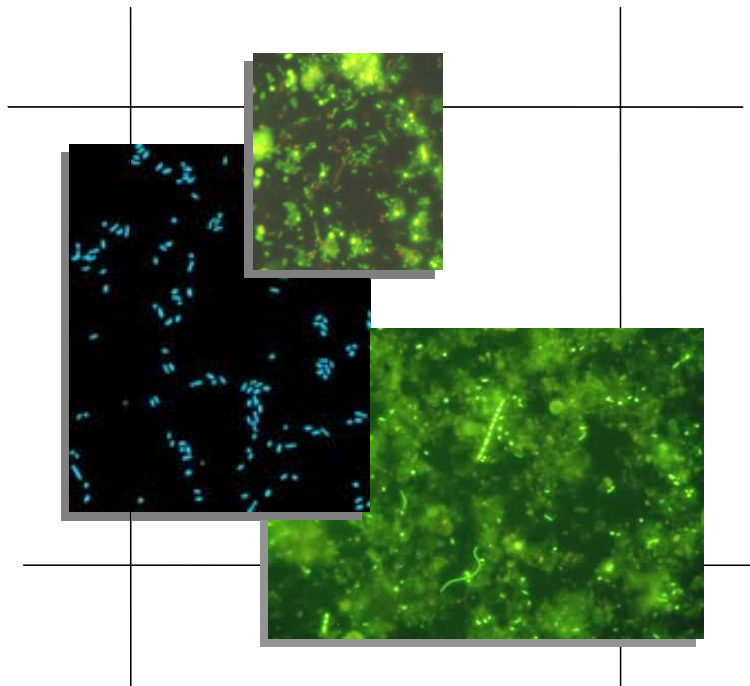


ΜΠΣ: «ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΒΙΟΛΟΓΙΑ: Διαχείριση χερσαίων και θαλάσσιων βιολογικών πόρων»

Μεταπτυχιακή διατριβή

«Κατανομή των βακτηριακών κοινοτήτων και των περιβαλλοντικών παραμέτρων που τις επηρεάζουν, σε θαλάσσια ιζήματα του Θρακικού Πελάγους»

Γλυκερία Φραγκιουδάκη



Ηράκλειο
Σεπτέμβριος 2006

Φωτογραφίες εξωφύλλου: Βακτήρια όπως φαίνονται με φθορίζον μικροσκόπιο και διαφορετικές χρώσεις σε ίζημα και νερό.

Πηγές: <http://www.naturesocean.com/images/nsw2.gif>

<http://www.icbm.de/pmbio/mikrobiologischer-garten/eng/enwat04.htm>

<http://serc.carleton.edu/microbelife/microobservatories/oligocean/methods.html>

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Αναστάσιο Τσελεπίδη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αλλά και την πολύτιμη βοήθεια που μου πρόσφερε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου διατριβής σε όλα της τα στάδια, αλλά και τον καθηγητή κ. Μιχάλη Παυλίδη για τις συμβουλές και τις παρατηρήσεις του.

Ιδιαίτερα σημαντική ήταν η συμβολή της Βούλας Πολυμενάκου στη δειγματοληψία, στις εργαστηριακές αναλύσεις, στο γράψιμο αλλά και στην παρουσίαση, γι' αυτό και την ευχαριστώ ιδιαίτερα.

Σημαντική βοήθεια υπήρξαν όλοι από την ωκεανογραφία με τον ένα ή τον άλλο τρόπο, ο Δημήτρης Ποδάρας, ο Νίκος Λαμπαδαρίου, ο Φώτης Πανταζόγλου και η Στέλλα Ψαρά. Τον Πέσμα τον ευχαριστώ και σαν φίλο και γιατί λασπωθήκαμε αρκετά μαζί στο καράβι!

Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε στα εργαστήρια του Ινστιτούτου Ωκεανογραφίας του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. Κρήτης. Η δειγματοληψία έγινε με το Ωκεανογραφικό Πλοίο «Αιγαίο» στα πλαίσια του προγράμματος AN.REC. γι' αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καπετάνιο και τα μέλη του πληρώματος του πλοίου.

Δεν θα μπορούσα να μην αναφερθώ στην Κορ και τη Μαρία, αλλά και σε όλους τους φίλους που έκαναν το Ηράκλειο πιο όμορφο!

