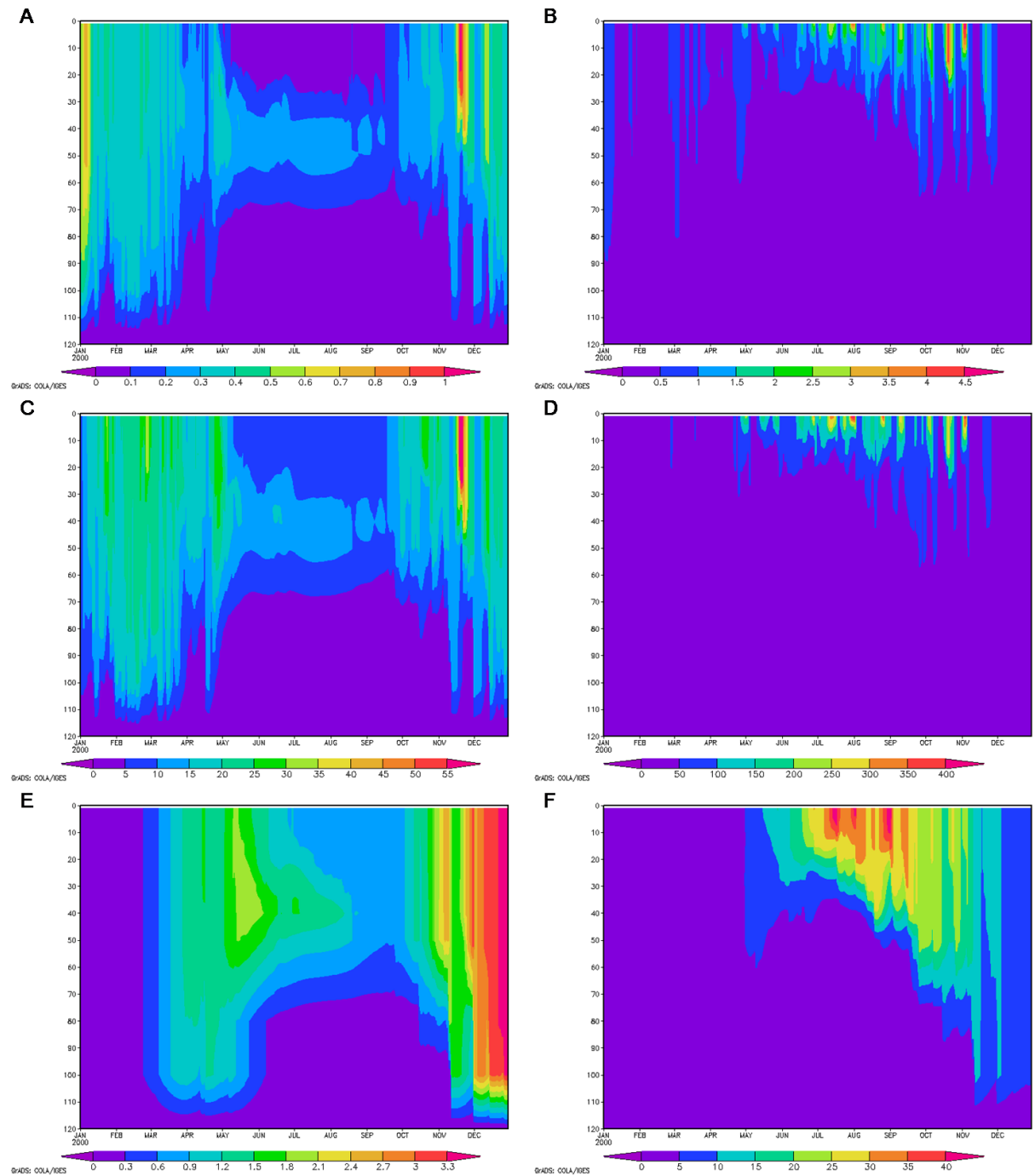
4.3.4 Ευαισθησία μοντέλου

Η περιοχή της Λέσβου ήταν πολύ εκτεθειμένη με δυνατά ρεύματα που οδηγούσαν στην γρήγορη διάχυση των εκροών από το ιχθυοτροφείο. Για να εξεταστεί αν η λειτουργία του μοντέλου ήταν επαρκής, πραγματοποιήθηκε έλεγχος ευαισθησίας στον οποίο η οριζόντια διάχυση απενεργοποιήθηκε. Αυτό βοήθησε να εντοπιστούν οι παράμετροι που παρουσιάζουν την μεγαλύτερη απόκριση στις πιθανές επιπτώσεις και τις αλλαγές που μπορούμε να περιμένουμε ως αποτέλεσμα της συνεχούς προσθήκης θρεπτικών στο σύστημα. Επίσης, είναι ενδεικτικό των αναμενόμενων αλλαγών σε άλλες περιοχές ιχθυοκαλλιεργειών, που χαρακτηρίζονται από προστατευμένες συνθήκες και περιορισμένη κυκλοφορία του νερού.

Σε αυτές τις συνθήκες το μοντέλο ανταποκρίθηκε στην προσθήκη των θρεπτικών, καταδεικνύοντας την δυνατότητα που έχει το ιχθυοτροφείο να επηρεάζει την εποχιακή κατανομή μιας σειράς παραμέτρων. Η κατανομή της χλωροφύλλης μεταβλήθηκε από τις αναμενόμενες υψηλότερες τιμές κατά την διάρκεια της περιόδου ανάμιξης την άνοιξη (Εικ. 4.9Α), και κάτω από το θερμοκλινές κατά την περίοδο στρωμάτωσης σε υψηλότερες τιμές την περίοδο στρωμάτωσης (καλοκαίρι) στα επιφανειακά στρώματα (Εικ 4.9Β).

Η αφθονία των βακτηρίων επίσης φαίνεται να επηρεάζεται καθώς παρουσία του ιχθυοτροφείου η βιομάζα τους αυξάνεται κοντά στους κλωβούς σε αντίθεση με την ομοιόμορφη κατανομή που παρουσιάζουν απουσία του ιχθυοτροφείου. Οι μικρότερες

ομάδες φυτοπλαγκτού (νανο- και πικο- φυτοπλαγκτόν) φαίνεται ότι μπορούν να ανταποκριθούν γρήγορα στην αυξημένη διάθεση θρεπτικών, ειδικά το καλοκαίρι (Εικ 4.9D) σε αντίθεση με την αναμενόμενη εποχιακή τους κατανομή απουσία του ιχθυοτροφείου (Εικ 4.9C). Οι μεγαλύτερες πλαγκτονικές ομάδες (διάτομα, δεινομαστιγωτά) έδειξαν μικρή απόκριση στο μοντέλο. Οι ετερότροφες ομάδες στο μοντέλο έχουν παρόμοια ανταπόκριση με τις αυτότροφες. Η βιομάζα του μικρο- και του μεσοζωοπλαγκτού αυξήθηκε κατά την διάρκεια της περιόδου ανάμιξης και στρωμάτωσης (Εικ 4.9F). Το μεσοζωοπλαγκτόν φαίνεται να αυξάνεται αρκετά σε σύγκριση με τις τιμές απουσία του ιχθυοτροφείου (Εικ 4.9E), γεγονός που μπορεί να υποδηλώνει την μετατόπιση προς την γραμμική τροφική αλυσίδα.



Εικόνα 4.9. Έλεγχος ευαισθησίας μοντέλου στο σημείο όπου εισάγονται τα θρεπτικά-Ισοκατανομή ετήσιας διακύμανσης για A: Χλωροφύλλη χωρίς εισροές (mg m^{-3}), B: Χλωροφύλλη με εισροές (mg m^{-3}), C: Νανο- & Πικοπλαγκτόν χωρίς εισροές (mgC m^{-3}), D: Νανο- & Πικοπλαγκτόν με εισροές (mgC m^{-3}), E: Μεσοζωοπλαγκτόν χωρίς εισροές (mgC m^{-3}), F: Μεσοζωοπλαγκτόν με εισροές (mgC m^{-3}). Στον άξονα y απεικονίζεται το βάθος

4.4 Συζήτηση

Για την αποτίμηση των επιπτώσεων των ιχθυοκαλλιεργειών ο Silvert (1992) εντοπίζει τρεις ζώνες επιρροής, την άμεσα εφαπτόμενη (μερικές εκατοντάδες μέτρα), την τοπική (περίπου 1 χλμ) και την ευρύτερη περιοχή (πάνω από 1 χλμ).

Στην άμεσα εφαπτόμενη ζώνη τα αποτελέσματα του μοντέλου και από τις δύο περιοχές δείχνουν αυξημένη συγκέντρωση φωσφορικών και αμμωνιακών ιόντων και ένα πρότυπο διάχυσης στην στήλη του νερού που φαίνεται πιο έντονα κατά τις περιόδους στρωμάτωσης το καλοκαίρι και το φθινόπωρο. Στο συμπέρασμα αυτό έχουν καταλήξει και οι Sara et al (2007a) που αναφέρουν ότι η αμμωνία είναι το θρεπτικό ιόν που επηρεάζεται περισσότερο από την παρουσία ιχθυοτροφείων και το ακολουθούν τα υπόλοιπα θρεπτικά ιόντα του αζώτου και τα φωσφορικά. Επιπλέον τα επίπεδα της χλωροφύλλης από τον έλεγχο ευαισθησίας του μοντέλου στην Λέσβο υποδεικνύουν δυνητική αλλαγή στην τροφική κατάσταση, όπως αυτή ορίζεται στην κλίμακα ευτροφισμού που προτείνει η Ignatiades (2005) για το Αιγαίο και βασίζεται σε συγκεντρώσεις χλωροφύλλης. Στην τοπική ζώνη εντοπίστηκαν πολύ μικρές αλλαγές από το μοντέλο ακόμα και όταν η παραγωγή διπλασιάστηκε. Παρόλα αυτά, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η αυξημένη διάθεση θρεπτικών μπορεί να οδηγήσει σε αλλαγές στην βιομάζα του πλαγκτού, ιδιαίτερα σε περιοχές με χαμηλή οριζόντια μεταφορά. Τα αποτελέσματα πεδίου στην περιοχή δείχνουν παρόμοια τάση καθώς η θήρευση έχει δείξει ότι παίζει σημαντικό ρόλο ως ρυθμιστικός παράγοντας στις φυτοπλαγκτονικές κοινότητες στην ευρύτερη περιοχή και στην μεταφορά του άνθρακα σε υψηλότερα τροφικά επίπεδα (Pitta et al 2009). Γενικότερα, η αυξημένη διάθεση θρεπτικών σε ολιγοτροφικές περιοχές μπορεί να ευνοήσει την επικράτηση της γραμμικής τροφικής αλυσίδας έναντι του μικροβιακού βρόχου (Thingstad, 1998; Agawin et al, 2004).

Οι περιοχές όπου είναι πιθανόν να βρεθούν επιπτώσεις των ιχθυοτροφείων εντοπίστηκαν στις προσομοιώσεις του μοντέλου. Οι τοπικές επιπτώσεις είναι φυσικά πολύ πιο δύσκολο να εντοπιστούν και να αποδοθούν στην λειτουργία του ιχθυοτροφείου. Σημαντικές επιπτώσεις σε τοπική κλίμακα δύνανται να απαντηθούν με μεγαλύτερη συχνότητα σε περιοχές όπου η ανταλλαγή υδάτων είναι μικρή, παράλληλα όμως έχει σημειωθεί ότι οι υδροδυναμικές συνθήκες και η πλευρική παράσυρση (lateral drifting) μπορούν να

διογκώσουν την περιοχή όπου ανιχνεύονται επιπτώσεις του ιχθυοτροφείου, ακόμα και σε εκτεθειμένες περιοχές (Sara, 2007a). Η σημασία της κυκλοφορίας ήταν εμφανής και στις δύο περιοχές και φαίνεται να αποτελεί τον κύριο μηχανισμό που αποσβάνει την επίπτωση των θρεπτικών στην στήλη του νερού ακόμα και όταν η παραγωγή του ιχθυοτροφείου αυξάνεται. Επιπλέον, οι Piedecausa et al (2010) σημειώνουν ότι η πληροφορία για τα χρονικά πρότυπα έκλυσης θρεπτικών από τα ιχθυοτροφεία, δίνει την δυνατότητα για καλύτερη περιβαλλοντική διαχείριση και μια πιο σαφή εικόνα των περιβαλλοντικών αλληλεπιδράσεων.

Ο εντοπισμός αλλαγών στη στήλη του νερού, ως αποτέλεσμα της λειτουργίας ιχθυοκαλλιέργειών, έχει αποδειχτεί προβληματικός σε εργασίες πεδίου (Pitta et al, 1999; Soto & Norambuena, 2004). Η χρήση του τρισδιάστατου μοντέλου για την αποτίμηση των επιπτώσεων αποδείχτηκε πολύ χρήσιμο εργαλείο για τον εντοπισμό αλλαγών που είναι δύσκολο να ανιχνευθούν στο πεδίο. Η υπολογιστική ισχύς που απαιτείται για να λειτουργήσει ένα τρισδιάστατο μοντέλο με υψηλή διακριτικότητα είναι ένας περιοριστικός παράγοντας, όπως επίσης περιοριστικός παράγοντας είναι η λεπτομερής γνώση των τοπικών παραμέτρων και των χαρακτηριστικών του ιχθυοτροφείου που απαιτούνται για την αξιολόγηση του μοντέλου. Όμως, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων έδειξαν ότι το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην χωροθέτηση, την μελέτη επιπτώσεων καθώς και στον σχεδιασμό δειγματοληψίας για τις ιχθυοκαλλιέργειες.

5 Προσαρμογή τροφικών σχέσεων του τρισδιάστατου βιογεωχημικού μοντέλου για την αποτίμηση των επιπτώσεων των ιχθυοκαλλιεργειών στην Ν. Λέσβο

5.1 Εισαγωγή

Ο στόχος του κεφαλαίου αυτού ήταν να βελτιωθεί η προσωμοίωση του μοντέλου αναφορικά με τις αλλαγές στην βιομάζα των πλαγκτονικών ομάδων και να προσαρμοστούν οι τροφικές σχέσεις στο μοντέλο ώστε να προσωμοιώνουν καλύτερα την σύσταση της κοινότητας που μετρήθηκε στο πεδίο.

Ο πίνακας τροφικών σχέσεων που εμπεριέχεται στο ΒΓΧ μοντέλο περιγράφει τις τροφικές σχέσεις μεταξύ των θηρευτών και του θηράματος. Η κατασκευή του πίνακα τροφικών σχέσεων θεωρείται ένας από του πίο συνοπτικούς αλλά και κοινά αποδεκτούς τρόπους να περιγραφούν οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των λειτουργικών ομάδων (Vichi, 2002). Οι τιμές στο τροφικό πλέγμα είναι αντιπροσωπευτικές του συστήματος που προσομοιώνει το μοντέλο και συχνά προσαρμόζονται ανάλογα με την εφαρμογή του σε διαφορετικές περιοχές (Vichi et al, 2004; Petihakis et al, 2009). Οι τιμές αναφέρονται στην σχετική διαθεσιμότητα ή την προτίμηση για κάθε πηγή τροφής που έχει ο θηρευτής (Blackford, 2004; Petihakis et al, 2009).

Η προσαρμογή των τροφικών σχέσεων συνεπάγεται ότι εκφράζει αλλαγές στην ποσότητα που καταναλώνει ο θηρευτής από την κάθε ομάδα. Οι θηρευτές στο μοντέλο απαρτίζονται από τρεις λειτουργικές ομάδες, τα ετερότροφα νανομαστιγωτά (Z6), το μικροζωοπλαγκτόν (Z5) και το μεσοζωοπλαγκτόν (Z4), όπως αυτές έχουν περιγραφεί και στο Κεφ. 3.

5.2 Υλικά και μέθοδοι

Η δομή του ΒΓΧ μοντέλου έχει περιγραφεί στο Κεφ. 4. Εκεί έχει παρατεθεί και ο πίνακας τροφικών σχέσεων όπως χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις που περιγράφονται στο κεφάλαιο αυτό, και επαναλαμβάνεται εδώ (Πιν. 5.1). Η δομή αυτή του τροφικού πλέγματος έχει προκύψει από το γενικό πίνακα τροφικών σχέσεων όπως περιγράφεται από τον Blackford (2004), για το οικολογικό μοντέλο. Οι προσαρμογές που

έγιναν θεωρήθηκε ότι ήταν αντιπροσωπευτικές του τροφικού πλέγματος στην Ανατολική Μεσόγειο, όπου το μεγαλύτερο ποσοστό θήρευσης προέρχεται από το ετερότροφο νανοπλαγκτόν και μικροπλαγκτόν (μικροβιακός βρόχος).

Πίνακας 5.1. Τροφικές προτιμήσεις των λειτουργικών ομάδων των θηρευτών στο ΒΓΧ μοντέλο. Τα Z4, Z5 & Z6 αντιστοιχούν στο μεσοζωπλαγκτόν, μικροζωοπλαγκτόν- και ετερότροφα νανομαστιγωτά και τα P1, P2, P3, P4 και B1 στα διάτομα, νανο- και πικο- φυτοπλαγκτόν, μικροφυτοπλαγκτόν και βακτήρια αντίστοιχα

Θηρευτές	Θήραμα							
	P1	P2	P3-	P4	Z4	Z5	Z6	B1
Z4	0.8		-	0.8	0.5	-	0.8	-
Z5	1	0.6	0.2	1	-	1	1	0.6
Z6	-	0.5	1	-	-	-	0.2	1

Έχοντας μετρήσει την σύσταση της βιοκοινότητας του πλαγκτού (Κεφ 2 & 3), ακολούθησε η προσαρμογή του τροφικού πίνακα του μοντέλου προκειμένου οι σχέσεις θηρευτή-θήραματος να αντιπροσωπεύουν την περιοχή μελέτης στην Λέσβο (Πιν. 5.2).

Πίνακας 5.2. Τροφικές προτιμήσεις των λειτουργικών ομάδων των θηρευτών στο ΒΓΧ μοντέλο, τροποποιημένες για την περιοχή μελέτης στην Λέσβο. Τα Z4, Z5 & Z6 αντιστοιχούν στο μεσοζωπλαγκτόν, μικροζωοπλαγκτόν- και ετερότροφα νανομαστιγωτά και τα P1, P2, P3, P4 και B1 στα διάτομα, νανο- και πικο- φυτοπλαγκτόν, μικροφυτοπλαγκτόν και βακτήρια αντίστοιχα

Θηρευτές	Θήραμα							
	P1	P2	P3	P4	Z4	Z5	Z6	B1
Z4	1	0.2	-	1	0.5	0.5	0.2	-
Z5	0.3	1	0.5	0.3	-	0.3	1	0.6
Z6	-	0.3	0.8	-	-	-	0.2	1

Στο τροποποιημένο τροφικό πλέγμα αυξάνεται η διαθεσιμότητα τροφής στο μεσοζωοπλαγκτόν (Z4), ενώ κύριος θηρευτής παραμένει η λειτουργική ομάδα του μικροζωοπλαγκτού. Η προσομοίωση του μοντέλου ήταν σε διακριτότητα 200μ, με μέσες τιμές ανά 10ήμερο, για το έτος που πραγματοποιήθηκαν οι εργασίες πεδίου (2008). Όλες οι τιμές για τις λειτουργικές ομάδες του πλαγκτού εκφράζονται σε mgC m^{-3} .

