



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΛΟΓΙΑΣ

Διδακτορική Διατριβή

**Μελέτη των επιπτώσεων του ευτροφισμού
στην οικολογική κατάσταση και τις
οικοσυστημικές λειτουργίες του βένθους**

Παναγιώτης Δημητρίου-Νικολάκης

Ηράκλειο, 2016



University of Crete
-Department of Biology-

PhD thesis

**Effects of eutrophication on the benthic
ecological status and ecosystem functions**

Panagiotis Dimitriou-Nikolakis

Heraklion, 2016

Εξεταστική επιτροπή

Επιβλέπων καθηγητής

Ιωάννης Καρακάσης (*Καθηγητής Πανεπιστημίου Κρήτης*)

Μέλη τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής

Χρήστος Αρβανιτίδης (*Ερευνητής Β' Ινστιτούτου Θαλάσσιας Βιολογίας,
Γενετικής και Υδατοκαλλιεργειών Ελληνικού
Κέντρου Θαλάσσιων Ερευνών*)

Παρασκευή Πίττα (*Ερευνήτρια Β' Ινστιτούτου Ωκεανογραφίας Ελληνικού
Κέντρου Θαλάσσιων Ερευνών*)

Μέλη εξεταστικής επιτροπής

Γεώργιος Κουμουνδούρος (*Αναπληρωτής καθηγητής Πανεπιστημίου Κρήτης*)

Κωνσταντία Λύκα (*Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Πανεπιστημίου Κρήτης*)

Άρτεμις Νικολαΐδου (*Καθηγήτρια Πανεπιστημίου Αθηνών*)

Νομική Σύμπουρα (*Ερευνήτρια Β' Ινστιτούτου Ωκεανογραφίας Ελληνικού
Κέντρου Θαλάσσιων Ερευνών*)

Η μελέτη πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του προγράμματος «**HYPOXIA**» (www.marine-hypoxia.eu) που χρηματοδοτήθηκε στο πλαίσιο της Πράξης «**ΑΡΙΣΤΕΙΑ II**» του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο-ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους.

Η μελέτη συγχρηματοδοτήθηκε από το πρόγραμμα «**Lifewatch Greece**» (www.lifewatchgreece.eu), Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Ανταγωνιστικότητα και επιχειρηματικότητα (ΕΠΑΝ II), το οποίο συγχρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο-ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους.



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



Η μελέτη υποστηρίχθηκε από τον σύνδεσμο υποτροφιών του ιδρύματος “**The A.G. Leventis Foundation**” με την χορήγηση υποτροφίας για τρία ακαδημαϊκά έτη, 2012-2015.



A.G. Leventis Foundation
Ίδρυμα Α. Γ. Λεβέντη

Περιεχόμενα

1. Γενική Εισαγωγή	1
1.1 Ευτροφισμός και υποξία	1
1.2 Πελαγικά συστήματα και ευτροφισμός	3
1.3 Βενθική πανίδα και ευτροφισμός	4
1.4 Στόχοι Εργασίας	8
2. Ένα βήμα μπροστά: Σύζευξη βενθικού και πελαγικού συστήματος και δείκτες οικολογικής κατάστασης	10
2.1 Περίληψη	10
2.2 Εισαγωγή	11
2.3 Υλικά και μέθοδοι	14
2.3.1. Περιγραφή συνόλου δεδομένων	14
2.3.2 Δείκτες ποικιλότητας και οικολογικής κατάστασης	16
2.3.3 Στατιστική ανάλυση	17
2.4 Αποτελέσματα	20
2.5 Συζήτηση	28
3. Μία καινοτόμος πειραματική διάταξη μεσόκοσμων κατάλληλη για πειράματα σύζευξης βενθικού–πελαγικού οικοσυστήματος	32
3.1 Περίληψη	32
3.2 Εισαγωγή	32
3.3 Υλικά και μέθοδοι	36
3.3.1 Σχεδιασμός Μεσόκομων	36
3.3.2 Δειγματοληψία νερού	39
3.3.3 Δειγματοληψία ιζήματος	39
3.3.4 Χρήση της πειραματικής διάταξης	41
3.3.5 Μεταβλητές και πρωτόκολλα ανάλυσης	43
3.3.6 Στατιστική ανάλυση	44
3.4 Αποτελέσματα	45
3.4.1 Στήλη του νερού	45
3.4.2 Ιζημα	48
3.5 Συζήτηση	51
4. Μελέτη της σύζευξης βενθικού – πελαγικού οικοσυστήματος μέσω ενός πειράματος μεσόκοσμων: Χρονικές υστερήσεις και αλλαγή καθεστώτος	54
4.1 Περίληψη	54

4.2 Εισαγωγή.....	55
4.3 Υλικά και μέθοδοι.....	57
4.3.1 Πειραματική διάταξη.....	57
4.3.2 Δειγματοληψίες και εργαστηριακές αναλύσεις.....	57
4.3.3 Στατιστικές αναλύσεις	60
4.4 Αποτελέσματα	61
4.4.1 Στήλη του νερού.....	61
4.4.2 Ιζημα.....	67
4.4.3 Αποτελέσματα ανάλυσης Cross-correlation.....	71
4.4.4 Πολυμεταβλητές αναλύσεις.....	73
4.4.5 Συζήτηση.....	74
5. Απόκριση της μακροπανίδας σε ευτροφικές συνθήκες σε ένα πείραμα μεσόκοσμων: η ελαστικότητα του οικοσυστήματος αποτρέπει την δημιουργία υποξίας	79
5.1 Περίληψη.....	79
5.2 Εισαγωγή.....	80
5.3 Υλικά και μέθοδοι.....	81
5.4 Αποτελέσματα	83
5.5 Συζήτηση.....	90
6. Γενική συζήτηση.....	95
6.1 Σύγκριση μεθοδολογικών προσεγγίσεων.....	95
6.2 Προσδιορισμός κρίσιμης τιμής έντασης ευτροφισμού	96
6.3 Διαφοροποίηση φυσικής / συνεχούς και τεχνητής / έντονης και σύντομης διατάραξης.....	98
6.4 Ολιγοτροφοποίηση του συστήματος και βελτίωση οικολογικής κατάστασης.....	99
7. Βιβλιογραφία	101

Πρόλογος

Η παρούσα διατριβή εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Θαλάσσιας Οικολογίας του τμήματος Βιολογίας του Πανεπιστημίου Κρήτης σε συνεργασία με το ινστιτούτο ωκεανογραφίας του Ελληνικού Κέντρου Θαλασσίων Ερευνών.

Όταν πριν από περίπου 8 χρόνια ξεκίνησα, ως προπτυχιακός φοιτητής, να δουλεύω στο εργαστήριο Θαλάσσιας Οικολογίας υπό τον καθηγητή Ι. Καρακάση δεν μπορούσα με τίποτα να φανταστώ ότι μία μέρα θα βρισκόμουν στην θέση να γράψω τον πρόλογο του διδακτορικού μου. Θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για όλα αυτά τα χρόνια εξαιρετικής συνεργασίας μας, από την στιγμή που με δέχτηκε στην ερευνητική του ομάδα ως σήμερα. Μου πρόσφερε την ευκαιρία, όχι μόνο μίας διατριβής, αλλά και την δυνατότητα να γνωρίσω και να ασχοληθώ με πολλούς και διαφορετικούς τομείς της θαλάσσιας οικολογίας. Ήταν πάντα δίπλα μου, έτοιμος να προσφέρει βοήθεια επιστημονική και όχι μόνο, στηρίζοντάς με σε κάθε βήμα.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον ερευνητή Β' Δρ. Χ. Αρβανιτίδη για την άψογη επιστημονική μας συνεργασία τα τελευταία χρόνια όχι μόνο στα πλαίσια της διατριβής μου αλλά και σε άλλες εργασίες. Ήταν πάντα έτοιμος να προσφέρει την απαραίτητη επιστημονική αλλά και «ψυχολογική» ώθηση που χρειάζεται ένας υποψήφιος διδάκτορας. Θα ήθελα επίσης να τον ευχαριστήσω για την οικονομική στήριξη στην διάρκεια του διδακτορικού και την ευκαιρία να δουλέψω σε ένα αρκετά διαφορετικό αντικείμενο.

Θέλω επίσης να ευχαριστήσω την ερευνήτρια Β' Δρ. Π. Πήττα για την επιστημονική της βοήθεια στα πλαίσια των πειραμάτων μεσόκοσμων, την πολύ προσεκτική και υπομονετική της διόρθωση σε όλα μου τα κείμενα (paper και διατριβή), αλλά κυριότερα γιατί υπήρξε μία «μπτρική» φιγούρα έτοιμη να βοηθήσει, να μαλώσει και να στηρίξει.

Ευχαριστώ θερμά και τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, Απαπλ. Καθ. Γ. Κουμουندούρο, Απαπλ. Καθ. Κ. Λύκα, Καθ. Α. Νικολαΐδου, Ερευν. Β' Ν. Σύμπουρα, για τις διορθώσεις και τις εύστοχες παρατηρήσεις τους πάνω στο γραπτό κείμενο τη διατριβής μου οι οποίες συνέβαλαν στη βελτίωση του τελικού κειμένου.

Η ολοκλήρωση της διατριβής δεν θα ήταν δυνατή χωρίς την βοήθεια της Δρ. Ν. Παπαγεωργίου την οποία θέλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερα για όλο τον χρόνο που αφιέρωσε στην εκπαίδευσή μου από προπτυχιακό φοιτητή ως σήμερα. Γνωρίζω ότι της έχω κοστίσει ένα σημαντικό μέρος του χρόνου της και ελπίζω να μπορέσω στο μέλλον να της τον ανταποδώσω.

Πρόλογος

Θερμές ευχαριστίες αξίζουν επίσης σε όλα τα μέλη του εργαστηρίου Θαλάσσιας Οικολογίας του Π.Κ. Β. Καλογεροπούλου, Ε. Τσικοπούλου, Μ. Μωραΐτη, Α. Γερόπουλο, καθώς και στις Ι. Σαντή, Α. Τσιώλα και Ι. Καλατζή για την βοήθειά τους στα πειράματα μεσόκοσμων, τις λοιπές μας επιστημονικές συνεργασίες, τα ταξίδια, τις καρές και τις λύπες της καθημερινότητας οι οποίες κάνουν την ζωή του υπ. διδάκτορα ομορφότερη.

Ευχαριστώ επίσης τους υπόλοιπους ερευνητές, τεχνικούς και φοιτητές του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. που συμμετείχαν στην διεξαγωγή του πειράματος των μεσόκοσμων, Μ. Καγιώργη, Μ. Κανελλοπούλου, Σ. Ντελιμπέρτο, Ελένη Δαφνομήλη, την Snezana Zivanovic, Γ. Πιπεράκη και αρκετούς ακόμα. Ευχαριστώ επίσης και τα μέλη της ομάδας του Lifewatch και του εργ. Βιοποικιλότητας του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. για την άψογη συνεργασία που έχουμε ως τώρα.

Κλείνοντας, θέλω να αφιερώσω την παρούσα διατριβή στην οικογένεια μου μαζί με ένα τεράστιο ευχαριστώ για την στήριξή τους, στην αδερφή μου την Ιωάννα μαζί με τις ευχαριστίες για την μεγάλη βοήθειά της στα γραφιστικά και καλλιτεχνικά ζητήματα και τέλος στην Καλλιρόνη που στάθηκε δίπλα μου και υπέμεινε την γκρίνια μου και τα προβλήματά μου όλα αυτά τα χρόνια.

Περίληψη

Ο ευτροφισμός είναι ένα από τα πλέον ορατά παραδείγματα των ανθρωπογενών αλλαγών στην βιόσφαιρα, επηρεάζοντας υδατικά οικοσυστήματα από την Αρκτική ως την Ανταρκτική. Η αύξηση της πρωτογενούς παραγωγής έχει ως αποτέλεσμα την συσσώρευση σωματιδιακής οργανικής ύλης (Particulate Organic Mater - POM) στην στήλη του νερού, η οποία καθιζάνοντας προς το ίζημα αυξάνει το οργανικό υλικό στο βένθος, ευνοώντας την μικροβιακή δραστηριότητα και την κατανάλωση του οξυγόνου στο βενθικό οριακό στρώμα του νερού. Η ευρωπαϊκή οδηγία για τα ύδατα απαιτεί την επίτευξη «καλής οικολογικής κατάστασης», τόσο στην στήλη του νερού όσο και στο βένθος μέχρι το 2015 και η ευρωπαϊκή οδηγία για την θαλάσσια στρατηγική έχει οδηγήσει στην δημιουργία νομοθετικών ρυθμίσεων για την προστασία του υδάτινου περιβάλλοντος από τον ευτροφισμό. Σε αυτά τα πλαίσια, η μακροπανίδα αποτελεί αξιόπιστο δείκτη και χρησιμοποιείται ευρέως για τον χαρακτηρισμό της κατάστασης του οικοσυστήματος και κατά συνέπεια της παρακολούθησης των επιπτώσεων του ευτροφισμού στο παράκτιο οικοσύστημα.

Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν δύο ανεξάρτητες προσεγγίσεις: (i) μετα-ανάλυση δεδομένων προκειμένου να εντοπιστούν ομοιότητες και διαφορές στην συμπεριφορά των βενθικών συστημάτων ανάλογα με την ένταση του ευτροφισμού και (ii) πειράματα μεσόκοσμων τα οποία δίνουν τη δυνατότητα αφενός εκτροπής του συστήματος σε βαθμό που είναι πολύ δύσκολο να γίνει στο πεδίο και αφετέρου μελέτης της εξέλιξης του φαινομένου στο χρόνο, μέχρι το σημείο της αλλαγής καθεστώτος.

Στην πρώτη προσέγγιση, συγκεντρώθηκε ένας μεγάλος αριθμός δεδομένων από την ανατολική Μεσόγειο και αναλύθηκε με σκοπό την διερεύνηση της σχέσης μεταξύ μεταβλητών της στήλης του νερού και της δομής της μακροβενθικής πανίδας. Τα αποτελέσματα έδειξαν μία ισχυρή ποσοτική σχέση μεταξύ των μεταβλητών της στήλης του νερού (συγκέντρωση χλωροφύλλης a και Eutrophication Index) και διάφορων δεικτών ποικιλότητας και οικολογικής κατάστασης, με βάση την μακροπανίδα. Το ποσοστό των βενθικών ευκαιριακών ειδών εμφανίζεται επαυξημένο σημαντικά σε ευτροφικούς σταθμούς, όπως επίσης και η ένταση της σύζευξης μεταξύ των δεικτών ευτροφισμού και βενθικής οικολογικής κατάστασης. Η τιμή του δείκτη Eutrophication Index (0,85), που διαχωρίζει την «Κακή-Φτωχή» από την «Μέτρια έως Υψηλή» οικολογική κατάσταση φαίνεται ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κρίσιμη τιμή, πάνω από την οποία επέρχεται σημαντική μεταβολή στην δομή των βενθικών κοινοτήτων.

Περίληψη

Για τις ανάγκες των πειραμάτων αναπτύχθηκε μία καινοτόμος πειραματική διάταξη μεσόκοσμων (εγκλεισμένο πειραματικό οικοσύστημα), η οποία περιέχει ταυτόχρονα στήλη νερού και ίζημα, κατάλληλη για πειράματα σύζευξης βενθικού – πελαγικού οικοσυστήματος. Η παρουσία μεγάλου όγκου νερού ($> 1,5 \text{ m}^3$), με επαρκές βάθος στην στήλη και μεγάλη ποσότητα ιζήματος στον βυθό (30 cm ύψος, 80 l όγκος), προσφέρει νέες πειραματικές δυνατότητες. Η πειραματική εγκατάσταση περιλαμβάνει έναν κυλινδρικό σάκο μεσόκοσμου, έναν δακτύλιο σταθεροποίησης στο επάνω μέρος και ένα δοχείο ιζήματος στο κάτω. Περιλαμβάνει επίσης παγίδες ιζήματος, ένα αυτόνομο σύστημα δειγματοληψίας νερού σε ορισμένα βάθη καθώς και ένα δειγματολήπτη ιζήματος, κατάλληλο για συλλογή ιζήματος χωρίς να διαταράσσεται η στήλη του νερού. Στις εγκαταστάσεις του Ελληνικού Κέντρου Θαλασσίων Ερευνών επωάστηκαν 9 μεσόκοσμοι, με 4.5 m βάθος, $1,5 \text{ m}^3$ όγκο παράκτιου νερού και στον πυθμένα, 85 l αδιατάραχτο ίζημα, που συλλέχθηκε από μία περιοχή με περιορισμένη ανθρωπογενή επίδραση, στο λιμάνι του Ηρακλείου Κρήτης. Δημιουργήθηκε μία διαβάθμιση έντασης ευτροφισμού με μηδενική (μάρτυρας), χαμηλή και υψηλή προσθήκη θρεπτικών. Το πείραμα διήρκεσε 58 ημέρες και μεταβλητές της στήλης του νερού και του ιζήματος μετρήθηκαν σε τακτά χρονικά διαστήματα.

Τα αποτελέσματα του πειράματος δείχνουν ότι η καθίζηση οργανικού υλικού λόγω του ευτροφισμού επηρέασε τις βιογεωχημικές μεταβλητές του ιζήματος, αλλά στις περισσότερες περιπτώσεις, παρατηρήθηκε μία χρονική υστέρηση μεταξύ της κατάστασης στην στήλη του νερού και της απόκρισης του ιζήματος. Επιπροσθέτως, στην υψηλή προσθήκη, το σύστημα δεν επέστρεψε στις αρχικές συνθήκες μέσα στην χρονική διάρκεια του πειράματος, σε αντίθεση με την χαμηλή προσθήκη όπου το σύστημα παρουσίασε σημάδια ανάκαμψης. Επιπροσθέτως, στο τέλος του πειράματος συλλέχθηκε από κάθε μεσόκοσμο ένα δείγμα μακροπανίδας (τελικές συνθήκες), τα οποία συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα δείγματα που συλλέχθηκαν στην περιοχή του λιμανιού (αρχικές συνθήκες). Τα αποτελέσματα έδειξαν στατιστικά σημαντικές διαφορές της υψηλής προσθήκης, ως προς την σύνθεση της βιοκοινότητας, οικολογικής κατάστασης και οικοσυστημικών διεργασιών. Οι διαφορές οφείλονται σε ορισμένα ιζηματοφάγα είδη με μεγάλη ικανότητα βιοανάδευσης. Η απόκριση της μακροβενθικής κοινότητας στην πίεση του ευτροφισμού λειτούργησε ως ανάδραση, αμβλύνοντας τις επιπτώσεις του ευτροφισμού και προφυλάσσοντας την σταθερότητα του οικοσυστήματος.

Συνοψίζοντας, από τα αποτελέσματα της διατριβής φάνηκε ότι μία βενθική κοινότητα «καλής» οικολογικής κατάστασης έχει την ικανότητα να προσαρμόζεται στην περιβαλλοντική πίεση του ευτροφισμού μεταβάλλοντας την δομή της, διατηρώντας την

Περίληψη

βιοποικιλότητα και παράλληλα αποτρέποντας την δημιουργία συνθηκών υποξίας στο εσωτερικό του ιζήματος, αν το φαινόμενο είναι έντονο αλλά μικρής χρονικής διάρκειας. Αν η ένταση του ευτροφισμού δεν μειωθεί τότε τα βενθικά μακροπανιδικά είδη επικρατούν με αποτέλεσμα την μείωση της βιοποικιλότητας, την υποβάθμιση της οικολογικής κατάστασης και των αντίστοιχων οικοσυστημικών λειτουργιών.

Abstract

Today it is understood that eutrophication is one of the most visible examples of anthropogenic changes in the biosphere, affecting aquatic ecosystems from the Arctic to Antarctica. The increase of primary productivity leads to accumulation of particulate organic matter (POM), which settles on the sediment and encourages microbial activity and consumption of DO in bottom water. The European Water Framework Directive demands the achievement of “Good Environmental Status” from all EU member states by 2015. Additionally, the European Marine Strategy Framework Directive has led to the implementation of laws for the protection of the marine environment from eutrophication. In this context, benthic macrofauna provides a reliable indicator of ecosystem health and has been used extensively for assessing the ecological status of the ecosystem and for monitoring the effects of eutrophication on the coastal marine ecosystem.

This study adopted two different and independent methodologies: (i) meta-analysis of data in order to identify patterns in the behaviour of benthic systems related to the intensity of eutrophication and (ii) mesocosm experiments, that allow one to deflect the system from its initial conditions to an extent hard to do in nature and on the other hand to study the succession of the phenomenon over time under various conditions to the point of regime shift.

In the context of the first methodology, a large data set from the Eastern Mediterranean was analyzed to explore the relationship between water column variables and benthic community status. The results showed a strong quantitative link between the water column variables (Chlorophyll *a* and Eutrophication Index) and various indicators describing benthic diversity and community composition. The percentage of benthic opportunistic species increased significantly in the stations with high trophic status of the water column and so did the strength of the coupling between values of seawater column and benthic indicators. The Eutrophication Index threshold level of 0.85, separating the “Bad and Poor” from “Moderate to High” conditions could serve as an acceptable critical value above which there is a readily observable change in benthic community composition.

In the context of the experiments, a new mesocosm setup containing both water column and sediment suitable for benthic-pelagic coupling experiments has been developed. The presence of a large volume of water (> 1.5 m³) with sufficient depth (4 m) on the top of the sediment, combined with a large volume of sediment on the bottom (30 cm height, 80 l volume) offers new opportunities for benthic-

Περίληψη

pelagic experiments on the mesocosm scale. The experimental setup includes a mesocosm bag, a securing ring with a cap on the top, a sediment container on the bottom, sediment traps, an autonomous water sampling system at specific depths and a newly developed sediment sampler for collecting samples without disturbing the system. Nine mesocosms have been deployed in the facilities of the Hellenic Center for Marine Research in Crete, in the eastern Mediterranean. A eutrophication gradient was created by adding nutrients in the water column (Low and High) and the experiment lasted for 58 days. Water column and sediment environmental variables were measured at regular intervals.

The results indicate that sedimentation caused by eutrophication in the water column affected sediment geochemical variables but in most cases a time lag was observed between the input of the water column and the response of the sediment. Additionally, in the High eutrophication treatment several fluctuations were observed and the system did not recover within the experimental duration, as opposed to the Low treatment which showed less fluctuations and signs of recovery. Macrofaunal samples were collected at the end of the experiment from each mesocosms and were compared to the ones collected at the beginning of the experiment from the sediment collection area. Results showed significant differences of the High treatment in terms of macrofaunal species composition, ecological status and ecosystem processes. Differences in community structure were caused by deposit feeding species with high bioturbation ability. The response of benthic species to the pressure of eutrophication created a different community with high bioturbation potential, therefore preventing the creation of hypoxic conditions in the sediment, thus maintaining ecosystem health.

Concluding, from the results of the study it is possible to argue that a benthic community of "good environmental status" has the ability to buffer environmental pressure and using bioturbation and other functions provided by specific species maintain biodiversity and ecosystem health, in the case of a strong but with limited time eutrophication event. However, if eutrophic conditions persist over a long period of time, benthic opportunistic species respond and dominate the community resulting in loss of biodiversity and downgrade of benthic ecological status and functions.

1. Γενική Εισαγωγή

1.1 Ευτροφισμός και υποξία

Ο ευτροφισμός, μέχρι πριν περίπου 30 χρόνια, αντιμετωπιζόταν μόνο ως πρόβλημα των λιμναίων συστημάτων καθώς η θάλασσα λόγω του μεγέθους της και των ρυθμών ανανέωσης των υδάτων, δεν θεωρούταν πιθανό να εμφανίσει προβλήματα ευτροφισμού (Jorgensen & Richardson 1996). Έτσι, μέχρι πρόσφατα, η κυρίως γνώση για τον ευτροφισμό βασιζόταν σε λιμνολογικές παρατηρήσεις και σε στατιστικά μοντέλα όπως εκείνο του Vollenweider (1976).

Σήμερα έχει γίνει κατανοητό ότι ο ευτροφισμός είναι ένα από τα πλέον ορατά παραδείγματα των ανθρωπογενών αλλαγών στην βιόσφαιρα, επηρεάζοντας υδατικά οικοσυστήματα από την Αρκτική ως την Ανταρκτική (Smith & Schindler 2009), με μεγάλες οικολογικές επομένως και οικονομικές συνέπειες. Εν τούτοις πολλοί συμφωνούν (Grall & Chauvaud 2002, Petersen et al. 2008) ότι η έρευνα σε ό,τι αφορά στον θαλάσσιο παράκτιο ευτροφισμό, παρά τις πρόσφατες ανακαλύψεις, βρίσκεται ακόμη στην αρχή της ενώ υπάρχουν περιθώρια για ένα νέο υπόδειγμα-παράδειγμα (paradigm) (Duarte 2009) που θα βασίζεται στην αλληλεπίδραση των συστατικών ενός πολύπλοκου συστήματος, όπως είναι το παράκτιο θαλάσσιο οικοσύστημα.

Οι «νεκρές ζώνες» (οριζόμενες από τους συγγραφείς, ως περιοχές στις οποίες απουσιάζουν οργανισμοί μεγαλύτεροι από 1 mm όπως μεγάλοι μακροπανιδικοί οργανισμοί, βενθικά ψάρια κ.α.) στα παράκτια έχουν επεκταθεί εκθετικά από την δεκαετία του 1960, με πολύ σοβαρές επιπτώσεις στη λειτουργία των οικοσυστημάτων (Diaz & Rosenberg 2008). Πρόκειται για περιοχές με υποξία, δηλαδή πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις διαλελυμένου οξυγόνου (DO) και τυπικά στερούμενες κινητικής πανίδας, η οποία τρέπεται σε φυγή μόλις ανιχνεύσει προβλήματα οξυγόνου, όθεν και ο όρος. Ο σχηματισμός τους έχει επεκταθεί από την αύξηση της πρωτογενούς παραγωγής και τον επακόλουθο παράκτιο ευτροφισμό που τροφοδοτείται από τις απορροές λιπασμάτων και την καύση ορυκτών καυσίμων. Η αύξηση της πρωτογενούς παραγωγής έχει ως αποτέλεσμα την συσσώρευση σωματιδιακής οργανικής ύλης (Particulate Organic Mater - POM) στην στήλη του νερού, που με την

Κεφάλαιο 1: Γενική Εισαγωγή

σειρά της, ευνοεί την μικροβιακή δραστηριότητα και την κατανάλωση του DO στο νερό του βυθού. Οι Diaz and Rosenberg (2008) αναφέρουν ότι οι νεκρές ζώνες έχουν βρεθεί σε περισσότερα από 400 συστήματα επηρεάζοντας συνολική επιφάνεια 245000 km². Σύμφωνα με τους Rabalais et al. (2009), στο σύνολο των εκβολικών συστημάτων (estuaries) των ΗΠΑ, υποξία παρουσίαζε το 37% την 10ετία του 1980, για να ανέλθει στο 52% και 64% τις 10ετίες του 1990 και του 2000 αντίστοιχα. Παρά τον γνωστό ολιγοτροφικό της χαρακτήρα ούτε η Μεσόγειος απουσιάζει από τον κατάλογο των 400 αυτών περιοχών και μάλιστα με πάνω από 10 σημεία από τα οποία μόνο 3 στην λεκάνη της Αδριατικής.

Τυπικά, ως όριο για την υποξία χρησιμοποιείται από πολλούς στη βιβλιογραφία η τιμή 2 mg O₂ l⁻¹ (Diaz 2001). Εν τούτοις, οι Vaquer-Sunyer and Duarte (2008) αναλύοντας δεδομένα από ένα μεγάλο αριθμό εργασιών και για διάφορα θαλάσσια είδη, βρήκαν ότι υπάρχουν σημαντικές διαφορές στα όρια ανοχής των οργανισμών μεταξύ διαφορετικών ταξινομικών ομάδων και κατέληξαν ότι ο αριθμός και η έκταση των παράκτιων οικοσυστημάτων που έχουν επηρεαστεί από την υποξία έχει υποεκτιμηθεί.

Η πιο σημαντική επίπτωση των ζωνών υποξίας είναι η εκτροπή της ροής της ενέργειας με ανεπιθύμητο τρόπο μακριά από τα ανώτερα τροφικά επίπεδα. Με την απουσία των ανώτερων τροφικών επιπέδων, (της κινητικής μακρο- και μεγαπανίδας), η ενέργεια που πριν καταναλωνόταν για να συντηρήσει σύνθετα τροφικά πλέγματα, εκτρέπεται προς τα κατώτερα (μικροβιακά) τροφικά επίπεδα (Diaz 2001). Αυτή η εκτροπή της ενέργειας προς τα βακτήρια οδηγεί σε μείωση της τροφικής πολυπλοκότητας και των οικοσυστημικών υπηρεσιών που θα μπορούσαν να στηρίξουν υψηλότερα επίπεδα βιοποικιλότητας και συντήρησης ανώτερων θηρευτών. Οι Diaz and Rosenberg (2008) με συντηρητικούς υπολογισμούς ανεβάζουν την βιομάζα που χάνεται ετησίως σε αυτές τις ζώνες στα 9 εκατ. τόνους.

Όπως σημειώνουν οι (Díaz et al. 2009), η χρήση βιομηχανικών λιπασμάτων σε παγκόσμια κλίμακα και η καύση ορυκτών καυσίμων έχουν επιφέρει σοβαρές αλλαγές στον κύκλο του αζώτου μέχρι το σημείο ώστε σήμερα ο παγκόσμιος κύκλος του Αζώτου να είναι εκτός ισορροπίας όπως και ο κύκλος του άνθρακα. Φαίνεται δε ότι χρειάστηκαν >100 έτη για να

Κεφάλαιο 1: Γενική Εισαγωγή

διαταράξει ο άνθρωπος τον κύκλο του άνθρακα αλλά <50 έτη για να διαταράξει τον κύκλο του Αζώτου.

Διάφορες μελέτες έχουν δείξει ότι η απόκριση του βενθικού οικοσυστήματος στην ευτροφισμό και την υποξία υπόκειται σε σύνθετη μη γραμμική δυναμική. Αυτό είναι ιδιαίτερα εμφανές, στις περιπτώσεις εφαρμογής διαχειριστικών μέτρων, με σκοπό την μείωση των θρεπτικών στοιχείων στην στήλη του νερού (ολιγοτροφοποίηση του συστήματος), όπου ούτε η κλωροφύλλη στη στήλη επανέρχεται (Duarte 2009), ούτε το βένθος επανέρχεται πλήρως στην προ της υποξίας κατάσταση (Diaz & Rosenberg 2008). Μάλιστα, οι Duarte et al. (2009) χαρακτηρίζουν την προσδοκία για επιστροφή στην προ της υποξίας κατάσταση ως σχεδόν αδύνατη, προσομοιάζοντας την με την επιστροφή στην χώρα του Peter Pan, την Neverland (εξ ου και ο τίτλος του άρθρου τους). Αιτίες αυτής της μη γραμμικότητας είναι, σύμφωνα με τον Duarte (2009) (α) η ύπαρξη κατωφλίων (thresholds) στην εξέλιξη του φαινομένου, πέρα από τα οποία συμβαίνουν απότομες αλλαγές στην απόκριση του οικοσυστήματος, βλ την παρομοίωση με την πώση από το λόφο των Tett et al. (2013), (β) η εμφάνιση χρονικών υστερήσεων (time lags) στις αποκρίσεις λόγω της συσσώρευσης και απελευθέρωσης θρεπτικών από τα ιζήματα ή στα μακρά χρονικά διαστήματα που απαιτούνται για την ανάκαμψη ορισμένων οργανισμών με βραδεία ανάπτυξη όπως τα θαλάσσια φανερόγαμα ή (γ) λόγω αλλαγών στη βάση σύγκρισης (shifting baselines) που μεταβάλλουν την σχέση κλωροφύλλης α – θρεπτικών με το χρόνο.

1.2 Πελαγικά συστήματα και ευτροφισμός

Η απόκριση του πελαγικού συστήματος στην προσθήκη θρεπτικών έχει μελετηθεί σε πλήθος εργασιών, βλ. ανασκόπηση Legendre and Rassoulzadegan (1995). Σε μεσοκόσμους έχουν γίνει επίσης πειράματα με προσθήκη θρεπτικών και έχει επιβεβαιωθεί ένα πρότυπο διαδοχής στην άνθηση φυτοπλαγκτονικών ομάδων (McAllister et al. 1961, Parsons et al. 1978). Εν τούτοις, υπάρχει ακόμη μεγάλη αβεβαιότητα για τον ακριβή μηχανισμό μέσω του οποίου προκαλείται ευτροφισμός και ακόμη περισσότερο

τοξικές ανθήσεις φυκών (HABs) ιδιαίτερα σε ολιγοτροφικά περιβάλλοντα. Πρόσφατες έρευνες στην ανατολική Μεσόγειο έδειξαν ότι, παρά το ότι ο φωσφόρος είναι σημαντικός περιοριστικός παράγοντας η προσθήκη του στο σύστημα δεν οδήγησε σε έκρηξη της πρωτογενούς παραγωγής ούτε σε αύξηση της Χλωροφύλλης *a* στο νερό (Thingstad et al. 2005). Για να εξηγηθεί αυτό το παράδοξο, διατυπώθηκαν διάφορα σενάρια, σύμφωνα με ένα από τα οποία, τα βακτήρια προσέλαβαν τον φωσφόρο και στη συνέχεια, μέσω του ετεροτροφικού τροφικού πλέγματος και της έντονης βόσκησης από τα ετερότροφα μαστιγωτά και τα βλεφαριδωτά, ο φωσφόρος προχώρησε πολύ γρήγορα στα ανώτερα τροφικά επίπεδα δηλ. τα κωπήποδα (Pitta et al. 2005b), ενώ πρόσφατο πείραμα σε μικρόκοσμους φαίνεται να επιβεβαιώνει αυτά τα αποτελέσματα (Tsiola et al. 2015).

Αντίστοιχα αποτελέσματα βρέθηκαν από μετρήσεις πεδίου σε περιοχές αυξημένης διάθεσης θρεπτικών, όπως πχ γύρω από ιχθυοτροφεία (Pitta et al. 2005a, Pitta et al. 2006), όπου η απόκριση του πελαγικού συστήματος σε ό,τι αφορά την χλωροφύλλη ή τον Σωματιδιακού Οργανικό Άνθρακα (Particulate Organic Carbon – POC ήταν ιδιαίτερα ασθενής, παρά τις σημαντικές ποσότητες διαλυτού N και P που διατίθενται στην περιοχή. Μια εξήγηση για αυτό το παράδοξο δόθηκε μετά από πειράματα *in situ* με χρήση ημιπερατών δοχείων (dialysis bags) (Pitta et al. 2009), που έδειξαν ότι η ιδιαίτερα αποτελεσματική βόσκηση από τα βλεφαριδωτά πρωτόζωα οδηγεί την ενέργεια ταχύτατα στα υψηλότερα τροφικά επίπεδα αποφεύγοντας την συσσώρευση βιομάζας για βακτηριακή αποικοδόμηση.

1.3 Βενθική πανίδα και ευτροφισμός

Οι κοινότεροι μακροπανιδικοί οργανισμοί των θαλάσσιων μαλακών υποστρωμάτων είναι οι πολύχαιτοι δακτυλιοσκώληκες, ακολουθούμενοι από τα δίθυρα μαλάκια, τα αμφίποδα και δεκάποδα καρκινοειδή και τα εχινόδερμα (Castro & Huber 1992), με αυτό το πρότυπο να απαντάται ιδιαίτερα στην ανατολική Μεσόγειο. Κάθε μια από αυτές τις κατηγορίες επηρεάζει και επηρεάζεται από τη δομή των ιζημάτων, συμβάλλοντας στη σχέση μεταξύ της στήλης του νερού και του ιζήματος. Επίσης, διαφορετικοί τύποι ιζήματος και διαφορετικές συγκεντρώσεις οργανικού φορτίου προάγουν άλλες

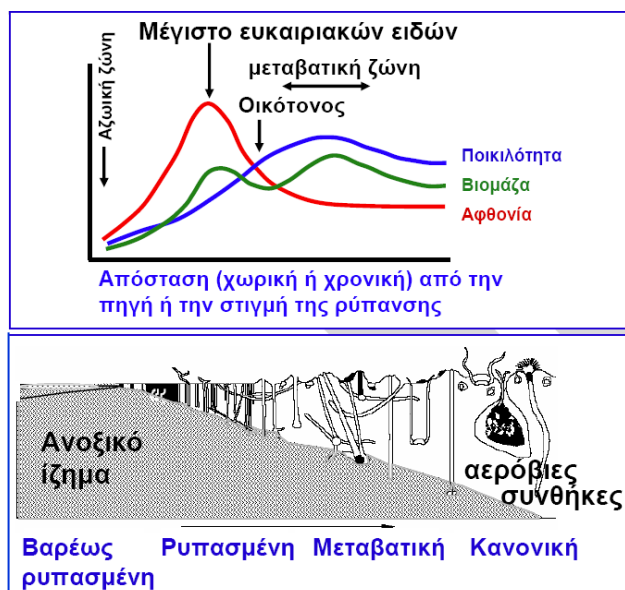
Κεφάλαιο 1: Γενική Εισαγωγή

οικοσυστημικές λειτουργίες, λόγω της πολύπλοκης σχέσης μεταξύ πανίδας και βιογεωχημείας του ιζήματος (Tomassetti & Porrello 2005).

Η μακροπανίδα αποτελεί αξιόπιστο δείκτη για τον χαρακτηρισμό της κατάστασης του οικοσυστήματος λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της. Οι μακροπανιδικοί οργανισμοί (ιδιαίτερα η ενδοπανίδα) έχουν περιορισμένη ικανότητα μετακίνησης και κατά συνέπεια μεγάλη δυνατότητα αποτύπωσης μη αναστρέψιμων αλλαγών του υδάτινου περιβάλλοντος. Παράλληλα, λόγω του αρκετά μεγάλου χρόνου ζωής τους, εκτίθενται σε χημικά και οργανικά κατάλοιπα για αρκετό διάστημα, ώστε να αποτυπώνονται στα πρότυπα διανομής τους οι επιπτώσεις των περιβαλλοντικά δυσμενών ερεθισμάτων. Τέλος, οι συναθροίσεις τους εμφανίζουν μεγάλη ποικιλότητα και κατά συνέπεια δυνατότητα απόκρισης σε διαφορετικούς τύπους καταπόνησης.

Για όλους τους παραπάνω λόγους, η πληροφορία που λαμβάνεται από το βένθος για την εν γένει κατάσταση ενός θαλάσσιου οικοσυστήματος είναι συχνά περισσότερο αξιόπιστη από μια χημική ανάλυση. Η μακροπανίδα και ιδιαίτερα τα μετρήσιμα χαρακτηριστικά της (αφθονία, ποικιλότητα, βιομάζα), αποτελεί τον πλέον διαδεδομένο δείκτη για τον χαρακτηρισμό της ποιότητας των θαλάσσιων οικοσυστημάτων σε προγράμματα περιβαλλοντικής παρακολούθησης (Gray 1981). Η απόκριση της μακροπανίδας στην περιβαλλοντική διατάραξη περιγράφηκε αρχικά από τους Pearson and Rosenberg (1978) με το εμπειρικό μοντέλο ιεραρχικής απόκρισης στην καταπόνηση και την περιγραφή του προτύπου διαδοχής της μακροπανίδας σε διαβαθμίσεις οργανικού εμπλουτισμού να έχει επιβεβαιωθεί σε εκατοντάδες εργασίες σε όλο τον κόσμο.

Κεφάλαιο 1: Γενική Εισαγωγή



Εικόνα 1.1 Μοντέλο διαδοχής του μακροβένθους συναρτήσει της απόστασης από την πηγή του οργανικού εμπλουτισμού (Pearson & Rosenberg, 1978). (α) διάγραμμα μεταβολής των κυριότερων παραμέτρων της βιοκοινότητας και (β) διαγραμματική απεικόνιση των κυριότερων ζωνών διαδοχής.

Αν και αρχικά, το μοντέλο περιγράφηκε ως απόκριση στον οργανικό εμπλουτισμό, πλέον θεωρείται ότι έχει καθολική ισχύ στα περισσότερα είδη διατάραξης (ανθρωπογενούς ή μη). Σε κοντινή απόσταση (χωρική ή χρονική) από την πηγή της διατάραξης, όπου η έντασή της είναι μέγιστη, η αφθονία της μακροπανίδας είναι σχεδόν μηδενική. Όσο αυξάνεται η απόσταση από την πηγή και οι συνθήκες αρχίζουν να βελτιώνονται, είδη, που είναι ανθεκτικά στην διατάραξη (ευκαιριακά είδη αρχικά πρώτου και στην συνέχεια δεύτερου βαθμού σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση των Glémarec and Hily (1981) εποικίζουν την περιοχή. Τα είδη αυτά, λόγω των χαρακτηριστικών τους, (r-στρατηγική: γενικευτές, μικρόσωμα, βραχύβια, ταχεία ωρίμανση, πολλοί απόγονοι, κακοί ανταγωνιστές), αυξάνουν ταχύτατα την αφθονία τους, σχηματίζοντας το μέγιστο των ευκαιριακών ειδών της Εικόνας (1.1). Οι κοινότητες που συγκροτούν χαρακτηρίζονται από μικρή ποικιλότητα και, λόγω του μικρού τους μεγέθους, από σχετικά χαμηλή βιομάζα. Με περαιτέρω απομάκρυνση από την πηγή της διατάραξης και βελτίωση των συνθηκών, τα είδη αυτά εκτοπίζονται από άλλα είδη, ευαίσθητα στην διατάραξη, (K-στρατηγική: εξειδικευτές, μεγάλο μέγεθος, λίγοι απόγονοι, ή/και γονική φροντίδα, καλοί ανταγωνιστές). Οι κοινότητες αυτές χαρακτηρίζονται από

Κεφάλαιο 1: Γενική Εισαγωγή

υψηλή ποικιλότητα και βιομάζα, με πολλούς λειτουργικούς τύπους και σύνθετες οικοσυστημικές διεργασίες. Σχετικά πρόσφατα, το γενικό αυτό πρότυπο βαθμονομήθηκε με τιμές οργανικού άνθρακα (TOC) από τους Hyland et al. (2005), χρησιμοποιώντας ένα μεγάλο σύνολο δεδομένων με παγκόσμια εξάπλωση.

Σε έντονα ευτροφικές συνθήκες, η αυξημένη παροχή ή παραγωγή οργανικής ύλης στο σύστημα οδηγεί σε αύξηση της καθίζησης POM και σταδιακά, στην μείωση του DO, και την υποξία στο βένθος. Αρχικά σημάδια είναι η μείωση του στρώματος με θετικό οξειδοαναγωγικό δυναμικό (Eh) στο ιζήμα, δηλαδή του βάθους του RPD (Redox potential discontinuity layer). Σύμφωνα με τους Gee and Warwick (1994) in Grall and Chauvaud (2002), σε συνθήκες μέτριας έντασης ευτροφισμού, η καθίζηση οργανικού υλικού μπορεί να έχει θετική επίδραση στις βενθικές κοινότητες καθώς αυξάνει την διαθεσιμότητα της τροφής και προσφέρει φυσική προστασία από θηρευτές, με συνέπεια την αύξηση της βιοποικιλότητας και της αφθονίας. Καθώς η ένταση του ευτροφισμού αυξάνει, παρατηρείται μία μεταβολή της δομής της βενθικής κοινότητας με αύξηση των ευκαιριακών ειδών r-στρατηγικής και ταυτόχρονη μείωση των ευαίσθητων ειδών K-στρατηγικής (Grall & Chauvaud 2002) και με την βιομάζα να ακολουθεί το πρότυπο των (Pearson & Rosenberg 1978). Στο τελικό στάδιο, η αύξηση του οργανικού υλικού οδηγεί σε κατάρρευση του συστήματος και σε αζωικές συνθήκες. Το μοντέλο αυτό είναι εμπειρικό και βασίζεται εξαιτίας της τάξης μεγέθους του σε παρατηρήσεις από το πεδίο (Grall & Chauvaud 2002).

Όμως, δεδομένα από πειραματικές μελέτες, εμφανίζουν αποκλίσεις από τα αναμενόμενα αποτελέσματα (αν και υπάρχει και ποσοστό συμφωνίας) (Heip et al. 1995) in Grall and Chauvaud (2002). Στην ανατολική Μεσόγειο, μελέτες σε περιβάλλοντα με οργανικό εμπλουτισμό έχουν δείξει μερικές αποκλίσεις ανάλογα με τον τύπο του ιζήματος (Karakassis et al. 2000, Parageorgiou et al. 2010). Οι διαφοροποιήσεις αυτές επιδρούν στην δυνατότητα του ιζήματος να μεταβολίσει το προσπίπτον οργανικό υλικό καθώς η βιοανάδευση από την δραστηριότητα της μακροπανίδας η οποία επιδρά στη βακτηριακή δραστηριότητα. Έτσι έχει δειχθεί, (Parageorgiou et al. 2010), ότι η αυξημένη ποικιλότητα αυξάνει τη δυνατότητα ανοργανοποίησης του αζώτου,

χρησιμοποιώντας όμως διαφορετικούς μεταβολικούς δρόμους στην περίπτωση της ιλύος, από ότι στην περίπτωση των αδρών υποστρωμάτων. Η ύπαρξη αντικρουόμενων δεδομένων υποδεικνύει την ανάγκη πειραμάτων ή/και, μεγάλης διάρκειας, μελετών που θα βοηθήσουν στον προσδιορισμό των σημαντικότερων διαδικασιών απόκρισης της βενθικής κοινότητας κατά την διάρκεια ενός γεγονότος ευτροφισμού

1.4 Στόχοι Εργασίας

Όπως σημειώνει ο Duarte (2009), η αναζήτηση αξιόπιστων δεικτών για τις επιπτώσεις του ευτροφισμού δεν πηγάζει μόνο από ακαδημαϊκό ενδιαφέρον, αλλά και από τις απαιτήσεις της νομοθεσίας όπως η ευρωπαϊκή Οδηγία Πλαίσιο για τα Ύδατα (Water Framework Directive - WFD) και η συνθήκη OSPAR. Επειδή η ανάκαμψη του συστήματος μετά την κρίση ανοξίας είναι εξαιρετικά δύσκολη, η θέσπιση ασφαλών προδιαγραφών περιβαλλοντικής ποιότητας (Environmental Quality Standards –EQS) είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την διατήρηση των αγαθών και υπηρεσιών που παρέχει στον άνθρωπο το οικοσύστημα της παράκτιας ζώνης. Η ζώνη αυτή παρουσιάζει ένα δυσανάλογο μεγάλο, για την έκτασή της μερίδιο, της παγκόσμιας πρωτογενούς παραγωγικότητας των θαλασσών, φιλοξενώντας ταυτόχρονα και την υψηλότερη βιοποικιλότητα, (από άποψη ανώτερων ταξινομικών επιπέδων), αλλά αποτελεί και τον χώρο αναπαραγωγής και στρατολόγησης για το μεγαλύτερο μέρος των θαλάσσιων οργανισμών και επομένως η υποβάθμισή της θα γίνει αντιληπτή πολύ πέραν και με οικονομικούς όρους.