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την συμπαράσταση τους όλα αυτά τα χρόνια.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	1
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	
1.1 Γενικά στοιχεία	4
1.2 Περιγραφή της υπό μελέτη περιοχής	5
1.2.1 Η Ανατολική Μεσόγειος	5
1.2.2 Το Βόρειο Αιγαίο και το Θρακικό πέλαγος	6
1.3 Καταμέτρηση της αφθονίας των βενθικών βακτηρίων	9
1.4 Διαχωρισμός ενεργών και ανενεργών βακτηρίων	10
1.5 Περιβαλλοντικές παράμετροι του ιζήματος	11
1.5.1 Οργανικό υλικό και οργανικός άνθρακας	11
1.5.2 Στοιχειακός άνθρακας	12
1.5.3 Φυτοχρωστικές	13
1.5.4 κ-Αλκάνια	13
1.6 Στόχοι της μελέτης	15
2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ	
2.1 Δειγματοληψία	16
2.2 Καταμέτρηση ολικών και ενεργών βακτηρίων	18
2.3 Προσδιορισμός χλωροφύλλης, φαιοχρωστικών και CPE	18
2.4 Προσδιορισμός συνολικού οργανικού άνθρακα, στοιχειακού και βιοδιαθέσιμου οργανικού άνθρακα	19
2.5 Προσδιορισμός συγκεντρώσεων κ-αλκανίων	19
2.6 Στατιστική ανάλυση	20
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	
3.1 Ολικά και ενεργά βακτήρια	22
3.2 Συγκεντρώσεις χλωροφύλλης-α, φαιοφυτινών και CPE	25
3.3 Συγκεντρώσεις συνολικού οργανικού άνθρακα, στοιχειακού και βιοδιαθέσιμου οργανικού άνθρακα	29
3.4 Συγκεντρώσεις κ-αλκανίων	32
3.5 Συσχετίσεις μεταξύ των μεταβλητών	35
3.6 Ανάλυση πρωταρχικών συνιστωσών	41
3.7 Ανάλυση BIOENV: Συσχέτιση της βακτηριακής αφθονίας και των περιβαλλοντικών παραμέτρων	43
4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ	
4.1 Βακτηριακή αφθονία και κατανομή των βακτηριακών κοινωνιών	44
4.2 Συγκεντρώσεις φυτοχρωστικών	46
4.3 Συγκεντρώσεις οργανικού και στοιχειακού άνθρακα και βιοδιαθέσιμου οργανικού άνθρακα	49
4.4 Συγκεντρώσεις κ-αλκανίων και προέλευση της προσδιορισμένης οργανικής ύλης	51
4.5 Συσχετίσεις μεταξύ των μεταβλητών	54
4.6 Ανίχνευση ομαδοποιήσεων μεταξύ των σταθμών	56
4.7 Παράγοντες που επηρεάζουν την κατανομή των βακτηρίων	57

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	
5.1 Βακτηριακή κατανομή:	59
5.2 Κατανομή οργανικού υλικού:	59
5.3 Προέλευση οργανικού υλικού και κατανομή κ-αλκανίων:	60
5.4 Ομαδοποιήσεις μεταξύ των σταθμών:	60
Βιβλιογραφία:	62

Περίληψη

Η περιοχή του Θρακικού Πελάγους αποτελεί το Βορειανατολικότερο άκρο της Μεσογείου. Είναι περιοχή ιδιαίτερου ενδιαφέροντος καθώς χαρακτηρίζεται από έντονη γεωμορφολογία και πολύπλοκη υδρογραφία. Στη συγκεκριμένη περιοχή εκβάλλουν αρκετά ποτάμια και εισέρχονται τα νερά της Μαύρης θάλασσας, επηρεάζοντας σημαντικά τη στήλη του νερού και κατά συνέπεια το βένθος.

Η συγκεκριμένη περιοχή επιλέχθηκε για την πραγματοποίηση της παρούσας έρευνας, σκοπός της οποίας ήταν η μελέτη της κατανομής των ολικών και ενεργών βακτηρίων στα ιζήματα και η ανίχνευση των περιβαλλοντικών παραμέτρων που την επηρεάζουν.