5.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης

5.3.1 Βιομάζα λειτουργικών ομάδων πλαγκτού

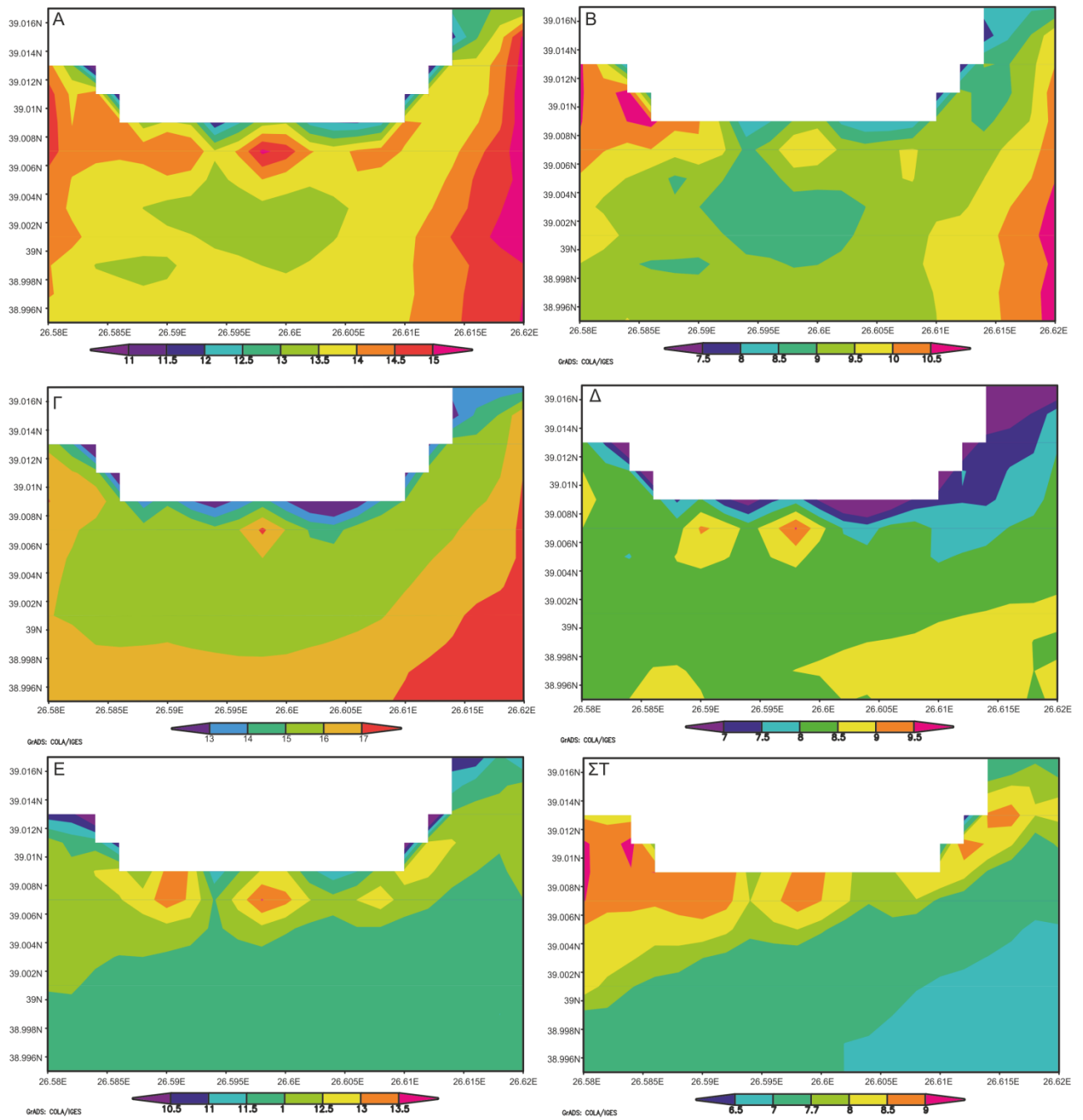
Η βιομάζα των λειτουργικών ομάδων του πλαγκτού, όπως προβλέφθηκε από το μοντέλο, παρατίθεται για τις χρονικές περιόδους που ήταν περισσότερο κοντά στην ημερομηνία

που πραγματοποιήθηκαν οι εργασίες πεδίου και ήταν, για τον Ιανουάριο το δεκαήμερο που ξεκινούσε την 21η Ιανουαρίου, για τον Απρίλιο το δεκαήμερο που ξεκινούσε την 11η Απριλίου και για τον Ιούλιο το δεκαήμερο που ξεκινούσε την 10η Ιουλίου.

5.3.1.1 *Βακτήρια και πικοφυτοπλαγκτόν*

Η μέση βιομάζα των βακτηρίων δεν φάνηκε να αλλάζει σε σχέση με την εποχή σύμφωνα με το εύρος τιμών που προέκυψαν από το μοντέλο. Η χαμηλότερη βιομάζα στην περιοχή των κλωβών φάνηκε τον Ιανουάριο ενώ η υψηλότερη τον Απρίλιο. Στην ευρύτερη περιοχή, η βιομάζα των βακτηρίων ήταν επίσης υψηλή τον Ιανουάριο σε μάζες νερού ανατολικά και δυτικά της περιοχής των ιχθυοκλωβών ενώ τον Απρίλιο η υψηλότερη βιομάζα εμφανίστηκε περισσότερο ανατολικά του ακρωτηρίου Αγριλιά. Η επιρροή των ιχθυοκλωβών ήταν πιο έντονη τον Ιούλιο καθώς η βιομάζα στην ευρύτερη περιοχή ήταν χαμηλότερη σε σχέση με τις άλλες εποχές. Κοντά στην ακτή φαίνεται ότι η βιομάζα κυμαινόταν σε χαμηλά επίπεδα σε όλες τις περιόδους που εξετάστηκαν. Η ζώνη επιρροής της μονάδας, αναφορικά με τα βακτήρια, ήταν μικρότερη τον Απρίλιο (<200μ) και μεγαλύτερη τον Ιούλιο (>400μ). Το πικοφυτοπλαγκτόν παρουσίασε παρόμοιο πρότυπο με τα βακτήρια, σύμφωνα με την πρόβλεψη του μοντέλου. Η μέση βιομάζα του στην περιοχή των κλωβών ήταν παρόμοια τον Ιανουάριο και τον Απρίλιο ενώ τον Ιούλιο ήταν πιο χαμηλή, αλλά πιο αυξημένη σε σχέση με την άμεσα εφαιπόμενη περιοχή. Τον Ιανουάριο, διακρίνονται στην Εικ. 5.1 μάζες νερού ανατολικά και δυτικά του ακρωτηρίου με υψηλή βιομάζα πικοφυτοπλαγκτού. Τον Ιούλιο, η πρόγνωση του μοντέλου έδειξε ότι η αυξημένη βιομάζα του πικοφυτοπλαγκτού εντοπίζεται κυρίως στην περιοχή των κλωβών. Η ζώνη επιρροής στην περιοχή της ιχθυοκαλλιέργειας ήταν μεγαλύτερη τον Απρίλιο και τον Ιούλιο ενώ φαίνεται πιο περιορισμένη τον Ιανουάριο.

Η διακύμανση της βιομάζας των βακτηρίων και του πικοφυτοπλαγκτού, όπως αυτή προβλέφθηκε από το μοντέλο για την χρονική περίοδο που αντιστοιχούσε στις εργασίες πεδίου, φαίνεται στην Εικόνα 5.1.

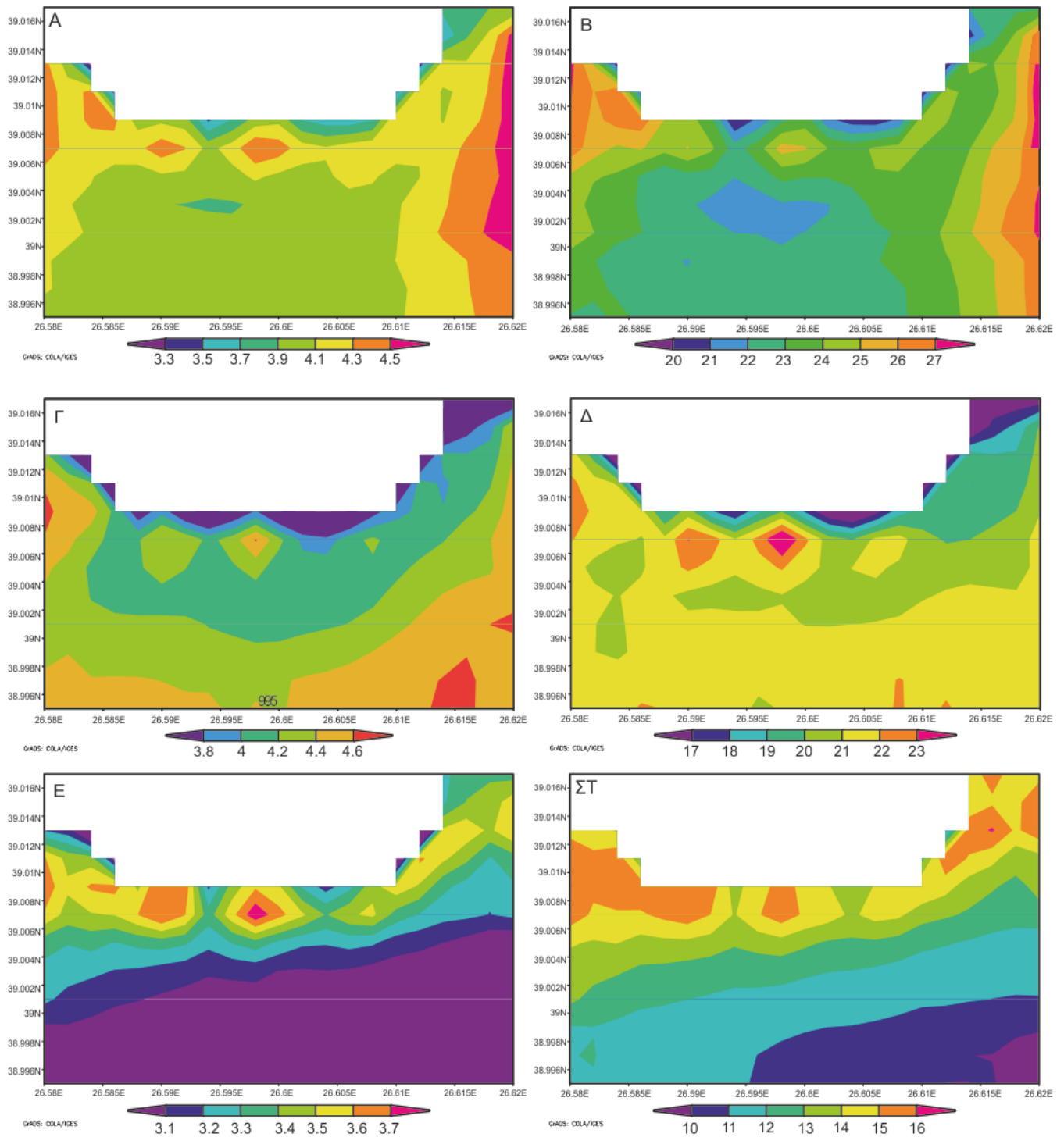


Εικόνα 5.1. Ισοκατανομή μέσης δεκαήμερης βιομάζας (mgC m^{-3}) στο επιφανειακό στρώμα στην περιοχή προσομοίωσης στην Λέσβο (Α: Βακτήρια- Ιανουάριος, Β: Πικοφυτοπλαγκτόν- Ιανουάριος, Γ: Βακτήρια- Απρίλιος, Δ: Πικοφυτοπλαγκτόν- Απρίλιος, Ε: Βακτήρια- Ιούλιος, ΣΤ: Πικοφυτοπλαγκτόν- Ιούλιος)

5.3.1.2 *Αυτότροφο και ετερότροφο νανοπλαγκτόν*

Το αυτότροφο νανοπλαγκτόν είχε την υψηλότερη βιομάζα τον Ιανουάριο και τον Απρίλιο και η πρόβλεψη για την βιομάζα του ήταν αρκετά υψηλή για όλες τις περιόδους που εξετάστηκαν. Τον Ιανουάριο, η επιρροή του ιχθυοτροφείου φάνηκε ότι ήταν περισσότερο περιορισμένη καθώς βιομάζα παρόμοια ή ακόμα και υψηλότερη από του ιχθυοτροφείου παρατηρείται σε μεγάλη απόσταση από αυτό, ανατολικά και δυτικά του ακρωτηρίου. Τον Απρίλιο, η υψηλότερη βιομάζα εμφανίστηκε κοντά στο ιχθυοτροφείο, χωρίς όμως η βιομάζα να αποκλίνει σημαντικά από την μέση βιομάζα της ευρύτερης περιοχής. Τον Ιούλιο, η κύρια επιρροή στην βιομάζα του αυτότροφου νανοπλαγκτού φαίνεται να προέρχεται από τους κλωβούς, ενώ οι υψηλότερες τιμές στην βιομάζα παρουσιάζονται κυρίως στην παράκτια περιοχή του ακρωτηρίου. Το ετερότροφο νανοπλαγκτόν παρουσιάζει ελαφρά διαφορετικό πρότυπο. Η μέση βιομάζα του ήταν πολύ χαμηλότερη σε σχέση με το αυτότροφο νανοπλαγκτόν. Οι κλωβοί αποτελούσαν την κύρια περιοχή επιρροής τον Ιούλιο, όπου όμως το εύρος τιμών στην βιομάζα ήταν μικρότερο. Τον Απρίλιο και τον Ιανουάριο εμφανίστηκε το ίδιο πρότυπο, με υψηλή βιομάζα ανατολικά και δυτικά του ακρωτηρίου, αν και πάλι φαίνεται ότι ανεξάρτητα από τις γύρω συνθήκες, υφίσταται μία ζώνη επιρροής λόγω της παρουσίας των ιχθυοκλωβών.

Η διακύμανση της βιομάζας των ετερότροφων και αυτότροφων νανομαστιγωτών, όπως αυτή προβλέφθηκε από το μοντέλο για την χρονική περίοδο που αντιστοιχούσε στις εργασίες πεδίου, φαίνεται στην Εικόνα 5.2.

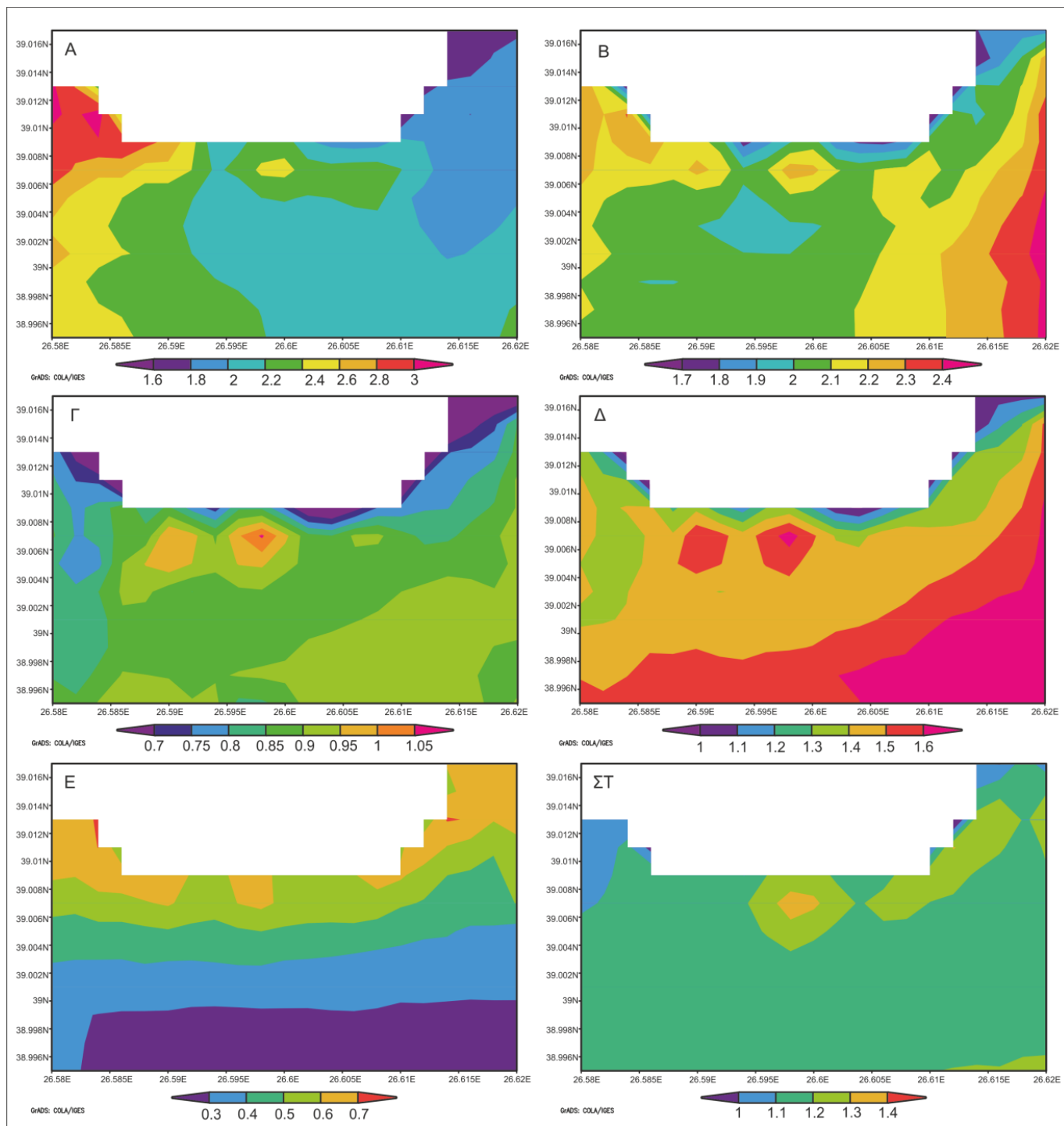


Εικόνα 5.2. Ισοκατανομή μέσης δεκαήμερης βιομάζας (mgC m^{-3}) στο επιφανειακό στρώμα στην περιοχή προσομοίωσης στην Λέσβο (Α: Ετερότροφα νανομαστιγωτά- Ιανουάριος, Β: Αυτότροφα νανομαστιγωτά- Ιανουάριος, Γ: Ετερότροφα νανομαστιγωτά - Απρίλιος, Δ: Αυτότροφα νανομαστιγωτά- Απρίλιος, Ε: Ετερότροφα νανομαστιγωτά- Ιούλιος, ΣΤ: Αυτότροφα νανομαστιγωτά- Ιούλιος)

5.3.1.3 *Διάτομα και αυτότροφα δινομαστιγωτά*

Η βιομάζα των διατόμων ήταν υψηλότερη των Ιανουάριο και χαμηλότερη τον Ιούλιο. Το πρότυπο του Ιανουαρίου ήταν διαφορετικό σε σχέση με τις μικρότερες λειτουργικές ομάδες καθώς η υψηλότερη βιομάζα των διατόμων εμφανίστηκε κυρίως δυτικά του ακρωτηρίου. Παράλληλα, εμφανής ήταν και η επιρροή των ιχθυοκλωβών την ίδια εποχή. Η επιρροή των ιχθυοκλωβών φαίνεται ότι ήταν μεγαλύτερη τον Απρίλιο, ενώ τον Ιούλιο το μοντέλο προέβλεψε πολύ μικρές αλλαγές σε σχέση με την βιομάζα των διατόμων. Η βιομάζα των δινομαστιγωτών ήταν μεγαλύτερη επίσης τον Ιανουάριο, η ζώνη κοντά στους κλωβούς παρουσίασε υψηλότερη βιομάζα αλλά ήταν εμφανείς και μάζες νερού, ανατολικά και δυτικά του ακρωτηρίου, με επίσης υψηλή βιομάζα. Τον Απρίλιο και τον Ιούλιο η βιομάζα ήταν υψηλότερη στην περιοχή των κλωβών αλλά οι τιμές κυμάνθηκαν στα ίδια επίπεδα τις δύο αυτές περιόδους. Τον Ιούλιο, η κύρια διαφοροποίηση ως προς την βιομάζα των αυτότροφων δινομαστιγωτών προέρχεται από την περιοχή του ιχθυοτροφείου.