Η πιο πρόσφατη από τις ευρωπαϊκές οδηγίες, η ευρωπαϊκή οδηγία για την θαλάσσια στρατηγική (Marine Strategy Framework Directive – MSFD) έχει υιοθετήσει την «οικοσυστημική προσέγγιση» και την «ολιστική διαχείριση» στην εκτίμηση των επιπτώσεων των ανθρωπογενών πιέσεων στην υγεία των οικοσυστημάτων (Tett et al. 2013). Αυτή η προσέγγιση, σε συνδυασμό με πολυάριθμες διεθνείς συμβάσεις (περιγράφονται αναλυτικά από τους Ferreira et al. (2011)), έχει οδηγήσει στην δημιουργία νομοθετικών ρυθμίσεων για την προστασία του υδάτινου περιβάλλοντος από τον ευτροφισμό. Συνέβαλαν δε

Κεφάλαιο 1: Γενική Εισαγωγή

στην μεταβολή του ορισμού του φαινομένου, από τον πιο περιγραφικό ορισμό του Nixon (1995), ως «αύξηση στον ρυθμό παραγωγής οργανικού υλικού σε ένα οικοσύστημα» (“an increase in the rate of supply of organic matter in an ecosystem”), σε έναν ορισμό που σχετίζεται περισσότερο με την πίεση και διατάραξη που προκαλεί «ευτροφισμός είναι ο εμπλουτισμός του νερού σε θρεπτικά στοιχεία που προκαλούν επιτάχυνση της ανάπτυξης φυκών και ανώτερων φυτικών μορφών ζωής, που προκαλούν ανεπιθύμητη διατάραξη στην ισορροπία των οργανισμών που βρίσκονται στο νερό και στην αντίστοιχη ποιότητα του νερού”.

Η προτεινόμενη μελέτη υιοθετεί και προσπαθεί να εφαρμόσει την οικοσυστημική προσέγγιση στη μελέτη του ευτροφισμού και των επιπτώσεών του στο βένθος. Θεωρώντας την στήλη του νερού όχι ως ξεχωριστό μέρος του οικοσυστήματος αλλά ως αναπόσπαστο κομμάτι του παράκτιου συστήματος, χρησιμοποιεί τα δεδομένα της στήλης ως μέτρο της πίεσης και της διατάραξης που ασκείται στο βένθος λόγω του ευτροφισμού. Βασίζεται στην εξέταση της απόκρισης των διαφόρων συστατικών του οικοσυστήματος στον ευτροφισμό επί μέρους, αλλά και στο σύνολο, με συνεξέταση διαφορετικών ομάδων οργανισμών, βιογεωχημικών διεργασιών και μάλιστα σε διαφορετικές κλίμακες στο χώρο και στο χρόνο έτσι ώστε να φωτιστούν διαφορετικές συμπληρωματικές όψεις του προβλήματος.

Η χρήση δύο ανεξάρτητων προσεγγίσεων (μετα-ανάλυση και πειράματα μεσόκοσμων) επιτρέπει την αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων κάθε μιας από αυτές και την υπέρβαση των περιορισμών που παρουσιάζουν οι υπόλοιπες ως προς κάποιους από τους στόχους της μελέτης. Συγκεκριμένα:

1. η μετα-ανάλυση (Ενότητα 2) συνδυάζει ένα μεγάλο αριθμό μελετών που εστιάζονται στην διασύνδεση βενθικού-πελαγικού συστήματος στην παράκτια ζώνη προκειμένου να εντοπίσει διαφορές και ομοιότητες στην συμπεριφορά των συστημάτων ανάλογα με τα φυσικά χαρακτηριστικά των ενδιαιτημάτων και την ένταση των φαινομένων.
2. τα πειράματα μεσόκοσμων (Ενότητες 3,4,5) δίνουν τη δυνατότητα αφενός εκτροπής του συστήματος σε βαθμό που είναι πολύ δύσκολο να γίνει στο πεδίο και αφετέρου μελέτης της εξέλιξης του φαινομένου στο χρόνο, μέχρι το σημείο της αλλαγής καθεστώτος.

2. Ένα βήμα μπροστά: Σύζευξη βενθικού και πελαγικού συστήματος και δείκτες οικολογικής κατάστασης¹

2.1 Περίληψη

Ένας μεγάλος αριθμός δεδομένων από την ανατολική Μεσόγειο αναλύθηκε με σκοπό την διερεύνηση της σχέσης μεταξύ μεταβλητών της στήλης του νερού και της δομής της μακροβενθικής πανίδας. Τα αποτελέσματα έδειξαν μία ισχυρή ποσοτική σχέση μεταξύ των μεταβλητών της στήλης του νερού (συγκέντρωση κλωροφύλλης *a* και Eutrophication Index) και διάφορων δεικτών ποικιλότητας και οικολογικής κατάστασης, με βάση την μακροπανίδα. Το ποσοστό των βενθικών ευκαιριακών ειδών εμφανίζεται επαυξημένο σημαντικά σε ευτροφικούς σταθμούς, όπως επίσης και η ένταση της σύζευξης μεταξύ των δεικτών ευτροφισμού και βενθικής οικολογικής κατάστασης. Η τιμή του Eutrophication Index (0,85), που διαχωρίζει την «Κακή-Φτωχή» από την «Μέτρια έως Υψηλή» οικολογική κατάσταση φαίνεται ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κρίσιμη τιμή, πάνω από την οποία επέρχεται σημαντική μεταβολή στην δομή των βενθικών κοινοτήτων.

¹ Δεδομένα από το κεφάλαιο αυτό έχουν δημοσιευτεί στην εργασία: Dimitriou PD, Papageorgiou N, Arvanitidis C, Assimakopoulou G, Pagou K, Papadopoulou KN, Pavlidou A, Pitta P, Reizopoulou S, Simboura N, Karakassis I (2015). One Step forward: Benthic Pelagic Coupling and Indicators for Environmental Status. PLoS ONE 10(10). [doi:10.1371/journal.pone.0141071](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0141071).

2.2 Εισαγωγή

Το φαινόμενο του ευτροφισμού έχει αναγνωριστεί ως ένας σημαντικός ανθρωπογενής παράγων αλλαγής της κατάστασης των υδάτινων οικοσυστημάτων, από την Αρκτική ως την Ανταρκτική (Smith & Schindler 2009), με εκτεταμένες οικολογικές και οικονομικές συνέπειες. Στο πλαίσιο της ευρωπαϊκής οδηγίας για τα ύδατα (Water Framework Directive - WFD) και της ευρωπαϊκής οδηγίας για την θαλάσσια στρατηγική (Marine Strategy Framework Directive - MSFD), έχουν προταθεί πολυάριθμοι δείκτες και μεθοδολογίες, που εφαρμόζονται σε μετρήσεις που αφορούν είτε τη στήλη του νερού είτε το ίζημα, οι οποίες μπορούν να χαρακτηρίσουν την οικολογική κατάσταση μίας περιοχής (Birk et al. 2012). Παρόλο τον μεγάλο αριθμό των διαθέσιμων εργαλείων, δεν υπάρχουν αρκετές μελέτες που να εξετάζουν την αλληλεπίδραση και την πιθανή συμμεταβολή δεικτών της στήλης του νερού και του ιζήματος, ειδικότερα υπό την επίδραση του ευτροφισμού, ο οποίος επηρεάζει και τα δύο μέρη του οικοσυστήματος.

Οι Kitsiou and Karydis (2011) αναφέρουν ότι, παρόλο που υπάρχει η τάση να αυξάνεται ο αριθμός των μεταβλητών που χρησιμοποιούνται στην ποσοτική αξιολόγηση του ευτροφισμού, είναι αμφίβολο αν τελικά αυτό είναι απαραίτητο. Αντιθέτως, αναφέρουν ότι ο αριθμός των μεταβλητών είναι σχετικά περιορισμένος και περιλαμβάνει τις συγκεντρώσεις θρεπτικών στοιχείων (ανόργανο άζωτο και φωσφόρος) καθώς και παραγωγή οργανικού υλικού ως συγκέντρωση κλωροφύλλης *a* ή αφθονία-βιομάζα φυτοπλαγκτού.

Σε αυτό το πλαίσιο, έχουν προταθεί αρκετοί δείκτες για τον χαρακτηρισμό της τροφικής κατάστασης του νερού μίας περιοχής. Βασίζονται είτε σε αβιοτικούς παράγοντες, όπως η αναλογία N/P (Ryther & Dunstan 1971) είτε στις συγκεντρώσεις των θρεπτικών στοιχείων (Karydis et al. 1983, Giovanardi & Tromellini 1992, Ignatiades et al. 1992). Με βάση την συγκέντρωση της κλωροφύλλης *a* στην στήλη του νερού ο Karydis (1999) δημιούργησε μία κλίμακα ευτροφισμού προσαρμοσμένη στα ελληνικά ύδατα. Περιελάμβανε 4 επίπεδα: ευτροφική κατάσταση, υψηλή μεσοτροφική, χαμηλή μεσοτροφική και ολιγοτροφική. Η συγκεκριμένη κλίμακα τροποποιήθηκε από τους Simboura et al. (2005), έτσι ώστε να συμφωνεί με τις επιταγές της

Κεφάλαιο 2: Σύζευξη βενθικού και πελαγικού συστήματος και δείκτες οικολογικής κατάστασης

Ευρωπαϊκής Οδηγίας για τα ύδατα, που προβλέπει 5 επίπεδα στην κλίμακα. Η νέα κλίμακα χαρακτηρίζει την οικολογική κατάσταση του νερού μίας περιοχής με βάση την συγκέντρωση της κλωροφύλλης *a* ως εξής: <0,1 $\mu\text{g L}^{-1}$ «Υψηλή», 0.1–0.4 $\mu\text{g L}^{-1}$ «Καλή», 0.4–0.6 $\mu\text{g L}^{-1}$ «Μέτρια», 0.6–2.21 $\mu\text{g L}^{-1}$ «Φτωχή» και $\geq 2.21 \mu\text{g L}^{-1}$ «Κακή».

Δύο πολυμετρικοί δείκτες για τον χαρακτηρισμό της οικολογικής κατάστασης του νερού έχουν προταθεί τα τελευταία χρόνια για την Μεσόγειο Θάλασσα: ο δείκτης Trophic Index (TRIX) (Vollenweider et al. 1998) και ο Eutrophication Index (E.I.) (Primpas et al. 2010). Και οι δύο αποτελούν ένα γραμμικό συνδυασμό των λογαρίθμων των συγκεντρώσεων θρεπτικών στοιχείων, συγκέντρωσης κλωροφύλλης-*a* και στην περίπτωση του TRIX και συγκέντρωσης Οξυγόνου.

Από την άλλη, η μακροπανίδα έχει καθιερωθεί ως ένα πολύ σημαντικό εργαλείο περιβαλλοντικής παρακολούθησης, ιδιαίτερα με την χρήση βιοτικών δεικτών, που έχουν δημιουργηθεί γι' αυτό το σκοπό όπως οι δείκτες AMBI και M-AMBI (Borja et al. 2000, Muxika et al. 2007), BQI (Rosenberg et al. 2004, Leonardsson et al. 2009), BQI-Family (Dimitriou et al. 2012), BENTIX (Simboura & Zenetos 2002), BOPA (Dauvin & Ruellet 2007), οι οποίοι έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς στα πλαίσια της ευρωπαϊκής οδηγίας για τα ύδατα σε διαφορετικές συνθήκες διατάραξης, μεταξύ αυτών και ο ευτροφισμός.

Η προσπάθεια ανάπτυξης ποσοτικών μοντέλων και σχέσεων σύζευξης πελαγικού και βενθικού οικοσυστήματος έχει αντιμετωπίσει δυσκολίες (Graf 1992). Τα περισσότερα μοντέλα που έχουν προταθεί σχετίζουν την πρωτογενή παραγωγή με τον ρυθμό κατανάλωσης του Οξυγόνου στο ίζημα (Vaquer-Sunyer & Duarte 2008), με την οργανική ύλη (Müller & Suess 1979, Brady et al. 2013) και άλλες βιογεωχημικές μεταβλητές (Grangeré et al. 2012). Όμως, η ποσοτικοποίηση της σχέσης και ο προσδιορισμός ενός σημείου πέρα από το οποίο υπάρχουν έντονες μεταβολές στην οικολογική κατάσταση του ιζήματος δεν έχουν γίνει, με εξαίρεση την μελέτη Comprehensive Studies for the Purposes of Article 6 of Directive 91/271 EEC (CSTT 1997), η οποία αναφέρει ότι μία συγκέντρωση κλωροφύλλης *a* στην στήλη μεγαλύτερη από 10 mg m^{-3} , κατά τους θερινούς μήνες, θα ήταν ικανή να προκαλέσει συνθήκες ανοξίας στο ίζημα. Αυτή η τιμή, αν και έχει αναδημοσιευτεί εκτενώς, αποτελεί κατά βάση

Κεφάλαιο 2: Σύζευξη βενθικού και πελαγικού συστήματος και δείκτες οικολογικής κατάστασης

μία υποκειμενική εκτίμηση η οποία δεν βασίζεται σε κάποια πειραματικά δεδομένα. Ακόμα και η συγκέντρωση του οξυγόνου, κάτω από την οποία δημιουργούνται υποξικές συνθήκες (2 mg l^{-1}) (Diaz 2001), μπορεί να ποικίλλει μεταξύ διαφορετικών βενθικών οργανισμών (Vaquer-Sunyer & Duarte 2008).

Όπως προαναφέρθηκε, οι βενθικοί δείκτες θεωρείται ότι εκφράζουν αξιόπιστα την οικολογική κατάσταση της περιοχής. Σε έντονα ευτροφικές συνθήκες, η καθίζηση οργανικής ύλης και η αντίστοιχη αύξηση της οργανικής ύλης στο ίζημα επιβαρύνουν την οικολογική κατάσταση υποβιβάζοντας την τιμή των βενθικών δεικτών προς την κακή οικολογική κατάσταση. Σε αυτό το πλαίσιο θα ήταν χρήσιμο να διερευνηθεί ποια ένταση ευτροφισμού (και των σχετιζόμενων μεταβλητών) θα μπορούσε να μεταβάλει την οικολογική κατάσταση μιας περιοχής σε «μη αποδεκτες συνθήκες» («Κακή», «Φτωχή», «Μέτρια» οικολογική κατάσταση), σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή οδηγία για τα ύδατα, καθότι, όπως προαναφέρθηκε, η μακροπανίδα αποτελεί έναν πολύ αξιόπιστο δείκτη της οικολογικής κατάστασης. Αν υπάρχει, δηλαδή, μία σχέση πίεσης-απόκρισης μεταξύ μεταβλητών ή δεικτών της στήλης του νερού και της οικολογικής κατάστασης του βένθους. Επιπροσθέτως, αν σε αυτή την σχέση υπάρχει κάποιο κρίσιμο όριο, πέρα από το οποίο, η βενθική κοινότητα υποβαθμίζεται.

Ο στόχος αυτής της ενότητας ήταν η δημιουργία και ανάλυση ενός μεγάλου συνόλου δεδομένων από το εν γένει ολιγοτροφικό περιβάλλον της ανατολικής Μεσογείου και η διερεύνηση της σχέσης μεταξύ μεταβλητών και δεικτών της στήλης του νερού και της κατάστασης της βενθικής κοινότητας όπως αυτή εκφράζεται μέσα από τους δείκτες οικολογικής κατάστασης του βένθους. Οι υποθέσεις που εξετάζονται εδώ είναι ότι (α) αλλαγές στην τροφική κατάσταση της στήλης του νερού επηρεάζουν την δομή της βενθικής κοινότητας και κατά συνέπεια (β) ότι αλλαγές στην τροφική κατάσταση της στήλης του νερού επηρεάζουν τις τιμές των βενθικών δεικτών και κατά συνέπεια τον χαρακτηρισμό της οικολογικής κατάστασης και (γ) υπάρχει κάποια κρίσιμη τιμή έντασης ευτροφισμού πέρα από την οποία παρατηρούνται αυτές οι μεταβολές.

2.3 Υλικά και μέθοδοι

2.3.1. Περιγραφή συνόλου δεδομένων

Για την παρούσα μελέτη, συγκεντρώθηκαν δεδομένα από το Ελληνικό Κέντρο Θαλάσσιων Ερευνών και το Πανεπιστήμιο Κρήτης. Τα δεδομένα αυτά είχαν συλλεχθεί στα πλαίσια δειγματοληψιών πεδίου που έγιναν για επιστημονικούς σκοπούς ή στα πλαίσια προγραμμάτων παρακολούθησης σε διαφορετικά σημεία της ανατολικής Μεσογείου (Πίνακας 2.1).

Πίνακας 2.1. Επισκόπηση των διαφορετικών συνόλων δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη. Οι σταθμοί 1-60 προέρχονται από δεδομένα του Πανεπιστημίου Κρήτης, ενώ οι σταθμοί 61 ως 126 από το Ελληνικό Κέντρο Θαλασσίων Ερευνών.

Serial Number	Location	Sampler	Sediment type	Depth range / Average	Sampling year
1-21	Malia Bay	van Veen	Mud/Sand/Silt	10-70 / 30	1992-1993
22-37	Cephalonia, Sounio, Ithaki	VanVeen	Mud/Sand/Silt	10-40 / 30	1995-1997
38-56	Evoikos gulf, Chios, Lesbos	VanVeen	Mud/Sand/Silt	60-70 / 65	2001-2002
56-60	Cephalonia, Sounio	Corers	Sand/Mud	18-22 / 20	2006-2007
61-77	Gialova bay	VanVeen	Sand/Mud	5-10 / 6.5	1995-1996
78-83	Corfu	VanVeen	Sand	40 / 40	1990-1991
84-87	Messiniakos gulf	Ponar grab	Sand/Mud	44-52 / 51	2006
88-96	Saronikos gulf	Ponar grab	Sand/Mud	20-90 / 64	2004
97-102	Saronikos gulf	Ponar grab	Sand/Mud	20-75 / 50	2007
103-109	Malliakos gulf	Ponar grab	Sand/Mud	15-20 / 17	1994
110-116	Thermaikos gulf	Ponar grab	Mud	17-21 / 19	1996
117-120	North Evoikos gulf	Ponar grab	Sand/Mud	20-40 / 25	1997
121-126	Thermaikos gulf	Ponar grab	Mud	17-21 / 19	2003

Η βασική προϋπόθεση καταλληλότητας των δεδομένων για την παρούσα μελέτη ήταν η δειγματοληψία του νερού και του βένθους να έχει γίνει την ίδια χρονική στιγμή. Οι μετρήσεις της στήλης του νερού ήταν απαραίτητο να συμπεριλαμβάνουν συγκέντρωση χλωροφύλλης *a* καθώς και συγκεντρώσεις ανόργανων θρεπτικών αλάτων (φωσφορικά, νιτρικά, νιτρώδη, και αμμωνιακά) (PO_4^{3-} , NO_3^- , NO_2^- and NH_4^+) από δείγματα συλλεχθέντα κοντά στον πυθμένα. Επίσης, ήταν απαραίτητο, ο ευτροφισμός να είναι η μόνη πηγή διατάραξης στην περιοχή, κατά συνέπεια σταθμοί κοντά σε άλλες σημαντικές πηγές

Κεφάλαιο 2: Σύζευξη βενθικού και πελαγικού συστήματος και δείκτες οικολογικής κατάστασης

διατάραξης όπως υδατοκαλλιέργειες, βιομηχανίες, λιμάνια κτλ απορρίφθηκαν. Εκτός από τις προαναφερθείσες συγκεντρώσεις κλωροφύλλης *a* και θρεπτικών στο νερό, σημαντική ήταν και η παρουσία συγκέντρωσης του διαλελυμένου Οξυγόνου, ενώ στο ίζημα δεδομένα οργανικού άνθρακα (Total Organic Carbon – TOC), οξειδοαναγωγικού δυναμικού (Redox potential – Eh), κοκκομετρικής σύνθεσης του ιζήματος (ποσοστό ιλύος%) και βάθους συμπεριελήφθησαν στην μελέτη εφόσον ήταν διαθέσιμα. Στο μέτρο του δυνατού, οι εργαστηριακές μέθοδοι ανάλυσης ήταν οι ίδιες ή τουλάχιστον τα δεδομένα που προκύπτουν ήταν της ίδιας ποιότητας. Το σύνολο δεδομένων που δημιουργήθηκε συμπεριελάμβανε 126 σταθμούς συνολικά, με κατανομή: 34 στο Ιόνιο πέλαγος, 68 στο βόρειο Αιγαίο και 24 στο νότιο Αιγαίο πέλαγος (Εικόνα 2.1).



Εικόνα 2.1. Χάρτης περιοχών από όπου προέρχονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη.

Μέρος από τα δεδομένα έχει συμπεριληφθεί σε δημοσιευμένες εργασίες (Karakassis & Eleftheriou 1997, Karakassis et al. 2000, Arvanitidis et al. 2005a, Arvanitidis et al. 2005b, Karakassis et al. 2005, Arvanitidis et al.

Κεφάλαιο 2: Σύζευξη βενθικού και πελαγικού συστήματος και δείκτες οικολογικής κατάστασης

2006, Kaiser et al. 2006, Simboura et al. 2007, Simboura & Reizopoulou 2007, Faulwetter et al. 2008, Simboura & Reizopoulou 2008, Parageorgiou et al. 2009) ή περιλαμβάνονται σε τεχνικές εκθέσεις του Ελληνικού Κέντρου Θαλάσσιων Ερευνών (ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. 1994a, b, 1998, 2003, 2004, 2008, 2010).

Στον πίνακα 2.2 παρουσιάζονται οι περιβαλλοντικές μεταβλητές που συμπεριλαμβάνονται στην ανάλυση. Τα δείγματα του νερού συλλέχθηκαν με φιάλες Niskin. Οι μετρήσεις της συγκέντρωσης της κλωροφύλλης *a* έγιναν με φιλτράρισμα του νερού σε φίλτρο GFF 0,7 μm σύμφωνα με την μέθοδο των Yentsch and Menzel (1963) και μέτρηση σε φθοριόμετρο. Η συγκέντρωση του διαλελυμένου Οξυγόνου μετρήθηκε με την μέθοδο Winkler ή με βαθμονομημένο όργανο CTD. Οι μετρήσεις των θρεπτικών έγιναν με τις μεθόδους των (Strickland and Parsons (1972), Grasshoff et al. (1999)). Η συγκέντρωση του Ολικού Οργανικού Άνθρακα (TOC) έγινε με την χρήση στοιχειακού αναλυτή (CHN Analyzer) με την μέθοδο των Hedges and Stern (1984) και η μέτρηση του οξειδοαναγωγικού δυναμικού έγινε με ηλεκτρόδιο βαθμονομημένο με διάλυμα Zobell. Η κοκκομετρική ανάλυση του ιζήματος έγινε με κοσκίνισμα, σύμφωνα με το πρωτόκολλο των Buchanan (1984).

Πίνακας 2.2. Κατάλογος περιβαλλοντικών μεταβλητών και δεικτών που συμπεριλαμβάνονται στην παρούσα μελέτη.

Biochemical variables		Biotic variables	
Seawater Column	Sediment	Diversity	Biotic indices
Chl- <i>a</i>	TOC	Species	BQI
PO ₄ ³⁻	Eh	ES(10)	BQI-Family
NO ₃ ⁻	% Silt & Clay		Shannon <i>H'</i>
NO ₂ ⁻	Depth		BENTIX
NH ₄ ⁺			M-AMBI
Eutrophication Index			
Dissolved Oxygen			

2.3.2 Δείκτες ποικιλότητας και οικολογικής κατάστασης

Όλα τα δεδομένα μακροπανίδας ελέγχθηκαν για λάθη στην ονοματολογία και συνώνυμα με τη χρήση του εργαλείου TaxonMatch της διαδικτυακής βάσης δεδομένων «World Register of Marine Species»

Κεφάλαιο 2: Σύζευξη βενθικού και πελαγικού συστήματος και δείκτες οικολογικής κατάστασης

(<http://www.marinespecies.org/aphia.php?p=match>). Τα δεδομένα αφθονίας χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό «παραδοσιακών» δεικτών ποικιλότητας, όπως ο συνολικός αριθμός ειδών (S), ο δείκτης Hurlbert's ES(10) και ο δείκτης Shannon $H' (\log_2)$, με την χρήση του προγράμματος PRIMER 6.1 (Clarke et al. 2014) (Πίνακας 2.2). Επίσης, από τα δεδομένα αφθονίας υπολογίστηκαν και οι δείκτες οικολογικής κατάστασης, όπως περιγράφονται στις αντίστοιχες δημοσιεύσεις. Για τον δείκτη M-AMBI (Muxika et al. 2007) χρησιμοποιήθηκε το αντίστοιχο πρόγραμμα υπολογισμού και το ευρετήριο ειδών (έκδοση 3/2012) που έχουν αναπτύξει οι συγγραφείς και βρίσκεται στην ιστοσελίδα (<http://ambi.azti.es>). Οι δείκτες BENTIX (Simboura & Zenetos 2002), με το αντίστοιχο ευρετήριο ειδών (<http://www.hcmr.gr/gr/listview3.php?id=1195>), BQI (Rosenberg et al. 2004) και BQI-Family (Dimitriou et al. 2012) υπολογίστηκαν με το εργαλείο Biological Indices Calculation Tool (BICT) το οποίο συμπεριλαμβάνεται στην πλατφόρμα υπηρεσιών «statistical R virtual labs» του προγράμματος Lifewatch Greece (www.lifewatchgreece.eu) και περιέχει το ευρετήριο ειδών των Dimitriou et al. (2012). Ο δείκτης E.I. (Primpas et al. 2010) υπολογίστηκε με τον τρόπο και με τα όρια οικολογικής κατάστασης που προτείνουν οι συγγραφείς του.

Οι Borja et al. (2012) αναφέρουν ότι υπάρχει ανάγκη για τον ορθό ορισμό συνθηκών αναφοράς για όλους τους δείκτες, έτσι ώστε ο χαρακτηρισμός της οικολογικής κατάστασης να μην είναι εσφαλμένος. Από όλους τους δείκτες της παρούσας μελέτης, οι δείκτες E.I. BENTIX και BQI-Family είναι βαθμονομημένοι για χρήση στην ολιγοτροφική περιοχή της ανατολικής Μεσογείου και κατά συνέπεια προτιμήθηκαν στον προσδιορισμό της έντασης του ευτροφισμού και της οικολογικής κατάστασης.

2.3.3 Στατιστική ανάλυση

Για όλες τις αναλύσεις, τα δεδομένα αφθονίας της μακροπανίδας μετασχηματίστηκαν με την χρήση τετραγωνικής ρίζας. Η Ανάλυση Ομοιότητας - Analysis of Similarity (ANOSIM) χρησιμοποιήθηκε στις μήτρες ομοιότητας που προέκυψαν από τα δεδομένα μακροπανίδας με την χρήση του δείκτη

Κεφάλαιο 2: Σύζευξη βενθικού και πελαγικού συστήματος και δείκτες οικολογικής κατάστασης

ομοιότητας Bray-Curtis, για να προσδιοριστούν στατιστικά σημαντικές διαφορές στην δομή της βενθικής κοινότητας μεταξύ των διαφορετικών οικολογικών καταστάσεων, όπως προσδιορίστηκαν από τους αντίστοιχους δείκτες. Για τον προσδιορισμό στατιστικά σημαντικών διαφορών μεταξύ ομάδων, όπου ήταν απαραίτητο, έγινε Ανάλυση διασποράς (Analysis of Variance – ANOVA). Συσχετίσεις μεταξύ διαφορετικών μεταβλητών έγιναν με την χρήση του μη παραμετρικού συντελεστή συσχέτισης Spearman (στο στατιστικό πρόγραμμα SPSS v.21). Για την διερεύνηση της συσχέτισης μεταξύ στήλης νερού και βένθους σε συγκεκριμένες οικολογικές καταστάσεις, το σύνολο των δεδομένων χωρίστηκε σε δύο μέρη, στους σταθμούς με «αποδεκτή» οικολογική κατάσταση («καλή», «υψηλή») και στους σταθμούς με «μη αποδεκτή» («μέτρια», «φτωχή», «κακή»), όπως χαρακτηρίστηκαν από τους βενθικούς δείκτες BENTIX και BQI-Family. Στη συνέχεια σε αυτούς τους σταθμούς, έγινε συσχέτιση Spearman μεταξύ των τιμών των BENTIX και BQ-Family με τον E.I. και την κλωροφύλλη *a*.

Για την ανάλυση των δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν δύο μη παραμετρικές διαγραμματικές (ordination) τεχνικές διευθέτησης: (i) Nonmetric-Multidimensional scaling (MDS), με τη χρήση του δείκτη ομοιότητας Bray-Curtis στο πρόγραμμα PRIMER 6.1, για την ανάλυση της δομής της βενθικής κοινότητας σε σχέση με την οικολογική κατάσταση της στήλης ή του βένθους και (ii) Canonical Correspondence Analysis (CCA), με την χρήση του προγράμματος CANOCO 4.5 (ter Braak 2002), για τον προσδιορισμό της επίδρασης των περιβαλλοντικών μεταβλητών στην δομή της βενθικής κοινότητας.

Η μέθοδος CCA επιλέχτηκε με βάση το μήκος της κλίσης του πρώτου άξονα, ο οποίος υπολογίστηκε με την μέθοδο Detrended Correspondence Analysis (DCA) (Leps & Smilauer 2003). Όπως υπολογίστηκε, ο πρώτος άξονας της DCA είχε μήκος ίσο με 6,387 φορές την τυπική απόκλιση, οπότε κατά συνέπεια η χρήση ενός μη γραμμικού μοντέλου, όπως αυτό της CCA, ήταν ορθότερη (Leps & Smilauer 2003). Πριν από την ανάλυση CCA, κάθε περιβαλλοντική μεταβλητή ελέγχθηκε με την χρήση του variance inflation factor (VIF). Σε περίπτωση που η τιμή του VIF για κάποια μεταβλητή ήταν μεγαλύτερη από 10, ήταν μία ένδειξη ότι η συγκεκριμένη μεταβλητή εμφάνιζε

Κεφάλαιο 2: Σύζευξη βενθικού και πελαγικού συστήματος και δείκτες οικολογικής κατάστασης

υψηλή συσχέτιση με κάποια ή κάποιες άλλες μεταβλητές και κατά συνέπεια, δεν μπορούσε να συμπεριληφθεί ταυτόχρονα με εκείνες στην ανάλυση. Γενικότερα, σε ένα διάγραμμα CCA, η κατεύθυνση των βελών των περιβαλλοντικών μεταβλητών προσδιορίζει την κατεύθυνση αύξησης της περιβαλλοντικής διαβάθμισης και το μήκος τους προσδιορίζει το ποσοστό της μεταβλητότητας στο σύνολο των δεδομένων που εξηγεί η συγκεκριμένη διαβάθμιση (Leps & Smilauer 2003). Η προβολή ενός σημείου πάνω στο βέλος της περιβαλλοντικής μεταβλητής αποτελεί μία ένδειξη της βέλτιστης συσχέτισης του σημείου με την αντίστοιχη μεταβλητή (Lopes et al. 2010). Τέλος, οι γωνίες που σχηματίζονται μεταξύ των βελών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μελέτη των σχέσεων μεταξύ των μεταβλητών. Μία γωνία μικρότερη από 90° δείχνει μία θετική σχέση μεταξύ των δύο μεταβλητών. Μία γωνία μεταξύ 90° και 180° δείχνει αρνητική συσχέτιση. Μία γωνία 90° είναι δείγμα πολύ χαμηλής συσχέτισης μεταξύ των μεταβλητών.

Για τον έλεγχο της επίδρασης του ευτροφισμού της στήλης του νερού, στη σχετική αφθονία των μακροπανιδικών ευκαιριακών ειδών (οριζόμενα ως αυτά που έχουν τιμή $ES50_{0,05} < 10$), προσδιορίστηκε το ποσοστό τους σε κάθε σταθμό. Για τις ανάγκες αυτής της ανάλυσης οι σταθμοί κατηγοριοποιήθηκαν σε ομάδες ανάλογα με την οικολογική κατάσταση της στήλης του νερού όπως αυτή προσδιορίστηκε από τον δείκτη E.I. ή την συγκέντρωση της κλωροφύλλης *a*. Τέλος, για κάθε μία από τις 5 οικολογικές καταστάσεις υπολογίστηκε ο μέσος όρος της αφθονίας των ευκαιριακών ειδών όλων των σταθμών και οι τιμές αυτές τοποθετήθηκαν σε ένα διάγραμμα.

2.4 Αποτελέσματα

Η οικολογική κατάσταση κάθε σταθμού προσδιορίστηκε με βάση τους 4 βαθμονομημένους δείκτες (E.I., Χλωροφύλλη α, BENTIX, BQI-Family) (Πίνακας 2.3).

Πίνακας 2.3. Αριθμός σταθμών σε κάθε οικολογική κατάσταση όπως προσδιορίστηκε από 4 δείκτες στήλης και βένθους (Eutrophication Index, Χλωροφύλλη α, BQI-Family και BENTIX).

	EI	Chl-a	BQI-Family	BENTIX
Bad	15	20	15	0
Poor	17	27	17	18
Moderate	40	26	19	28
Good	54	41	76	55
High	0	12	0	25

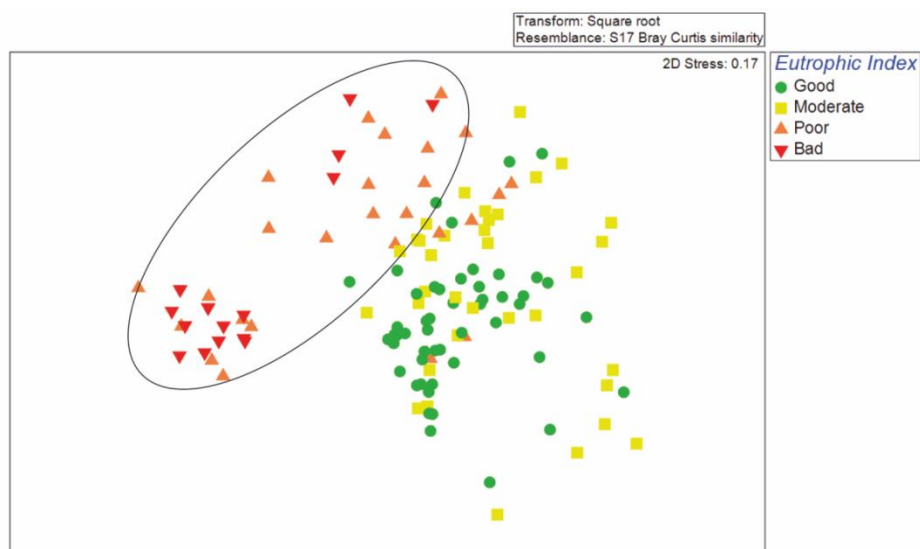
Η ανάλυση ANOSIM έδειξε στατιστικά σημαντικές διαφορές στην δομή της μακροπανίδας μεταξύ όλων των δυνατών ζευγών κλάσεων οικολογικής κατάστασης του δείκτη E.I., καθώς και μεταξύ των περισσότερων της κλίμακας χλωροφύλλης α (Πίνακας 2.4).

Πίνακας 2.4. Αποτελέσματα ανάλυσης ANOSIM των δεδομένων μακροπανίδας. Οι σταθμοί ομαδοποιήθηκαν με βάση την οικολογική κατάσταση της στήλης του νερού με βάση τον Eutrophication Index ή την κλίμακα χλωροφύλλης α. **: $p < 0,01$, *: $p < 0,05$, ns: μη στατιστικά σημαντικό.

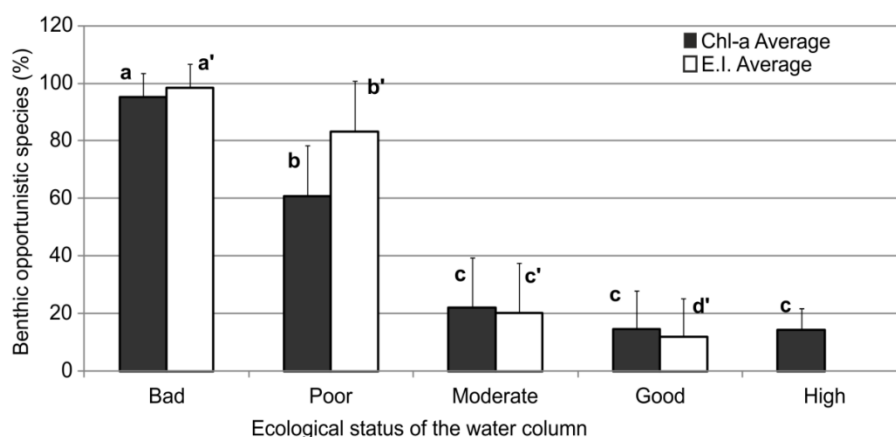
Eutrophication Index				Chl-a				
	Bad	Poor	Moderate		Bad	Poor	Moderate	Good
Poor	*	-		Poor	**	-		
Moderate	**	**	-	Moderate	**	ns	-	
Good	**	**	**	Good	**	**	ns	-
				High	**	ns	**	ns

Από το διάγραμμα MDS (Εικόνα 2.2), που έγινε με βάση τα δεδομένα μακροπανίδας και την οικολογική κατάσταση της στήλης, όπως την χαρακτήρισε ο δείκτης E.I. φάνηκε ότι οι σταθμοί με «Κακή» ή «Φτωχή» οικολογική κατάσταση ομαδοποιούνται στο αριστερό μέρος του διαγράμματος, ενώ αντίθετα οι σταθμοί με «Μέτρια» ή «Καλή» κατάσταση διασκορπίζονται στο υπόλοιπο διάγραμμα.

Κεφάλαιο 2: Σύζευξη βενθικού και πελαγικού συστήματος και δείκτες οικολογικής κατάστασης



Εικόνα 2.2 Διάγραμμα nMDS από τα δεδομένα μακροπανίδας, όπου όμως κάθε σταθμός σημάνθηκε με βάση την οικολογική κατάσταση της στήλης του νερού, όπως αυτή χαρακτηρίστηκε από τον δείκτη Eutrophication Index.



Εικόνα 2.3. Μέσος όρος του ποσοστού αφθονίας των βενθικών ευκαιριακών ειδών ($ES50_{0.05} < 10$) των σταθμών κάθε οικολογικής κατάστασης της στήλης του νερού όπως χαρακτηρίστηκε από τον Eutrophication Index και την κλίμακα χλωροφύλλης *a*. Στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων (ANOVA, $p < 0,05$) και τα αντίστοιχα *post hoc* τεστ υποδεικνύονται από τις διαφορές στα αντίστοιχα γράμματα: χλωροφύλλη *a* (a-c) και Eutrophication Index (a'-d').

Το ποσοστό των μακροπανιδικών ευκαιριακών (Εικόνα 2.3) ειδών διέφερε στατιστικά (ANOVA, $p < 0.05$) μεταξύ των σταθμών με διαφορετικές οικολογικές καταστάσεις («Κακή», «Φτωχή», «Μέτρια») και για τους δύο δείκτες, ενώ στην περίπτωση του E.I., στατιστικά σημαντικές διαφορές εντοπίστηκαν και

Κεφάλαιο 2: Σύζευξη βενθικού και πελαγικού συστήματος και δείκτες οικολογικής κατάστασης

ανάμεσα στην «Μέτρια» και «Καλή» οικολογική κατάσταση. Στο όριο που διαχωρίζει την «Μέτρια» από την «Φτωχή» οικολογική κατάσταση παρουσιάζεται μία αλλαγή στο ποσοστό των ευκαιριακών ειδών με το ποσοστό να αυξάνεται από το 21% στο 61% στην περίπτωση της κλίμακας χλωροφύλλης *a* ή από 20% ως 83% στην περίπτωσης του E.I. φτάνοντας κοντά στο 100% στους σταθμούς με «Κακή» οικολογική κατάσταση.

Η επίδραση των περιβαλλοντικών μεταβλητών που συμπεριελήφθησαν στην ανάλυση CCA ήταν στατιστικά σημαντική ($p < 0,01$), ωστόσο, η συγκέντρωση του NO_2 βρέθηκε να έχει τιμή $\text{VIF} > 10$ και κατά συνέπεια αποκλείστηκε από την ανάλυση, όπως επίσης και με το οξειδοαναγωγικό δυναμικό, για το οποίο δεν υπήρχαν αρκετά δεδομένα. Τα αποτελέσματα της CCA (Πίνακας 2.5) έδειξαν ότι ο άξονας 1 αντιπροσωπεύει το 85,7% της μεταβλητότητας, ενώ ο άξονας 2 το 51%.

Πίνακας 2.5. Αποτελέσματα της Canonical Correspondence Analysis

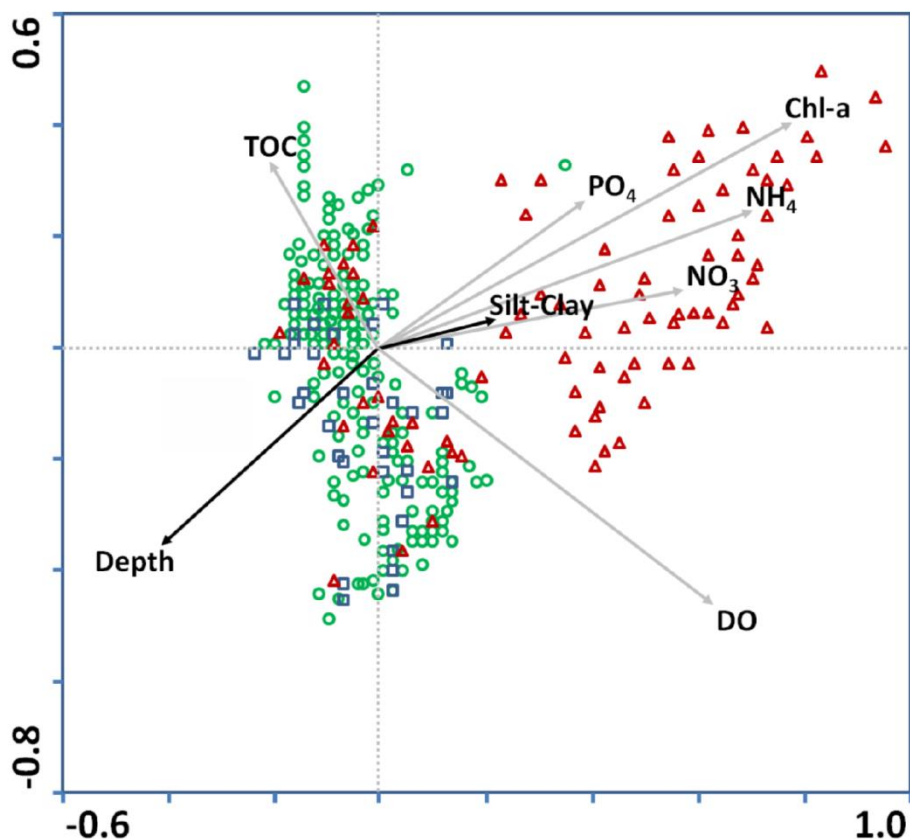
Axes	1	2	3	4	Total inertia
Eigenvalues	0,857	0,51	0,388	0,272	8.459
Species-environment correlations	0,968	0,944	0,933	0,91	
Cumulative % of explained variance					
of species data	10,1	26,2	30,7	34	
of species-environment relation	33,7	63,8	79,1	89,8	
Sum of all eigenvalues	8,459				
Sum of all canonical eigenvalues	2,541				
Monte-Carlo permutation test		Eigenvalue	F-ratio	P-value	
Test of significance of first canonical axis		0,857	4,285	0,002	
Test of significance of all canonical axes		2,541	2,33	0,002	

Οι συσχετίσεις μεταξύ αφθονίας ειδών και περιβαλλοντικών μεταβλητών ήταν ψηλές (0,968 και 0,944 για τους πρώτους δύο άξονες). Επιπροσθέτως, οι πρώτοι δύο άξονες εξηγούσαν το 26% της συνολικής μεταβλητότητας των ειδών καθώς και το 63,8% της μεταβλητότητας της αλληλεπίδρασης μακροπανίδας - περιβαλλοντικών μεταβλητών, το οποίο μπορεί να θεωρηθεί ως ένα επαρκές ποσοστό για ένα σύνολο δεδομένων αυτού το μεγέθους (Leps & Smilauer 2003). Τέλος, τα αποτελέσματα του Monte-Carlo permutation test (499

Κεφάλαιο 2: Σύζευξη βενθικού και πελαγικού συστήματος και δείκτες οικολογικής κατάστασης

μεταθέσεις) έδειξε ότι τα αποτελέσματα της ανάλυσης ήταν στατιστικά σημαντικά.

Στο πρώτο διάγραμμα που προέκυψε από την ανάλυση CCA, παρουσιάζεται η σχέση των περιβαλλοντικών μεταβλητών με συγκεκριμένα μακροπανιδικά είδη (Εικόνα 2.4)



Εικόνα 2.4. Διάγραμμα Canonical Correspondence Analysis (CCA) με είδη (σχήματα) και περιβαλλοντικές μεταβλητές (βέλη). Τα κόκκινα τρίγωνα αντιπροσωπεύουν ευκαιριακά είδη (ES50_{0,05} 1-10), ο πράσινος κύκλος μεταβατικά είδη (ES50_{0,05} 10-20), και το μπλε τετράγωνο ευαίσθητα (ES50_{0,05} 20-30).