Για το σκοπό αυτό, επιλέχθηκε ένα πλέγμα οχτώ σταθμών στο Θρακικό Πέλαγος έτσι ώστε να καλύπτεται το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής. Από κάθε σταθμό λήφθηκαν πυρήνες ιζημάτων με χρήση του πολυπυρηνοδειγματολήπτη Multiple-corer, τον Ιούλιο του 2004, οι οποίοι στη συνέχεια τεμαχίστηκαν σε επτά βάθη (0-1, 1-2, 2-4, 4-6, 6-8, 8-10 και 10-12 cm). Σε όλους τους πυρήνες και σε κάθε βάθος, έγινε καταμέτρηση ολικών και ενεργών βακτηρίων και προσδιορίστηκαν το Eh, οι συγκεντρώσεις οργανικού, μαύρου και βιοδιαθέσιμου οργανικού άνθρακα, χλωροφύλλης-α, φαιοφυτινών και του ισοδύναμου χλωροπλαστικών χρωστικών (CPE). Στο επιφανειακό ίζημα μόνο, έγινε προσδιορισμός των συγκεντρώσεων των κ-αλκανίων, ώστε να ερευνηθεί η προέλευση τους και η ύπαρξη ρύπανσης στην περιοχή.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της καταμέτρησης των ολικών και ενεργών βακτηρίων, φάνηκε ότι οι αφθονίες τους μειώνονται με το βάθος από την επιφάνεια του πυρήνα. Η κατανομή των βακτηριακών κοινωνιών όμως, δεν φάνηκε να μεταβάλλεται βάση κάποιου συγκεκριμένου προτύπου. Όλες οι παράμετροι του οργανικού υλικού, παρουσίασαν επίσης μείωση με το βάθος από την επιφάνεια του πυρήνα και η κατανομή τους δεν ακολουθούσε κάποιο πρότυπο. Οι συγκεντρώσεις των κ-αλκανίων και οι δείκτες που προκύπτουν από τις συγκεντρώσεις τους, έδειξαν ότι τα κ-αλκάνια σε όλους τους σταθμούς είναι χερσαίας προέλευσης, ενώ η περιοχή δεν μπορεί να θεωρηθεί ρυπασμένη.

Εξετάζοντας όλους τους παραπάνω παράγοντες σε σχέση με τις αφθονίες των βακτηρίων, φάνηκε ότι στο επιφανειακό ίζημα η κατανομή τους επηρεάζεται αρνητικά από τη συγκέντρωση των κ-αλκανίων, ενώ οι υπόλοιπες παράμετροι δεν προέκυψε να επηρεάζουν την κατανομή τους.

Κατά τη στατιστική ανάλυση, δεν προέκυψε καμία ομαδοποίηση μεταξύ των σταθμών, γεγονός που αποδίδεται στη γεωμορφολογία της περιοχής και τις έντονες τεκτονικές συνθήκες που επικρατούν.

Abstract

Thracian Sea is located in the North- East Mediterranean Sea and is an area of great interest due to its complicated geomorphology as well as to influences of riverine inputs and Black Sea Waters. This area was chosen in order to study the distribution of total and nucleoid containing bacteria as well as the environmental factors that controls them.

Sediment samples were collected from eight different stations using a Bowers and Conelly multiple corer in July 2004 on board the R/V Aegeao. Corers were sliced in seven different layers representing the following depths: 0-1, 1-2, 2-4, 4-6, 6-8, 8-10 and 10-12 cm. The environmental factors determined were organic carbon, black carbon, bioavailable organic carbon, chlorophyll a, phaeopigments and CPE. The amount of *n*-alkanes was also determined in the surficial sediments (0-1 cm).

According to the results, total and nucleoid containing bacterial counts showed a decreasing trend following sediment depth. Their distribution though, showed no significant trend. All the environmental factors followed also a depth decreasing trend. No factor was found to control their distribution. From the analysis of the *n*-alkanes concentrations is evident that all the *n*-alkanes are of terrestrial origin and that the area is not polluted from petroleum hydrocarbons.

Following statistical procedures, negative correlation was found at the surface sediment between the bacterial distribution and the *n*-alkanes of terrestrial origin. However, we could not determine any important environmental factor that controls their distribution; these results may likely be explained as the consequences of the strong bottom currents and the tectonic activity of the area.

