



ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ:

ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΙΚΗ ΒΙΟΛΟΓΙΑ – ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ
ΧΕΡΣΑΙΩΝ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΒΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΛΟΓΙΑΣ, ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

2015

Μελέτη μεγέθους μεσοζωοπλαγκτού σε σχέση με τη διατροφή των μικρών πελαγικών ψαριών: Συσχέτιση με την παραγωγικότητα και την ανθρωπογενή επιβάρυνση

Μπατζιάκας Ευστράτιος, Α.Μ.:651

ΣΕ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΤΟ

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΚΕΝΤΡΟ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΕΡΕΥΝΩΝ



Ο Μπατζιάκας Ευστράτιος χρηματοδοτήθηκε από το Έβδομο Πρόγραμμα Πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης ([FP7/2007-2013]), κάτω από τη συμφωνία επιχορήγησης Ν^ο 287600 του προγράμματος PERSEUS (Policy-oriented marine Environmental Research for the Southern European Seas).

Πανεπιστήμιο Κρήτης, Τμήμα Βιολογίας

*ΠΜΣ: Περιβαλλοντικής Βιολογίας – Διαχείριση
χερσαίων και θαλάσσιων βιολογικών πόρων*

Ηράκλειο 2015

Batziakas Stratos was funded by the European Community's Seventh Framework Programme ([FP7/2007-2013]), under the grand agreement N^o 287600 – PERSEUS project (Policy-oriented marine Environmental Research for the Southern European Seas).

University of Crete, Biology Department

*M.Sc.: Environmental Biology – Terrestrial
and Marine Biological Resource Management*

Heraklion 2015

Επιβλέπων Καθηγητής (Παν. Κρήτης):

Κουμουνδούρος Γεώργιος

Επιβλέπων Ερευνητής (ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε.):

Σωμαράκης Στυλιανός

Μέλη εξεταστικής επιτροπής:

Καρακάσης Ιωάννης



Αφιερωμένο στον εκλιπόντα πατέρα μου.



ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κυρ. Γεώργιο Κουμουνδούρο, αναπληρωτή καθηγητή του Τμήματος Βιολογίας του Παν. Κρήτης, επιβλέποντα καθηγητή από το Παν. Κρήτης, Στυλιανό Σωμαράκη, ερευνητή Α του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε, επιβλέποντα ερευνητή από το ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. και Ιωάννη Καρακάση, καθηγητή του Τμήματος Βιολογίας του Παν. Κρήτης, μέλος της εξεταστικής επιτροπής, για τη συμβολή τους στη διεκπεραίωση της παρούσας εργασίας.

Τους Δρ. Κωνσταντίνο Φραγκούλη και Δρ. Νικόλαο Νικολιουδάκη για την υπερπολύτιμη βοήθεια και συνεργασία καθ' όλη τη διάρκεια της πορείας μου στο ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε.

Την Δρ. Παρασκευή Πήττα για τη διάθεση του εξοπλισμού κυτταρομετρίας και των μικροσκοπίων του εργαστήριου του Ινστιτούτου ωκεανογραφίας. Την κυτταρομετρία πραγματοποίησε η κα. Αναστασία Τσιώλα και τις αναλύσεις φυτοπλαγκτού η Δρ. Τατιάνα Τσαγκαράκη.

Την κα. Κωσταρή Μαριλένα, για τη συμβολή στην ανάλυση τμήματος των ζωοπλαγκτονικών οργανισμών.

Τα μέλη της ερευνητικής αποστολής και το πλήρωμα του Ερευνητικού Σκάφους «Φιλία», για τη συλλογή των δειγμάτων των οργανισμών και των φυσικοχημικών παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία.

Τους καθηγητές, ερευνητές και διδασκάλους του ΠΜΣ Περιβαλλοντικής Βιολογίας, για την πολύτιμη γνώση και εμπειρία που μου παρείχαν κατά τη διάρκεια της φοίτησης μου.

Τους συμφοιτητές μου, Θέκλα, Ματίνα, Σοφία, Στέφανο και Νίκο για τη συμμετοχή και την παρέα κατά τη διάρκεια των σπουδών.

Τέλος, τους δύο στηρικτικούς πυλώνες της ζωής μου, τη μητέρα μου και την Κατερίνα.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	12
<i>Περίληψη (στην Ελληνική)</i>	12
<i>Abstract</i>	13
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	16
<i>Η οργάνωση του πλαγκτού στο πελαγικό οικοσύστημα και η σημασία του μεγέθους των οργανισμών</i>	16
<i>Τα μικρά πελαγικά ψάρια και η διατροφή τους</i>	21
<i>Ο κύκλος του άνθρακα στους ωκεανούς</i>	23
<i>Στόχος της εργασίας</i>	26
ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ	27
<i>Περιοχή μελέτης και στρατηγική δειγματοληψίας</i>	27
<i>Μεθοδολογία συντήρησης και ανάλυσης δειγμάτων</i>	29
<i>Μετατροπές αφθονίας οργανισμών σε μονάδες βιομάζας άνθρακα</i>	33
<i>Κατασκευή του κανονικοποιημένων φασμάτων βιομάζας</i>	35
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	37
<i>Φυσικοχημικό προφίλ των περιοχών έρευνας</i>	37
<i>Βιομάζα και αφθονία των πελαγικών οργανισμών</i>	38
<i>Κανονικοποιημένα φάσματα βιομάζας (NB-SS)</i>	41
<i>Διατροφή των ειδών <i>Sardina pilchardus</i> και <i>Engraulis encrasicolus</i></i>	44
ΣΥΖΗΤΗΣΗ	47
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	54

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Περίληψη (στην Ελληνική)

Για τη μελέτη του μεγέθους του μεσοζωοπλαγκτού σε σχέση με τη διατροφή των μικρών πελαγικών ιχθύων, επιλέχθηκαν δύο διακριτά οικοσυστήματα στην ευρύτερη περιοχή του Σαρωνικού κόλπου, του κόλπου της Ελευσίνας και της περιοχής του Αγίου Κοσμά. Οι δύο αυτές περιοχές παρουσιάζουν διαφορές ως προς τη γεωμορφολογία, την υδρολογία, την παραγωγικότητα και το βαθμό ανθρωπογενούς επιβάρυνσης. Οι δειγματοληψίες έλαβαν χώρα το Δεκέμβριο (2012) και το Σεπτέμβριο (2013), όπου συλλέχθηκαν οι οργανισμοί, από τα βακτήρια μέχρι τα μικρά πελαγικά ψάρια και μετρήθηκαν οι παράγοντες θερμοκρασίας, αλατότητας, φθορισμού και διαλυμένου οξυγόνου στην υδάτινη στήλη. Η διατροφή των δύο κυρίαρχων ειδών μικρών πελαγικών ιχθύων (*Engraulis encrasicolus* και *Sardina pilchardus*) εκτιμήθηκε μέσω μέτρησης των θηραμάτων από τα στομαχικά τους περιεχόμενα. Η ανάλυση των φασμάτων βιομάζας (NB-SS) χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της εποχικής διακύμανσης, της στρωμάτωσης κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, των διαφορών των δύο οικοσυστημάτων μεταξύ τους καθώς και της επίδρασης της υποξίας. Χαμηλότερες κλίσεις του NB-SS παρουσιάζονται στην Ελευσίνα, ένδειξη της μεγαλύτερης ανθρωπογενούς επιβάρυνσης στην περιοχή αυτή. Οι έντονες υποξικές συνθήκες το Σεπτέμβριο κάτω από το θερμοκλινές στην Ελευσίνα μεταβάλλει δραστικά τη σύνθεση της πλαγκτονική βιοκοινότητας. Η αντίστοιχη κλίση του NB-SS είναι η χαμηλότερη που καταγράφηκε στην παρούσα μελέτη (-1.353). Οι αφθονίες των ιχθύων ανά m³ είναι μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερες στην Ελευσίνα από ότι στον Άγιο Κοσμά, ένδειξη ότι τα μικρά πελαγικά ψάρια επιλέγουν την περιοχή της Ελευσίνας, πιθανόν λόγω της απουσίας αλιευτικής πίεσης στην περιοχή αυτή. Γάυρος και σαρδέλα τρέφονται με διαφορετικά μεγέθη οργανισμών, με το γάυρο να κυνηγά μεγαλύτερα θηράματα από τη σαρδέλα. Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε κάτω από το πλαίσιο του προγράμματος PERSEUS (αριθμός επιχορήγησης N^o 287600 – EC FP7/2007-2013)

Λέξεις κλειδιά: Φάσματα, Βιομάζα, Σαρωνικός, Γάυρος, Σαρδέλα

English Title

Mesozooplankton size study in relation to small pelagic fish diet: Correlation with productivity and the anthropogenic disturbance.

Batziakas Stratos^{1,2}

¹*University of Crete, Biology Department*

²*Hellenic Centre for Marine Research, Institute of Marine Biological Resources & Inland Waters, Institute of Oceanography*

Abstract

For the study of mesozooplankton sizes in relation to the diet of small pelagic fishes, two distinct ecosystems in the broader area of Saronikos Gulf, Elefsis Bay and Aghios Kosmas, were chosen. These areas are different in relation to their geomorphology, hydrology, production and the magnitude of the anthropogenic impact. Samplings took place in December (2012) and September (2013), where organisms from bacteria to small pelagic fishes were collected and measures for temperature, salinity, fluorescence and dissolved oxygen from the water column were taken. The diet of the two most abundant small pelagic fish species (*Engraulis encrasicolus* and *Sardina pilchardus*) was estimated via prey counting from their stomach contents. The biomass spectrum analysis (NB-SS) was utilized for estimating the effect of seasonal variation, stratification through the summer period and hypoxia on the plankton community, as well as the overall differences between the two ecosystems. Steeper slopes of the NB-SS were observed in Elefsis Bay, which indicates a higher level of anthropogenic impact in the area. The acute hypoxia conditions in September below the thermocline in Elefsis Bay, induces drastic changes in the plankton community composition. The corresponding NB-SS slope is the steepest recorded in the present study (-1.353). Fish abundances per m³ are one order of magnitude higher in Elefsis Bay than in Aghios Kosmas, which indicates that small pelagic fishes chose Elefsis Bay, possibly to avoid fishing pressure. Anchovy and sardine feed on different prey sizes, with anchovies hunting for larger preys than sardines. This study was performed under the framework of PERSEUS project (grand N^o 287600, EC FP7/2007-2013).

Keywords: Biomass, Spectrum, Saronikos, Sardine, Anchovy

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η οργάνωση του πλαγκτού στο πελαγικό οικοσύστημα και η σημασία του μεγέθους των οργανισμών

Ο όρος «πλαγκτόν» προέρχεται από την αρχαία ελληνική λέξη «πλαγκτός» που σημαίνει περιπλανώμενος. Περιλαμβάνει όλους τους οργανισμούς των οποίων η ικανότητα κολύμβησης δεν είναι επαρκής και παρασέρνονται από τα ρεύματα, σε αντίθεση με το νηκτόν, όπου περιέχονται οι οργανισμοί εκείνοι που κολυμπούν ενεργά (π.χ. μεγάλα καρκινοειδή, κεφαλόποδα, ψάρια, κ.ά.) (Harris *et al.*, 2000 και αναφορές εντός). Αν και παραμένουν εκτιθέμενοι στις δυνάμεις των ρευμάτων και των αναταράξεων, σχεδόν όλοι οι ζωοπλαγκτονικοί οργανισμοί έχουν την ικανότητα μετακίνησης, τουλάχιστο για να αλλάζουν τη θέση του ύψους τους εντός της υδάτινης στήλης. Το ζωοπλαγκτό διακρίνεται από το φυτοπλαγκτόν είτε βάση της μορφολογίας τους, είτε της διατροφικής τους κατάστασης, αυτότροφοι ή ετερότροφοι. Με βάση την τελευταία διάκριση, το ζωοπλαγκτό ορίζεται ως η βιοκοινότητα όλων των φαγοτροφικών οργανισμών. Σχετικά με τις διατροφικές τους προτιμήσεις μπορούν να ταξινομηθούν ως φυτοφάγοι, τριμματοφάγοι, παμφάγοι ή σαρκοφάγοι. Στην ομάδα των ετερότροφων πλαγκτονικών οργανισμών περιλαμβάνονται και οσμώτροφα βακτήρια, που ονομάζονται βακτηριοπλαγκτόν. Τέλος, υπάρχει και η μιξοτροφία (υποχρεωτική ή προαιρετική), όπου αποτελεί συνδυασμό αυτό- και ετερο- τροφίας, που συναντάται συχνά σε δινομαστιγωτά και άλλα πρωτόζωα, όπως τρηματοφόρα, ακτινόζωα και βλεφαριφωτά, αλλά και σε μερικά μετάζωα όπως κνιδόζωα και μαλάκια. Τα είδη που περνούν όλη τη ζωή τους στο πελαγικό οικοσύστημα καλούνται ολοπλαγκτόν. Ως μεροπλαγκτόν θεωρούνται οι πλαγκτονικές μορφές του κύκλου ζωής μη πλαγκτονικών οργανισμών, για παράδειγμα οι προνύμφες εχινόδερμων και το ιχθυοπλαγκτόν (όπου τα ώριμα άτομα ανήκουν στο βένθος και στο νηκτόν, αντίστοιχα).

Ένας ακόμα τρόπος διάκρισης του πλαγκτού είναι με βάση το μέγεθος. Η πλέον αποδεκτή ταξινόμηση των πλαγκτονικών οργανισμών με βάση το μέγεθος, από τους μικρότερους προς τους μεγαλύτερους οργανισμούς, είναι η εξής: φεμτο- (0.02 – 0.2 μm), πικο- (0.2 – 2 μm), νανο- (2 – 20 μm), μικρο- (20 – 200 μm), μεσο- (2 – 20 mm), μακρο- (2 – 20 cm) και μεγα- (20 – 200 cm) πλαγκτόν (Sieburth *et al.* 1978). Το ζωοπλαγκτόν εκτείνεται σε εύρος πέντε κλάσεων μεγέθους, από το νανο- έως το

μεγαπλαγκτόν. Κάθε ονομαστική κλάση μεγέθους καλύπτει και από μία τάξη μεγέθους, εκτός του μεσοζωοπλαγκτού που καλύπτει δύο. Η εξαίρεση αυτή δικαιολογείται από το γεγονός ότι το εύρος αυτό καλύπτει το φάσμα μεγεθών των ζωοπλαγκτονικών δειγμάτων που παραδοσιακά συλλαμβάνονται από δίκτυ με άνοιγμα ματιού 200 – 330 μm . Τα δείγματα αυτά συνήθως περιλαμβάνουν τον κύριο όγκο των πλαγκτονικών καρκινοειδών και των μεροπλαγκτονικών νυμφών, και επιπλέον, τα όρια αυτής της κλάσης μεγέθους (0.2 – 20 mm) καλύπτουν, σχεδόν με ακρίβεια, το εύρος μεγεθών των κωπηποδιτών και ενήλικων κωπηπόδων που γενικά απαρτίζουν την πλέον άφθονη ζωοπλαγκτονική ομάδα. Αυγά και πρώιμα αναπτυξιακά στάδια καρκινοειδών και μεροπλαγκτονικών οργανισμών καθώς και πολλά πρωτόζωα (κυρίως βλεφαριδωτά) ανήκουν στο μικροπλαγκτόν (20 – 200 μm). Το φεμτοπλαγκτόν απαρτίζουν οι ιοί (το λεγόμενο ιοπλαγκτόν). Τα βακτήρια εμπεριέχονται στο πικοπλαγκτόν (0.2 – 2 μm), ενώ οι φυτοπλαγκτονικοί οργανισμοί καλύπτουν το εύρος από πικο- έως μικροπλαγκτόν.

Πολλές σημαντικές διεργασίες για τη ζωή ενός οργανισμού είναι εξαρτώμενες από το μέγεθος (Platt και Denman, 1977). Ο ρυθμός μεταβολής των διεργασιών αυτών μπορεί δηλαδή να εκφραστεί ως μία απλή εξίσωση ως προς το βάρος του ατόμου. Είναι λοιπόν εύχρηστο να χρησιμοποιείται το σωματικό βάρος ως ένας συντελεστής κλίμακας σε θεωρητικές περιγραφές των φυσιολογικών διεργασιών. Η σύνδεση της παραγωγικότητας ενός συνόλου οργανισμών μιας βιοκοινότητας με διάφορες ιδιότητες του μεγέθους του σώματος, ξεκίνησε με την προσπάθεια να δοθεί μία απάντηση για το πώς διαμοιράζεται ο διαθέσιμος χώρος των διάφορων ενδαιτημάτων μεταξύ των πολλών διαφορετικών οργανισμών (Kerr και Dickie, 2001). Εντός ενός συγκεκριμένου ενδαιτήματος, η κατανομή των σωματικών μεγεθών μέσα σε μία ομάδα παρόμοιων ειδών προκύπτει ως συνάρτηση της κατανομής πόρων μεταξύ τους (Hutchinson και MacArthur, 1959, MacArthur, 1960, 1957). Επίσης, η κανονικότητα που παρουσιάζεται στην πυκνότητα των θηρευτών όπως αντικατοπτρίζεται στο μέγεθος της επικράτειας των πτηνών, προκύπτει από τις σχέσεις μεταξύ του σωματικού μεγέθους, της πυκνότητας των θηραμάτων και της σχετικής απόδοσης των διατροφικών συμπεριφορών και στρατηγικών τους (Schoener, 1974). Ακόμα, η ταξινόμηση των ζωοπλαγκτονικών βιοκοινοτήτων με βάση την κατανομή μεγεθών παρείχε έναν ισχυρότερο παράγοντα πρόβλεψης των διαφορών της παραγωγής μεταξύ βιοκοινοτήτων εσωτερικών υδάτινων σωμάτων διαφορετικής ζωογεωγραφικής και

γεωμορφομετρικής κλάσης από τη συμβατική ταξινόμηση με βάση τη σύσταση των ειδών (Sprules, 1980, 1984). Έτσι, το μέγεθος σώματος, μέσω της σύνδεσης του με τις διατροφικές αλληλεπιδράσεις, έχει ανεγερθεί ως σημαντικός δείκτης της οργάνωσης των οικοσυστημάτων.

Στην αναζήτηση τρόπων για να μειωθεί η διαφαινόμενη περιπλοκότητα των οικοσυστημάτων σε διαχειρίσιμο επίπεδο, έχουν υιοθετηθεί, με διαφορετικό επίπεδο επιτυχίας, ένας αριθμός διαφορετικών θεωριών, όπως η έννοια του τροφικού επιπέδου, η κυκλική ροή των ατόμων άνθρακα, η αμφίδρομη ροή της ενέργειας, η ποικιλότητα των ειδών (και άλλα) (Platt και Denman, 1978). Η πρώτη παρουσίαση των φασμάτων βιομάζας έγινε από τους Sheldon *et al.* (1972, 1973). Βασιζόμενοι σε πλαγκτονικά δείγματα (από 1 – 100 μm μέγεθος) που συνέλεξαν από ένα πολύ σημαντικό εύρος πελαγικών οικοσυστημάτων γύρω από την Αμερικανική ήπειρο, παρατήρησαν μία γενική ομοιομορφία στο μοτίβο κατανομής της συγκέντρωσης βιομάζας σε σχέση με το μέγεθος των σωματιδίων. Διαμορφώνοντας τα δεδομένα τους σε λογαρίθμους συγκέντρωσης βιομάζας και κατανέμοντας τα σε λογαριθμικές κλάσεις μεγέθους, κατέληξαν ότι τα παραγόμενα φάσματα είναι «αναπάντεχα επίπεδα». Προχώρησαν στη συνέχεια στην εφαρμογή της προηγούμενης υποθέσεως για να προβλέψουν τις συγκεντρώσεις μεγαλύτερων ειδών (τόνων, φαλαινών), συγκρίνοντας τις προβλέψεις τους με δεδομένα από τη βιβλιογραφία.

Τέτοια «ανοιχτά» συστήματα που δε χαρακτηρίζονται από ένα μέσο μέγεθος και εξελίσσονται δυναμικά προς μία κρίσιμη κατάσταση, απαντώνται αρκετά συχνά στη φύση, φαινόμενο ευρύτερα γνωστό ως «αυτο-οργανωμένη κρισιμότητα» (Self-organized criticality) (Bak *et al.*, 1988). Οι Vidondo *et al.* (1997), παρατήρησαν ότι τα συστήματα αυτά ακολουθούν τη γενική μορφή

$$N_{S \geq S} = aS^{-b} \quad (1)$$

όπου $N_{S \geq S}$, είναι ο αριθμός των αντικειμένων μεγαλύτερων από ένα όριο μεγέθους (S), a , παράμετρος που περιγράφει το συνολικό αριθμό αντικειμένων και b , ο λογαριθμικός ρυθμός μείωσης του αριθμού των αντικειμένων ως προς το μέγεθος. Πράγματι, ένας εντυπωσιακός αριθμός διεργασιών περιγράφονται από κάποια μορφή της παραπάνω σχέσης, συμπεριλαμβανομένου της κατανομής του εισοδήματος (Pareto, 1897), της κατανομής του αριθμού των νησιών του Αιγαίου με βάση την έκτασή τους (Korcsak, 1938), της κατανομής των σεισμών με βάση την έντασή τους (Richter, 1958), της

κατανομής των χημικών στοιχείων στο σύμπαν (Winiwarter, 1983), ακόμα και της κατανομής των λέξεων με βάση τον αριθμό εμφάνισής τους στο γραπτό και προφορικό λόγο (Zipf, 1949).