Η σχετική θέση και οι γωνίες που σχηματίζουν τα βέλη των περιβαλλοντικών μεταβλητών της στήλης που σχετίζονται με τον ευτροφισμό (χλωροφύλλη *a* και συγκεντρώσεις θρεπτικών) δείχνει μία ισχυρή συσχέτιση μεταξύ τους, καθώς και με τα μακροπανιδικά ευκαιριακά είδη, όπως προκύπτει από την θέση των ειδών αυτών στο διάγραμμα. Το μεγάλο μήκος του βέλους της συγκέντρωσης του οξυγόνου συμβολίζει την σημαντική επίδρασή του στην δομή της βενθικής πανίδας αλλά δεν σχετίζεται άμεσα με

Κεφάλαιο 2: Σύζευξη βενθικού και πελαγικού συστήματος και δείκτες οικολογικής κατάστασης

συγκεκριμένα βενθικά είδη. Σε ό,τι αφορά τις μεταβλητές του ιζήματος, το TOC σχετίζεται περισσότερο με μεταβατικά είδη ενώ το βάθος και η κοκκομετρία του ιζήματος δεν φαίνεται να επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό την δομή της μακροπανίδας στο συγκεκριμένο σύνολο δεδομένων.

Τα αποτελέσματα των συσχετίσεων Spearman μεταξύ των περιβαλλοντικών μεταβλητών και των δεικτών (Πίνακας 2.6) αποκάλυψαν πολυάριθμες, στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις ($p < 0,05$).

Πίνακας 2.6. Συσχετίσεις Spearman μεταξύ βιολογικών και γεωχημικών μεταβλητών και/ή δεικτών. *: $p < 0,05$, **: $p < 0,01$, ns: μη στατιστικά σημαντικό

	Chl-<i>a</i>	NH₄⁺	PO₄³⁻	NO₂⁻	NO₃⁻	EI	DO	TOC	Eh	% Silt & Clay
PO₄³⁻	ns	ns								
NO₂⁻	ns	0,33**	0,24**							
NO₃⁻	ns	0,24**	0,33**	0,61**						
EI	0,73**	0,54**	0,29**	0,50**	0,55**					
DO	0,67**	0,35**	-0,52**	0,29*	-0,19	0,36**				
TOC	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns			
Eh	-0,68**	-0,58**	ns	ns	ns	-0,61**	ns	-0,66**		
% Silt & Clay	0,39**	0,31**	0,41**	ns	0,35**	0,37**	ns	0,55**	-0,66**	
BQI	-0,49**	-0,40**	-0,18*	-0,18*	-0,29*	-0,63**	-0,46**	-0,24*	0,70**	-0,27*
BQI-Family	-0,60**	-0,40**	ns	-0,14*	-0,24*	-0,65**	-0,46**	-0,25*	0,67**	-0,28*
H'	-0,57**	-0,40**	ns	ns	ns	-0,54**	-0,40**	-0,12*	0,73**	ns
BENTIX	-0,34**	ns	ns	ns	ns	-0,33**	ns	-0,20*	0,38**	ns
M-AMBI	-0,58**	-0,38**	-0,26**	-0,20**	-0,33**	-0,67**	-0,48**	-0,15*	0,69**	-0,31**
S	-0,34**	-0,45**	-0,35**	-0,23**	-0,37**	-0,61**	-0,28*	ns	0,66**	-0,41**
ES(10)	-0,54**	-0,42**	ns	-0,12*	-0,30**	-0,63**	-0,44**	-0,36**	0,75**	-0,36**
Depth	-0,60**	-0,38**	0,29**	ns	ns	-0,37**	-0,74**	ns	0,64**	ns

Οι συσχετίσεις μεταξύ της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης *a* ήταν θετικές στην περίπτωση του Silt&Clay περιεχομένου του ιζήματος και της συγκέντρωσης του οξυγόνου, ενώ ήταν αρνητικές με τους δείκτες ποικιλότητας ή οικολογικής κατάστασης καθώς και με το οξειδοαναγωγικό δυναμικό και το βάθος. Αντίστοιχες συσχετίσεις παρουσίασε και ο δείκτης E.I. με τις ίδιες μεταβλητές. Στο σύνολο των συσχετίσεων η χλωροφύλλη *a* παρουσίασε υψηλότερες τιμές συσχέτισης με τις περιβαλλοντικές μεταβλητές της στήλης και του βένθους, ενώ ο E.I. εμφάνισε υψηλότερες συσχετίσεις με τους δείκτες ποικιλότητας και οικολογικής κατάστασης. Η συγκέντρωση του διαλελυμένου οξυγόνου στον πυθμένα, εμφάνισε θετική συσχέτιση τόσο με την χλωροφύλλη *a*, όσο και με τον E.I. Αντιθέτως, το οξειδοαναγωγικό δυναμικό παρουσίασε

Κεφάλαιο 2: Σύζευξη βενθικού και πελαγικού συστήματος και δείκτες οικολογικής κατάστασης

αρνητικές συσχετίσεις με τις μεταβλητές της στήλης του νερού αλλά και με τους δείκτες του βένθους.

Τα αποτελέσματα των συσχετίσεων Spearman στο διαχωρισμένο σύνολο δεδομένων έδειξαν πολύ διαφορετικές τιμές συσχέτισης μεταξύ του «αποδεκτού» και του «μη αποδεκτού» μέρους (Πίνακας 2.7).

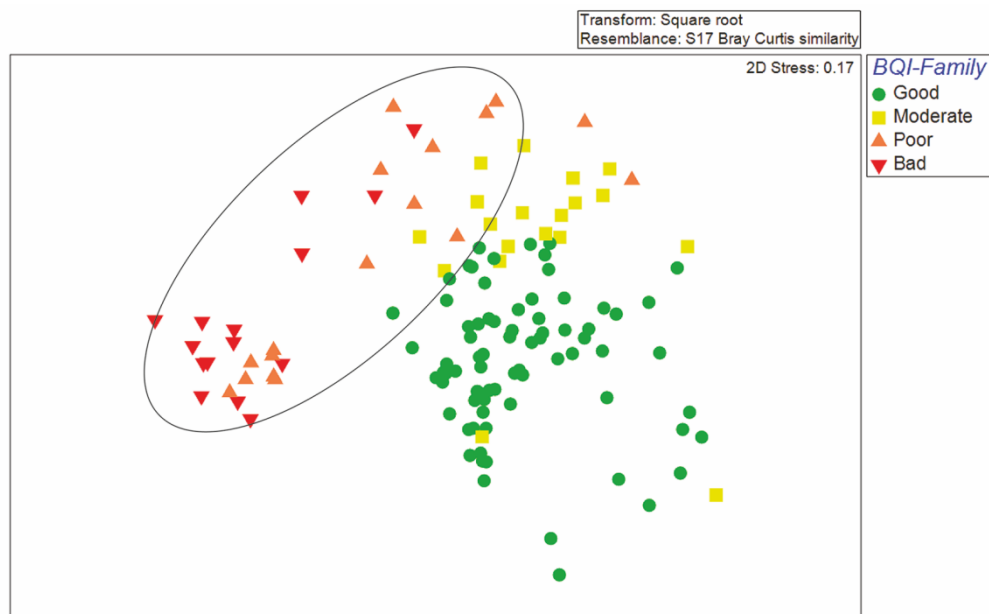
Πίνακας 2.7. Αποτελέσματα συσχέτισης Spearman μεταξύ δεικτών της στήλης του νερού (Eutrophication Index και κλωροφύλλη α) και του βένθους (BENTIX και BQI-Family), σε δύο ομάδες σταθμών χωρισμένους με βάση την οικολογική κατάσταση του βένθους: Acceptable: «Καλή, Υψηλή», Unacceptable: «Κακή», «Φτωχή», «Μέτρια». * $p < 0.05$, ** $p < 0.001$, ns = μη στατιστικά σημαντικό

	Chl- α		EI	
	BENTIX	BQI-Family	BENTIX	BQI-Family
Acceptable	-0,26*	ns	ns	-0,31*
Unacceptable	-0,55**	-0,68**	-0,50**	-0,84**

Στους σταθμούς με «μη αποδεκτή» οικολογική κατάσταση, παρουσιάστηκαν στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις ($p < 0,01$) μεταξύ όλων των δυνατών ζευγών. Επίσης, οι τιμές των συντελεστών ήταν αρκετά μεγάλες (-0,5 έως -0,84). Αντίθετα, στους σταθμούς με «αποδεκτή» οικολογική κατάσταση, οι τιμές των συντελεστών συσχέτισης ήταν είτε πολύ μικρότερες είτε η συσχέτιση δεν ήταν στατιστικά σημαντική ($p > 0.05$).

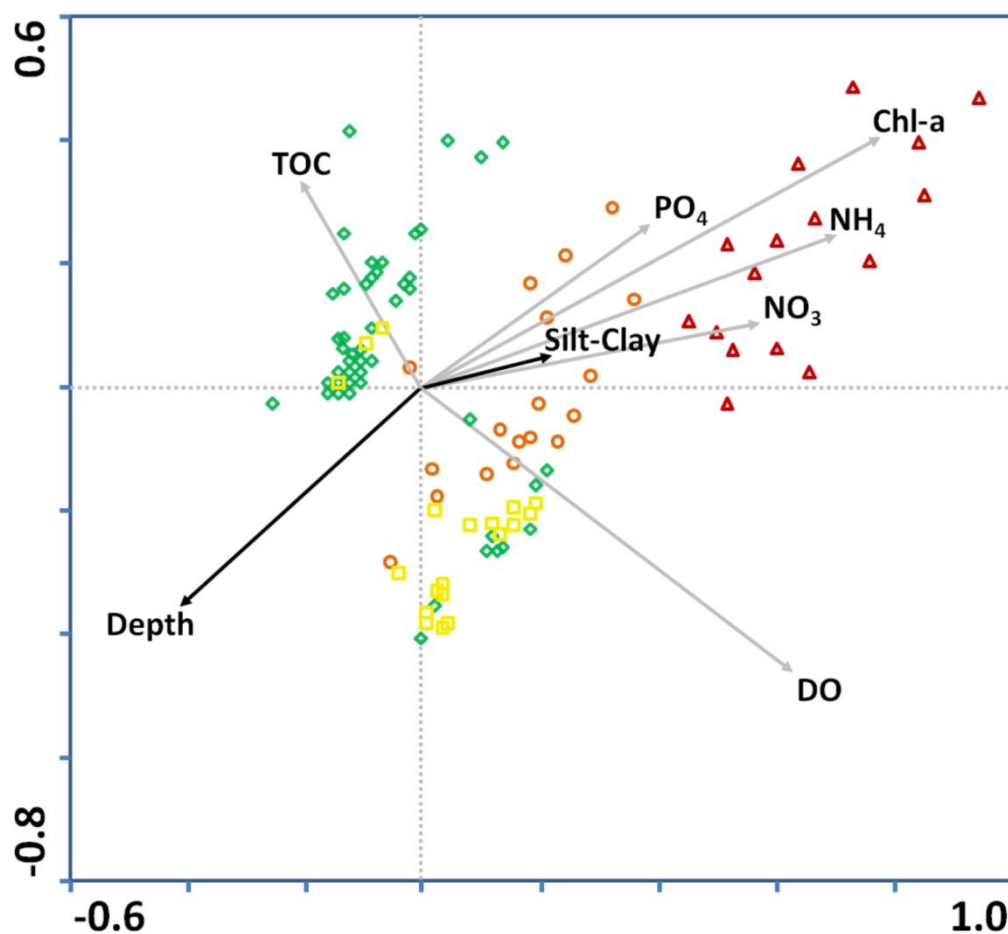
Το διάγραμμα MDS στην Εικόνα (2.5) βασίστηκε στα ίδια δεδομένα μακροπανίδας με αυτό της Εικόνας (2.2), αλλά στην συγκεκριμένη περίπτωση, οι σταθμοί είχαν σημανθεί με βάση την οικολογική κατάσταση του βένθους, όπως αυτή χαρακτηρίστηκε από τον δείκτη BQI-Family.

Κεφάλαιο 2: Σύζευξη βενθικού και πελαγικού συστήματος και δείκτες οικολογικής κατάστασης



Εικόνα 2.5. Διάγραμμα nMDS από τα δεδομένα μακροπανίδας. Η σήμανση έχει γίνει με βάση την οικολογική κατάσταση του βένθους, όπως αυτή χαρακτηρίστηκε από τον δείκτη BQI-Family. Η έλλειψη περικλείει τους σταθμούς που στο διάγραμμα 2.2 είχαν «Κακή» ή «Φτωχή» οικολογική κατάσταση στην στήλη του νερού, σύμφωνα με τον δείκτη Eutrophication Index.

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, οι σταθμοί με «Κακή» ή «Φτωχή» οικολογική κατάσταση στο ίζημα ομαδοποιούνται στο αριστερό μέρος του διαγράμματος, ενώ οι σταθμοί με «μέτρια» ή «καλή» οικολογική κατάσταση διασκορπίζονται στο υπόλοιπο διάγραμμα. Υπάρχει μία εμφανής ομοιότητα μεταξύ των διαγραμμάτων (2.2) και (2.5) σε ό,τι αφορά την ομαδοποίηση των σταθμών με βάση την οικολογική τους κατάσταση.



Εικόνα 2.6. Διάγραμμα Canonical Correspondence Analysis με σταθμούς και περιβαλλοντικές μεταβλητές. Η σήμανση έχει γίνει με βάση την οικολογική κατάσταση του βένθους, όπως αυτή χαρακτηρίστηκε από τον δείκτη BQI-Family (τρίγωνο «Κακή», κύκλος «Φτωκή», τετράγωνο «Μέτρια», ρόμβος «Καλή»).

Από το δεύτερο διάγραμμα της ανάλυσης CCA (Εικόνα 2.6), όπου περιλαμβάνονται σταθμοί και περιβαλλοντικές μεταβλητές, φαίνεται ότι οι σταθμοί που έχουν «Κακή» οικολογική κατάσταση συσχετίζονται περισσότερο με την κλωροφύλλη α και τις συγκεντρώσεις των θρεπτικών, ενώ οι σταθμοί με φτωχή οικολογική κατάσταση σχετίζονται περισσότερο με το διαλυμένο Οξυγόνο. Τέλος, οι σταθμοί με «Μέτρια» και «Καλή» οικολογική κατάσταση σχετίζονται περισσότερο με το βάθος και τη περιεκτικότητα του TOC στο ίζημα.

2.5 Συζήτηση

Τα αποτελέσματα της παρούσας ανάλυσης, αναδεικνύουν την ύπαρξη ενός ισχυρού δεσμού μεταξύ της οικολογικής κατάστασης της στήλης του νερού και την δομής της μακροβενθικής κοινότητας. Αν και τα παράκτια οικοσυστήματα θεωρούνται σχετικά ασταθή σε ό,τι αφορά τις μεταβλητές της στήλης του νερού, ειδικότερα σε εκτεθειμένα σημεία (Chalkia & Pitta 2003), τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν ότι αλλαγές στις μεταβλητές της στήλης του νερού, αντανακλώνονται ποιοτικά και ποσοτικά στην υποκείμενη βενθική κοινότητα.

Ο χαρακτηρισμός της οικολογικής κατάστασης με την χρήση ενός δείκτη όπως ο E.I., φάνηκε να είναι πιο αποτελεσματικός από ότι η χρήση της απλής συγκέντρωσης κλωροφύλλης *a*. Μία πιθανή εξήγηση είναι ότι με την παρουσία των συγκεντρώσεων των θρεπτικών στον τύπο υπολογισμού, συμπεριλαμβάνεται και η δυνατότητα του συστήματος να αυξήσει (ή να μειώσει) στο σύντομο μέλλον την συγκέντρωση της κλωροφύλλης *a*. Ωστόσο θα πρέπει να επισημανθεί, ότι δεν υπάρχει πάντοτε ομοφωνία μεταξύ των ειδικών σε σχέση με την μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της οικολογικής κατάστασης, ειδικά σε ό,τι αφορά την διάκριση μεταξύ διαδοχικών οικολογικών καταστάσεων (Teixeira et al. 2010), καθώς καμία μεθοδολογία δεν φαίνεται να λειτουργεί πολύ καλύτερα από ότι οι υπόλοιπες (Rice et al. 2010).

Οι μεταβολές της δομής της βενθικής κοινότητας, που συσχετίζονται με την τροφική κατάσταση της στήλης του νερού, φαίνεται να σχετίζονται με την αύξηση της αφθονίας των μακροβενθικών ευκαιριακών ειδών. Αυτή η μεταβολή δεν είναι γραμμική, αλλά συμβαίνει απότομα καθώς η ένταση του ευτροφισμού αυξάνεται, περνώντας το όριο μεταξύ «μέτριας» και «φτωχής» οικολογικής κατάστασης. Περνώντας το συγκεκριμένο όριο, τα ευαίσθητα είδη εκτοπίζονται και τα ευκαιριακά είδη κυριαρχούν, καθώς είναι ικανά να ανέχονται αντίξοες περιβαλλοντικές συνθήκες και να αναπαράγονται γρήγορα σε αυτές όπως περιγράφεται από το μοντέλο απόκρισης στον οργανικό εμπλουτισμό των Pearson and Rosenberg (1978).

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης CCA, οι διαβαθμίσεις (gradients) των περιβαλλοντικών μεταβλητών επηρεάζουν με διαφορετικό

Κεφάλαιο 2: Σύζευξη βενθικού και πελαγικού συστήματος και δείκτες οικολογικής κατάστασης

τρόπο μακροπανιδικά είδη με διαφορετική στρατηγική ζωής (r ή K). Στην συγκεκριμένη μελέτη οι πιο σημαντικές μεταβλητές ήταν η κλωροφύλλη a , και τα θρεπτικά (που φάνηκε να επιδρούν περισσότερο στα ευκαιριακά είδη), ενώ το TOC και το ποσοστό ιλύος φάνηκε να σχετίζονται περισσότερο με μεταβατικά και ευαίσθητα είδη.

Και οι δύο δείκτες ευτροφισμού που χρησιμοποιήθηκαν στη παρούσα μελέτη, ο E.I. και η κλωροφύλλη a , εμφάνισαν στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις και με τις περιβαλλοντικές μεταβλητές αλλά και με τους βενθικούς δείκτες. Οι συντελεστές συσχέτισης των δεικτών ευτροφισμού ήταν παρόμοιοι στις συσχετίσεις με τα οξειδοαναγωγικό δυναμικό, τους δείκτες BENTIX και Shannon. Όμως ο δείκτης E.I. εμφάνισε υψηλότερες συσχετίσεις με τους υπόλοιπους βενθικούς δείκτες, ενώ αντίθετα η κλωροφύλλη a εμφάνισε υψηλότερες συσχετίσεις με περιβαλλοντικές μεταβλητές όπως το οξυγόνο (θετική), η κοκκομετρία (θετική), και το βάθος (αρνητική).

Σύμφωνα με την μελέτη CSTT (1997), μία τιμή κλωροφύλλης a στην στήλη του νερού $10 \mu\text{g l}^{-1}$, κατά την διάρκεια των θερινών μηνών θα ήταν ικανή να προκαλέσει ανεπιθύμητες επιπτώσεις στο ίζημα, στις παράκτιες περιοχές της Βόρειας Θάλασσας. Στην oligοτροφική ανατολική Μεσόγειο, σύμφωνα με τους Simboura et al. (2005), το όριο της «κακής» οικολογικής κατάστασης ορίζεται σε συγκέντρωση πάνω από $2.2 \mu\text{g l}^{-1}$. Σύμφωνα με την απόφαση της European-Commission (2013) στο πλαίσιο της οδηγίας για τα ύδατα, τα όρια της «αποδεκτής» κατάστασης κατά την περίοδο της αύξησης του φυτοπλαγκτού κυμαίνονται από $10 \mu\text{g l}^{-1}$, στην Βόρεια Θάλασσα ως $1,5 \mu\text{g l}^{-1}$, στις ισπανικές ακτές της Μεσογείου. Οι τιμές καθορίζονται σε μεγάλο βαθμό από την περιοχή μελέτης. Στην παρούσα μελέτη, τιμές μέχρι και $6,5 \mu\text{g l}^{-1}$ δεν προκάλεσαν συνθήκες υποξίας στο βένθος στο oligοτροφικό σύστημα της ανατολικής Μεσογείου. Το αντίθετο μάλιστα, η συγκέντρωση του Οξυγόνου στο νερό παρουσίασε θετική συσχέτιση με την κλωροφύλλη a , με το 85% των σταθμών να εμφανίζουν συγκεντρώσεις οξυγόνου πάνω από $6,5 \mu\text{g l}^{-1}$. Ωστόσο, το καθιζάνον οργανικό υλικό λόγω του ευτροφισμού, φάνηκε να σχετίζεται με σημαντικές μεταβολές στο οξειδοαναγωγικό δυναμικό του ιζήματος, με το 33% των σταθμών να εμφανίζουν τιμές $<0 \text{ mV}$, με τις αντίστοιχες μεταβολές στην δομή της βενθικής κοινότητας.

Κεφάλαιο 2: Σύζευξη βενθικού και πελαγικού συστήματος και δείκτες οικολογικής κατάστασης

Το ζήτημα του προσδιορισμού της λεγόμενης «Καλής οικολογικής κατάστασης» (Good Environmental Status – GES), έχει συζητηθεί σε αρκετές μελέτες (Borja et al. 2012, Rice et al. 2012, Simboura et al. 2012). Στα πλαίσια της ευρωπαϊκής οδηγίας για την θαλάσσια στρατηγική, προκύπτει η πρόκληση για ορθή χρήση των διαθέσιμων εργαλείων και της επιστημονικής γνώσης που προσφέρουν για την υποστήριξη της αειφορικής διαχείρισης των θαλάσσιων οικοσυστημάτων (Rice et al. 2010). Για έναν φορέα διαχείρισης, επιστημονικό ή πολιτικό, είναι σημαντική η ύπαρξη σημείων έγκαιρης προειδοποίησης (early warning signals) για περιοχές όπου είναι απαραίτητη μεγαλύτερη διαχειριστική δράση. Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης (ευτροφισμός σε ολιγοτροφική περιοχή), το όριο που διαχωρίζει την «μέτρια» από την «φτωχή» οικολογική κατάσταση στην στήλη του νερού φαίνεται να σχετίζεται με μία απότομη αλλαγή καθεστώτος στην βενθική κοινότητα. Η πίεση που ασκεί η καθίζηση του οργανικού υλικού που προκαλείται από τον ευτροφισμό, από αυτό το σημείο και πέρα, δύναται να καθορίσει την δομή της βενθικής κοινότητας, καθώς το βενθικό σύστημα κάνει την ικανότητά του να απορροφά την διατάραξη. Οι Tett et al. (2013) υποστηρίζουν ότι, σύμφωνα με την οικοσυστημική προσέγγιση, η αντοχή ενός ανοιχτού συστήματος στην διατάραξη, εξαρτάται από την διατήρηση της ακεραιότητας των επιμέρους λειτουργιών του και της ικανότητας του να ανακυκλώνει ύλη και ενέργεια. Οι Rice et al. (2012) αναφέρουν ότι οι βιοκοινότητες που χαρακτηρίζονται ως «Καλής οικολογικής κατάστασης» περιέχουν πολλά διαφορετικά είδη και οικοσυστημικές λειτουργίες. Αυτές οι κοινότητες έχουν την ικανότητα να δείχνουν μεγάλη ανοχή σε μέτριες πιέσεις γιατί η βιοποικιλότητα τους επιτρέπει να απορροφούν την διατάραξη, μοιράζοντάς την σε πολλές διαφορετικές ρυθμιστικές λειτουργίες (Loreau et al. 2002). Λαμβάνοντας υπόψιν τα παραπάνω επιχειρήματα, είναι αναμενόμενο να υπάρχει ισχυρή σύζευξη βενθικού και πελαγικού συστήματος στο ευτροφικό άκρο του συνόλου δεδομένων, όπου το βενθικό σύστημα κάνει την αντοχή του και καθορίζεται από το καθιζάνον οργανικό υλικό. Αντίθετα, στο ολιγοτροφικό άκρο, η σύζευξη γίνεται ασθενής και άλλες παράμετροι γίνονται πιο σημαντικές για την βενθική κοινότητα, όπως ο τύπος ιζήματος, το βάθος ή το οργανικό υλικό.

Κεφάλαιο 2: Σύζευξη βενθικού και πελαγικού συστήματος και δείκτες οικολογικής κατάστασης

Η ποσοτικοποίηση της συσχέτισης μεταξύ μεταβλητών της στήλης και βενθικών δεικτών μπορεί να φανεί χρήσιμη στην διαχείριση των παράκτιων οικοσυστημάτων, και ειδικότερα στον προσδιορισμό συνθηκών αναφοράς, όπως αναφέρουν οι Borja et al. (2012) ή σε ασκήσεις βαθμονόμησης μεταξύ διαφορετικών περιοχών (Occhipinti et al. 2009) και σε συνδυασμό με παρόμοιες μελέτες, όπως των Hyland et al. (2005) στην μελέτη της «αντοχής» των οικοσυστημάτων στην πίεση που προκαλούν οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Καθώς όμως η τροφική κατάσταση της στήλης του νερού εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την περιοχή μελέτης, είναι απαραίτητες αντίστοιχες μελέτες σε διαφορετικές περιοχές, προκειμένου να καθοριστούν τα επιμέρους όρια ανοχής της βενθικής κοινότητας και να δημιουργηθεί μία ενιαία στρατηγική διαχείρισης του φαινομένου του ευτροφισμού.

3. Μία καινοτόμος πειραματική διάταξη μεσόκοσμων κατάλληλη για πειράματα σύζευξης βενθικού–πελαγικού οικοσυστήματος²

3.1 Περίληψη

Περιγράφεται μία καινοτόμος πειραματική διάταξη μεσόκοσμων (εγκλεισμένο πειραματικό οικοσύστημα), η οποία περιέχει ταυτόχρονα στήλη νερού και ίζημα, κατάλληλη για πειράματα σύζευξης βενθικού – πελαγικού οικοσυστήματος. Η παρουσία μεγάλου όγκου νερού (>1,5 m³), με επαρκές βάθος στην στήλη και μεγάλη ποσότητα ιζήματος στον βυθό (30 cm ύψος, 80 l όγκος), προσφέρει νέες πειραματικές δυνατότητες. Η πειραματική εγκατάσταση περιλαμβάνει έναν κυλινδρικό σάκο μεσόκοσμου, έναν δακτύλιο σταθεροποίησης στο επάνω μέρος και ένα δοχείο ιζήματος στο κάτω. Περιλαμβάνει επίσης παγίδες ιζήματος, ένα αυτόνομο σύστημα δειγματοληψίας νερού σε ορισμένα βάθη καθώς και ένα δειγματολήπτη ιζήματος, κατάλληλο για συλλογή ιζήματος χωρίς να διαταράσσεται η στήλη του νερού. Η πειραματική διάταξη χρησιμοποιήθηκε με επιτυχία στα πλαίσια ενός πειράματος σύζευξης βενθικού – πελαγικού οικοσυστήματος σε συνθήκες ευτροφισμού, που έλαβε χώρα στις εγκαταστάσεις του Ελληνικού Κέντρου Θαλασσίων Ερευνών. Μεταβλητές στήλης και ιζήματος, που σχετίζονται με τις τεχνικές πτυχές του μεσόκοσμου, παρακολουθήθηκαν στην διάρκεια του πειράματος (για 58 ημέρες) και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η συγκεκριμένη διάταξη είναι κατάλληλη για τέτοιου είδους πειράματα.

3.2 Εισαγωγή

Η διερεύνηση της δυναμικής της σύζευξης βενθικού και πελαγικού οικοσυστήματος (benthic pelagic coupling), σε καθεστώς αυξημένης παροχής οργανικού υλικού, έχει απασχολήσει την επιστημονική κοινότητα τα τελευταία χρόνια. Οι διεργασίες που διέπουν το πελαγικό οικοσύστημα είναι πολύ σημαντικές για τη μεταφορά του οργανικού υλικού στο ίζημα (Le Guitton et al.

² Μέρος αυτών των δεδομένων έχει υποβληθεί προς δημοσίευση στο περιοδικό *Limnology and Oceanography: Methods*. Panagiotis D. Dimitriou, Nafsika Papageorgiou,, Antonis Geropoulos, Vasiliki Kalogeropoulou, Manolis Moraitis, Ioulia Santi,, Irini Tsikopoulou, Paraskevi Pitta, Ioannis Karakassis. A novel mesocosm setup for benthic-pelagic coupling experiments.

Κεφάλαιο 3: Μία καινοτόμος πειραματική διάταξη μεσόκοσμων κατάλληλη για πειράματα σύζευξης βενθικού – πελαγικού οικοσυστήματος

2015) ενώ ταυτόχρονα οι βιογεωχημικές διεργασίες του βενθικού οικοσυστήματος μέσω ανάβλυσης (Cowie 2005) ή μέσω κυματισμού (Lucas et al. 2000), επηρεάζουν τη στήλη του νερού.








Η πρωτογενής παραγωγή του φυτοπλαγκτού και η επακόλουθη καθίζηση οργανικού υλικού έχουν μελετηθεί διεθνώς στα πλαίσια ερευνητικών προγραμμάτων. Παραδείγματος χάριν, οι Rodrigues Alves et al. (2014) αναφέρουν πως στα παράκτια οικοσυστήματα της νοτιοανατολικής Βραζιλίας, η εισροή θρεπτικών από τον Ατλαντικό προκαλεί νέα παραγωγή φυτοπλαγκτού, συνεισφέροντας έτσι στην αύξηση της αφθονίας των βενθικών κοινοτήτων, κυρίως των βακτηρίων, μέσω της ιζηματοπόθεσης. Στη θαλάσσια περιοχή της Μάγχης, σύμφωνα με τους Zhang et al. (2015), την άνθηση του φυτοπλαγκτού την άνοιξη, ακολούθησε άμεση αύξηση αφθονίας στις περισσότερες βενθικές ταξινομικές και λειτουργικές ομάδες. Από την άλλη, στην ολιγοτροφική Ανατολική Μεσόγειο, οι Dimitriou et al. (2015), (αναλυτικά στην ενότητα 2), αναφέρουν πως η αυξημένη καθίζηση οργανικής ύλης λόγω ευτροφισμού επηρεάζει τις βενθικές κοινότητες ευνοώντας κυρίως τα ευκαιριακά είδη.

Δεδομένα από βραχυπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες μελέτες έχουν χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία και βαθμονόμηση μαθηματικών μοντέλων, με τη βοήθεια των οποίων μπορεί να εξηγηθούν οι διεργασίες του υπό μελέτη οικοσυστήματος και να γίνει πρόβλεψη της απόκρισής του σε διάφορες συνθήκες/σενάρια (Graf 1992, Franco et al. 2015). Διάφορα μοντέλα έχουν προταθεί μέχρι στιγμής, συσχετίζοντας την πρωτογενή παραγωγικότητα του πελαγικού συστήματος με την απαίτηση οξυγόνου στο ίζημα (Hargrave 1973, Vaquer-Sunyer & Duarte 2008, Fulweiler et al. 2010, Suykens et al. 2011) ή οργανικού υλικού στο ίζημα (Müller & Suess 1979, Brady et al. 2013) ή διάφορες βιογεωχημικές μεταβλητές του ιζήματος (Grangeré et al. 2012). Οι περισσότερες από τις παραπάνω προσεγγίσεις έχουν βασιστεί σε μελέτες πεδίου και όχι σε δεδομένα από πειραματικές μελέτες. Ωστόσο, οι μελέτες πεδίου δεν μπορούν πάντα να προσφέρουν επαρκή πληροφορία για τους μηχανισμούς και τις διεργασίες που διέπουν το υπό μελέτη οικοσύστημα, ιδιαίτερα σε ό,τι αφορά την απόκριση σε συγκεκριμένες πιέσεις και επίπεδα διατάραξης των αρχικών συνθηκών. Για τη μελέτη των βιολογικών αποκρίσεων

Κεφάλαιο 3: Μία καινοτόμος πειραματική διάταξη μεσόκοσμων κατάλληλη για πειράματα σύζευξης βεθνικού – πελαγικού οικοσυστήματος

θα πρέπει να σχεδιαστεί ένα πειραματικό μοντέλο, όπου να προσομοιώνονται μία ή συνδυασμός πολλών πιέσεων σε συγκεκριμένο όγκο νερού, απομονωμένο από άλλους εξωτερικούς παράγοντες (Mostajir et al. 2013).

Οι πειραματικές διατάξεις εγκλεισμού οικοσυστημάτων (μεσόκοσμοι - mesocosms) χρησιμοποιούνται για τη διερεύνηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ οργανισμών ή μεταξύ οργανισμών και φυσικών περιβαλλοντικών συνθηκών, λόγω της ιδιότητάς τους να προσομοιώνουν τις πραγματικές συνθήκες, ως μικρογραφία του φυσικού οικοσυστήματος (Petersen et al. 2009) (Εικόνα 3.1).

Class of experiment	Scale	Methods	Advantages	Disadvantages	Examples
 Whole ecosystem manipulations in nature	Scale of small natural ecosystems	Manipulate one or more factors. Maintain both control and treatment ecosystems.	High degree of realism.	Expensive; difficult to control and replicate for large ecosystems with environmental gradients.	Whole watershed manipulations: experimental lakes, tide pools, or small creeks.
 <i>In situ</i> field experiments	1 m ² –1 ha	Manipulate individual plots or water masses, each of which is open to the larger natural ecosystem.	High degree of realism and replication possible.	Treatment options constrained by openness. Patchy environments present challenges for replication.	Enrichment of Nutrients on a Coral Reef Experiment (ENCORE). Iron Enrichment Experiments (IEX).
 Cage experiments	1–100 m ²	Semipermeable enclosure allows water and small organisms to move in or out and excludes others.	High degree of realism and replication possible.	Limited to population and community-level studies.	Grazing and predation experiments, experiments on rocky shores.
 Field mesocosms	1–100 m ³	Walls prevent exchange of water, organisms, and materials between what is inside and outside of container.	Intermediate degree of control and realism. Easy to maintain. Less costly than land-based systems. High degree of replication possible.	Difficult to simulate realistic internal mixing. Isolation and artifacts of scale can distort dynamics.	Limnocorrals Controlled Ecosystem Population Experiment (CEPEX).
 Laboratory mesocosms	0.01–100 m ³	Walls isolate organisms and processes. Chemical and physical environment is maintained through technology.	Very high degree of control over internal biological and physical conditions. Convenient location allows continuous monitoring and manipulation. High degree of replication possible.	May be expensive to construct and maintain depending on the degree of environmental control. Isolation and artifacts may distort dynamics.	Multiscale Experimental Ecosystem Research Center (MEERC); Marine Ecosystem Research Laboratory, University of Rhode Island (MERL); Ecotron Controlled Environmental Facility.
 Physiological-scale laboratory experiments	0.001–1 m ³	No attempt made to simulate an ecosystem.	Allows highly controlled study of individual processes.	Extrapolation to ecosystem context can be difficult.	Photosynthesis vs. irradiance experiments sediment flux rate experiments.
 Simulation models	Matched to research question and data	Create mathematical analog of ecological system. Ask "what-if" questions.	Infinite control over what is included. Useful tool for both designing experiments and extrapolating results.	Realism of output is entirely constrained by assumptions: garbage in = garbage out.	Ecopath Ecosim

Εικόνα 3.1. Χαρακτηριστικά διαφορετικών κλάσεων μεγέθους πειραματικών εγκαταστάσεων. πηγή (Petersen et al. 2009).

Εχει αναφερθεί, (Bloesch 1988, Petersen et al. 2009) πως για μελέτες στο επίπεδο των βιολογικών κοινοτήτων ή των τροφικών πλεγμάτων ο ελάχιστος όγκος του απομονωμένου νερού πρέπει να υπερβαίνει το 1 m³. Πειραματικά συστήματα αυτής της κλίμακας έχει βρεθεί πως αποτελούν ένα ικανοποιητικό συμβιβασμό μεταξύ του μεγέθους του μελετώμενου οικοσυστήματος, της πολυπλοκότητας της πειραματικής κατασκευής και του οικονομικού κόστους και εργασίας που απαιτείται (Petersen et al. 2009).

Κεφάλαιο 3: Μία καινοτόμος πειραματική διάταξη μεσόκοσμων κατάλληλη για πειράματα σύζευξης βενθικού – πελαγικού οικοσυστήματος

Οι περισσότερες μελέτες με τη χρήση μεσόκοσμων εστιάζουν κυρίως στη μελέτη των διεργασιών που διέπουν τη στήλη του νερού στα πελαγικά οικοσυστήματα (Riebesell et al. 2007, Calbet et al. 2012, Sebastián et al. 2012, Schwier et al. 2015) και άλλα. Η προσθήκη ιζήματος στις μελέτες μεσόκοσμων ενισχύει τη ρεαλιστικότητα των φυσικών διεργασιών, συμπεριλαμβάνοντας πολύ περισσότερες διεργασίες στους βιογεωχημικούς κύκλους (θρεπτικά, οξυγόνο, ρυπαντές) και περισσότερες ομάδες οργανισμών (μικροβένθος, μειοπανίδα, μακροπανίδα) (Petersen et al. 2009). Οι πιο συνηθισμένες πειραματικές διατάξεις μεσόκοσμων που περιέχουν και ίζημα καλούνται βενθόκοσμοι (ή μικρόκοσμοι). Κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η ενσωμάτωση επαρκούς ποσότητας ιζήματος ενώ παράλληλα διατηρείται η υπερκείμενη στήλη του νερού σε ένα ελάχιστο ύψος και όγκο. Παραδείγματα βενθόκοσμων περιλαμβάνουν επώαση πυρήνων ιζήματος (Ernst et al. 2006, Shelley et al. 2008) ή ολόκληρα ενυδρεία με περισσότερο ίζημα και ύψος στήλης νερού που δεν ξεπερνά το ένα μέτρο (Karle et al. 2007, Widdicombe et al. 2009, Porter et al. 2010) και μόνο ελάχιστα παραδείγματα μεγάλων *in situ* μεσόκοσμων (Suomela et al. 2005, Kraufvelin et al. 2006, Bruschetti et al. 2008). Ειδοποιός διαφορά μεταξύ μεσόκοσμων και μικρόκοσμων ή βενθόκοσμων, είναι ότι οι πρώτοι είναι σχεδιασμένοι να ενσωματώνουν μία πληρέστερη σειρά οικολογικών διεργασιών καθιστώντας τους κάτι μεταξύ των εργαστηριακών πειραμάτων και των δειγματοληψιών πεδίου (Petersen et al. 2009). Επιπροσθέτως, πειράματα μεσόκοσμων μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πειραματικούς σχεδιασμούς μεγάλης χρονικής διάρκειας, από λίγες μέχρι 100 ημέρες, χρονικό διάστημα επαρκές ώστε μία συγκεκριμένη πειραματική μεταχείριση να ολοκληρώσει τον κύκλο της (Boynton et al. 2001).

Η πειραματική διάταξη μεσόκοσμου που προτείνεται στην συγκεκριμένη θεματική ενότητα, αποτελεί ενδιάμεσο κρίκο ανάμεσα στα μικρής κλίμακας εργαστηριακά πειράματα με βενθόκοσμους και στα *in situ* πειράματα θαλάσσιων μεσόκοσμων. Η χρήση κερσαίων εγκαταστάσεων για τη διεξαγωγή του πειράματος, που ταυτόχρονα περιελάμβανε επαρκή όγκο νερού 1,5 m³, βάθος στήλης 4,5 m και όγκο ιζήματος 85 l και 30 cm βάθος, επιτρέπει την μέγιστη δυνατή προσομοίωση των πραγματικών συνθηκών, ενώ ταυτόχρονα διατηρεί το κόστος και τις τεχνικές δυσκολίες στο ελάχιστο δυνατό επίπεδο. Ο

Κεφάλαιο 3: Μία καινοτόμος πειραματική διάταξη μεσόκοσμων κατάλληλη για πειράματα σύζευξης βενθικού – πελαγικού οικοσυστήματος

συνδυασμός μιας πλήρως λειτουργικής στήλης νερού και βενθικής κοινότητας καθιστά δυνατή την λεπτομερή μελέτη των επιμέρους διεργασιών και αλληλεπιδράσεων του θαλάσσιου οικοσυστήματος ταυτόχρονα με το σύνολο. Ο συγκεκριμένος πειραματικός σχεδιασμός συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των πειραμάτων μεσόκοσμων στήλης νερού (πολυμεταβλητές μελέτες, επαναληψιμότητα, έλεγχος συνθηκών) με την πιο ρεαλιστική παρουσία ενός τμήματος του βένθους με μία λειτουργική βενθική κοινότητα.

Η συγκεκριμένη πειραματική διάταξη χρησιμοποιήθηκε με επιτυχία σε ένα πείραμα που έγινε στο πλαίσιο του προγράμματος HYPOXIA (www.marine-hypoxia.eu) στις εγκαταστάσεις πειραμάτων μεσόκοσμων στο Ελληνικό Κέντρο Θαλασσιών Ερευνών. Στόχος του πειράματος ήταν η μελέτη της σύζευξης βενθικού – πελαγικού οικοσυστήματος σε συνθήκες ευτροφισμού. Στην παρούσα ενότητα, παρουσιάζονται και αναλύονται συγκεκριμένες μεταβλητές που σχετίζονται με τα τεχνικά θέματα της πειραματικής διάταξης, όπως παρακολούθηση της κατάστασης του μεσόκοσμου, στρωμάτωση της στήλης του νερού και του ιζήματος και απόκριση της βενθικής πανίδας.

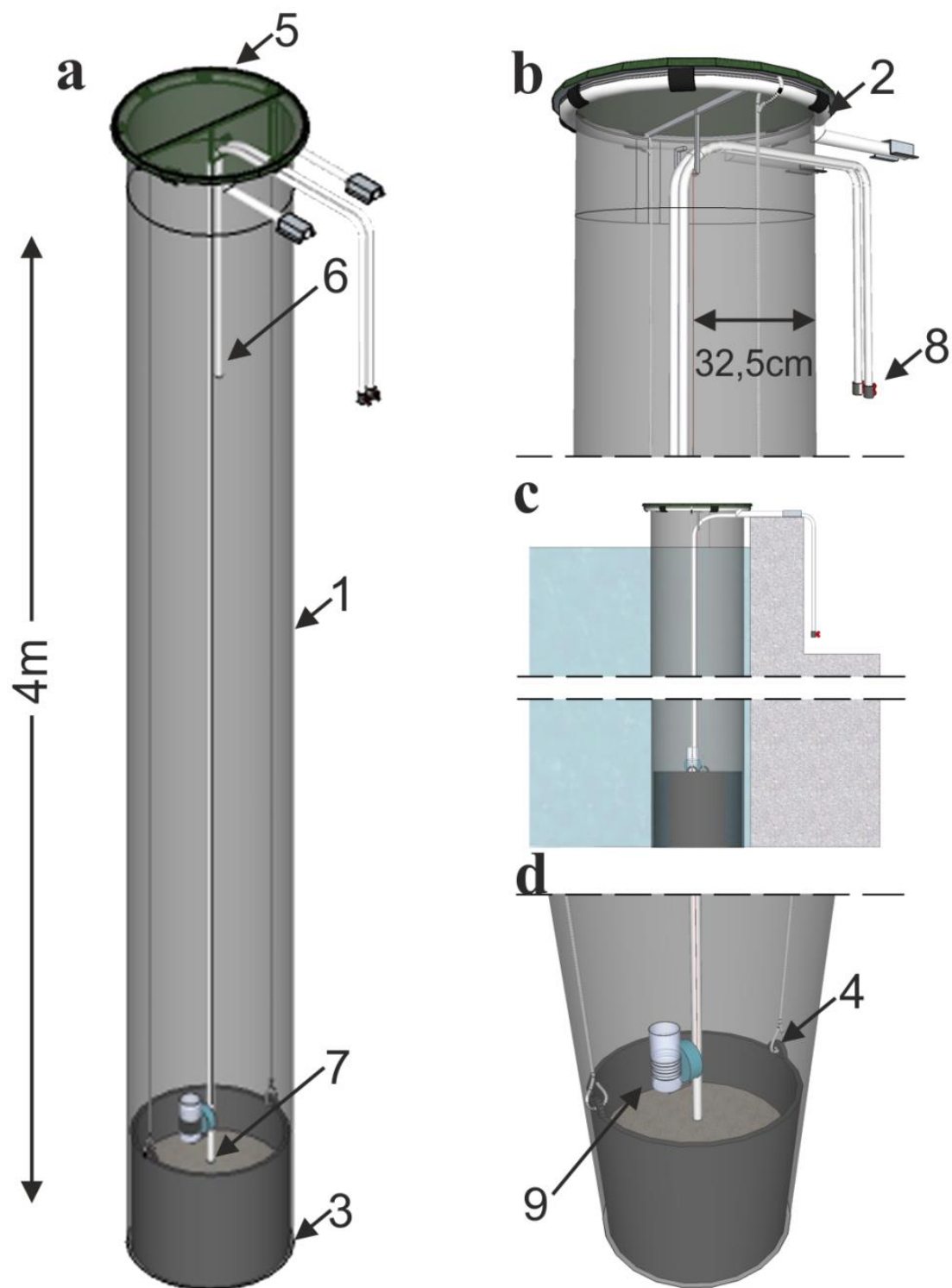
3.3 Υλικά και μέθοδοι

Οι εγκαταστάσεις του CRETACOSMOS (www.cretacosmos.eu) στο Ελληνικό Κέντρο Θαλασσιών Ερευνών αποτελούν τη μοναδική υποδομή μεσόκοσμων στην Ανατολική Μεσόγειο, που μέχρι σήμερα έχει φιλοξενήσει πολλά και διαφορετικά πειράματα μεγάλης κλίμακας και διεθνούς βεληνεκούς. Αποτελούνται από δύο κερσαίες, ελεγχόμενης θερμοκρασίας ($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$), τσιμεντένιες δεξαμενές όγκου 150 και 350 m³ αντίστοιχα.