1.1 Γενικά στοιχεία

Οι βακτηριακές κοινότητες αποτελούν βασικό στοιχείο της βενθικής τροφικής αλυσίδας έχοντας την ικανότητα να ελέγχουν τον κύκλο των θρεπτικών (π.χ. άζωτο, φώσφορος), του άνθρακα και του οξυγόνου παίζοντας καθοριστικό ρόλο σε όλες τις βιογεωχημικές διεργασίες του ιζήματος (Danovaro *et al.*, 1993; 1995; Danovaro, 1996; Fabiano & Danovaro, 1998; Danovaro *et al.*, 1999b; Turley, 2000; Van Wambeke *et al.*, 2000; Polymenakou *et al.*, 2005a). Έχουν την ικανότητα να εκμεταλλεύονται την οργανική ύλη, να βελτιώνουν την ποιότητα της, ιδιαίτερα σε oligοτροφικά περιβάλλοντα (Pfanckuche, 1993; Danovaro *et al.*, 1999b; 1999c; 2000b) μετατρέποντας δυσδιάλυτες ουσίες σε διαθέσιμη τροφή για τους οργανισμούς (Danovaro *et al.*, 1998; 1999b; 1999c; Bianchi *et al.*, 2003a).

Κατά κύριο λόγο τα βακτήρια αποτελούν ένα πολύ σημαντικό ποσοστό της συνολικής βενθικής βιομάζας στα βαθιά ιζήματα (Danovaro, 1996; Danovaro *et al.*, 1999c; Dixon & Turley, 2002). Περίπου το 75% της συνολικής βιομάζας ενός θαλάσσιου οικοσυστήματος βρίσκεται στα πρώτα 10 cm του ιζήματος, ενώ τα βακτήρια που υπάρχουν στα παράκτια και τα βαθύτερα ιζήματα αποτελούν το 76% της συνολικής βακτηριακής βιομάζας του πλανήτη (Turley, 2000).

Παρά το γεγονός ότι σε παγκόσμια κλίμακα έχουν πραγματοποιηθεί διάφορες μελέτες για την παρουσία των βακτηρίων στα ιζήματα (Boetius *et al.*, 1996; Danovaro, 1996; Epstein, 1997; Danovaro *et al.*, 1998; Fabiano & Danovaro, 1998; Danovaro *et al.*, 1999a; 1999b; 1999c; 2000a; 2000b; Turley, 2000; Danovaro *et al.*, 2001; Turley & Dixon, 2002; Bianchi *et al.*, 2003a; 2003b; Luna *et al.*, 2004; Polyenakou *et al.*, 2005a), οι παράγοντες που επηρεάζουν την κατανομή των βακτηρίων στα ιζήματα είναι δύσκολο να προσδιοριστούν καθώς εξαρτώνται από τις ιδιαιτερότητες του κάθε οικοσυστήματος (Luna *et al.*, 2004). Θεωρείται ότι η κατανομή τους στα θαλάσσια ιζήματα καθορίζεται από πολλούς παράγοντες που συμπεριλαμβάνουν την κοκκομετρία του ιζήματος, τις διαταραχές που συμβαίνουν σε αυτό (τυρβώδης ροή, επαναιώρηση), το δυναμικό οξειδοαναγωγής, την διαθεσιμότητα της τροφής και την θηρευτική πίεση που τους ασκείται από τα πρωτόζωα και την μειοπανίδα (Danovaro *et al.*, 2001; 2002).

Βασικός στόχος της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της κατανομής των βακτηριακών αφθονιών σε ιζήματα από την περιοχή του Θρακικού Πελάγους (Βόρειο Αιγαίο) καθώς και της ποιότητας και προέλευσης του οργανικού υλικού. Στην περιοχή του Β. Αιγαίου, η εισροή υδάτων από τις εκβολές των ποταμών και από την Μαύρη

θάλασσα μέσω του στενού των Δαρδανελίων, σε συνδυασμό με τις διεργασίες που συμβαίνουν μέσω της αλληλεπίδρασης αέρα-θάλασσας, έχουν σαν αποτέλεσμα την διαμόρφωση ενός σύνθετου συστήματος όσον αφορά στην υδρολογία και στις βιοχημικές διεργασίες της στήλης του νερού και των ιζημάτων. Οι παραπάνω συνθήκες εξασφαλίζουν την μοναδικότητα της περιοχής για τη μελέτη των βιογεωχημικών συνθηκών (Lykousis *et al.*, 2002).