Για την ερμηνεία της οργάνωσης των μεγεθών της πλαγκτονικής βιοκοινότητας, οι (Platt και Denman, 1977) εισήγαγαν ένα θεωρητικό μαθηματικό μοντέλο το οποίο στήριξαν πάνω σε ευρέως αποδεκτές αλλομετρικές σχέσεις του μεταβολισμού ως προς το μέγεθος του σώματος (Fenchel, 1974): Έστω ότι $\beta(w)$ η συνολική βιομάζα $\beta'(w)$ εντός κλάσης μεγέθους που χαρακτηρίζεται από βάρος w , διαιρούμενο από το εύρος της κλάσης μεγέθους Δw

$$\beta(w) = \frac{\beta'(w)}{\Delta w} \quad (2)$$

Είναι βολικό (τόσο από μαθηματικής άποψης, όσο και πρακτικά, λόγω της φύσης των μετρήσεων) να οργανώνονται οι τάξεις βιομάζας κατά αυξανόμενη κλίμακα οκτάβας. Με άλλα λόγια, το χαρακτηριστικό βάρος της κάθε κλάσης μεγέθους να είναι διπλάσιο από το αντίστοιχο της αμέσως προηγούμενης γειτονικής κλάσης, και το μισό της αμέσως επόμενης. Σε οποιοδήποτε χρονικό σημείο, κάθε οργανισμός μπορεί να τοποθετηθεί (ανεξαρτήτως του είδους στο οποίο ανήκει), αποκλειστικά σε μία μόνο από τις κλάσεις της κλίμακας. Με αυτή τη διευθέτηση των κλάσεων βιομάζας, το εύρος των κλάσεων Δw , εντός μιας σταθερής μονάδας τάξης μεγέθους, είναι ίσο με το ονομαστικό βάρος της κλάσης w

$$\Delta w \cong w \quad (3)$$

Λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση (3), η ποσότητα $\beta(w)$, παίρνει τη μορφή

$$\beta(w) \cong \frac{\beta'(w)}{w} \quad (4)$$

Η ποσότητα $\beta(w)$ καλείται *κανονικοποιημένο φάσμα μεγεθών βιομάζας* (normalized biomass size spectrum, ή NB-SS από εδώ και πέρα), και εκτιμά την πυκνότητα του αριθμού των οργανισμών σε κάθε κλάση w .

Στην πράξη, το NB-SS υπολογίζεται από την εξίσωση

$$\log_2 \left(\frac{C_{class}}{C_{ind^{-1}}} \right) = a + b \cdot \log_2(C_{ind^{-1}}) \quad (5)$$

μία εξίσωση της μορφής $y = a + bx$ που επιτρέπει τον εύκολο υπολογισμό των παραμέτρων a και b μέσω γραμμικής παλινδρόμησης. Η κανονικοποίηση είναι

απαραίτητη για να είναι η ανάλυση ανεξάρτητη από το εύρος των κλάσεων που επιλέγουμε. Οι ποσότητες C_{class} και $C\ ind^{-1}$ είναι αντίστοιχες των $\beta'(w)$ και w της εξίσωσης (4). Όπου C_{class} δηλαδή, είναι η ποσότητα άνθρακα σε $mg\ m^{-3}$ της κάθε κλάσης και $C\ ind^{-1}$ το ονομαστικό βάρος w της κλάσης, ή αλλιώς, το μέσο βάρος άνθρακα ενός ατόμου της εν λόγω κλάσης. Η παράμετρος a αποτελεί μέτρο της συνολικής αφθονίας του συστήματος (Zhou, 2006), η οποία όμως είναι ευαίσθητη στην επιλογή του εύρους των κλάσεων, καθώς και στο σημείο έναρξης που επιλέγουμε για να ξεκινήσουμε την κατασκευή τους. Ως εκ τούτου, οι δύο παράγοντες πρέπει να διατηρούνται σταθεροί για κάθε περίπτωση για να είναι συγκρίσιμες οι παράμετροι μεταξύ τους. Αντιθέτως, η κλίση b της ευθείας δεν επηρεάζεται από τους δύο παραπάνω παράγοντες. Στη σταθερή κατάσταση, η κλίση θεωρείται ότι είναι -1 και το εύρος των κλίσεων προβλέπεται μεταξύ -0.82 και -1.22 (Platt και Denman, 1977, Zhou, 2006).

Το NB-SS έχει προταθεί ως δείκτης της κατάστασης του οικοσυστήματος για διάφορες διεργασίες κατά το παρελθόν. Οι Gómez-Canchong *et al.* (2013), συνοψίζοντας τη βιβλιογραφία όπου το NB-SS και οι διάφορες παράμετροι του χρησιμοποιήθηκαν ως δείκτης για κάποια διεργασία του συστήματος (Πιν. 1), κατέληξαν ότι είναι δυνατή η άμεση σύγκριση μεταξύ δύο οικοσυστημάτων αρκεί να είναι γνωστοί δύο εκ των τριών παραμέτρων n , a , b (όπου n η αφθονία των οργανισμών και a , b οι παράμετροι του NB-SS).

Πίνακας 1. Πίνακας όπου απεικονίζονται οι διαφορετικοί παράγοντες του φάσματος βιομάζας και οι διεργασίες για τις οποίες έχει προταθεί το NB-SS ως δείκτης της κατάστασης του οικοσυστήματος (Gómez-Canchong *et al.*, 2013).

Παράμετρος/Μέθοδος	Διεργασία/Δείκτης/Εφαρμογή	Πηγή
Περιοχή κάτω από το NB-SS	Συνολική βιομάζα της βιοκοινότητας	(Platt και Denman, 1977, 1978)
Απόκλιση από τη θεωρητική βέλτιστη ευθεία	Βαθμός διατάραξης του συστήματος από της σταθερή κατάσταση	Sprules και Munawar (1986), Choi <i>et al.</i> (1999)
Απόκλιση από τη θεωρητική βέλτιστη ευθεία	Συνολική παραγωγικότητα του συστήματος	Sprules και Munawar (1986)
Συνέχεια του φάσματος μεγεθών	Σύνδεση βενθικών και πελαγικών οικοσυστημάτων σε λίμνες	Echevarría <i>et al.</i> (1990)
Συνέχεια του φάσματος μεγεθών	Σύνδεση βενθικών και πελαγικών οικοσυστημάτων στην υφαλοκρηπίδα	Schwinghamer (1985), Warwick <i>et al.</i> (1986)
a	Βιομάζα των πρωτογενών παραγωγών ή της μικρότερης ομάδας του φάσματος	(Zhou, 2006)

Πίνακας 1. (Συνέχεια)

<i>Παράμετρος/Μέθοδος</i>	<i>Διεργασία/Δείκτης/Εφαρμογή</i>	<i>Πηγή</i>
<i>a</i>	Σύγκριση βιομάζας δύο βιοκοινοτήτων με ίσες κλίσεις <i>b</i>	Sprules και Munawar (1986)
<i>b</i>	Συνολική παραγωγικότητα του συστήματος	Sprules και Munawar (1986)
<i>b</i>	Αλιευτική εκμετάλλευση	Pope <i>et al.</i> (1988), Murawski και Idoine, (1992), Gobert (1994), Rice και Gislason (1996), Gislason και Rice (1998), Bianchi <i>et al.</i> (2000)
<i>b</i>	Επίδραση αποβλήτων σε συστήματα τρεχούμενων υδάτων	DeBruyn <i>et al.</i> (2002)
<i>b</i>	Πρόβλεψη παραγωγικότητας των ιχθύων από το στοκ του φυτοπλαγκτού	Moloney και Field (1985)
<i>b</i>	Πρόβλεψη παραγωγικότητας των ιχθύων μέσω της πρωτογενούς και δευτερογενούς παραγωγικότητας	Sheldon <i>et al.</i> (1977), Borgmann (1983)
<i>b</i>	Ρυθμός θνησιμότητας	Peterson και Wroblewski (1984)
<i>b</i>	Αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας	Yvon-Durocher <i>et al.</i> (2011)
<i>b</i>	Αναλογία μάζας μεταξύ θηρευτή-θηράματος	Silvert και Platt (1978), Camacho και Solé, (2001), Benoît και Rochet (2004)
<i>b</i>	Αποδοτικότητα ανάπτυξης των ατόμων	Silvert and Platt (1980), Camacho and Sole (2001), Benoit and Rochet (2004)
<i>b</i>	Αποδοτικότητα του οικοσυστήματος	Borgmann (1987), Boudreau και Dickie (1992), Boudreau <i>et al.</i> (1991), Thiebaut και Dickie (1992, 1993), Sprules και Goyke (1994)
<i>b</i>	Ροή ανθεκτικών ρυπαντών στα ανώτερα επίπεδα του τροφικού πλέγματος	Borgmann και Whittle (1983), Borgmann (1985), Thomann (1979, 1981)
<i>b</i>	Εκροή οργανικού άνθρακα στα πελαγικά οικοσυστήματα	Frangoulis <i>et al.</i> , (2010)

Τα μικρά πελαγικά ψάρια και η διατροφή τους

Η παραγωγή των μικρών πελαγικών ιχθύων αντιπροσωπεύει ένα πολύ σημαντικό κομμάτι των παγκόσμιων εκφορτώσεων, που κυμαίνεται από το ένα τρίτο έως σχεδόν το μισό του παγκόσμιου συνόλου (Fréon and Misund, 1999). Στη Μεσόγειο θάλασσα,

τα μικρά πελαγικά αποτελούν το μεγαλύτερο μερίδιο των συνολικών εκφορτώσεων (Leonart και Μαγνου, 2003). Γαύρος, σαρδέλα, φρίσσα και παπαλίνα αντιπροσωπεύουν περίπου το 50% των συνολικών ετήσιων εκφορτώσεων. Τα είδη αυτά σχηματίζουν συχνά μικτά κοπάδια και μεταβάλλουν τη χωρική τους κατανομή ούτως ώστε να διατηρούν σταθερή την πυκνότητα των κοπαδιών τους (Giannoulaki *et al.*, 2003 και αναφορές εντός). Τα μικρά πελαγικά είναι εξαιρετικά ευκαιριακοί και ευέλικτοι θηρευτές μικρών θηραμάτων, με ικανότητα να αλλάζουν μεταξύ ενεργητικής διατροφής και φιλτραρίσματος (Nikolioudakis *et al.*, 2012, 2014, και αναφορές εντός). Η δομή και λειτουργία του πλαγκτονικού τροφικού πλέγματος ενδέχεται να επηρεάζει σημαντικά την επιλογή θηράματος των μικρών πελαγικών (“bottom-up” ρύθμιση), η επιλογή των οποίων καθορίζει τελικά τη δομή του φάσματος μεγεθών του μεσοζωοπλαγκτού (“top-down” ρύθμιση).

Τα κυριότερα μικρά πελαγικά ψάρια στο Αιγαίο είναι ο γαύρος (*Engraulis encrasicolus*) και η σαρδέλα (*Sardina pilchardus*). Η κυριότερη διαφορά μεταξύ της διατροφής των δύο αυτών ειδών στο βόρειο Αιγαίο, είναι ο υψηλός αριθμός φυτοπλαγκτονικών ατόμων στις στομαχικές κοιλότητες των ενήλικων σαρδελών και η πιο συχνή εύρεση μεγαλύτερων θηραμάτων (κυρίως νύμφες δεκαπόδων) στα στομάχια των γαύρων (Nikolioudakis *et al.*, 2012, 2014). Αυτό συμβαίνει διότι η σαρδέλα έχει αρκετά πιο πυκνές βραγχιακές άκανθες, ικανές να συλλάβουν μέχρι και νανοπλαγκτονικά θηράματα. Το γεγονός αυτό κάνει τη σαρδέλα περισσότερο ικανή για παθητική διατροφή, σε σχέση με το γαύρο που είναι πιο ενεργητικός θηρευτής. Ωστόσο, τόσο ο γαύρος όσο και η σαρδέλα ικανοποιούν τις περισσότερες από τις ενεργειακές τους ανάγκες καταναλώνοντας τα μεγαλύτερα δυνατά κωπήποδα που είναι ικανά να συλλάβουν, με το γαύρο να εκμεταλλεύεται καλύτερα το εύρος αυτών των θηραμάτων. Οι σαρδέλες τρέφονται με μικρότερα κωπήποδα (σε σχέση πάντα με το γαύρο), όχι όμως τα μικρότερα άτομα που είναι διαθέσιμα στο πεδίο. Αν και στο βόρειο Αιγαίο τα δύο αυτά είδη καλύπτουν τις ενεργειακές τους ανάγκες εκμεταλλευόμενα παρόμοιες πηγές θηραμάτων, γαύρος και σαρδέλα θεωρούνται δύο τροφικά διακριτά είδη που παρουσιάζουν επιλεκτικότητα με βάση το μέγεθος, όπου ο γαύρος στηρίζεται περισσότερο σε μεγάλα θηράματα και οι σαρδέλες εκμεταλλεύονται αποδοτικότερα τα μικρότερα ζωοπλαγκτονικά μεγέθη.

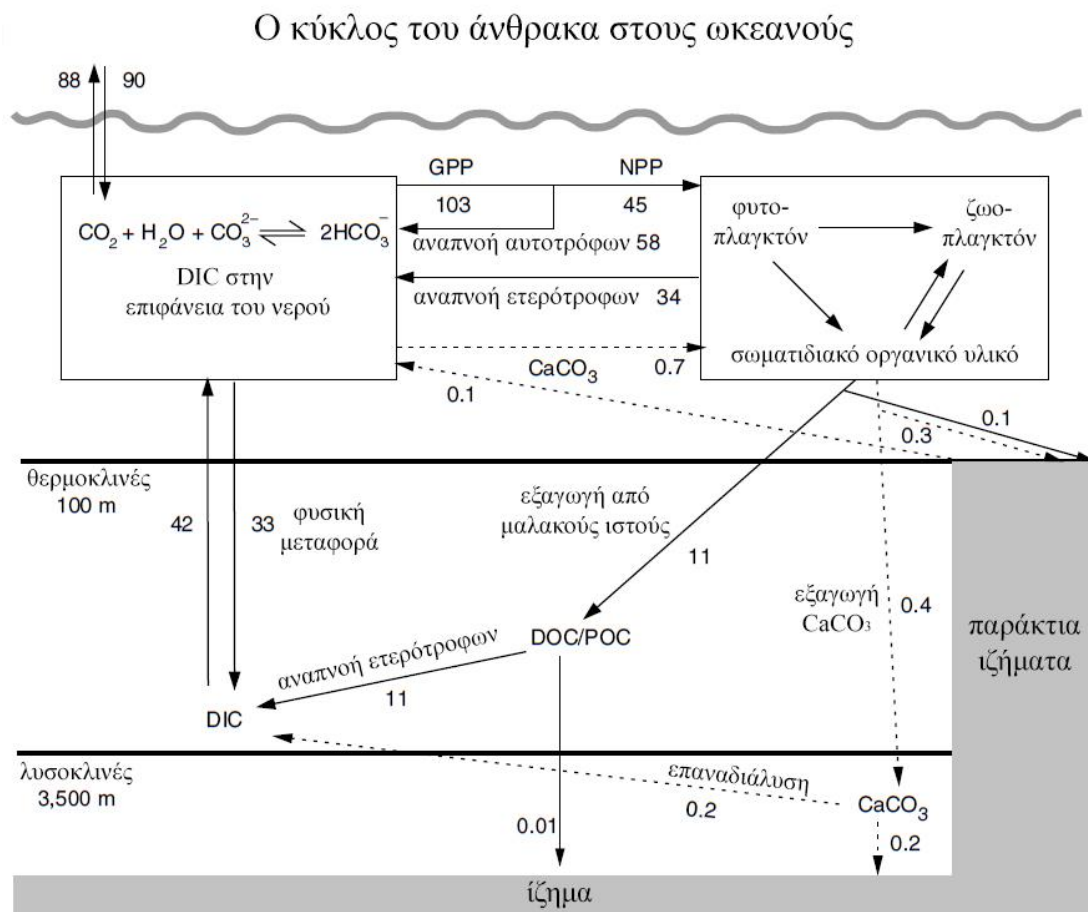
Ο κύκλος του άνθρακα στους ωκεανούς

Η μελέτη και παρακολούθηση των διάφορων συστατικών του κύκλου του άνθρακα στους ωκεανούς είναι καίριας σημασίας, τόσο για την κατανόηση των ροών ενέργειας στο οικοσύστημα, όσο και για την πρόβλεψη της κατάστασης του οικοσυστήματος σε βάθος χρόνου, ούτως ώστε να μπορούμε να εφαρμόσουμε στοχευμένες και αποτελεσματικές πολιτικές διαχείρισης στα εκμεταλλευόμενα θαλάσσια οικοσυστήματα. Η ανάγκη αυτή είναι πιο επιτακτική από ποτέ, λόγω των συνεπειών των ανθρώπινων δραστηριοτήτων στο παγκόσμιο κλίμα, όπου οι ενέργειες (ή μη-ενέργειες) που θα αναλάβουμε θα επηρεάσουν τον ανθρώπινο πολιτισμό για πολλές γενεές στο μέλλον (Falkowski *et al.*, 2000).

Ο κύκλος του άνθρακα στους ωκεανούς ξεκινά από την επιφάνεια, όπου το ατμοσφαιρικό CO₂ διαλύεται στο νερό (IPCC 3rd Assessment Report, 2001). Το διαλυμένο CO₂ στο θαλασσινό νερό βρίσκεται σε τρεις κύριες μορφές (CO₂, HCO₃⁻, CO₃²⁻), το σύνολο αυτών αποτελεί τον διαλυμένο οργανικό άνθρακα (DIC). Η διαλυτότητα του CO₂ στο νερό είναι εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία, ως εκ τούτου η μεταφορά θερμότητας μεταξύ αέρα-θάλασσας συμβάλει στο τοπικό και εποχικό μοτίβο μεταφοράς CO₂ μεταξύ αέρα-θάλασσας. Η μείωση της θερμοκρασίας των επιφανειακών υδάτων οδηγεί προς αύξηση πρόσληψης CO₂ από τους ωκεανούς, ενώ η αύξηση οδηγεί προς εκπομπή προς την ατμόσφαιρα.

Τις τοπικές και εποχικές κατανομές των ροών CO₂ οδηγούν επίσης οι βιολογικές διεργασίες (Εικ. 1). Η ακαθάριστη πρωτογενής παραγωγή (gross primary production, GPP) του φυτοπλαγκτού των ωκεανών είναι περίπου 103 PgC/yr. Μέρος αυτού επιστρέφει στη δεξαμενή του DIC μέσω της διαδικασίας της αναπνοής των αυτότροφων οργανισμών, με το υπόλοιπο να διαμορφώνει την καθαρή πρωτογενή παραγωγή (net primary production, NPP), η οποία εκτιμάται περίπου στα 45 PgC/yr. Περίπου 14 με 30% της συνολικής NPP συμβαίνει στις παράκτιες περιοχές. Ο παραγόμενος οργανικός άνθρακας είτε καταναλώνεται από το ζωοπλαγκτόν, ποσοτικά μία διαδικασία σημαντικότερη από τη βόσκηση στη χέρσο, είτε βυθίζεται ως σωματιδιακό οργανικό υλικό. Μέρος του οργανικού άνθρακα απελευθερώνεται σε διαλυμένη οργανική μορφή (dissolved organic carbon, DOC) και οξειδώνεται από τα βακτήρια, με τμήμα αυτής να καταλήγει τελικά ως καθαρή DOC παραγωγή στη ωκεάνια δεξαμενή.

Η συνολική παραγωγικότητα των ωκεανών καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την παροχή θρεπτικών από τα βαθύτερα ύδατα. Υπάρχουν αρκετά θρεπτικά συστατικά, που δυνητικά δρουν ως περιοριστικοί παράγοντες, στην πράξη όμως νιτρικά ή/και φωσφορικά είναι οι συνηθέστεροι. Το πυρίτιο διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στον περιορισμό της ανάπτυξης συγκεκριμένων φυτοπλακτονικών οργανισμών, καθορίζοντας έτσι την ποιοτική μορφή της πρωτογενούς παραγωγής και δυνητικά, το βάθος στο οποίο καταλήγει ο οργανικός άνθρακας.



Εικόνα 1. Διάγραμμα των ροών του κύκλου του άνθρακα στους ωκεανούς (μεταφρασμένο από IPCC 3rd Assessment Report, (2001)). Πλησίον των βελών που αντικατοπτρίζουν την πορεία του άνθρακα απεικονίζονται οι συγκεντρώσεις σε PgC/yr. Το CO_2 στο νερό απαντάται σε τρεις κυρίως μορφές (CO_2 , CO_3^{2-} , HCO_3^-), όπου το σύνολο τους αποτελούν τον DIC). Ένα μικρό μέρος άνθρακα δεσμεύεται σε CaCO_3 . Ο DIC μεταφέρεται στους ωκεανούς μέσω φυσικών και βιολογικών διεργασιών.