3.3.1 Σχεδιασμός Μεσόκοσμων

Οι μεσόκοσμοι (Εικόνες 3.2.a-d) είναι 9 κυλινδρικούς σάκοι από αδιαφανές πολυαιθυλένιο, διαμέτρου 0.64 m, περιμέτρου 2m, ύψους 4.5 m και συνολικού όγκου υδάτινης στήλης 1.5 m³, οι οποίοι επώαστηκαν στη τσιμεντένια δεξαμενή όγκου 350 m³ των υποδομών του ΕΛΚΕΘΕ, με τρεχούμενο θαλασσινό νερό σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Κεφάλαιο 3: Μία καινοτόμος πειραματική διάταξη μεσόκοσμων κατάλληλη για πειράματα σύζευξης βεθνικού – πελαγικού οικοσυστήματος



Εικόνα 3.2.a-d. Τρισδιάστατη αναπαράσταση και διαστάσεις ενός μεσόκοσμου. a: όλη η κατασκευή, b: το άνω μέρος, c: πλάγια όψη, d: το κάτω μέρος. 1: Σάκος πολυαιθυλενίου (4,5 m στήλη νερού, 1,5 m³ συνολικός όγκος), 2: ατσάλινο στεφάνι, 3: Δοχείο ιζήματος (30cm ύψος και 85 l ιζήματος), 4: Σχοινί σταθεροποίησης, 5: Καπάκι και υλικό σκίασης, 6: Επιφανειακό σημείο δειγματοληψίας νερού (1m), 7: Βαθύ σημείο δειγματοληψίας νερού (4m), 8: Διακόπτης ροής και έξοδος δείγματος νερού, 9: ιζηματοπαγίδα (3.8m βάθος)

Κεφάλαιο 3: Μία καινοτόμος πειραματική διάταξη μεσόκοσμων κατάλληλη για πειράματα σύζευξης βεθνικού – πελαγικού οικοσυστήματος

Κάθε σάκος σταθεροποιείται με την χρήση ενός ατσάλινου δακτυλίου στην κορυφή του, ο οποίος με τη σειρά του ασφαρίζεται σε ένα σταθερό σημείο πάνω στο τοίχωμα της δεξαμενής. Ειδικά διαμορφωμένα διαφανή καλύμματα, κατασκευασμένα από PVC, τοποθετούνται στο άνοιγμα του κάθε μεσόκοσμου όπου και ασφαλίζουν, εμποδίζοντας την είσοδο σκόνης, νερού και γενικότερα την επιμόλυνση του νερού από το εξωτερικό περιβάλλον. Τα καλύμματα μπορούν εύκολα να απασφαλιστούν και να ανοίξουν εάν αυτό είναι απαραίτητο. Η ένταση του φωτός στο εσωτερικό του μεσόκοσμου μπορεί να ρυθμιστεί με την χρήση ενός υφάσματος σκίασης που τοποθετείται επάνω στο κάλυμμα, προκειμένου να μειωθεί η έντονη ηλιακή ακτινοβολία (Εικόνα 3.2b). Εάν κριθεί απαραίτητη από τον πειραματικό σχεδιασμό, η ύπαρξη ανάμειξης στην στήλη, αυτή μπορεί να γίνει με την χρήση ελαφρού αερισμού προερχόμενου από ένα λεπτό σωλήνα PVC, διαμέτρου 4 cm, ο οποίος τοποθετείται κάθετα στο κέντρο του μεσόκοσμου και προκαλεί μία ροή αέρα από τον πυθμένα προς την επιφάνεια σύμφωνα με την κατασκευή του Norwegian National Mesocosm Center, University of Bergen (Williams & Egge 1998, Nejtgaard et al. 2006).

Τα δοχεία του ιζήματος (Εικόνα 3.2d) είναι κατασκευασμένα από αδιαφανές (μαύρο) πολυαιθυλένιο (PELD) κυλινδρικού σχήματος, διαμέτρου 0.6 cm και ύψους 60 cm, με δύο χερούλια στο πάνω μέρος τους. Το ίζημα στο εσωτερικό του έχει ύψος 30 cm και συνολικό όγκο 85 l. Μετά την πλήρωση με ίζημα μέχρι το απαιτούμενο ύψος, το υπόλοιπο δοχείο συμπληρώνεται με νερό, κλείνει με την χρήση ενός καλύμματος για την αποτροπή τυχόν υπερχειλίσης του ιζήματος κατά την τοποθέτηση του δοχείου στο εσωτερικό του μεσόκοσμου. Λόγω του μεγάλου βάρους των δοχείων, απαιτείται η χρήση ενός μηχανικού γερανού για την σωστή τοποθέτησή τους στο εσωτερικό του μεσόκοσμου. Η σταθεροποίησή τους στο επιθυμητό ύψος γίνεται με την χρήση αποστειρωμένου σχοινιού το οποίο δένεται στα χερούλια από την μία άκρη και στο μεταλλικό στεφάνι από την άλλη, εξασφαλίζοντας παράλληλα ότι δεν θα ασκείται πίεση στο σάκο από τα δοχεία. Μετά την τοποθέτηση, το καπάκι αφαιρείται και όλο το σύστημα αφήνεται να ηρεμήσει για τέσσερις ημέρες πριν ξεκινήσει το πείραμα και οι δειγματοληψίες.

Κεφάλαιο 3: Μία καινοτόμος πειραματική διάταξη μεσόκοσμων κατάλληλη για πειράματα σύζευξης βεθνικού – πελαγικού οικοσυστήματος

Η θερμοκρασία και η ένταση του φωτός παρακολουθούνται κατά την διάρκεια του πειράματος από ειδικούς αισθητήρες, οι οποίοι συλλέγουν μετρήσεις κάθε 1 λεπτό. Οι αισθητήρες καθαρίζονται σε τακτά χρονικά διαστήματα για την αποτροπή ανάπτυξης φυκών στην εξωτερική τους επιφάνεια.

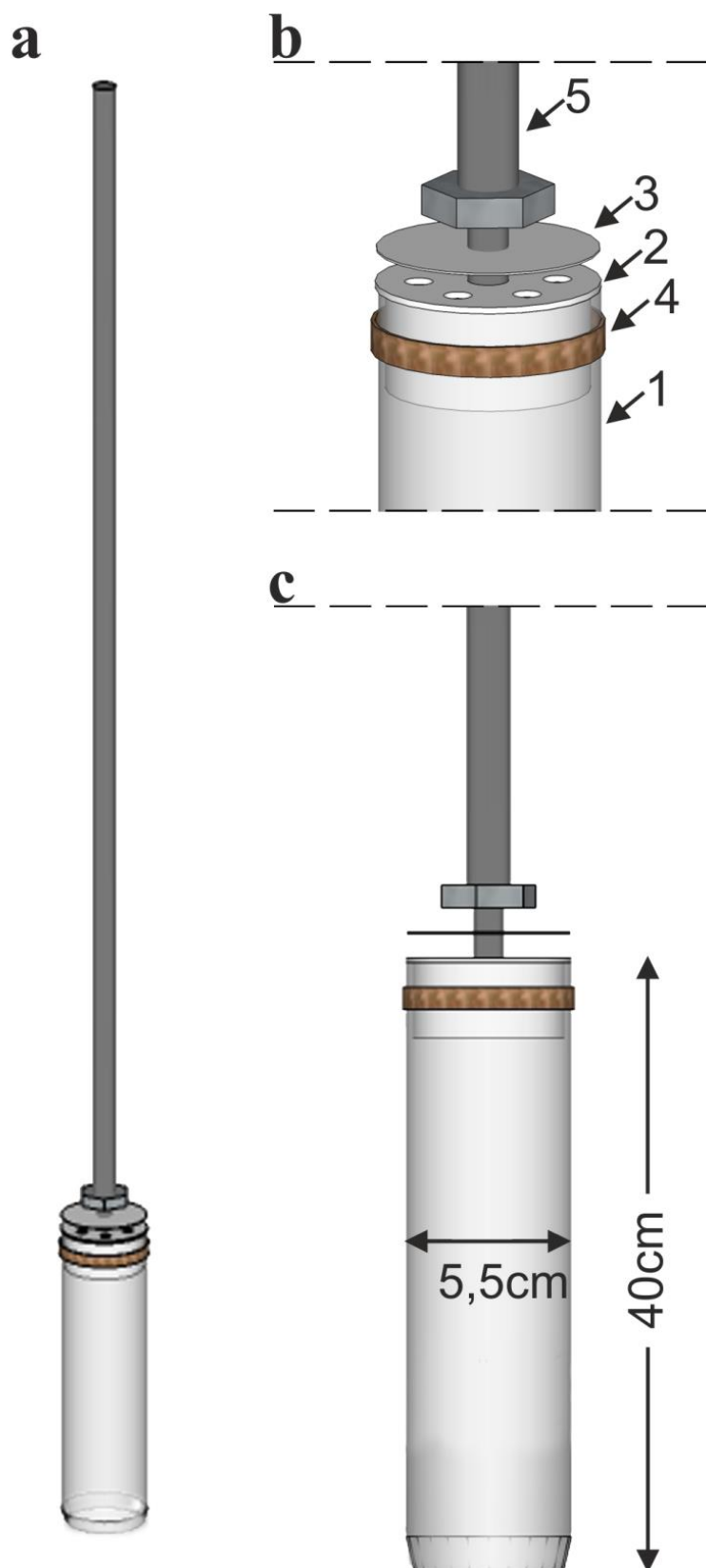
3.3.2 Δειγματοληψία νερού

Το σύστημα δειγματοληψίας του νερού (Εικόνα 3.2b,c) σχεδιάστηκε με σκοπό τη ελαχιστοποίηση της διατάραξης του συστήματος. Σε κάθε μεσόκοσμο, αποστειρωμένοι σωλήνες από PVC, εσωτερικής διαμέτρου 9 mm, τοποθετούνται μόνιμα στο κέντρο του σάκου σε συγκεκριμένα βάθη του 1 m και των 4 m (10 cm πάνω από την επιφάνεια του ιζήματος). Η λήψη του νερού γίνεται με το άνοιγμα του διακόπτη στην άκρη του σωλήνα έξω από το μεσόκοσμο και η πρώτη συλλογή νερού γίνεται, αφού αυτό αφεθεί να τρέξει για περίπου 30 δευτερόλεπτα.

3.3.3 Δειγματοληψία ιζήματος

Για τις ανάγκες του πειράματος, σχεδιάστηκε ειδικός πυρηνολήπτης (corer sampler), με σκοπό τη συλλογή ιζήματος, από το εσωτερικό του μεσόκοσμου, προκαλώντας τη λιγότερη δυνατή διατάραξη στο σύστημα (Εικόνα 3.3.a-c). Η χρήση πυρηνολήπτη προτιμήθηκε από άλλες μεθόδους, αφενός λόγω του μικρού του μεγέθους, αλλά κυρίως λόγω του ότι επιτρέπει την ακριβή δειγματοληψία συγκεκριμένου σημείου, δίνοντας την δυνατότητα να αποφεύγεται η λήψη δείγματος από τα ίδια σημεία πολλές φορές, ακόμα και μέσα στο μικρό μέγεθος του δοχείου ιζήματος.

Κεφάλαιο 3: Μία καινοτόμος πειραματική διάταξη μεσόκοσμων κατάλληλη για πειράματα σύζευξης βεθνικού – πελαγικού οικοσυστήματος



Εικόνα 3.3. Τρισδιάστατη αναπαράσταση του δειγματολήπτη ιζήματος. a: δειγματολήπτης, b: λεπτομέρειες συστήματος εισόδου/εξόδου, c: πλάγια όψη. 1: Κυλινδρικός πυρηνολήπτης (5.5 cm διάμετρος), 2: PVC τάπα με τρύπες, 3: μεμβράνη, 4: Σταθεροποιητικός δακτύλιος, 5: Ανοξείδωτο κοντάρι.

Κεφάλαιο 3: Μία καινοτόμος πειραματική διάταξη μεσόκοσμων κατάλληλη για πειράματα σύζευξης βενθικού – πελαγικού οικοσυστήματος

Ο δειγματολήπτης αποτελείται από: (i) κυλινδρικό πυρηνολήπτη από PVC, διαστάσεων: ύψος: 40 cm, διάμετρος: 5,5 cm και επιφάνεια: 23.8 cm² (ii) τάπα από PVC, τοποθετημένη στο πάνω μέρος του κυλίνδρου ύψους 5 cm με τρύπες διαμέτρου 1 mm στην περιμέτρή της ώστε να επιτρέπεται η ροή του νερού εντός και εκτός του (iii) λεπτή πλαστική μεμβράνη τοποθετημένη στο πάνω μέρος της τάπας, η οποία καλύπτει τις τρύπες (iv) στο κέντρο της τάπας, βρίσκεται στερεωμένο κοντάρι από ανοξείδωτο ατσάλι, μήκους 1.5 m, και (v) ανεξάρτητα κοντάρια, μήκους 2 m, τα οποία μπορούν να προσαρτηθούν το ένα στο άλλο προκειμένου να υπάρχει η δυνατότητα δειγματοληψίας σε οποιοδήποτε βάθος. Καθώς ο δειγματολήπτης κατεβαίνει κάθετα προς τον πυθμένα του μεσόκομου, η πίεση που ασκεί το νερό, που εισέρχεται στον κύλινδρο, ανασπώνει μερικά χιλιοστά την μεμβράνη στο επάνω μέρος, επιτρέποντας την ροή του νερού και την έξοδό του από τον κύλινδρο. Όταν ο πυρηνολήπτης φτάνει στο ίζημα, πιέζεται στο εσωτερικό και το ίζημα εισέρχεται στον κύλινδρο, αφήνοντας μόνο μερικά εκατοστά νερού στο επάνω μέρος του. Στην συνέχεια, καθώς ο δειγματολήπτης ανασύρεται κάθετα προς την επιφάνεια, η πίεση που ασκείται από το νερό, απευθείας πάνω στην μεμβράνη, την αναγκάζει να κλείσει ερμητικά, δημιουργώντας αρνητική πίεση που συγκρατεί το ίζημα στο εσωτερικό του κυλίνδρου. Όταν ο δειγματολήπτης φτάσει στην επιφάνεια, μία τάπα τοποθετείται στο κάτω μέρος του κυλίνδρου, κλείνοντας το δείγμα στο εσωτερικό.

3.3.4 Χρήση της πειραματικής διάταξης

Μετά από σειρά δοκιμών και βελτιώσεων της πειραματικής διάταξης που κράτησε περίπου ένα χρόνο, το Σεπτέμβριο του 2014 έλαβε χώρα η πρώτη πλήρης δοκιμή των μεσόκοσμων σε πραγματικές συνθήκες. Ο πειραματικός σχεδιασμός περιελάμβανε την μελέτη της σύζευξης του βενθικού και του πελαγικού οικοσυστήματος σε συνθήκες ευτροφισμού, που δημιουργήθηκαν με την προσθήκη θρεπτικών στοιχείων (PO₄ και NO₃) στην στήλη του νερού.

Χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 9 μεσόκοσμοι, δύο πειραματικές μεταχειρίσεις με προσθήκη θρεπτικών (Χαμηλή προσθήκη - ένταση ευτροφισμού «Low treatment», Υψηλή προσθήκη - ένταση ευτροφισμού «High

Κεφάλαιο 3: Μία καινοτόμος πειραματική διάταξη μεσόκοσμων κατάλληλη για πειράματα σύζευξης βενθικού – πελαγικού οικοσυστήματος

treatment»), καθώς και μάρτυρας «Control» μηδενική προσθήκη. Κάθε επίπεδο προσθήκης περιελάμβανε τρεις επαναλήψεις (replicates). Η αρχική συγκέντρωση των θρεπτικών που μετρήθηκε στο νερό βρέθηκε να είναι 0,05 μM PO_4 και η αντίστοιχη των NO_3 ήταν 0,1 μM . Με βάση αυτές καθορίστηκε η συγκέντρωση της χαμηλής προσθήκης στα 5 μM (100x προσθήκη) και η συγκέντρωση της υψηλής προσθήκης στα 10 μM (200x προσθήκη). Αντίστοιχα, η προσθήκη NO_3 έγινε με τελική συγκέντρωση 30 μM (300x προσθήκη), στην χαμηλή και 60 μM (600x προσθήκη), στην υψηλή προσθήκη.

Το θαλασσινό νερό που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα, συλλέχθηκε από την παράκτια περιοχή του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. στις Γούρνες του Ηρακλείου από βάθος 2 m. Η μεταφορά του νερού έγινε μέσα σε 30-60 λεπτά από τον χρόνο συλλογής, με την χρήση δεξαμενών από υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο (high density polyethylene - PE, οι οποίες προηγουμένως είχαν καθαριστεί με οξύ,. Για τη διασφάλιση της ομοιογένειας μεταξύ των μεσόκοσμων, το θαλασσινό νερό κατανεμήθηκε εξ ίσου από τα δοχεία στους μεσόκοσμους, η διαδικασία πλήρωσης των οποίων διήρκεσε δύο ώρες. Σε κάθε μεσόκοσμο τοποθετήθηκε μία ιζηματοπαγίδα σε βάθος 3,8 μ , για την μέτρηση του ρυθμού ιζηματοπόθεσης. Η ιζηματοπαγίδα αποτελούνταν από ένα κυλινδρικό δοχείο από PVC, με 4,5 cm ακτίνα, 25 cm ύψος και 16 l όγκο.

Το ίζημα του πειράματος συλλέχθηκε από μία περιοχή με περιορισμένη ανθρωπογενή επίδραση στο λιμάνι του Ηρακλείου και πιο συγκεκριμένα στην περιοχή όπου ελλιμενίζονται τα μικρά αλιευτικά και τα σκάφη αναψυχής. Οι ετήσιες τιμές συγκέντρωσης κλωροφύλλης α (Chl- α) στη στήλη του νερού, στην εν λόγω περιοχή κυμαίνονται από 0,4 $\mu\text{g l}^{-1}$ την άνοιξη έως 1,4 $\mu\text{g l}^{-1}$ το φθινόπωρο, τιμές που αντιστοιχούν σε «Μέτρια» και «Φτωχή» οικολογική κατάσταση βάσει της κλίμακας που έχει προταθεί από τους Simboura et al. (2005), ενώ παράλληλα, οι τιμές των NO_3 και PO_4 κυμαίνονται από 10,09 μM και 0,18 μM την άνοιξη έως 2,9 μM και 0,01 μM το φθινόπωρο. Το ποσοστό ιλύος/αργίλου (Silt&Clay%) του ιζήματος είναι 40%, το ποσοστό του οργανικού υλικού 10.1% και φιλοξενεί βενθικές κοινότητες με μέσο όρο 43 διαφορετικών ειδών ανά 0,1 m^2 . Το ίζημα συλλέχθηκε με χρήση δειγματολήπτη τύπου Boxcogger (30x30x30 cm) και τοποθετήθηκε στα δοχεία που περιγράφονται παραπάνω. Η συνολική ποσότητα του ιζήματος στα δοχεία ήταν 30 cm ύψος

Κεφάλαιο 3: Μία καινοτόμος πειραματική διάταξη μεσόκοσμων κατάλληλη για πειράματα σύζευξης βενθικού – πελαγικού οικοσυστήματος

και 85 l όγκος. Μετά την συλλογή, τα δοχεία γέμισαν με θαλασσινό νερό και μεταφέρθηκαν στις εγκαταστάσεις των μεσόκοσμων μέσα σε 1-2 ώρες. Επιπροσθέτως, για τον προσδιορισμό των αρχικών συνθηκών του ιζήματος και της μακροπανίδας στην περιοχή του λιμανιού συλλέχθηκαν 3 δείγματα για βιογεωχημικές αναλύσεις και άλλα 3 για μακροπανίδα. Η κοκκομετρική ανάλυση του ιζήματος έδειξε ότι το ποσοστό ιλύος και αργίλου ήταν 40% και η βενθική πανίδα της περιοχής ήταν πλούσια σε ποικιλότητα με 43 διαφορετικά είδη ανά 0,1 m².

Η συνολική διάρκεια του πειράματος ήταν 58 ημέρες. Η δειγματοληψία νερού και από τα δύο βάθρα γινόταν κάθε 3 ημέρες ενώ του ιζήματος κάθε 6 μέχρι την μέρα 24, όπου αποφασίστηκε οι δειγματοληψίες να γίνονται κάθε 7 μέρες, έτσι ώστε να μην αφαιρεθεί παραπάνω από το 10% του συνολικού όγκου νερού ή ιζήματος από τον κάθε μεσόκοσμο. Η δειγματοληψία του νερού γινόταν από δύο διαφορετικά βάθρα, (επιφάνεια 1 μ και πυθμένας 4 μ) και μετά ακολουθούσε το άδειασμα των ιζηματοπαγίδων. Στην συνέχεια, λάμβανε χώρα η δειγματοληψία του ιζήματος με την χρήση πυρηνολήπτη, παίρνοντας ένα δείγμα από κάθε μεσόκοσμο κάθε φορά από διαφορετικό σημείο στο δοχείο. Με την λήψη του δείγματος, καταγράφονταν η θερμοκρασία του ιζήματος και το οξειδοαναγωγικό δυναμικό (Eh) και στην συνέχεια το ίζημα διαχωριζόταν σε τρία στρώματα: επιφανειακό στρώμα (0-1 cm), ενδιάμεσο στρώμα (1-3 cm) και βαθύτερο στρώμα (3-5 cm). Τα δείγματα τοποθετούνταν στον πάγο και αποθηκεύονταν για μελλοντικές αναλύσεις. Στο τέλος του πειράματος, συλλέχθηκε ένα δείγμα μακροπανίδας από κάθε μεσόκοσμο, με την χρήση του δειγματολήπτη Boxcorer.

3.3.5 Μεταβλητές και πρωτόκολλα ανάλυσης

Λεπτομερής περιγραφή των μεταβλητών (μέθοδοι και αποτελέσματα) που μετρήθηκαν στα πλαίσια του συγκεκριμένου πειράματος περιέχονται στην ενότητα 3. Στην παρούσα ενότητα, στα πλαίσια της παρακολούθησης της εξέλιξης του πειράματος καθώς και της διερεύνησης των τεχνικών θεμάτων της πειραματικής διάταξης παρουσιάζεται και αναλύεται μόνο ένα μέρος των μεταβλητών. Στην στήλη του νερού, περιλαμβάνονται οι συγκεντρώσεις των

Κεφάλαιο 3: Μία καινοτόμος πειραματική διάταξη μεσόκοσμων κατάλληλη για πειράματα σύζευξης βεθνικού – πελαγικού οικοσυστήματος

θρεπτικών PO_4 και NO_3 που μετρήθηκαν με την μέθοδο των (Strickland & Parsons 1972, Grasshoff et al. 1999), η συγκέντρωση της χλωροφύλλης a (Yentsch & Menzel 1963), με την χρήση ενός Turner fluorometer (model 112) και η συγκέντρωση του διαλελυμένου Οξυγόνου που μετρήθηκε με την μέθοδο τιτλοδότησης Winkler. Ο ρυθμός καθίζησης χλωροφύλλης a μετρήθηκε από το νερό στις ιζηματοπαγίδες, ως βάρος ανά μέρα ανά m^2 . Το ποσοστό της οργανικής ύλης (OM%) του ιζήματος υπολογίστηκε ως το άθροισμα του βιοδιαθέσιμου και του μη βιοδιαθεσιμου οργανικού υλικού (Loh et al. 2008). Τα δείγματα μακροπανίδας, κοσκινίστηκαν με κόσκινο 0,5 mm, συντηρήθηκαν σε διάλυμα φορμόλης 10% και για την διευκόλυνση της διαλογής βάφτηκαν με χρωστική Rose Bengal.

3.3.6 Στατιστική ανάλυση

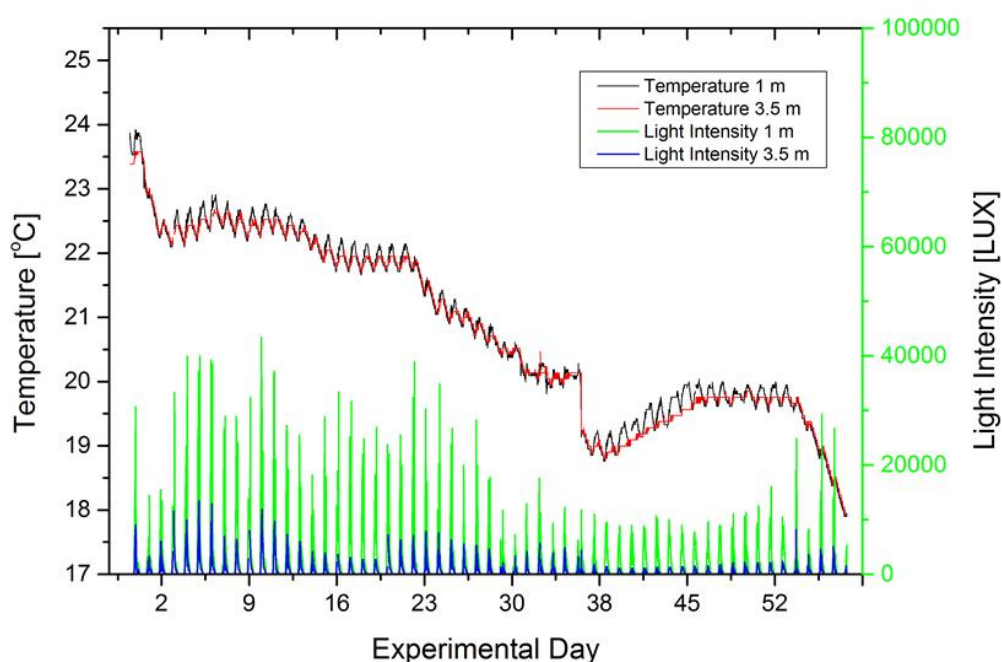
Για την διερεύνηση της μεταβλητότητας μεταξύ των δύο διαφορετικών βαθών στην στήλη του νερού (1 m and 4 m) για τις μεταβλητές NO_3 , PO_4 , χλωροφύλλη a , O_2 και των διαφορετικών επιπέδων του ιζήματος (0-1 cm, 1-3 cm, 3-5 cm) για το OM% χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος two way repeated measures Analysis of Variance (RM ANOVA). Στις περιπτώσεις που υπάρχει στατιστικά σημαντική αλληλεπίδραση μεταξύ των παραγόντων βάθος/στρώμα και χρόνος, η ανάλυση των κύριων επιπτώσεων (Main effects) των παραγόντων μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένα συμπεράσματα (Maxwell & Delaney 2004), κατά συνέπεια, έγινε ανάλυση των απλών επιπτώσεων (Simple effects), δηλαδή η διερεύνηση της μεταβλητότητας των παραγόντων σε κάθε χρονική στιγμή ξεχωριστά. Οι συγκρίσεις κατά ζεύγη (Pairwise comparisons) έγιναν με την χρήση Bonferroni *post hoc* test.

Πριν από τις αναλύσεις, όλες οι μεταβλητές ελέγχθηκαν ότι τηρούν τις προϋποθέσεις της κανονικής κατανομής (Shapiro-Wilk test) και της ομοιογένειας διασπορών (Levene's Test). Η υπόθεση της σφαιρικότητας, για την αλληλεπίδραση των παραγόντων, ελέγχθηκε με το Mauchly's test.

3.4 Αποτελέσματα

3.4.1 Στήλη του νερού

Στην αρχή του πειράματος, η θερμοκρασία σταθεροποιήθηκε στους 22° C όπου και παρέμεινε στην διάρκεια των τριών πρώτων εβδομάδων του πειράματος (ημέρα 21). Στην συνέχεια, άρχισε να μειώνεται με ρυθμό περίπου ένα βαθμό την εβδομάδα, ώσπου να φθάσει την ελάχιστη τιμή 18.5° C στο τέλος του πειράματος (Εικόνα 3.4).



Εικόνα 3.4. Θερμοκρασία και ένταση του φωτός σε δύο διαφορετικά βάθη (επιφάνεια 1 m και πυθμένας 3.5 m) όπως μετρήθηκαν με αυτόματους αισθητήρες στην διάρκεια του πειράματος.

Η στατιστική ανάλυση δεν έδειξε στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των δύο βαθών (RM ANOVA $p > 0.05$). Η ένταση του φωτός (Εικόνα 3.4) ήταν υψηλή στην διάρκεια των πρώτων 30 ημερών του πειράματος, ενώ μειώθηκε σταδιακά στις υπόλοιπες 28 μέρες. Η στατιστική ανάλυση έδειξε στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των διαφορετικών βαθών (RM ANOVA: $F(18,36) = 14.542, p < 0.001$).

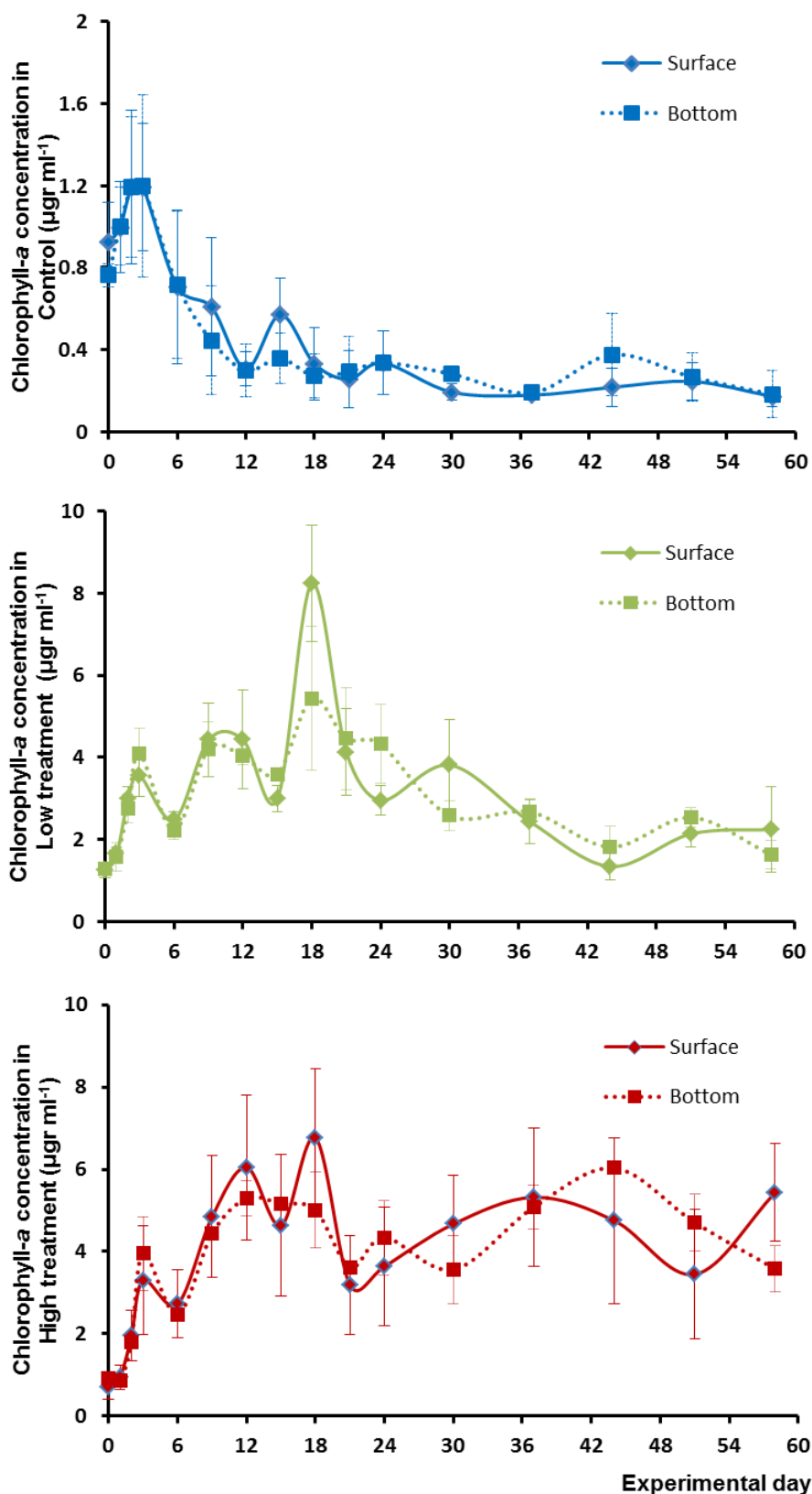
Η μέση συγκέντρωση των θρεπτικών PO_4 και NO_3 στον μάρτυρα ήταν 0,01 μM και 0,1 μM και στα δύο βάθη δειγματοληψίας. Μετά την προσθήκη

Κεφάλαιο 3: Μία καινοτόμος πειραματική διάταξη μεσόκοσμων κατάλληλη για πειράματα σύζευξης βεθνικού – πελαγικού οικοσυστήματος

των θρεπτικών, στην χαμηλή προσθήκη η αρχική συγκέντρωση ήταν 4.5 μM PO_4 και 23 μM NO_3 , ενώ στη υψηλή 9,5 μM και 55 μM αντίστοιχα. Η στατιστική ανάλυση έδειξε ότι δεν υπήρχαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των δύο βαθών σε κανένα μεσόκοσμο (RM ANOVA: effect of depth $p>0.05$). Στην χαμηλή προσθήκη, τα θρεπτικά εξαντλήθηκαν μέχρι την ημέρα 24, ενώ αντίθετα στην υψηλή, οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών δεν μηδενίστηκαν καθόλη την διάρκεια του πειράματος.

Σε ό,τι αφορά τη συγκέντρωση της κλωροφύλλης a , στους εμπλουτισμένους μεσόκοσμους παρατηρήθηκαν πολλαπλές ανθήσεις και αντίστοιχα μέγιστα κλωροφύλλης a (ημέρες 3, 9, 18 στην χαμηλή προσθήκη) και ημέρες 3, 12, 24, 44 στην υψηλή) (Εικόνα 3.6). Στον μάρτυρα, η μέγιστη συγκέντρωση κλωροφύλλης a παρατηρήθηκε την ημέρα 3 και μετά οι τιμές παρέμειναν σχετικά σταθερές. Στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των βαθών δεν παρατηρήθηκαν ούτε για την συγκέντρωση της κλωροφύλλης a αλλά ούτε και για την συγκέντρωση του διαλελυμένου οξυγόνου, σε κανένα επίπεδο προσθήκης (RM ANOVA effect of depth $p>0.05$).

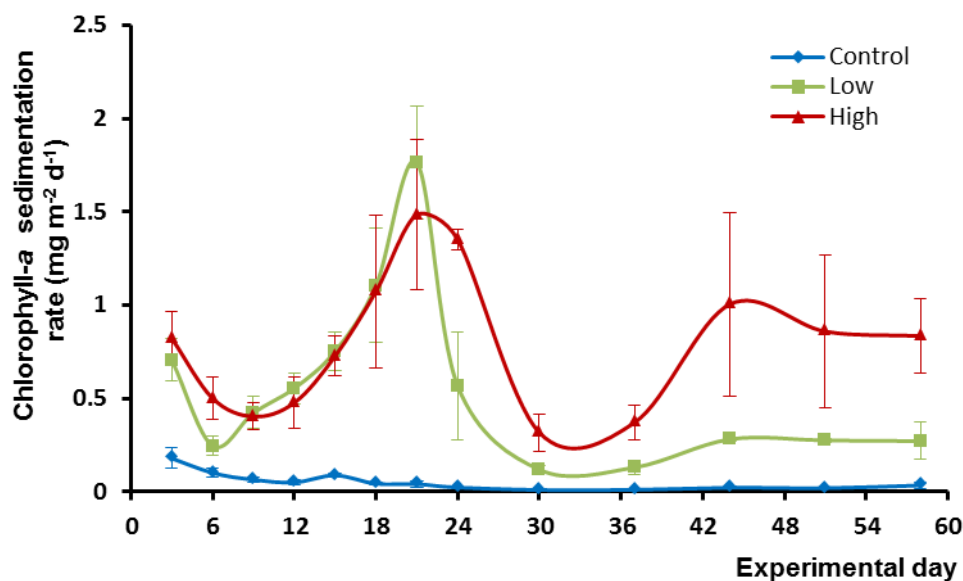
Κεφάλαιο 3: Μία καινοτόμος πειραματική διάταξη μεσόκοσμων κατάλληλη για πειράματα σύζευξης βεθνικού – πελαγικού οικοσυστήματος



Εικόνα 3.6. Μέση συγκέντρωση της κλωροφύλλης *a* στον μάρτυρα, στην χαμηλή προσθήκη και στην υψηλή προσθήκη για τα δύο βάθη δειγματοληψίας (επιφάνεια 1 m και πυθμένας 4 m) στην διάρκεια του πειράματος.

Κεφάλαιο 3: Μία καινοτόμος πειραματική διάταξη μεσόκοσμων κατάλληλη για πειράματα σύζευξης βεθνικού – πελαγικού οικοσυστήματος

Ο ρυθμός καθίζησης κλωροφύλλης *a* (Εικόνα 3.7), όπως μετρήθηκε από τις ιζηματοπαγίδες, παρέμεινε σταθερός στον μάρτυρα αλλά αυξήθηκε στους εμπλουτισμένους μεσόκοσμους. Το μέγιστο της καθίζησης παρουσιάστηκε την ημέρα 21 και για τα δύο επίπεδα προσθήκης ενώ στην συνέχεια του πειράματος η υψηλή προσθήκη παρουσίασε υψηλότερους ρυθμούς.

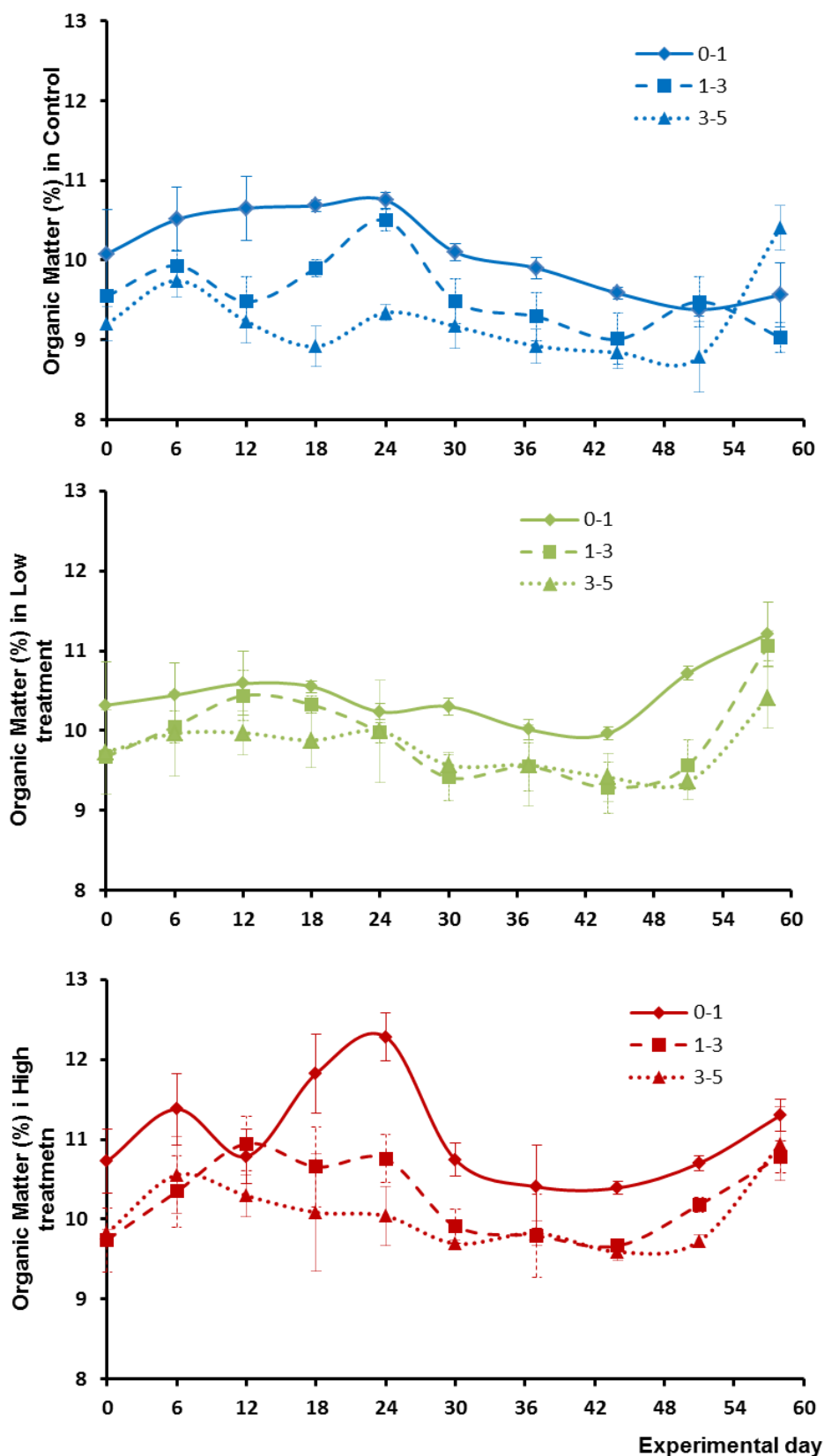


Εικόνα 3.7. Μέση τιμή του ρυθμού καθίζησης όπως υπολογίστηκε από τις ιζηματοπαγίδες στον μάρτυρα και τα δύο επίπεδα προσθήκης

3.4.2 Ίζημα

Στο ίζημα, η συγκέντρωση του οργανικού υλικού (Εικόνα 3.8) ανταποκρίθηκε στον αυξημένο ρυθμό ιζηματοπόθεσης, με τα ποσοστά να είναι ίδια ή υψηλότερα από αυτά που μετρήθηκαν στο πεδίο

Κεφάλαιο 3: Μία καινοτόμος πειραματική διάταξη μεσόκοσμων κατάλληλη για πειράματα σύζευξης βεθνικού – πελαγικού οικοσυστήματος

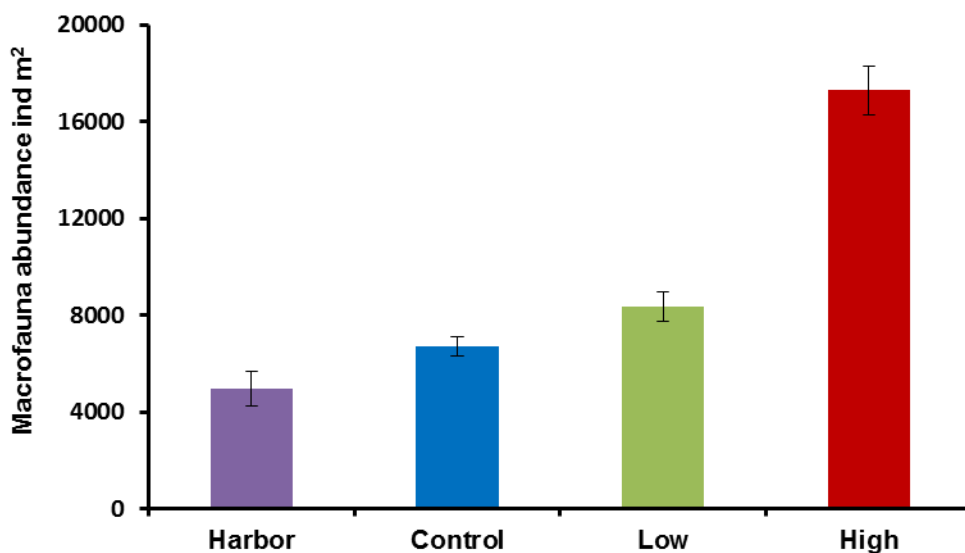


Εικόνα 3.8. Μέση τιμή ποσοστού οργανικού υλικού του ιζήματος στον μάρτυρα, χαμηλή και υψηλή προσθήκη στα 3 στρώματα του ιζήματος: επιφανειακό στρώμα (0-1 cm), ενδιάμεσο στρώμα (1-3 cm) και βαθύτερο στρώμα (3-5 cm).

Κεφάλαιο 3: Μία καινοτόμος πειραματική διάταξη μεσόκοσμων κατάλληλη για πειράματα σύζευξης βεθνικού – πελαγικού οικοσυστήματος

Το μέγιστο ποσοστό ΟΜ% στο ίζημα παρατηρήθηκε την ημέρα 24 σε όλα τα επίπεδα προσθήκης. Τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης έδειξαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των διαφορετικών στρωμάτων του ιζήματος στον μάρτυρα (RM ANOVA: Interaction layer (x) time: ns, main effects of layer: $F_{2,4}: 13.471, p < 0,05$, Post Hoc: 0-1 layer different), στην χαμηλή προσθήκη (RM ANOVA: Interaction layer (x) time: ns, effects of layer: $F_{2,4}: 30.513, p < 0,05$, Post Hoc: 0-1 layer different), αλλά και στη υψηλή προσθήκη (RM ANOVA: Interaction layer (x) time: ns, effects of layer: $F_{2,4}: 4.895, p < 0,05$, Post Hoc: all layers different).

Η αφθονία της μακροπανίδας (Εικόνα 3.9) αυξήθηκε κατά την διάρκεια του πειράματος σε όλους τους μεσόκοσμους σε σχέση με την αφθονία που βρέθηκε στην περιοχή συλλογής του ιζήματος.



Εικόνα 3.9. Μέση αφθονία μακροπανίδας που συλλέχθηκε με την χρήση δειγματολήπτη box corer (επιφάνεια 0.1 m²), στην περιοχή του λιμανιού και στο τέλος του πειράματος σε κάθε μεσόκοσμο.

Η στατιστική ανάλυση έδειξε στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των επιπέδων προσθήκης (One way ANOVA $F_{3,7} = 103.886, p < 0,001$) και σύμφωνα με την *post hoc* ανάλυση, η αύξηση της αφθονίας ήταν στατιστικά σημαντική μόνο στους εμπλουτισμένους μεσόκοσμους.

3.5 Συζήτηση

Η ευρωπαϊκή οδηγία για τη θαλάσσια στρατηγική έχει υιοθετήσει την «οικοσυστημική προσέγγιση» και την «ολιστική διαχείριση» στην εκτίμηση των επιπτώσεων των ανθρωπογενών πιέσεων στην υγεία των οικοσυστημάτων (Tett et al. 2013). Πειράματα που προσομοιώνουν την απόκριση ολόκληρων οικοσυστημάτων σε συγκεκριμένες πιέσεις γίνονται όλο και πιο δημοφιλή. Τα πειράματα μεσόκοσμων χρησιμοποιούνται ευρέως και μπορούν να προσφέρουν πληροφορίες σε πολλούς τομείς της θαλάσσιας οικολογίας, όπως οι επιπτώσεις της υπερθέρμανσης του πλανήτη, της οξύνισης των θαλάσσιων υδάτων, του ευτροφισμού κ.α. Τα πειράματα σύζευξης πελαγικού και βενθικού οικοσυστήματος είναι πολύ σημαντικά για την πλήρη κατανόηση των λειτουργιών των θαλάσσιων παράκτιων οικοσυστημάτων. Σε αυτά τα πλαίσια, η προτεινόμενη μεθοδολογία, με την προσθήκη ιζήματος (ένα μέρος του οικοσυστήματος που συνήθως δεν συμπεριλαμβάνεται) σε μία ευρέως χρησιμοποιούμενη μεθοδολογία όπως αυτή των πελαγικών μεσόκοσμων, φιλοδοξεί να προσφέρει νέες ευκαιρίες έρευνας και να βελτιώσει τις γνώσεις μας για το θαλάσσιο παράκτιο οικοσύστημα.