Παρά την ιδιαιτερότητα όμως της περιοχής, θεωρείται από τις λιγότερο μελετημένες λεκάνες όλης της Μεσογείου (Zeri *et al.*, 2000) και ιδιαίτερα όσον αφορά στις μικροβιακές κοινωνίες για τις οποίες έχουν πραγματοποιηθεί ελάχιστες μελέτες (Danovaro *et al.*, 1999c; Bianchi *et al.*, 2003b; Πολυμενάκου, 2005). Οι Danovaro και συνεργάτες (1999c), μελέτησαν την βακτηριακή αφθονία και βιομάζα του Βόρειου και Νότιου Αιγαίου σε σχέση με την είσοδο στο βενθικό οικοσύστημα οργανικού υλικού από την εύρωτη ζώνη. Σύμφωνα με τα συμπεράσματα τους, η βακτηριακή βιομάζα επηρεάζεται άμεσα από την ποιότητα του οργανικού υλικού που εισέρχεται στο βενθικό περιβάλλον και η απόκριση των βακτηριακών κοινωνιών στις μεταβολές της πελαγικής παραγωγικότητας είναι άμεση. Στη συνέχεια οι Bianchi *et al.*, (2003b), μελετώντας την μεταβολική δραστηριότητα των βακτηρίων σε σχέση με το βενθικό οργανικό υλικό, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η αποδόμηση της οργανικής ύλης είναι ιδιαίτερα έντονη στα πρώτα 4cm του ιζήματος. Η Πολυμενάκου (2005), μελέτησε τη σύνθεση των μικροβιακών κοινωνιών με τη μέθοδο της ανάλυσης φωσφολιπιδίων (PLFA), σε σχέση με την παρουσία στο ίζημα δυσδιάλυτης οργανικής ύλης και ρύπανσης. Σύμφωνα με τα συμπεράσματα της έρευνας, η παρουσία στο ίζημα δυσδιάλυτων ουσιών (π.χ. στοιχειακός άνθρακας), επηρεάζει την διαθεσιμότητα του άνθρακα στις μικροβιακές κοινωνίες.

1.2 Περιγραφή της υπό μελέτη περιοχής

1.2.1 Η Ανατολική Μεσόγειος

Η Μεσόγειος χωρίζεται από τα στενά της Σικελίας σε δύο βαθιές λεκάνες, την δυτική και ανατολική λεκάνη. Όσον αφορά στην κυκλοφορία των επιφανειακών υδάτων της ανατολικής λεκάνης, χαρακτηρίζεται από κυκλωνική κίνηση που είναι αποτέλεσμα της επίδρασης του ανέμου, της σχέσης θερμοκρασίας και αλατότητας των υδάτινων μαζών, της έντονης τοπογραφίας του βυθού, της ακανόνιστης ακτογραμμής, των μεγάλων νησιών που συναντώνται και της ανταλλαγής νερών με τις γειτονικές λεκάνες.

Σημαντική εισροή/εκροή υδάτων συμβαίνει μέσω των στενών της Σικελίας με τη δυτική λεκάνη της Μεσογείου, μέσω του στενού του Οτράντο με την Αδριατική θάλασσα και μέσω των στενών της Κρήτης με το Αιγαίο πέλαγος (Horton *et al.*, 1997).

Η Ανατολική λεκάνη της Μεσογείου έχει χαρακτηριστεί ως ένα από τα περισσότερο oligοτροφικά συστήματα στον κόσμο (Ignatiades, 1969; Krom, 1991, Tselepides *et al.*, 2000a) και για το λόγο αυτό συγκεντρώνει μεγάλο επιστημονικό ενδιαφέρον. Ο oligοτροφικός χαρακτήρας της Ανατολικής Μεσογείου αποδίδεται σε διάφορους παράγοντες όπως στην εξάντληση των θρεπτικών και μείωση της παραγωγικότητας με κατεύθυνση προς τα Ανατολικά (Salihiglou *et al.*, 1990), στη μεταφορά της οργανικής ύλης προς τα Δυτικά λόγω της υδρολογίας της περιοχής (Dugdale & Wilkerson, 1988) και στην έντονη βόσκηση του φυτοπλαγκτού από το μεγάλο απόθεμα ζωοπλαγκτού (Weikert & Koppelman, 1993).

Η Ηπειρωτική κατωφέρεια και τα βαθιά ιζήματα της Ανατολικής Μεσογείου έχουν θεωρηθεί σαν κλειστό υποσύστημα (Tselepides *et al.*, 2000a) που χαρακτηρίζεται από α) εισροή αμελητέας ποσότητας πρωτογενούς οργανικής ύλης, β) οργανική ύλη που αποτελείται κυρίως από δυσδιάλυτες ουσίες και γ) χαμηλές συγκεντρώσεις των οργανικών ενώσεων που δυνητικά αποτελούν περιοριστικό παράγοντα ανάπτυξης και οι οποίες μειώνονται με το βάθος και την απόσταση από την ξηρά (Tselepides & Lampadariou, 2004).