Η βύθιση του σωματιδιακού οργανικού άνθρακα (particulate organic carbon, POC) που αποτελείται από νεκρούς οργανισμούς και συσσωματώματα, σε συνδυασμό με τη βύθιση του DOC, δημιουργούν μία καθοδική ροή οργανικού άνθρακα από τα ανώτερα στρώματα των ωκεανών προς τα κατώτερα, γνωστή και ως εξαγωγική παραγωγή. Η εξαγωγική παραγωγή εκτιμάται από 10 έως 20 PgC/yr περίπου. Μόνο ένα μικρό τμήμα (περίπου 0.1 PgC) της εξαγωγικής παραγωγής καταλήγει στο ίζημα, και αυτό κυρίως στις παράκτιες ζώνες. Η αναπνοή των ετερότροφων οργανισμών σε μεγαλύτερα βάθη, μετατρέπει τον εναπομείναντα οργανικό άνθρακα πάλι σε DIC. Τελικά, και συνήθως σε μία άλλη περιοχή, αυτός ο DIC ανεβαίνει στα επιφανειακά στρώματα μέσω ανοδικών ρευμάτων, όπου μπορεί να έρθει ξανά σε ισορροπία με το ατμοσφαιρικό CO₂. Αυτοί οι μηχανισμοί, συχνά αποκαλούμενοι ως βιολογική αντλία, διατηρούν τις συγκεντρώσεις DIC στα βαθύτερα νερά υψηλές και ως αποτέλεσμα η ατμοσφαιρική συγκέντρωση CO₂ είναι 200 ppm χαμηλότερη από ότι θα ήταν απουσία αυτών των μηχανισμών.

Τέλος, μέρος του συνόλου του άνθρακα δεσμεύεται σε μορφή ανθρακικού ασβεστίου (CaCO₃) από ορισμένους θαλάσσιους οργανισμούς που σχηματίζουν κελύφη από αυτό. Αυτή η διαδικασία εξαντλεί τα επιφανειακά αποθέματα CO₃²⁻, μειώνει την αλκαλικότητα, και τείνει να αυξάνει την σχετική συγκέντρωση του CO₂, οδηγώντας σε περισσότερη εκπομπή CO₂ πίσω στην ατμόσφαιρα. Το σύνολο της εξαγωγής του οργανικού άνθρακα και της εξαγωγής του ανθρακικού ασβεστίου, αποτελεί ένα σημαντικό παράγοντα που ρυθμίζει το αποτέλεσμα της βιολογικής δραστηριότητας στην επιφανειακή pCO₂. Η παγκόσμια παραγωγή CaCO₃ έχει εκτιμηθεί στα 0.7 PgC/yr, τόσο σε ρηχά νερά, όσο και στα επιφανειακά ύδατα των βαθύτερων ωκεανών. Από αυτή την ποσότητα, το 60% περίπου συσσωρεύεται στο ίζημα. Το υπόλοιπο επαναδιαλύεται είτε στην υδάτινη στήλη, είτε εντός του ιζήματος.

Άνθρακας (οργανικός ή ανόργανος) που προέρχεται από την ξηρά εισέρχεται στους ωκεανούς μέσω των ποταμών, όσο και σε κάποιο βαθμό, μέσω των υπόγειων υδάτων. Η μεταφορά αυτή αποτελείται από μεταφορά φυσικών πηγών άνθρακα μαζί με σημαντικό ποσό ανθρωπογενών διαταράξεων. Η παγκόσμια μεταφορά φυσικών πηγών άνθρακα από τους ποταμούς προς τους ωκεανούς είναι περίπου 0.8 PgC/yr, μισό εκ του οποίου είναι οργανικής και το υπόλοιπο ανόργανης προέλευσης. Οι επιπλέον εισροές λόγω της ανθρώπινης δραστηριότητας είναι περίπου 0.1 PgC/yr (κυρίως οργανικός άνθρακας).

Το ζωοπλαγκτό καταλαμβάνει καίρια θέση στο πελαγικό τροφικό πλέγμα καθώς πρόκειται για το συνδετικό κρίκο που μεταφέρει ενέργεια από τα κατώτερα τροφικά επίπεδα και τα μονοκύτταρα άλγη, προς τα ανώτερα όπως είναι τα στοκ των πελαγικών ψαριών. Εκτός από τη θήρευση, το ζωοπλαγκτό θεωρείται ως ο σημαντικότερος περιβαλλοντικός παράγοντας που καθορίζει την ετήσια δυναμική των στοκ πολλών εμπορικά εκμεταλλευόμενων ειδών ιχθύων. Η θήρευση στο ζωοπλαγκτό επίσης καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τη σύσταση και ποσότητα της κάθετης ροής του POC στην υδάτινη στήλη. Το γεγονός αυτό, όχι μόνο τροφοδοτεί τις βενθικές βιοκοινότητες, αλλά συμβάλει και στην απομάκρυνση του πλεονάζοντος ανθρωπογενούς CO₂ από την ατμόσφαιρα μέσω της κατακρήμνισης και ταφής στο ίζημα οργανικών και ανόργανων μορφών άνθρακα.

Στόχος της εργασίας

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η μελέτη των φασμάτων μεγεθών των μεσοζωοπλαγκτονικών οργανισμών και η διερεύνηση της σχέσης τους με τη διατροφή των μικρών πελαγικών ιχθύων. Η αλληλεπίδραση των δύο αυτών παραγόντων ερευνήθηκε υπό το πρίσμα δύο περιπτώσεων με διαφορετική παραγωγικότητα και διαφορετικό βαθμό ανθρωπογενούς επιβάρυνσης.

ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Περιοχή μελέτης και στρατηγική δειγματοληψίας

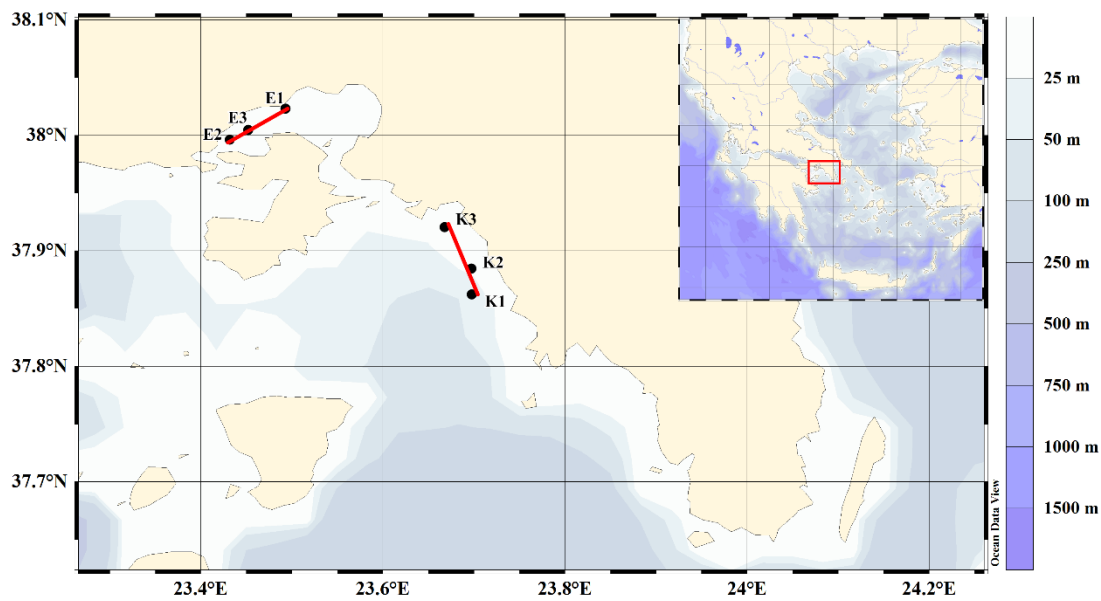
Ο Σαρωνικός κόλπος βρίσκεται στην κεντρική περιοχή του Αιγαίου (βορειοανατολική Μεσόγειος) μεταξύ 37.30'N – 38.00'N και 24.01'E – 23.00'E. Το μήκος της ακτογραμμής είναι ~270 km, η έκταση που καλύπτει είναι 2 866 km² και το μέσο βάθος ~100 m. Στο βόρειο τμήμα του, βρίσκεται ο κόλπος της Ελευσίνας (μέσο βάθος ~20 m), που διαχωρίζεται από τον υπόλοιπο κόλπο από το νησί της Σαλαμίνας και επικοινωνεί μαζί του μέσω δύο στενών καναλιών στο ανατολικό και δυτικό τμήμα. Τα νησιά Σαλαμίνα και Αίγινα, καθώς και το ~100 m ισοβαθές μεταξύ τους, χωρίζει τον εσωτερικό Σαρωνικό κόλπο σε δυτικό και ανατολικό. Ο δυτικός κόλπος είναι βαθύτερος, με μέγιστα βάθη ~220 m στο βόρειο τμήμα και ~450 m στο νότιο. Ο ανατολικός έχει πιο ομαλή βαθυμετρία, με βάθη 50 – 70 m στο βόρειο τμήμα (περιοχή Αγίου Κοσμά) και μέχρι ~200 m στο νότιο, από όπου ανοίγεται στο Αιγαίο πέλαγος (εξωτερικός Σαρωνικός). Ο κόλπος υφίσταται ισχυρή εποχική διακύμανση της θερμοκρασίας του αέρα (~0° έως ~40°C). Ως αποτέλεσμα, την περίοδο από Μάιο έως Νοέμβριο, σχηματίζεται πυκνοκλινές στην περιοχή (Paraskevoroulou *et al.*, 2014; Pavlidou *et al.*, 2010 και αναφορές εντός).

Η κυκλοφορία του νερού στον κόλπο της Ελευσίνας επηρεάζεται τόσο από τη θερμοκρασία και την αλατότητα, όσο και από τις διακυμάνσεις της διεύθυνσης και ταχύτητας του ανέμου. Τα επιφανειακά ύδατα που εισέρχονται στον κόλπο και από τα δύο κανάλια, αναμιγνύονται με τα λιγότερο αλμυρά ύδατα, και εξέρχονται ξανά από τα δύο κανάλια. Η ανταλλαγή μεταξύ των κατώτερων στρωμάτων νερού συμβαίνει κυρίως μέσω του ανατολικού καναλιού, το οποίο είναι αρκετά βαθύτερο (~25 m) από το δυτικό (~10 m). Εξαιτίας της ιδιαίτερης μορφολογίας και κυκλοφορίας νερού του κόλπου, δημιουργούνται υποξικές (εως και παροδικά ανοξικές) συνθήκες στο βαθύτερο τμήμα του κατά την περίοδο της θερινής διαστρωμάτωσης (Paraskevoroulou *et al.*, 2014; Pavlidou *et al.*, 2010 και αναφορές εντός).

Αρκετές πηγές ρύπανσης παρουσιάζονται στην ευρύτερη περιοχή του Σαρωνικού κόλπου και της Ελευσίνας. Αν και δεν υπάρχουν σημαντικές εισροές υδάτων από ποταμούς, η περιοχή λαμβάνει τα επεξεργασμένα λύματα ολόκληρης της Αθηναϊκής πόλης μέσω σημειακής πηγής σε βάθος 65 m νοτίως του μικρού νησιού της

Ψυτάλλειας, στο βορειοανατολικό τμήμα του κόλπου. Οι υπόλοιπες σημειακές πηγές ρύπανσης κατανέμονται στις ακτές, και περιλαμβάνουν μαρίνες, τουριστικές εγκαταστάσεις, εγκαταστάσεις ιχθυοτροφίων, και τα επεξεργασμένα ή μη λύματα από μικρές πόλεις και καταλύματα (SoHeIME, 2005). Η βιομηχανική περιοχή των Αθηνών εντοπίζεται στην περιοχή της Ελευσίνας. Οι δραστηριότητες που πραγματοποιούνται στην περιοχή περιλαμβάνουν ναυπηγεία, διυλιστήρια καυσίμων, βιομηχανίες επεξεργασίας τροφίμων, μεταλλουργία, παραγωγή τσιμέντου, παρασκευή καλωδίων, ανακύκλωση απορριμμάτων, χώρους υγειονομικής ταφής και στρατιωτικές εγκαταστάσεις (που περιλαμβάνουν ναυτική βάση και αεροδρόμιο). Για το λόγο αυτό η Ελευσίνα θεωρείται ως το πιο επιβαρυνμένο τμήμα της ευρύτερης περιοχής του Σαρωνικού. Μη σημειακές πηγές ρύπανσης αποτελούν η υψηλή ένταση των θαλάσσιων μεταφορών στην περιοχή και η ατμοσφαιρικές εναποθέσεις μετάλλων από τις πλησίον αστικές περιοχές. Η κατανομή των βαρέων μετάλλων στην περιοχή ακολουθεί μία διαβάθμιση από βορά προς νότο, με την Ελευσίνα να παρουσιάζει μεγαλύτερες συγκεντρώσεις Cu, Ni και Zn. Οι εισροές Cd και Pb προέρχονται κυρίως από τα λύματα που απορρίπτονται στην περιοχή της Ψυτάλλειας, και δε παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές μεταξύ του κόλπου της Ελευσίνας και του ανατολικού τμήματος του εσωτερικού Σαρωνικού κόλπου (Paraskevoudou *et al.*, 2014).

Δύο ερευνητικές αποστολές έλαβαν χώρα στην ευρύτερη περιοχή του Σαρωνικού Κόλπου (Αιγαίο Πέλαγος), κατά το χρονικό διάστημα 7-10 Δεκεμβρίου 2012 και 5-9 Σεπτεμβρίου 2013 επί του ερευνητικού σκάφους Φιλία (R/V PHILIA). Οι δύο αυτές περιόδους όπου πραγματοποιήθηκαν οι αποστολές ήταν αντιπροσωπευτικές της διαστρωμάτωσης και μίξης της υδάτινης στήλης στην περιοχή, επιτρέποντας τη σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών δειγματοληπτικών συνθηκών από άποψη υδρογραφίας και οξυγόνωσης της στήλης. Σε κάθε περίοδο, τα μικρά πελαγικά ψάρια συλλαμβάνονταν μέσω πελαγικής τράτας σε δύο διαφορετικές τοποθεσίες: α) στον Κόλπο της Ελευσίνας και β) στην περιοχή του Αγίου Κοσμά, και οι δύο από τις οποίες βρίσκονται στην ευρύτερη περιοχή του Σαρωνικού Κόλπου (Εικ. 2). Παράλληλα με τις πελαγικές τράτες για τη σύλληψη των μικρών πελαγικών ιχθύων, πραγματοποιήθηκαν επιπλέον δειγματοληψίες ενός εύρους βιοτικών και αβιοτικών παραγόντων σε τρεις σταθμούς ανά τοποθεσία οι οποίοι βρίσκονταν μεταξύ της διαδρομής της τράτας.



Εικόνα 2. Χάρτης βαθυμετρίας της ευρύτερης περιοχής του Σαρωνικού Κόλπου. Με *E* απεικονίζονται οι σταθμοί στο εσωτερικό του κόλπου της Ελευσίνας και *K* οι σταθμοί στην περιοχή του Αγίου Κοσμά. Με κόκκινη γραμμή απεικονίζεται η διαδρομή που ακολούθησε η τράτα μεταξύ των τριών σταθμών κάθε περιοχής.

Για τη μέτρηση θερμοκρασίας, αλατότητας, φθορισμού και διαλυμένου οξυγόνου της υδάτινης στήλης σε κάθε σταθμό χρησιμοποιήθηκε μία συστοιχία SBE 25 Sealogger CTD. Για την εκτίμηση της αφθονίας πικο-, νανο- και μικροπλαγκτού, δείγματα νερού ελήφθησαν μέσω φιαλών Niskin σε τρία διακριτά βάθη που καθορίζονταν από τις υδρολογικές συνθήκες κάθε σταθμού κατά τη δειγματοληπτική περίοδο. Τα δειγματοληπτικά βάθη καθορίστηκαν στο πεδίο, ελέγχοντας το υδρολογικό προφίλ που λαμβάνονταν από τη συστοιχία CTD σε πραγματικό χρόνο, με τέτοιο τρόπο ούτως ώστε δείγματα νερού να ληφθούν άνω και κάτω του θερμοκλινούς. Κάθετες σύρσεις δικτύων τύπου WP2 και ανοίγματος ματιού 45 και 200 μm πραγματοποιήθηκαν για τη συλλογή μικρο- και μεσο- μεταζωοπλαγκτονικών οργανισμών (Nikolioudakis *et al.*, 2011) σε όλη τη στήλη άνω και κάτω του θερμοκλινούς. Αμέσως μετά τη συλλογή, κάθε δείγμα χωρίζονταν στα δύο. Το πρώτο υποδείγμα χρησιμοποιούνταν για εκτίμηση βιομάζας, και το δεύτερο διατηρούνταν σε 4% διάλυμα φορμαλδεΐδης με ρυθμιστικό βόρακα.

Μεθοδολογία συντήρησης και ανάλυσης δειγμάτων

Πικο- και νανοπλαγκτονικά δείγματα, που περιέχουν ένα εύρος αυτότροφων και ετερότροφων οργανισμών, μονιμοποιήθηκαν με χρήση 0.2 μm προφίλτραρισμένης

25% γλουταραλδεϋδης, τελικής συγκέντρωσης 0.5% (Marie *et al.*, 1997) . Τα δείγματα παρέμεναν μετά στους 4 °C για περίπου 45 λεπτά, στη συνέχεια καταψύχονταν βαθιά σε υγρό άζωτο και αποθηκεύονταν τελικά στους -80 °C μέχρι την καταμέτρηση τους.

Για την καταμέτρηση των ετερότροφων πικοπλαγκτονικών οργανισμών (που περιέχουν ετερότροφα βακτήρια και πικοευκαρυωτικά κύτταρα) τα δείγματα αφήνονταν να ξεπαγώσουν σε θερμοκρασία δωματίου, σημαίνονταν με χρώση SYBR Green I (Molecular Probes) σε αραιώση $4 \cdot 10^{-4}$ από το αρχικό διάλυμα σε ρυθμιστικό διάλυμα Tris-EDTA (TE, Sigma-Aldrich), και επωάζονταν για 20 λεπτά σε θερμοκρασία δωματίου υπό συνθήκες σκότους (Marie *et al.*, 1997). Τα δείγματα αραιώνονταν σε ρυθμιστικό διάλυμα TE, όποτε αυτό καθίσταντο αναγκαίο ούτως ώστε να διατηρηθεί ο ρυθμός καταμέτρησης σωματιδίων σε <1000 ανιχνεύσεων ανά δευτερόλεπτο. Η καταμέτρηση των δειγμάτων των αυτότροφων πικοπλαγκτονικών οργανισμών (περιλαμβάνουν αυτότροφα βακτήρια και πικοευκαρυωτικά κύτταρα) πραγματοποιήθηκε χωρίς να προηγηθεί χρώση, αξιοποιώντας το χαρακτηριστικό φθορισμό της χλωροφύλλης και της φυκοερυθρίνης που περιέχεται στα κύτταρα τους.

Η καταμέτρηση των πικοπλαγκτονικών οργανισμών πραγματοποιήθηκε σε κυτταρομετρητή ροής τύπου FACS Calibur (Becton Dickinson), εξοπλισμένο με αεροψυχόμενο λέιζερ στα 488 nm και τυπική εγκατάσταση φίλτρων, μέσω της συμβατικής άσκησης αέριας πίεσης για ένα με τρία λεπτά. Ο ρυθμός ροής καθοριζόταν σε ημερήσια βάση και η βαθμονόμηση του μετρητή φθορισμού πραγματοποιούνταν με τη βοήθεια πολυφθορίζοντων σφαιριδίων (1 μm , Polysciences). Το πρόγραμμα Cell Quest Pro (Becton Dickison) χρησιμοποιήθηκε για την απόκτηση και επεξεργασία των δεδομένων της κυτταρομετρίας ροής.

Τα δείγματα των αυτότροφων και ετερότροφων νανοπλαγκτονικών κυττάρων αναλύθηκαν σύμφωνα με ένα τροποποιημένο πρωτόκολλο κυτταρομετρίας (Zubkon και Burkill, 2006) σύμφωνα με το οποίο τα μονιμοποιημένα δείγματα ξεπαγώνονταν σε θερμοκρασία δωματίου, βάφονταν με χρώση SYBR Green I σε αραιώση $2 \cdot 10^{-4}$ επί του αρχικού διαλύματος σε ρυθμιστικό διάλυμα TE, παρουσία κιτρικού καλίου τελικής συγκέντρωσης 30 mM, και επωάζονταν για 60 λεπτά σε θερμοκρασία δωματίου υπό συνθήκες σκότους. Μία σύριγγα 5 ml γεμίζονταν με το σημασμένο με χρώση δείγμα και τοποθετούνταν σε μία αντλία σύριγγας (Raze Scientific Instruments). Η αντλία αυτή συνδέονταν με το όργανο FACS Calibur μέσω αγωγών σιλικόνης έτρεχε με

ταχύτητα 1 ml ml^{-1} για 1 λεπτό, έπειτα από σταθεροποίηση του ρυθμού ροής. Τα αυτότροφα νανοπλαγκτονικά κύτταρα διακρίνονταν από τα ετερότροφα με βάση τα γραφήματα των κυτταρομετρικών δεδομένων για πράσινο και κόκκινο φθορισμό. Ένα μίγμα σφαιριδίων διαμέτρου 0.5 και 1 μm (Polysciences) χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση του οργάνου. Το πρόγραμμα Cell Quest Pro (Becton Dickison) χρησιμοποιήθηκε για την απόκτηση και επεξεργασία των δεδομένων της κυτταρομετρίας ροής.