Η διακύμανση της βιομάζας των διατόμων και των αυτότροφων δινομαστιγωτών, όπως αυτή προβλέφθηκε από το μοντέλο για την χρονική περίοδο που αντιστοιχούσε στις εργασίες πεδίου, φαίνεται στην Εικόνα 5.3.

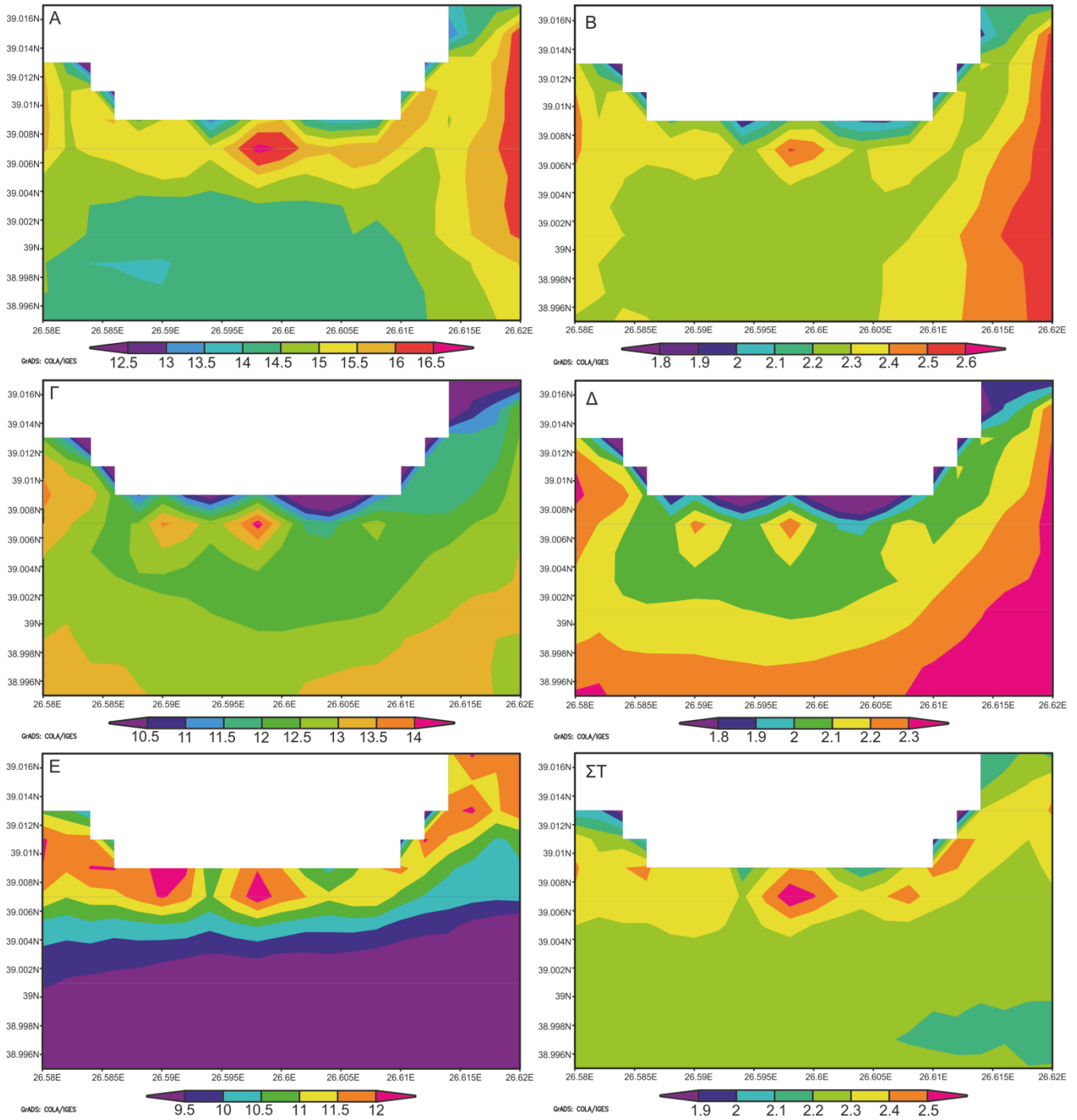


Εικόνα 5.3. Ισοκατανομή μέσης δεκαήμερης βιομάζας (mgC m^{-3}) στο επιφανειακό στρώμα στην περιοχή προσομοίωσης στην Λέσβο (Α: Διάτομα- Ιανουάριος, Β: Αυτότροφα Δινομαστιγωτά- Ιανουάριος, Γ: Διάτομα- Απρίλιος, Δ: Αυτότροφα Δινομαστιγωτά- Απρίλιος, Ε: Διάτομα- Ιούλιος, ΣΤ: Αυτότροφα Δινομαστιγωτά- Ιούλιος)

5.3.1.4 *Μικροζωοπλαγκτόν και μεσοζωοπλαγκτόν*

Η υψηλότερη βιομάζα μικροζωοπλαγκτού εμφανίστηκε τον Ιανουάριο και τον Απρίλιο. Η ζώνη επιρροής των κλωβών ήταν αρκετά εξαπλωμένη και μόνο τον Ιανουάριο παρουσιάστηκαν εξίσου υψηλές βιομάζες στην περιοχή ανατολικά και δυτικά των κλωβών. Τον Ιούλιο, ενώ η μέση βιομάζα ήταν χαμηλότερη από τις άλλες περιόδους φαίνεται και σε αυτήν την λειτουργική ομάδα ότι οι περισσότερες αλλαγές στην βιομάζα εντοπίζονται στην περιοχή κοντά στους κλωβούς σε συνδυασμό με την παρουσία ζωνών υψηλής βιομάζας παράκτια του ακρωτηρίου Αγριλιάς. Το μεσοζωοπλαγκτόν εμφάνισε διαφορετικό πρότυπο. Η μέση βιομάζα του δεν διαφοροποιήθηκε πολύ ανάμεσα στις εποχές όμως η υψηλότερη βιομάζα κοντά στους κλωβούς, σύμφωνα με τον μοντέλο, εμφανίστηκε τον Ιούλιο. Τον Ιανουάριο και τον Απρίλιο η βιομάζα του μεσοζωοπλαγκτού είναι υψηλότερη και στην ευρύτερη περιοχή, κυρίως ανατολικά και δυτικά του ιχθυοτροφείου.

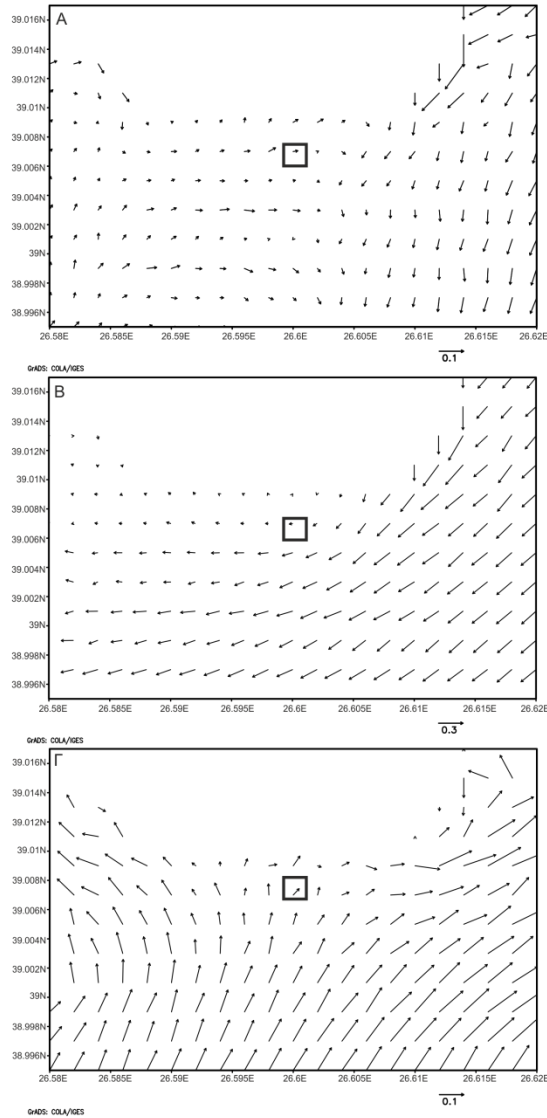
Η διακύμανση της βιομάζας του μικροζωοπλαγκτού και του μεσοζωοπλαγκτού, όπως αυτή προβλέφθηκε από το μοντέλο για την χρονική περίοδο που αντιστοιχούσε στις εργασίες πεδίου, φαίνεται στην Εικόνα 5.4.



Εικόνα 5.4. Ισοκατανομή μέσης δεκαήμερης βιομάζας (mgC m^{-3}) στο επιφανειακό στρώμα στην περιοχή προσομοίωσης στην Λέσβο (Α: Μικροζωοπλαγκτόν- Ιανουάριος, Β: Μεσοζωοπλαγκτόν- Ιανουάριος, Γ: Μικροζωοπλαγκτόν- Απρίλιος, Δ: Μεσοζωοπλαγκτόν- Απρίλιος, Ε: Μικροζωοπλαγκτόν- Ιούλιος, ΣΤ: Μεσοζωοπλαγκτόν- Ιούλιος)

5.3.2 Ταχύτητα και διεύθυνση ρεύματος στην περιοχή εφαρμογής του μοντέλου

Η ταχύτητα και η διεύθυνση του ρεύματος παρέχουν σημαντική πληροφορία για την προέλευση των μαζών νερού στην περιοχή όπου λειτουργεί η ιχθυοκαλλιέργεια καθώς και πληροφορία για την εποχιακή διακύμανση της κύριας κατεύθυνση του ρεύματος. Πρέπει να σημειωθεί ότι η μέση μηνιαία ταχύτητα και διεύθυνση του ρεύματος δεν ανταποκρίνονται απαραίτητα στις συνθήκες που μετρήθηκαν στο πεδίο τις ημέρες δειγματοληψίας καθώς η ημερήσια διακύμανση εξαρτάται σημαντικά και από τους ανέμους που πνέουν. Τον Ιανουάριο η μέση μηνιαία ταχύτητα φάνηκε ότι ήταν χαμηλότερη από την μέση ταχύτητα τον Απρίλιο και τον Ιούλιο, ενώ η κύρια διεύθυνση του ρεύματος φαίνεται να ήταν από τον βορρά τον Απρίλιο και από τον νότο τον Ιούλιο. Η πρόγνωση του μοντέλου για την μέση μηνιαία ταχύτητα και διεύθυνση του ρεύματος φαίνεται στην Εικόνα 5.5.



Εικόνα 5.5. Μέση μηνιαία ταχύτητα και διεύθυνση ρεύματος στο επιφανειακό στρώμα στην Λέσβο τον Ιανουάριο (Α), Απρίλιο (Β) και Ιούλιο (Γ). Η θέση των κλωβών απεικονίζεται με τετράγωνο και το διάνυσμα της ταχύτητα απεικονίζεται κάτω από κάθε εικόνα σε $m s^{-1}$

5.3.3 Σύγκριση εποχιακών αποτελεσμάτων πεδίου με προγνώσεις του ΒΓΧ μοντέλου

Οι μέσες δεκαήμερες προγνώσεις του ΒΓΧ μοντέλου συγκρίθηκαν με τα διαθέσιμα αποτελέσματα από το πεδίο προκειμένου να διαπιστωθεί αν το εύρος τιμών που προέβλεψε το μοντέλο αποκλίνει και κατά πόσο από τις τιμές που μετρήθηκαν στο πεδίο. Η σύγκριση αυτή έγινε για κάποιες κύριες βιοχημικές παραμέτρους (χλωροφύλλη και

φωσφορικά) καθώς και για βιολογικές παραμέτρους με τις αντίστοιχες λειτουργικές ομάδες. Η σύγκριση παρατίθεται στον Πίνακα 5.3.

Πίνακας 5.3. Σύγκριση προγνώσεων μοντέλου (εύρος τιμών στην περιοχή προσομοίωσης) και αποτελεσμάτων πεδίου (μέση τιμή όλων των σταθμών) για επιλεγμένες αβιοτικές και βιοτικές παραμέτρους. Η πρόγνωση του μοντέλου αφορά την μέση δεκαήμερη τιμή για την χρονική περίοδο που αντιστοιχεί στις εργασίες πεδίου

Εποχή	Παράμετρος	Πρόγνωση μοντέλου	Μέση τιμή πεδίου
Ιανουάριος	Chl mg m ⁻³	0.24-0.38	0.25
Απρίλιος	Chl mg m ⁻³	0.04-0.08	0.14
Ιούλιος	Chl mg m ⁻³	0.05-0.07	0.1
Ιανουάριος	PO ₄ mM m ⁻³	0.05-0.1	0.07
Απρίλιος	PO ₄ mM m ⁻³	0.05-0.16	0.14
Ιούλιος	PO ₄ mM m ⁻³	0.07-0.36	0.13
Ιανουάριος	Βακτ. mgC m ⁻³	11.1-15	11.509
Απρίλιος	Βακτ. mgC m ⁻³	11.1-17	22.115
Ιούλιος	Βακτ. mgC m ⁻³	9-13.5	15.648
Ιανουάριος	Διάτομα mgC m ⁻³	1.6-3	0.06
Απρίλιος	Διάτομα mgC m ⁻³	0.55-1.05	19.79
Ιούλιος	Διάτομα mgC m ⁻³	0.25-0.7	0.98
Ιανουάριος	Μικροζ. mgC m ⁻³	11.5-16.5	0.6
Απρίλιος	Μικροζ. mgC m ⁻³	9.1-14	3.3
Ιούλιος	Μικροζ. mgC m ⁻³	8.5-12	0.92
Ιανουάριος	Μεσοζ. mgC m ⁻³	1.8-2.6	3.56
Απρίλιος	Μεσοζ. mgC m ⁻³	1.5-2.3	0.65
Ιούλιος	Μεσοζ. mgC m ⁻³	1.7-2.5	1.4

Η πρόγνωση του μοντέλου για τις τιμές της χλωροφύλλης ήταν πολύ κοντά στην μέση τιμή των μετρήσεων πεδίου και φάνηκε ότι το μοντέλο έχει την τάση να υποεκτιμά την συγκέντρωση της χλωροφύλλης τον Απρίλιο και τον Ιανουάριο. Η μέση τιμή των φωσφορικών ήταν εντός του εύρους τιμών που προέβλεψε το μοντέλο για όλες τις περιόδους δειγματοληψίας. Η βιομάζα των βακτηρίων των μετρήσεων πεδίου ήταν εντός του εύρους τιμών που προέβλεψε το μοντέλο τον Ιανουάριο ενώ τον Απρίλιο και τον Ιούλιο, το μοντέλο φαίνεται να υποεκτιμά αυτήν την παράμετρο αν και οι τιμές παραμένουν κοντά. Στα διάτομα, τον Ιανουάριο και τον Ιούλιο, οι τιμές πεδίου ήταν κοντά στην πρόγνωση του μοντέλου αλλά τον Απρίλιο η βιομάζα των διατόμων στο

πεδίο είναι μια τάξη μεγέθους υψηλότερη από αυτήν που προβλέπει το μοντέλο. Στην ομάδα του μικροζωοπλαγκτού, το μοντέλο φαίνεται ότι υπερεκτιμά αρκετά την βιομάζα σε όλες τις περιόδους δειγματοληψίας. Για το μεσοζωοπλαγκτόν, οι τιμές πεδίου ήταν κοντά στο εύρος τιμών του μοντέλου.

5.3.4 Συσχετίσεις μεταξύ λειτουργικών ομάδων

Από τα δεδομένα του πεδίου (Κεφ. 2 και 3), φάνηκε ότι στην περιοχή της ιχθυοκαλλιέργειας υπάρχουν αλλαγές στην δομή του τροφικού πλέγματος την περίοδο του Απριλίου και του Ιουλίου. Το ΒΓΧ μοντέλο, εφόσον διαπιστώθηκε ότι λειτουργεί ικανοποιητικά, μπορεί να παρέχει αντίστοιχες πληροφορίες και ενδείξεις για την λειτουργία του συστήματος μιας και ο όγκος δεδομένων που προκύπτει είναι μεγάλος. Σε αυτήν την περίπτωση, στόχος ήταν να εξεταστεί αν οι τροφικές σχέσεις μεταξύ των λειτουργικών ομάδων αλλάζουν ως αποτέλεσμα της αυξημένης διάθεσης θρεπτικών από τους κλωβούς. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε η μέση δεκαήμερη βιομάζα όλων των λειτουργικών ομάδων (8 στο σύνολο) καθώς και η συσχέτιση αυτών με τα φωσφορικά για έναν ετήσιο κύκλο (σύνολο 36 σημεία) στο επιφανειακό στρώμα στην περιοχή των κλωβών (όπως ορίζεται από τα στίγματα 39.004 °N-39.006 °N & 26.598 °E-26.602 °E) και συγκρίθηκε με τις ίδιες παραμέτρους σε μια περιοχή απομακρυσμένη από την επιρροή των κλωβών (όπως ορίζεται από τα στίγματα 38.996 °N-39.998 °N & 26.585 °E-26.59 °E).