1.2.2 Το Βόρειο Αιγαίο και το Θρακικό πέλαγος

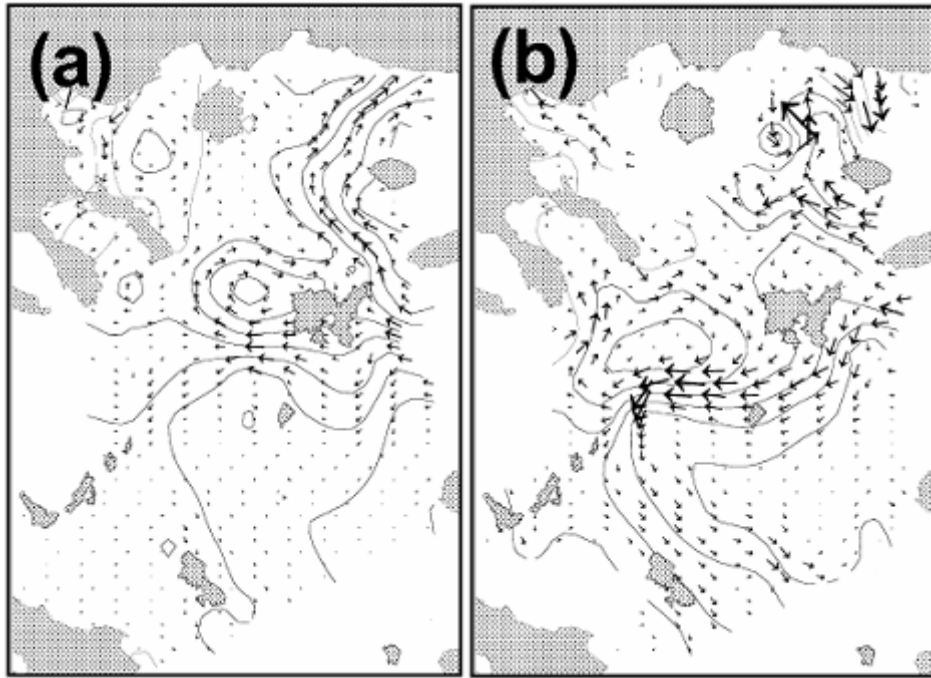
Το Αιγαίο αποτελεί λεκάνη με ιδιόμορφη τοπογραφία, ασυνήθιστη βαθυμετρία και εκατοντάδες μικρά και μεγάλα νησιά. Η τοπογραφία του βυθού αποτελείται από τρεις λεκάνες: τη λεκάνη του όρους Άθως στα βόρεια, τη λεκάνη της Χίου κεντρικά και τη λεκάνη της Κρήτης που είναι η μεγαλύτερη στα νότια. Στο βορειοανατολικότερο άκρο, το Αιγαίο ανταλλάζει νερά με την θάλασσα του Μαρμαρά, η οποία λειτουργεί σαν διάυλος επικοινωνίας με την Μαύρη θάλασσα. Τα νερά της Μαύρης θάλασσας είναι χαμηλότερης αλατότητας και επιπλέον εισερχόμενα προς το Αιγαίο, ενώ τα πυκνότερα και μεγαλύτερης αλατότητας νερά του Αιγαίου, κατευθύνονται βυθιζόμενα προς τη θάλασσα του Μαρμαρά. Η μεγαλύτερη ροή προς το Αιγαίο, συμβαίνει προς τα τέλη της άνοιξης και τις αρχές καλοκαιριού, όταν δηλαδή τα κατακρημνίσματα είναι περισσότερα και η εκροή των ποταμών στην Μαύρη θάλασσα είναι μεγαλύτερη (Poulos *et al.*, 1997)

Στο Βόρειο Αιγαίο εκρέουν διάφορα ποτάμια κατά μήκος της Ελληνικής και Τουρκικής ακτογραμμής, τα σπουδαιότερα από τα οποία είναι ο Αξιός, ο Αλιάκμονας, ο Γαλλικός, ο Πηνειός, ο Σπερχειός, ο Έβρος, ο Στρυμόνας, ο Νέστος και τα μικρότερα ποτάμια Menderes, Bakir, Gediz, Kuguk Menderes και Bujuk Menderes, της Τουρκίας (Poulos *et al.*, 1997)