Για την καταμέτρηση των διατόμων, δινομαστιγωτών και βλεφαριδωτών, τα δείγματα συντηρούνταν σε όξινο διάλυμα Lugol 2% και αναγνωρίζονταν στο κατώτερο δυνατό ταξινομικό επίπεδο κάτω από ανάστροφο μικροσκόπιο, έπειτα από κατακρήμνιση από 10 έως 100 ml διαλύματος, ανάλογα με την πυκνότητα του δείγματος.

Για την καταμέτρηση της αφθονίας των οργανισμών που συγκροτούν τις διάφορες λειτουργικές ομάδες της μεταζωοπλαγκτονικής βιοκοινότητας (ναύπλιοι, κωπηποδήτες, μεγαλύτεροι ναύπλιοι, κωπηλάτες, οστρακώδη, κλαδοκεραιωτά, κωπήποδα, προνύμφες δεκαπόδων, σάλπες και χαιτόγναθα) καθώς και την εκτίμηση της βιομάζας των ατόμων της κάθε ομάδας χρησιμοποιήθηκε μία ημι-αυτόματη μέθοδος ανάλυσης εικόνας (Frangoulis *et al.*, 2010). Αρχικά το δείγμα ξεπλενόταν με απιονισμένο νερό για να απομακρυνθεί η φορμόλη. Τμήμα του δείγματος τοποθετούνταν αραιωμένο σε καπάκια πλαστικών τρυβλίων, επιλεγμένα ούτως ώστε να φέρουν ελάχιστες παραμορφώσεις στην επιφάνειά τους. Η αραιώση του δείγματος επιλεγόταν με τέτοιο τρόπο ούτως ώστε να καταμετρώνται τελικά τουλάχιστο 500 άτομα. Εν συνεχεία το δείγμα σαρωνόταν σε εκτυπωτή υψηλής ευκρίνειας Epson Perfection 4990 Photo στα 2400 ή 4800 dpi, ανάλογα αν το δείγμα προερχόταν από δίκτυ με διάμετρο ματιού 200 ή 45 μm αντίστοιχα, με τη βοήθεια του προγράμματος Epson Scan. Οι παραγόμενες εικόνες αναλύονταν στο πρόγραμμα ανάλυσης εικόνας Image Pro Plus (v.6 και v.6.2), όπου τα αντικείμενα κατανέμονταν αρχικά αυτόματα ανά μέγεθος αντικειμένου, εν συνεχεία ο χρήστης αναγνώριζε και ταξινομούσε τα αντικείμενα στις αντίστοιχες ταξινομικές ομάδες και τέλος, το πρόγραμμα εξήγαγε αυτόματα τα εικονομετρικά χαρακτηριστικά των αντικειμένων σε ειδικά διαμορφωμένο φύλλο MS Excel.

Όσον αφορά τους ιχθύες, πραγματοποιήθηκαν δυο με τρεις πελαγικές σύρσεις (ανάλογα με τη συλληψιμότητα) για κάθε συνδυασμό περιόδου-τοποθεσίας. Στο κατάστρωμα, η καλάδα ταξινομούνταν σε επίπεδο είδους, ζυγίζονταν και αμέσως μετά, τουλάχιστο 20 άτομα ανά είδος (όπου υπήρχαν) καταψύχονταν στους -35 °C για να χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση των στομαχικών περιεχομένων τους.

Για την εκτίμηση της κατανομής των ιχθύων και του υπολογισμού της συνολικής βιομάζας κάθε είδους, τόσο στον κόλπο της Ελευσίνας όσο και στην ευρύτερη περιοχή του κόλπου του Σαρωνικού, ελήφθησαν ακουστικά δεδομένα, η μεθοδολογία συλλογής και επεξεργασίας των οποίων περιγράφονται αναλυτικά στους Tsagarakis *et al.* (2015). Ταξινομημένα άτομα κάθε είδους (~ 200 άτομα, όπου υπήρχαν, ή το σύνολο τους εάν ήταν λιγότερα) ζυγίζονταν και μετρούνταν το μήκος τους, ούτως ώστε να υπολογιστεί η σχέση μήκους-βάρους που χαρακτηρίζει τα είδη της περιοχής. Όταν ο αριθμός ατόμων ήταν χαμηλός, χρησιμοποιούνταν σχέσεις μήκους-βάρους από τη διαδικτυακή βάση δεδομένων Fishbase.org. Τα δεδομένα αυτά ανάγονταν στο σύνολο της καλάδας και εν συνεχεία χρησιμοποιούνταν για τον υπολογισμό της βιομάζας των ειδών σε κάθε περιοχή με τη βοήθεια των ακουστικών δεδομένων. Η βιομάζα αυτή χρησιμοποιήθηκε αργότερα για την εκτίμηση της πραγματικής συγκέντρωσης βιομάζας άνθρακα ανά m³ ανά περιοχή και για την κατασκευή των κλάσεων του NB-SS. Η συγκέντρωση βιομάζας C (mg) ανά m³ εκτιμήθηκε χρησιμοποιώντας ένα μέσο βάθος ανά περιοχή (20 m για τον κόλπο της Ελευσίνας, 85 m για την ευρύτερη περιοχή του Σαρωνικού κόλπου) και με τις κατάλληλες μετατροπές, όπως αναφέρονται παρακάτω (Πιν. 2). Οι ιχθύες θεωρήθηκε ότι εκμεταλλεύονται όλο το διαθέσιμο χώρο της ευρύτερης περιοχής για τη διατροφή τους. Η περιοχή του κόλπου της Ελευσίνας με την υπόλοιπη ευρύτερη περιοχή του Σαρωνικού κόλπου, θεωρήθηκε ότι διατηρούν διακριτούς πληθυσμούς μικρών πελαγικών ιχθύων, ούτως ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση μεταξύ τους.

Στο εργαστήριο, οι ιχθύες ξεπαγώνονταν, τα στομάχια τους ανοίγονταν και τα θηράματα τους αποθηκεύονταν σε 4% διάλυμα φορμαλδεΐδης με ρυθμιστικό βόρακα για μετέπειτα έλεγχο. Η αναγνώριση των μεσοζωοπλαγκτονικών θηραμάτων πραγματοποιήθηκε μέσω του προγράμματος ανάλυσης εικόνας, με τον ίδιο τρόπο που περιγράφεται ανωτέρω. Τα φυτοπλαγκτονικά θηράματα, έπειτα από προκαταρκτική εξέταση, δεν ελήφθησαν υπόψη, καθώς σαρδέλα και γαύρος στην Ανατολική Μεσόγειο βασίζουν την πρόσληψη άνθρακα από τα ζωοπλαγκτονικά θηράματα τους

(Nikolioudakis *et al.*, 2012, 2014). Μόνο τα περιεχόμενα των στομάχων ελήφθησαν υπόψη, ενώ τα εντερικά και οισοφαγικά περιεχόμενα απορρίπτονταν για να μειωθεί το πιθανό σφάλμα που θα προέκυπτε από το διαφορετικό ρυθμό πέψης και ταχύτητας διόδου από το πεπτικό σύστημα, καθώς και η τροφοληψία στο σάκο της τράτας κατά τη διάρκεια της σύρσης (Hyslop, 1980). Δεν καταγράφηκαν σημάδια γαστροοισοφαγικής παλινδρόμησης εξαιτίας του δειγματοληπτικού στρες. Μη αναγνωρίσιμο υλικό ήταν παρόν στην πλειονότητα των στομαχικών περιεχομένων (κυρίως υπολείμματα φυτοπλαγκτού και ζωοπλαγκτού), ωστόσο το υλικό αυτό δεν ελήφθησε υπόψη (Van Der Lingen, 2002). Τα στομαχικά περιεχόμενα των ατόμων κάθε σύρσης συνενώθηκαν, καθώς οι διαφορές της διαίτας μεταξύ των ατόμων είναι μικρές στα μικρά πελαγικά εντός της ίδιας καλάδας (π.χ. Louw *et al.*, 1998, Van Der Lingen, 2002). Αν και ο αριθμός των ιχθύων ανά είδος ήταν αρκετός για να αξιοποιηθεί για τη σύγκριση μεταξύ των δειγματοληπτικών περιοχών και περιόδων, η κατάσταση των θηραμάτων στο εσωτερικό των στομάχων ήταν πολύ κακή, καθιστώντας την αναγνώριση τους αδύνατη. Από τα συλληφθέντα είδη, μόνο οι σαρδέλες ήταν επαρκείς σε αριθμό και με τα στομαχικά τους περιεχόμενα σε αναγνωρίσιμη κατάσταση σε μία σύρση για κάθε τοποθεσία το Δεκέμβριο του 2012. Το μόνο επιπλέον είδος που χρησιμοποιήθηκε στη μετέπειτα ανάλυση ήταν ο γαύρος, που πιάστηκε εντός του Κόλπου της Ελευσίνας το Δεκέμβριο του 2012 σε μία σύρση, όπου τα στομαχικά περιεχόμενα τους δεν υπέστησαν πέψη. Το δείγμα αυτό χρησιμοποιήθηκε για τη σύγκριση των διατροφικών συνηθειών μεταξύ των δύο ειδών στην ίδια περιοχή και περίοδο.

Μετατροπές αφθονίας οργανισμών σε μονάδες βιομάζας άνθρακα

Για τη μετατροπή της αφθονίας των οργανισμών σε βιομάζα άνθρακα, χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές προσεγγίσεις, ανάλογα με τους περιορισμούς της κάθε μεθοδολογίας που χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση αφθονίας και του μεγέθους των εκάστοτε ομάδων οργανισμών. Για τις ομάδες μονοκύτταρων πικο- και νανοπλαγκτονικών οργανισμών μετατράπηκαν οι μονάδες αφθονίας σε μονάδες βιομάζας άνθρακα χρησιμοποιώντας μία σταθερή τιμή άνθρακα ανά κύτταρο, χαρακτηριστική για την κάθε ομάδα (Πιν. 2.). Για τα άτομα διατόμων, δινομαστιγωτών και βλεφαριδωτών μετρήθηκαν η αφθονία τα εικονομετρικά τους χαρακτηριστικά κάτω από ανάστροφο μικροσκόπιο με τη βοήθεια του προγράμματος ImagePro Plus (v. 6.2),

Πίνακας 2. Οι συντελεστές μετατροπής μεγέθους σε βιομάζα άνθρακα που χρησιμοποιήθηκαν για τους αντίστοιχους οργανισμούς στην παρούσα εργασία. V: ατομικός όγκος, d: πλάτος, h: μήκος, B: βάρος, V_{total} : συνολικός όγκος ατόμων της λειτουργικής ομάδας, WW: υγρό βάρος, DW: ξηρό βάρος.

Ομάδα/Είδος	Συντελεστές μετατροπής	Πηγές
ετερότροφα βακτήρια	μέσο βάρος C ανά κύτταρο, $2 \cdot 10^{-11}$ mgC	Lee και Fuhrman (1987)
<i>Prochlorococcus sp.</i>	μέσο βάρος C ανά κύτταρο, $3 \cdot 10^{-11}$ mgC	Campbell <i>et al.</i> (1994)
<i>Synechococcus sp.</i>	μέσο βάρος C ανά κύτταρο, $2.5 \cdot 10^{-10}$ mgC	Kana και Glibert (1987)
πικοετερότροφοι και πικοαυτότροφοι μονοκύτταροι	μέσο βάρος C ανά κύτταρο, $6 \cdot 10^{-10}$ mgC	Caron <i>et al.</i> (1995)
νανοετερότροφοι και νανοαυτότροφοι μονοκύτταροι	μέσο βάρος C ανά κύτταρο, $1.3 \cdot 10^{-8}$ mgC	Caron <i>et al.</i> (1995)
βλεφαριδιωτά, δινομαστιγιωτά	υπολογισμός βιοόγκου (επίμηκες σφαιροειδές): $V = \frac{\pi}{6} \cdot d^2 \cdot h$	Hillebrand <i>et al.</i> (1999)
	μετατροπή βιοόγκου σε βιομάζα άνθρακα βλεφ.: $\log(B) = (0.841 \cdot \log(V) - 0.168)/10^{-9}$ δινο: $\log(B) = (0.864 \cdot \log(V) - 0.353)/10^{-9}$	Menden-Deuer και Lessard (2000)
διάτομα	υπολογισμός βιοόγκου (οβάλ κυλινδρικό): $V = \pi \cdot d^2 \cdot \left(\frac{h}{4} + \frac{d}{6}\right)$	Hillebrand <i>et al.</i> (1999)
	μετατροπή βιοόγκου σε βιομάζα άνθρακα: $\log(B) = (0.811 \cdot \log(V) - 0.541)/10^{-9}$	Menden-Deuer και Lessard (2000)
ναύπλιοι, μικρά κωπήποδα, μεγάλοι ναύπλιοι, οστρακώδη, κωπήποδα, προνύμφες δεκαπόδων	υπολογισμός βιοόγκου (επίμηκες σφαιροειδές): $V = \frac{\pi}{6} \cdot d^2 \cdot h$	Alcaraz <i>et al.</i> (2003)
	μετατροπή βιοόγκου σε βιομάζα άνθρακα: $B = V \cdot \left(\frac{V_{total} \cdot 0.078 + 0.0825}{V_{total}}\right)$	
κωπηλάτες	μετατροπή μήκους νουκλεονίου σε βιομάζα άνθρακα: $B = 1,06 \cdot 10^{-4} \cdot (h \cdot 10^3)^{2.6}$	Lombard <i>et al.</i> (2009)
κλαδοκεραιωτά	μετατροπή μήκους σε βιομάζα άνθρακα: $\log(B) = (4.51 \cdot \log(h) - 12.74)/10^3$	Uye (1982)
σάλπες	υπολογισμός βιοόγκου νουκλεονίου (επίμηκες σφαιροειδές): $V = \frac{\pi}{6} \cdot d^2 \cdot h$	Alcaraz <i>et al.</i> (2003)
	μετατροπή βιοόγκου σε βιομάζα άνθρακα: $B = V \cdot \left(\frac{V_{total} \cdot 0.078 + 0.0825}{V_{total}}\right)$	
χαιτόγναθα	μετατροπή μήκους σε βιομάζα άνθρακα: $\log(B) = (3.16 \cdot \log(h) - 1.29)/10^3$	Uye (1982)

Πίνακας 2. (Συνέχεια)

Ομάδα/Είδος	Συντελεστές μετατροπής	Πηγές
<i>Engraulis encrasicolous</i>	υγρό σε ξηρό βάρος, WW·0.240	Brey (2001)
	ξηρό βάρος σε βιομάζα άνθρακα, DW·0.4	Brey <i>et al.</i> (2010)
<i>Sardina pilchardus</i>	υγρό σε ξηρό βάρος, WW·0.347	Brey (2001)
	ξηρό βάρος σε βιομάζα άνθρακα, DW·0.4	Brey <i>et al.</i> (2010)
<i>Sardinella aurita</i>	υγρό σε ξηρό βάρος, WW·0.304	Brey (2001)
	ξηρό βάρος σε βιομάζα άνθρακα, DW·0.4	Brey <i>et al.</i> (2010)
<i>Boops boops</i>	υγρό σε ξηρό βάρος, WW·0.330	Brey (2001)
	ξηρό βάρος σε βιομάζα άνθρακα, DW·0.4	Brey <i>et al.</i> (2010)
<i>Spicara smaris</i>	υγρό σε ξηρό βάρος, WW·0.347	Brey (2001)
	ξηρό βάρος σε βιομάζα άνθρακα, DW·0.4	Brey <i>et al.</i> (2010)
<i>Trachurus mediterraneus</i>	υγρό σε ξηρό βάρος, WW·0.345	Brey (2001)
	ξηρό βάρος σε βιομάζα άνθρακα, DW·0.4	Brey <i>et al.</i> (2010)
<i>Scomber colias</i>	υγρό σε ξηρό βάρος, WW·0.365	Brey (2001)
	ξηρό βάρος σε βιομάζα άνθρακα, DW·0.4	Brey <i>et al.</i> (2010)

εν συνεχεία υπολογίστηκε ο βιοόγκος των ατόμων και τέλος από την αφθονία και το βιοόγκο υπολογίστηκε η βιομάζα άνθρακα. Το μέγεθος των ατόμων μικρο- και μέσο-μεταζωοπλαγκτονικών οργανισμών μετατράπηκε σε βιομάζα μέσω εξισώσεων μετατροπής μεγέθους σε βιομάζα, χρησιμοποιώντας τα εικονομετρικά χαρακτηριστικά τους, ανάλογα με τη ομάδα οργανισμών στην οποία ανήκαν. Για τους ιχθύες χρησιμοποιήθηκαν εξισώσεις μετατροπής υγρού σε ξηρό βάρος και εν συνεχεία ξηρού βάρους σε βιομάζα άνθρακα, ανάλογα με το είδος στο οποίο ανήκαν τα άτομα.

Κατασκευή του κανονικοποιημένων φασμάτων βιομάζας

Για την κατασκευή του NB-SS οι διακριτές τιμές βιομάζας άνθρακα ανά άτομο πρέπει αρχικά να ομαδοποιηθούν σε λογαριθμικές κλάσεις βιομάζας C. Το εύρος των κλάσεων (Δw) επιλέγεται με τέτοιο τρόπο, ούτως ώστε να προκύπτουν οι περισσότερες δυνατές κλάσεις βιομάζας, χωρίς ωστόσο να δημιουργούνται κενά μεταξύ των κλάσεων. Το βήμα που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των λογαριθμικών κλάσεων ήταν $0,99658 \log_2(\text{mg C ind}^{-1})$, η επόμενη λογαριθμική κλάση δηλαδή είναι κατά αυτό τον αριθμό μεγαλύτερη από την προηγούμενη. Με τον τρόπο αυτό, τα δεδομένα ομαδοποιήθηκαν σε ~32 μη κενές κλάσεις, με τη μικρότερη να ισούται με $-35,651 \log_2(\text{mg C ind}^{-1})$ και τη μεγαλύτερη $14,178 \log_2(\text{mg C ind}^{-1})$. Οι κενές κλάσεις (μηδενικές) δε χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση. Επειδή κάθε δειγματοληπτικό

εργαλείο συλλαμβάνει ικανοποιητικά τους οργανισμούς μέσα σε ένα συγκεκριμένο εύρος μεγεθών (Gallienne and Robins, 2001, Harris *et al.*, 2000) τα άτομα που ήταν μικρότερα ή πολύ μεγαλύτερα του εύρους αυτού, δε λαμβάνονταν υπόψη για την κατασκευή του NB-SS (San Martin *et al.*, 2006). Οι κλάσεις των ιχθύων συμπεριλήφθηκαν μόνο στην ανάλυση του συνόλου της υδάτινης στήλης, καθώς θεωρήθηκε ότι αξιοποιούν όλο το ύψος της στήλης για τη μετακίνηση και τη διατροφή τους.

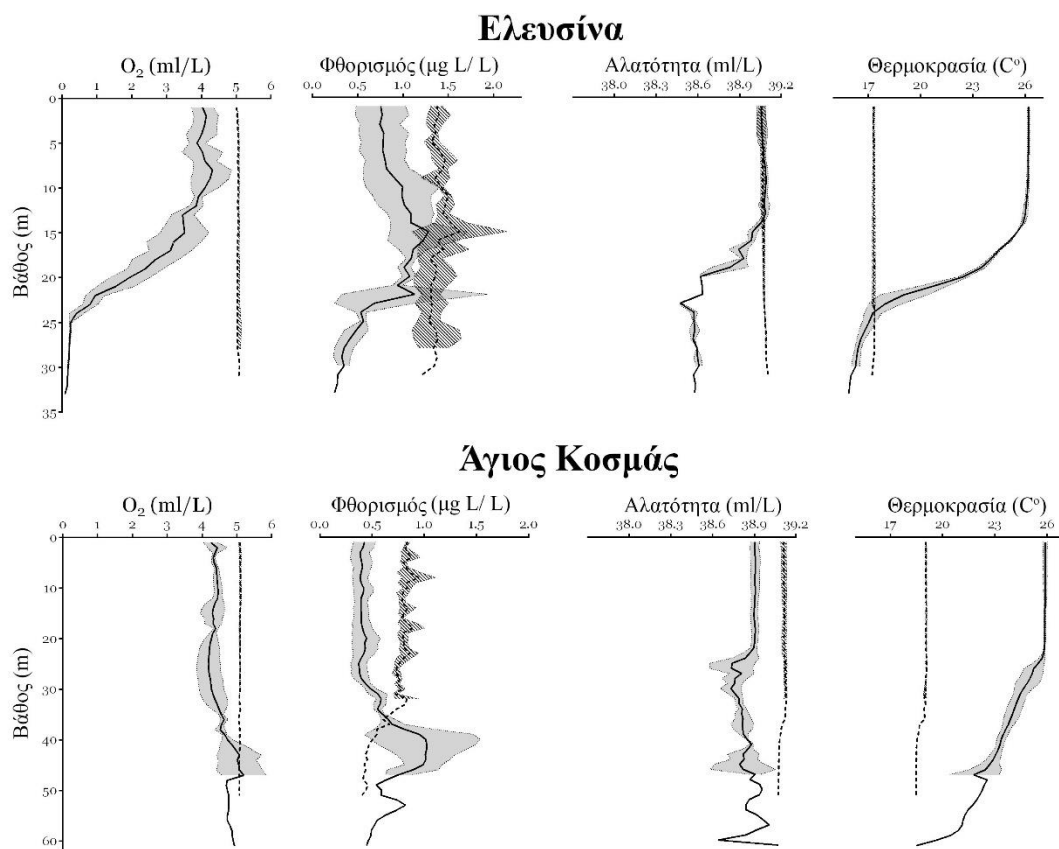
Κάθε σύνολο διακριτών τιμών μετρήσεων που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του NB-SS, αναφέρεται σε ένα υποσύνολο των οργανισμών που συνελήφθησαν κατά τη δειγματοληψία (πάντα >500 άτομα για τους πλαγκτονικούς οργανισμούς, σε όλες τις περιπτώσεις). Ως εκ τούτου, ένας παράγοντας αραιώσης προέκυπτε, με τον οποίο πολλαπλασιάζοντας τα δεδομένα των κλάσεων διορθώνονταν για να ανταποκρίνονται στην ποσότητα βιομάζας ανά μονάδα όγκου στο πεδίο.