Όπως φάνηκε από τα αποτελέσματα της χρήσης της πειραματικής διάταξης, όλα τα μέρη του περικλειόμενου οικοσυστήματος (στήλη νερού, ίζημα και οργανισμοί που ζουν σε αυτό) φάνηκε να λειτουργούν σωστά. Στη στήλη του νερού, η προσθήκη θρεπτικών οδήγησε στην απόκριση του φυτοπλαγκτού και στην αύξηση της συγκέντρωσης της κλωροφύλλης *a*. Η μέγιστη συγκέντρωσή της ($\approx 6 \mu\text{g l}^{-1}$) ήταν πολύ μεγαλύτερη από τις συνήθεις τιμές που μετριοούνται στην ολιγοτροφική περιοχή της ανατολικής Μεσογείου (Kitsiou & Karydis 2011), όπου το μέγιστο όριο για τις ευτροφικές περιοχές είναι $2,21 \mu\text{g l}^{-1}$ σύμφωνα με την κλίμακα των Simboura et al. (2005). Παρόλα αυτά, η συγκέντρωση αυτή ήταν αρκετά μικρότερη από τις αντίστοιχες τιμές που αναφέρονται στην περιοχή της Βαλτικής ή της Βόρειας Θάλασσας. Ακόμα και με την προσθήκη μίας πολύ μεγάλης συγκέντρωσης θρεπτικών και σε ελεγχόμενες πειραματικές συνθήκες, η συνολική συγκέντρωση της κλωροφύλλης *a* περιορίστηκε και δεν ξεπέρασε τα επίπεδα που έχουν παρατηρηθεί σε άλλες μελέτες στην περιοχή της ανατολικής Μεσογείου (Simboura et al. 2005, Dimitriou et al. 2015, Pavlidou et al. 2015).

Κεφάλαιο 3: Μία καινοτόμος πειραματική διάταξη μεσόκοσμων κατάλληλη για πειράματα σύζευξης βενθικού – πελαγικού οικοσυστήματος

Η αυξημένη καθίζηση κλωροφύλλης α , που προκλήθηκε από τον ευτροφισμό στην στήλη του νερού, μετρήθηκε με επιτυχία στις ιζηματοπαγίδες κατά τη διάρκεια του πειράματος. Ο ρυθμός καθίζησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μία ένδειξη της πίεσης που ασκείται από την στήλη του νερού στο ίζημα. Κάτω από αυτή την πίεση, το ΟΜ% του ιζήματος και η μακροπανίδα επηρεάστηκαν και μεταβλήθηκαν, απόδειξη της σύζευξης του πελαγικού με το βενθικό μέρος του συστήματος. Στο ίζημα των μεσοκόσμων παρατηρήθηκαν στρώματα που διέφεραν μεταξύ τους, όπως ακριβώς συμβαίνει και στο πεδίο, και η μακροπανίδα, αφού επέζησε κατά την μεταφορά της στους μεσόκοσμους, μπόρεσε να αναπαραχθεί και να αυξήσει την αφθονία της. Η απουσία ακραίων τιμών στο σύνολο των μεταβλητών, ταυτόχρονα με την χαμηλή μεταβολή τους στον μάρτυρα, αποτελούν μία ένδειξη ότι η επίπτωση του εγκλεισμού του οικοσυστήματος στο εσωτερικό μίας πειραματικής διάταξης ήταν περιορισμένη.

Η προτεινόμενη πειραματική διάταξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πληθώρα μελετών που ως τώρα επικεντρώνονταν αποκλειστικά στην στήλη του νερού, όπως πειράματα οξύνισης, επίδρασης της θερμοκρασίας, αλληλεπιδράσεων με ρύπους κ.α. Επίσης, η συγκεκριμένη πειραματική διάταξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιοδήποτε μέρος του κόσμου υπάρχουν εγκαταστάσεις με μία αρκετά μεγάλη και κυρίως βαθιά δεξαμενή. Στην συγκεκριμένη πρώτη χρήση, ο κυρίως περιοριστικός παράγοντας ήταν το βάθος της δεξαμενής των εγκαταστάσεων του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε., ενώ το συνολικό κόστος του πειράματος δεν αυξήθηκε πάρα πολύ, με το μεγαλύτερο μέρος του εξοπλισμού (δοχεία, δειγματολήπτης) να μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί.

Σε αυτήν την πρώτη χρήση της πειραματικής διάταξης, παρατηρήθηκαν και καταγράφηκαν διάφορες αδυναμίες και τεχνικά θέματα που χρήζουν μελλοντικής βελτίωσης. Πρώτον, σε προκαταρκτικές δοκιμές που έγιναν ο δειγματολήπτης ιζήματος δεν κατέστη δυνατόν να πάρει δείγμα από ιζήματα με μεγάλη περιεκτικότητα σε άμμο. Σε τέτοια ιζήματα, προτιμάται η χρήση πυρηνολήπτη με πιο μικρή διάμετρο, έτσι ώστε να μπορεί το δείγμα να παραμένει με ασφάλεια στο εσωτερικό του κυλίνδρου μέχρι να φτάσει στην επιφάνεια. Κατά τη διαδικασία τοποθέτησης των δοχείων ιζημάτων χρειάζεται πολλή προσοχή προκειμένου να αποφευχθεί η υπερχειλίση ιζήματος, γεγονός

Κεφάλαιο 3: Μία καινοτόμος πειραματική διάταξη μεσόκοσμων κατάλληλη για πειράματα σύζευξης βεθνικού – πελαγικού οικοσυστήματος

που μπορεί να επηρεάσει την αρχική κατάσταση της στήλης του νερού. Τέλος η αύξηση της ποσότητας και κυρίως της επιφάνειας του διαθέσιμου ιζήματος, (χρήσιμο για πειράματα μεγαλύτερης διάρκειας με περισσότερες δειγματοληψίες), προκαλεί αρκετές τεχνικές δυσκολίες. Με αύξηση της ποσότητας, αφενός απαιτούνται μεγαλύτερα δοχεία και αφετέρου, λόγω της αύξησης του βάρους, απαιτείται να είναι και μεγαλύτερης αντοχής. Η αύξηση της αντοχής, όμως είναι δύσκολη λόγω της χρήσης πλαστικών δοχείων, ενώ ταυτόχρονα δυσκολεύει και η διαδικασία μεταφοράς και τοποθέτησής τους. Συνοψίζοντας, είναι απαραίτητη η διεξαγωγή δοκιμαστικών πειραμάτων πριν από το κυρίως πείραμα, προκειμένου να διασφαλιστεί η μέγιστη δυνατή εξοικείωση με τον εξοπλισμό και η ομαλή διεξαγωγή του πειράματος.

4. Μελέτη της σύζευξης βενθικού – πελαγικού οικοσυστήματος μέσω ενός πειράματος μεσόκοσμων: Χρονικές υστερήσεις και αλλαγή καθεστώτος

4.1 Περίληψη

Ένα πείραμα μεσόκοσμων πραγματοποιήθηκε για τη μελέτη της σύζευξης βενθικού – πελαγικού οικοσυστήματος σε συνθήκες ευτροφισμού. Στις εγκαταστάσεις του Ελληνικού Κέντρου Θαλασσίων Ερευνών επωάστηκαν 9 μεσόκοσμοι, με 4.5 m βάθος, 1,5 m³ όγκο παράκτιου νερού και στον πυθμένα, 85 l αδιατάρακτο ίζημα, που συλλέχθηκε από μία περιοχή με περιορισμένη ανθρωπογενή επίδραση, στο λιμάνι του Ηρακλείου Κρήτης. Δημιουργήθηκε μία διαβάθμιση έντασης ευτροφισμού με μηδενική (μάρτυρας), χαμηλή και υψηλή προσθήκη θρεπτικών. Το πείραμα διήρκεσε 58 ημέρες και μεταβλητές της στήλης του νερού και του ιζήματος μετρήθηκαν σε τακτά χρονικά διαστήματα. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η καθίζηση οργανικού υλικού λόγω του ευτροφισμού επηρέασε τις βιογεωχημικές μεταβλητές του ιζήματος, αλλά στις περισσότερες περιπτώσεις, παρατηρήθηκε μία χρονική υστέρηση μεταξύ της κατάστασης στην στήλη του νερού και της απόκρισης του ιζήματος. Επιπροσθέτως, στην υψηλή προσθήκη, το σύστημα δεν επέστρεψε στις αρχικές συνθήκες μέσα στην χρονική διάρκεια του πειράματος, σε αντίθεση με την χαμηλή προσθήκη όπου το σύστημα παρουσίασε σημάδια ανάκαμψης.

4.2 Εισαγωγή

Το φαινόμενο του ευτροφισμού μελετήθηκε εκτενώς τα τελευταία 50 χρόνια, με έμφαση στα λιμναία οικοσυστήματα (Vollenweider 1968, Rodhe 1969, Carlson 1977) και στην συνέχεια στα παράκτια και εκβολικά οικοσυστήματα (Ryther & Dunstan 1971, Bayley et al. 1978). Πολυάριθμες συμβάσεις (περιγράφονται αναλυτικά από τους Ferreira et al. (2011)) έχουν δημιουργήσει νομοθετικές ρυθμίσεις για την προστασία του υδάτινου περιβάλλοντος από τον ευτροφισμό. Όπως έχει προαναφερθεί σε προηγούμενες θεματικές ενότητες, υπάρχουν αρκετά διαθέσιμα εργαλεία για την περιγραφή και ποσοτικοποίηση του φαινομένου του ευτροφισμού και των επιπτώσεών του στο οικοσύστημα. Υπό την επίδραση της ευρωπαϊκής οδηγίας για την θαλάσσια στρατηγική, οι πιο πρόσφατες μελέτες που αφορούν τον ευτροφισμό προσπαθούν να εισάγουν μία ολιστική ανάλυση του φαινομένου, συνδυάζοντας την στήλη του νερού με την κατάσταση του βένθους σε μελέτες πεδίου (Rodrigues Alves et al. 2014, Dimitriou et al. 2015, Pavlidou et al. 2015, Zhang et al. 2015). Όμως, οι μελέτες πεδίου δεν παρέχουν πάντα επαρκείς πληροφορίες σε ό,τι αφορά τους μηχανισμούς και τις διαδικασίες που εμπλέκονται στην απόκριση των θαλάσσιων οργανισμών σε συγκεκριμένες πιέσεις. Αντίθετα, μία πειραματική προσέγγιση επιτρέπει τη μελέτη των αποκρίσεων του συστήματος κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες, ενώ παράλληλα, επιτρέπει την εκτροπή του συστήματος από την αρχική κατάσταση, σε βαθμό που είναι πολύ δύσκολο να γίνει στο πεδίο. Τα πειράματα μεσόκοσμων μπορούν να καλύψουν αυτή την ανάγκη, καθώς επιτρέπουν την μελέτη των αλληλεπιδράσεων μεταξύ περιβάλλοντος και οργανισμών ή και οργανισμών μεταξύ τους, με την ιδιότητά τους να προσομοιώνουν τις πραγματικές συνθήκες ως μικρογραφίες οικοσυστημάτων (Petersen et al. 2009).

Σε αυτό το πλαίσιο, η πειραματική μεταχείριση της προσθήκης θρεπτικών σε πειράματα μεσόκοσμων, με έμφαση στην στήλη του νερού, είναι κάτι που συναντάται στην βιβλιογραφία. Οι Svensen et al. (2001) αναφέρουν ότι η προσθήκη θρεπτικών σε μεσόκοσμους μεγάλου όγκου (12 m³) προκάλεσε αύξηση του ρυθμού ιζηματοπόθεσης, ιδιαίτερα σε πλαγκτονικές κοινότητες

Κεφάλαιο 4: Σύζευξη βενθικού – πελαγικού οικοσυστήματος μέσω ενός πειράματος μεσόκοσμων: Χρονικές υστερήσεις και αλλαγή καθεστώτος

όπου κυριαρχούν τα μαστιγωτά. Οι Andersson et al. (2006) μελέτησαν την επίδραση του θρεπτικού εμπλουτισμού στην δομή του μικροβιακού τροφικού πλέγματος της Βαλτικής Θάλασσας και βρήκαν αύξηση της παραγωγικότητας, αρχικά των αυτότροφων οργανισμών και στην συνέχεια των ετερότροφων. Στη Μεσόγειο Θάλασσα, οι Vidal and Duarte (2000) αναφέρουν ότι η μεσογειακή πλαγκτονική κοινότητα του καλοκαιριού ανταποκρίνεται στην προσθήκη θρεπτικών, αυξάνοντας την βιομάζα της περισσότερο από 100 φορές και αλλάζοντας την δομή της κοινότητας από μία αρχική κυριαρχία πικοπλαγκτού, σε κυριαρχία του τμήματος της κοινότητας μεγέθους 2-20 μm .

Η προσθήκη ιζήματος σε πειράματα μεσόκοσμων αυξάνει τον ρεαλισμό του συστήματος και ταυτόχρονα επιτρέπει την μελέτη περισσότερων διεργασιών και οργανισμών (Petersen et al. 2009). Πειράματα εμπλουτισμού με θρεπτικά και η μελέτη των επιπτώσεών τους στο ίζημα γίνονται συνήθως σε μικρής κλίμακας πειραματικές δομές (βενθόκοσμοι - benthocosms) ή σε *in situ* θαλάσσιους μεσόκοσμους. Οι Oviatt et al. (1986), στην περιοχή του Rhode Island, αναφέρουν ότι μία προσθήκη θρεπτικών στην στήλη του νερού, 32 φορές μεγαλύτερη σε σχέση με την αρχική, προκάλεσε αύξηση της παραγωγικότητας κατά 3,5 φορές και η επακόλουθη αύξηση της κατανάλωσης οξυγόνου στο ίζημα δημιούργησε για μικρό χρονικό διάστημα ανοξικές συνθήκες. Τέλος, στην Βόρεια Θάλασσα, οι Haas et al. (2009) αναφέρουν ότι η προσθήκη θρεπτικών σε κοινότητες φυκών και κοραλλιών, τοποθετημένες σε βενθόκοσμους του 0,5 m^3 , επηρέασε την φυσιολογία και τον μεταβολισμό της κοινότητας και διευκόλυνε αλλαγή φάσεων σε κοραλλιογενή οικοσυστήματα.

Ο στόχος του πειράματος ήταν, εφαρμόζοντας την οικοσυστημική προσέγγιση στην μελέτη του φαινομένου του ευτροφισμού, να διερευνηθεί η σύζευξη των περιβαλλοντικών μεταβλητών στήλης και βένθους κάτω από συνθήκες έντονου ευτροφισμού (βιοτικές και αβιοτικές) και ειδικότερα να απαντηθούν δύο ερωτήματα: (i) Ο ευτροφισμός στην στήλη του νερού επηρεάζει τις βενθικές γεωχημικές μεταβλητές, και αν ναι, πόσο γρήγορα παρατηρούνται αυτές οι επιπτώσεις; (ii) Μπορεί το οικοσύστημα να επανέλθει στις αρχικές συνθήκες μετά από μία χρονική διάρκεια πειράματος 2 μηνών;

4.3 Υλικά και μέθοδοι

4.3.1 Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη μεσόκοσμων που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα περιγράφηκε αναλυτικά στην ενότητα 3. Ο σχεδιασμός του παρόντος πειράματος περιελάμβανε 9 μεσόκοσμους: δύο πειραματικές μεταχειρίσεις με προσθήκη θρεπτικών (Χαμηλή προσθήκη - ένταση ευτροφισμού «Low treatment», Υψηλή προσθήκη - ένταση ευτροφισμού «High treatment»), καθώς και μάρτυρα «Control» με μηδενική προσθήκη. Κάθε επίπεδο προσθήκης περιελάμβανε τρεις επαναλήψεις (replicates). Κάθε επίπεδο προσθήκης περιελάμβανε τρεις επαναλήψεις (replicate). Στην παρούσα μελέτη, για την στήλη του νερού χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα δεδομένα από το βαθύτερο σημείο δειγματοληψίας (4 m βάθος).

Η προσθήκη των θρεπτικών στοιχείων έγινε μία φορά, την πρώτη ημέρα του πειράματος (μέρα 0). Όπως προαναφέρθηκε στην ενότητα 3, η αρχική συγκέντρωση των θρεπτικών, που μετρήθηκε στο θαλασσινό νερό στην θέση υδροληψίας, βρέθηκε να είναι 0,05 μM PO_4 και η αντίστοιχη των NO_3 ήταν 0,1 μM . Με βάση αυτές καθορίστηκε η συγκέντρωση της χαμηλής προσθήκης στα 5 μM (100x προσθήκη) και η συγκέντρωση της υψηλής προσθήκης στα 10 μM (200x προσθήκη). Αντίστοιχα, η προσθήκη NO_3 έγινε με τελική συγκέντρωση 30 μM (300x προσθήκη) στην χαμηλή και 60 μM (600x προσθήκη) στην υψηλή προσθήκη. Η διαδικασία συλλογής και μεταφοράς του νερού και του ιζήματος από το πεδίο στους μεσόκοσμους έχει περιγραφεί αναλυτικά στην ενότητα 3.3.4.

4.3.2 Δειγματοληψίες και εργαστηριακές αναλύσεις

Οι δειγματοληψίες νερού και ιζήματος από τους μεσόκοσμους έγιναν σε καθορισμένες ημερομηνίες κατά την διάρκεια του πειράματος, έχοντας ως κύριο μέλημα να μην εξαχθεί πάνω από το 10% του συνολικού νερού ή ιζήματος (Πίνακας 4.1). Η διαδικασία της δειγματοληψίας νερού και ιζήματος έχει περιγραφεί αναλυτικά στις ενότητες 3.3.2 και 3.3.3 περιγράφεται αναλυτικά στις ενότητες 3.

Κεφάλαιο 4: Σύζευξη βενθικού – πελαγικού οικοσυστήματος μέσω ενός πειράματος μεσόκοσμων: Χρονικές υστερήσεις και αλλαγή καθεστώτος

Πίνακας 4.1. Δειγματοληψίες στήλης νερού, ιζηματοπαγίδων, και ιζήματος στην διάρκεια του πειράματος

Day	Water Column	Sediment Traps	Sediment
0	+		+
1	+		
2	+		
3	+	+	
6	+	+	+
9	+	+	
12	+	+	+
15	+	+	
18	+	+	+
21	+	+	
24	+	+	+
30	+	+	+
37	+	+	+
44	+	+	+
51	+	+	+
58	+	+	+

Πίνακας 4.2. Κατάλογος περιβαλλοντικών μεταβλητών που περιλαμβάνονται στην παρούσα μελέτη. Τα δείγματα της στήλης του νερού ελήφθησαν από βάθος 4 m. Τα δείγματα του ιζήματος ελήφθησαν ανά περίπτωση από διαφορετικά στρώματα: *: Μόνο επιφανειακό στρώμα του ιζήματος (0-1 cm), *** τρία στρώματα ιζήματος (επιφανειακό 0-1 cm, ενδιάμεσο 1-3 cm, βαθύτερο 3-5 cm).

Water column	Sediment Traps	Sediment
NO ₃	Chlorophyll- <i>a</i>	Redox potential*
PO ₄	Particulate Organic Carbon	Chlorophyll- <i>a</i> ***
Chlorophyll- <i>a</i>		Total Organic Carbon*
Dissolved Oxygen		Organic Matter ***
Trophic Index		Sulfide ***
Eutrophication Index		

Κεφάλαιο 4: Σύζευξη βενθικού – πελαγικού οικοσυστήματος μέσω ενός πειράματος μεσόκοσμων: Χρονικές υστερήσεις και αλλαγή καθεστώτος

Οι περιβαλλοντικές μεταβλητές που μετρήθηκαν στα πλαίσια του πειράματος (Πίνακας 4.2) αναλύθηκαν από υπο-δείγματα νερού και ιζήματος με βάση συγκεκριμένα πρωτόκολλα ανάλυσης. Πιο συγκεκριμένα, μετρήθηκαν οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών ιόντων (Strickland & Parsons 1972, Grasshoff et al. 1999), η συγκέντρωση της κλωροφύλλης *a* στο νερό (Yentsch & Menzel 1963), με την χρήση ενός φθοριομέτρου Turner (modell12), μετά από εξαγωγή σε 90% ακετόνη. Η συγκέντρωση του διαλελυμένου Οξυγόνου (DO) μετρήθηκε με την μέθοδο πηλοδοποίησης Winkler. Ο ρυθμός καθίζησης κλωροφύλλης *a* και Σωματιδιακού Οργανικού Άνθρακα (Particulate Organic Carbon – POC) μετρήθηκε από το νερό στις ιζηματοπαγίδες, με αναγωγή σε καθιζάνον υλικό ανά m^2 ανά μέρα. Στο ίζημα, το οξειδοαναγωγικό δυναμικό μετρήθηκε στο πρώτο εκατοστό του ιζήματος από το κάθε δείγμα ιζήματος, με την χρήση ηλεκτροδίου ρυθμισμένο με διάλυμα Zobell (Zobell 1946). Η συγκέντρωση του υδρόθειου H_2S στο ίζημα μετρήθηκε με κατάλληλο ηλεκτρόδιο αμέσως μετά τη δειγματοληψία σύμφωνα με τη μέθοδο των (Wildish et al. 1999). Για τη μέτρηση αυτή σε περίπου 5 ml ιζήματος τοποθετούνταν 5 ml διαλύματος SAOB (Sulfide AntiOxidant Buffer) και L-ασκορβικού οξέος, ενώ το ηλεκτρόδιο ήταν κατάλληλα βαθμονομημένο σε διάλυμα 3% $Na_2S \cdot 9H_2O$. Το ποσοστό της οργανικής ύλης στο ίζημα (OM%) υπολογίστηκε ως το άθροισμα της βιοδιαθέσιμης (labile) και της μη βιοδιαθέσιμης (refractory) οργανικής ύλης που μετρήθηκαν, με βάση το ποσοστό μείωσης βάρους (μέθοδος Loss on Ignition) μετά από καύση διαδοχικά στους 250° και 500° C για 16 ώρες (Loh et al. 2008). Ο ολικός οργανικός άνθρακας (Total Organic Carbon – TOC) στο ίζημα, καθώς και το POC στο νερό, μετρήθηκαν με την χρήση στοιχειακού αναλυτή Perkin Elmer 2400 CHN Analyzer με βάση το πρωτόκολλο των Tung and Tanner (2003) και ο διαχωρισμός από τον ανόργανο άνθρακα έγινε με βάση την μέθοδο των Verardo et al. (1990). Χρησιμοποιώντας τις συγκεντρώσεις κλωροφύλλης *a*, ανόργανων θρεπτικών και διαλελυμένου οξυγόνου, υπολογίστηκαν 2 δείκτες ευτροφισμού που χρησιμοποιούνται στο πλαίσιο της Οδηγίας Πλαίσιο για τα Υδάτα, ο δείκτης Eutrophication Index (E.I.) (Primpas et al. 2010) στην Ελλάδα και στην Ιταλία ο Trophic Index (TRIX) (Vollenweider et al. 1998),

Κεφάλαιο 4: Σύζευξη βενθικού – πελαγικού οικοσυστήματος μέσω ενός πειράματος μεσόκοσμων: Χρονικές υστερήσεις και αλλαγή καθεστώτος

βαθμονομημένος για τον Ελλαδικό χώρο από τους Primpas and Karydis (2011).

4.3.3 Στατιστικές αναλύσεις

Τα δεδομένα των βιογεωχημικών μεταβλητών της στήλης και του νερού αναλύθηκαν, για μεταβλητότητα μεταξύ των επιπέδων προσθήκης (μάρτυρας, χαμηλή, υψηλή) και στον χρόνο (Μέρες 0 μέχρι 58). Τα δεδομένα ελέγχθηκε κατά πόσον ακολουθούν την κανονική κατανομή (Shapiro-Wilk test) και είχαν ομοιογένεια διασπορών (Levene's test) ενώ η ύπαρξη πιθανών ακραίων τιμών (outliers) ελέγχθηκε με την χρήση studentized residuals. Εφόσον ίσχυαν οι προϋποθέσεις παραμετρικής ανάλυσης, η μεταβλητότητα μεταξύ των επιπέδων προσθήκης, του χρόνου καθώς και η αλληλεπίδραση μεταξύ τους αναλύθηκε με την χρήση της μεθόδου Repeated Measures ANOVA (RM ANOVA) στο πρόγραμμα SPSS 23. Η υπόθεση της σφαιρικότητας για την αλληλεπίδραση «προσθήκη (x) χρόνο» ελέγχθηκε με το Mauchly's test. Στις περιπτώσεις που υπάρχει στατιστικά σημαντική αλληλεπίδραση, η ανάλυση των κύριων επιπτώσεων (Main effects) των μεταβλητών μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένα συμπεράσματα (Maxwell & Delaney 2004) κατά συνέπεια, έγινε ανάλυση των απλών επιπτώσεων (Simple effects), δηλαδή α) μεταβλητότητα των επιπέδων προσθήκης σε κάθε χρονική στιγμή και β) μεταβλητότητα μέσα στο χρόνο για κάθε επίπεδο προσθήκης χωριστά. Οι συγκρίσεις κατά ζεύγη (Pairwise comparisons) έγιναν με την χρήση Bonferroni *post hoc* test.

Για την μελέτη των χρονικών υστερήσεων μεταξύ επιλεγμένων μεταβλητών στήλης (χλωροφύλλης *a* νερού, ρυθμός καθίζησης χλωροφύλλης *a*, δείκτης TRIX) και βένθους (οξειδοαναγωγικό δυναμικό, TOC, χλωροφύλλης *a* ιζήματος, υδρόθειο) χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Cross-correlation analysis, με την χρήση ενός διαδικτυακού υπολογιστή (Wessa 2012). Η μέθοδος περιλαμβάνει διαδοχικές μη παραμετρικές συσχετίσεις Spearman, στις οποίες η μία μεταβλητή τοποθετείται με αυξανόμενη χρονική υστέρηση σε σχέση με την άλλη. Το σημείο στο οποίο εντοπίζεται η μέγιστη, στατιστικά σημαντική, συσχέτιση δείχνει και την χρονική υστέρηση των δύο μεταβλητών.

Κεφάλαιο 4: Σύζευξη βενθικού – πελαγικού οικοσυστήματος μέσω ενός πειράματος μεσόκοσμων: Χρονικές υστερήσεις και αλλαγή καθεστώτος

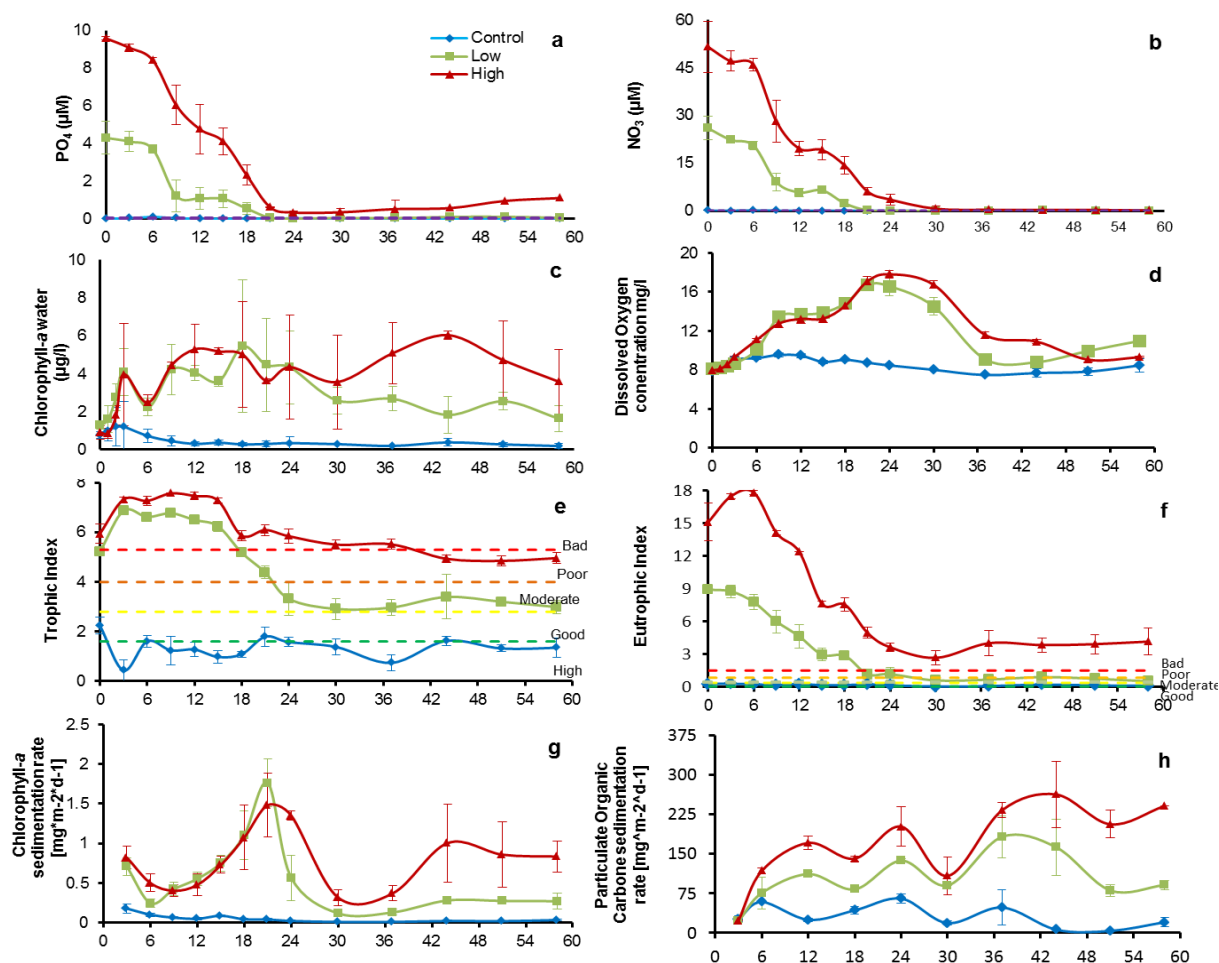
Οι πολυμεταβλητές αναλύσεις στα περιβαλλοντικά δεδομένα έγιναν με την χρήση του προγράμματος Primer E v7. Αυτές οι αναλύσεις έγιναν χρησιμοποιώντας τον μέσο όρο των μετρήσεων κάθε μεταβλητής από τις τρεις επαναλήψεις κάθε επιπέδου προσθήκης. Οι τριγωνικές μήτρες ομοιότητας των περιβαλλοντικών μεταβλητών υπολογίστηκαν με την χρήση Ευκλείδειας απόστασης (Clarke et al. 2014). Σε περιπτώσεις υψηλής συμμεταβλητότητας μεταξύ μεταβλητών, μόνο η μία συμπεριλήφθηκε στις αναλύσεις. Στις μήτρες ομοιότητας χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Analysis of Similarities (ANOSIM) για να εντοπιστούν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των επιπέδων προσθήκης και κατασκευάστηκε επίσης ένα non-metric multi-dimensional scaling (nMDS) διάγραμμα για να εξεταστεί οπτικά η εξέλιξη του πειράματος στο χρόνο. Επιπροσθέτως, στις τρεις τριγωνικές μήτρες ομοιότητας κάθε επιπέδου προσθήκης, έγινε ανάλυση Relate seriation για να εντοπιστεί πιθανή γραμμική διαδοχή μεταξύ των χρονικών σημείων στην εξέλιξη του πειράματος, καθώς και ανάλυση Relate cyclicity για να προσδιοριστεί αν η εξέλιξη ήταν κυκλική και το σύστημα επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (58 μέρες).

4.4 Αποτελέσματα

4.4.1 Στήλη του νερού

Στην στήλη του νερού τα δύο επίπεδα προσθήκης ευτροφισμού διαχωρίστηκαν οπτικά, σε σχέση με το μάρτυρα (Εικόνα 4.1, a-h).

Κεφάλαιο 4: Σύζευξη βενθικού – πελαγικού οικοσυστήματος μέσω ενός πειράματος μεσόκοσμων: Χρονικές υστερήσεις και αλλαγή καθεστώτος



Εικόνα 1, a-h. Διαγράμματα χρονικής μεταβλητότητας των τιμών επιλεγμένων μεταβλητών της στήλης του νερού και δεικτών ευτροφισμού στην διάρκεια των 58 ημερών του πειράματος. (Μάρτυρας: μπλε γραμμή (ρόμβος), Χαμηλή προσθήκη: πράσινη γραμμή (τετράγωνο), Υψηλή προσθήκη: κόκκινη γραμμή (τρίγωνο). Οι διακεκομμένες γραμμές στα διαγράμματα των δεικτών ευτροφισμού (e,f) αντιπροσωπεύουν τα αντίστοιχα όρια οικολογικής κατάστασης (κακή, φτωχή, μέτρια, καλή, υψηλή).

Σε ό,τι αφορά την συγκέντρωση των θρεπτικών αλάτων, μετά την αρχική προσθήκη, οι συγκεντρώσεις ήταν 0,01 μM PO₄, 0,11 μM NO₃ στο μάρτυρα, 5 μM PO₄, 22,72 μM NO₃ στην χαμηλή προσθήκη και 10 μM PO₄ and 55,83 μM NO₃ στην υψηλή προσθήκη. Επίσης, στην χαμηλή προσθήκη, τα θρεπτικά εξαντλήθηκαν μετά την μέρα 24 ενώ αντίθετα, στην υψηλή προσθήκη η συγκέντρωση των θρεπτικών δεν έπεσε ποτέ κάτω από 0,5 μM (Διάγραμμα 4.1.a,b).

Η συγκέντρωση της χλωροφύλλης α στο νερό, στους εμπλουτισμένους μεσόκοσμους, παρουσίασε πολλαπλά μέγιστα, ενδείξεις πολλαπλών

Κεφάλαιο 4: Σύζευξη βενθικού – πελαγικού οικοσυστήματος μέσω ενός πειράματος μεσόκοσμων: Χρονικές υστερήσεις και αλλαγή καθεστώτος

διαδοχικών ανθήσεων φυτοπλαγκτού (ημέρες 3, 9, 18 στην χαμηλή προσθήκη και ημέρες 3, 12, 24, 44 στην υψηλή) (Εικόνα 4.1.c). Η υψηλότερη συγκέντρωση κλωροφύλλης *a* στη χαμηλή προσθήκη ήταν $5,44 \mu\text{g l}^{-1}$ (μέρα 18), ενώ στην υψηλή προσθήκη ήταν $6,03 \mu\text{g l}^{-1}$ (ημέρα 44). Στο μάρτυρα, η μέγιστη τιμή $1,2 \mu\text{g l}^{-1}$ παρατηρήθηκε την μέρα 3 μετά από μία σύντομη άνθηση φυτοπλαγκτού, στην αρχή του πειράματος. Η στατιστική ανάλυση (Πίνακας 4.3) έδειξε στατιστικά σημαντική αλληλεπίδραση «προσθήκη (x) χρόνο» (RM ANOVA: $F_{26,52}=2.993$, $MS = 2.993$, $p<0,001$), και η ανάλυση των απλών επιπτώσεων του επιπέδου προσθήκης (Πίνακας 4.4) έδειξε ότι οι εμπλουτισμένοι μεσόκοσμοι διέφεραν από τον μάρτυρα, από την ημέρα 6 ως το τέλος του πειράματος. Επιπροσθέτως, όλα τα επίπεδα προσθήκης διέφεραν στατιστικά σημαντικά κατά τις μέρες 37 και 44. Η ανάλυση των απλών επιπτώσεων του χρόνου έδειξε ότι μόνο στους εμπλουτισμένους μεσόκοσμους, αυτή ήταν στατιστικά σημαντική ($p<0,01$).

Η συγκέντρωση του διαλελυμένου οξυγόνου αυξήθηκε, κατά την διάρκεια του πειράματος, και στα δύο εμπλουτισμένα επίπεδα προσθήκης με μέγιστο $11,5 \text{ mg l}^{-1}$, (ημέρα 24), τιμή διπλάσια από την αρχική $5,5 \text{ mg l}^{-1}$. Η RM ANOVA (Πίνακας 4.3) παρουσίασε στατιστικά σημαντική αλληλεπίδραση «προσθήκη (x) χρόνο» (RM ANOVA: $F_{26,52}= 25.835$, $MS= 11.325$, $p<0,001$) και η ανάλυση των απλών επιπτώσεων του επιπέδου προσθήκης (Πίνακας 4.4) έδειξε ότι οι εμπλουτισμένοι μεσόκοσμοι διέφεραν από τον μάρτυρα, από την ημέρα 9 ως την 36. Ανάλυση των απλών επιπτώσεων του χρόνου έδειξε ότι η επίδραση του χρόνου ήταν στατιστικά σημαντική ($p<0,01$) μόνο στους εμπλουτισμένους μεσόκοσμους.

Και οι δύο δείκτες ευτροφισμού, ο E.I. και ο TRIX (Εικόνα 4.1.e,f), κατηγοριοποίησαν όλα τα επίπεδα προσθήκης σε διαφορετικές οικολογικές καταστάσεις, ειδικά κατά την διάρκεια του δεύτερου μήνα του πειράματος. Και τα δύο εμπλουτισμένα επίπεδα προσθήκης ξεκίνησαν από την «κακή» οικολογική κατάσταση, αλλά την ημέρα 18 η χαμηλή προσθήκη άρχισε να βελτιώνεται και μεταφέρθηκε στην «φτωχή» οικολογική κατάσταση. Η κατάσταση συνέχισε να βελτιώνεται και στην ημέρα 30 πέρασε στην «μέτρια» οικολογική κατάσταση πλησιάζοντας και το όριο της «καλής» οικολογικής κατάστασης. Αντίθετα, στην υψηλή προσθήκη, ο χαρακτηρισμός παρέμεινε

Κεφάλαιο 4: Σύζευξη βενθικού – πελαγικού οικοσυστήματος μέσω ενός πειράματος μεσόκοσμων: Χρονικές υστερήσεις και αλλαγή καθεστώτος

«κακή» οικολογική κατάσταση σε όλη την διάρκεια του πειράματος. Η RM ANOVA (Πίνακας 4.3) έδειξε στατιστικά σημαντική αλληλεπίδραση «προσθήκη (x) χρόνο» (RM ANOVA: $F_{26,52} = 3.966$, $MS = 9758.196$, $p < 0,001$) και η ανάλυση των απλών επιπτώσεων του επιπέδου προσθήκης (Πίνακας 4.4) έδειξε ότι όλα τα επίπεδα διέφεραν σε όλη την διάρκεια του πειράματος. Επίσης, η επίδραση του χρόνου ήταν στατιστικά σημαντική ($p < 0,01$) μόνο στους εμπλουτισμένους μεσόκοσμους.

Ο ρυθμός καθίζησης κλωροφύλλης α ήταν παρόμοιος και στα εμπλουτισμένα δύο επίπεδα προσθήκης, με μέγιστο $1.5 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (μέρα 21) (Εικόνα 4.1.g). Από την μέρα 21 και ως το τέλος του πειράματος, ο ρυθμός καθίζησης στην υψηλή προσθήκη ήταν μεγαλύτερος. Η RM ANOVA (Πίνακας 4.3), έδειξε στατιστικά σημαντική αλληλεπίδραση «προσθήκη (x) χρόνο» (RM ANOVA: $F_{26,52} = 52.689$, $MS = 10.359$, $p < 0,001$) και η ανάλυση των απλών επιπτώσεων του επιπέδου προσθήκης (Πίνακας 4.4) έδειξε ότι ο μάρτυρας διέφερε μεταξύ των ημερών 6 ως 21 και ότι από την ημέρα 30 και μετά όλα τα επίπεδα ήταν διαφορετικά. Η επίδραση του χρόνου ήταν στατιστικά σημαντική ($p < 0,01$) για όλες τις περιπτώσεις.

Ο ρυθμός καθίζησης σωματιδιακού άνθρακα (POC) (Διάγραμμα 4.1.h) παρουσίασε παρόμοια συμπεριφορά με τον ρυθμό της κλωροφύλλης α , με το μέγιστο να καταγράφεται την ημέρα 24 στο μάρτυρα και στην χαμηλή προσθήκη, και την ημέρα 44 στην υψηλή. Επίσης, η υψηλή προσθήκη παρουσίασε υψηλότερο ρυθμό καθόλη τη διάρκεια του πειράματος, γεγονός που επιβεβαιώνεται από τα αποτελέσματα της RM ANOVA (Πίνακας 4.3), με στατιστικά σημαντική αλληλεπίδραση «προσθήκη (x) χρόνο» (RM ANOVA: $F_{26,52} = 152.689$, $MS = 10.359$, $p < 0,001$). Η ανάλυση των απλών επιπτώσεων του επιπέδου προσθήκης (Πίνακας 4.4) έδειξε ότι μετά την ημέρα 12, όλες οι προσθήκες ήταν διαφορετικές. Τέλος, η επίδραση του χρόνου ήταν στατιστικά σημαντική ($p < 0,01$) μόνο στους εμπλουτισμένους μεσόκοσμους.

Κεφάλαιο 4: Σύζευξη βενθικού – πελαγικού οικοσυστήματος μέσω ενός πειράματος μεσόκοσμων: Χρονικές υστερήσεις και αλλαγή καθεστώτος

Πίνακας 4.3. Αποτελέσματα προϋποθέσεων και αναλύσεων της Repeated measures ANOVA των περιβαλλοντικών μεταβλητών της στήλης του νερού καθώς και δύο δεικτών ευτροφισμού. Η προϋπόθεση της κανονικής κατανομής ελέγχθηκε με το Shapiro-Wilk τεστ, η υπόθεση της σφαιρικότητας με το Mauchly τεστ. -: η ανάλυση δεν μπορεί να γίνει, ns: μη στατιστικά σημαντικό, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, C: μάρτυρας, L: χαμηλή προσθήκη, H: υψηλή προσθήκη.

	Normality	Sphericity	Two-way interaction	Effect of treatment	C	L	H
PO ₄	no	-	-	-	-	-	-
NO ₃	no	-	-	-	-	-	-
NO ₂	no	-	-	-	-	-	-
Chlorophyll- <i>a</i> Water	yes	yes	**	-	ns	**	**
O ₂	yes	yes	**	-	ns	**	**
Trophic Index	yes	yes	**	-	ns	**	**
Eutrophication Index	yes	yes	**	-	ns	**	**
Chlorophyll- <i>a</i> sedimentation rate	yes	yes	**	-	**	**	**
Particulate Organic Carbon sedimentation rate	yes	yes	**	-	ns	**	**

Κεφάλαιο 4: Σύζευξη βενθικού – πελαγικού οικοσυστήματος μέσω ενός πειράματος μεσόκοσμων: Χρονικές υστερήσεις και αλλαγή καθεστώτος

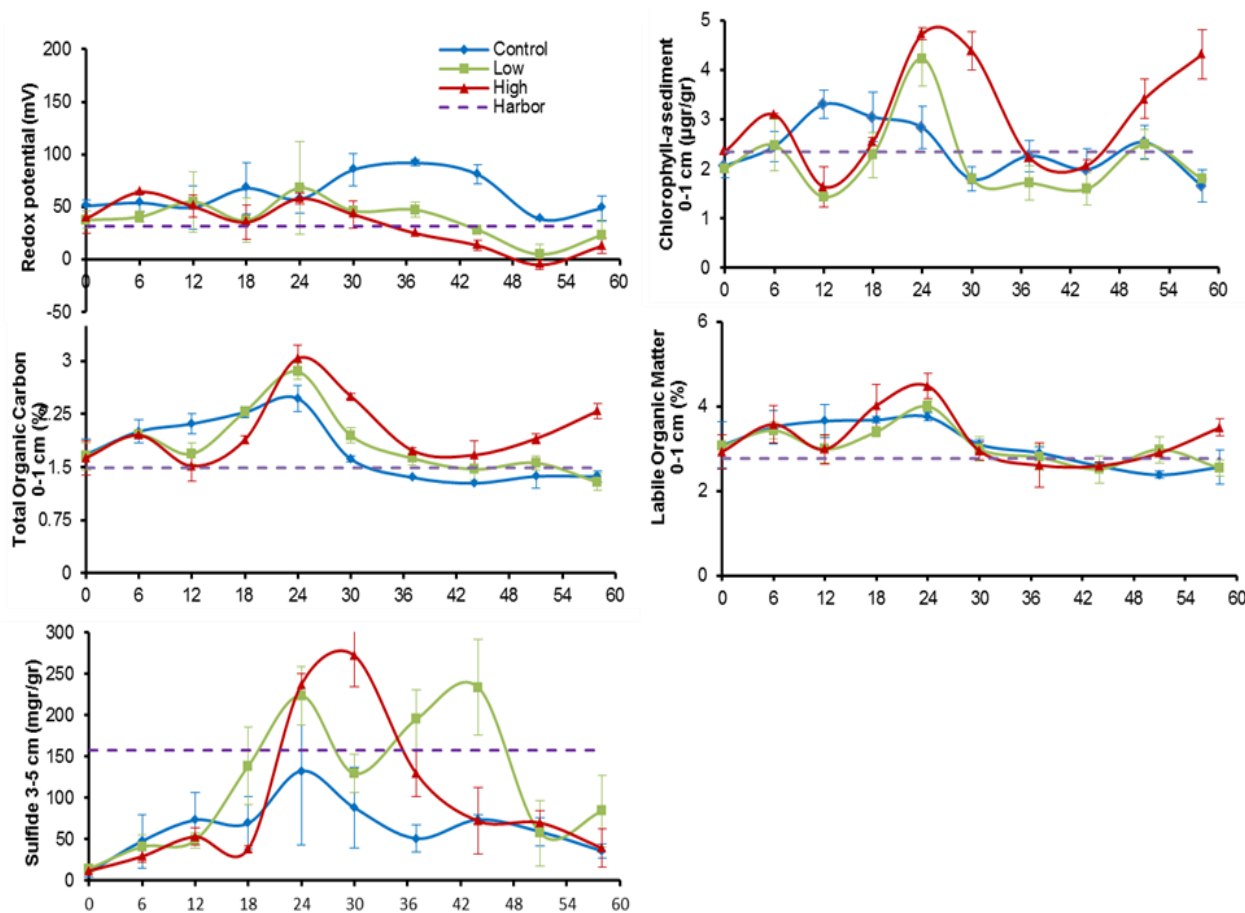
Πίνακας 4.4. Repeated measures ANOVA ανάλυση των απλών επιπτώσεων της προσθήκης για τις μεταβλητές της στήλης του νερού (μαζί με την αντίστοιχη *post hoc* ανάλυση) όπου βρέθηκε στατιστικά σημαντική ($p < 0,05$) αλληλεπίδραση «προσθήκη (x) χρόνο». Το επίπεδο σημαντικότητας ορίστηκε στο 0,01, ns: μη στατιστικά σημαντικό, C: μάρτυρας, L: χαμηλή προσθήκη, H: υψηλή προσθήκη.