Το Β. Αιγαίο αποτελεί το βορειοανατολικότερο τμήμα της Ανατολικής Μεσογείου. Λόγω της θέσης του αποτελεί συνδετικό κρίκο μεταξύ των νερών της Μεσογείου και της Μαύρης θάλασσας. Η εισροή των υδάτων της Μαύρης θάλασσας στο Β. Αιγαίο αποτελεί την σημαντικότερη πηγή υδάτων για την περιοχή αφού είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από τις εισροές των ποταμών που εκβάλλουν στο Β. Αιγαίο (Kourafalou & Barboroulos, 2003). Έχει υπολογιστεί ότι η ποσότητα των υδάτων που εισρέουν από τη Μαύρη θάλασσα στο Β. Αιγαίο είναι περίπου $400 \text{ km}^3/\text{y}$, ενώ η συνολική προσφορά όλων των ποταμών που εκβάλλουν στο Β. Αιγαίου είναι περίπου $33 \text{ km}^3/\text{y}$ (Giresse *et al.*, 2003). Άλλοι ερευνητές έχουν εκτιμήσει την ποσότητα των νερών της Μαύρης Θάλασσας από 100 έως $1300 \text{ km}^3/\text{y}$ και την εισροή των ποταμών περίπου $20 \text{ km}^3/\text{y}$ (Zervakis *et al.*, 2000).

Γενικά η κυκλοφορία των επιφανειακών υδάτων στο Β. Αιγαίο χαρακτηρίζεται από κυκλωνική κίνηση και ιδιαίτερα χαρακτηριστικό είναι το μέτωπο που σχηματίζεται από την εισροή των υδάτων της Μαύρης θάλασσας. Μία άλλη χαρακτηριστική μορφή της περιοχής είναι ο σχεδόν μόνιμος αντικυκλώνας στην περιοχή γύρω από την Σαμοθράκη και την Ίμβρο (Lykousis *et al.*, 2002).

Πιο συγκεκριμένα, η κυκλοφορία των υδάτων στην περιοχή του Β. Αιγαίου χαρακτηρίζεται από την κυριαρχία δύο ρευμάτων, ενός κινούμενου προς τα Δυτικά και ενός κινούμενου προς τα Νότια διαμορφώνοντας στην πορεία τους μικρής έκτασης κυκλώνες και αντικυκλώνες. Τα νερά της Μαύρης θάλασσας μετά την είσοδο τους, ακολουθούν δύο διαφορετικές κατευθύνσεις ανάλογα με την εποχή. Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού (περίοδος κατά την οποία πραγματοποιήθηκε η δειγματοληψία της παρούσας εργασίας), ο κύριος όγκος των νερών οδηγείται Νότια της Λήμνου με κατεύθυνση ΝΔ. Επιπρόσθετα, η αλληλεπίδραση των υδάτινων μαζών της Μαύρης θάλασσας και της Λεβαντίνης έχουν σαν αποτέλεσμα τον σχηματισμό ενός μετώπου νότια της Λήμνου κατά τους καλοκαιρινούς μήνες (Zodiatis, 1994). Στη συνέχεια τα νερά της Μαύρης θάλασσας κατευθύνονται πάνω από τη λεκάνη της Σαμοθράκης ακολουθώντας κίνηση προς τα Δυτικά (σχήμα 1.1) (Stergiou *et al.*, 1997).



Σχήμα 1.1: Επιφανειακή κυκλοφορία των υδάτων στο Β. Αιγαίο την Άνοιξη (εικόνα a) και το Φθινόπωρο (εικόνα b). (Lykousis *et al.*, 2002).

Το αποτέλεσμα της εισόδου των υδάτινων μαζών της Μαύρης θάλασσας στο Β. Αιγαίο είναι ο εμπλουτισμός της περιοχής σε οργανικό υλικό και θρεπτικά συστατικά που ευνοούν την αύξηση της πρωτογενούς παραγωγής και κατ' επέκταση και των ετερότροφων οργανισμών. Η σημασία του εμπλουτισμού της περιοχής σε οργανική ύλη είναι πολύ μεγάλη δεδομένου του ολιγοτροφικού χαρακτήρα της περιοχής του Β. Αιγαίου (Lykousis *et al.*, 2002). Είναι γνωστό εξάλλου ότι στις περιοχές που σχηματίζονται μέτωπα συμβαίνει βύθιση του οργανικού υλικού των επιφανειακών υδάτων προς τα βαθύτερα στρώματα με αποτέλεσμα τον εμπλουτισμό της βενθικής ζώνης σε θρεπτικά συστατικά (Bianchi *et al.*, 2003a).