Στην περίπτωση των πλαγκτονικών οργανισμών, ο παράγοντας αραιώσης προέκυψε από τον όγκο του υποδείγματος σε σχέση με τον όγκο δείγματος. Στην περίπτωση των ιχθύων, ως υποδείγμα θεωρήθηκε ο αριθμός των ατόμων των ειδών της καλάδας από τα οποία υπολογίστηκαν οι σχέσεις μήκους – βάρους, τα οποία αξιοποιήθηκαν επίσης για την κατασκευή των κλάσεων βιομάζας των ιχθύων. Θεωρώντας αυτά το υποδείγμα μας, ο παράγοντας αραιώσης προκύπτει διαιρώντας την ποσότητα βιομάζας C (mg) ανά είδος στο υποδείγμα με τη συγκέντρωση βιομάζας C (mg) ανά m³ που προέκυψε από τα ηχοβολιστικά δεδομένα (όπως περιγράφεται παραπάνω).

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Φυσικοχημικό προφίλ των περιοχών έρευνας

Στην Εικόνα 3 φαίνεται η κατακόρυφη κατανομή των παραμέτρων οξυγόνου, φθορισμού, αλατότητας και θερμοκρασίας, για τις δύο περιοχές. Κατά τους καλοκαιρινούς μήνες παρατηρείται πιο έντονη στρωμάτωση στον κόλπο της Ελευσίνας. Σχηματίζεται ένα ενδιάμεσο στρώμα που ξεκινά περίπου από τα 15 μέτρα βάθος μέχρι τα 25 μέτρα, απ' όπου ξεκινάει το κατώτερο στρώμα.



Εικόνα 3. Κατακόρυφη κατανομή οξυγόνου, φθορισμού, αλατότητας και θερμοκρασίας στην υδάτινη στήλη των δύο περιοχών μελέτης, Ελευσίνας (επάνω) και Αγίου Κοσμά (κάτω). Με συμπαγή μαύρη γραμμή απεικονίζεται η καλοκαιρινή περίοδος (Σεπτέμβριος) και η διακύμανση της με γκριζα σκιά. Με διακεκομμένη γραμμή απεικονίζεται η χειμερινή περίοδος (Δεκέμβριος) και η διακύμανση της με μαύρη γραμμική σκίαση.

Στο διάστημα αυτό, στην Ελευσίνα η θερμοκρασία πέφτει από ~ 26° σε ~17° C, και συνεχίζει να πέφτει μέχρι λίγο κάτω από τους 16° C στο βαθύτερο σημείο. Η αλατότητα ακολουθεί παρόμοιο προφίλ, πέφτοντας από ~39 σε ~38.6 ml/L. Το διαλυμένο οξυγόνο από ~4 ml/L στο επιφανειακό στρώμα, ξεκινά να μειώνεται από τα 15 μέτρα βάθος και σχεδόν μηδενίζεται από τα 25 μέτρα και κάτω (0.2 ml/L και χαμηλότερα), δημιουργώντας έντονες συνθήκες υποξίας, φαινόμενο καλά καταγεγραμμένο στο παρελθόν (Pavlidou *et al.*, 2010). Το προφίλ φθορισμού υποδεικνύει ότι η πρωτογενής παραγωγή είναι μάλλον πιο έντονη άνω του θερμοκλινούς, με μέγιστη τιμή 1.28 (± 0.42) $\mu\text{g L/L}$ στα 15 μέτρα. Κατά τη χειμερινή περίοδο η υδάτινη στήλη παρουσιάζεται ομογενοποιημένη, με θερμοκρασία ~17.3° C, αλατότητα ~39 ml/L, διαλυμένο οξυγόνο ~5 ml/L και το φθορισμό να υποδεικνύει ότι η πρωτογενής παραγωγή είναι μάλλον όμοια σε ολόκληρο το ύψος της στήλης.

Το προφίλ για την περιοχή του Αγίου Κοσμά είναι αρκετά διαφορετικό από το αντίστοιχο του κόλπου της Ελευσίνας. Η στρωμάτωση είναι εμφανώς ασθενέστερη κατά τους θερινούς μήνες. Η θερμοκρασία ξεκινά να μειώνεται σταδιακά από τα 25 μέτρα μέχρι το βυθό (61 μέτρα), από τους ~25.8° στους ~18.5° C αντίστοιχα. Η αλατότητα κινείται από ~38.9 έως ~38.6 ml/L. Από το προφίλ του οξυγόνου φαίνεται ότι το ανώτερο στρώμα έχει χαμηλότερη συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου (~4.3 ml/L) από τα κατώτερα στρώματα (~4.8 ml/L). Η φωτοσυνθετική δραστηριότητα φαίνεται να λαμβάνει χώρα κυρίως στο ενδιάμεσο μεταβατικό στρώμα, όπως μαρτυρά το προφίλ φθορισμού (μέγιστη τιμή $1.02 \pm 0.47 \mu\text{g L/L}$). Τους χειμερινούς μήνες, η υδάτινη στήλη παρουσιάζεται ομογενοποιημένη, όπως και στον κόλπο της Ελευσίνας, με θερμοκρασία ~19° C, αλατότητα ~39.1 ml/L, διαλυμένο οξυγόνο ~5 ml/L και το φθορισμό να υποδεικνύει ότι η πρωτογενής παραγωγή λαμβάνει μάλλον χώρα κυρίως στα ανώτερα στρώματα (μέγιστη τιμή $0.95 \pm 0.16 \mu\text{g L/L}$).

Βιομάζα και αφθονία των πελαγικών οργανισμών

Αρκετές διαφορές μεταξύ Ελευσίνας και Αγίου Κοσμά φαίνονται παρατηρώντας τις πυκνότητες αφθονίας (Πίν. 3) και βιομάζας (Εικ. 4) των οργανισμών των ομάδων μελέτης. Η διάκριση «μικρών κωπηπόδων» από «κωπήποδα» έχει να κάνει με το δειγματοληπτικό εργαλείο με το οποίο έχουν συλληφθεί (45 και 200 μm δίκτυο αντίστοιχα). Το ίδιο ισχύει και για τις ομάδες «ναύπλιοι» - «μεγάλοι ναύπλιοι». Τα *Prochlorococcus sp.* απουσιάζανε πλήρως από την περιοχή της Ελευσίνας. *Scomber*

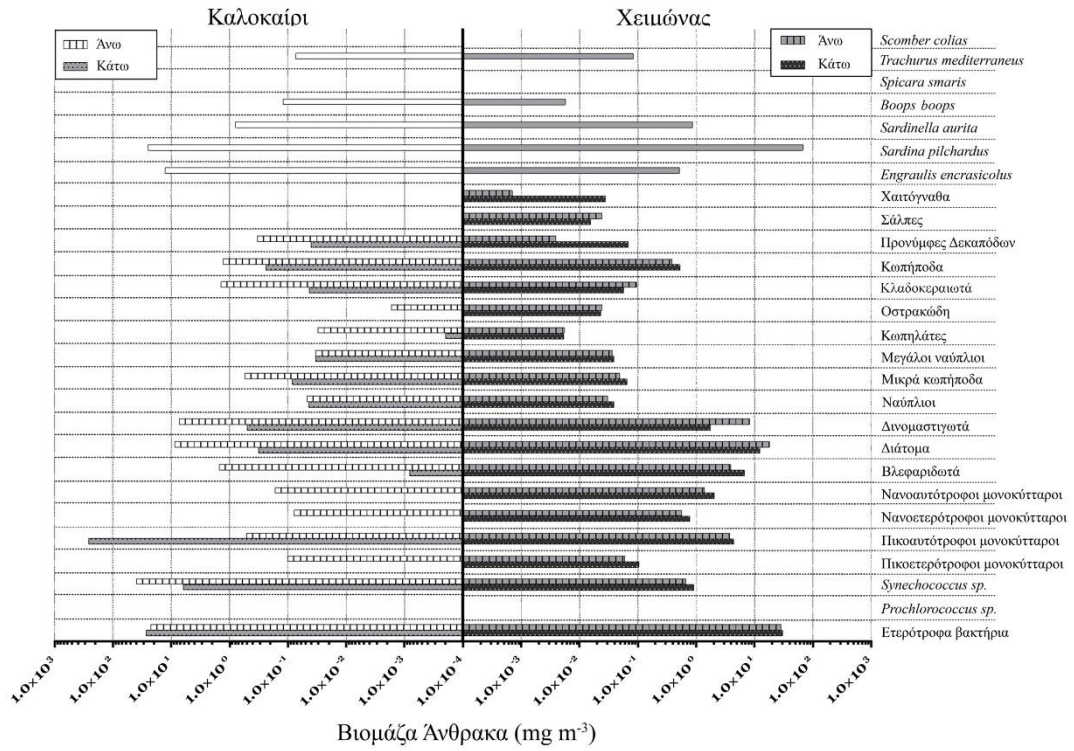
colias και *Spicara smaris*, εμφανίστηκαν μόνο στην περιοχή του Αγίου Κοσμά το χειμώνα, ωστόσο, στην ίδια περιοχή και περίοδο απουσίαζε ο γαύρος (*Engraulis encrasicolus*). Δείγμα της επιρροής της έντονης υποξίας στα κατώτερα στρώματα το καλοκαίρι στην Ελευσίνα αποτελεί η απουσία νανοαυτότροφων, νανο- και πικοετερότροφων μονοκύτταρων οργανισμών, καθώς και ο κατακλυσμός του

Πίνακας 3. Αφθονίες των οργανισμών των διάφορων ομάδων για τις δύο περιοχές μελέτης ανά περίοδο, άνω και κάτω του θερμοκλινούς. Η πυκνότητα των ατόμων για τα είδη ιχθύων αναφέρονται στο σύνολο της υδάτινης στήλης.

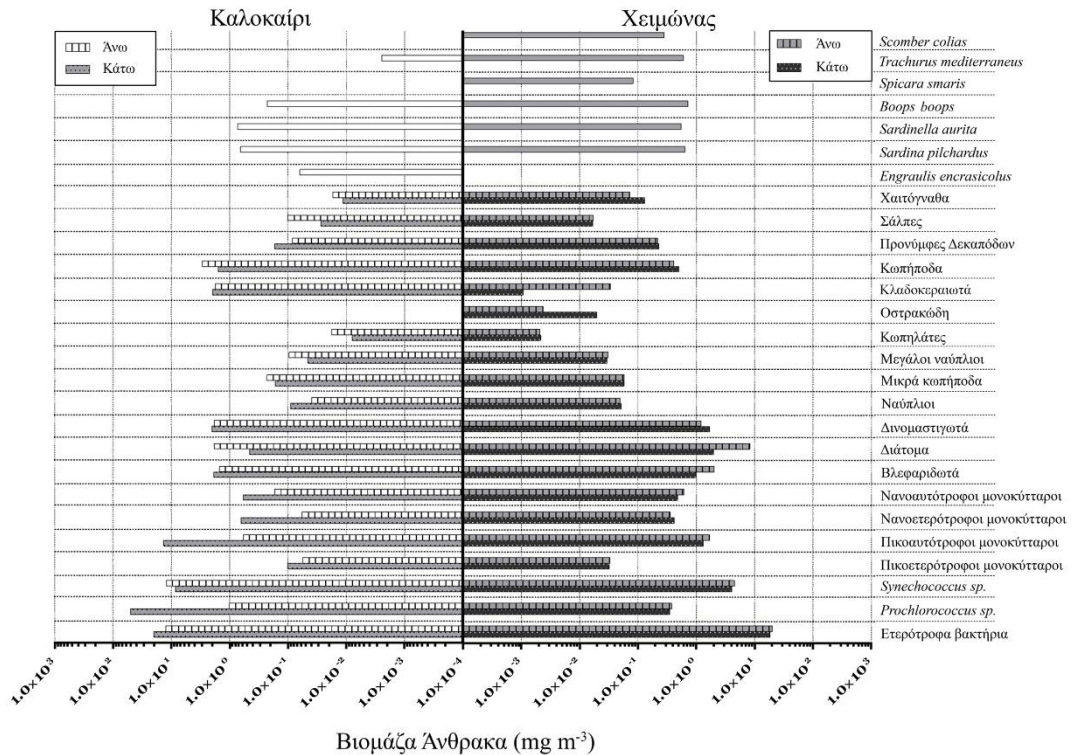
άτομα / m ³	Ελευσίνα				Άγιος Κοσμάς			
	Καλοκαίρι		Χειμώνας		Καλοκαίρι		Χειμώνας	
	Άνω	Κάτω	Άνω	Κάτω	Άνω	Κάτω	Άνω	Κάτω
<i>Scomber colias</i>	-	-	-	-	-	-	2.15 · 10 ⁻⁵	-
<i>Trach. mediterraneus</i>	1.41 · 10 ⁻⁴	-	3.01 · 10 ⁻⁵	-	1.75 · 10 ⁻⁶	-	1.30 · 10 ⁻⁴	-
<i>Spicara smaris</i>	-	-	-	-	-	-	3.44 · 10 ⁻⁵	-
<i>Boops boops</i>	6.51 · 10 ⁻⁵	-	1.52 · 10 ⁻⁶	-	1.73 · 10 ⁻⁴	-	1.89 · 10 ⁻⁴	-
<i>Sardinella aurita</i>	9.31 · 10 ⁻⁴	-	1.98 · 10 ⁻⁴	-	4.80 · 10 ⁻⁴	-	2.47 · 10 ⁻⁴	-
<i>Sardina pilchardus</i>	2.19 · 10 ⁻²	-	4.77 · 10 ⁻²	-	6.33 · 10 ⁻⁴	-	6.37 · 10 ⁻⁴	-
<i>Engraulis encrasicolus</i>	5.25 · 10 ⁻²	-	2.49 · 10 ⁻³	-	1.79 · 10 ⁻⁴	-	-	-
<i>Χαιτόγναθα</i>	-	-	3.15	3.78	3.78	3.46	2.84	1.43
<i>Σάλπες</i>	-	-	7.78	1.46	4.54 · 10	2.27 · 10	4.36	7.89
<i>Προνύμφες Δεκαπόδων</i>	2.38 · 10	2.85	2.52	3.38	7.57	6.20	2.84	1.58
<i>Κωπήποδα</i>	1.55 · 10 ³	1.95 · 10 ²	4.92 · 10 ²	4.29 · 10 ²	2.76 · 10 ³	1.29 · 10 ³	2.80 · 10 ²	2.49 · 10 ²
<i>Κλαδοκεραιωτά</i>	2.14 · 10 ³	6.80 · 10	5.53 · 10	4.35 · 10	9.66 · 10 ²	7.44 · 10 ²	8.88	2.21
<i>Οστρακώδη</i>	1.01	-	5.05	8.30	-	-	2.52	1.52
<i>Κωπηλάτες</i>	9.15 · 10	9.94 · 10 ⁻¹	1.20 · 10	1.20 · 10	5.27 · 10	1.65 · 10	3.00	3.09
<i>Μεγάλοι ναύπλιοι</i>	2.71 · 10	1.21	4.73 · 10	4.51 · 10	6.86 · 10	3.10 · 10	2.38 · 10	1.21 · 10
<i>Μικρά κωπήποδα</i>	3.32 · 10 ³	3.72 · 10 ²	2.22 · 10 ²	8.27 · 10 ²	1.17 · 10 ³	6.72 · 10 ²	3.26 · 10 ²	2.59 · 10 ²
<i>Ναύπλιοι</i>	1.41 · 10 ³	6.81 · 10 ²	5.20 · 10 ²	2.68 · 10 ²	1.40 · 10 ³	1.84 · 10 ³	1.25 · 10 ³	9.35 · 10 ²
<i>Δινομαστιγωτά</i>	3.42 · 10 ⁶	1.02 · 10 ⁶	9.90 · 10 ⁶	7.80 · 10 ⁶	1.92 · 10 ⁶	3.04 · 10 ⁶	4.30 · 10 ⁶	2.22 · 10 ⁶
<i>Διάτομα</i>	4.46 · 10 ⁶	1.28 · 10 ⁶	1.30 · 10 ⁸	1.05 · 10 ⁸	3.24 · 10 ⁶	3.48 · 10 ⁶	3.94 · 10 ⁷	1.18 · 10 ⁶
<i>Βλεφαριδωτά</i>	3.02 · 10 ⁶	2.00 · 10 ⁴	9.80 · 10 ⁶	5.80 · 10 ⁶	2.08 · 10 ⁶	2.44 · 10 ⁶	1.90 · 10 ⁶	2.14 · 10 ⁶
<i>Νανοαυτ. μονοκύτταροι</i>	1.26 · 10 ⁷	-	1.06 · 10 ⁸	1.56 · 10 ⁸	1.29 · 10 ⁷	4.47 · 10 ⁷	4.73 · 10 ⁷	3.64 · 10 ⁷
<i>Νανοετερ. μονοκύτταροι</i>	5.96 · 10 ⁶	-	4.33 · 10 ⁷	5.92 · 10 ⁷	4.35 · 10 ⁶	4.91 · 10 ⁷	2.72 · 10 ⁷	3.25 · 10 ⁷
<i>Πικοαυτ. μονοκύτταροι</i>	8.45 · 10 ⁸	4.31 · 10 ¹¹	6.28 · 10 ⁹	7.32 · 10 ⁹	9.65 · 10 ⁸	2.25 · 10 ¹⁰	2.85 · 10 ⁹	2.18 · 10 ⁹
<i>Πικοετερ. μονοκύτταροι</i>	1.68 · 10 ⁸	-	9.84 · 10 ⁷	1.74 · 10 ⁸	9.18 · 10 ⁷	1.66 · 10 ⁸	5.45 · 10 ⁷	5.36 · 10 ⁷
<i>Synechococcus sp.</i>	1.57 · 10 ¹¹	2.49 · 10 ¹⁰	2.66 · 10 ⁹	3.64 · 10 ⁹	4.83 · 10 ¹⁰	3.42 · 10 ¹⁰	1.81 · 10 ¹⁰	1.63 · 10 ¹⁰
<i>Prochlorococcus sp.</i>	-	-	-	-	3.36 · 10 ¹⁰	1.67 · 10 ¹²	1.26 · 10 ¹⁰	1.16 · 10 ¹⁰
<i>Ετερότροφα βακτήρια</i>	1.12 · 10 ¹²	1.34 · 10 ¹²	1.43 · 10 ¹²	1.50 · 10 ¹²	6.24 · 10 ¹¹	9.93 · 10 ¹¹	9.98 · 10 ¹¹	9.17 · 10 ¹¹

κατώτερου υδάτινου στρώματος από πικοαυτότροφους μονοκύτταρους οργανισμούς, των οποίων οι τιμές αφθονίας και βιομάζας C ανά m³ παρουσιάζονται κατά τρεις τάξεις μεγέθους μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες άνω του θερμοκλινούς. Οι μεγάλοι

Ελευσίνα



Άγιος Κοσμάς



Εικόνα 4. Κατανομή βιομάζας άνθρακα ανά m^3 των ομάδων των οργανισμών σε λογαριθμική κλίμακα μεγέθους, ανά περιοχή, άνω και κάτω του θερμοκλινούς. Η πυκνότητα βιομάζας άνθρακα των ιχθύων αναφέρεται στο σύνολο της υδάτινης στήλης.