Day	Chlorophyll - a water	O ₂	Trophic Index	Eutrophication Index	Chlorophyll-a sedimentation rate	Particulate Organic Carbon sedimentation rate
0	ns	ns	C ≠ L ≠ H	C ≠ L ≠ H	-	-
3	ns	ns	C ≠ L ≠ H	C ≠ L ≠ H	ns	ns
6	C, L ≠ H	ns	C ≠ L ≠ H	C ≠ L ≠ H	C ≠ L, H	C, L ≠ H
9	C, L ≠ H	C ≠ L, H	C ≠ L ≠ H	C ≠ L ≠ H	C ≠ L, H	-
12	C ≠ L, H	C ≠ L, H	C ≠ L ≠ H	C ≠ L ≠ H	C ≠ L, H	C ≠ L ≠ H
15	C ≠ L, H	C ≠ L, H	C ≠ L ≠ H	C ≠ L ≠ H	C ≠ L, H	-
18	C ≠ L, H	C ≠ L, H	C ≠ L ≠ H	C ≠ L ≠ H	C ≠ L, H	C ≠ L ≠ H
21	C ≠ L, H	C ≠ L, H	C ≠ L ≠ H	C ≠ L ≠ H	C ≠ L, H	-
24	C ≠ L, H	C ≠ L, H	C ≠ L ≠ H	C ≠ L ≠ H	C ≠ L, H	C ≠ L ≠ H
30	C ≠ L, H	C ≠ L, H	C ≠ L ≠ H	C ≠ L ≠ H	C ≠ L ≠ H	C ≠ L ≠ H
37	C ≠ L ≠ H	C, L ≠ H	C ≠ L ≠ H	C ≠ L ≠ H	C ≠ L ≠ H	C ≠ L ≠ H
44	C ≠ L ≠ H	ns	C ≠ L ≠ H	C ≠ L ≠ H	C ≠ L ≠ H	C ≠ L ≠ H
51	C ≠ L, H	ns	C ≠ L ≠ H	C ≠ L ≠ H	C ≠ L ≠ H	C ≠ L ≠ H
58	C ≠ L, H	ns	C ≠ L ≠ H	C ≠ L ≠ H	C ≠ L ≠ H	C ≠ L ≠ H

Κεφάλαιο 4: Σύζευξη βενθικού – πελαγικού οικοσυστήματος μέσω ενός πειράματος μεσόκοσμων: Χρονικές υστερήσεις και αλλαγή καθεστώτος

4.4.2 Ίζημα

Στο σύνολό τους οι μεταβλητές του ιζήματος φάνηκαν να ανταποκρίνονται στην αυξημένη ιζηματοπόθεση που παρατηρήθηκε στους εμπλουτισμένους μεσόκοσμους (Fig. 2a-e).



Εικόνα 2, a-e. Διαγράμματα χρονικής μεταβλητότητας των τιμών επιλεγμένων βιογεωχημικών μεταβλητών του ιζήματος στην διάρκεια των 58 ημερών του πειράματος. (Μάρτυρας: μπλε γραμμή (ρόμβος), Χαμηλή προσθήκη: πράσινη γραμμή (τετράγωνο), Υψηλή προσθήκη: κόκκινη γραμμή (τρίγωνο). Οι μωβ διακεκομμένες γραμμές αντιπροσωπεύουν τις αρχικές τιμές που μετρήθηκαν στο λιμάνι του Ηρακλείου, από όπου προέρχονται τα ιζήματα. Η σημείωση των εκατοστών δείχνει το βάθος του ιζήματος, από το οποίο προέρχεται το δείγμα (0-1 cm επιφανειακό στρώμα, 3-5 cm βαθύτερο στρώμα).

Οι τιμές του δυναμικού οξειδοαναγωγής (Eh) (Εικόνα. 2.a) παρουσίασαν διακυμάνσεις τις πρώτες 24 μέρες του πειράματος, ενώ ήταν σε όλες τις περιπτώσεις υψηλότερες από τις αρχικές που μετρήθηκαν στο πεδίο. Από την ημέρα 24 και μετά οι τιμές, του Eh στους εμπλουτισμένους μεσόκοσμους παρουσίασαν μείωση, ενώ αντίθετα στο μάρτυρα, οι τιμές αυξήθηκαν. Οι χαμηλότερες τιμές καταγράφηκαν την ημέρα 51 σε όλες τις μεταχειρίσεις. Η

Κεφάλαιο 4: Σύζευξη βενθικού – πελαγικού οικοσυστήματος μέσω ενός πειράματος μεσόκοσμων: Χρονικές υστερήσεις και αλλαγή καθεστώτος

στατιστική ανάλυση (Πίνακας 4.5) έδειξε στατιστικά σημαντική αλληλεπίδραση «προσθήκη (x) χρόνο» (RM ANOVA: $F_{18,36} = 4.907$, $MS = 697.900$, $p < 0,001$) και η ανάλυση των απλών επιπτώσεων του επιπέδου προσθήκης (Πίνακας 4.6) έδειξε στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ όλων των επιπέδων μετά την ημέρα 37. Η επίδραση του χρόνου ήταν στατιστικά σημαντική ($p < 0,01$) μόνο στους εμπλουτισμένους μεσόκοσμους.

Η συγκέντρωση της κλωροφύλλης *a* στο ανώτερο στρώμα του ιζήματος (0-1 cm) (Εικόνα. 2.b) ανταποκρίθηκε στην αυξημένη ιζηματοπόθεση των εμπλουτισμένων μεσοκόσμων. Οι μέγιστες τιμές που καταγράφηκαν ήταν $4,2 \mu\text{g g}^{-1}$ στην χαμηλή προσθήκη και $4,8 \mu\text{g/g}$ (ημέρα 24) στην υψηλή. Από αυτό το χρονικό σημείο και μετά, οι συγκεντρώσεις μειώθηκαν στα αρχικά επίπεδα και μόνο στο τέλος του πειράματος, παρατηρήθηκε μία αύξηση στην υψηλή προσθήκη. Η στατιστική ανάλυση (Πίνακας 4.5), έδειξε στατιστικά σημαντική αλληλεπίδραση «προσθήκη (x) χρόνο» (RM ANOVA: $F_{18,36} = 4,120$ $MS = 0.721$, $p < 0,001$) και η ανάλυση των απλών επιπτώσεων του επιπέδου προσθήκης (Πίνακας 4.6) έδειξε ότι η επίπτωση του επιπέδου ήταν στατιστικά σημαντική, μόνο στην μέση του πειράματος (ημέρες 12 με 37) και στο τέλος του πειράματος (ημέρες 51-58). Η επίδραση του χρόνου ήταν στατιστικά σημαντική ($p < 0,01$) σε όλα τα επίπεδα προσθήκης.

Το TOC (Εικόνα. 2.c,d) και η Labile OM% στο ανώτερο στρώμα του ιζήματος ανταποκρίθηκαν και αυτά στην αυξημένη ιζηματοπόθεση. Και οι δύο μεταβλητές παρουσίασαν παρόμοια χρονικά πρότυπα, με μία αρχική αύξηση (2 μέγιστα ημέρα 6 και 24), στην συνέχεια μείωση και παραμονή στην αρχική συγκέντρωση και στο τέλος μόνο η υψηλή προσθήκη παρουσίασε αύξηση στις τιμές. Η στατιστική ανάλυση (Πίνακας 4.5) έδειξε σημαντική αλληλεπίδραση «προσθήκη (x) χρόνο» (RM ANOVA, TOC: $F_{18,36} = 8.911$, $MS = 0.231$, $p < 0,001$ και RM ANOVA, Labile OM%: $F_{18,36} = 1.272$, $MS = 0.180$, $p < 0,05$) και η ανάλυση των απλών επιπτώσεων του επιπέδου προσθήκης (Πίνακας 4.6) έδειξε ότι ο μάρτυρας διέφερε μόνο σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές. Η επίδραση του χρόνου ήταν στατιστικά σημαντική ($p < 0,01$) σε όλες τις περιπτώσεις.

Τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης για όλες τις υπόλοιπες γεωχημικές μεταβλητές του ιζήματος, δεν έδειξαν στατιστικά σημαντική επίδραση του επιπέδου προσθήκης (Πίνακας 4.5) (RM ANOVA αλληλεπίδραση

Κεφάλαιο 4: Σύζευξη βενθικού – πελαγικού οικοσυστήματος μέσω ενός πειράματος μεσόκοσμων: Χρονικές υστερήσεις και αλλαγή καθεστώτος

«προσθήκη (x) χρόνο» ns ($p > 0.05$), main effect of treatment: ns ($p > 0.05$)). Εξαίρεση αποτελεί η συγκέντρωση του υδρόθειου στο βαθύτερο στρώμα του ιζήματος (Εικόνα. 2.e), όπου η στατιστική ανάλυση έδειξε σημαντική αλληλεπίδραση «προσθήκη (x) χρόνο» (RM ANOVA, $F_{18,36} = 2.006$, $MS = 8580.203$, $p < 0,05$) και η ανάλυση των απλών επιπτώσεων του επιπέδου προσθήκης (Πίνακας 4.6) στατιστικά σημαντικές διαφορές, μετά την ημέρα 18. Η επίδραση του χρόνου ήταν στατιστικά σημαντική ($p < 0,01$) μόνο στους εμπλουτισμένους μεσόκοσμους.

Πίνακας 4.5. Αποτελέσματα προϋποθέσεων και αναλύσεων της Repeated measures ANOVA των περιβαλλοντικών μεταβλητών του ιζήματος. Η προϋπόθεση της κανονικής κατανομής ελέγχθηκε με το Shapiro-Wilk τεστ, η υπόθεση της σφαιρικότητας με το Mauchly τεστ. -: η ανάλυση δεν μπορεί να γίνει, ns: μη στατιστικά σημαντικό, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, C: μάρτυρας, L: χαμηλή προσθήκη, H: υψηλή προσθήκη.

	Normality	Sphericity	Two-way interaction	Effect of treatment	Simple effects of time for each treatment		
					C	L	H
Redox Potential (Eh) 0-1 cm	yes	yes	**	-	ns	*	**
Labile Organic Matter 0-1cm	yes	yes	**	-	**	**	**
Refractory Organic Matter 0-1 cm	yes	yes	**	-	**	**	**
Total Organic Matter 0-1 cm	yes	yes	**	-	**	**	**
Labile Organic Matter 1-3 cm	yes	yes	ns	ns	*	*	*
Refractory Organic Matter 1-3 cm	no	-	-	-	-	-	-
Total Organic Matter 1-3 cm	no	-	-	-	-	-	-
Labile Organic Matter 3-5 cm	yes	yes	ns	ns	**	**	**
Refractory Organic Matter 3-5 cm	yes	yes	ns	ns	ns	ns	ns
Total Organic Matter 3-5 cm	yes	yes	ns	ns	ns	ns	ns
Total Organic Carbon 0-1 cm	yes	yes	**	-	**	**	**
Total Organic Nitrogen 0-1 cm	yes	yes	ns	ns	**	**	**
Chlorophyl a Sediment 0-1 cm	yes	yes	**	-	*	**	**
Chlorophyl a Sediment 1-3 cm	yes	yes	ns	ns	*	**	**
Chlorophyl a Sediment 3-5 cm	yes	yes	ns	ns	ns	**	**
Sulfide 0-1 cm	yes	yes	ns	ns	ns	ns	ns
Sulfide 1-3 cm	yes	yes	ns	ns	**	**	**
Sulfide 3-5 cm	yes	yes	**	-	ns	**	**

Κεφάλαιο 4: Σύζευξη βενθικού – πελαγικού οικοσυστήματος μέσω ενός πειράματος μεσόκοσμων: Χρονικές υστερήσεις και αλλαγή καθεστώτος

Πίνακας 4.6. Repeated measures ANOVA ανάλυση των απλών επιπτώσεων του επιπέδου προσθήκης για τις μεταβλητές του ιζήματος (μαζί με την αντίστοιχη *post hoc* ανάλυση) όπου βρέθηκε στατιστικά σημαντική ($p < 0,05$) αλληλεπίδραση «προσθήκη (x) χρόνο». Το επίπεδο σημαντικότητας ορίστηκε στο 0,01, ns: μη στατιστικά σημαντικό, C: μάρτυρας, L: χαμηλή προσθήκη, H: υψηλή προσθήκη.

Day	Redox Potential	Sulfide 3-5 cm	Total Organic Carbon 0-1cm	Labile Organic Matter 0-1 cm	Chlorophyll- <i>a</i> Sediment 0-1 cm
0	ns	ns	ns	ns	ns
3	-	-	-	-	-
6	ns	ns	ns	ns	ns
9	-	-	-	-	-
12	ns	ns	C ≠ L, H	C ≠ L, H	C ≠ L, H
15	-	-	-	-	-
18	ns	L ≠ C, H	C, L ≠ H	C, L ≠ H	C ≠ L, H
21	-	-	-	-	-
24	ns	C ≠ L, H	C ≠ L ≠ H	C ≠ L ≠ H	C ≠ L, H
30	C ≠ L, H	C ≠ L ≠ H	C ≠ L ≠ H	ns	C ≠ L ≠ H
37	C ≠ L ≠ H	C ≠ L, H	C, L ≠ H	ns	ns
44	C ≠ L ≠ H	C ≠ L ≠ H	ns	ns	ns
51	C ≠ L ≠ H	ns	C ≠ L, H	C ≠ L, H	C, L ≠ H
58	C ≠ L ≠ H	L ≠ C, H	C, L ≠ H	C, L ≠ H	C, L ≠ H

4.4.3 Αποτελέσματα ανάλυσης *Cross-correlation*

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης *Cross-correlation* ανέδειξαν την ύπαρξη μία χρονικής υστέρησης μεταξύ την κατάστασης των βιοχημικών μεταβλητών της στήλης του νερού και της απόκρισης των μεταβλητών του ιζήματος (Πίνακας 4.7).

Πίνακας 4.7. Αποτελέσματα ανάλυσης *cross-correlation* (Spearman) μεταξύ επιλεγμένων βιογεωχημικών μεταβλητών της στήλης του νερού (οριζόντιες σειρές) και του ιζήματος (κάθετες στήλες). Παρατίθεται μόνο η υψηλότερη στατιστικά σημαντική συσχέτιση ($p < 0,05$) που υποδεικνύει την χρονική υστέρηση (σε ημέρες) μεταξύ των δύο μεταβλητών $p < 0,05$.

		Total Organic Carbon			Chlorophyll- <i>a</i> sediment			Sulfide 3-5 cm			Redox Potential		
		C	L	H	C	L	H	C	L	H	C	L	H
Chlorophyll- <i>a</i> water	Time Lag	18	12	12	18	12	12	18	18	12	36	30	18
	rho	0,81	0,73	0,66	0,71	0,51	0,66	0,62	0,55	0,48	-0,65	-0,68	-0,61
Trophic Index	Time Lag	18	12	12	18	12	12	18	12	18	36	30	30
	rho	0,60	0,79	0,57	0,72	0,45	0,42	0,48	0,53	0,70	-0,56	-0,71	-0,81
Chlorophyll- <i>a</i> sedimentation rate	Time Lag	18	12	12	18	12	12	18	12	12	36	36	24
	rho	0,78	0,92	0,64	0,66	0,91	0,78	0,56	0,56	0,58	-0,59	-0,66	-0,52

Στον μάρτυρα, παρατηρήθηκε μία χρονική υστέρηση 18 ημερών μεταξύ των μεταβλητών της στήλης (κλωροφύλλη *a* νερού, ρυθμός καθίζησης Chl-*a* και TRIX), και του ιζήματος (TOC, κλωροφύλλη *a* ιζήματος και υδρόθειο). Η συγκεκριμένη χρονική υστέρηση παρατηρήθηκε σε όλα τα δυνατά ζεύγη των παραπάνω μεταβλητών με τις τιμές της συσχέτισης Spearman (r_s) να κυμαίνονται από 0,48 ως 0,81. Από την άλλη πλευρά, το οξειδοαναγωγικό δυναμικό εμφάνισε μεγαλύτερη χρονική υστέρηση, 36 μέρες, και με τις τρεις μεταβλητές της στήλης του νερού (r_s : -0,56 με -0,65).

Στην χαμηλή προσθήκη, οι αντίστοιχες χρονικές υστερήσεις ήταν μικρότερες σε σχέση με τον μάρτυρα (Πίνακας 4.7). Όλα τα δυνατά ζεύγη των ακόλουθων μεταβλητών νερού (Chl-*a* νερού, ρυθμός καθίζησης κλωροφύλλης *a* και TRIX) και ιζήματος (TOC, κλωροφύλλη *a* ιζήματος και H₂S) βρέθηκαν να έχουν 12 ημέρες υστέρηση με τις αντίστοιχες τιμές r_s να κυμαίνονται μεταξύ 0,51 και 0,92. Το οξειδοαναγωγικό δυναμικό παρουσίασε και πάλι μεγαλύτερη

Κεφάλαιο 4: Σύζευξη βενθικού – πελαγικού οικοσυστήματος μέσω ενός πειράματος μεσόκοσμων: Χρονικές υστερήσεις και αλλαγή καθεστώτος

υστέρηση σε σχέση με τις υπόλοιπες μεταβλητές, 30 ημερών, αλλά μικρότερη σε σχέση με την αντίστοιχη του μάρτυρα.

Η υψηλή προσθήκη εμφάνισε παρόμοιες χρονικές υστερήσεις με τις αντίστοιχες της χαμηλής, 12 ημέρες (Πίνακας 4.7), σε όλα τα ζεύγη των μεταβλητών, με εξαίρεση το οξειδοαναγωγικό δυναμικό το οποίο εμφάνισε διαφορετικές υστερήσεις με κάθε μεταβλητή της στήλης (18 ημέρες με την κλωροφύλλη *a* νερού, 24 ημέρες με τον ρυθμό καθίζησης κλωροφύλλης *a* και 30 με τον TRIX). Οι τιμές r_s κυμάνθηκαν μεταξύ 0,48 με 0,78 στην πρώτη περίπτωση, και μεταξύ -0,52 και -0,61 στην περίπτωση του οξειδοαναγωγικού δυναμικού.

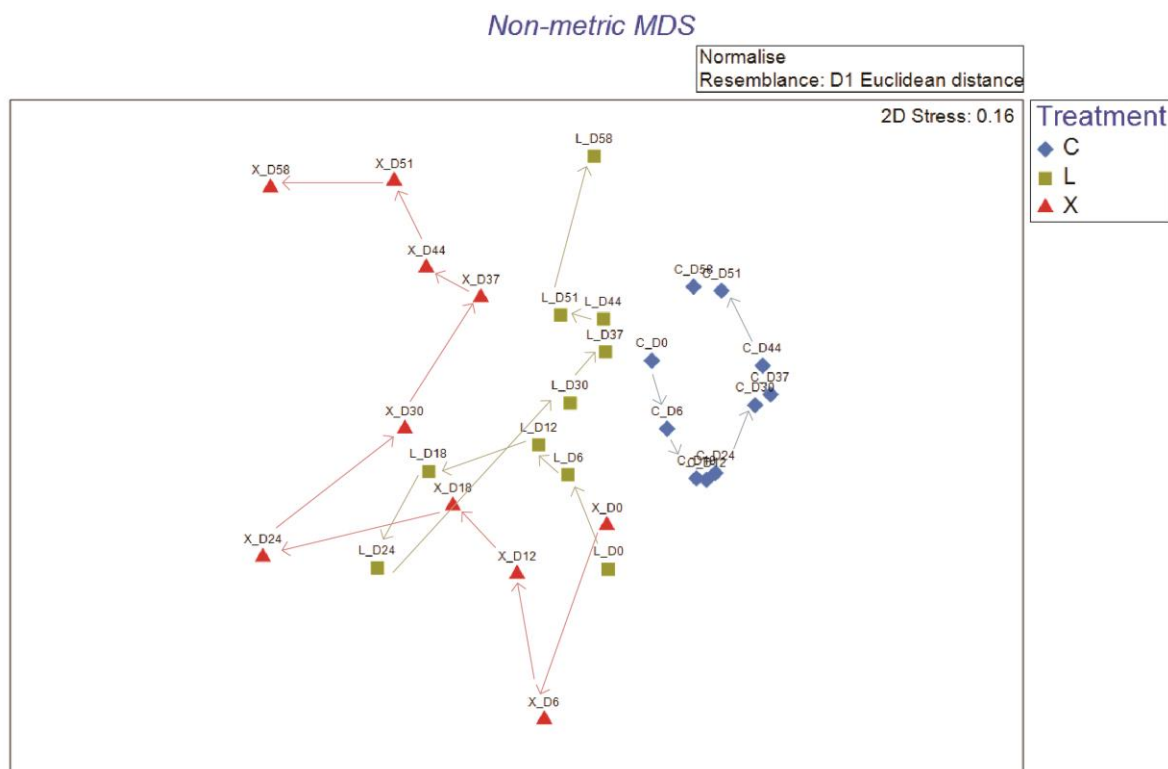
Χρονική υστέρηση παρατηρήθηκε ακόμα και μεταξύ των γεωχημικών μεταβλητών του ιζήματος (Πίνακας 4.8). Το TOC και το οξειδοαναγωγικό δυναμικό παρουσίασαν 12 ημέρες στον μάρτυρα και 24 στα εμπλουτισμένα επίπεδα προσθήκης. Οι αντίστοιχες τιμές r_s ήταν -0,64, -0,72 και -0,68. Επιπροσθέτως, το οξειδοαναγωγικό δυναμικό με το υδρόθειο παρουσίασε την ίδια χρονική υστέρηση, 24 και 12 ημερών με παρόμοιες τιμές r_s -0,64, -0,72 και -0,68. Αντιθέτως, δεν παρατηρήθηκε χρονική υστέρηση μεταξύ του TOC και του υδρόθειου στο ίζημα, σε κανένα επίπεδο προσθήκης (r_s : 0,63, 0,60, 0,74), ομοίως και στην στήλη του νερού μεταξύ της κλωροφύλλης *a* νερού και του ρυθμού καθίζησης Chl-*a* (r_s : 0,72, 0,77, 0,71).

Πίνακας 4.8. Αποτελέσματα ανάλυσης cross-correlation (Spearman) μεταξύ επιλεγμένων γεωχημικών μεταβλητών του ιζήματος. Παρατίθεται μόνο η υψηλότερη στατιστικά σημαντική συσχέτιση ($p < 0,05$) που υποδεικνύει την χρονική υστέρηση (σε ημέρες) μεταξύ των δύο μεταβλητών.

		C	L	H
TOC - Eh	Time Lag	12	24	24
	Spearman	-0,67	-0,75	-0,67
Eh - Sulfide	Time Lag	12	24	24
	Spearman	-0,64	-0,72	-0,68
TOC - Sulfide	Time Lag	0,00	0,00	0
	Spearman	0,63	0,60	0,74
Chlorophyll-<i>a</i> water - Chlorophyll-<i>a</i> sedimentation rate	Time Lag	0	0	0
	Spearman	0,72	0,77	0,71

4.4.4 Πολυμεταβλητές αναλύσεις

Το διάγραμμα nMDS, που δημιουργήθηκε από το σύνολο των περιβαλλοντικών μεταβλητών για κάθε επίπεδο προσθήκης ξεχωριστά (Εικόνα 4 3), απεικονίζει έναν καθαρό διαχωρισμό μεταξύ του μάρτυρα και των εμπλουτισμένων επιπέδων. Η γραμμή στο διάγραμμα, που ενώνει τα διαδοχικά χρονικά σημεία στην διάρκεια του πειράματος, αναδεικνύει τα διαφορετικά μοτίβα του μάρτυρα και των εμπλουτισμένων επιπέδων προσθήκης.



Εικόνα 4.3. Διάγραμμα MDS με τις περιβαλλοντικές μεταβλητές (μέση όροι) κάθε επιπέδου προσθήκης. Κάθε σημείο αντιπροσωπεύει την δειγματοληψία της συγκεκριμένης ημέρας. Μάρτυρας: μπλε ρόμβος, Χαμηλή προσθήκη πράσινο τετράγωνο, Υψηλή προσθήκη: κόκκινο τρίγωνο. Τα βέλη ενώνουν διαδοχικά χρονικά σημεία κάθε επιπέδου προσθήκης.

Πιο συγκεκριμένα, τα σημεία του μάρτυρα τοποθετήθηκαν όλα μαζί σε έναν κύκλο στο δεξί μέρος του διαγράμματος με τις ημέρες 0 και 58 να βρίσκονται σχετικά κοντά. Αντίθετα, τα χρονικά σημεία της χαμηλής προσθήκης δημιούργησαν μία ομάδα στο κέντρο του διαγράμματος, παρουσιάζοντας μία πιο γραμμική διαδοχή, η οποία ξεκινώντας από την ημέρα 0 στο κέντρο του διαγράμματος, συνεχίζει ευθεία ως την ημέρα 12, όπου και παρουσίασε μία έντονη διακύμανση αποτελούμενη από τις ημέρες 18 και 24, ενώ την ημέρα 30 το σύστημα επιστρέφει στην προηγούμενη γραμμή,

Κεφάλαιο 4: Σύζευξη βενθικού – πελαγικού οικοσυστήματος μέσω ενός πειράματος μεσόκοσμων: Χρονικές υστερήσεις και αλλαγή καθεστώτος

συνεχίζοντας μέχρι το τέλος την ημέρα 58 στην αντίθετη άκρη του διαγράμματος. Τέλος, τα σημεία της υψηλής προσθήκης, είναι διασκορπισμένα στην αριστερή πλευρά του διαγράμματος παρουσιάζοντας μία ακανόνιστη διαδοχή με έντονες διακυμάνσεις και μεγάλες αποστάσεις μεταξύ τους, από την αρχή του πειράματος έως την ημέρα 30 και στην συνέχεια οι ημέρες 37 έως 58 αποτελούν μία διαχωρισμένη ομάδα στο πάνω και αριστερό μέρος του διαγράμματος. Σε ό,τι αφορά τις εμπλουτισμένες προσθήκες, τα σημεία των αρχικών ημερών βρίσκονται αρκετά κοντά, όπως επίσης και τα σημεία των μέγιστων, για αρκετές μεταβλητές, στις ημέρες 18 και 24.

Η ανάλυση relate στα περιβαλλοντικά δεδομένα όλων των επιπέδων προσθήκης (Πίνακας 4.9) έδειξε στατιστικά σημαντική γραμμικότητα (seriation) και κυκλικότητα (cyclicity) σε όλες τις περιπτώσεις.

Πίνακας 4.9 Πολυμεταβλητή ανάλυση relate seriation και cyclicity στην τριγωνική μήτρα ομοιότητας των περιβαλλοντικών δεδομένων για κάθε επίπεδο προσθήκης.

	RELATE seriation		RELATE cyclicity	
	ρ statistic	p<	ρ statistic	p<
Control	0,525	0,01	0,649	0,01
Low	0,739	0,01	0,437	0,01
High	0,436	0,01	0,561	0,01

Στο μάρτυρα, παρουσιάστηκε η υψηλότερη τιμή του στατιστικού ρ στην ανάλυση cyclicity ($\rho = 0,649$). Αντίθετα, η χαμηλή προσθήκη εμφανίζει έντονα στοιχεία γραμμικότητας όπως φαίνεται από την υψηλή τιμή του ρ στην ανάλυση seriation ($\rho = 0,739$). Τέλος η υψηλή προσθήκη εμφάνισε στατιστικά σημαντικά μεν, αλλά χαμηλά δε, στοιχεία γραμμικότητας και κυκλικότητας.

4.4.5 Συζήτηση

Η Ευρωπαϊκή Οδηγία για την Θαλάσσια Στρατηγική (EMSFD) εισήγαγε την «οικοσυστημική προσέγγιση» και την «ολιστική διαχείριση» στην εκτίμηση της υγείας των θαλάσσιων οικοσυστημάτων (Tett et al. 2013). Ο σχεδιασμός του πειράματος προσπάθησε να εφαρμόσει την εν λόγω προσέγγιση προκειμένου να εκτιμήσει τις επιπτώσεις του ευτροφισμού στην κατάσταση του βενθικού οικοσυστήματος. Η παρουσία ενός επαρκούς όγκου νερού ($1,5 \text{ m}^3$)

Κεφάλαιο 4: Σύζευξη βενθικού – πελαγικού οικοσυστήματος μέσω ενός πειράματος μεσόκοσμων: Χρονικές υστερήσεις και αλλαγή καθεστώτος

για πειράματα μεσόκοσμων (Petersen et al. 2009), ταυτόχρονα με μία πλήρως λειτουργική βενθική κοινότητα, αυξάνει τον ρεαλισμό του πειράματος.

Στο συγκεκριμένο πείραμα, μετά την αρχική προσθήκη θρεπτικών, οι συγκεντρώσεις των PO_4 και NO_3 ήταν πολύ υψηλότερες από τις αντίστοιχες τιμές που έχουν μετρηθεί σε μελέτες πεδίου, στο πλαίσιο της εφαρμογής της οδηγίας για τα ύδατα (WFD) (Pavlidou et al. 2015). Ωστόσο, τα θρεπτικά απορροφήθηκαν γρήγορα από το φυτοπλαγκτό του νερού και εξαντλήθηκαν μετά από 24 ημέρες στην χαμηλή προσθήκη, ενώ στην υψηλή σταθεροποιήθηκαν σε χαμηλές συγκεντρώσεις, μετά την ημέρα 30 ($\geq 0,5 \mu M$).

Η μέγιστη συγκέντρωση της κλωροφύλλης a που παρατηρήθηκε και στα δύο εμπλουτισμένα επίπεδα προσθήκης έφτασε σε πολύ υψηλές τιμές, συγκριτικά με τις συνήθεις τιμές που παρατηρούνται στην περιοχή της ανατολικής Μεσογείου (Pavlidou et al. 2015, Simboura et al. 2015). Το όριο της «Κακής» οικολογικής κατάστασης, σύμφωνα με την κλίμακα των Simboura et al. (2005) είναι $2,21 \mu g l^{-1}$, περίπου το 1/3 από την μεγαλύτερη τιμή ($6,01 \mu g l^{-1}$) που καταγράφηκε στο πείραμά την ημέρα 18. Όμως, η καλύτερη εκτίμηση της πίεσης που ασκείται στο βενθικό σύστημα λόγω του ευτροφισμού παρέχεται από τους δύο πολυμετρικούς δείκτες (TRIX και E.I.) που συμπεριλαμβάνονται στην παρούσα μελέτη. Και οι δύο δείκτες παρέχουν τους ίδιους χαρακτηρισμούς οικολογικής κατάστασης, σε όλα τα επίπεδα προσθήκης σε κάθε χρονικό σημείο, ωστόσο ο δείκτης TRIX παρέχει ένα καλύτερο οπτικό αποτέλεσμα διαχωρίζοντας πιο καλά τις οικολογικές καταστάσεις. Η πληροφορία, αυτή σε συνδυασμό με την σημαντικά αυξημένη καθίζηση κλωροφύλλης a και POC, που καταγράφηκε στην υψηλή προσθήκη, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μία ποσοτικοποίηση της ισχυρότερης πίεσης που ασκήθηκε στο βένθος στην υψηλή προσθήκη, σε σχέση με την χαμηλή.

Η συγκέντρωση του διαλελυμένου Οξυγόνου στο βενθικό οριακό στρώμα (benthic boundary layer), αυξήθηκε κατά την διάρκεια των 30 πρώτων ημερών του πειράματος, ακολουθώντας το πρότυπο της κλωροφύλλης a στους εμπλουτισμένους με θρεπτικά μεσόκοσμους. Σύμφωνα με την μελέτη CSTT (1997), συγκέντρωση κλωροφύλλης a μεγαλύτερη από $10 \mu g l^{-1}$, θα μπορούσε να προκαλέσει συνθήκες υποξίας στο βένθος. Στην παρούσα μελέτη, παρά την

Κεφάλαιο 4: Σύζευξη βενθικού – πελαγικού οικοσυστήματος μέσω ενός πειράματος μεσόκοσμων: Χρονικές υστερήσεις και αλλαγή καθεστώτος

προσθήκη πολύ μεγάλης συγκέντρωσης θρεπτικών στο νερό, η παραγόμενη χλωροφύλλη *a* δεν έφτασε την παραπάνω συγκέντρωση, πιθανώς λόγω της έντονης βόσκησης του φυτοπλαγκτού και της μεταφοράς της βιομάζας στα ετερότροφα επίπεδα (Pitta et al. 2009). Σε διαφορετικό σύστημα, οι Oniatt et al. (1986), στην περιοχή του Rhode Island, αναφέρουν ότι ο συνεχής εμπλουτισμός, (32x την συγκέντρωση της περιοχής στην υψηλή προσθήκη), σε θαλάσσιους μεσόκοσμους παρόμοιου βάθους 5 m, αύξησε την κατανάλωση οξυγόνου στο ίζημα προκαλώντας σύντομες περιόδους υποξίας.

Η καθίζηση οργανικού υλικού που προκλήθηκε από τον ευτροφισμό επηρέασε τις βενθικές γεωχημικές μεταβλητές, ειδικά στην υψηλή προσθήκη. Τα ποσοστά TOC και Labile OM% αυξήθηκαν, αλλά όχι τόσο πολύ σε σχέση με την αντίστοιχη ποσοστιαία αύξηση της χλωροφύλλης *a* στο νερό. Πιο συγκεκριμένα, η μέγιστη συγκέντρωση χλωροφύλλης *a* ήταν εξαπλάσια των αρχικών συνθηκών, ενώ η αύξηση του TOC και Labile OM% ήταν μόλις διπλάσια και 1,5 φορές μεγαλύτερη αντίστοιχα. Ακόμα και η συγκέντρωση της χλωροφύλλης *a* στο ίζημα δεν αυξήθηκε τόσο πολύ, φθάνοντας σε 2,5 φορές εκείνη της αρχικής τιμής.

Αν και οι μεταβολές στις βιογεωχημικές μεταβλητές του ιζήματος ήταν μικρότερες σε σχέση με αυτές της στήλης, η επίδραση του ευτροφισμού στο ίζημα ήταν στατιστικά σημαντική, ειδικά στο επιφανειακό στρώμα του ιζήματος. Και στα δύο εμπλουτισμένα επίπεδα προσθήκης, η συγκέντρωση της χλωροφύλλης και του υδροθείου καθώς και τα ποσοστά των LabOM και TOC αυξήθηκαν ενώ η τιμή του Eh μειώθηκε. Ωστόσο, παρατηρήθηκαν διαφορές μεταξύ των ημερών στις οποίες βρέθηκαν οι μέγιστες (ή ελάχιστες) τιμές των μεταβλητών, ιδιαίτερα στην περίπτωση του Eh. Αυτές οι διαφορές υποδεικνύουν την ύπαρξη χρονικών υστερήσεων μεταξύ της κατάστασης της στήλης του νερού και της απόκρισης του ιζήματος. Η παρουσία υστερήσεων παρατηρήθηκε μεταξύ όλων των πιθανών ζευγαριών μεταβλητών στήλης και ιζήματος και σε όλα τα επίπεδα προσθήκης. Η κυριότερη διαφορά μεταξύ τους ήταν η διάρκεια της χρονικής υστέρησης. Η υστέρηση στους εμπλουτισμένους μεσόκοσμους ήταν μικρότερη από ότι στον μάρτυρα (12 ημέρες αντί για 18) για όλες τις μεταβλητές εκτός από το Eh (18-30 ημέρες αντί για 36). Στο ίζημα, το Eh, παρουσίασε την πιο αργή αντίδραση σε σχέση με τις υπόλοιπες μεταβλητές

Κεφάλαιο 4: Σύζευξη βενθικού – πελαγικού οικοσυστήματος μέσω ενός πειράματος μεσόκοσμων: Χρονικές υστερήσεις και αλλαγή καθεστώτος

(12 και 24 μέρες αντίστοιχα). Η αύξηση της πίεσης από την στήλη, προκάλεσε την μείωση της υστέρησης, παρόλα αυτά, ήταν σημαντική. Χρονικές υστερήσεις σε συνθήκες ευτροφισμού έχουν παρατηρηθεί σε λιμναία οικοσυστήματα: οι Verspagen et al. (2005) παρατήρησαν 3-14 εβδομάδες χρονική υστέρηση μεταξύ της αύξησης του πελαγικού και του βενθικού πληθυσμού του κυανοβακτηρίου *Microcystis*. Επίσης, σε ένα πείραμα εμπλουτισμού μεσόκοσμων μεγάλης χρονικής διάρκειας, οι Kraufvelin et al. (2006) παρατήρησαν ότι σε σκληρό υπόστρωμα παλιρροιακής ζώνης, διαφορετικά είδη φυκών ανταποκρίθηκαν στον εμπλουτισμό με διαφορετικές ταχύτητες, ανάλογα με την στρατηγική ζωής τους. Μετά από βιβλιογραφική έρευνα, δεν εντοπίστηκε καμία μελέτη σε oligοτροφικό περιβάλλον που να παρέχει μια συγκεκριμένη εκτίμηση της χρονικής υστέρησης μεταξύ της κατάστασης της στήλης του νερού και της ανταπόκρισης του ιζήματος σε ένα παράκτιο οικοσύστημα.

Εξετάζοντας την μεταβλητότητα του συστήματος στο σύνολό του, παρατηρήθηκαν διαφορές στην χρονική διαδοχή και εξέλιξη των μεσόκοσμων μεταξύ των διαφορετικών επιπέδων προσθήκης. Πιο συγκεκριμένα, ο μάρτυρας παρουσίασε μία έντονα κυκλική διαδοχή χωρίς διακυμάνσεις και μέσα στο χρονικό διάστημα των δύο μηνών, βρέθηκε η τελική κατάσταση του συστήματος να μοιάζει πάρα πολύ με την αρχική, όπως φάνηκε από την εικόνα 4.3 και τον πίνακα 4.9. Αντίθετα, στην χαμηλή προσθήκη οι ημέρες 18 και 24 δημιουργούν μία έντονη διακύμανση και διαχωρίζονται από τα υπόλοιπα χρονικά σημεία που δημιουργούν μία κατά τα άλλα γραμμική διαδοχή. Τέλος, στην υψηλή προσθήκη, το πρότυπο διαδοχής είναι ακόμα περισσότερο διαταραγμένο, με τις ημέρες 6 και 12 να δημιουργούν μία ακόμα διακύμανση, μαζί με αυτή των ημερών 18 και 24 σε ένα λιγότερο γραμμική μοτίβο σε σχέση με την χαμηλή προσθήκη. Διακυμάνσεις και ακανόνιστα πρότυπα διαδοχής σχετίζονται με συνθήκες υψηλής διατάραξης (Karakassis et al. 1999), και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ενδείξεις ότι είναι πιθανό να συμβεί αλλαγή καθεστώτος σε σύντομο χρονικό διάστημα (Brock & Carpenter 2012).

Συνοψίζοντας, ο σχεδιασμός του συγκεκριμένου πειράματος περιελάμβανε μία έντονη, αλλά σύντομη, διατάραξη (μία προσθήκη θρεπτικών

Κεφάλαιο 4: Σύζευξη βενθικού – πελαγικού οικοσυστήματος μέσω ενός πειράματος μεσόκοσμων: Χρονικές υστερήσεις και αλλαγή καθεστώτος

στην αρχή του πειράματος) και μετά, παρακολούθηση της εξέλιξης του φαινομένου σε ένα χρονικό διάστημα δύο μηνών. Σε αυτό το χρονικό διάστημα, ο μάρτυρας παρουσίασε μικρή διακύμανση και το σύστημα επέστρεψε γρήγορα στις αρχικές συνθήκες. Η χαμηλή προσθήκη μένοντας, στην μεγαλύτερη διάρκεια του πειράματος, στην «Μέτρια» οικολογική κατάσταση δημιούργησε ένα σύστημα το οποίο είχε έντονη γραμμική διαδοχή αλλά δεν επέστρεψε στο αρχικό σημείο (παρόλο που η κυκλικότητα της διαδοχής ήταν στατιστικά σημαντική). Τέλος, στην υψηλή προσθήκη όπου η οικολογική κατάσταση της στήλης ήταν «Κακή» σε όλη τη διάρκεια του πειράματος η διαδοχή ήταν ακανόνιστη και το σύστημα απομακρύνθηκε πολύ από τις αρχικές συνθήκες. Παρόλα αυτά συνθήκες υποξίας στο βένθος δεν παρατηρήθηκαν, για λόγους που θα αναλυθούν στην ενότητα 5.

5. Απόκριση της μακροπανίδας σε ευτροφικές συνθήκες σε ένα πείραμα μεσόκοσμων: η ελαστικότητα του οικοσυστήματος αποτρέπει την δημιουργία υποξίας

5.1 Περίληψη

Ένα πείραμα μεσόκοσμων πραγματοποιήθηκε για την μελέτη της σύζευξης βενθικού – πελαγικού οικοσυστήματος σε συνθήκες ευτροφισμού. Επώαστηκαν εννέα μεσόκοσμοι, με 4,5 m βάθος, 1,5 m³ όγκο παράκτιου νερού και τον πυθμένα, 85 l αδιατάραχτο ίζημα, που συλλέχθηκε από μία περιοχή, με περιορισμένη ανθρωπογενή επίδραση στο λιμάνι του Ηρακλείου Κρήτης. Δημιουργήθηκε μία διαβάθμιση έντασης ευτροφισμού (μάρτυρας, χαμηλή, υψηλή) με προσθήκη θρεπτικών και η διάρκεια του πειράματος ήταν 58 ημέρες. Στο τέλος του πειράματος συλλέχθηκε από κάθε μεσόκοσμο ένα δείγμα μακροπανίδας και συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα δείγματα που συλλέχθηκαν στην περιοχή του λιμανιού. Τα αποτελέσματα έδειξαν στατιστικά σημαντικές διαφορές της υψηλής προσθήκης, ως προς την σύνθεση της βιοκοινότητας, οικολογικής κατάστασης και οικοσυστημικών διεργασιών. Οι διαφορές οφείλονται σε ορισμένα ιζηματοφάγα είδη με μεγάλη ικανότητα βιοανάδευσης. Η απόκριση της μακροβενθικής κοινότητας στην πίεση του ευτροφισμού λειτούργησε ως ανάδραση, αμβλύνοντας τις επιπτώσεις του ευτροφισμού και προφυλάσσοντας την σταθερότητα του οικοσυστήματος.

5.2 Εισαγωγή

Οι επιπτώσεις του οργανικού εμπλουτισμού στην ποικιλότητα, αφθονία και βιομάζα των μακροβενθικών κοινοτήτων έχουν περιγραφεί διεξοδικά από τους Pearson and Rosenberg (1978) και στην συνέχεια οδήγησαν σε πληθώρα δημοσιεύσεων σχετικά με το θέμα. Αυτές οι αλλαγές στη δομή των μακροβενθικών κοινοτήτων μπορούν να αλλάξουν τη λειτουργική ποικιλότητα των βιοκοινοτήτων (Brown et al. 1987, Karakassis & Hatziyanni 2000, Solan et al. 2004, Tillin et al. 2006).

Η λειτουργική ποικιλότητα αναφέρεται στο εύρος των οργανισμικών γνωρισμάτων που επηρεάζονται από τις οικοσυστημικές ιδιότητες (Hooper et al. 2002). Μεταβολές των λειτουργικών συνιστωσών των βιοκοινοτήτων σχετίζονται με την προσαρμογή των οργανισμών στο περιβάλλον και την απόκρισή τους στην περιβαλλοντική πίεση (de Juan et al. 2007). Μελέτες που αφορούν τις επιδράσεις των ιχθυοκαλλιεργειών στη μακροπανίδα (Tomassetti & Porrello 2005, Parageorgiou et al. 2009, Tomassetti et al. 2009) παρατήρησαν ομοιότητες με το εμπειρικό μοντέλο διαδοχής των Pearson and Rosenberg (1978) όσον αφορά τη λειτουργική ποικιλότητα. Η απόκριση της βενθικής πανίδας στον οργανικό εμπλουτισμό εξαρτάται από τα βιολογικά γνωρίσματα των οργανισμών. Διαφορετικά είδη δρουν μέσω διαφορετικών προτύπων, ενώ η συνολική δράση της πανίδας είναι σημαντική για τη ρύθμιση των συστημάτων (Parageorgiou et al. 2009). Κάθε πρότυπο συχνά συνδέεται με ιδιαίτερα γνωρίσματα του είδους (Norling et al. 2007). Για παράδειγμα, τα ευκαιριακά είδη επηρεάζονται λιγότερο από την ιζηματοπόθεση και είναι πιθανό να έχουν θετική απόκριση σε αυτή (Tomassetti & Porrello 2005).

Η βενθική μακροπανίδα έχει σημαντική επίδραση πάνω στις γεωχημικές διεργασίες του ιζήματος ιδιαίτερα σε μαλακά υποστρώματα μέσω της βιοανάδευσης (bioturbation). Η βιοανάδευση είναι η διεργασία ανάδευσης των ιζημάτων και υλικών σωματιδίων που πραγματοποιούνται λόγω των διεργασιών της μακροπανίδας όπως η αναζήτηση τροφής και σίτιση, η κατασκευή στοών, και άλλες δραστηριότητες που προκαλούν κυκλοφορία νερού και αερίων στο εσωτερικό των ιζημάτων (Volkenborn et al. 2010,

Κεφάλαιο 5: 5.Απόκριση της μακροπανίδας σε ευτροφικές συνθήκες σε ένα πείραμα μεσόκοσμων: η ελαστικότητα του οικοσυστήματος αποτρέπει την δημιουργία υποξίας

Queirós et al. 2013). Αυτές οι διεργασίες επηρεάζουν την οξυγόνωση, το pH και το οξειδοαναγωγικό δυναμικό των ιζημάτων μεταξύ άλλων παραμέτρων (see (Queirós et al. 2013)).