Με το μη παραμετρικό τεστ Spearman, εξετάστηκε ποιές παράμετροι και ομάδες συσχετίζονται σημαντικά μεταξύ τους στους κλωβούς και στην περιοχή αναφοράς. Στην περιοχή αναφοράς, τα φωσφορικά συσχετίστηκαν σημαντικά ($p < 0.01$) με τα βακτήρια και με το μεσοζωοπλαγκτόν, με συντελεστή -0.6 και 0.5 αντίστοιχα. Στην περιοχή των κλωβών, τα φωσφορικά συσχετίστηκαν σημαντικά με όλες τις λειτουργικές ομάδες πλαγκτού εκτός από το πικοφυτοπλαγκτόν και τα αυτότροφα δινωμαστιγωτά. Η συσχέτιση με τις άλλες λειτουργικές ομάδες ήταν σημαντική σε επίπεδο $p < 0.01$ ενώ για τα διάτομα ήταν σημαντική σε επίπεδο $p < 0.05$.

Η συσχέτιση των ετερότροφων λειτουργικών ομάδων με το θήραμά τους παρουσίασε αρκετές αλλαγές ανάμεσα στις επιλεγμένες περιοχές και φαίνεται στον Πίνακα 5.4. Ο συντελεστής συσχέτισης φάνηκε να αυξάνεται στην περιοχή του ιχθυοτροφείου.

Πίνακας 5.4. Συσχέτιση (Spearman Correlation) και επίπεδο σημαντικότητας μεταξύ των λειτουργικών ομάδων θηρευτών και όλων των πλαγκτονικών λειτουργικών ομάδων στο ΒΓΧ μοντέλο στην περιοχή αναφοράς (ΠΑ) και την περιοχή του ιχθυοτροφείου (ΠΙ). (όπου: βακτήρια= Β, διάτομα= Δ, νανοφυτοπλαγκτόν= ΝΦ, πικοφυτοπλαγκτόν= ΠΦ, αυτότροφα δινομαστιγωτά= ΑΔ, μεσοζωοπλαγκτόν= ΜΖ, μικροζωοπλαγκτόν= ΜιΖ και ετερότροφο νανοπλαγκτόν= ΕΝ) (*= $p < 0.05$, **= $p < 0.01$, ***= $p < 0.001$)

Λειτουργική ομάδα		ΜΖ		ΜιΖ		ΕΝ	
		ΠΑ	ΠΙ	ΠΑ	ΠΙ	ΠΑ	ΠΙ
Β	Συντ. συσχέτισης	-0.57	-0.47	0.46	0.63	0.57	0.68
	Επίπεδο σημ.	***	***	***	***	***	***
Δ	Συντ. συσχέτισης	-0.35		0.74	0.84	0.67	0.82
	Επίπεδο σημ.	*		***	***	***	***
ΝΦ	Συντ. συσχέτισης			0.64	0.70	0.73	0.77
	Επίπεδο σημ.			***	***	***	***
ΠΦ	Συντ. συσχέτισης						0.40
	Επίπεδο σημ.						*
ΑΔ	Συντ. συσχέτισης			0.35	0.37	0.55	0.53
	Επίπεδο σημ.			*	*	***	***
ΜιΖ	Συντ. συσχέτισης					0.85	0.88
	Επίπεδο σημ.					***	***
ΕΝ	Συντ. συσχέτισης			0.85	0.88		
	Επίπεδο σημ.			***	***		

5.4 Συζήτηση

Η αλλαγή στις τροφικές σχέσεις φάνηκε ότι βελτίωσε σημαντικά την λειτουργία του ΒΓΧ μοντέλου στην περιοχή μελέτης, ως προς την προσομοίωση των συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή των κλωβών. Με την εφαρμογή του τροφικού πλέγματος που παρουσιάζεται στο Κεφ. 4, οι αλλαγές που προέβλεψε το μοντέλο στην περιοχή των κλωβών ήταν μικρές. Η προσαρμογή των τροφικών σχέσεων συνέβαλε σημαντικά στην καλύτερη αποτύπωση του συστήματος, όπως αυτή μετρήθηκε και στις εργασίες πεδίου.

Τα θρεπτικά που εκλύονται από την ιχθυοκαλλιέργεια φαίνεται, σύμφωνα με την πρόβλεψη του μοντέλου, ότι επηρεάζουν την περιοχή γύρω από τους κλωβούς, σε διαφορετικό βαθμό κατά την διάρκεια του έτους. Συνολικά όμως, όπως φάνηκε από την συσχέτιση των λειτουργικών ομάδων, στην περιοχή των κλωβών οι τροφικές σχέσεις

αλλάζουν και υπάρχει τάση μεγαλύτερης (θετικής) εξάρτησης μεταξύ των ομάδων. Οι διαφορές στην βιομάζα των ομάδων του πλαγκτού ήταν πίο έντονες στην περιοχή της ιχθυοκαλλιέργειας τους πίο θερμούς μήνες. Κατά του θερμούς μήνες φάνηκε επίσης ότι η παρουσία των κλωβών αποτελεί την κύρια εισροή θρεπτικών στο σύστημα και οι αλλαγές στο τροφικό πλέγμα παρατηρούνται κυρίως γύρω από αυτούς. Έτσι, τον Ιούλιο, οι μέγιστες τιμές στην βιομάζα προβλέπονται από το μοντέλο στην περιοχή των κλωβών ενώ τον Ιανουάριο και τον Απρίλιο, οι τιμές στους κλωβούς είναι μεν υψηλές αλλά και στην ευρύτερη περιοχή επικρατούν συνθήκες που επίσης φάνηκε ότι συνέβαλαν στην αύξηση της βιομάζας των πλαγκτονικών ομάδων. Στις προσομοιώσεις, εντοπίστηκαν περιοχές, ιδιαίτερα ανατολικά του ακρωτηρίου Αγριλιά, που εμφάνιζαν υψηλή βιομάζα στις πλαγκτονικές ομάδες. Η κυκλοφορία της περιοχής συσχετίζεται άμεσα με την αυξημένη βιομάζα σε εκείνες τις περιοχές, καθώς το μέσο ρεύμα στην περιοχή είναι από ανατολικά ή βορειοανατολικά, ως αποτέλεσμα της πορείας των υδάτινων μαζών για να παρακάμψουν το νησί της Λέσβου (Ζερβάκης και συν. 2008). Αν και η κυκλοφορία στα στενά της Λέσβου δεν έχει μελετηθεί εκτενώς, είναι γνωστό ότι οι υδάτινες μάζες του βορείου Αιγαίου παρουσιάζουν υψηλότερα επίπεδα πρωτογενούς παραγωγής (Ignatiades et al, 2002) και εμπλουτίζονται συστηματικά από αναβλύσεις υδάτινων μαζών, πλούσιων σε θρεπτικά αλλά και από εισροές ποταμών (Siokou et al, 2010).

Η ζώνη επιρροής γύρω από τους κλωβούς φαίνεται από το μοντέλο να επεκτείνεται περίπου 200-400μ προς την κατεύθυνση του κύριου ρεύματος. Παρόμοια αποτελέσματα από την εφαρμογή διαφορετικού μοντέλου, σε άλλη περιοχή, παρουσιάζουν και οι Cromeu & Black (2005). Παράλληλα και σε εργασίες πεδίου (Dalsgaard & Krause-Jensen, 2006; Pitta et al, 2009) και στην παρούσα μελέτη, φαίνεται ότι η ζώνη επιρροής των κλωβών κυμαίνεται σε απόσταση μέχρι και 500μ από αυτούς. Η ζώνη αυτή ήταν εμφανής σε όλες τις χρονικές περιόδους που εξετάστηκαν μέσω του μοντέλου, υποδηλώνοντας ότι η επιρροή των κλωβών στην βιοκοινότητα γύρω από αυτούς είναι δυνητικά συνεχής. Έχει δείχτει σε άλλα συστήματα, ότι τα θρεπτικά, όταν προστίθενται στο περιβάλλον επαναλαμβάνόμενα και σε τακτά χρονικά διαστήματα, μεταφέρονται σε υψηλότερα τροφικά επίπεδα πίο αποτελεσματικά από ό,τι όταν παρέχονται συνεχώς ή σποραδικά (Weber & Brown, 2013), αλλά και ότι, με τον τρόπο αυτό, ευνοούνται συνθήκες γρήγορης συσσώρευσης βιομάζας (Svensen et al, 2002). Η πρόγνωση του

μοντέλου για την αυξημένη βιομάζα πλαγκτονικών ομάδων κοντά στους κλωβούς είναι αναμενόμενη στο πεδίο, όπως φαίνεται από τα ευρήματα των παραπάνω μελετών αλλά και από τα αποτελέσματα πεδίου στην παρούσα μελέτη. Παράλληλα, οι προγνώσεις του μοντέλου βοηθούν να εντοπιστούν άλλες, πιο απομακρυσμένες περιοχές, που δυνητικά επίσης επηρεάζονται λόγω της υδροδυναμικής της περιοχής όπως φάνηκε και στο Κεφ.4.

Οι ομάδες που παρουσίασαν την μεγαλύτερη απόκλιση από τις τιμές πεδίου ήταν το μικροζωοπλαγκτόν και το νανοφυτοπλαγκτόν, η βιομάζα τους κυμάνθηκε σε υψηλά επίπεδα σε σχέση με τις μετρήσεις πεδίου. Οι λόγοι στους οποίους μπορεί να οφείλεται αυτό είναι, αφενός το γεγονός ότι το μοντέλο υποεκτιμά το μεσοζωοπλαγκτόν, επομένως και την θήρευση που εξασκεί και αφετέρου ότι το μικροζωοπλαγκτόν ενδεχομένως δεν θηρευόταν αρκετά από άλλες λειτουργικές ομάδες. Από την άλλη, ήταν πολύ ενδιαφέρον ότι χωρίς να γίνει παρέμβαση στις αρχικές τιμές του μοντέλου, πολλές παράμετροι ήταν πολύ κοντά στις τιμές που μετρήθηκαν στο πεδίο, και η τάση που ακολούθησαν όλες οι βιολογικές παράμετροι ακολούθησαν την τάση που μετρήθηκε στο πεδίο.

Με τις αλλαγές στο τροφικό πλέγμα λαμβάνοντας υπόψη τις μετρήσεις πεδίου, η βιοκοινότητες στο μοντέλο φάνηκε να εξελίσσονται στον χρόνο με τρόπο που ήταν πιο κοντά στις συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή. Το γεγονός ότι το ΒΓΧ μοντέλο προέβλεψε αποκρίσεις στην αυξημένη διάθεση θρεπτικών που ήταν παρόμοιες με αυτές που μετρήθηκαν στο πεδίο μπορεί να φανεί χρήσιμο και σε επίπεδο διαχείρισης.

Σε διαχειριστικό επίπεδο, για τις ιχθυοκαλλιέργειες, είναι γνωστό πως ζητούμενο είναι να εφαρμόζονται μοντέλα που να μπορούν να προβλέψουν ποιές είναι οι αλλαγές στην γύρω περιοχή ως αποτέλεσμα της προσθήκης θρεπτικών και σε τι έκταση επεκτείνονται (Silvert, 1992). Η χρήση των μοντέλων ως διαχειριστικό εργαλείο δεν έχει στόχο να αντικαταστήσει την περιβαλλοντική παρακολούθηση στις ιχθυοκαλλιέργειες αλλά να συνεπικουρήσει ώστε η παρακολούθηση αυτή να γίνεται πιο σωστά. Οι πληροφορίες που προκύπτουν από ένα τρισδιάστατο ΒΓΧ μοντέλο που εφαρμόζεται σε περιοχή ιχθυοκαλλιεργειών μπορούν, σε συνδυασμό με πληροφορίες από το πεδίο, να συνθέσουν μια πλήρη εικόνα των αλλαγών που αναμένονται στην περιοχή εφαρμογής. Παράλληλα, και ίσως πιο σημαντικά, με δεδομένο ότι το μοντέλο λειτουργεί και περιγράφει καλά την

υφιστάμενη κατάσταση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για πρόγνωση, σε περίπτωση που οι συνθήκες αλλάζουν είτε σε σχέση με την μονάδα (π.χ. αύξηση παραγωγής), είτε σε σχέση με άλλους παράγοντες (π.χ. άνοδος θερμοκρασίας θάλασσας).

Ως προς την επιστημονική πληροφορία που προέκυψε, η καλή λειτουργία του μοντέλου δίνει την δυνατότητα να εντοπιστούν π.χ. οι κύριοι παράγοντες στους οποίους οφείλονται οι διαφορές που προβλέπει το μοντέλο και να γίνει επιλογή των σταθμών δειγματοληψίας, με βάση τις αποστάσεις και θέσεις όπου φαίνονται οι αλλαγές. Κυρίως όμως, η χρήση των μοντέλων βασίζεται στην απάντηση ερωτημάτων για την περιοχή που μοντελοποιείται, συνεπώς η διαπίστωση προβλημάτων και η βελτίωση της απόδοσης ενός μοντέλου για μια περιοχή παρέχει την δυνατότητα να τεθούν και να προταθούν απαντήσεις σε νέα ερωτήματα. Η εξέλιξη των μοντέλων ολόκληρου του οικοσυστήματος (end to end) που χρησιμοποιείται τα τελευταία χρόνια για την ολοκληρωμένη διαχείριση του οικοσυστήματος, απαιτεί τα επιμέρους στοιχεία των μοντέλων να λειτουργούν με τον βέλτιστο δυνατό τρόπο (Rose et al, 2010). Αντίστοιχα, η βελτίωση της λειτουργίας του τρισδιάστατου βιογεωχημικού μοντέλου, ώστε να αποτυπώνονται καλύτερα οι επιπτώσεις των ιχθυοκαλλιεργειών στην στήλη του νερού σε εκτεθειμένες περιοχές, συμβάλλει και στην ενσωμάτωση του τομέα αυτού σε μοντέλα για την ολοκληρωμένη διαχείριση του οικοσυστήματος. Η προσέγγιση αυτή αποτελεί προτεραιότητα στις μελλοντικές εργασίες, σε σχέση με την ανάπτυξη και εξέλιξη των υδατοκαλλιεργειών (SCAR- Fish, 2013).

6 Γενική συζήτηση

Η ιχθυοκαλλιέργεια έχει συμπεριληφθεί στην διαχείριση της παράκτιας ζώνης, σε οδηγίες για την ποιότητα των νερών και φυσικά η οικονομική της ανάπτυξη προμηνύει την παραμονή και εξάπλωσή της στο θαλάσσιο σύστημα. Μάλιστα, η χρήση των ιχθυοκαλλιεργειών θεωρείται κομμάτι της ορθολογικής διαχείρισης θαλάσσιων πόρων (Subasinghe et al, 2011). Λαμβάνοντας υπόψη ότι το 2012 οι υδατοκαλλιέργειες ήδη παρείχαν το 50% των εδώδιμων θαλασσινών προς ανθρώπινη κατανάλωση (Klinger et al, 2012), είναι απαραίτητο να γίνει περισσότερο κατανοητή η επίδρασή τους στην στήλη του νερού. Αν και οι εισροές θρεπτικών από τις ιχθυοκαλλιέργειες αποτελούν σήμερα ένα μηδαμινό κομμάτι των εισροών σε σχέση με άλλες πηγές στην Μεσογειακή λεκάνη (Karakassis et al, 2005), σε τοπικό επίπεδο οι ποσότητες μπορεί να είναι σημαντικές.

Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης έδειξαν ότι η επίδραση των θρεπτικών από τις ιχθυοκαλλιέργειες στην στήλη είναι σημαντική και επηρεάζει τους οργανισμούς από όλες τις τάξεις μεγέθους, με διαφορετικούς τρόπους. Επίσης, φάνηκε ότι οι διαφοροποιήσεις λαμβάνουν χώρα προς την κατεύθυνση του ρεύματος, οπότε είναι σημαντικό η κατεύθυνση αυτή να είναι γνωστή με ακρίβεια. Η ζώνη επιρροής του ιχθυοτροφείου δεν είναι απαραίτητα μερικά μέτρα γύρω από αυτό αλλά επεκτείνεται σε ενδιάμεσες αποστάσεις (μερικές εκατοντάδες μέτρα) και ενδεχομένως περισσότερο. Προφανώς, η σύσταση της βιοκοινότητας της περιοχής παίζει σημαντικό ρόλο, παρόλα αυτά φαίνεται ότι ακόμα και σε συνθήκες άνθησης, η παροχή θρεπτικών επηρεάζει την δομή της βιοκοινότητας. Όταν η ολιγοτροφία είναι πιά έντονη, όπως στην περίπτωση της Κύπρου, οι αλλαγές στο τροφικό πλέγμα είναι πιά δύσκολο να ανιχνευθούν. Ανεξάρτητα από την διαφορετική χωρική και εποχιακή δυναμική, ένα από τα σημαντικότερα ευρήματα της παρούσας διατριβής ήταν ότι οι σταθμοί κοντά στους κλωβούς επηρεάστηκαν από την παρουσία των κλωβών για όλες τις ομάδες που μελετήθηκαν.

Οι επιμέρους αλλαγές στην δομή της βιοκοινότητας έχουν παρατηρηθεί και σε άλλες μελέτες προσθήκης θρεπτικών. Είναι σύνηθες, η προσθήκη θρεπτικών να προκαλεί άμεσες αλλαγές στην βιομάζα του φυτοπλαγκτού, όπως αυτή μετριέται από την χλωροφύλλη (Cottingham et al, 1997; Schluter, 1998) και είναι επίσης σύνηθες, η αύξηση αυτή να ελέγχεται από μεγαλύτερους θηρευτές (top-down) (Cury et al, 2003).