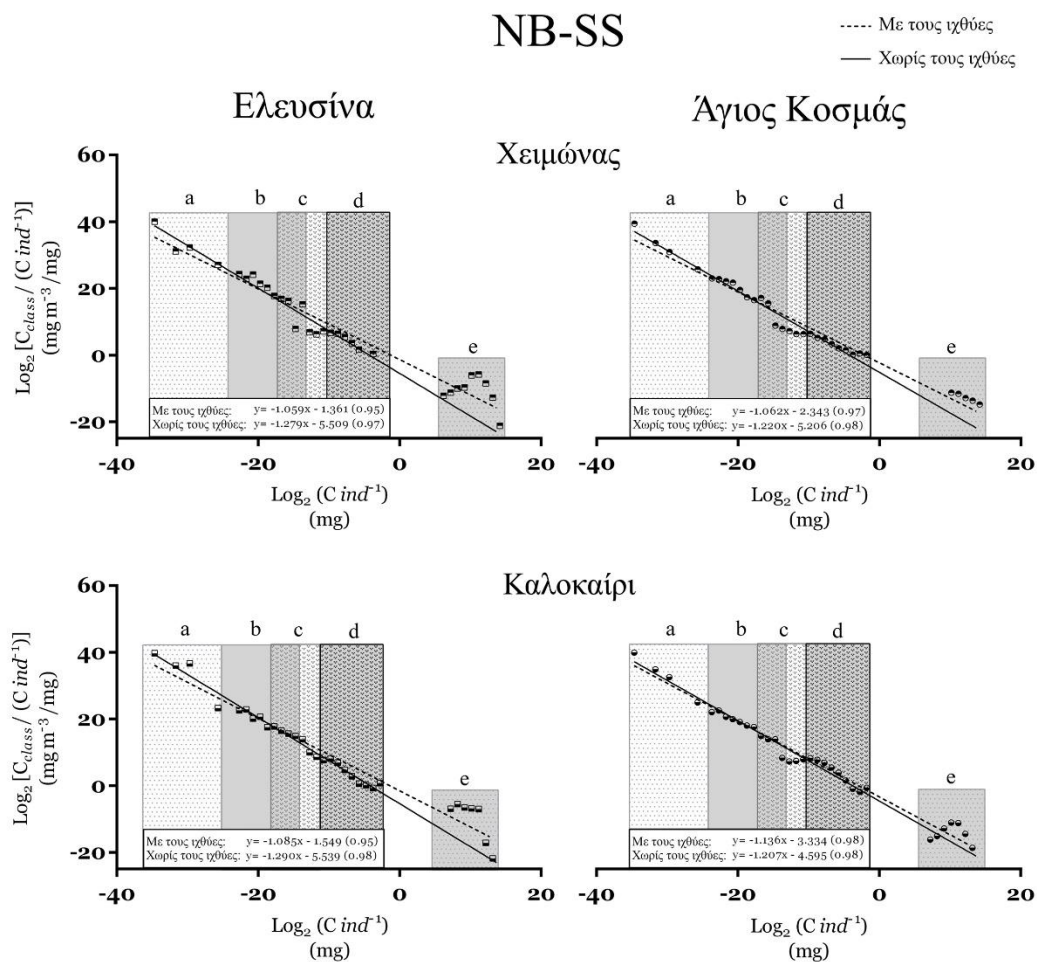
ζωοπλαγκτονικοί θηρευτές (Χαιτόγναθα, Σάλπες) απουσιάζουν γενικότερα τους καλοκαιρινούς μήνες στην περιοχή της Ελευσίνας. Οι συνθήκες έντονης υποξίας καθώς και οι προαναφερθείσες διαφορές στη σύσταση των οργανισμών των κατώτερων τροφικών επιπέδων μεταξύ των δύο στρωμάτων, φαίνεται να επηρεάζει και τους υπόλοιπους πλαγκτονικούς οργανισμούς. Οι τιμές πυκνότητας αφθονίας και βιομάζας C των υπόλοιπων πλαγκτονικών οργανισμών, παρουσιάζονται μειωμένες κατά περίπου μία τάξη μεγέθους κάτω από το θερμοκλινές, εκτός από τα βλεφαριδωτά, τους κωπήλατες (όπου η διαφορά βιομάζας C είναι τέσσερις και δύο τάξεις μεγέθους αντίστοιχα) και τα οστρακώδη που απουσιάζουν τελείως. Παρ' όλα αυτά, ο κόλπος της Ελευσίνας διατηρεί υψηλές συγκεντρώσεις ιχθύων και στις δύο περιόδους. Οι τιμές βιομάζας C ανά m^3 του συνόλου του ιχθυοαποθέματος ισούται με $68.97 \text{ mg}/m^3$ το χειμώνα και $38.26 \text{ mg}/m^3$ το καλοκαίρι. Οι αντίστοιχες τιμές για τον Άγιο Κοσμά είναι 2.87 και $1.67 \text{ mg}/m^3$, πάνω δηλαδή από μία τάξη μεγέθους χαμηλότερες.

Σε αντίθεση, η βιοκοινότητα της περιοχής του Αγίου Κοσμά παρουσιάζεται πιο σταθερή, τόσο μεταξύ των δύο περιόδων, όσο και μεταξύ των στρωμάτων. Όσον αφορά τους μικρότερους οργανισμούς, *Prochlorococcus sp.*, νανοετερότροφοι, πικο- και νανο- αυτότροφοι μονοκύτταροι οργανισμοί, παρουσιάζουν αυξημένη βιομάζα C ανά m^3 κατά περίπου μία τάξη μεγέθους το καλοκαίρι κάτω από το θερμοκλινές. Στους μεγαλύτερους ζωοπλαγκτονικούς οργανισμούς, παρατηρείται αύξηση τους καλοκαιρινούς μήνες σε χαιτόγναθα, σάλπες, προνύμφες δεκαπόδων, κωπήποδα και κλαδοκεραιωτά, στα τελευταία των οποίων οι τιμές πυκνότητας αφθονίας και βιομάζας C είναι κατά δύο περίπου τάξεις μεγέθους μεγαλύτερες. Η ομάδα των οστρακώδων απουσιάζει το καλοκαίρι, επανεμφανίζεται ωστόσο το Δεκέμβριο. Σχετικά με τα είδη ιχθύων, η σημαντικότερη διαφορά είναι, όπως προαναφέρθηκε, η απουσία του γαύρου (*Engraulis encrasicolus*) το χειμώνα και η εμφάνιση των ειδών *Scomber colias* και *Spicara smaris*.

Κανονικοποιημένα φάσματα βιομάζας (NB-SS)

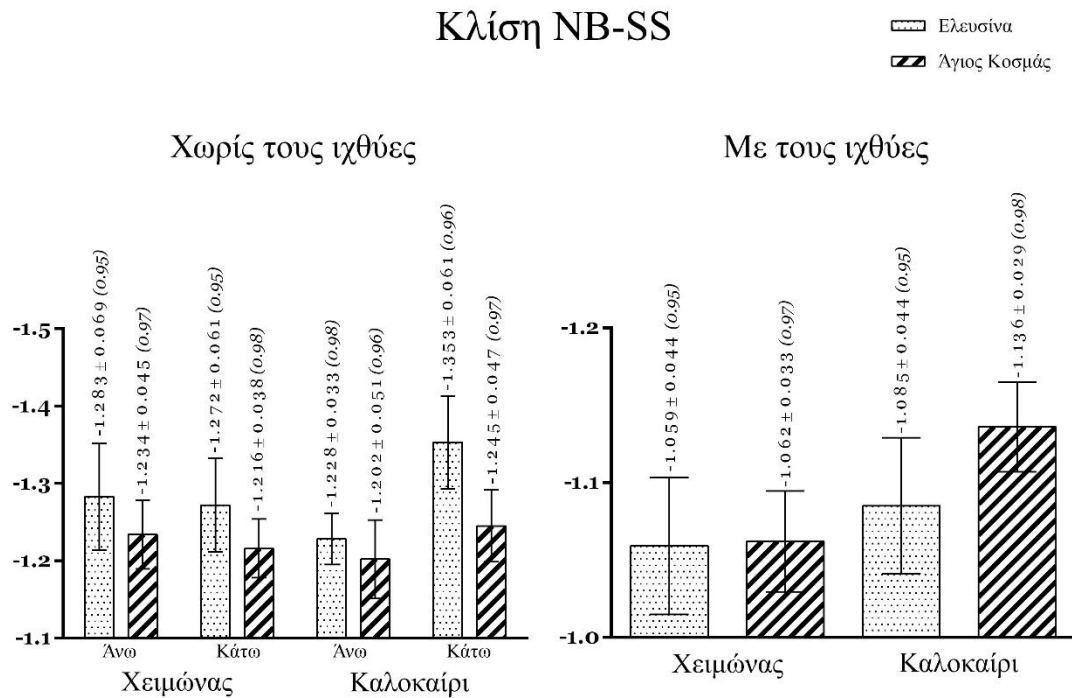
Η μορφή του NB-SS φανερώνει διαφορές στη δομή της βιοκοινότητας, τόσο μεταξύ Ελευσίνας – Αγίου Κοσμά, χειμώνα – καλοκαιριού, όσο και μεταξύ των δύο υδάτινων στρωμάτων (άνω και κάτω του θερμοκλινούς) κυρίως στην περίπτωση της Ελευσίνας τους θερινούς μήνες. Στο σύνολο της υδάτινης στήλης (Εικ. 5), η κλίση του NB-SS κυμαίνεται από -1.207 έως -1.290 χωρίς να συμπεριλάβουμε τις κλάσεις των

ιχθύων, και -1.059 έως -1.136 συμπεριλαμβανομένου αυτών. Οι εξισώσεις παλινδρόμησης παρουσιάζουν ισχυρή στατιστική υποστήριξη ($r^2 = 0.97, 0.98$) εκτός από τις περιπτώσεις που συμπεριλαμβάνονται οι κλάσεις των ιχθύων στην Ελευσίνα, όπου η στατιστική υποστήριξη πέφτει περίπου στο 0.95 . Παρατηρώντας τις κλίσεις του NB-SS, τόσο σε ολόκληρη τη στήλη (Εικ. 5), όσο και μεταξύ των δύο υδάτινων στρωμάτων (Εικ. 6), στην περιοχή της Ελευσίνας παρουσιάζονται γενικά πιο απότομες



Εικόνα 5. Τα φάσματα κανονικοποιημένων μεγεθών βιομάζας για την Ελευσίνα (αριστερά), τον Άγιο Κοσμά (δεξιά), και τις περιόδους χειμώνα (πάνω), καλοκαίρι (κάτω). Με συμπαγή μαύρη γραμμή παρουσιάζεται το φάσμα μεγεθών χωρίς οι ομάδες των ιχθύων να έχουν συμπεριληφθεί στην ανάλυση και με διακεκομμένη το αντίστροφο. Κάτω αριστερά σε κάθε γράφημα, εμφανίζονται οι εξισώσεις παλινδρόμησης περιγράφουν τη δομή του NB-SS, με το συντελεστή r^2 εντός παρενθέσεων. Οι κλάσεις μεγεθών είναι ομαδοποιημένες με βάση τη μεθοδολογία σύλληψης και εκτίμησης αφθονίας/βιομάζας, έτσι έχουμε α) βακτήρια, πικο- και νανο- μονοκύτταροι οργανισμοί, β) μικρο- φυτο- και ζωο- μονοκύτταροι πλαγκτονικοί οργανισμοί, γ) μικρο- μετα- ζωοπλαγκτονικοί οργανισμοί, δ) μεσο- μετα- ζωοπλαγκτονικοί οργανισμοί και ε) μικροί πελαγικοί ιχθύες.

από τις αντίστοιχες στην περιοχή του Αγίου Κοσμά. Ιδιαίτερα ενδιαφέρον ωστόσο προκαλεί το γεγονός ότι, συμπεριλαμβανομένου των ιχθύων, η εικόνα αυτή αντιστρέφεται (Εικ. 6, δεξιά).



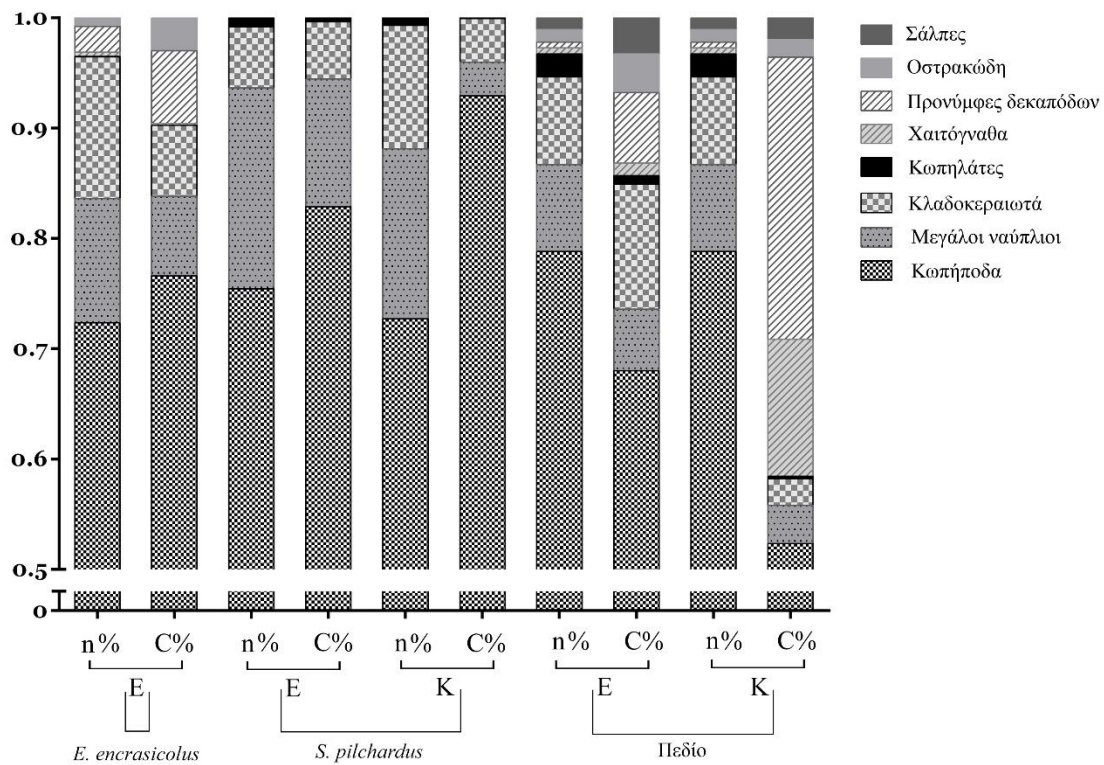
Εικόνα 6. Οι κλίσεις του NB-SS (με το r^2 εντός παρενθέσεων) για τις περιοχές της Ελευσίνας και του Αγίου Κοσμά, κατά τις δύο περιόδους (χειμώνας – καλοκαίρι), χωρίς (αριστερά) και με (δεξιά) τις κλάσεις των ιχθύων. Οι κλίσεις άνω και κάτω του θερμοκλινοῦς παρουσιάζονται στο αριστερό γράφημα, όπου δε περιλαμβάνονται οι κλάσεις των ιχθύων. Στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των κλίσεων δε παρουσιάζονται (εκτός από το ζευγάρι Α.Κοσμάς(άνω) – Ελευσίνα(κάτω), $P_{\text{value}} = 0.04$).

Οι κλάσεις των ιχθύων (Εικόνα 5, ε) πέφτουν πάντα πάνω από την πρόβλεψη του NB-SS (χωρίς τους ιχθύες). Ως αποτέλεσμα όταν συμπεριλαμβάνονται οι ιχθύες στην ανάλυση οι κλίσεις χαμηλώνουν αρκετά. Παρατηρώντας περαιτέρω την κατανομή των κλάσεων, υπάρχει ένα μεγάλο κενό μεταξύ των μεσοπλαγκτονικών οργανισμών (Εικόνα 5, d) και των ιχθύων (ε), κενό το οποίο πιθανόν καταλαμβάνουν μακροζωοπλαγκτονικοί οργανισμοί και ιχθυοπλαγκτό. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι οργανισμοί αυτοί δε συλλαμβάνονταν επαρκώς από τα δειγματοληπτικά εργαλεία που αξιοποιήθηκαν στην παρούσα έρευνα.

Η επίδραση της υποξίας στη δομή και σύσταση της βιοκοινότητας τους καλοκαιρινούς μήνες κάτω από το θερμοκλινές στην Ελευσίνα αποτυπώνεται στην κλίση του NB-SS (Εικ. 6, αριστερά). Η τιμή -1.353 που καταγράφεται κάτω από το θερμοκλινές στη συγκεκριμένη περιοχή και περίοδο, είναι η χαμηλότερη από όλες τις περιπτώσεις. Το ίδιο παρατηρείται και από την παράμετρο a (τομή στον άξονα των y), όπου καταγράφει τη χαμηλότερη τιμή του συντελεστή από όλες τις περιπτώσεις (-8.435 ± 1.04), δύο φορές μικρότερη από την αντίστοιχη τιμή άνω του θερμοκλινούς την ίδια περίοδο (-4 ± 0.59). Παρατηρώντας τους συντελεστές προσαρμογής r^2 , μεταξύ χειμώνα – καλοκαιριού, οι χαμηλότερες τιμές για την Ελευσίνα παρουσιάζονται το χειμώνα (0.95), ενώ για τον Άγιο Κοσμά το καλοκαίρι άνω του θερμοκλινούς (0.96).

*Διατροφή των ειδών *Sardina pilchardus* και *Engraulis encrasicolus**

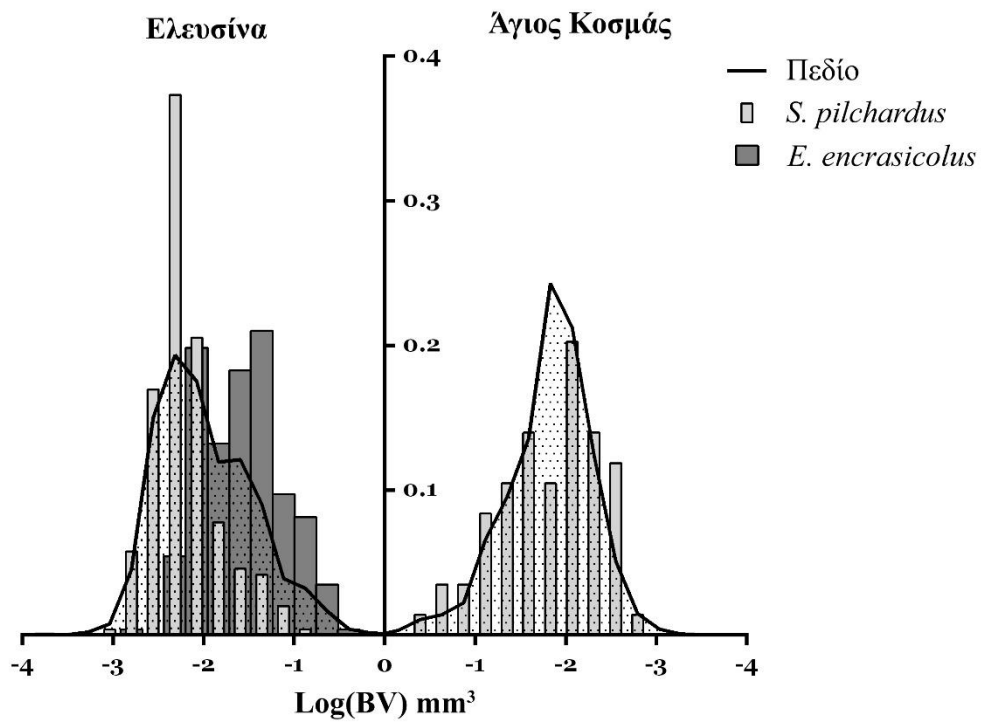
Όσον αφορά τα στομαχικά περιεχόμενα των μικρών πελαγικών ιχθύων, μόνο αυτά των σαρδελών (*Sardina pilchardus*) την περίοδο του χειμώνα στις δύο περιοχές, και των γαύρων (*Engraulis encrasicolus*) την ίδια περίοδο, αλλά μόνο για την περιοχή της Ελευσίνας (ο γαύρος απουσίαζε το Δεκέμβριο από την Ελευσίνα) ήταν σε κατάσταση ικανοποιητική για αναγνώριση. Στη δίαιτα και των δύο ειδών κυριαρχούν τα κωπήποδα που απαρτίζουν πάνω από το 70% του αριθμού των συνολικών ατόμων που καταναλώνουν (Εικ. 7) και καλύπτουν την κυριότητα των αναγκών τους σε ποσότητα άνθρακα (εως και 93% στην περίπτωση της σαρδέλας στην περιοχή του Αγίου Κοσμά). Την υπόλοιπη δίαιτα τους απαρτίζουν κυρίως ναύπλιοι και κλαδοκεραιωτά. Ο γαύρος φαίνεται να εκμεταλλεύεται αρκετά αποτελεσματικά τη δεξαμενή άνθρακα των μεγαλύτερων κλάσεων του μεσοζωοπλαγκτού που απαρτίζουν οι προνύμφες δεκαπόδων (6.6% C συμμετοχή στη δίαιτά τους, 6.4% επί του συνολικού C στο πεδίο). Αντιθέτως, η σαρδέλα δε φαίνεται να προτιμά (ή κυνηγά) αντίστοιχα θηράματα, ούτε στην περιοχή της Ελευσίνας, αλλά ούτε και στην περιοχή του Αγίου Κοσμά, όπου χαιτόγναθα και προνύμφες δεκαπόδων παρουσιάζουν σημαντική συνεισφορά στη δεξαμενή άνθρακα της περιοχής (38% επί του συνολικού C). Ακόμα, μικρό ποσοστό της δίαιτας τους συμπληρώνουν ο γαύρος με οστρακώδη [Ελευσίνα (n%: 0.8, C%: 3%)] και η σαρδέλα με κωπηλάτες [Ελευσίνα (n%: 0.8, C%: 0.4), Άγιος Κοσμάς (n%: 0.7, C%: <0.1)]. Όσον αφορά διαφορές στην ποιότητα της διατροφής της σαρδέλας μεταξύ των δύο περιοχών, παρότι η σχετικές αφθονίες των κωπηπόδων



Εικόνα 7. Συχνότητες αφθονίας (n%) και βιομάζας άνθρακα (C%) των μεσοζωοπλαγκτονικών οργανισμών στα στομαχικά περιεχόμενα του γαύρου (*E. encrasicolus*) και της σαρδέλας (*S. pilchardus*) σε σύγκριση με τις αντίστοιχες συχνότητες στο πεδίο. E: Ελευσίνα, K: Άγιος Κοσμάς

Αγίου Κοσμά, ένδειξη ότι στην εν λόγω περιοχή οι σαρδέλες θηρεύουν μεγαλύτερα άτομα κωπηπόδων. Στην ίδια περιοχή, οι σαρδέλες θηρεύουν δύο φορές μεγαλύτερο αριθμό κλαδοκεραιωτών, ωστόσο, η αυξημένη αυτή θήρευση δε συμβάλει αντίστοιχα στην κάλυψη των ενεργειακών τους αναγκών.