Μία μέτρηση της δυνατότητας βιοανάδευσης της βενθικής κοινότητας μπορεί να δοθεί από τον δείκτη Community Bioturbation Potential (BPC) που προτάθηκε από τους (Solan et al. 2004). Ο δείκτης συνδυάζει δεδομένα αφθονίας, βιομάζα και λειτουργικών χαρακτηριστικών μακροπανιδικών ειδών ή ταξινομικών ομάδων. Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν την ικανότητα των ειδών για αναμόχλευση του ιζήματος (sediment reworking) και κινητικότητα (mobility), δύο λειτουργικά χαρακτηριστικά που ρυθμίζουν την ανάδευση του ιζήματος (Solan et al. 2004). Δεδομένα για τα συγκεκριμένα λειτουργικά χαρακτηριστικά για μακροπανιδικά είδη είναι διαθέσιμα από τους Queirós et al. (2013).

Ο στόχος της συγκεκριμένης θεματικής ενότητας είναι η διερεύνηση των χαρακτηριστικών (ποικιλότητα και λειτουργικά χαρακτηριστικά) της μακροπανιδικής κοινότητας που βρισκόταν στα ιζήματα του πειράματος μεσόκοσμων. Πιο συγκεκριμένα, (i) να προσδιοριστεί η μεταβολή της δομής της κοινότητας, από τις αρχικές συνθήκες στο πεδίο, στο τέλος του πειράματος σε κάθε επίπεδο προσθήκης ξεχωριστά και (ii) η συσχέτιση των χαρακτηριστικών της νέας βιοκοινότητας με τις περιβαλλοντικές συνθήκες του κάθε επιπέδου προσθήκης.

5.3 Υλικά και μέθοδοι

Οι στόχοι, η μεθοδολογία και τα αποτελέσματα των περιβαλλοντικών μεταβλητών στο πείραμα των μεσόκοσμων έχουν περιγραφεί εκτενώς στις δύο προηγούμενες θεματικές ενότητες.

Δείγματα μακροπανίδας, ελήφθησαν από την περιοχή του λιμανιού κατά την διάρκεια της αρχικής συλλογής του ιζήματος, καθώς και στο τέλος του πειράματος (ένα δείγμα από κάθε μεσόκοσμο). Για τη συλλογή του δείγματος χρησιμοποιήθηκε ένας δειγματολήπτης τύπου box corer (επιφάνεια 0.13 x 0.13 m) τόσο στο λιμάνι όσο και στο τέλος του πειράματος. Τα δείγματα

Κεφάλαιο 5: 5.Απόκριση της μακροπανίδας σε ευτροφικές συνθήκες σε ένα πείραμα μεσόκοσμων: η ελαστικότητα του οικοσυστήματος αποτρέπει την δημιουργία υποξίας

κοσκινίστηκαν με την χρήση κόσκινου με άνοιγμα 0,5 cm, και το ίζημα που κατακρατήθηκε μαζί με τους οργανισμούς διατηρήθηκε σε 5% διάλυμα φορμόλης. Για την διευκόλυνση της διαλογής των οργανισμών από το ίζημα, αυτοί βάφτηκαν με χρωστική Rose Bengal, και προσδιορίστηκαν σε επίπεδο είδους (ή στο χαμηλότερο δυνατό ταξινομικό επίπεδο) με την χρήση κατάλληλων κλειδών.

Για τον υπολογισμό των δεικτών ποικιλότητας και τις πολυμεταβλητές αναλύσεις χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα PRIMER-E v. 7 ενώ οι δείκτες οικολογικής κατάστασης υπολογίστηκαν με τις μεθόδους που αναφέρθηκαν στην ενότητα 2.

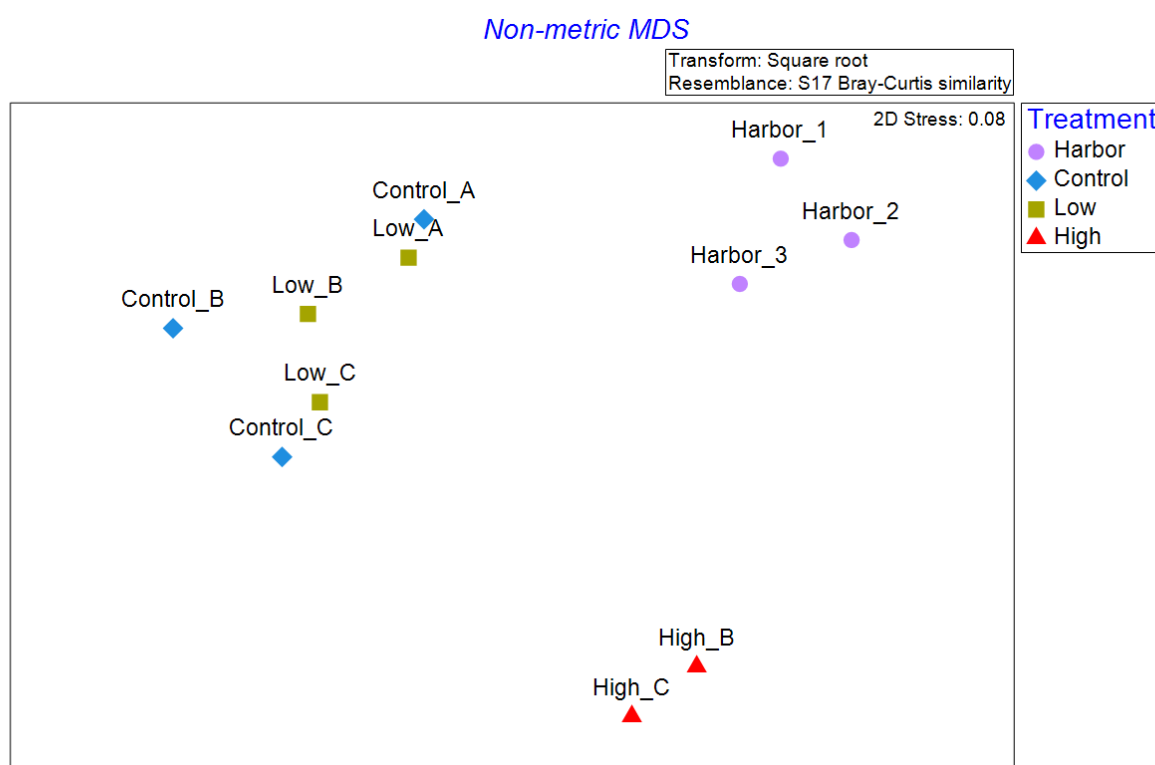
Για τον υπολογισμό της βιομάζας ανά άτομο των διαφορετικών ειδών και της μεταβολής της στη διάρκεια του πειράματος, διαιρέθηκε η συνολική αφθονία του κάθε είδους με την αντίστοιχη βιομάζα κάθε επιπέδου προσθήκης, και η τιμή αυτή συγκρίθηκε με την αντίστοιχη τιμή των αρχικών συνθηκών (περιοχή συλλογής ιζήματος).

Για τον προσδιορισμό των λειτουργικών χαρακτηριστικών των μακροπανιδικών ειδών χρησιμοποιήθηκε η βάση δεδομένων Polytraits (Faulwetter et al. 2014) που βρίσκεται στην ιστοσελίδα (<http://polytraits.lifewatchgreece.eu/>) και περιέχει δεδομένα για λειτουργικά χαρακτηριστικά για περισσότερα από 950 διαφορετικά μακροπανιδικά είδη που έχουν συλλεχθεί με βάση τη διαθέσιμη βιβλιογραφία. Τα χαρακτηριστικά που περιλαμβάνονται είναι: «Επίπεδο ανοχής στη διατάραξη» όπως προκύπτει από τις βάσεις δεδομένων του δεικτών BQI, BENTIX και AMBI, «Μέγεθος», «Τροφικός τύπος», «Ηλικία πρώτης αναπαραγωγής», και «Τροποποίηση ενδιαιτήματος».

Ο δείκτης community Bioturbation Potential (BP_c) (Solan et al. 2004), που υπολογίστηκε με βάση την μεθοδολογία και τα δεδομένα των Queirós et al. (2013), προσφέρει μία ένδειξη της συνολικής ικανότητας της βενθικής κοινότητας για βιοανάδευση.

5.4 Αποτελέσματα

Η πολυμεταβλητή ανάλυση nMDS στα δεδομένα μακροπανίδας (Εικόνα 5.1) παρουσιάζει μία ομαδοποίηση μεταξύ των δειγμάτων της χαμηλής προσθήκης και του μάρτυρα στο αριστερό μέρος του διαγράμματος ενώ τα δείγματα της υψηλής προσθήκης ομαδοποιούνται στο κάτω και αριστερό μέρος του διαγράμματος. Τέλος τα δείγματα από την περιοχή του λιμανιού ομαδοποιούνται στο πάνω αριστερά μέρος του διαγράμματος.



Εικόνα 5.1. Διάγραμμα nMDS με τα δεδομένα αφθονίας μακροπανίδας από το πείραμα των μεσόκοσμων.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ANOSIM έδειξαν ότι υπάρχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των επιπέδων προσθήκης (Global R: 0.77, $p < 0,01$) και τα τεστ κατά ζεύγη έδειξαν στατιστικά σημαντικές διαφορές ($p < 0,01$) για όλα τα ζεύγη εκτός του ζεύγους μάρτυρα – χαμηλής προσθήκης (Πίνακας 5.1).

Κεφάλαιο 5: 5.Απόκριση της μακροπανίδας σε ευτροφικές συνθήκες σε ένα πείραμα μεσόκοσμων: η ελαστικότητα του οικοσυστήματος αποτρέπει την δημιουργία υποξίας

Πίνακας 5.1 Αποτελέσματα ANOSIM στις διαφορετικές μεταχειρίσεις για τα δεδομένα μακροπανίδας

ANOSIM Global R: 0.77, p<0,01		
Pairwise Tests	R Statistic	Significance
Harbor, Control	0,963	p<0,01
Harbor, Low	1	p<0,01
Harbor, High	1	p<0,01
Control, Low	-0,111	ns
Control, High	1	p<0,01
Low, High	1	p<0,01

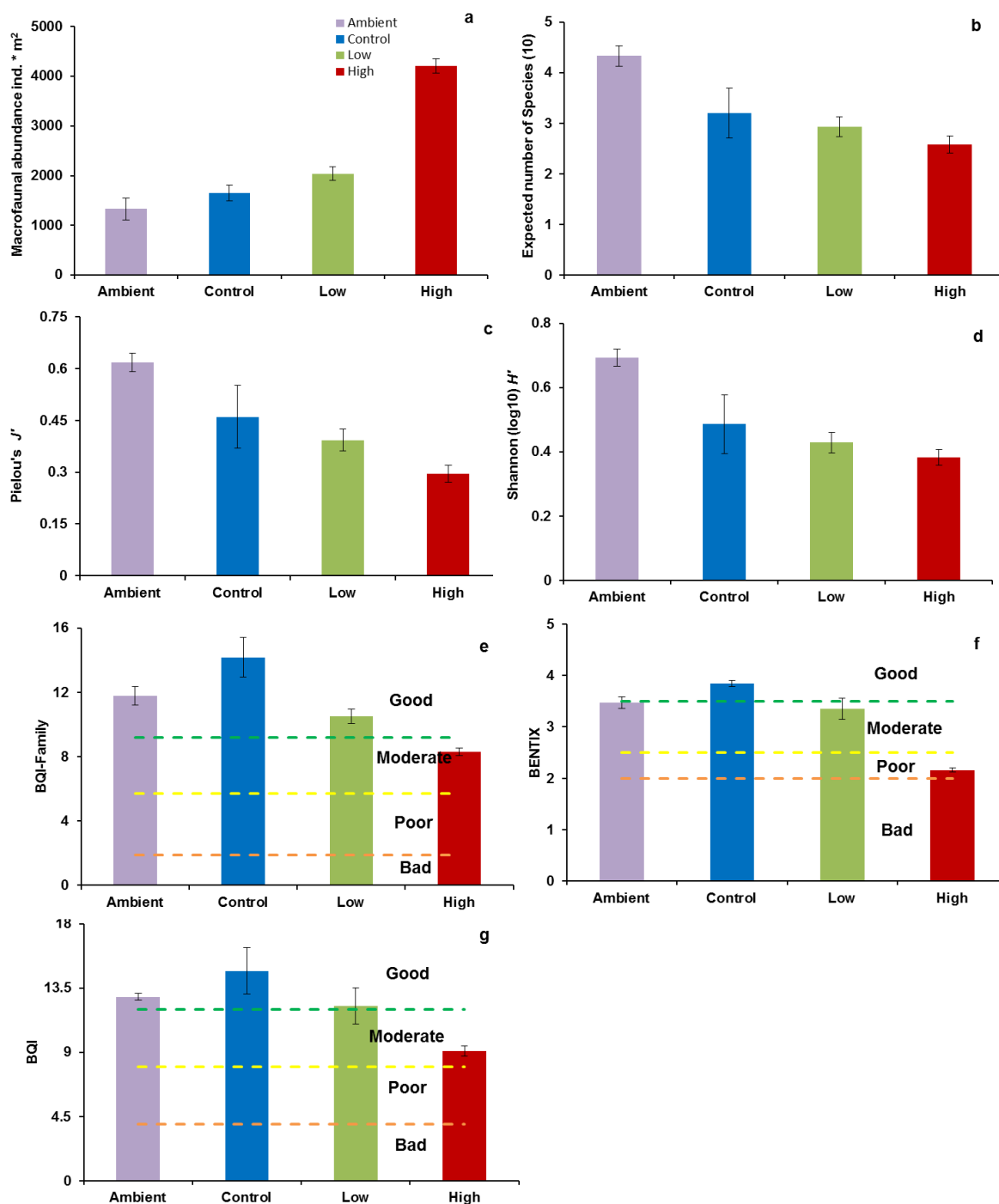
Τα αποτελέσματα της ANOVA των δεικτών ποικιλότητας και οικολογικής κατάστασης έδειξαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των επιπέδων προσθήκης για το σύνολο των δεικτών με εξαίρεση τον αριθμό των ειδών (S) και οικογενειών (F) (Πίνακας 5.2).

Πίνακας 5.2. Αποτελέσματα one way ANOVA μεταξύ των επιπέδων προσθήκης για τους διαφορετικούς δείκτες ποικιλότητας και οικολογικής κατάστασης.

	S	F	N	d	J'	ES(10)	H'	BENTIX	BQI	BQI- Family
F	-	-	160,1	5,52	18,75	20,96	14,9	251,7	1911,41	1991,29
pvalue	n	n	0,01	0,05	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	s	s								
Post Hoc	-		A,C≠L≠H	A,C,L≠H	A,C≠L,H	A≠C,L≠H	A≠C,L,H	A,L≠C≠H	A,C,L≠H	A,L≠C≠H

Η υψηλή προσθήκη, παρουσίασε τις μεγαλύτερες διαφοροποιήσεις σε σχέση με τον μάρτυρα και τις αρχικές συνθήκες με αύξηση του αριθμού των ατόμων, της κυριαρχίας συγκεκριμένων ειδών και ταυτόχρονα μείωση της ποικιλότητας και των τιμών των δεικτών οικολογικής κατάστασης (Εικόνα 5.2).

Κεφάλαιο 5: 5.Απόκριση της μακροπανίδας σε ευτροφικές συνθήκες σε ένα πείραμα μεσόκοσμων: η ελαστικότητα του οικοσυστήματος αποτρέπει την δημιουργία υποξίας



Εικόνα 5.2. Τιμές δεικτών ποικιλότητας και οικολογικής κατάστασης για τις αρχικές συνθήκες και κάθε επίπεδο προσθήκης (μηδενική – Control, χαμηλή – Low, υψηλή – High). Οι διακεκομμένες γραμμές στους δείκτες οικολογικής κατάστασης αντιπροσωπεύουν τα όρια των διαφορετικών καταστάσεων (Κακή, Φτωχή, Μέτρια, Καλή).

Κεφάλαιο 5: 5.Απόκριση της μακροπανίδας σε ευτροφικές συνθήκες σε ένα πείραμα μεσόκοσμων: η ελαστικότητα του οικοσυστήματος αποτρέπει την δημιουργία υποξίας

Σε ό,τι αφορά την οικολογική κατάσταση, η υψηλή προσθήκη ήταν η μόνη που παρουσίασε μεταβολή της ένδειξης με την κατάσταση να μεταβάλλεται από «Καλή» στις αρχικές συνθήκες, σε «Μέτρια» ή «Φτωχή».

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης SIMPER έδειξαν ότι πέντε είδη ήταν υπεύθυνα για το μεγαλύτερο ποσοστό των διαφορών μεταξύ των επιπέδων προσθήκης (Πίνακας 5.3).

Πίνακας 5.3 Αποτελέσματα ανάλυσης SIMPER μεταξύ των διαφορετικών επιπέδων προσθήκης στα δεδομένα μακροπανίδας.

Groups Harbor & Control		Average dissimilarity = 40,36			
Species	Av,Abund Harbor	Av,Abund Control	Contrib%	Cum, %	
Paradoneis lyra	65	111,67	40,55	40,55	
Chaetozone setosa	3	7	18,17	58,72	
Leiochone leiopygos	19,33	8,67	10,2	68,92	
Notomastus latericeus	10	0	8,4	77,31	
Groups Harbor & Low		Average dissimilarity = 46,31			
Species	Av,Abund Harbor	Av,Abund Low	Contrib%	Cum, %	
Paradoneis lyra	65	155,67	59,79	59,79	
Leiochone leiopygos	19,33	6,67	8,26	68,04	
Chaetozone setosa	3	12,67	6,66	74,7	
Notomastus latericeus	10	1	5,8	80,5	
Groups Harbor & High		Average dissimilarity = 62,82			
Species	Av,Abund Harbor	Av,Abund High	Contrib%	Cum, %	
Paradoneis lyra	65	349,5	83,32	83,32	
Leiochone leiopygos	19,33	12,5	4,29	87,61	
Notomastus latericeus	10	5,5	1,88	89,49	
Caulleriella sp.	0,33	6,5	1,79	91,28	
Groups Control & Low		Average dissimilarity = 22,83			
Species	Av,Abund Control	Av,Abund Low	Contrib%	Cum, %	
Paradoneis lyra	111,67	155,67	51,57	51,57	
Chaetozone setosa	24,33	12,67	19,49	71,06	
Haplotaxida sp.	10	13,33	6,87	77,93	
Monticellina dorsobranchialis	2,67	4,67	3,47	81,4	

Κεφάλαιο 5: 5.Απόκριση της μακροπανίδας σε ευτροφικές συνθήκες σε ένα πείραμα μεσόκοσμων: η ελαστικότητα του οικοσυστήματος αποτρέπει την δημιουργία υποξίας

Groups Control & High		Average dissimilarity = 52,75		
Species	Av,Abund Control	Av,Abund High	Contrib%	Cum, %
<i>Paradoneis lyra</i>	111,67	349,5	76,95	76,95
<i>Chaetozone setosa</i>	7	24,3	5,65	82,6
<i>Leiochone leiopygos</i>	8,67	12,5	3,05	85,66
<i>Monticellina dorsobranchialis</i>	2,67	9	2,07	87,73
Groups Low & High		Average dissimilarity = 41,19		
Species	Av,Abund Low	Av,Abund High	Contrib%	Cum, %
<i>Paradoneis lyra</i>	155,67	349,5	75,49	75,49
<i>Leiochone leiopygos</i>	6,67	12,5	3,66	79,15
<i>Chaetozone setosa</i>	12,67	7	3,19	82,34
<i>Caulleriella sp.</i>	0	6,5	2,51	84,85

Το είδος *Paradoneis lyra* (οικογένεια Paraonidae) φάνηκε να είναι υπεύθυνο για το μεγαλύτερο μέρος των διαφορών μεταξύ των επιπέδων προσθήκης μεταξύ τους και με τις αρχικές συνθήκες. Δύο ακόμη είδη από την οικογένεια Cirratulidae (*Leiochone leiopygos*, *Chaetozone setosa*), ένα στην οικογένεια Maldanidae (*Monticellina dorsobranchialis*) και ένα Capitellidae (*Notomastus latericeus*) συμπληρώνουν συνολικά ένα 80% των διαφορών ανάμεσα στις κοινότητες. Από τα είδη αυτά, το *Paradoneis Lyra* παρουσίασε την μεγαλύτερη αύξηση αφθονίας ξεκινώντας από τα 65 άτομα στην περιοχή του λιμανιού φτάνοντας τα 116 στον μάρτυρα, τα 156 στην χαμηλή προσθήκη και τα 350 στην υψηλή. Αντίθετα το είδος *Notomastus latericeus* ήταν το μόνο που μείωσε την αφθονία του σε σχέση με τις αρχικές συνθήκες, ξεκινώντας από 10 άτομα στο λιμάνι και καταλήγοντας σε μηδενική αφθονία στον μάρτυρα, ένα άτομο στην χαμηλή προσθήκη και 6 στην υψηλή.

Τα συγκεκριμένα είδη ταυτόχρονα με την αύξηση (ή μείωση στην περίπτωση του *Notomastus latericeus*) της αφθονίας τους αύξησαν και την βιομάζα τους ανά άτομο (Πίνακας 5.4).

Κεφάλαιο 5: 5.Απόκριση της μακροπανίδας σε ευτροφικές συνθήκες σε ένα πείραμα μεσόκοσμων: η ελαστικότητα του οικοσυστήματος αποτρέπει την δημιουργία υποξίας

Πίνακας 5.4. Ποσοστιαία μεταβολή της βιομάζας ανά άτομο από τις αρχικές συνθήκες, στο τέλος του πειράματος σε κάθε επίπεδο προσθήκης, για τα είδη που προκάλεσαν την μεγαλύτερη διαφοροποίηση μεταξύ των επιπέδων προσθήκης, όπως προέκυψαν από την ανάλυση SIMPER. Ποσοστό μικρότερο από 100% σημαίνει μείωση βάρους και μεγαλύτερο αύξηση.

	Control/Harbo	Low/Harbo	High/Harbo
	r	r	r
<i>Chaetozone setosa</i>	26,34%	33,38%	115,92%
<i>Leiochone leiopygos</i>	98,05%	109,77%	111,71%
<i>Monticellina</i>			
<i>dorsobranchialis</i>	83,64%	94,80%	114,59%
<i>Notomastus latericeus</i>	–	27,15%	128,43%
<i>Paradoneis lyra</i>	91,63%	162,06%	165,73%

Στην υψηλή προσθήκη όλα τα είδη αύξησαν το βάρος τους ανά άτομο, ενώ αντίθετα στον μάρτυρα παρουσίασαν μείωση. Στην χαμηλή προσθήκη τρία είδη παρουσίασαν μείωση και δύο αύξηση.

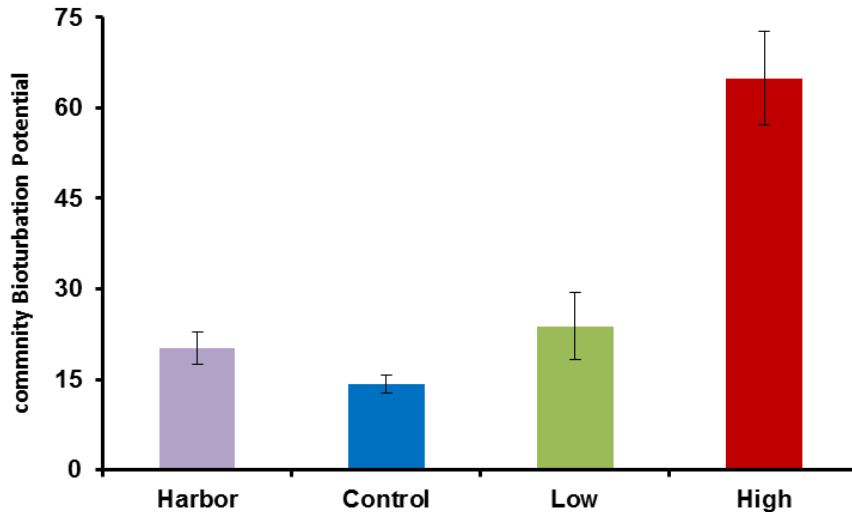
Τα αποτελέσματα της συλλογής των λειτουργικών χαρακτηριστικών των συγκεκριμένων ειδών (Πίνακας 5.5) έδειξαν ότι σε μεγάλο βαθμό τα είδη αυτά έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά.

Πίνακας 5.5. Λειτουργικά χαρακτηριστικά («Επίπεδο ανοχής στη διατάραξη», «Μέγεθος», «Τροφικός τύπος», «Ηλικία πρώτης αναπαραγωγής» και «Τροποποίηση ενδιαιτήματος») των ειδών που προκάλεσαν την μεγαλύτερη διαφοροποίηση μεταξύ των επιπέδων προσθήκης.

	Life strategy			Body size							Feeding Type						Age at First Reproduction						Ecosystem Engineering												
	ES50_0.05 value	BENTIX group	AMBI group	BS <2.5 mm	BS 2.5-10 mm	BS 11-20 mm	BS 21-50 mm	BS 51-80 mm	BS 81-100 mm	BS >100 mm	FT Omnivor	FT suspension feeder	FT scavenger	FT non-selective deposit feeder	FT herbivore	FT selective deposit feeder	FT deposit FTer	FT predator	AFR ≤ 2 months	AFR 2-6 months	AFR 1 year	AFR 2 years	AFR 3 years	AFR 4 years	AFR > 4 years	EE yes	EE no	EE biodiffusor	EE Upward Conveyor	EE regenerator	EE downward conveyour	EE blind-ended ventilation	EE habitat-building	EE open-ended ventilation	
<i>Chaetozone setosa</i>	6.87	2	4	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	+	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Leiochone leiopygos</i>	13.63	2	3	-	-	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-
<i>Monticellina dorsobranchialis</i>	13.49	2	4	-	-	+	+	-	-	-	-	-	+	-	-	+	-	-	-	-	+	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Notomastus latericeus</i>	14.97	2	3	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+	-	+	-	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-
<i>Paradoneis lyra</i>	12.63	2	3	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+	+	+	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Και τα πέντε είδη ανήκουν στα μεταβατικά ή ευκαιριακά είδη σύμφωνα και με τις τρεις μεθόδους κατηγοριοποίησης, έχουν μέσο μέγεθος 11 έως 50 mm και έχουν υψηλή ικανότητα βιοανάδευσης του ιζήματος. Η βασική τους διαφοροποίηση είναι ότι τα είδη *Paradoneis lyra* και *Notomastus latericeus* παρουσιάζουν πολύ γρήγορους κύκλους αναπαραγωγής (≤ 2 μήνες).

Τα αποτελέσματα του δείκτη community Bioturbation Potential (BP_c) (Εικόνα 5.3) έδειξαν ότι η βιοανάδευση στην υψηλή προσθήκη ήταν σημαντικά μεγαλύτερη από ότι στις υπόλοιπες, με την αύξηση αυτή να είναι στατιστικά σημαντική (one way ANOVA $F_{3,8}$: 100.080, $p < 0,01$, *post hoc*: High \neq υπολοίπων).



Εικόνα 5.3. Μέση τιμή του δείκτη community Bioturbation Potential (BP_c) της αρχικής βιοκοινότητας και της βιοκοινότητας κάθε επιπέδου προσθήκης.

5.5 Συζήτηση

Οι Rice et al. (2012) αναφέρουν ότι στο κείμενο της οδηγίας για την Θαλάσσια Στρατηγική (MSFD) και πιο συγκεκριμένα στο κεφάλαιο «Descriptor 6 - Sea-floor Integrity», ο ορισμός της «Καλής» Οικολογικής Κατάστασης (Good Environmental Status – GES) αναφέρεται ως «Η ακεραιότητα του πυθμένα είναι σε επίπεδο το οποίο διασφαλίζει ότι η δομή και οι λειτουργίες του οικοσυστήματος διαφυλάσσονται και, πιο συγκεκριμένα, τα βενθικά οικοσυστήματα δεν επηρεάζονται αρνητικά». Ο ευτροφισμός αποτελεί επίσης έναν από τους ολιστικούς descriptors της MSFD. Πέρα από τον ορισμό ορίων οικολογικής κατάστασης, που σχετίζονται με τον ευτροφισμό, όπως γίνεται στα πλαίσια της WFD, είναι σημαντικό να διερευνηθεί η σχέση «δόσης-απόκρισης» μεταξύ των δύο μερών του θαλάσσιου οικοσυστήματος στα πλαίσια του φαινομένου.

Κεφάλαιο 5: 5.Απόκριση της μακροπανίδας σε ευτροφικές συνθήκες σε ένα πείραμα μεσόκοσμων: η ελαστικότητα του οικοσυστήματος αποτρέπει την δημιουργία υποξίας

Στην παρούσα μελέτη, δημιουργήθηκε μία πολύ ισχυρή πίεση από την στήλη του νερού προς το ίζημα με την προσθήκη μίας πολύ μεγάλης ποσότητας θρεπτικών, την επακόλουθη άνθιση του φυτοπλαγκτού με την αντίστοιχη αύξηση του καθιζάνοντος οργανικού υλικού. Προκλήθηκε ένα επεισόδιο διατάραξης στο βενθικό σύστημα, το οποίο ανταποκρίθηκε στις νέες περιβαλλοντικές συνθήκες μεταβάλλοντας την δομή και τις λειτουργίες του προσπαθώντας να προσαρμοστεί στις νέες συνθήκες. Τα αποτελέσματα των πολυμεταβλητών αναλύσεων, δείχνουν ότι οι βενθικές κοινότητες της υψηλής προσθήκης διέφεραν σε σημαντικό βαθμό από αυτές του μάρτυρα και της χαμηλής προσθήκης. Αντίθετα, οι κοινότητες της χαμηλής προσθήκης και του μάρτυρα δεν φαίνεται να διαφέρουν μεταξύ τους. Η νέα δομή της κοινότητας στην υψηλή προσθήκη χαρακτηρίστηκε από χαμηλότερη ποικιλότητα, μεγαλύτερη κυριαρχία συγκεκριμένων ειδών, και χαμηλότερη οικολογική κατάσταση (μεταβολή από «Καλή» σε «Μέτρια» «Φτωχή» ή σε σχέση με τις υπόλοιπες).

Όταν το οργανικό υλικό αποτίθεται στην επιφάνεια του ιζήματος, η βενθική ενδοπανίδα συμβάλλει στην πολυδιάστατη κατανομή του μεταξύ των διαφορετικών στρωμάτων του ιζήματος, μέσω της τροφοληψίας, της δημιουργίας σωλήνων και την ανακύκλωσή του μέσω της πέψης και αφόδευσης. (Heilskov et al. 2006). Οι Solan et al. (2010) αναφέρουν ότι διαφορετικά βενθικά είδη επηρεάζουν με διαφορετικό τρόπο τις οικοσυστημικές λειτουργίες, καθώς δεν αλληλεπιδρούν όλα τα είδη με το περιβάλλον με τον ίδιο τρόπο. Αναφέρουν επίσης, ότι η τροφοληψία, η κίνηση και η κατασκευή σωλήνων επηρεάζει την κίνηση σωματιδίων. Από το σύνολο των ειδών που βρέθηκαν σε όλα τα δείγματα, η ανάλυση SIMPER προσδιόρισε 5 είδη πολυκαίτων, τα οποία ήταν υπεύθυνα για την μεγαλύτερη διαφοροποίηση μεταξύ των διαφορετικών δειγμάτων. Όπως φάνηκε από την ανάλυση και τα 5 είδη διαθέτουν παρόμοια χαρακτηριστικά, ως προς την στρατηγική ζωής, το μέγεθός τους, την κινητικότητα και την ικανότητά τους για βιοανάδευση. Πιο συγκεκριμένα, ήταν όλα είδη ευκαιριακά δεύτερης τάξης ή έστω ανθεκτικά

Κεφάλαιο 5: 5.Απόκριση της μακροπανίδας σε ευτροφικές συνθήκες σε ένα πείραμα μεσόκοσμων: η ελαστικότητα του οικοσυστήματος αποτρέπει την δημιουργία υποξίας

στην διατάραξη σύμφωνα με τους (Glémarec & Hily 1981), με μικρό ή μέσο μέγεθος και τροφοληψία μέ ιζηματοφαγία (deposit feeders), χαρακτηριστικό που σύμφωνα με τον (Weigel 1991) ευνοείται σε συνθήκες ευτροφισμού. Όμως, μόνο δύο από αυτά είχαν αρκετά μικρούς κύκλους ζωής έτσι ώστε να μπορέσουν να αναπαραχθούν στο χρονικό διάστημα του πειράματος (2 μήνες). Σε συνθήκες εγκλεισμού, (απουσία δυνατότητας μεταφοράς λαρβών από άλλες περιοχές) και σε συνδυασμό με την ήδη μεγαλύτερη αρχική αφθονία επέτρεψαν στο είδος *Paradoneis lyra*, να κυριαρχήσει στην κοινότητα εκτοπίζοντας τελείως από τον μάρτυρα και την χαμηλή προσθήκη το είδος *Notomastus latericeus* ενώ στην υψηλή προσθήκη η αυξημένη διαθεσιμότητα τροφής πιθανώς να επέτρεψε την επιβίωσή του. Έχει δειχθεί ότι η συμπερίληψη λειτουργικών χαρακτηριστικών σε μελέτες, βοηθάει στην καλύτερη κατανόηση των οικοσυστημικών λειτουργιών από ότι η απλή μελέτη της ποικιλότητας ή της βιομάζας (Griffin et al. 2009, Culhane et al. 2014).

Οι βενθικές κοινότητες των περιοχών με «Καλή οικολογική κατάσταση» (Good environmental status - GES) χαρακτηρίζονται από λίγα άφθονα είδη και πολλά σπάνια και οι ρόλοι που παίζουν τα διαφορετικά είδη, είναι περισσότερο συμπληρωματικοί παρά ανταγωνιστικοί. (Rice et al. 2012). Η αρχική βενθική κοινότητα που χρησιμοποιήθηκε στο συγκεκριμένο πείραμα, προέρχεται από μία περιοχή με περιορισμένη ανθρωπογενή επίδραση, η οποία από την μία πλευρά χαρακτηρίζεται από «Καλή» οικολογική κατάσταση σύμφωνα με τους δείκτες, ενώ από την άλλη πλευρά αντιμετωπίζει παροδικές πιέσεις από την στήλη του νερού καθώς το νερό γίνεται εποχιακά ευτροφικό. Οι εν λόγω βενθικές κοινότητες εμφανίζουν μεγάλη ικανότητα απορρόφησης πιέσεων καθώς η βιοποικιλότητα ρυθμίζει τις οικοσυστημικές λειτουργίες και δίνει την δυνατότητα απορρόφησης της διατάραξης μέσω συγκεκριμένων ειδών αλλάζοντας την δομή της (Rice et al. 2012). Στο πείραμα της παρούσας μελέτης, κάτω από την ισχυρή πίεση της υψηλής προσθήκης, (πολύ αυξημένη καθίζηση οργανικής ύλης στο ίζημα) η απόκριση συγκεκριμένων ειδών της βενθικής κοινότητας ήταν ταχύτατη, με άμεση εκμετάλλευση της αυξημένης

Κεφάλαιο 5: 5.Απόκριση της μακροπανίδας σε ευτροφικές συνθήκες σε ένα πείραμα μεσόκοσμων: η ελαστικότητα του οικοσυστήματος αποτρέπει την δημιουργία υποξίας

διαθεσιμότητας τροφής και την επακόλουθη αύξηση της μέσης βιομάζας τους ανά άτομο. Αντίθετα, στον μάρτυρα, όπου η διαθεσιμότητα της τροφής ήταν μικρότερη από ό,τι στις αρχικές συνθήκες του λιμανιού, παρουσιάστηκε μείωση της βιομάζας ανά άτομο και για τα 5 είδη.

Η αυξημένη καθίζηση οργανικού υλικού που παρατηρήθηκε στην υψηλή προσθήκη σε όλη την διάρκεια του πειράματος δεν προκάλεσε συνθήκες υποξίας στο ίζημα. Ακόμα και αν το νερό στο βενθικό οριακό στρώμα ήταν καλά οξυγονωμένο, η αποικοδόμησης τη οργανικής ύλης θα μπορούσε να επιφέρει μία αξιοσημείωτη μείωση του Eh με βάση τα αποτελέσματα άλλων μελετών σε ιχθυοτροφεία (Karakassis et al. 2000, Hyland et al. 2005) αλλά και σε ευτροφικές περιοχές της ανατολικής Μεσογείου (Dimitriou et al. 2015). Στην παρούσα μελέτη, το Eh μειώθηκε μόνο στο τέλος του πειράματος φτάνοντας για σύντομο χρονικό διάστημα σε τιμές οριακά υποξικές (ημέρα 51, τιμή Eh -5) οι οποίες σύντομα όμως βελτιώθηκαν. Όπως φάνηκε από την τιμή του δείκτη BP_c η βιοκοινότητα της υψηλής προσθήκης παρουσίασε μία πολύ μεγάλη ικανότητα βιοανάδευσης. Η ισχυρή βιοανάδευση οξυγόνωνε το ίζημα χρησιμοποιώντας το διαθέσιμο οξυγόνο στο βενθικό οριακό στρώμα, με αποτέλεσμα η τιμή του Eh να διατηρηθεί σε ανεκτά επίπεδα για την μακροπανίδα.

Η αύξηση της βιοανάδευσης χρησιμοποιήθηκε ως ένας μηχανισμός ανάδρασης στην περιβαλλοντική διατάραξη. Τα υγιή οικοσυστήματα είναι ανθεκτικά σε εξωτερικές πιέσεις και μπορούν να διατηρηθούν χωρίς να υπάρχει ανάγκη ανθρώπινης παρέμβασης (Tett et al. 2013). Περιλαμβάνουν οργανισμούς που αφενός παρουσιάζουν αυξημένη λειτουργική ποικιλότητα προσαρμοσμένη στις συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες και αφετέρου, μια ποικιλία αναδραστικών μηχανισμών σε εξωτερικές πιέσεις. Στην παρούσα μελέτη, παρόλη την πολύ ισχυρή πίεση που ασκήθηκε από την στήλη του νερού, η βενθική κοινότητα διέθετε την απαραίτητη ευρωσία (vigor), οριζόμενη ως «η ικανότητα του οικοσυστήματος να διατηρείται ή αναδιοργανώνεται» (Costanza et al. 1992), έτσι ώστε να προσαρμοστεί και να ευδοκιμήσει στις νέες συνθήκες, αμβλύνοντας παράλληλα τις παρατηρούμενες επιπτώσεις του ευτροφισμού στο

Κεφάλαιο 5: 5.Απόκριση της μακροπανίδας σε ευτροφικές συνθήκες σε ένα πείραμα μεσόκοσμων: η ελαστικότητα του οικοσυστήματος αποτρέπει την δημιουργία υποξίας

ίζημα. Σε ένα ισχυρό μεν αλλά μεμονωμένο επεισόδιο διατάραξης όπως αυτό, η κοινότητα μεταβλήθηκε μεν αλλά προσαρμόστηκε στις νέες συνθήκες.

6. Γενική συζήτηση

6.1 Σύγκριση μεθοδολογικών προσεγγίσεων

Στην παρούσα μελέτη, χρησιμοποιήθηκαν δύο ανεξάρτητες μεθοδολογικές προσεγγίσεις: μετα-ανάλυση μεγάλου αριθμού δεδομένων πεδίου και πειράματα μεσόκοσμων. Κάθε μία από τις δύο προσεγγίσεις είχε διαφορετικά χαρακτηριστικά (Πίνακας 6.1) και φώτισε διαφορετικές πλευρές των σχετικών οικολογικών διεργασιών.

Πίνακας 6.1 Συγκριτικά χαρακτηριστικά των δεδομένων πεδίου (Ενότητα 2) και των πειραμάτων μεσόκοσμων (Ενότητες 4-5)

	Δεδομένα πεδίου	Μεσόκοσμοι
Εμπλουτισμός θρεπτικών	Συνεχής	Εφάπαξ
Μέγιστη Συγκέντρωση PO₄ μΜ	2.28	10
Μέγιστη Συγκέντρωση NO₃ μΜ	7.95	60
Βάθος (m)	8 - 100	5
Ένταση φωτοσύνθεσης	Ποικίλη	Μεγάλη
Παρουσία ανώτερων τροφικών επιπέδων	ΝΑΙ	ΟΧΙ
Στρατολόγηση μακροπανίδας	ΝΑΙ	Μειωμένη
Άλλες πηγές διατάραξης	Μειωμένη	ΟΧΙ
Υδροδυναμισμός	ΝΑΙ	ΟΧΙ
Ποικιλομορφία ιζήματος	ΝΑΙ	ΟΧΙ
Χρονική εξέλιξη	ΟΧΙ	ΝΑΙ
Περιβαλλοντικές μεταβλητές	Περιορισμένες	Λεπτομερείς
Τύπος διατάραξης	Συνεχής - Μικρότερη ένταση	Σύντομη - Μέγιστη ένταση
Διαβάθμιση οικολογικής κατάστασης στήλης	Κακή - Καλή	Κακή - Υψηλή
Διαβάθμιση οικολογικής κατάστασης βένθους	Κακή - Καλή	Μέτρια - Καλή
Μέγιστη συγκέντρωση κλωροφύλλης (μg l⁻¹)	6.6	6.01
Σχέση κλωροφύλλης - οξυγόνου	Θετική	Θετική
Ελάχιστη τιμή οξειδοαναγωγικού δυναμικού	-161	-8

Η πιο σημαντική διαφορά των δύο προσεγγίσεων αφορούσε τον τύπο της διατάραξης που προκάλεσε ο ευτροφισμός στο βένθος. Στην περίπτωση της μετα-ανάλυσης, η διατάραξη στους ευτροφικούς σταθμούς ήταν συνεχής (με τις αναμενόμενες εποχιακές διακυμάνσεις) αλλά μικρότερης έντασης από ότι

στους μεσόκοσμους, όπου η προσθήκη μεγάλης ποσότητας θρεπτικών εφάπαξ προκάλεσε ένα πολύ έντονο αλλά παροδικό επεισόδιο. Μία άλλη ομάδα διαφορών δημιουργούν τα τεχνικά χαρακτηριστικά των μεσόκοσμων. Αρχικά, το βάθος ήταν πολύ μικρότερο από ότι στο πεδίο, με συνέπεια να υπάρχει πολύ έντονη φωτοσύνθεση σε όλο το ύψος της στήλης του νερού, ενώ απουσιάζαν τελείως ο υδροδυναμισμός, η ποικιλομορφία του ιζήματος, η θήρευση από ανώτερα τροφικά επίπεδα (πχ βενθικά ψάρια), ενώ η στρατολόγηση νέων ατόμων στο βένθος είναι περιορισμένη. Από την άλλη, η πειραματική μεταχείριση επέτρεψε την λεπτομερή παρακολούθηση της εξέλιξης περιβαλλοντικών μεταβλητών στον χρόνο και την δημιουργία μιας πλήρους σειράς δεδομένων.

6.2 Προσδιορισμός κρίσιμης τιμής έντασης ευτροφισμού

Παρά όλες τις τεχνικές διαφορές των δύο προσεγγίσεων παρατηρήθηκαν κάποια σημεία σύγκλισης. Το πιο σημαντικό σημείο αφορά την ομοιότητα στην μέγιστη τιμή της μετρηθείσας συγκέντρωσης κλωροφύλλης *a*, περίπου στα 6 $\mu\text{g l}^{-1}$. Η τιμή αυτή, αν και φαντάζει πολύ υψηλή για τα ολιγοτροφικά Μεσογειακά δεδομένα, απέχει πολύ από τις αντίστοιχες τιμές στην Βόρεια Θάλασσα, όπου τιμές από 4 ως 9 $\mu\text{g l}^{-1}$ είναι συνήθεις (McQuatters-Gollor et al. 2007). Επιπροσθέτως, ούτε στο πεδίο αλλά και ούτε και σε πειραματικές συνθήκες κατέστη δυνατό να μετρηθεί μία συγκέντρωση κλωροφύλλης *a* κοντά στα 10 $\mu\text{g l}^{-1}$, τιμή που έχει αναφερθεί ότι μπορεί να προκαλέσει συνθήκες υποξίας στο βένθος (CSTT 1997). Άμεσο αποτέλεσμα της παραπάνω κατάστασης ήταν η απουσία συνθηκών υποξίας στο βενθικό οριακό στρώμα. Στο πείραμα των μεσόκοσμων η συγκέντρωση του διαλελυμένου Οξυγόνου αυξήθηκε πάρα πολύ, εν μέρει λόγω της έντονης φωτοσύνθεσης λόγω του μικρού βάθους και του έντονου φωτισμού. Όμως, η θετική σχέση κλωροφύλλης *a* και οξυγόνου παρατηρήθηκε και στη μετα-ανάλυση. Συνεπώς η δημιουργία συνθηκών υποξίας λόγω του ευτροφισμού στην περιοχή της ανατολικής Μεσογείου φαίνεται να είναι σχετικά σπάνια, και όπου έχει παρατηρηθεί παίζουν καθοριστικό ρόλο οι περιβαλλοντικές συνθήκες της περιοχής αλλά και το είδος των εισροών όπως γίνεται στην περιοχή του Αμβρακικού κόλπου (ημίκλειστος

κόλπος με πολλές εισροές γλυκών νερών) και του δυτικού Σαρωνικού κόλπου (Pavlidou et al. 2015).