Στην περίπτωση της ιχθυοκαλλιέργειας, λόγω του υδροδυναμικού καθεστώτος, είναι πιθανό αυτοί οι μηχανισμοί να εμφανίζονται σε διαφορετικές αποστάσεις από τους κλωβούς. Απουσία θηρευτών, τα επίπεδα της χλωροφύλλης έχουν άλλωστε βρεθεί να αυξάνονται σε περιβάλλον ιχθυοκαλλιεργειών (Dalsgaard & Krause Jensen, 2006; Pitta et al, 2009). Παράλληλα, η αύξηση του μεσοζωοπλαγκτού, και ιδιαίτερα των κωπηπόδων και κλαδοκεραιωτών, κοντά στην ιχθυοκαλλιέργεια συνδέεται με την παρουσία μίας πύο σταθερής πηγής θρεπτικών. Ενώ το μικροζωοπλαγκτόν έχει την δυνατότητα να ανταποκριθεί γρήγορα στην αυξημένη διάθεση λείας (Gismervik, 2006), το μεσοζωοπλαγκτόν χαρακτηρίζεται από πύο αργούς ρυθμούς αύξησης (Legendre & Rivkin, 2002). Το γεγονός ότι η αφθονία και η βιομάζα του μεσοζωοπλαγκτού αυξάνονται κατόπιν των κλωβών, σημαίνει και αυξημένη διάθεση θηράματος που επιτρέπει στο μεσοζωοπλαγκτόν να αυξηθεί. Μάλιστα, οι Legendre & Rivkin (2002) επισημαίνουν ότι η συνεχής παροχή ενδιάμεσης ποσότητας θρεπτικών οδηγεί συχνά σε αλλαγές στην δομή του τροφικού πλέγματος. Η νέα δομή δεν είναι απαραίτητα ασταθής, αν οι οργανισμοί που αναπτύσσονται αποτελούν λεία για τους υπάρχοντες θηρευτές, δεν είναι απαραίτητο δηλαδή ότι θα παρατηρηθούν φαινόμενα ευτροφισμού. Η εναλλαγή μεταξύ του μικροβιακού τροφικού πλέγματος και μίας πύο κλασσικής τροφικής αλυσίδας είναι κάτι που παρατηρήθηκε και στην περίπτωση της Λέσβου. Αυτό είναι άλλωστε παρόμοιο με φαινόμενο που είναι σύνηθες στο Β. Αιγαίο όταν η παροχή θρεπτικών αυξάνεται (Siokou et al, 2002).

Επιπλέον, κάτι που δεν είχε εξεταστεί στο παρελθόν ως αποτέλεσμα του εμπλουτισμού από ιχθυοκαλλιέργειες, είναι οι αλλαγές στο μέγεθος ορισμένων οργανισμών. Η διαδικασία μέτρησης μεγεθών είναι αρκετά χρονοβόρα και για τον λόγο αυτό πραγματοποιήθηκε μόνο στα δείγματα της θερινής δειγματοληψίας. Τα αποτελέσματα είχαν πολύ ενδιαφέρον καθώς φάνηκε για πρώτη φορά ότι κάποιες ομάδες ανταποκρίνονται στην διαρκή προσθήκη θρεπτικών μεγαλώνοντας ή μικραίνοντας σε μέγεθος. Το μέγεθος των οργανισμών που απαρτίζουν μια βιοκοινότητα είναι εξίσου σημαντικό με την αφθονία τους. Η κατανομή μεγεθών αποτελεί ένδειξη αν ένα τροφικό πλέγμα θα βασίζεται στον μικροβιακό βρόχο ή στην κλασσική τροφική αλυσίδα καθώς ακόμα και σε ολιγοτροφικές περιοχές η θήρευση έχει φανεί να ελέγχει την αφθονία των κυττάρων πάνω από 5μm (Mura et al, 1996). Τα κύτταρα δεν τείνουν απαραίτητα προς

πιο μικρά μεγέθη σε ολιγοτροφικές συνθήκες. Τα διάτομα για παράδειγμα, χρησιμοποιούν μηχανισμούς αποθήκευσης θρεπτικών ενδοκυτταρικά και έχειδειχτεί ότι κάποια από τα μεγαλύτερα κύτταρα έχουν αυξημένη δυνατότητα να αποθηκεύουν θρεπτικά (Lomas, 2000). Ο ρυθμός αύξησης των κυττάρων μειώνεται όσο αυξάνεται το μέγεθός τους (Geider et al 1986), άρα μπορούν πιο εύκολα να αντιμετωπίσουν συνθήκες περιορισμού θρεπτικών καθώς οι ανάγκες ενός μεγάλου κυττάρου για θρεπτικά ανά μονάδα χρόνου είναι μικρότερη (Werner 1977). Το μέγεθος των δινομαστιγιωτών αυξομειώνεται σύμφωνα με την διαθεσιμότητα της τροφής, το μέγεθός της, αλλά και με την ικανότητα κάποιου είδους να φωτοσυνθέτει ή να τρέφεται μέσω μικτοτροφίας (Hansen, 1996; Jakobsen, 1997; Barton et al, 2013). Οι Purina et al (2004), σε πειράματα προσθήκης οργανικών και ανόργανων θρεπτικών, βρήκαν επίσης αύξηση του μέσου μεγέθους των δινομαστιγιωτών, όπως επίσης και διαφορετική απόκριση συγκεκριμένων ειδών στην προσθήκη. Αντίστοιχα, και το μέσο μέγεθος των βλεφαριδωτών αλλάζει, με τα μεγαλύτερα κύτταρα να μπορούν να καταναλώσουν μεγαλύτερου μεγέθους λεία, ενώ δείχνουν προτίμηση να θηρεύουν συγκεκριμένες ομάδες (Gonzalez et al, 1990; Pitta et al, 2001). Οι μεγαλύτερες ομάδες (δηλαδή το μεσοζωοπλαγκτόν) ελέγχουν τις μικρότερες μέσω της θήρευσης και επίσης δείχνουν προτιμήσεις στο θήραμα και αλλαγές στην στρατηγική τους σε σχέση με τη διαθέσιμη λεία (Barquero et al, 1998; Gismervik, 2006). Όλες αυτές οι σχέσεις εξαρτώνται από σειρά παραγόντων και συνθηκών, συνεπώς είναι σύνηθες να διαφέρουν τα αποτελέσματα ανάλογα με την περιοχή, την σύνθεση των ειδών και τον περιοριστικό παράγοντα (Arin et al, 2002; Sarthouet et al 2005; Gismervik, 2006; Litchman et al, 2009; Barton et al, 2013).

Εφόσον οι επιπτώσεις στην στήλη του νερού εντοπίζονται στις πλαγκτονικές κοινότητες, είναι λογικό να χρησιμοποιούνται πλαγκτονικά μοντέλα για τον χαρακτηρισμό του τροφικού πλέγματος. Το τρισδιάστατο ΒΓΧ μοντέλο ήταν ένα πολύ καλό εργαλείο, καθώς οι αλλαγές που παρατηρήθηκαν στο πεδίο ήταν εμφανείς περισσότερο στο επίπεδο οργανισμών παρά των διαλελυμένων και σωματιδιακών θρεπτικών. Η ανταπόκριση του μοντέλου σε αυτές τις αλλαγές ήταν ικανοποιητική και οι τάσεις που προέβλεψε μετρήθηκαν με διαφορετικές διαβαθμίσεις και στο πεδίο. Στην προσομοίωση με μηδενική κυκλοφορία φάνηκε περισσότερο η επίδραση του ιχθυοτροφείου στο πικοπλαγκτόν και στο μεσοζωοπλαγκτόν (αύξηση) αλλά όχι στο μικροπλαγκτόν, γεγονός

που ήταν αναμενόμενο αν λάβουμε υπόψη ότι για το μικροπλαγκτό, οι αλλαγές που μετρήθηκαν δεν ήταν μόνο ποσοτικές (αφθονία) αλλά σε κάποιες περιπτώσεις σχετίζονταν με την αυξομείωση στο μέγεθος. Οι αλλαγές στο τροφικό πλέγμα (food matrix) του ΒΓΧ μοντέλου αποδείχτηκε ότι περιγράφουν καλύτερα το σύστημα που μελετήθηκε και η ανταπόκριση του μοντέλου μετά από αυτές τις αλλαγές βελτιώθηκε ως προς τις τάσεις που προβλέπει. Θα ήταν χρήσιμο να εξετασθεί η λειτουργικότητα του μοντέλου αν περιελάμβανε και δομή με βάση το μέγεθος των λειτουργικών ομάδων. Η δομή με βάση το μέγεθος των οργανισμών περιγράφεται στους Blanchard et al (2011) και έχει ως κεντρική ιδέα την κατανομή των οργανισμών με βάση το μέγεθός τους ανεξάρτητα από την λειτουργία τους. Σε περιοχές όπου υπάρχει η απαραίτητη πληροφορία, έχει γίνει σύζευξη με ΒΓΧ μοντέλα (Blanchard et al, 2012), προκειμένου να αποτιμηθούν επιπτώσεις των κλιματικών αλλαγών σε μεγάλου μεγέθους θαλάσσια συστήματα. Σε μελλοντικές προσομοιώσεις θα ήταν επίσης ενδιαφέρον να περιληφθεί σύζευξη με υψηλότερα τροφικά επίπεδα, και ιδιαίτερα με ψάρια, που έχει δειχθεί ότι χρησιμοποιούν τις ιχθυοκαλλιέργειες ως περιοχές εγκατάστασης του γόνου (Fernandez-Jover et al 2009), αλλά εκμεταλλεύονται και τις συνθήκες που έχουν αλλάξει γύρω από τους κλωβούς (Dempster et al, 2002) και στην ευρύτερη περιοχή (Machias et al, 2005). Παρόμοια σύζευξη έχει γίνει για το συγκεκριμένο μοντέλο από τους Politikos et al (2011) που το συνέδεσαν με ένα μοντέλο αύξησης της σαρδέλας. Έχει επίσης εφαρμοστεί με ικανοποιητικά αποτελέσματα για την ολοκληρωμένη αποτίμηση των επιπτώσεων των ιχθυοκαλλιεργειών σε ένα πύο κλειστό σύστημα (Petihakis et al, 2012). Οι προοπτικές για μελλοντικές χρήσεις του είναι πολύ ενδιαφέρουσες, όπως πρόσφατα αποδείχθηκε με την χρήση του για εκτιμήσεις σχετικά με το αν η αλιεία και οι ιχθυοκαλλιέργειες θα μπορέσουν να υποστηρίξουν την ζήτηση τροφής λόγω αύξησης του παγκόσμιου πληθυσμού (Merino et al, 2012). Η παρούσα τάση στα μοντέλα είναι η προσέγγιση end to end (E2E) προκειμένου να αντιμετωπισθούν θέματα παγκοσμίου ενδιαφέροντος (Travers et al, 2007). Τα E2E μοντέλα αποτελούνται από πολλά επιμέρους συζευγμένα μοντέλα που σκοπό έχουν να περιγράψουν το σύνολο του οικοσυστήματος. Ως σημαντική πηγή διατροφής του ανθρώπου, οι υδατοκαλλιέργειες είναι επόμενο ότι θα επιχειρηθεί να ενσωματωθούν σε αυτήν την προσπάθεια.

Το γενικό πρότυπο που παρατηρήθηκε στην προσέγγιση πεδίου και μοντελιστικά ήταν η απουσία αλλαγών τον χειμώνα, δηλαδή την περίοδο ανάμιξης, στις βιολογικές και χημικές παραμέτρους που μετρήθηκαν. Αυτό ήταν συνδυασμός και της ταχύτητας του ρεύματος που ευνοούσε την γρήγορη διάχυση, και της μειωμένης παροχής θρεπτικών μέσω της τροφής αλλά και της τροφικής κατάστασης των περιοχών. Στην μεν Λέσβο, η χλωροφύλλη φαίνεται ότι προερχόταν από το πίκο- και νανο- πλαγκτόν, στην δε Κύπρο, οι αυξημένες ποσότητες διαλελυμένων θρεπτικών οδήγησαν σε μεγαλύτερη αφθονία μικροπλαγκτού τον Φεβρουάριο. Η ανοιξιάτικη (έναρξη της θερμοστρωμάτωσης) άνθηση μετρήθηκε στην Λέσβο αλλά όχι στην Κύπρο. Η αφθονία του πίκο- και μικροπλαγκτού στην Λέσβο τον Απρίλιο ήταν μεν μεγαλύτερη από ό,τι τον Ιανουάριο χειμώνα αλλά πολύ παρόμοια με εκείνη του Ιουλίου. Η ανταπόκριση των πλαγκτονικών κοινοτήτων στα αυξημένα θρεπτικά στην Λέσβο, εν μέσω της άνθησης, ήταν και πάλι εμφανής και έχει παρατηρηθεί και από τους Sanders et al (1986) σε εκβολές ποταμών όπου φάνηκε πως η προσθήκη θρεπτικών ακόμα και σε περιοχές ήδη σε άνθηση επηρεάζει την αύξηση αφθονίας και την δομή της κοινότητας. Στο ιχθυοτροφείο της Λέσβου, η μεγάλη πτώση στην αφθονία των διατόμων στον σταθμό των κλωβών οφείλεται πιθανότατα σε θήρευση μιάς και, όπως έχει φανεί από άλλες μελέτες (Sara et al, 2011), η συνεχής παροχή θρεπτικών πλησίον των κλωβών μπορεί να συντηρεί μια βιοκοινότητα διαφορετική από εκείνη του περιβάλλοντος χώρου. Το καλοκαίρι, οι αλλαγές στην δομή της βιοκοινότητας χαρακτηρίστηκαν από αύξηση των θηρευτών σε μέγεθος και αφθονία στην Λέσβο και αύξηση της συνεισφοράς των ετερότροφων ομάδων στην συνολική βιομάζα. Παράλληλα, το πίκο- και νανο-πλαγκτόν επίσης ευνοήθηκαν, όπως ήταν αναμενόμενο, καθώς τα μικρά κύτταρα είναι αυτά που πίο άμεσα ανταποκρίνονται στην αύξηση θρεπτικών εξαιτίας του μικρού λόγου επιφάνειας προς όγκο (surface to volume ratio) (Azam et al, 1983). Οι αλλαγές, αν και πίο περιορισμένες, ήταν παρόμοιες και στην Κύπρο την ίδια εποχή.

Οι αλλαγές που παρατηρήθηκαν εμφάνισαν μεν κάποιο πρότυπο αλλά πιθανότατα οφείλονται σε διαφορετικές ή και συνδυαστικές διεργασίες που καταγράφηκαν την ώρα δειγματοληψίας. Συνεπώς, δεν κατέστη δυνατόν να εντοπιστούν παράμετροι που να μπορούν να χαρακτηριστούν «δείκτες» του βαθμού των αλλαγών που επιφέρει το κάθε ιχθυοτροφείο. Η στήλη του νερού και οι οργανισμοί που απαρτίζουν την βιοκοινότητά

είναι άλλωστε ένα εξαιρετικά δυναμικό σύστημα, είναι απαραίτητο λοιπόν να λαμβάνονται υπόψη οι ιδιαιτερότητές του και όταν μελετάμε το περιβάλλον των ιχθυοκαλλιιεργειών.

Συμπερασματικά, η λεπτομερής ανάλυση των βιοκοινοτήτων έδειξε πως οι εκροές από τις ιχθυοκαλλιιεργειες επηρεάζουν την στήλη του νερού κυρίως την άνοιξη και το καλοκαίρι και οι αλλαγές αυτές εντοπίστηκαν σε αποστάσεις κυρίως μέχρι και τα 100μ κατάντη των κλωβών αλλά και σε μεγαλύτερες αποστάσεις για κάποιες ομάδες. Είναι απαραίτητη και η χρήση ΒΓΧ μοντέλου, με σχετικά υψηλή διακριτότητα, προκειμένου να αποτυπωθούν οι αλλαγές αυτές στην πρόβλεψη του μοντέλου, το οποίο γενικά δείχνει αύξηση στην βιομάζα των ετερότροφων ομάδων, όταν το υδροδυναμικό καθεστώς δεν είναι τόσο έντονο ώστε να προάγεται η πολύ γρήγορη διασπορά των θρεπτικών.

Οι αλλαγές που μετρήθηκαν στο πεδίο υποδηλώνουν ότι τα θρεπτικά από τις ιχθυοκαλλιιεργειες αφομοιώνονται από το σύνολο των ομάδων πλαγκτού, με διαφορετική απόκριση της κάθε ομάδας. Η συνεχής καθημερινή προσθήκη θρεπτικών και η διάχυση ωθούν το σύστημα κατάντη της ιχθυοκαλλιιεργειας από αυτό που οι Legendre & Rivkin (2002) ονομάζουν μικροβιακό τροφικό πλέγμα (microbial food web: βακτήρια-μικρό φυτοπλαγκτόν- πρωτόζωα) σε «πολυφάγο» τροφικό πλέγμα (multivorous food web: πολλά μεγέθη φυτοπλαγκτού που θηρεύονται από διαφορετικές ομάδες θηρευτών).

Η πρόκληση στην παρούσα διατριβή ήταν να εξεταστούν οι αλληλεπιδράσεις σε επίπεδο βιοκοινοτήτας, σε ένα δυναμικό περιβάλλον. Η απόκριση σε επίπεδο βιοκοινοτήτας που μετρήθηκε στο πεδίο και προβλέφθηκε από το ΒΓΧ μοντέλο επιβεβαιώνει ότι οι ολιγοτροφικές περιοχές ανταποκρίνονται στις αλλαγές γρήγορα, συχνά χωρίς μετρήσιμα ίχνη, και τα ευρήματα εξαρτώνται σημαντικά από το αν ο πειραματικός σχεδιασμός είναι προσαρμοσμένος στην συγκεκριμένη περιοχή που γίνεται η δειγματοληψία. Χρησιμοποιώντας έναν τέτοιο πειραματικό σχεδιασμό, κατέστη δυνατόν να μελετηθούν και οι επιπτώσεις που έχουν οι προσθήκες θρεπτικών στο ολιγοτροφικό θαλάσσιο σύστημα της ανατολικής Μεσογείου. Τα δεδομένα που προέκυψαν δείχνουν ότι μπορούμε, μέσω των ιχθυοκαλλιιεργειών, να αντλήσουμε πολλές πληροφορίες για τις

φυσικές διεργασίες, τις αλληλεπιδράσεις και την απόκριση των βιοκοινοτήτων στην αλλαγή.

Στην παρούσα διατριβή εξετάστηκε η, μέχρι τώρα άγνωστη, φύση των αλλαγών στο σύνολο της κοινότητας του πλαγκτού, ως αποτέλεσμα της λειτουργίας των ιχθυοτροφείων. Το εύρος των μηχανισμών που απαρτίζουν την απόκριση της βιοκοινότητας στην προσθήκη θρεπτικών ήταν μεγάλο. Οι ολοένα αναπτυσσόμενες ιχθυοκαλλιέργειες, ως σταθερή πηγή θρεπτικών, μπορούν να αποτελέσουν πεδίο μελέτης και για μια ευρύτερη θεματική ενότητα.