Σαρδέλα και γαύρος φαίνεται να εκμεταλλεύονται διαφορετικά μεγέθη μεσοζωοπλαγκτονικών οργανισμών για τη διατροφή τους (Εικ. 8). Οι κατανομές συχνοτήτων των μεγεθών των θηραμάτων από τα στομαχικά τους περιεχόμενα είναι διακριτές για την περιοχή και περίοδο όπου υπάρχουν δεδομένα και για τα δύο είδη (χειμώνας – Ελευσίνα). Η *S. pilchardus* φαίνεται να τρέφεται με τα μικρότερα διαθέσιμα μεγέθη που παρουσιάζονται στο πεδίο. Ο *E. encrasicolus* αντιθέτως φαίνεται να επιλέγει μεγαλύτερους οργανισμούς.



Εικόνα 8. Κατανομές συχνοτήτων μεγεθών των θηραμάτων των στομαχικών περιεχομένων (σε λογαριθμικές κλάσεις βιόγκου) για τα είδη *S. pilchardus* και *E. encrasicolus*, σε σχέση με τις αντίστοιχες κατανομές μεγεθών του μεσοζωοπλαγκτού στις δύο περιοχές μελέτης.

ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Η κατανόηση της δομής και της λειτουργίας των πελαγικών οικοσυστημάτων αποτελεί προτεραιότητα για την ορθή διαχείριση τους. Οι ανθρωπογενείς επεμβάσεις στα οικοσυστήματα αυτά επιδρούν σε πολλαπλά επίπεδα. Για παράδειγμα ο ευτροφισμός επηρεάζει την πρωτογενή παραγωγή στην ποσότητα και ποιότητα της (Chislock), και η αλιεία εμπορικών ειδών μικρών πελαγικών ψαριών αφαιρεί τους θηρευτές πολλών ζωοπλαγκτονικών ειδών. Η περιπλοκότητα αυτών των αλληλεπιδράσεων ανέδειξε την ανάγκη για εύρεση απλών δεικτών για την παρακολούθηση της κατάστασης των οικοσυστημάτων. Τα φάσματα μεγεθών των οργανισμών έχουν προταθεί αρκετές φορές κατά το παρελθόν ως δείκτες της κατάστασης ολόκληρου του πελαγικού οικοσυστήματος (π.χ. Gómez-Canchong *et al.*, 2013; Jung and Houde, 2005; Petchey and Belgrano, 2010), και μπορούν να αποδειχθούν ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για σκοπό αυτό.

Η παρούσα εργασία είχε ως στόχο την μελέτη του μεγέθους του μεσοζωοπλαγκτού, ένα πολύ σημαντικό τμήμα της πλαγκτονικής βιοκοινότητας, και ο συσχετισμός αυτού με τη διατροφή των μικρών πελαγικών ιχθύων, την πρωτογενή παραγωγικότητα και την ανθρωπογενή επιβάρυνση. Για το σκοπό αυτό επιλέχθηκαν δύο περιοχές στον ευρύτερο Σαρωνικό κόλπο (Ελευσίνα – Άγιος Κοσμάς) με διαφορετικό γεωφυσικό, φυσικοχημικό και ωκεανογραφικό προφίλ, που βρίσκονται πλησίον της πόλης των Αθηνών και δέχονται διαφορετικό βαθμό ανθρωπογενών πιέσεων. Η ανάλυση των φασμάτων βιομάζας αξιοποιήθηκε για την εκτίμηση της κατάστασης του οικοσυστήματος των δύο περιοχών και ως μέτρο της παραγωγικότητας τους. Ένα σημαντικό εύρος οργανισμών (από τα βακτήρια έως τα μικρά πελαγικά ψάρια) αξιοποιήθηκε για τη σύγκριση των βιοτικών παραγόντων των δύο περιοχών. Τόσο αναλυτική δομή του φάσματος μεγεθών έχει γίνει μία ακόμα φορά, όσων γνωρίζουμε (Houde *et al.*, 2004). Εκτιμήθηκε η συγκέντρωση αφθονίας και βιομάζας ανά m^3 των κυριότερων λειτουργικών ομάδων, και ελήφθησαν μετρήσεις θερμοκρασίας, αλατότητας, οξυγόνου και φθορισμού. Οι δειγματοληψίες στο πεδίο έλαβαν χώρα το Δεκέμβριο (2012) και Σεπτέμβριο (2013), επιτρέποντας την παρακολούθηση της εξέλιξης της εποχικής διαστρωμάτωσης της υδάτινης στήλης, από το χειμώνα στο καλοκαίρι. Η διατροφή δύο εκ των συλληφθέντων ειδών μικρών πελαγικών ιχθύων (*Engraulis encrasicolus* και *Sardina pilchardus*) εκτιμήθηκε από τα

στομαχικά τους περιεχόμενα και συγκρίθηκε η σύσταση τους σε μεσοζωοπλαγκτονικούς οργανισμούς, τόσο μεταξύ τους, όσο και με το πεδίο.

Ο κόλπος της Ελευσίνας θεωρείται ως η πιο επιβαρυνόμενη θαλάσσια περιοχή της Ελλάδας (SoHelME, 2005) Ένας σημαντικός αριθμός διάφορων βιομηχανικών εγκαταστάσεων υπάρχουν στη βόρεια πλευρά της ακτής. Στο δυτικό τμήμα του κόλπου βρίσκεται η πόλη της Αθήνας. Κατά το παρελθόν, ο κόλπος δεχόταν σημαντικότερη ανθρωπογενή επιβάρυνση από εισροές ανεπεξέργαστων αστικών λυμάτων καθώς και υπολείμματα από τη βιομηχανική επεξεργασία λιπασμάτων. Σήμερα ωστόσο, λόγω βελτίωσης των κανόνων περιβαλλοντικής πολιτικής καθώς και της στροφής προς καθαρότερες τεχνολογίες, ο κόλπος δε λαμβάνει μεγάλη ποσότητα ανεπεξέργαστων λυμάτων. Επιπλέον, οι εισροές γλυκών υδάτων δεν είναι σημαντικές, καθώς δεν εκβάλει κάποιος ποταμός εντός του κόλπου, εκτός από μερικούς εφήμερους χειμάρρους κατά το χειμώνα.

Οι διαφορές μεταξύ των δύο περιοχών στη σύσταση και δομή του πελαγικού οικοσυστήματος φαίνονται από τα αποτελέσματα αφθονίας και βιομάζας C ανά m³. Ο κόλπος της Ελευσίνας φιλοξενεί σημαντικά μεγαλύτερες αφθονίες ιχθύων ανά m³, στις οποίες κυριαρχεί η σαρδέλα. Αυτό πιθανόν να οφείλεται στο γεγονός ότι η αλιεία απαγορεύεται εντός του κόλπου της Ελευσίνας. Οι υψηλές αυτές αφθονίες των ιχθύων ανιχνεύονται από την ανάλυση του NB-SS. Οι κλάσεις των ιχθύων έπεφταν πάντα πάνω από την πρόβλεψη του NB-SS, μεταβάλλοντας σημαντικά τις κλίσεις κάνοντας τις πιο ρηχές όταν συμπεριλαμβάνονταν στην ανάλυση. Φαίνεται λοιπόν ότι η ανάλυση του NB-SS έχει την ικανότητα να προβλέπει τις επιπτώσεις της αλιείας στους ιχθυοπληθυσμούς. Παρόμοιες αναλύσεις, αν και όχι με τόσο μεγάλο εύρος οργανισμών, έχουν γίνει και στο παρελθόν. Χαμηλότερες κλίσεις έχουν συνδεθεί άμεσα με τη ένταση της αλιείας σε ιχθυοπληθυσμούς κοραλλιογενών υφάλων στα νησιά Φίτζι (Graham *et al.*, 2005), και με την υπερεκμετάλλευση των ιχθυοπληθυσμών στη Βόρεια Θάλασσα (Rice και Gislason, 1996). Οι Duplisea και Kerr, (1995) χρησιμοποίησαν δεδομένα βενθικών ιχθύων είκοσι ενός ετών από την υφαλοκρηπίδα της Σκωτίας για να δημιουργήσουν ένα «πρότυπο» φάσμα μεγεθών με το οποίο συνέκριναν μετέπειτα κάθε φάσμα έτους ξεχωριστά.

Οι κλάσεις των ιχθύων σχημάτισαν καμπανοειδείς δομές όπως φαίνεται στην Εικ. 5(e), φαινόμενο το οποίο παρατηρείται συχνά (π.χ. Boudreau and Dickie, 1992, Houde

et al., 2004, Jung and Houde, 2005). Η δομή των κλάσεων αυτών έχει επιχειρηθεί να ερμηνευθεί κατά το παρελθόν, μέσω μιας διαφορετικής προσέγγισης των φασμάτων μεγεθών των οργανισμών, προσαρμόζοντας τα δεδομένα σε πολυωνυμική περιοδική συνάρτηση δευτέρου βαθμού (Kerr and Dickie, 2001, Thiebaut and Dickie, 1992). Μία ερμηνεία του φαινομένου αυτού στην περίπτωση μας, είναι ότι καθώς η περιοχή κυριαρχείται από δύο είδη μικρών πελαγικών ψαριών, τα φάσματα βιομάζας παίρνουν τη μορφή των κατανομών βιομάζας εντός των ειδών, τα οποία προσεγγίζουν περισσότερο την κανονική κατανομή.

Η ερμηνεία των κλίσεων αποτελεί ένα από τα δυνατά σημεία της ανάλυσης του NB-SS. Πιο απότομες κλίσεις δείχνουν ότι η βιομάζα μειώνεται όσο αυξάνεται το μέγεθος, υπονοώντας ότι η συνολική μέση θηρευτική πίεση αυξάνει με το μέγεθος και ότι υπάρχει απώλεια διαθέσιμης ενέργειας στα ανώτερα τροφικά επίπεδα (San Martin *et al.*, 2006). Οπότε, η κλίση του φάσματος υποδεικνύει την απόδοση της μεταφοράς βιομάζας από τους μικρότερους προς τους μεγαλύτερους οργανισμούς (Gaedke, 1993). Ακολουθώντας την αρχή της ελαχίστου προσπάθειας, τα φυσικά αυτά συστήματα ακολουθούν την πορεία που εκφράζει την ελάχιστη ροή ενέργειας, τη βέλτιστη, δηλαδή, πορεία προς το *κρίσιμο* σημείο ισορροπίας. Τα συστήματα αυτά έχουν την ικανότητα να διαχέουν τις διαταραχές στο φάσμα της οργάνωσης τους, καταλήγοντας τελικά και πάλι σε ισορροπία. Ως αποτέλεσμα, η κατανομή των σημείων των κλάσεων του NB-SS μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη πρόβλεψη της κατάστασης του συστήματος, στο χρονικό διάστημα μετά από μία διαταραχή (Silvert και Platt, 1978).

Οι κλίσεις των φασμάτων βιομάζας από τα βακτήρια έως το μεσοζωοπλαγκτό χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της κατάστασης των οικοσυστημάτων των δύο περιοχών. Το εύρος αυτών των οργανισμών αντιπροσωπεύει την πρωτογενή και δευτερογενή παραγωγή. Οι κλίσεις του NB-SS στην Ελευσίνα είναι πάντοτε χαμηλότερες από τις αντίστοιχες του Αγίου Κοσμά και παρουσιάζουν μεγαλύτερη μεταβλητότητα. Το γεγονός αυτό αποτελεί ένδειξη ότι ο κόλπος της Ελευσίνας δέχεται ισχυρότερες πιέσεις από την περιοχή του Αγίου Κοσμά. Οι πιέσεις αυτές είναι πιθανότατα ο συνδυασμός της μεγαλύτερης σε ένταση ανθρωπογενούς επιβάρυνσης, της γεωμορφολογικής και υδρολογικής ιδιαιτερότητας της περιοχής και της αυξημένης θηρευτικής πίεσης από τα μικρά πελαγικά ψάρια.

Στα NB-SS που μελετήθηκαν, ορισμένες κενές κλάσεις ήταν αδύνατο να μη προκύψουν, τόσο λόγω των διαφορετικών μεθοδολογιών συλλογής των οργανισμών που αξιοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, όσο και των διαφορετικών περιορισμών που επάγει η αναγκαιότητα χρήσης διαφορετικών μεθόδων εκτίμησης βιομάζας C των ατόμων, λόγω του διαφορετικού εύρους μεγεθών οργανισμών που καλύπτει η κάθε μέθοδος. Ως εκ τούτου, κάποιες κενές κλάσεις προέκυψαν μεταξύ των κλάσεων που καλύπτουν τους πικο- και νανο- πλαγκτονικούς οργανισμούς, επειδή ορίστηκε ένα μέσο βάρος ανά κύτταρο (Πιν. 2), πράγμα που σημαίνει ότι τα άτομα των ομάδων αυτών των οργανισμών καταλήγουν στην ίδια κλάση μεγέθους. Ακόμα, ένα μεγάλο κενό δημιουργείται μεταξύ μεσοζωοπλαγκτονικών οργανισμών και ιχθύων. Το κενό αυτό καλύπτεται από μακροπλαγκτονικούς οργανισμούς (>2cm), ευφασεώδη, προνύμφες δεκαπόδων, ιχθυοπλαγκτόν, κ.ά., άτομα δηλαδή με αυξημένες κολυμβητικές δυνατότητες, ικανά να ξεφεύγουν από τις κάθετες σύρσεις των πλαγκτονικών διχτυών (Harris et al., 2000).

Τα αποτελέσματα της διατροφής των κυριότερων ειδών μικρών πελαγικών στις δύο περιοχές μελέτης (σαρδέλα, γαύρος), βρίσκονται σε συμφωνία με παλαιότερες μελέτες για τη διατροφή των δύο ειδών στο Αιγαίο (Nikolioudakis 2012-2014). Από τις κατανομές των συχνοτήτων των μεγεθών των θηραμάτων από τα στομαχικά τους περιεχόμενα, ο γαύρος φαίνεται ότι εκμεταλλεύεται τα μεγαλύτερα μεγέθη μεσοζωοπλαγκτού από αυτά που παρουσιάζονται στο πεδίο. Αντιθέτως, παρουσία του γαύρου, η σαρδέλα τρέφεται με το μικρότερο τμήμα των μεγεθών. Έτσι, τα μεγέθη των στομαχικών περιεχομένων του γαύρου και της σαρδέλας, σχηματίζουν δύο διακριτές κατανομές. Το γεγονός ότι ο γαύρος κυνηγά μεγαλύτερα πλαγκτονικά θηράματα, φαίνεται και από την παρουσία προνυμφών δεκαπόδων στα στομαχικά τους περιεχόμενα, που αποτελούν θηράματα με αυξημένες κολυμβητικές ικανότητες (Harris et al., 2000). Η σαρδέλα, ωστόσο, στην περιοχή του Αγίου Κοσμά και απουσία του γαύρου, διευρύνει το φάσμα μεγεθών των θηραμάτων που καταναλώνει. Αν και δε βρέθηκε να θηρεύει προνύμφες δεκαπόδων, φαίνεται ότι στην περιοχή του Αγίου Κοσμά κυνηγά τα μεγαλύτερα δυνατά κωπήποδα που μπορεί να συλλάβει, καθώς καλύπτει το 93% των αναγκών της σε άνθρακα με αυτά, παρότι δε μεταβάλλεται σημαντικά η ποσοστιαία σύσταση της σχετικής αφθονίας των θηραμάτων στα στομαχικά της περιεχόμενα σε σχέση με την περιοχή της Ελευσίνας. Το γεγονός αυτό είναι ένδειξη ότι η σαρδέλα μεταβάλλει τη διατροφική της συμπεριφορά από

περισσότερο παθητική στην Ελευσίνα, προς περισσότερο ενεργητική στον Άγιο Κοσμά.

Οι συνθήκες υποξίας τους καλοκαιρινούς μήνες στα βαθύτερα τμήματα του κόλπου της Ελευσίνας, είναι ένα φαινόμενο που έχει παρατηρηθεί από το 1973 (Friligos, 1976), και καταγράφεται σαφώς στο προφίλ οξυγόνου της υδάτινης στήλης (Εικ. 3) της παρούσας εργασίας. Η υποξία στα κατώτερα στρώματα του κόλπου της Ελευσίνας είναι ένα φαινόμενο το οποίο λαμβάνει χώρα τουλάχιστο τα τελευταία 5000 χρόνια (Pavlidou *et al.*, 2010). Ο συνδυασμός ωκεανογραφικών, κλιματικών και ανθρωπογενών πιέσεων καθορίζουν την χρονική εξέλιξη του φαινομένου στην περιοχή. Συνθήκες έντονης υποξίας καταγράφηκαν και στην παρούσα εργασία, όπου οι τιμές του διαλυμένου οξυγόνου σχεδόν μηδενίζονται στο βαθύτερο σημείο του κόλπου. Η ιδιαιτερότητα αυτή της περιοχής επηρεάζει το πλαγκτονικό πελαγικό σύστημα στο σύνολο του. Νανοαυτότροφοι και πικο-, νανο- ετερότροφοι οργανισμοί απουσιάζουν πλήρως κάτω από το θερμοκλινές, ενώ ταυτόχρονα οι πικοαυτότροφοι μονοκύτταροι οργανισμοί παρουσιάζουν κατά τρεις τάξεις μεγαλύτερες τιμές βιομάζας C ανά m^3 από τις αντίστοιχες άνω του θερμοκλινούς. Οι τιμές αφθονίας των ζωοπλαγκτονικών και των μεγαλύτερων φυτοπλαγκτονικών οργανισμών είναι κατά μία κλάση μεγέθους μικρότερες. Στο παρελθόν έχουν καταγραφεί μέχρι και μηδενικές αφθονίες ζωοπλαγκτού κάτω από το θερμοκλινές (Friligos, 1986).

Οι παραπάνω μεταβολές στην πλαγκτονική βιοκοινότητα καταγράφονται στα φάσματα βιομάζας, όπου η τιμή της κλίσης του NB-SS κάτω από το θερμοκλινές το καλοκαίρι στην Ελευσίνα καταγράφει τη χαμηλότερη τιμή (-1.353) από όλες τις περιπτώσεις. Τόσο απότομες κλίσεις υποδεικνύουν την παρουσία έντονων διαταραχών στο οικοσύστημα (DeBruyn *et al.*, 2002).

Οι πρόσφατες εξελίξεις των αυτοματοποιημένων και ημι- αυτοματοποιημένων οργάνων ή/και μεθόδων για την καταμέτρηση της αφθονίας του πλαγκτού διευκολύνει την πιο συστηματική μελέτη των φασμάτων μεγεθών βιομάζας/βιοόγκου. Αυτοματοποιημένα όργανα, όπως το LISST (Laser In Situ Scattering and Transmissometry particle size analyzer) για σωματίδια μεταξύ 1 – 250 μm και το LOPC (Laser Optical Plankton Counter) για σωματίδια από 100 μm έως 3 cm, παρέχουν μετρήσεις υψηλής ανάλυσης για όλα τα σωματίδια στην υδάτινη στήλη, χωρίς ωστόσο να έχουν ικανότητα διάκρισης των λειτουργικών ομάδων (Zhou, 2006). Ωστόσο, το

μεγαλύτερο πρόβλημα με την εφαρμογή της θεωρίας του NB-SS σε δεδομένα από αυτόματους οπτικούς μετρητές πλαγκτού, είναι η επικάλυψη ζώντων και μη-ζώντων σωματιδίων. Μέθοδοι ανάλυσης εικόνας (π.χ. Gorsky *et al.*, 2010, Grosjean *et al.*, 2004) μας επιτρέπουν να υπερβούμε τα δύο παραπάνω προβλήματα, επιτρέποντας της διάκριση σε λειτουργικές ομάδες και το διαχωρισμό ζώντων, μη-ζώντων σωματιδίων.