Ένα άλλο σημείο σύγκλισης μεταξύ των δύο διαφορετικών προσεγγίσεων είναι το όριο της έντασης του ευτροφισμού πέρα από το οποίο παρατηρούνται έντονες επιπτώσεις στο βένθος. Από τα αποτελέσματα της μετα-ανάλυσης των δεδομένων πεδίου της ενότητας 2, συμπεραίνεται ότι το όριο που διαχωρίζει την «Φτωχή» από την «Μέτρια» οικολογική κατάσταση στην στήλη του νερού (τιμή δείκτη E.I. 0,85) μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μία αποδεκτή κρίσιμη τιμή, πέρα από την οποία η πίεση που ασκεί ο ευτροφισμός έχει αρνητικές επιπτώσεις στο βένθος με μεταβολή προς το χειρότερο της οικολογικής κατάστασης (Dimitriou et al. 2015). Το συμπέρασμα αυτό συνάδει και με τα αποτελέσματα των Simboura et al. (2015) που, στα πλαίσια της εφαρμογής των WFD και MSFD, μελέτησαν την οικολογική κατάσταση και της στήλης και του βένθους και βρήκαν ότι στους σταθμούς με E.I. > 0,85 η οικολογική κατάσταση του βένθους, σύμφωνα με τον δείκτη BENTIX, είναι «Φτωχή» ή «Μέτρια». Αντίστοιχα, τα αποτελέσματα του πειράματος των μεσόκοσμων (Ενότητες 4 και 5) έδειξαν ότι οι μεταβλητές του βένθους επηρεάστηκαν περισσότερο στην υψηλή, προσθήκη. Οι βιογεωχημικές μεταβλητές του ιζήματος φάνηκαν να επηρεάζονται και από τις δύο προσθήκες, αλλά στην υψηλή το σύστημα παρουσίασε μεγαλύτερες διακυμάνσεις και μία ακανόνιστη διαδοχή. Οι επιπτώσεις όμως του ευτροφισμού είναι πιο ευδιάκριτες στην δομή της μακροπανίδας όπου η υψηλή προσθήκη ήταν η μόνη που παρουσίασε στατιστικά σημαντικές διαφορές τόσο από τις αρχικές συνθήκες, όσο και από την μηδενική και χαμηλή προσθήκη. Πιο συγκεκριμένα, στην υψηλή προσθήκη αυξήθηκε η κυριαρχία μεταβατικών ειδών και ευκαιριακών ειδών β' τάξης, με παράλληλη μεταβολή της οικολογικής κατάστασης σε «Μέτρια». Κάτι τέτοιο δεν παρατηρήθηκε στην χαμηλή προσθήκη και φυσικά ούτε και στον μάρτυρα.

Τα προγράμματα περιβαλλοντικής παρακολούθησης μεγάλης κλίμακας (όπως εκείνα για την υλοποίηση της WFD) ή και μικρής κλίμακας βασίζονται σε μία τελική τιμή-ένδειξη, η οποία αντιστοιχεί σε μία συγκεκριμένη κατάσταση του οικοσυστήματος και η οποία συνδέεται με την ανάγκη ή όχι λήψης μέτρων για την βελτίωση των συνθηκών. Οι τιμές αυτές, όπως επισημαίνουν οι Borja et al.

(2012), διαφέρουν πολύ μεταξύ των κρατών – μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης και είναι απαραίτητο να προσδιορίζονται για κάθε περιοχή με την χρήση κατάλληλης μεθοδολογίας. Ο δείκτης E.I. είναι βαθμονομημένος για χρήση στην περιοχή της ανατολικής Μεσογείου και έχει κριθεί αποτελεσματικός στον χαρακτηρισμό της οικολογικής κατάστασης της στήλης του νερού (αν και το όριο μεταξύ «Καλής» και «Υψηλής» οικολογικής κατάστασης χρειάζεται να επαναπροσδιοριστεί σύμφωνα με τους Pavlidou et al. (2015)).

Συνεπώς το όριο E.I. 0,85 (για την περίπτωση του ολιγοτροφικού συστήματος της ανατολικής Μεσογείου) επιβεβαιώνεται και από πειραματικά δεδομένα, ως μία αποδεκτή κρίσιμη τιμή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα πλαίσια προγραμμάτων παρακολούθησης ως μία ένδειξη περιοχών υψηλού κινδύνου (high risk area). Η συλλογή και ανάλυση δειγμάτων νερού είναι πολύ πιο γρήγορη και οικονομική από την αντίστοιχη δειγμάτων βένθους και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό περιοχών, στις οποίες πιο έντονη δειγματοληπτική προσπάθεια στο βένθος είναι απαραίτητη για τον προσδιορισμό της οικολογικής κατάστασης. Η μελέτη όλων των μερών του οικοσυστήματος και η εφαρμογή της «ολιστικής» διαχείρισης προωθείται από την επιστημονική κοινότητα (Borja et al. 2010) αλλά ταυτόχρονα απαιτεί πολύ μεγαλύτερους πόρους σε χρήμα, χρόνο και επιστημονικό δυναμικό.

6.3 Διαφοροποίηση φυσικής / συνεχούς και τεχνητής / έντονης και σύντομης διατάραξης

Στο πεδίο, η συνεχής καθίζηση οργανικού υλικού λόγω του ευτροφισμού, ασκεί μία συνεχόμενη αλλά σταθερή πίεση στο βένθος με τις αναμενόμενες εποχιακές διακυμάνσεις. Η συνεχόμενη πίεση φάνηκε να επηρεάζει τη δομή των βενθικών κοινοτήτων, δεδομένου ότι συσχετίζεται με την επικράτηση ευκαιριακών ειδών και κακή οικολογική κατάσταση. Αντίστοιχα, εκτός από την οικολογική κατάσταση του βένθους φάνηκε να επηρεάζεται και το οξειδοαναγωγικό δυναμικό, με τις τιμές στους ευτροφικούς σταθμούς (τιμή E.I. > 0,85) να ξεκινούν από -25 mV και να φτάνουν μέχρι τα -156 mV με μέση τιμή τα -75 mV.

Αντίθετα, στο πείραμα των μεσόκοσμων, η μορφή της διατάραξης που προκλήθηκε ήταν σύντομη, (λόγω της εφάπαξ προσθήκης θρεπτικών), και πολύ

έντονη, (πολύ υψηλή προσθήκη με συνέπεια πολύ έντονο ευτροφισμό). Η περιοχή, από την οποία συλλέχτηκε το ίζημα που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια του πειράματος, μπορεί να χαρακτηριστεί ως ελαφρώς διαταραγμένη, όπου περιοδικά οι συνθήκες στην στήλη του νερού γίνονται ευτροφικές. Η οικολογική κατάσταση του βένθους όμως χαρακτηρίστηκε από πολυάριθμους βενθικούς δείκτες ως «Καλή», ενώ παράλληλα, ο χαρακτηρισμός δε φάνηκε να παρουσιάζει εποχιακή διακύμανση (Dimitriou et al. in preparation). Όπως προαναφέρθηκε στις ενότητες 2.5 και 5.5, οι κοινότητες που χαρακτηρίζονται από «Καλή» οικολογική κατάσταση, χαρακτηρίζονται από λίγα άφθονα είδη και πολλά σπάνια με μεγάλη ικανότητα απορρόφησης πιέσεων καθώς η βιοποικιλότητα δίνει την δυνατότητα απορρόφησης της διατάραξης μέσω συγκεκριμένων ειδών αλλάζοντας την δομή της (Rice et al. 2012). Στη συγκεκριμένη κοινότητα, η βιοανάδευση φαίνεται να δρα ως μηχανισμός ανάδρασης, με την οξυγόνωση του ιζήματος που επιφέρει, να αποτρέπει την πτώση του οξειδοαναγωγικού δυναμικού κάτω από τα -5 mV, και σίγουρα μακριά από την μέση τιμή των -75 mV του πεδίου. Ενδεχομένως, αν και αυτό δεν μπορεί να υποστηριχθεί πλήρως από τα δεδομένα της παρούσας μελέτης αλλά από το μοντέλο των Pearson and Rosenberg (1978) και τα αποτελέσματα της μελέτης των Hyland et al. (2005), η παράταση της πίεσης για μεγάλο χρονικό διάστημα θα οδηγούσε τελικώς στην κατάρρευση της βενθικής κοινότητας και την μεταβολή των περιβαλλοντικών συνθηκών.

6.4 Ολιγοτροφοποίηση του συστήματος και βελτίωση οικολογικής κατάστασης

Η εφαρμογή διαχειριστικών μέτρων, όπως ο βιολογικός καθαρισμός αστικών λυμάτων, φαίνεται ότι επηρεάζει θετικά την οικολογική κατάσταση τόσο της στήλης του νερού όσο και του βένθους. Στα δεδομένα της μετα-ανάλυσης συμπεριλαμβάνονται σταθμοί στον Θερμαϊκό κόλπο, στους οποίους έχουν γίνει δειγματοληψίες πριν την χρήση βιολογικού καθαρισμού (1996) και μετά (2002). Σε αυτούς τους σταθμούς, τόσο οι τιμές των περιβαλλοντικών μεταβλητών, αλλά και η δομή και οικολογική κατάσταση της μακροπανίδας βελτιώθηκαν αισθητά σε αυτό το χρονικό διάστημα. Πιο συγκεκριμένα, η μέση τιμή του δείκτη E.I. σε αυτούς τους σταθμούς ήταν 1,88 και η μέση τιμή χλωροφύλλης 1,2 $\mu\text{g l}^{-1}$ («Κακή

Κεφάλαιο 6: Γενική συζήτηση

και «Φτωχή» οικολογική κατάσταση), ενώ οι αντίστοιχες τιμές το 2002 ήταν Ε.Ι. 0,56 και κλωροφύλλη a 0,6 $\mu\text{g l}^{-1}$ («Μέτρια» και «Καλή» οικολογική κατάσταση). Αντίστοιχα στο ίζημα, η οικολογική κατάσταση βελτιώθηκε με τον χαρακτηρισμό να είναι «Φτωχή» ή «Μέτρια» οικολογική κατάσταση το 1996 και να γίνεται καλή ή και «Υψηλή» το 2002. Παρόμοια συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν και από την χαμηλή προσθήκη στο πείραμα μεσόκοσμων όπου, ενώ οι συνθήκες ευτροφισμού ήταν αρχικά παρόμοιες με τον Θερμαϊκό το 1996, το σύστημα στο τέλος του πειράματος παρουσίασε σημάδια ανάκαμψης όταν μειώθηκε η ένταση του ευτροφισμού στην στήλη.

Η μη δημιουργία συνθηκών υποξίας στο βένθος βοηθάει στην ταχύτερη επαναφορά του συστήματος και στην επιτυχή βελτίωση των οικολογικών συνθηκών, σε περιπτώσεις ολιγοτροφοποίησης του συστήματος. Στην διεθνή βιβλιογραφία, οι επιπτώσεις του ευτροφισμού συνδέονται συνήθως με την δημιουργία υποξικών ή και ανοξικών συνθηκών στο ίζημα (Diaz & Rosenberg 2008, Duarte 2009), οι οποίες καθιστούν την επαναφορά του συστήματος, στην προ υποξίας κατάσταση, πάρα πολύ δύσκολη (Duarte et al. 2009) και προκαλούν την αποτυχία διαχειριστικών προγραμμάτων. Τα δεδομένα της παρούσας μελέτης δεν επαρκούν για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων για τις δυνατότητες επαναφοράς των ακραία επιβαρυσμένων οικοσυστημάτων, παρ' όλα αυτά η δυσκολία στην δημιουργία υποξικών συνθηκών λόγω του ευτροφισμού στην περιοχή της ανατολικής Μεσογείου, αποτελεί ένα ενθαρρυντικό στοιχείο για την επιτυχία διαχειριστικών προγραμμάτων και την επίτευξη «Καλής» οικολογικής κατάστασης.

7. Βιβλιογραφία

- Andersson A, Samuelsson K, Haecky P, Albertsson J (2006) Changes in the pelagic microbial food web due to artificial eutrophication. *Aquatic Ecology* 40:299-313
- Arvanitidis C, Chatzigeorgiou G, Koutsoubas D, Kevrekidis T, Dounas C, Eleftheriou A, Koulouri P, Mogias A (2005a) Estimating lagoonal biodiversity in Greece: comparison of rapid assessment techniques. *Helgoland Marine Research* 59:177-186
- Arvanitidis C, Hatzigeorgiou G, Koutsoubas D, Dounas C, Eleftheriou A, Koulouri P (2005b) Mediterranean lagoons revisited: weakness and efficiency of the rapid biodiversity assessment technique in severely fluctuating environment. *Biodiversity and Conservation* 14:2347-2359
- Arvanitidis C, Valavanis VD, Eleftheriou A, Costello MJ, Faulwetter S, Gotsis P, Kitsos MS, Kirmtzoglou I, Zenetos A, Petrov A, Galil B, Papageorgiou N (2006) MedOBIS: Biogeographic information system for the eastern Mediterranean and Black Sea. *Marine Ecology Progress Series* 316:225-230
- Bayley S, Stotts VD, Springer PF, Steenis J (1978) Changes in submerged aquatic macrophyte populations at the head of Chesapeake Bay, 1958–1975. *Estuaries* 1:171-182
- Birk S, Bonne W, Borja A, Brucet S, Courrat A, Poikane S, Solimini A, Van De Bund W, Zampoukas N, Hering D (2012) Three hundred ways to assess Europe's surface waters: An almost complete overview of biological methods to implement the Water Framework Directive. *Ecological Indicators* 18:31-41
- Bloesch J (1988) Mesocosm studies. *Hydrobiologia* 159:221-222
- Borja A, Dauer DM, Grémare A (2012) The importance of setting targets and reference conditions in assessing marine ecosystem quality. *Ecological Indicators* 12:1-7
- Borja Á, Elliott M, Carstensen J, Heiskanen A-S, van de Bund W (2010) Marine management—towards an integrated implementation of the European Marine Strategy Framework and the Water Framework Directives. *Marine Pollution Bulletin* 60:2175-2186
- Borja A, Franco J, Perez V (2000) A marine biotic index to establish the ecological quality of soft-bottom benthos within european estuarine and coastal environments. *Marine Pollution Bulletin* 40:1100-1114
- Boynton WR, Hagy JD, Breitburg DL (2001) *Issues of scale in land-margin ecosystems*. Columbia University Press, New York
- Brady DC, Testa JM, Di Toro DM, Boynton WR, Kemp WM (2013) Sediment flux modeling: Calibration and application for coastal systems. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 117:107-124
- Brock WA, Carpenter SR (2012) Early Warnings of Regime Shift When the Ecosystem Structure Is Unknown. *PLoS ONE* 7:e45586

Κεφάλαιο 7: Βιβλιογραφία

- Brown JR, Gowen RJ, McLusky DS (1987) The effect of salmon farming on the benthos of a Scottish sea loch. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 109:39-51
- Bruschetti M, Luppi T, Fanjul E, Rosenthal A, Iribarne O (2008) Grazing effect of the invasive reef-forming polychaete *Ficopomatus enigmaticus* (Fauvel) on phytoplankton biomass in a SW Atlantic coastal lagoon. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 354:212-219
- Buchanan JB (1984) Sediment analysis. In : NA Holmer & AD McIntyre (Eds) *Methods for the study of marine benthos* Blackwell Scienc Oxford 41-65
- Calbet A, Martínez RA, Isari S, Zervoudaki S, Nejstgaard JC, Pitta P, Sazhin AF, Sousoni D, Gomes A, Berger SA, Tsagaraki TM, Ptacnik R (2012) Effects of light availability on mixotrophy and microzooplankton grazing in an oligotrophic plankton food web: Evidences from a mesocosm study in Eastern Mediterranean waters. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 424–425:66-77
- Carlson RE (1977) A trophic state index for lakes¹. *Limnology and oceanography* 22:361-369
- Castro P, Huber ME (1992) *Marine Biology*. Mosby-Year Book, Saint Louis, Missouri
- Chalkia D, Pitta P (2003) Temporal variation and dynamics of pelagic variables in two contrasting coastal ecosystems. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 83:23-25
- Clarke KR, Gorley RN, Somerfield PJ, Warwick RM (2014) *Change in marine communities: an approach to statistical analysis and interpretation*. Plymouth, Plymouth
- Costanza R, Norton BG, Haskell BD (1992) *Towards an operational definition of health*. Island Press, Washington D.C.
- Cowie G (2005) The biogeochemistry of Arabian Sea surficial sediments: A review of recent studies. *Progress in Oceanography* 65:260-289
- CSTT (1997) *Comprehensive Studies for the Purposes of Article 6 of Directive 91/271 EEC). The Urban Waste Water Treatment Directive*. Edinburgh: Scottish Environment Protection Agency (East Region)
- Culhane FE, Briers RA, Tett P, Fernandes TF (2014) Structural and functional indices show similar performance in marine ecosystem quality assessment. *Ecological Indicators* 43:271-280
- Dauvin JC, Ruellet T (2007) Polychaete/amphipod ratio revisited. *Marine Pollution Bulletin* 55:215-224
- de Juan S, Thrush S, Demestre M (2007) Functional changes as indicators of trawling disturbance on a benthic community located in a fishing ground (NW Mediterranean Sea). *Marine Ecology Progress Series* 334:117-129
- Diaz RJ (2001) Overview of hypoxia around the world. *Journal of Environmental Quality* 30:275-281
- Diaz RJ, Rosenberg R (2008) Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *science* 321:926-929

Κεφάλαιο 7: Βιβλιογραφία

- Díaz RJ, Rosenberg R, Rabalais NN, Levin LA (2009) Dead zone dilemma. *Marine pollution bulletin* 58:1767-1768
- Dimitriou PD, Apostolaki ET, Papageorgiou N, Reizopoulou S, Simboura N, Arvanitidis C, Karakassis I (2012) Meta-analysis of a large data set with Water Framework Directive indicators and calibration of a Benthic Quality Index at the family level. *Ecological Indicators* 20:101-107
- Dimitriou PD, Papageorgiou N, Arvanitidis C, Assimakopoulou G, Pagou K, Papadopoulou KN, Pavlidou A, Pitta P, Reizopoulou S, Simboura N, Karakassis I (2015) One Step forward: Benthic Pelagic Coupling and Indicators for Environmental Status. *PLoS ONE* 10:e0141071
- Duarte CM (2009) Coastal eutrophication research: A new awareness. *Hydrobiologia* 629:263-269
- Duarte CM, Conley DJ, Carstensen J, Sánchez-Camacho M (2009) Return to Neverland: Shifting baselines affect eutrophication restoration targets. *Estuaries and Coasts* 32:29-36
- Ernst SR, Morvan J, Geslin E, Le Bihan A, Jorissen FJ (2006) Benthic foraminiferal response to experimentally induced Erika oil pollution. *Marine Micropaleontology* 61:76-93
- European-Commission (2013) COMMISSION DECISION of 20 September 2013 establishing, pursuant to Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council, the values of the Member State monitoring system classifications as a result of the intercalibration exercise and repealing Decision 2008/915/EC. *Official Journal of the European Union*, L 266(8102013)
- Faulwetter S, Gotsis P, Reizopoulou S, Orfanidis S, Kevrekidis T, Nicolaidou A, Simboura N, Malea P, Dounas C, Mogias A, Valavanis V, Arvanitidis C (2008) EInet: The Greek biodiversity transitional waters information system. An exemplar for the development of distributed information networks in Europe. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 18:S135-S142
- Faulwetter S, Markantonatou V, Pavludi C, Papageorgiou N, Keklikoglou K, Chatzinikolaou E, Pafilis E, Chatzigeorgiou G, Vasileiadou K, Dailianis T, Fanini L, Koulouri P, Arvanitidis C (2014) Polytraits: A database on biological traits of marine polychaetes. *Biodiversity data journal*:e1024
- Ferreira JG, Andersen JH, Borja A, Bricker SB, Camp J, Cardoso da Silva M, Garcés E, Heiskanen AS, Humborg C, Ignatiades L, Lancelot C, Menesguen A, Tett P, Hoepffner N, Claussen U (2011) Overview of eutrophication indicators to assess environmental status within the European Marine Strategy Framework Directive. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 93:117-131
- Franco BC, Palma ED, Tonini MH (2015) Benthic-pelagic uncoupling between the Northern Patagonian Frontal System and Patagonian scallop beds. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 153:145-155
- Fulweiler RW, Nixon SW, Buckley BA (2010) Spatial and Temporal Variability of Benthic Oxygen Demand and Nutrient Regeneration in an

Κεφάλαιο 7: Βιβλιογραφία

- Anthropogenically Impacted New England Estuary. *Estuaries and Coasts* 33:1377-1390
- Gee J, Warwick R (1994) Metazoan community structure in relation to the fractal dimensions of marine macroalgae. *Marine Ecology Progress Series* 103:141-150
- Giovanardi F, Tromellini E (1992) Statistical assessment of trophic conditions. Application of the OECD methodology to the marine environment. *Science of the Total Environment*:211-233
- Glémarec M, Hily C (1981) Perturbations apportées à la macrofaune benthique de la baie de Concarneau par les effluents urbains et portuaires. *Acta Oecologica Oecologia Applicata* 2:139-150
- Graf G (1992) Benthic-pelagic coupling: a benthic view. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review* 30:149-190
- Grall J, Chauvaud L (2002) Marine eutrophication and benthos: the need for new approaches and concepts. *Global Change Biology* 8:813-830
- Grangeré K, Lefebvre S, Blin JL (2012) Spatial and temporal dynamics of biotic and abiotic features of temperate coastal ecosystems as revealed by a combination of ecological indicators. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 108:109-118
- Grasshoff K, Kremling K, Erhardt M (1999) *Methods of Seawater Analysis*. Wiley-VCH, Weinheim; New York; Chichester; Brisbane; Singapore; Toronto
- Gray J (1981) *The sediment and related environmental factors*. Cambridge University Press, Cambridge
- Griffin JN, Méndez V, Johnson AF, Jenkins SR, Foggo A (2009) Functional diversity predicts overyielding effect of species combination on primary productivity. *Oikos* 118:37-44
- Haas A, Al-Zibdah M, Wild C (2009) Effect of inorganic and organic nutrient addition on coral-algae assemblages from the Northern Red Sea. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 380:99-105
- Hargrave BT (1973) Coupling carbon flow through some pelagic and benthic communities. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada* 30:1317-1326
- Hedges JL, Stern JH (1984) Carbon and nitrogen determinations of carbonate-containing solids. *Limnology and Oceanography* 29:657-663
- Heilskov AC, Alperin M, Holmer M (2006) Benthic fauna bio-irrigation effects on nutrient regeneration in fish farm sediments. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 339:204-225
- Heip CH, Goosen N, Herman P, Kromkamp J, Middelburg J, Soetaert K (1995) Production and consumption of biological particles in temperate tidal estuaries. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*:1-149
- Hooper D, Solan M, Symstad A, Diaz S, Gessner M, Buchmann N, Degrange V, Grime P, Hulot F, Mermillod-Blondin F (2002) Species diversity, functional diversity and ecosystem functioning. *Biodiversity and Ecosystem Functioning: Syntheses and Perspectives* 17:195-208

Κεφάλαιο 7: Βιβλιογραφία

- Hyland J, Balthis L, Karakassis I, Magni P, Petrov A, Shine J, Vestergaard O, Warwick R (2005) Organic carbon content of sediments as an indicator of stress in the marine benthos. *Marine Ecology Progress Series* 295:91-103
- Ignatiades L, Karydis M, Vounatsou P (1992) A possible method for evaluating oligotrophy and eutrophication based on nutrient concentration scales. *Marine Pollution Bulletin* 24:238-243
- Jorgensen B, Richardson K (1996) Eutrophication in coastal marine ecosystems. *American Geophysical Union*
- Kaiser MJ, Clarke KR, Hinz H, Austen MC, Somerfield PJ, Karakassis I (2006) Global analysis of response and recovery of benthic biota to fishing. *Marine Ecology Progress Series* 311:1-14
- Karakassis I, Eleftheriou A (1997) The continental shelf of Crete: structure of macrobenthic communities. *Marine Ecology Progress Series* 160:185-196
- Karakassis I, Hatziyanni E (2000) Benthic disturbance due to fish farming analyzed under different levels of taxonomic resolution. *Marine Ecology Progress Series* 203:247-253
- Karakassis I, Hatziyanni E, Tsapakis M, Plaiti W (1999) Benthic recovery following cessation of fish farming: a series of successes and catastrophes. *Marine Ecology Progress Series* 184:205-218
- Karakassis I, Pitta P, Krom MD (2005) Contribution of fish farming to the nutrient loading of the Mediterranean. *Scientia Marina* 69:313-321
- Karakassis I, Tsapakis M, Hatziyanni E, Papadopoulou KN, Plaiti W (2000) Impact of cage farming of fish on the seabed in three Mediterranean coastal areas. *ICES Journal of Marine Science* 57:1462-1471
- Karle IM, Agrenius S, Molander S, Magnusson K, Blanck H, Dahl B, Hall P, Dahllöf I (2007) Verification of a benthic boxcosm system with potential for extrapolating experimental results to the field. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 353:265-278
- Karydis M (1999) Evaluation report on the eutrophication level in coastal Greek areas. Mytilini: University of the Aegean. Greek
- Karydis M, Ignatiades L, Moschopoulou N (1983) An index associated with nutrient eutrophication in the marine environment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 16:339-344
- Kitsiou D, Karydis M (2011) Coastal marine eutrophication assessment: A review on data analysis. *Environment International* 37:778-801
- Kraufvelin P, Moy FE, Christie H, Bokn TL (2006) Nutrient addition to experimental rocky shore communities revisited: Delayed responses, rapid recovery. *Ecosystems* 9:1076-1093
- Le Guitton M, Soetaert K, Damsté JSS, Middelburg JJ (2015) Biogeochemical consequences of vertical and lateral transport of particulate organic matter in the southern North Sea: A multiproxy approach. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 165:117-127
- Legendre L, Rassoulzadegan F (1995) Plankton and nutrient dynamics in marine waters. *Ophelia* 41:153-172
- Leonardsson K, Blomqvist M, Rosenberg R (2009) Theoretical and practical aspects on benthic quality assessment according to the EU-Water

Κεφάλαιο 7: Βιβλιογραφία

- Framework Directive - Examples from Swedish waters. *Marine Pollution Bulletin* 58:1286-1296
- Leps J, Smilauer P (2003) *Multivariate Analysis of Ecological Data using CANOCO*, Vol 86. Cambridge University Press, Cambridge
- Loh PS, Miller AEJ, Reeves AD, Harvey SM, Overnell J (2008) Assessing the biodegradability of terrestrially-derived organic matter in Scottish sea loch sediments. *Hydrology and Earth System Sciences* 12:811-823
- Lopes C, Mix A, Abrantes F (2010) Environmental controls of diatom species in northeast Pacific sediments. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 297:188-200
- Loreau M, Naeem S, Inchausti P (2002) *Biodiversity and Ecosystem Functioning. Synthesis and Perspectives*. Oxford University Press, Oxford
- Lucas CH, Widdows J, Brinsley MD, Salkeld PN, Herman PMJ (2000) Benthic-pelagic exchange of microalgae at a tidal flat. 1. Pigment analysis. *Marine Ecology Progress Series* 196:59-73
- Müller PJ, Suess E (1979) Productivity, sedimentation rate, and sedimentary organic matter in the oceans-I. Organic carbon preservation. *Deep Sea Research Part A, Oceanographic Research Papers* 26:1347-1362
- Maxwell SE, Delaney HD (2004) *Designing Experiments and Analyzing Data: A Model Comparison Perspective*. Lawrence Erlbaum Associates
- McAllister C, Parsons T, Stephens K, Strickland J (1961) MEASUREMENTS OF PRIMARY PRODUCTION IN COASTAL SEA WATER USING A LARGE-VOLUME PLASTIC SPHERE. *Limnology and Oceanography* 6:237-258
- McQuatters-Gollop A, Raitsos DE, Edwards M, Pradhan Y, Mee LD, Lavender SJ, Attrill MJ (2007) A long-term chlorophyll dataset reveals regime shift in North Sea phytoplankton biomass unconnected to nutrient levels. *Limnology and Oceanography* 52:635-648
- Mostajir B, Le Floc'h E, Mas S, Pete R, Parin D, Nouguié J, Fouilland E, Vidussi F (2013) A new transportable floating mesocosm platform with autonomous sensors for real-time data acquisition and transmission for studying the pelagic food web functioning. *Limnology and Oceanography: Methods* 11:394-409
- Muxika I, Borja Á, Bald J (2007) Using historical data, expert judgement and multivariate analysis in assessing reference conditions and benthic ecological status, according to the European Water Framework Directive. *Marine Pollution Bulletin* 55:16-29
- Nejstgaard J, Frischer M, Verity P, Anderson J, Jacobsen A, Zirbel M, Larsen A, Martínez-Martínez J, Sazhin A, Walters T (2006) Plankton development and trophic transfer in seawater enclosures with nutrients and *Phaeocystis pouchetii* added. *MARINE ECOLOGY-PROGRESS SERIES*- 321:99
- Nixon SW (1995) Coastal marine eutrophication: a definition, social causes, and future concerns. *Ophelia* 41:199-219
- Norling K, Rosenberg R, Hulth S, Grémare A, Bonsdorff E (2007) Importance of functional biodiversity and species-specific traits of benthic fauna for ecosystem functions in marine sediment. *Marine Ecology Progress Series* 332:11-23

Κεφάλαιο 7: Βιβλιογραφία

- Occhipinti A, Forni AG, Silvestri C, Argyrou M, Jordana E, Mavrič B, Pinedo S, Simboura N, Gorazd Urbanic G (2009) The Mediterranean intercalibration exercise on off-bottom benthic invertebrates with special emphasis on the Italian situation. *Marine Ecology* 30:495-504
- Oviatt CA, Keller AA, Sampou PA, Beatty LL (1986) Patterns of productivity during eutrophication: a mesocosm experiment. *Marine Ecology Progress Series* 28:69-80
- Papageorgiou N, Kalantzi I, Karakassis I (2010) Effects of fish farming on the biological and geochemical properties of muddy and sandy sediments in the Mediterranean Sea. *Marine Environmental Research* 69:326-336
- Papageorgiou N, Sigala K, Karakassis I (2009) Changes of macrofaunal functional composition at sedimentary habitats in the vicinity of fish farms. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 83:561-568
- Parsons T, Harrison P, Waters R (1978) An experimental simulation of changes in diatom and flagellate blooms. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 32:285-294
- Pavlidou A, Simboura N, Rousselaki E, Tsapakis M, Pagou K, Drakopoulou P, Assimakopoulou G, Kontoyiannis H, Panayotidis P (2015) Methods of eutrophication assessment in the context of the water framework directive: Examples from the Eastern Mediterranean coastal areas. *Continental Shelf Research* 108:156-168
- Pearson TH, Rosenberg R (1978) Macrobenthic succession in relation to organic enrichment and pollution of the marine environment. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review* 16:229-311
- Petersen JK, Hansen JW, Laursen MB, Clausen P, Carstensen J, Conley DJ (2008) Regime shift in a coastal marine ecosystem. *Ecological Applications* 18:497-510
- Petersen JK, Kennedy VS, W.C. D, Kemp WM (2009) Enclosed Experimental Ecosystems and Scale. *Tools for Understanding and Managing Coastal Ecosystems*. Springer, New York
- Pitta P, Apostolaki E, Tsagaraki T, Tsapakis M, Karakassis I (2006) Fish farming effects on chemical and microbial variables of the water column: a spatio-temporal study along the Mediterranean Sea. *Hydrobiologia* 563:99-108
- Pitta P, Apostolaki ET, Giannoulaki M, Karakassis I (2005a) 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, Stambler N, Tanaka T, Zohary T, Tselepides A, Rassoulzadegan F (2005b) Biological response to P addition in the Eastern Mediterranean Sea. The microbial race against time. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 52:2961-2974
- Pitta P, Tsapakis M, Apostolaki ET, 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

Κεφάλαιο 7: Βιβλιογραφία

- Porter ET, Mason RP, Sanford LP (2010) Effect of tidal resuspension on benthic–pelagic coupling in an experimental ecosystem study. *Marine Ecology Progress Series* 413:33-53
- Primpas I, Karydis M (2011) Scaling the trophic index (TRIX) in oligotrophic marine environments. *Environmental Monitoring and Assessment* 178:257-269
- Primpas I, Tsirtsis G, Karydis M, Kokkoris GD (2010) Principal component analysis: Development of a multivariate index for assessing eutrophication according to the European water framework directive. *Ecological Indicators* 10:178-183
- Queirós AM, Birchenough SNR, Bremner J, Godbold JA, Parker RE, Romero-Ramirez A, Reiss H, Solan M, Somerfield PJ, Van Colen C, Van Hoey G, Widdicombe S (2013) A bioturbation classification of European marine infaunal invertebrates. *Ecology and Evolution* 3:3958-3985
- Rabalais NN, Turner RE, Díaz RJ, Justić D (2009) Global change and eutrophication of coastal waters. *ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil* 66:1528-1537
- Rice J, Arvanitidis C, Borja A, Frid C, Hiddink JG, Krause J, Lorange P, Ragnarsson SA, Skold M, Trabucco B (2010) MARINE STRATEGY FRAMEWORK DIRECTIVE. Task Group 6 Report. Seafood integrity. In: Pilha H (ed) JRC Scientific and Technical Reports. ICES
- Rice J, Arvanitidis C, Borja A, Frid C, Hiddink JG, Krause J, Lorange P, Ragnarsson SA, Sköld M, Trabucco B, Enserink L, Norkko A (2012) Indicators for sea-floor integrity under the european marine strategy framework directive. *Ecological Indicators* 12:174-184
- Riebesell U, Schulz KG, Bellerby RGJ, Botros M, Fritsche P, Meyerhofer M, Neill C, Nondal G, Oschlies A, Wohlers J, Zollner E (2007) Enhanced biological carbon consumption in a high CO₂ ocean. *Nature* 450:545-548
- Rodhe W (1969) Crystallization of eutrophication concepts in Northern Europe. National Academy of Sciences, Washington, DC
- Rodrigues Alves BG, Ziggiatti Gúth A, Caruso Bicego M, Airton Gaeta S, Gomes Sumida PY (2014) Benthic community structure and organic matter variation in response to oceanographic events on the Brazilian SE inner shelf. *Continental Shelf Research* 85:106-116
- Rosenberg R, Blomqvist M, Nilsson HC, Cederwall H, Dimming A (2004) Marine quality assessment by use of benthic species-abundance distributions: a proposed new protocol within European Union Water Framework Directive. *Marine Pollution Bulletin* 49:728-739
- Ryther JH, Dunstan WM (1971) Nitrogen, phosphorus and eutrophication in the coastal marine environment. *Science* 171:1008-1013
- Schwier AN, Rose C, Asmi E, Ebling AM, Landing WM, Marro S, Pedrotti ML, Sallon A, Iuculano F, Agusti S, Tsiola A, Pitta P, Louis J, Guieu C, Gazeau F, Sellegri K (2015) Primary marine aerosol emissions from the Mediterranean Sea during pre-bloom and oligotrophic conditions: correlations to seawater chlorophyll a from a mesocosm study. *Atmos Chem Phys* 15:7961-7976

Κεφάλαιο 7: Βιβλιογραφία

- Sebastián M, Pitta P, González JM, Thingstad TF, Gasol JM (2012) Bacterioplankton groups involved in the uptake of phosphate and dissolved organic phosphorus in a mesocosm experiment with P-starved Mediterranean waters. *Environmental Microbiology* 14:2334-2347
- Shelley R, Widdicombe S, Woodward M, Stevens T, McNeill CL, Kendall MA (2008) An investigation of the impacts on biodiversity and ecosystem functioning of soft sediments by the non-native polychaete *Sternaspis scutata* (Polychaeta: Sternaspidae). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 366:146-150
- Simboura N, Panayotidis P, Papathanassiou E (2005) A synthesis of the biological quality elements for the implementation of the European Water Framework Directive in the Mediterranean ecoregion: The case of Saronikos Gulf. *Ecological Indicators* 5:253-266
- Simboura N, Papathanassiou E, Sakellariou D (2007) The use of a biotic index (Bentix) in assessing long-term effects of dumping coarse metalliferous waste on soft bottom benthic communities. *Ecological Indicators* 7:164-180
- Simboura N, Reizopoulou S (2007) A comparative approach of assessing ecological status in two coastal areas of Eastern Mediterranean. *Ecological Indicators* 7:455-468
- Simboura N, Reizopoulou S (2008) An intercalibration of classification metrics of benthic macroinvertebrates in coastal and transitional ecosystems of the Eastern Mediterranean ecoregion (Greece). *Marine Pollution Bulletin* 56:116-126
- Simboura N, Tsapakis M, Pavlidou A, Assimakopoulou G, Pagou K, Kontoyiannis H, Zeri C, Krasakopoulou E, Rousselaki E, Katsiaras N, Diliberto S, Naletaki M, Tsiamis K, Gerakaris V, Drakopoulou P, Panayotidis P (2015) Assessment of the environmental status in the Hellenic coastal waters (Eastern Mediterranean): From the Water Framework Directive to the Marine Strategy Framework Directive. *Mediterranean Marine Science* 16:46-64
- Simboura N, Zenetos A (2002) Benthic indicators to use in Ecological Quality classification of Mediterranean soft bottom marine ecosystems, including a new Biotic Index. *Mediterranean Marine Science* 3:77-111
- Simboura N, Zenetos A, Pancucci-Papadopoulou MA, Reizopoulou S, Streftaris N (2012) Indicators for the sea-floor integrity of the Hellenic seas under the European Marine Strategy Framework Directive: Establishing the thresholds and standards for good environmental status. *Mediterranean Marine Science* 13:140-152
- Smith VH, Schindler DW (2009) Eutrophication science: where do we go from here? *Trends in Ecology and Evolution* 24:201-207
- Solan M, Batty P, Bulling MT, Godbold JA (2010) How biodiversity affects ecosystem processes: implications for ecological revolutions and benthic ecosystem function. *Aquatic Biology* 2:289
- Solan M, Cardinale BJ, Downing AL, Engelhardt KAM, Ruesink JL, Srivastava DS (2004) Extinction and Ecosystem Function in the Marine Benthos. *Science* 306:1177-1180

Κεφάλαιο 7: Βιβλιογραφία

- Strickland JD, Parsons TR (1972) A practical handbook of seawater analysis. 2nd edn Bulletin Fisheries Research Board of Canada 197:310
- Suomela J, Gran V, Helminen H, Lagus A, Lehtoranta J, Sipura J (2005) Effects of sediment and nutrient enrichment on water quality in the Archipelago Sea, northern Baltic: An enclosure experiment in shallow water. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 65:337-350
- Suykens K, Schmidt S, Delille B, Harlay J, Chou L, De Bodt C, Fagel N, Borges AV (2011) Benthic remineralization in the northwest European continental margin (northern Bay of Biscay). *Continental Shelf Research* 31:644-658
- Svensen C, Egge JK, Stiansen JE (2001) Can silicate and turbulence regulate the vertical flux of biogenic matter? A mesocosm study.
- Teixeira H, Borja T, Weisberg SB, Ananda Ranasinghe J, Cadien DB, Dauer DM, Dauvin JC, Degraer S, Diaz RJ, Grémare A, Karakassis I, Llansó RJ, Lovell LL, Marques JC, Montagne DE, Occhipinti-Ambrogi A, Rosenberg R, Sardá R, Schaffner LC, Velarde RG (2010) Assessing coastal benthic macrofauna community condition using best professional judgement - Developing consensus across North America and Europe. *Marine Pollution Bulletin* 60:589-600
- ter Braak CJF (2002) Canoco reference manual and CanoDraw for Windows user's guide: software for canonical community ordination (version 4.5). Microcomputer Power, Ithaca, New York:252
- Tett P, Gowen RJ, Painting SJ, Elliott M, Forster R, Mills DK, Bresnan E, Capuzzo E, Fernandes TF, Foden J, Geider RJ, Gilpin LC, Huxham M, McQuatters-Gollop AL, Malcolm SJ, Saux-Picart S, Platt T, Racault MF, Sathyendranath S, Van Der Molen J, Wilkinson M (2013) Framework for understanding marine ecosystem health. *Marine Ecology Progress Series* 494:1-27
- Thingstad T, Krom M, Mantoura R, Flaten GF, Groom S, Herut B, Kress N, Law C, Pasternak A, Pitta P (2005) Nature of phosphorus limitation in the ultraoligotrophic eastern Mediterranean. *Science* 309:1068-1071
- Tillin H, Hiddink J, Jennings S, Kaiser M (2006) Chronic bottom trawling alters the functional composition of benthic invertebrate communities on a sea-basin scale. *Marine Ecology Progress Series* 318:31-45
- Tomassetti P, Persia E, Mercatali I, Vani D, Marussso V, Porrello S (2009) Effects of mariculture on macrobenthic assemblages in a western mediterranean site. *Marine Pollution Bulletin* 58:533-541
- Tomassetti P, Porrello S (2005) Polychaetes as indicators of marine fish farm organic enrichment. *Aquaculture International* 13:109-128
- Tsiola A, Pitta P, Fodelianakis S, Pete R, Magiopoulos I, Mara P, Psarra S, Tanaka T, Mostajir B (2015) Nutrient Limitation in Surface Waters of the Oligotrophic Eastern Mediterranean Sea: an Enrichment Microcosm Experiment. *Microb Ecol*:1-14
- Tung JWT, Tanner PA (2003) Instrumental determination of organic carbon in marine sediments. *Marine Chemistry* 80:161-170
- Vaquier-Sunyer R, Duarte CM (2008) Thresholds of hypoxia for marine biodiversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 105:15452-15457

Κεφάλαιο 7: Βιβλιογραφία

- Verardo DJ, Froelich PN, McIntyre A (1990) Determination of organic carbon and nitrogen in marine sediments using the Carlo Erba NA-1500 analyzer. *Deep Sea Research Part A Oceanographic Research Papers* 37:157-165
- Verspagen JMH, Snelder EOFM, Visser PM, JÖHnk KD, Ibelings BW, Mur LR, Huisman JEF (2005) Benthic–pelagic coupling in the population dynamics of the harmful cyanobacterium *Microcystis*. *Freshwater Biology* 50:854-867
- Vidal M, Duarte CM (2000) Nutrient accumulation at different supply rates in experimental Mediterranean planktonic communities. *Marine Ecology Progress Series* 207:1-11
- Volkenborn N, Polerecky L, Wetthey D, Woodin S (2010) Oscillatory porewater bioadvection in marine sediments induced by hydraulic activities of *Arenicola marina*. *Limnology and oceanography* 55:1231-1247
- Vollenweider RA (1968) The Scientific Basis for Lake and Stream Eutrophication with Particular Reference to Phosphorus and Nitrogen as Eutrophication Factors. Book Technical Report DAS/DS1/68.27. Organization for Economic Cooperation and Development, Paris, France
- Vollenweider RA (1976) Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication. *Memorie dell'Istituto Italiano di Idrobiologia, Dott Marco de Marchi Verbania Pallanza*
- Vollenweider RA, Giovanardi F, Montanari G, Rinaldi A (1998) Characterization of the trophic conditions of marine coastal waters with special reference to the NW Adriatic Sea: Proposal for a trophic scale, turbidity and generalized water quality index. *Environmetrics* 9:329-357
- Weigelt M (1991) Short-and long-term changes in the benthic community of deeper parts of Kiel Bay (Western Baltic) due to oxygen depletion and eutrophication. *Meeresforschung-Reports on Marine Research* 33:197-224
- Wessa P (2012) Cross Correlation Function (v1.0.8) in Free Statistics Software (v1.1.23-r7). Office for Research Development and Education:http://www.wessa.net/rwasp_cross.wasp/
- Widdicombe S, Dashfield SL, McNeill CL, Needham HR, Beesley A, McEvoy A, Øxnevad S, Clarke KR, Berge JA (2009) Effects of CO₂ induced seawater acidification on infaunal diversity and sediment nutrient fluxes. *Marine Ecology Progress Series* 379:59-75
- Wildish DJ, Akagi HM, Hamilton N, Hargrave BT (1999) A recommended method for monitoring sediments to detect organic enrichment from mariculture in the bay of Fundy. Biological Station, St. Andrews, NB, Canada
- Williams PIB, Egge J (1998) The management and behaviour of the mesocosms. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 46:3-14
- Yentsch CS, Menzel DW (1963) A method for the determination of phytoplankton chlorophyll and phaeophytin by fluorescence. *Deep-Sea Research and Oceanographic Abstracts* 10:221-231

Κεφάλαιο 7: Βιβλιογραφία

- Zhang Q, Warwick RM, McNeill CL, Widdicombe CE, Sheehan A, Widdicombe S (2015) An unusually large phytoplankton spring bloom drives rapid changes in benthic diversity and ecosystem function. *Progress in Oceanography* 137, Part B:533-545
- Zobell CE (1946) Studies on redox potential of marine sediments. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists* 30:477-510
- ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. (1994a) Μελέτη εντοπισμού ρύπανσης Μαλιακού κόλπου σε συνδυασμό με τις ιχθυοπαραγωγικές και αλιευτικές δυνατότητες ανάπτυξής του. In: Anagnostou A., E. P (eds). *Hellenic Centre for Marine Research, Anavyssos*
- ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. (1994b) Ωκειανογραφική μελέτη κόλπου Μαλίων. In: Eleftheriou A (ed). *Hellenic Centre for Marine Research (former Institute Marine Biology Crete), Heraklion*
- ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. (1998) Αλληλεπίδραση Υδατοκαλλιεργειών και θαλάσσιου περιβάλλοντος. In: Eleftheriou A (ed) ΕΠΕΤ II. *Hellenic Centre for Marine Research (former Institute Marine Biology Crete), Heraklion*
- ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. (2003) Transfer and Fate of Harmful Algal Bloom (HAB) Toxins in European Marine Waters (FATE) EVK3-2001-00050. In: Pagou K (ed). *Hellenic Centre for Marine Research, Anavyssos*
- ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. (2004) Παρακολούθηση οικοσυστήματος του Σαρωνικού κόλπου υπό την επίδραση της εκβολής των λυμάτων του αγωγού της Ψυττάλειας 2000-2004. In: Siokou I (ed). *Hellenic Centre for Marine Research, Anavyssos*
- ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. (2008) Παρακολούθηση οικοσυστήματος του Σαρωνικού κόλπου υπό την επίδραση της εκβολής των λυμάτων του αγωγού της Ψυττάλειας (ΚΕΛΨ) (Β' Περίοδος). In: Christou ED, Krasakopoulou E (eds). *Hellenic Centre for Marine Research, Anavyssos*
- ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. (2010) Παρακολούθηση της ποιότητας του θαλασσίου περιβάλλοντος του Μεσσηνιακού κόλπου και των δυτικών ακτών του νομού Μεσσηνίας. In: Pavlidou A (ed). *Hellenic Centre for Marine Research, Anavyssos*