6.1 Προοπτικές και συμπεράσματα

Η παρούσα διατριβή δημιούργησε καινούρια ερωτήματα τα οποία μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενο μελλοντικών εργασιών. Οι δειγματοληψίες που έγιναν αποτελούν μια εικόνα του συστήματος την ημέρα της δειγματοληψίας και θα ήταν πολύ χρήσιμο οι δειγματοληψίες να διαρκούσαν περισσότερες ημέρες. Μερικά από τα πιο σημαντικά ερωτήματα που δημιουργήθηκαν ήταν:

1. Πόσο γρήγορη είναι η απόκριση των βιοκοινοτήτων στην προσθήκη θρεπτικών στην κατεύθυνση του ρεύματος; Είναι οι αλλαγές στο τροφικό πλέγμα εδραιωμένες εποχιακά ή εμφανίζονται σποραδικά, χωρίς συγκεκριμένο δηλαδή επαναλαμβανόμενο πρότυπο;
2. Πόσο συχνά αλλάζει το καθεστώς κοντά στους ιχθυοκλωβούς σε έναν ετήσιο κύκλο σε σχέση με την ταχύτητα του ρεύματος; Πώς αυξομειώνεται η ζώνη επιρροής της ιχθυοκαλλιέργειας;
3. Υπάρχουν είδη ή ομάδες που ευνοούνται συστηματικά από την έκλυση θρεπτικών;
4. Υπάρχουν αλλαγές στην ισορροπία μεταξύ αυτότροφων και ετερότροφων οργανισμών, ανεξαρτήτως μεγέθους, σε σχέση με την απόσταση από το ιχθυοτροφείο;
5. Εντοπίζοντας ζώνες όπου η επίπτωση του ιχθυοτροφείου είναι μεγαλύτερη, και διαπιστώνοντας αν υφίστανται μέσω εργασιών πεδίου, μπορεί το μοντέλο να χρησιμοποιείται και για την επιλογή σταθμών, αλλά και σε επίπεδο διαχείρισης;
6. Κατά πόσο η συνεχής ανάμιξη της στήλης και η ανάσχεση του ρεύματος που φάνηκε να προκαλείται από τους κλωβούς επηρεάζει την άμεσα εφαιπόμενη περιοχή;

7. Αν προστεθούν υψηλότερα τροφικά επίπεδα στο βιογεωχημικό μοντέλο (ψάρια), πώς αλλάζει η συμπεριφορά του και η απεικόνιση του συστήματος;
8. Χρησιμοποιώντας την σταθερή προσθήκη θρεπτικών ως δεδομένη, τι προβλέψεις προκύπτουν από το ΒΓΧ μοντέλο από εφαρμογή σεναρίων όπως αύξηση της θερμοκρασίας της θάλασσας ή μείωση της κυκλοφορίας στο σύστημα (κλιματική αλλαγή);

Στην περαιτέρω κατανόηση των διεργασιών που συντελούνται κατάντη των κλωβών θα συνέβαλαν μετρήσεις από τα ακόλουθα:

- Ο χρόνος απορρόφησης του φωσφόρου σε διαφορετικές ομάδες μεγεθών (P turnover time), όπως έχει μετρηθεί από τους Tanaka et al (2003)
- Ο ημερήσιος κύκλος στις αλλαγές του πλαγκτού για συνεχόμενες ημέρες, όπως μετρήθηκε από τους Karakassis et al (2001) για την χλωροφύλλη και τα θρεπτικά
- Η τυρβώδης ροή και οι αλλαγές στην ροή του ρεύματος που προκαλούν οι κλωβοί, όπως μετρήθηκε από τους Klebert et al (2013)
- Οι αλλαγές στην αφθονία των αυτότροφων και ετερότροφων δινομαστιγιωτών όπως έχει μετρηθεί από τους Verity & Borkman (2010)
- Η θήρευση που ασκεί το μικροζωοπλαγκτόν, όπως έχει μετρηθεί από τους Landry & Hassett (1982) ανά απόσταση από τους κλωβούς
- Η θήρευση και η παραγωγή αυγών του μεσοζωοπλαγκτού όπως έχει μετρηθεί από τους Calbet et al (2002) και (Calbet et al 2000) αντίστοιχα

Συμπεράσματα:

1. Η επίδραση της παροχής θρεπτικών από ιχθυοτροφεία στο πλαγκτονικό σύστημα της Κύπρου και της Λέσβου διέφερε ως προς την εποχή και ως προς την απόσταση από τους ιχθυοκλωβούς.
2. Η ταχύτητα του ρεύματος και η κατακόρυφη στρωμάτωση επηρεάστηκαν από την παρουσία των κλωβών εντός των ορίων της ιχθυοκαλλιέργειας και στις δύο περιοχές.
3. Μετρήθηκαν αλλαγές στην δομή των κοινοτήτων του πλαγκτού, ως αποτέλεσμα της παρουσίας των κλωβών, στην Λέσβο τον Απρίλιο και τον Ιούλιο και στην Κύπρο τον Ιούλιο.

4. Καλοκαίρι-Λέσβος: Η διεύθυνση του ρεύματος ήταν από την δύση προς την ανατολή και η ζώνη επίδρασης του ιχθυοτροφείου έφτανε τα 200μ κατάντη για το πίκο- και νανοπλαγκτόν. Μετρήθηκαν αλλαγές στην δομή των βιοκοινοτήτων του πλαγκτού σε όλους τους σταθμούς κατάντη των κλωβών.
5. Καλοκαίρι-Λέσβος: Η αφθονία των βακτηρίων αυξήθηκε κατά 50% στα 100μ κατάντη σε σχέση με τους σταθμούς αναφοράς. Η μέση αφθονία στα 100μ ήταν $\sim 7 \times 10^5$ κύτ ml⁻¹ ενώ στους σταθμούς αναφοράς ήταν $\sim 4 \times 10^5$ cells ml⁻¹.
6. Καλοκαίρι-Λέσβος: Η αφθονία των νανομαστιγωτών επίσης αυξήθηκε, η μέση αφθονία στα 100μ κατάντη ήταν 516 κύτταρα ml⁻¹ ενώ στον σταθμό αναφοράς κατάντη ήταν 261 κύτ ml⁻¹.
7. Καλοκαίρι-Λέσβος: Συνολικά, το νανοπλαγκτόν ανταποκρίθηκε στην προσθήκη θρεπτικών με σταδιακή αύξηση της αφθονίας από τους κλωβούς μέχρι και τα 100μ κατάντη και σταδιακή μείωση όσο αυξανόταν η απόσταση από τους ιχθυοκλωβούς κατάντη.
8. Καλοκαίρι-Λέσβος: Η αφθονία των διατόμων την περίοδο στρωμάτωσης μειώθηκε κατά μία τάξη μεγέθους στους σταθμούς κατάντη των ιχθυοκλωβών μέχρι και τα 500μ. Το μέσο μέγεθός τους επίσης μειώθηκε και ενώ το 95% των κυττάρων είχαν διάμετρο πάνω από 20 μm και στους δύο σταθμούς αναφοράς, στους σταθμούς κοντά στην μονάδα το ποσοστό αυτό έπεσε στο 50%, δείχνοντας αυξητικές τάσεις όσο αυξανόταν και η απόσταση από τους ιχθυοκλωβούς.
9. Καλοκαίρι-Λέσβος: Η ποικιλότητα του μικροπλαγκτού σύμφωνα με τους δείκτες Margalef και Pielou αλλά και ο αναμενόμενος αριθμός ειδών αυξήθηκαν κατάντη της μονάδας.
10. Καλοκαίρι-Λέσβος: Το μέσο μέγεθος των δινομαστιγωτών και βλεφαριδωτών αυξήθηκε στους σταθμούς κατάντη των ιχθυοκλωβών.
11. Καλοκαίρι-Λέσβος: Η αφθονία του μεσοζωοπλαγκτού αυξήθηκε στην περιοχή των κλωβών, με τα κωπήποδα και τα κλαδοκεραιωτά να παρουσιάζουν μέγιστη αφθονία στα 100 μ κατάντη. Στην ίδια απόσταση μετρήθηκε και το μικρότερο μέσο μέγεθός τους.
12. Καλοκαίρι-Λέσβος: Η αφθονία των κλαδοκεραιωτών στους κλωβούς μειώθηκε σημαντικά πριν διπλασιαστεί στους σταθμούς 80 και 100μ κατάντη.

13. Άνοιξη-Λέσβος: Την περίοδο σχηματισμού της θερμοστρωμάτωσης, η κατεύθυνση του ρεύματος ήταν από την ανατολή προς την δύση και επικρατούσαν συνθήκες άνθησης του φυτοπλαγκτού στην περιοχή.
14. Άνοιξη-Λέσβος: Η αφθονία των δινομαστιγωτών αυξήθηκε κατάντη των κλωβών, ενώ η χαμηλότερη αφθονία καταγράφηκε στους κλωβούς.
15. Άνοιξη-Λέσβος: Η μέγιστη αφθονία των διατόμων παρατηρήθηκε στα 100μ κατάντη και στην ίδια απόσταση τα βακτήρια είχαν την χαμηλότερη αφθονία.
16. Άνοιξη-Λέσβος: Το μικροπλαγκτόν εμφάνισε ελάχιστη αφθονία στους κλωβούς και μέγιστη στα 100μ κατάντη. Η διάφορα μεταξύ των δύο ήταν μία τάξη μεγέθους, με μέσο αριθμό κυττάρων στους κλωβούς $6495 \text{ cells ml}^{-1}$ και $69144 \text{ cells ml}^{-1}$ στα 100μ κατάντη.
17. Στην Κύπρο, η διεύθυνση του ρεύματος ήταν από την δύση προς την ανατολή, σε όλες τις περιόδους δειγματοληψίας.
18. Καλοκαίρι-Κύπρος: Η αφθονία των βακτηρίων ήταν υψηλότερη κοντά στους κλωβούς.
19. Καλοκαίρι-Κύπρος: Η αφθονία των διατόμων ήταν χαμηλότερη κοντά στους κλωβούς και το μέσο μέγεθός τους μειώθηκε κοντά στα ιχθυοτροφεία, ενώ το μέσο μέγεθος των δινομαστιγωτών αυξήθηκε.
20. Η βέλτιστη διακριτότητα του ΒΓΧ μοντέλου για την περιγραφή των ιχθυοκαλλιιεργειών, ξεκινούσε από τα 200μ μέχρι και τα 50μ και η βέλτιστη χρονική διακριτότητα ήταν οι εβδομαδιαίες διακυμάνσεις.
21. Οι αλλαγές ως αποτέλεσμα του εμπλουτισμού με θρεπτικά είναι μετρήσιμες ως προς την αφθονία, το μέγεθος, την βιομάζα και την σύσταση των ειδών.
22. Οι διαφορετικοί μηχανισμοί θήρευσης, πρόσληψης θρεπτικών και ανάπτυξης της κάθε ομάδας πλαγκτού μπορούν να εξηγήσουν τις μετρήσεις πεδίου και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του μοντέλου.
23. Η αποκρίσεις που παρατηρήθηκαν έχουν κοινά χαρακτηριστικά με την απόκριση που παρατηρείται σε άλλες μελέτες προσθήκης θρεπτικών σε μικρές και μεγάλες κλίμακες στην Μεσόγειο και άλλες θάλασσες.

7 Βιβλιογραφία

- Agawin N.S.R., Duarte C.M., Agusti S., Vaque D. 2004. Effect of N:P ratios on response of Mediterranean picophytoplankton to experimental nutrient inputs. *Aquatic Microbial Ecology*, 34 (1):57-67
- Allen J. I., Fulton E. A. 2010. Progress in Oceanography Top-down, bottom-up or middle-out? Avoiding extraneous detail and over-generality in marine ecosystem models. *Progress in Oceanography*, 84(1-2):129–133
- Arechavala-Lopez P., Sanchez-Jerez P., Bayle-Sempere J., Fernandez-Jover D., Martinez-Rubio L., Lopez-Jimenez J.A., Martinez-Lopez F.J. 2011. Direct interaction between wild fish aggregations at fish farms and fisheries activity at fishing grounds: a case study with *Boops boops*. *Aquaculture*, 42: 996-1010
- Arin L., Morán X. A. G., Estrada M. 2002. Phytoplankton size distribution and growth rates in the Alboran Sea (SW Mediterranean): short term variability related to mesoscale hydrodynamics. *Journal of Plankton Research*, 24(10):1019-1033
- Arzul G., Seguel M., Clement A. 2001. Effect of marine animal excretions on differential growth of phytoplankton species. *ICES Journal of Marine Science*, 58:386-390
- Apostolaki E.T., Marbà N., Holmer M., Karakassis I. 2009. Fish farming enhances biomass and nutrient loss in *Posidonia oceanica* (L.) Delile. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 81:390–400
- Atienza D., Calbet A., Saiz E., Alcaraz M., Trepát I. 2006. Trophic impact, metabolism, and biogeochemical role of the marine cladoceran *Penilia avirostris* and the co-dominant copepod *Oithona nana* in the NW Mediterranean coastal waters. *Marine Biology*, 150:221–235
- Azam F., Fenchel T., Field J.G., Gray J.S., Meyer-Reil L.A., Thingstad F. 1983. The ecological role of water-column microbes in the Sea. *Marine Ecology Progress Series*, 10:257-263
- Azov Y. 1991. Eastern Mediterranean- a Marine Desert. *Marine Pollution Bulletin*, 23:225-232
- Baretta J.W., Ebenhoh W., Ruardij P. 1995. The European Regional Seas Ecosystem Model, a complex marine ecosystem model. *Netherlands Journal of Sea Research*, 33:233-46
- Bacher K., Gordoá A., Sague O. 2012. Spatial and temporal extension of wild fish aggregations at *Sparus aurata* and *Thunnus thynnus* farms in the north-western Mediterranean. *Aquaculture Environment Interactions*, 2:239-252
- Bar-Zeev E., Berman T., Rahav E., Dishon G., Herut B., Kress N., Berman-Frank I. 2011. Transparent exopolymer particle (TEP) dynamics in the eastern Mediterranean Sea. *Marine Ecology Progress Series*, 431:107-118

- Barton A. D., Finkel Z. V., Ward B. A., Johns D. G., Follows M. J. 2013. On the roles of cell size and trophic strategy in North Atlantic diatom and dinoflagellate communities. *Limnology & Oceanography*, 58(1):254-266
- Barquero S., Cabal J. A., Anadón R., Fernández E., Varela M., Bode A. 1998. Ingestion rates of phytoplankton by copepod size fractions on a bloom associated with an off-shelf front off NW Spain. *Journal of Plankton Research*, 20(5):957-972
- Bianchi C.N., Mori C., 2000. Marine Biodiversity of the Mediterranean Sea: Situation, Problems and Prospects for future research. *Marine Pollution Bulletin*, 40:367-376
- Blackford C.J., Allen J.I., Gilbert J.F. 2004 Ecosystem dynamics at six contrasting sites: a generic modelling study. *Journal of Marine Systems*, 52:191-215
- Blanchard J. L., Law R., Castle M. D., Jennings S. 2011. Coupled energy pathways and the resilience of size-structured food webs. *Theoretical Ecology*, 4(3):289-300
- Blanchard J. L., Jennings S., Holmes R., Harle J., Merino G., Allen J. I., Barange M. 2012. Potential consequences of climate change for primary production and fish production in large marine ecosystems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 367(1605):2979-2989
- Blumberg A.F., Mellor G.L. 1987. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. In: Heaps NS, editor. *Three-Dimensional Coastal Ocean Circulation Models*. Coastal Estuarine Science, Washington DC, AGU p. 1-16
- Brohée M., Goffart A., Frankignoulle M., Henri V., Mouchet A., Hecq J.H. 1989. Variations printanières des communautés planctoniques en Baie de Calvi (Corse) en relation avec les contraintes physiques locales. *Cahiers de Biologie Marine*, 30:321-328
- Buschmann A.H., Riquelme V.A., Hernandez-Gonzalez M.C., Varela D., Jimenez J.E., Henriquez L.A., Vergara P.A., Guinez R., Filun L. 2006. A review of the impacts of salmonid farming on marine coastal ecosystems in the southeast Pacific. *ICES Journal of Marine Science*, 63:1338-1345
- Calbet A., Landry M. R., Scheinberg R. D. 2000. Copepod grazing in a subtropical bay: species-specific responses to a midsummer increase in nanoplankton standing stock. *Marine Ecology Progress Series*, 193:75-84
- Calbet A., Saiz E., Alcaraz M. 2002. Copepod egg production in the NW Mediterranean: effects of winter environmental conditions. *Marine Ecology Progress Series*, 237:173-184
- Calbet A., Landry M.R. 2004. Phytoplankton growth, microzooplankton grazing, and carbon cycling in marine systems. *Limnology Oceanography*, 49:51-57
- Cardia F., Lovatelli A. 2007. A review of cage aquaculture: Mediterranean Sea. In: *Cage aquaculture – Regional reviews and global overview*. Halwart M., Soto D., Arthur J.R. (eds) p. 156–87. Fisheries Technical Paper. No. 498, FAO, Rome
- Coale K.H., Johnson K.S., Fitzwater S.E., Gordon R.M., Tanner S., Chavez F.P., Ferioli L., Sakamoto C., Rogers P., Millero F., Steinberg P., Nightingale P., Cooper D., Cochlan W.P., Landry M.R., Constantinou J., Rollwagen G., Trasvina A., Kudela R. 1996. A

massive phytoplankton blooms induced by an ecosystem-scale iron fertilization experiment in the equatorial Pacific Ocean. *Nature*, 383:495–501

Cromeey C. J., & Black K. D. 2005. Modelling the impacts of finfish aquaculture. In: *Environmental Effects of Marine Finfish Aquaculture*, Barry T Hargrave (ed) (pp. 129-155). *Handbook of Environmental Chemistry*, 5M. Springer Berlin Heidelberg

Cury P., Shannon L., & Shin Y. J. 2003. The Functioning of Marine Ecosystems: a Fisheries Perspective. In: *Responsible fisheries in the marine ecosystem*, Michael Sinclair, Grímur Valdimarsson (eds) (pp 103-123). FAO, Rome

Cushing D.H., Road Y. 1989. A difference in structure between ecosystems in strongly stratified waters and in those that are only weakly stratified. *Journal of Plankton Research*, 11:1–13

Dalsgaard T., Krause-Jensen D. 2006. Monitoring nutrient release from fish farms with microalgal and phytoplankton bioassays. *Aquaculture*, 256:302-310

Davidson K., Roberts E. C., Gilpin L. C. 2002. The relationship between carbon and biovolume in marine microbial mesocosms under different nutrient regimes. *European Journal Phycology* 37:501–507