Συμπερασματικά, η διατροφή των ειδών *Engraulis encrasicolus* και *Sardina pilchardus* καλύπτει διαφορετικά τμήματα του φάσματος μεγεθών του μεσοζωπλαγκτού. Οι δύο περιοχές διαφέρουν μεταξύ τους ως προς την παραγωγικότητα την ανθρωπογενή επιβάρυνση και την οξυγόνωση της υδάτινης στήλης, κάτι το οποίο καταγράφεται στις κλίσεις των κανονικοποιημένων φασμάτων βιομάζας. Η Ελευσίνα διατηρεί πολύ υψηλές συγκεντρώσεις ιχθύων και στις δύο περιόδους, ένδειξη ότι οι ιχθύες επιλέγουν ενεργά την περιοχή αυτή, πιθανόν για να αποφύγουν την αλιευτική πίεση. Οι συνθήκες έντονης υποξίας στα κατώτερα στρώματα τους καλοκαιρινούς μήνες στην Ελευσίνα επηρεάζει σημαντικά τη σύσταση και τη δομή της πλαγκτονικής βιοκοινότητας. Τέλος, δείξαμε ότι τα φάσματα βιομάζας μπορούν να αποτελέσουν ένα πολύ ισχυρό εργαλείο για την εκτίμηση της κατάστασης των πελαγικών οικοσυστημάτων, καθώς αλλαγές όπως η διαφορά έντασης της ανθρωπογενούς επιβάρυνσης, η ανεπαρκής οξυγόνωση της υδάτινης στήλης και η διαφορά αλιευτικής πίεσης αντικατοπτρίζονται στις παραμέτρους της ανάλυσης τους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Alcaraz, M., Saiz, E., Calbet, A., Trepas, I., and Broglio, E. 2003. Estimating zooplankton biomass through image analysis. *Marine Biology*, 143: 307–315.
- Bak, P., Tang, C., and Wiesenfeld, K. 1988. Self-organized criticality. *Physical Review A*, 38: 364–374. <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.38.364>.
- Benoît, E., and Rochet, M.-J. 2004. A continuous model of biomass size spectra governed by predation and the effects of fishing on them. *Journal of Theoretical Biology*, 226: 9–21. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S002251930300290X>.
- Bianchi, G., Gislason, H., Graham, K., Hill, L., Jin, X., Koranteng, K., Manickchand-Heileman, S., *et al.* 2000. Impact of fishing on size composition and diversity of demersal fish communities. *ICES Journal of Marine Science*, 57: 558–571. <http://icesjms.oxfordjournals.org/cgi/doi/10.1006/jmsc.2000.0727>.
- Borgmann, U. 1983. Effect of Somatic Growth and Reproduction on Biomass Transfer Up Pelagic Food Webs As Calculated From Particle-Size-Conversion Efficiency. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 40: 2010–2018.
- Borgmann, U. 1985. Predicting the effect of toxic substances on pelagic ecosystems. *Science of The Total Environment*, 44: 111–121.
- Borgmann, U. 1987. Models on the shape of, and biomass flow up, the biomass size-spectrum. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 44: 136–140.
- Borgmann, U., and Whittle, D. M. 1983. Particle-size-conversion efficiency and contaminant concentrations in Lake Ontario biota. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 40: 328–336.
- Boudreau, P. R., and Dickie, L. M. 1992. Biomass Spectra of Aquatic Ecosystems in Relation to Fisheries Yield. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 49: 1528–1538.
- Boudreau, P. R., Dickie, L. M., and Kerr, S. R. 1991. Body-size spectra of production and biomass as system-level indicators of ecological dynamics. *Journal of Theoretical Biology*, 152: 329–339.
- Brey, T. 2001. Population dynamics in benthic invertebrates. A virtual handbook. Version 01.2., <http://www.thomas-brey.de/science/virtualhandbook>.
- Brey, T., Müller-Wiegmann, C., Zittier, Z. M. C., and Hagen, W. 2010. Body composition in aquatic organisms — A global data bank of relationships between mass, elemental composition and energy content. *Journal of Sea Research*, 64: 334–340. Elsevier B.V. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1385110110000705>.
- Camacho, J., and Solé, R. V. 2001. Scaling in ecological size spectra. *Europhysics Letters*, 55: 774–780.
- Campbell, L., Nolla, H. A., and Vaultot, D. 1994. The importance of *Prochlorococcus* to community structure in the Central of Pacific Ocean. *Limnology and Oceanography*, 39: 954–961.
- Caron, D. A., Dam, H. G., Kremer, P., Lessard, E., Madin, L. P., Malone, T. C., Napp, J. M., *et al.* 1995. The contribution of microorganisms to particulate carbon and nitrogen in surface waters of the Sargasso Sea near Bermuda. *Deep-Sea Research*, 42: 943–972.
- Choi, J. S., Mazumder, A., and Hansell, R. I. C. 1999. Measuring perturbation in a complicated, thermodynamic world. *Ecological Modelling*, 117: 143–158.

- DeBruyn, A. M. ., Marcogliese, D. J., and Rasmussen, J. B. 2002. Altered body size distributions in a large river fish community enriched by sewage. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 59: 819–828. <http://www.nrcresearchpress.com/doi/abs/10.1139/f02-056>.
- Duplisea, D., and Kerr, S. 1995. Application of a biomass size spectrum model to demersal fish data from the Scotian Shelf. *Journal of Theoretical Biology*, 177: 263–269. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022519385702433>.
- Echevarría, F., Carrillo, P., Jimenez, F., Sanchez-castillo, P., Cruz-pizarro, L., and Rodriguez, J. 1990. The size-abundance distribution and taxonomic composition of plankton in an oligotrophic, high mountain lake (La Caldera, Sierra Nevada, Spain). *Journal of Plankton Research*, 12: 415–422.
- Falkowski, P., Scholes, R. J., Boyle, E., Canadell, J., Canfield, D., Elser, J., Gruber, N., *et al.* 2000. The global carbon cycle: a test of our knowledge of earth as a system. *Science (New York, N.Y.)*, 290: 291–296.
- Fenchel, T. 1974. Intrinsic rate of natural increase: The relationship with body size. *Oecologia*, 14: 317–326. <http://www.springerlink.com/index/R676W424027752T8.pdf\npapers2://publication/uuid/E8F6AE1E-A5AF-4A94-891F-18FCABD3DC46>.
- Frangoulis, C., Psarra, S., Zervakis, V., Meador, T., Mara, P., Gogou, A., Zervoudaki, S., *et al.* 2010. Connecting export fluxes to plankton food-web efficiency in the Black Sea waters inflowing into the Mediterranean Sea. *Journal of Plankton Research*, 32: 1203–1216. <http://www.plankt.oxfordjournals.org/cgi/doi/10.1093/plankt/fbq010> (Accessed 19 June 2014).
- Fréon, P., and Misund, O. A. 1999. Dynamics of pelagic fish distribution and behaviour: effects on fisheries and stock assessment. *Fishing News Books*, Oxford: 348.
- Friligos, N. 1976. Seasonal variations of nutrients around the sewage outfall in the Saronikos Gulf (1973). *Thalassia Jugoslavica*: 441–453.
- Friligos, N. 1986. Nutrient cycling and a stoichiometric model in Epidavros, a deep basin in the Aegean Sea. *Pubblicazioni della Stazione Zoologica di Napoli I: Marine Ecology*, 7: 43–57.
- Gaedke, U. 1993. Ecosystem analysis based on biomass size distributions: A case study of a plankton community in a large lake. *Limnology and Oceanography*, 38: 112–127.
- Gallienne, C. P., and Robins, D. B. 2001. Is Oithona the most important copepod in the world's oceans? *Journal of Plankton Research*, 23: 1421–1432. <http://plankt.oxfordjournals.org/content/23/12/1421.short> (Accessed 7 October 2014).
- Giannoulaki, M., Machias, a., Koutsikopoulos, C., Haralabous, J., Somarakis, S., and Tsimenides, N. 2003. Effect of coastal topography on the spatial structure of the populations of small pelagic fish. *Marine Ecology Progress Series*, 265: 243–253.
- Gislason, H., and Rice, J. 1998. Modelling the response of size and diversity spectra of fish assemblages to changes in exploitation. *ICES Journal of Marine Science*, 55: 362–370.
- Gobert, B. 1994. Size structures of demersal catches in a multispecies multigear tropical fishery. *Fisheries Research*, 19: 87–104.
- Gómez-Canchong, P., Blanco, J. M., and Quiñones, R. A. 2013. On the use of biomass size spectra linear adjustments to design ecosystem indicators. *Scientia Marina*, 77: 257–268. <http://scientiamarina.revistas.csic.es/index.php/scientiamarina/article/view/1451/1565>.
- Gorsky, G., Ohman, M. D., Picheral, M., Gasparini, S., Stemmann, L., Romagnan, J.-B., Cawood, a., *et al.* 2010. Digital zooplankton image analysis using the ZooScan integrated system. *Journal of*

- Plankton Research, 32: 285–303.
<http://www.plankt.oxfordjournals.org/cgi/doi/10.1093/plankt/fbp124> (Accessed 15 September 2014).
- Graham, N., Dulvy, N., Jennings, S., and Polunin, N. 2005. Size-spectra as indicators of the effects of fishing on coral reef fish assemblages. *Coral Reefs*, 24: 118–124.
<http://link.springer.com/10.1007/s00338-004-0466-y>.
- Grosjean, P., Picheral, M., Warembourg, C., and Gorsky, G. 2004. Enumeration, measurement, and identification of net zooplankton samples using the ZOOSCAN digital imaging system. *ICES Journal of Marine Science*, 61: 518–525.
<http://icesjms.oxfordjournals.org/cgi/doi/10.1016/j.icesjms.2004.03.012>.
- Harris, R. P., Wiebe, P. H., Lenz, J., Skjoldal, H. R., and Huntley, M. 2000. *ICES Zooplankton Methodology Manual*. Academic press, London. 684 pp.
<http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=9-q2owZ2psQC&oi=fnd&pg=PP2&dq=ICES+Zooplankton+Methodology+Manual&ots=NI3WU6DvRB&sig=h4AkY19PQ0np1Gifb0na3OSezAI> (Accessed 8 October 2014).
- Hillebrand, H., Dürselen, C.-D., Kirschtel, D., Pollinger, U., and Zohary, T. 1999. Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae. *Journal of phycology*, 424: 403–424.
- Houde, E. D., Adolf, J., Boicourt, W. C., Connelly, W., Gallegos, C. L., Harding, L. W., Jordan, C., *et al.* 2004. Trophic Indicators of Ecosystem Health in Chesapeake Bay. Progress Report, EAGLES - Atlantic Coast Environmental Indicators Consortium.
- Hutchinson, G. E., and MacArthur, R. H. 1959. A Theoretical Ecological Model of Size Distributions Among Species of Animals. *The American Naturalist*, 93: 117–125.
- Hyslop, E. J. 1980. Stomach contents analysis—a review of methods and their application. *Journal of Fish Biology*, 17: 411–429. <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1095-8649.1980.tb02775.x>.
- IPCC 3rd Assessment Report. 2001. The Carbon Cycle and Atmospheric Carbon Dioxide. In: *Climate Change 2001: The Scientific Basis, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press: 183–237.
- Jung, S., and Houde, E. D. 2005. Fish biomass size spectra in Chesapeake Bay. *Estuaries*, 28: 226–240.
<http://www.springerlink.com/content/q40273v79417h728/>.
- Kana, T., and Glibert, P. M. 1987. Effect of irradiances up to 2000 $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ on marine *Synechococcus* WH7803—I. Growth, pigmentation, and cell composition. *Deep-Sea Research*, 34: 479–516.
- Kerr, S. R., and Dickie, L. M. 2001. *The Biomass Spectrum: A Predator-Prey Theory of Aquatic Production*. Columbia University Press: 352.
- Korcak, J. 1938. Deux types fondamentaux de distribution statistique. Comité d'organisation, Bull. de l'Institute Int'l de Statistique, Prague, 3: 295–299.
- Lee, S., and Fuhrman, J. A. 1987. Relationships between biovolume and biomass of naturally derived marine bacterioplankton. *Applied Environmental Microbiology*, 53: 1298–1303.
- Lleonart, J., and Maynou, F. 2003. Fish stock assessments in the Mediterranean: state of the art. *Scientia Marina*, 67: 37–49. <http://www.google.com/search?client=safari&rls=es-es&q=Fish+stock+assessments+in+the+Mediterranean:+state+of+the+art&ie=UTF-8&oe=UTF-8>.

- Lombard, F., Renaud, F., Sainsbury, C., Sciandra, A., and Gorsky, G. 2009. Appendicularian ecophysiology I. *Journal of Marine Systems*, 78: 606–616. Elsevier B.V. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924796309001092> (Accessed 8 October 2014).
- Louw, G., van der Lingen, C., and Gibbons, M. J. 1998. Differential feeding by sardine *Sardinops sagax* and anchovy *Engraulis capensis* recruits in mixed shoals. *South African Journal of Marine Science*, 19: 227–232. <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.2989/025776198784126647>.
- MacArthur, R. 1960. On the relative abundance of species. *American Naturalist*, 94: 25–36.
- MacArthur, R. H. 1957. On the relative abundance of bird species. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, 43: 293–295.
- Marie, D., Partensky, F., Jacquet, S., and Vaultot, D. 1997. Enumeration and cell cycle analysis of natural populations of marine picoplankton by flow cytometry using the nucleic acid stain SYBR Green I. *Applied and Environmental Microbiology*, 63: 186–193.
- Menden-Deuer, S., and Lessard, E. J. 2000. Carbon to volume relationships for dinoflagellates, diatoms, and other protist plankton. *Limnology and Oceanography*, 45: 569–579.
- Moloney, C. L., and Field, J. G. 1985. Use of particle-size data to predict potential pelagic-fish yields of some southern African areas. *South African Journal of Marine Science*, 3: 119–128. <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.2989/025776185784461144>.
- Murawski, S. A., and Idoine, J. S. 1992. Multispecies size composition: a conservative property of exploited fishery systems? *Journal of Northwest Atlantic Fishery Science*, 14: 79–85.
- Nikolioudakis, N., Isari, S., Pitta, P., and Somarakis, S. 2012. Diet of sardine *Sardina pilchardus*: an ‘end-to-end’ field study. *Marine Ecology Progress Series*, 453: 173–188. <http://www.int-res.com/abstracts/meps/v453/p173-188/> (Accessed 8 October 2014).
- Nikolioudakis, N., Isari, S., and Somarakis, S. 2014. Trophodynamics of anchovy in a non-upwelling system: direct comparison with sardine. *Marine Ecology Progress Series*, 500: 215–229. <http://www.int-res.com/abstracts/meps/v500/p215-229/> (Accessed 8 October 2014).
- Nikolioudakis, N., Palomera, I., Machias, A., and Somarakis, S. 2011. Diel feeding intensity and daily ration of the sardine *Sardina pilchardus*. *Marine Ecology Progress Series*, 437: 215–228. <http://www.int-res.com/abstracts/meps/v437/p215-228/>.
- Paraskevopoulou, V., Zeri, C., Kaberi, H., Chalkiadaki, O., Krasakopoulou, E., Dassenakis, M., and Scoullou, M. 2014. Trace metal variability, background levels and pollution status assessment in line with the water framework and Marine Strategy Framework EU Directives in the waters of a heavily impacted Mediterranean Gulf. *Marine Pollution Bulletin*, 87: 323–337. Elsevier Ltd. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0025326X14004974>.
- Pareto, V. 1897. *Cours d’Economie Politique*. V. 2, book 3, Lausanne.
- Pavlidou, A., Kontoyiannis, H., Anagnostou, C., Siokou–Frangou, I., Pagou, K., Krasakopoulou, E., Assimakopoulou, G., *et al.* 2010. Biogeochemical Characteristics in the Elefsis Bay (Aegean Sea, Eastern Mediterranean) in Relation to Anoxia and Climate Changes. *In Handbook of Environmental Chemistry*, pp. 161–201. http://link.springer.com/10.1007/698_2010_55.
- Petchey, O. L., and Belgrano, A. 2010. Body-size distributions and size-spectra: universal indicators of ecological status? *Biology letters*, 6: 434–437.
- Peterson, I., and Wroblewski, J. S. 1984. Mortality Rate of Fishes in the Pelagic Ecosystem. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 41: 1117–1120.

- Platt, T., and Denman, K. 1977. Organisation in the pelagic ecosystem. *Helgoländer Wissenschaftliche Meeresunters*, 581: 575–581. <http://link.springer.com/article/10.1007/BF02207862> (Accessed 19 June 2014).
- Platt, T., and Denman, K. 1978. The structure of pelagic marine ecosystems. *Rapports et Proces Verbaux des Reunions*, 173: 60–65. <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=DK19790419065> (Accessed 19 June 2014).
- Pope, J. G., Stokes, T. K., Murawski, S. A., and Idoine, J. S. 1988. A comparison of fish size composition in the North Sea and on Georges Bank. In: W. Wolff et al. (ed.), *Ecodynamics: Contributions to Theoretical Ecology*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg: 146–152.
- Rice, J., and Gislason, H. 1996. Patterns of change in the size spectra of numbers and diversity of the North Sea fish assemblage, as reflected in surveys and models. *ICES Journal of Marine Science*, 53: 1214–1225. <http://icesjms.oxfordjournals.org/content/53/6/1214.short>.
- Richter, C. F. 1958. *Elementary seismology*. W. H. Freeman and Co., San Francisco: 768.
- San Martin, E., Harris, R. P., and Irigoien, X. 2006. Latitudinal variation in plankton size spectra in the Atlantic Ocean. *Deep-Sea Research*, 53: 1560–1572. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S096706450600124X> (Accessed 30 September 2014).
- Schoener, T. W. 1974. Resource partitioning in Ecological Communities. *Science*, 185: 27–39.
- Schwinghamer, P. 1985. Observations on size-structure and pelagic coupling of some shelf and abyssal benthic communities. In: Gibbs P.E. (ed.). *Proceedings of the 19th European Marine Biology Symposium, September 1984*: 347–360.
- Sheldon, R. W., Prakash, A., and Sutcliffe, W. H. J. 1972. The size distribution of the particles in the ocean. *Limnology and Oceanography*, 17: 323–340.
- Sheldon, R. W., Sutcliffe Jr., W. H., and Paranjape, M. a. 1977. Structure of pelagic food chain and relationship between plankton and fish production. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 34: 2344–2353.
- Sheldon, R. W., Sutcliffe, W. H. J., and Prakash, A. 1973. The production of particles in the surface waters of the ocean with particular reference to the sargasso sea. *Limnology and Oceanography*, 18: 719–733.
- Silvert, W., and Platt, T. 1978. Energy flux in the pelagic ecosystem: a time-dependent equation. *Limnology and Oceanography*, 23: 813–816. http://www.aslo.org/lo/toc/vol_23/issue_4/0813.html (Accessed 19 June 2014).
- SoHelME. 2005. *State of the Hellenic Marine Environment*. Papathanasiou, E. and Zenetos, A. (eds), HCMR publications: 360pp.
- Sprules, W. G. 1980. Zoogeographic patterns in the size structure of zooplankton communities, with possible applications to lake ecosystem modelling and management. In: W.C. Kerfoot (ed.), *Evolution and ecology of zooplankton communities*. University Press of New England: 642–656.
- Sprules, W. G. 1984. Towards an optimal classification of zooplankton for lake ecosystem studies. *Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie*: 320–325.
- Sprules, W. G., and Goyke, A. P. 1994. Size-based structure and production in the pelagia of Lakes Ontario and Michigan. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 51: 2603–2611.
- Sprules, W. G., and Munawar, M. 1986. Plankton Size Spectra in Relation to Ecosystem Productivity, Size, and Perturbation. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 43: 1789–1794.

- Thiebaut, M. L., and Dickie, L. M. 1992. Models of aquatic biomass size spectra and the common structure of their solutions. *Journal of Theoretical Biology*, 159: 147–161.
- Thiebaut, M. L., and Dickie, L. M. 1993. Structure of the Body-Size Spectrum of the Biomass in Aquatic Ecosystems: A Consequence of Allometry in Predator–Prey Interactions. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 50: 1308–1317.
- Thomann, R. V. 1979. An analysis of PCB in Lake Ontario using a size-dependent food chain model. In: Scavia D., Robertson A. (eds), *Perspectives on Lake Ecosystem Modelling*, Ann Arbor Science: 292–320.
- Thomann, R. V. 1981. Equilibrium Model of Fate of Microcontaminants in Diverse Aquatic Food Chains. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 38: 280–297.
- Tsagarakis, K., Giannoulaki, M., Pyrounaki, M., and Machias, A. 2015. Species identification of small pelagic fish schools by means of hydroacoustics in the Eastern Mediterranean Sea. *Mediterranean Marine Science*, 16: 151–161.
- Uye, S. 1982. Length-weight relationships of important zooplankton from the Inland Sea of Japan. *Journal of the Oceanological Society of Japan*, 38: 149–158.
- Van Der Lingen, C. D. 2002. Diet of sardine *Sardinops sagax* in the southern Benguela upwelling ecosystem. *South African Journal of Marine Science*, 24: 301–316. <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.2989/025776102784528691>.
- Vidondo, B., Prairie, Y. T., Blanco, J. M., and Duarte, C. M. 1997. Some aspects of the analysis of size spectra in aquatic ecology. *Limnology and Oceanography: Methods*, 42: 184–192. <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=2669321> (Accessed 8 October 2014).
- Warwick, R., Collins, N., Gee, J., and George, C. 1986. Species size distributions of benthic and pelagic Metazoa: evidence for interaction? . *Marine Ecology Progress Series*, 34: 63–68.
- Winiwarter, P. 1983. The Genesis model - Part II: Frequency distributions of elements in self-organised systems. *Speculations in Science and Technology*, 6: 103–112.
- Yvon-Durocher, G., Montoya, J. M., Trimmer, M., and Woodward, G. 2011. Warming alters the size spectrum and shifts the distribution of biomass in freshwater ecosystems. *Global Change Biology*, 17: 1681–1694.
- Zhou, M. 2006. What determines the slope of a plankton biomass spectrum? *Journal of Plankton Research*, 28: 437–448. <http://www.plankt.oxfordjournals.org/cgi/doi/10.1093/plankt/fbi119>.
- Zipf, G. K. 1949. *Human Behavior and the Principle of Least Effort*. Addison-Wesley Press, Cambridge: 573.
- Zubkov, M. V., and Burkill, P. H. 2006. Syringe Pumped High Speed Flow Cytometry of Oceanic Phytoplankton. *Cytometry Part A*, 69A: 1010–1019.