Davis R.E. 1982. An inexpensive drifter for surface currents. In: Dursi, M., Woodward, W.E. (Eds.), *Proceedings of the IEEE Second Working Conf. on Current Measurement*, (82). Hilton Head, U.S.A., Jan. 19–21, pp. 89–93

Dempster T., Sanchez-Herez P., Bayle-Sempere J.T., Gimenez-Casaldueiro F., Valle C. 2002. Attraction of wild fish to sea-cage fish farms in the south-western Mediterranean Sea: spatial and short-term temporal variability. *Marine Ecology Progress Series*, 242:237-52

Drakopoulos P.G., Lascaratos A. 1999. Modelling the Mediterranean Sea: climatological forcing. *Journal of Marine Systems*, 20:157-7

Dial R., Roughgarden J. 1998. Theory of marine communities: The intermediate disturbance hypothesis. *Ecology*, 79:1412-1424

Dosdat A, Servais F., Metailler R, Huelvan C, Desbruyeres E. 1996. Comparison of nitrogenous losses in five teleost species. *Aquaculture*, 141:107-127

Dowd M. 2005. A bio-physical coastal ecosystem model for assessing environmental effects of marine bivalve aquaculture. *Ecological Modelling*, 183(2-3):323–346

Duarte C.M., Holmer M., Olsen Y., Soto D., Marbà N., Guiu J., Black K., Karakassis I. 2009. Will the oceans help feed humanity? *BioScience*, 59:967-976

Egge J.K., Thingstad T.F., Larsen A., Engel A., Wohlers J., Bellerby R.G.J., Riebesell U. 2009. Primary production during nutrient-induced blooms at elevated CO₂ concentrations. *Biogeosciences*, 6:877-885

Emeis K.C., Robertson A.H.F., Richter C. 1996. Paleooceanography and sapropel introduction. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, initial reports*, Vol. 160

- FAO, 2012a. The state of world fisheries and aquaculture, Fisheries and Aquaculture Department, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome
- FAO, 2012b. Yearbook-Fishery and Aquaculture Statistics 2010, Food and Agriculture Organisation of the United Nations, Rome
- Fennel W., Neumann T. 2004. Introduction to the modelling of marine ecosystems Amsterdam: Elsevier. 297 S. (Elsevier Oceanography Series: 72)
- Frangoulis C., 2002. Mesozooplankton outfluxes in coastal areas. PhD Thesis, University of Liege, Belgium
- Frangoulis C., Psarra S., Zervakis V., Meador T., Mara P., Gogou A., Zervoudaki S., Giannakourou A. Pitta P., Lagaria A., Krasakopoulou E., Siokou-Frangou, I. 2010. Connecting export fluxes to plankton food-web efficiency in the Black Sea waters inflowing into the Mediterranean Sea. *Journal of Plankton Research*, 32(8):1203-1216
- Fernandez-Jover D., Sanchez-Jerez P., Bayle-Sempere J., Arechavala-Lopez P., Martinez-Rubio L., Lopez-Jimenez J., Lopez F. 2009. Coastal fish farms are settlement sites for juvenile fish. *Marine Environmental Research*, 68:89-96
- Flaten G.A.F., Skjoldal E.F., Krom M.D., Law, C.S., Mantoura, R.F.C., Pitta, P., Psarra, S., Tanaka, T., Tselepides, A., Woodward, E.M.S., Zohary, T., Thingstad, T.F. 2005. Studies of the microbial P-cycle during a Lagrangian phosphate-addition experiment in the Eastern Mediterranean. *Deep-Sea Research II*, 52:2928-2943
- Forrestal F., Coll M., Die D. J., Christensen V. 2012. Ecosystem effects of bluefin tuna *Thunnus thynnus thynnus* aquaculture in the NW Mediterranean Sea. *Marine Ecology Progress Series* 456:215-231
- Galperin B., Mellor G.L. 1990. A time-dependent, three-dimensional model of the Delaware Bay and River. Part 1: Description of the model and tidal analysis, *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 31:231-53
- Geider R. J., Platt T., Raven J. A. 1986. Size dependence of growth and photosynthesis in diatoms: a synthesis. *Marine Ecology Progress Series*, 30:93-104
- Gismervik I. 2006. Top-down impact by copepods on ciliate numbers and persistence depends on copepod and ciliate species composition. *Journal of Plankton Research*, 28(5):499-507
- Gonzalez J. M., Sherr E. B., Sherr B. F. 1990. Size-selective grazing on bacteria by natural assemblages of estuarine flagellates and ciliates. *Applied and Environmental Microbiology*, 56(3):583-589
- Gowen R.J., Bradbury N.B. 1987. The ecological impact of salmonid farming in coastal waters: a review. *Oceanography Marine Biology Annual Review*, 25
- Grime J.P. 1973. Competitive exclusion in Herbaceous Vegetation. *Nature*, 242:344-347

- Hall P.O.J., Holby O., Kollberg S., Samuelsson M. 1992. Chemical fluxes and mass balance in a marine fish cage farm. IV. Nitrogen. *Marine Ecology Progress Series*, 89:81-91
- Hansen P. J. 1991. Quantitative importance and trophic role of heterotrophic dinoflagellates in a coastal pelagial food web. *Marine Ecology Progress Series*, 73(2-3):253-261
- Hansen P. J. 1992. Prey size selection, feeding rates and growth dynamics of heterotrophic dinoflagellates with special emphasis on *Gyrodinium spirale*. *Marine Biology*, 114(2), 327-334
- Hansen B., Bjornsen P.K., Hansen P.J. 1994. The size ratio between planktonic predators and their prey. *Limnology and Oceanography*, 39:395-402
- Heesen D.O. 1992. Nutrient element limitation of zooplankton production. *The American Naturalist*, 140:799-814
- Henderson B.A., Gamito S., Karakassis I., Pederson P., Smaal A. 2001. Use of hydrodynamic and benthic models for managing environmental impacts of marine aquaculture. *Journal of Applied Ichthyology*, 17:163-172
- Hillebrand H., Dürselen C. D., Kirschtel D., Pollinger D. and Zohary T. 1999. Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae. *Journal of Phycology*, 35:403-424
- Hobbie J.E., Cole J.J., 1984. Response of a detrital food web to eutrophication. *Bulletin of Marine Science*, 35:357-363
- Holby O., Hall P. 1991. Chemical fluxes and mass balances in a marine fish cage farm. II. Phosphorus. *Marine Ecology Progress Series*, 70:263-272
- Holmer M., Hansen P.K., Karakassis I., Borg A.J., Schembri P.J. 2008. Monitoring of Environmental Impacts of Marine Aquaculture. In: *Aquaculture in the Ecosystem*, M. Holmer, K. Black, C.M. Duarte, N. Marba and I. Karakassis (eds) (pp. 47-85) Springer
- Holmer M., Argyrou M., Dalsgaard T., Danovaro R., Diaz-Almela E., Duarte C.M., Frederiksen M., Grau A., Karakassis I., Marbà N., Mirto S., Pérez M., Pusceddu A., Tsapakis M. 2008. Effects of fish farm waste on *Posidonia oceanica* meadows: synthesis and provision of monitoring and management tools. *Marine Pollution Bulletin*, 56:1618-1629
- Holmer M. 2010. Environmental issues of fish farming in offshore waters: perspectives, concerns and research needs. *Aquaculture Environment Interactions* 1:57-70
- Horton C., Clifford M., Schmitz J., Kantha L.H. 1997. A real-time oceanographic nowcast/forecast system for the Mediterranean Sea. *Journal of Geophysical Research*, 102 (C11):25123-156
- Huertas I.E., Ríos A. F., García-Lafuente J., Navarro G., Makaoui A., Sánchez-Román A., Rodríguez-Galvez S., Orbi A., Ruíz J., Pérez F.F., 2012. Atlantic forcing of the Mediterranean oligotrophy. *Global Biogeochemical Cycles*, 26(2)

- Hutchinson G.E., 1961. The paradox of the plankton. *The American Naturalist*, 95:137-145
- Ignatiades L. 2005. Scaling the trophic status of the Aegean Sea, eastern Mediterranean. *Journal of Sea Research* 2005, 54:51-7
- Ignatiades L., Psarra S., Zervakis V., Pagou K., Souvermezoglou, E., Assimakopoulou G., Gotsis-Skretas O. 2002. Phytoplankton size-based dynamics in the Aegean Sea (Eastern Mediterranean). *Journal of Marine Systems*, 36:11–28
- Ignatiades L., Gotsis-Skretas O., Pagou K., Krasakopoulou E. 2009. Diversification of phytoplankton community structure and related parameters along a large-scale longitudinal east–west transect of the Mediterranean Sea. *Journal of Plankton Research*, 31:411-428
- Islam M. 2005. Nitrogen and phosphorus budget in coastal and marine cage aquaculture and impacts of effluent loading on ecosystem: review and analysis towards model development. *Marine Pollution Bulletin*, 50:48-6
- Ivancic I., Deggobis D. An optimal manual procedure for ammonia analysis in natural waters by the indophenol blue method. *Water Research* 1984, 18:1143-1147
- Ivancic I., Godrijan J., Pfannkuchen M., Maric D., Gasparovic B., Djakovac T., Najdek M. 2012. Survival mechanisms of phytoplankton in conditions of stratification-induced deprivation of orthophosphate: Northern Adriatic case study. *Limnology Oceanography*, 57(6):1721-1731
- Jakobsen H. H., Hansen P. J. 1997. Prey size selection, grazing and growth response of the small heterotrophic dinoflagellate *Gymnodinium* sp. and the ciliate *Balanion comatum*-a comparative study. *Marine Ecology Progress Series*, 158:75-86
- Jeong H.J., Yoo Y.D., Kim J.S., Seong K.A., Kang N.S., Kim T.H. 2010. Growth, Feeding and Ecological Roles of the Mixotrophic and Heterotrophic Dinoflagellates in Marine Planktonic Food Webs. *Ocean Science Journal*,45:65-91
- Jobling M. 1998. Feeding and nutrition in intensive fish farming. In: Black, K.D., Pickering, A.D. (eds.) (pp. 67–106), *Biology of Farmed Fish*. Sheffield Academic Press, Sheffield
- Jonsson P. R. 1986. Particle size selection, feeding rates and growth dynamics of marine planktonic oligotrichous ciliates (Ciliophora: Oligotrichina). *Marine Ecology Progress Series*, 33:568-572
- Kalantzi I., Karakassis I. 2006. Benthic impacts of fish farming: Meta-analysis of community and geochemical data. *Marine Pollution Bulletin*, 52:484-493
- Karakassis I., Tsapakis M., Hatziyanni E., Papadopoulou K-N, Plaiti W. 2000. Impact of bass and bream farming in cages on the seabed in three Mediterranean coastal areas. *ICES Journal Marine Science*, 57:1462-71

- Karakassis I., Tsapakis M., Hatziyanni E., Pitta P. 2001. Diel variation of nutrients and chlorophyll in sea bream and sea bass cages in the Mediterranean. *Fresenius Environmental Bulletin*, 10:278-283
- Karakassis I., Pitta P., Krom M. 2005. Contribution of fish farming to the nutrient loading of the Mediterranean. *Scientia Marina*, 69:313-321
- Kaushik S. 1998. Nutritional bioenergetics and estimation of waste production in non-salmonids. *Aquatic Living Resources*, 11(4):211-17
- Kerner M., Hohenberg H., Ertl S., Reckermann M., Spitz A. 2003. Self-organization of dissolved organic matter to micelle-like microparticles in river water. *Nature*, 422:150-154
- Kjørboe T., Tiselius P., Mitchell-Innes B., Hansen J.L.S., Visser A.W., Mari X. 1998. Intensive aggregate formation with low vertical flux during an upwelling-induced diatom bloom. *Limnology & Oceanography*, 43:104-116
- Klebert P., Lader P., Gansel L., Oppedal F. 2012. Hydrodynamic interactions on net panel and aquaculture fish cages: A review. *Ocean Engineering*, 58:260-274
- Kleppel G.S. 1993. On the diets of calanoid copepods. *Marine Ecology Progress Series*, 99:182-195
- Klinger D., Naylor R. 2012. Searching for solutions in aquaculture: charting a sustainable course. *Annual Review of Environment and Resources*, 37:247-276
- Korres G., Lascaratos A. 2003. A one-way nested eddy resolving model of the Aegean and Levantine basins: Implementation and climatological runs. *Annales Geophysicae, MFSP- Pt I Special Issue*, 21:205-20
- Koski M., Breteler W. K., Schogt N. 1998. Effect of food quality on rate of growth and development of the pelagic copepod *Pseudocalanus elongatus* (Copepoda, Calanoida). *Marine Ecology Progress Series*, 170:169-187
- Kourafalou V.H., Barbopoulos K. 2003. High resolution simulations on the North Aegean Sea seasonal circulation. *Annales Geophysicae*, 21(1):251-6
- Krom M., Kress N., Brenner L. and Gordon I., 1991. Phosphorus limitation and primary productivity in the Eastern Mediterranean Sea. *Limnology & Oceanography*, 36:424-432
- Krom M.D., Emeis K.-C., VanCappellen P., 2010. Why is the Eastern Mediterranean phosphorus limited? *Progress in Oceanography*, 55:236-244
- Krom M.D., Thingstad T.F., Brenner S., Carbo P., Drakopoulos P., Fileman T.W., Flaten G.A.F., Groom S., Herut B., Kitidis V., Kress N., Law C.S., Liddicoat M.I., Mantoura R.F.C., Pasternak A., Pitta P., Polychronaki T., Psarra S., Rassoulzadegan F., Skjoldal E.F., Spyres G., Tanaka T., Tselepidis A., Wassmann P., Riser C.W., Woodward E.M.S., Zodiatis G., Zohary T. 2005. Summary and overview of the CYCLOPS P addition Lagrangian experiment in the Eastern Mediterranean. *Deep-Sea Research II*, 52:3090-3108.

- Landry M. R., Hassett R. P. 1982. Estimating the grazing impact of marine microzooplankton. *Marine biology*, 67(3):283-288
- La Rosa T., Mirto S., Favaloro E., Savona B., Sara G., Danovaro R., Mazzola A. 2002. Impact on the water column biogeochemistry of a Mediterranean mussel and fish farm. *Water Research*, 36:713-21
- Lascaratos A., Nittis K. 1998. A high-resolution three-dimensional numerical study of intermediate water formation in the Levantine Sea. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 103 (C9):18,497-18,511
- Lawrence C., Menden-Deuer S. 2012. Drivers of protistan grazing pressure: seasonal signals of plankton community composition and environmental conditions. *Marine Ecology Progress Series*, 459:39-52
- Lemarie G., Martin J.L., Dutto G., Garidou C. 1998. Nitrogenous and phosphorus waste production in a flow-through land-based farm of european sea bass (*Dicentrarchus labrax*). *Aquatic Living Resources*, 11:247-54
- Lomas M. W., Glibert P. M. 2000. Comparisons of nitrate uptake, storage, and reduction in marine diatoms and flagellates. *Journal of Phycology*, 36(5):903-913
- Lupatsch L., Kissil G.W. 1998. Predicting aquaculture waste from gilthead seabream (*Sparus aurata*) culture using a nutritional approach. *Aquatic Living Resources*, 11:265-8
- Machias A., Giannoulaki M., Somarakis S., Maravelias C.D., Neofitou C., Koutsoubas D., Papadopoulou K.N., Karakassis I. 2006. Fish farming effects on local fisheries landings in oligotrophic seas. *Aquaculture*, 261:809-816
- Machias A., Karakassis I., Giannoulaki M., Papadopoulou K., Smith C., Somarakis S. 2005. Response of demersal fish communities to the presence of fish farms. *Marine Ecology Progress Series*, 288:241-250
- Machias A., Karakassis I., Labropoulou M., Somarakis S., Papadopoulou K., Papakonstantinou C. 2004. Changes in wild fish assemblages after the establishment of a fish farming zone in an oligotrophic marine ecosystem. *Estuarine, Coastal and Shelf science*, 60:771-779
- Magill S.H., Thetmeyer H., Cromey C.J. 2006. Settling velocity of faecal pellets of gilthead sea bream (*Sparus aurata* L.) and sea bass (*Dicentrarchus labrax* L.) and sensitivity analysis using measured data in a deposition model. *Aquaculture*, 251:295-305
- Maldonado M., Echeverria M.C.C.Y., Riesgo A. 2005. The environmental impact of Mediterranean cage fish farms at semi-exposed locations: does it need a re-assessment? *Helgoland Marine Research*, 59:121-135
- Margalef R. 1967. The food web in the pelagic environment *Helgoländer Wissenschaftliche Meeresuntersuchungen* Volume 15 (1-4):548-559
- Mellor G.L., Yamada T. 1982. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Review of Geophysics Space Physics*, 20(4):851-75

- Mellor G.L., Blumberg A.F. 1985. Modeling vertical and horizontal diffusivities with the sigma coordinate system. *Monthly Weather Review*, 113:1379-83
- Mellor G.L., Ezer T. 1991. A Gulf Stream model and an altimetry assimilation scheme. *Journal of Geophysical Research*, 96:8779–95
- Mura M. P., Agusti S., Del Giorgio P. A., Gasol J. M., Vaqué D., Duarte C. M. 1996. Loss-controlled phytoplankton production in nutrient-poor littoral waters of the NW Mediterranean: in situ experimental evidence. *Marine ecology progress series*. Oldendorf, 130(1):213-219
- Naylor R.L., Goldburg R.J., Primavera J.H., Kautsky N., Beveridge M.C.M., Clay J., Folke, Lubchenco J, Mooney H., Troell M. 2000. Effect of aquaculture on world fish supplies. *Nature*, 405:1017-24
- Neuer S., Cowles T.J. 1995. Comparative size-specific grazing rates in field populations of ciliates and dinoflagellates. *Marine Ecology Progress Series*, 125:259-267
- Nixon S. W.1995. Coastal marine eutrophication: a definition, social causes and future concerns. *Ophelia* 41:199-219
- Olenina I., Hajdu S., Edler L., Andersson A., Wasmund N., Busch S., Göbel J., Gromisz S., Huseby S., Huttunen M., Jaanus A., Kokkonen P., Ledaine I., Niemkiewicz, E. 2006 Biovolumes and size-classes of phytoplankton in the Baltic Sea. HELCOM Baltic Sea Environmental Proceedings No. 106, 144pp
- Oviatt C., Doering P., Nowiclu B., Reed L., Cole J., Frithsen J. 1995. An ecosystem level experiment on nutrient limitation in temperate coastal marine environments. *Marine Ecology Progress Series*, 116:171-179
- Papadopoulos A., Katsafados G., Kallos G., Nickovic S. 2002. The weather forecasting system for POSEIDON-An overview. *Global Atmosphere and Ocean System*, 8 (2-3):219-37
- Pearson T.H. and Black K.D. 2001. Environmental impacts of marine fish cage culture. In: K.D. Black (ed) (pp. 1-32), *Environmental impacts of aquaculture*. Sheffield Academic Press, Sheffield
- Petihakis G, Triantafyllou G, Allen JI, Hoteit I, Dounas C. 2002. Modelling the Spatial and Temporal Variability of the Cretan Sea Ecosystem. *Journal of Marine Systems*, 36(3-4):173-96
- Petihakis G., Triantafyllou G., Pollani A., Koliou A., Theodorou A. 2005. Field data analysis and application of a complex water column biogeo-chemical model in different areas of a semi-enclosed basin: Towards the development of an ecosystem management tool. *Marine Environmental Research*, 59:493-518
- Petihakis G., Smith C.J., Triantafyllou G., Surlantzis G., Papadopoulou K.N., Pollani A., Korres G. 2007. Scenario testing of fisheries management strategies using a high resolution ERSEM–POM ecosystem model. *ICES Journal of Marine Science*, 64:1627-40

- Petihakis G., Triantafyllou G., Tsiaras K., Korres G., Pollani A., Hoteit I. 2009. Eastern Mediterranean biogeochemical flux model—Simulations of the pelagic ecosystem. *Ocean Science*, 5(1):29
- Petihakis G., Tsiaras K., Triantafyllou G., Korres G., Tsagaraki T. M., Tsapakis M., Vavilis P., Pollani A., Frangoulis C. 2012. Application of a complex ecosystem model to evaluate effects of finfish culture in Pagasitikos Gulf, Greece. *Journal of Marine Systems*, 94:S65-S77
- Plaganyi E. E. 2007. Models for an ecosystem approach to fisheries. FAO fisheries technical paper. No. 477. Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy
- Politikos D. V., Triantafyllou G., Petihakis G., Tsiaras K., Somarakis S., Ito S. I., Megrey B. A. 2011. Application of a bioenergetics growth model for European anchovy (*Engraulis encrasicolus*) linked with a lower trophic level ecosystem model. *Hydrobiologia*, 670(1):141-163
- Piroddi C., Bearzi G., Christensen V. 2011. Marine open cage aquaculture in the eastern Mediterranean Sea: a new trophic resource for bottlenose dolphins. *Marine Ecology Progress Series*, 440:255-266
- Piedecausa M.A., Aguado-Giménez F., Cerezo-Valverde J., Hernández-Llorente M.D., García-García B. 2010. Simulating the temporal pattern of waste production in farmed gilthead seabream (*Sparus aurata*), European seabass (*Dicentrarchus labrax*) and Atlantic bluefin tuna (*Thunnus thynnus*). *Ecological Modeling*, 221(4):634-40
- Pitta P., Karakassis I., Tsapakis M., Zivanovic S. 1999. Natural vs. mariculture induced variability in nutrients and plankton in the Eastern Mediterranean. *Hydrobiologia*, 391:181–194
- Pitta P., Apostolaki E., Giannoulaki M., Karakassis I. 2005. Mesoscale changes in the water column in response to fish farming zones in three coastal areas in the Eastern Mediterranean Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf science*, 65:501-512
- Pitta P., Tsapakis M., Apostolaki E.T., Tsagaraki T., Holmer M., Karakassis I. 2009. “Ghost nutrients” from fish farms are transferred up the food web by phytoplankton grazers. *Marine Ecology Progress Series*, 374:1-6
- Porter K.G., Feig Y.S. 1980. The use of DAPI for identifying and counting aquatic microflora. *Limnology & Oceanography*, 25:943-948
- Purina I., Balode M., Béchemin C., Pöder T., Vérité C., Maestrini S. 2004. Influence of dissolved organic matter from terrestrial origin on the changes of dinoflagellate species composition in the Gulf of Riga, Baltic Sea. *Hydrobiologia*, 514(1-3):127-137
- Ribera d'Alcala M., Civitarese G., Conversano F., Lavezza R., 2003. Nutrient ratios and fluxes hint at overlooked processes in the Mediterranean Sea. *Journal of Geophysical Research* 108:1–16

Robinson A.R., Leslie W.G., Theocharis A., Lascaratos A. 2001. Mediterranean Sea Circulation. In: Encyclopedia of Ocean Sciences. John H. Steele, Karl K. Turekian, Steve A. Thorpe (eds) (pp.1689-1705), Academic Press, 2001

Rose K. A., Allen J. I., Artioli Y., Barange M., Blackford J., Carlotti F., Cropp R., Daewel U., Edwards K., Flynn K., Hill S.L., HilleRisLambers R., Huse G., Mackinson S., Megrey B., Moll A., Rivkin R., Salihoglu B., Schrum C., Shannon L q , Shin J.Y., Smith S.L., Smith C., Solidoro C., St.John M., Zhou M. 2010. End-to-end models for the analysis of marine ecosystems: challenges, issues and next steps. *Marine and Coastal Fisheries Dynamics Management and Ecosystem Science*, 2(1):115–130

Sanders R.W., Berninger U.G., Lim E.L., Kemp P.K., Caron D.A. 2000. Heterotrophic and mixotrophic nanoplankton predation on picoplankton in the Sargasso Sea and on Georges Bank. *Marine Ecology Progress Series*, 192:103–118

Sara G., Scipoti D., Milazzo M., Modica A. 2006. Use of stable isotopes to investigate dispersal of waste from fish farms as a function of hydrodynamics. *Marine Ecology Progress Series*, 313:261-276

Sara G. 2007(a). Ecological effects of aquaculture on living and non living suspended fractions of the water column: a meta- analysis. *Water Research*, 41:3187-3200

Sara, G. 2007(b). A meta-analysis on the ecological effects of aquaculture on the water column: Dissolved nutrients. *Marine Environmental Research*, 63:390-408

Sara G., Lo Martire M., Sanfilippo M., Pulicanò G., Cortese G., Mazzola, Manganaro A., Pusceddu A. 2011. Impacts of marine aquaculture at large spatial scales: evidences from N and P catchment loading and phytoplankton biomass. *Marine environmental research*, 71(5):317–24

Sarthou G., Timmermans K. R., Blain S., Treguer P. 2005. Growth physiology and fate of diatoms in the ocean: a review. *Journal of Sea Research*, 53(1):25-42

Schlüter L. 1998. The influence of nutrient addition on growth rates of phytoplankton groups, and microzooplankton grazing rates in a mesocosm experiment. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 228(1):53-71

Sherr E.B., Sherr B.F. 2007. Heterotrophic dinoflagellates: a significant component of microzooplankton biomass and major grazers of diatoms in the sea. *Marine Ecology Progress Series*, 352:187-197

Silvert W. 1992. Assessing the environmental impacts of finfish aquaculture in marine waters. *Aquaculture*, 107:67-79

Silvert W., Cromey C. Modelling Impacts. 2001. In: Environmental Impacts of Aquaculture, Black K.D. (ed.) (pp. 154-181), Sheffield Academic Press, Sheffield

Siokou-Frangou I., Bianchi M., Christaki U., Christou E.D., Giannakourou A., Gotsis O., Ignatiades L., Pagou K., Pitta P., Psarra S., Souvermezoglou E., Wambeke F.V., Zervakis V. 2002. Carbon flow in the planktonic food web along a gradient of oligotrophy in the Aegean Sea (Mediterranean Sea). *Journal of Marine Systems*, 33-34:335-353

- Siokou-Frangou I., Christaki U., Mazzocchi M.G., Montresor M., d'Alcala M.R., Vaque D., Zingone A. 2010. Plankton in the open Mediterranean Sea: a review. *Biogeosciences*, 7:1543-1586
- Skejic S., Marasovic I., Vidjak O., Kuspilic G., Nincevic-Gladan Z., Sestanovic S., Bojanic N. 2010. Effects of cage fish farming on phytoplankton community structure, biomass and primary production in an aquaculture area in the middle Adriatic Sea. *Aquaculture Research*, 42(9):1-13
- Skejic S., Marasovic I., Nincevic-Gladan Z. 2012. Phytoplankton assemblages at fish farm in Maslinova Bay (the island of Brac). *Croatian Journal of Fisheries*, 70 (2):41-52
- Smayda T.J. 2006. Harmful algal Bloom Communities in Scottish coastal Waters: Relationship to Fish Farming and Regional Comparisons: A review. A report for Scottish Executive Environment Group, Natural Scotland Paper 2006/3 168 pp
- Smagorinsky J. 1964. General circulation experiments with the primitive equations, I, The basic experiment. *Monthly Weather Review*, 91:99-164.
- Sommer U., Stibor H. 2002. Copepoda – Cladocera – Tunicata: The role of three major mesozooplankton groups in pelagic food webs. *Ecological Research*, 17:161-174
- Soto D, Norambuena F. Evaluation of salmon farming effects on marine systems in the inner seas of southern Chile: a large-scale mensurative experiment. 2004. *Journal of Applied Ichthyology*, 20:493–501
- Stigebrandt A., Aure J., Ervik A., Kupta Hansen P. 2004. Regulating the environmental impact of intensive marine fish farming III. A model for estimation of the holding capacity in the Modeling- Ongrowing- fish farm Monitoring system, *Aquaculture*, 234:239-61
- Strategic Working Group on Fisheries and Aquaculture. Science in support of the European fisheries and Aquaculture policy. 2013, Report from the 1st SCAR-Fish meeting, Brussels, 14th June 2012. url: http://ec.europa.eu/research/agriculture/scar/pdf/scar_fish_report_3042013_fin.pdf
- Strickland J.D., Parsons T.R. 1972. A practical handbook of seawater analysis. *Bulletin of the Fisheries Research Board of Canada* 167: 311 pp
- Strom S.L., Morello T.A. 1998. Comparative growth rates and yields of ciliates and heterotrophic dinoflagellates. *Journal of Plankton Research*, 20:571-584
- Subasinghe R., Soto D., Jia J. 2009. Global aquaculture and its role in sustainable development. *Reviews in Aquaculture*, 1(1):2-9
- Sugimura, Y., Suzuki Y. 1988. A high temperature catalytic oxidation method for non-volatile dissolved organic carbon in seawater by direct injection of a liquid sample, *Marine Chemistry*, 24:105-131
- Svensen C., Nejstgaard J. C., Egge J. K., Wassmann P. 2002. Pulsing versus constant supply of nutrients (N, P and Si): effect on phytoplankton, mesozooplankton and vertical flux of biogenic matter. *Scientia Marina*, 66(3):189-203

- Tanaka T., Rassoulzadegan F., Thingstad T. F. 2003. Measurements of phosphate affinity constants and phosphorus release rates from the microbial food web in Villefranche Bay, northwestern Mediterranean. *Limnology and oceanography*, 48(3):1150-1160
- Tett P. 2008. Fish farm wastes in the Ecosystem.. In: *Aquaculture in the Ecosystem*, M. Holmer, K. Black, C.M. Duarte, N. Marba and I. Karakassis (eds) (pp. 47-8) Springer
- Tett P., Gilpin L., Svendsen H., Erlandsson C.P., Larsson U., Kratzer S., Fouilland E., Jensen C., Lee J.Y., Grenz C., Newton A., Ferreira J.G., Fernandes T., Scory, S. 2003. Eutrophication and some European waters of restricted exchange. *Continental Shelf Research*, 23:1635-71
- Thingstad T.F., Zweifel U.L., Rassoulzadegan F. 1998. P limitation of heterotrophic bacteria and phytoplankton in the northwest Mediterranean. *Limnology & Oceanography*, 43 (1):88-94
- Thingstad T.F., Krom M.D., Mantoura R.F.C., Flaten G.A.F., Groom S., Herut B., Kress N., Law C.S., Pasternak A., Pitta P., Psarra S., Rassoulzadegan F., Tanaka T., Tselepidis A., Wassmann P., Woodward E.M.S., Riser C.W., Zodiatis G., Zohary, T. 2005. Nature of Phosphorus Limitation in the Ultraoligotrophic Eastern Mediterranean. *Science*, 309:1068-1071
- Thingstad T.F., Sakshaug E. 1990. Control of phytoplankton growth in nutrient recycling ecosystems. Theory and terminology. *Marine Ecology Progress Series*, 63:261-272
- Thingstad T.F., Rassoulzadegan F. 1999. Conceptual models for the biogeochemical role of the photic zone microbial food web, with particular reference to the Mediterranean Sea. *Progress in Oceanography*, 44:271-286
- Tilman D. 1996. Biodiversity: Population versus ecosystem stability. *Ecology*, 77:350-363
- Tomas C.R. 1997. *Identifying Marine Diatoms and Dinoflagellates*. Academic Press, San Diego
- Tonani M, Pinardi N, Dobricic S, Pujol I, Fratianni C. 2008. A high resolution free-surface model of the Mediterranean Sea. *Ocean Science*, 4:1-14
- Travers M., Shin Y.J., Cury P. 2007. Towards end to end models for investigating the effects of climate and fishing in marine ecosystems. *Progress in Oceanography*, 75:751-70
- Triantafyllou G., Petihakis G., Dounas C., Theodorou A. 2001. Assessing marine ecosystem response to nutrient inputs. *Marine Pollution Bulletin*, 43:175-86
- Triantafyllou G., Petihakis G., Allen J.I. 2003. Assessing the performance of the Cretan Sea ecosystem model with the use of high frequency M3A buoy data set. *Annales Geophysicae*, 21:365-75
- Tsapakis M., Pitta P., Karakassis I. 2006 Nutrients and fine particulate matter released from sea bass (*Dicentrarchus labrax*) farming. *Aquatic Living Resources*, 19:69-75

- Tsagaraki T.M., Petihakis G., Tsiaras K., Triantafyllou G., Tsapakis M., Korres G., Kakagiannis G., Frangoulis C., Karakassis I. 2011. Beyond the cage: Ecosystem modelling for impact evaluation in aquaculture. *Ecological Modelling*, 222 (14):2512-2523
- Turley C.M. 1999. The changing Mediterranean Sea- a sensitive ecosystem? *Progress in Oceanography*, 44:387-400
- Turley C.M., Bianchi M, Christaki U, Conan P, Harris JRW, Psarra S., Ruddy G., Stutt E.D., Tselepides A., Van Wambeke F. 2003. Relationship between primary producers and bacteria in an oligotrophic sea—the Mediterranean and biogeochemical implications, *Marine Ecology Progress Series*, 193:11–18
- Umani S.F., Beran A. 2003. Seasonal variations in the dynamics of microbial plankton communities: first estimates from experiments in the Gulf of Trieste, Northern Adriatic Sea. *Marine Ecology Progress Series*, 247:1-16
- Utermöhl von H. 1931. Neue Wege in der quantitativen Erfassung des Planktons. (Mit besondere Berücksichtigung des Ultraplanktons). *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie*, 5:567–595
- Verity P. G., Borkman D. G. 2010. A decade of change in the Skidaway river estuary. III. Plankton. *Estuaries and coasts*, 33(2):513-540
- Vichi M. 2002. Predictability studies of coastal marine ecosystem behavior. PhD thesis, University of Oldenburg, Germany
- Vichi M., Baretta J.W., Bekker J.G.B., Ebenhoh W., Kohlmeier C., Ruardij P., Pinardi N., Zavatarelli M. 2004. European Regional Seas Ecosystem Model III Review of the biogeochemical equations. www.bo.ingv.it/ersem3/ERSEM_III_report.lyx, v 1.6 2004/07/28 10:44:29 mav Exp, 2004
- Weber M. J., Brown M. L. 2013. Continuous, pulsed and disrupted nutrient subsidy effects on ecosystem productivity, stability, and energy flow. *Ecosphere*, 4(2), art27.
- Weisse T. 1991. The Microbial Food Web and its Sensitivity to Eutrophication and Contaminant Enrichment: a Cross-system Overview. *International Review Hydrobiology*, 76:327-337
- Werner D. 1977. *The biology of Diatoms*. University of California Press, Berkeley, 498 pp.
- Wild-Allen K., Herzfeld M., Thompson P.A., Rosebrock U., Parslow J., Volkman J.K. 2010. Applied coastal biogeochemical modelling to quantify the environmental impact of fish farm nutrients and inform managers. *Journal of Marine Systems*, 81:134-47
- Wu P., Haines K. 1996. Modelling the dispersal of Levantine Intermediate Water and its role in Mediterranean deep water formation *Journal of Geophysical Research*, 101, pp.6591–6607
- Yentsch C.S., Menzel D.W. 1963. A method for the determination of phytoplankton chlorophyll and phaeophytin by fluorescence. *Deep Sea Research*, 10:221-231

- Yeroulanos L.B. 2010. Synthesis of Mediterranean marine finfish aquaculture- a marketing and promotion strategy, FAO, Rome
- Yucel-Gier G., Uslu O., Bizsel N. 2008. Effects of marine fish farming on nutrient composition and plankton communities in Eastern Aegean Sea. *Aquaculture Research*, 39:181-194
- Zavatarelli M., Mellor G.L. 1995. A numerical study of the Mediterranean Sea circulation. *Journal of Physical Oceanography*, 25(6):1384-1414
- Zavatarelli M., Pinardi N. 1995. The Adriatic Sea general circulation: modelling with the Princeton Ocean Model. *Annales Geophysicae*;13 (suppl. 2), C251
- Zervakis V., Kalampokis A., Kakagiannis G., Georgakarakos S., Saridakis J. 2009. Low-cost drifters for coastal use. In: *Proceedings, 9th Hellenic Symposium of Oceanography and Fisheries*, Hellenic Centre for Marine Research, Patras, 13–16 May, pp. 333–337
- Zodiatis G., Theodorou A., Demetropoulos A. 1998. Hydrography and circulation south of Cyprus in late summer 1995 and in spring 1996. *Oceanologica Acta*, 21:447–58
- Zodiatis G., Drakopoulos P., Brenner S., Groom S. 2005. Variability of the Cyprus warm core Eddy during the CYCLOPS project. *Deep-Sea Research II*, 52:2897–2910
- Zohary T., Robarts R.D. 1998. Experimental study of microbial P limitation in the eastern Mediterranean. *Limnology & Oceanography*, 43:387-395
- Τσαπάκης Μ. 2008. Κατασκευή ισοζυγίου μάζας Φωσφόρου, Αζώτου και Άνθρακα. Παραδοτέο 1.4.3 «Σύστημα Εκτίμησης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων από τις Ιχθυοκαλλιέργειες (AQUA-PLANNER)»
- Ζερβάκης Β., Κακαγιάννης Γ., Κοκκίνη Ζ. 2008. Μελέτη θαλάσσιας κυκλοφορίας στην περιοχή Αγριλιού Λέσβου. Παραδοτέο 1.1.1 «Σύστημα Εκτίμησης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων από τις Ιχθυοκαλλιέργειες (AQUA-PLANNER)»