Ένα άλλο χαρακτηριστικό της περιοχής είναι η έντονη γεωμορφολογία του βυθού που είναι αποτέλεσμα της έντονης τεκτονικής δραστηριότητας. Αποτέλεσμα της συνεχούς και μακροχρόνιας δράσης των τεκτονικών διεργασιών είναι ο σχηματισμός ρηγμάτων και κυρίως του ρήγματος του Β. Αιγαίου που εκτείνεται με κατεύθυνση ΝΔ-ΒΑ της περιοχής και περιλαμβάνει τις βαθιές λεκάνες του όρους Άθως και της Λήμνου με μέγιστο βάθος που φτάνει τα 1500m (σχήμα 1.2). Οι βαθιές λεκάνες διαχωρίζονται από περιοχές με ομαλότερη μορφολογία και βάθος περίπου 500m. Οι βαθυμετρικές αυτές διαφορές δημιουργούν ένα φυσικό φράγμα, διαχωρίζοντας τις περιοχές της υφαλοκρηπίδας στα βόρεια από την υπόλοιπη περιοχή (Kourafalou & Barboroulos, 2003). Αντίθετα οι περιοχές με βάθος μικρότερο από 400m έχουν ελεύθερη επικοινωνία

με το υπόλοιπο Αιγαίο και γι' αυτό θεωρείται ότι αποτελούνται από υδάτινες μάζες με προέλευση από τη θάλασσα της Λεβαντίνης (Zervakis *et al.*, 2003).



Σχήμα 1.2: Χάρτης της περιοχής του Β. Αιγαίου (Lykousis *et al.*, 2002)

Όσον αφορά στις βιογεωχημικές διεργασίες, τον κύκλο του άνθρακα και τους μηχανισμούς μεταφοράς ενέργειας στην στήλη του νερού και στα ιζήματα της περιοχής του Β. Αιγαίου, έχουν εντοπιστεί διάφοροι παράγοντες που φαίνεται να επηρεάζουν το σύστημα οι οποίοι είναι: οι διακυμάνσεις στην κυκλοφορία των υδάτινων μαζών, η διαμόρφωση των υδάτινων όγκων μεγάλου βάθους, η εισροή υδάτων από τα ποτάμια που εκβάλλουν στην περιοχή, η συνεισφορά υδάτινων μαζών από τη Μαύρη θάλασσα, οι διακυμάνσεις της πρωτογενούς παραγωγικότητας στην εύρωτη ζώνη, η μορφολογία του βυθού και η εισροή υλικού κυρίως με τη μορφή σκόνης, μέσω της αιολικής μεταφοράς (Lykousis *et al.*, 2002).

1.3 Καταμέτρηση της αφθονίας των βενθικών βακτηρίων

Κατά τη δεκαετία του 1960, οι μικροβιολόγοι που μελετούσαν τα θαλάσσια βακτήρια χρησιμοποιούσαν σαν μέθοδο την καταμέτρηση βακτηρίων από καλλιέργειες που πραγματοποιούσαν σε ελεγχόμενες συνθήκες (Cole, 1999). Έγινε όμως αντιληπτό ότι οι αφθονίες των βακτηρίων που προέκυπταν από την μέθοδο αυτή ήταν κατά πολύ χαμηλότερες από τις αντίστοιχες των πραγματικών συνθηκών γιατί όπως διατυπώθηκε αργότερα από τον Amann και τους συνεργάτες του (1995), μόνο ένα μικρό ποσοστό των βακτηρίων μπορεί να καλλιεργηθεί. Η εξέλιξη της φθορίζουσας μικροσκοπίας κατά

τη δεκαετία του 1970, βελτίωσε πολύ σημαντικά την ικανότητα της καταμέτρησης των βακτηρίων σε περιβαλλοντικά δείγματα (Cole, 1999). Η εξέλιξη των τεχνικών της φθορίζουσας μικροσκοπίας και η χρήση φθορίζουσων ουσιών που ενώνονται με το DNA των κυττάρων (π.χ. DAPI και Acridine Orange) οδήγησε στην καθιέρωση της μεθόδου για τον αξιόπιστο προσδιορισμό των βακτηριακών αφθονιών (Quèric *et al.*, 2004; Lunau *et al.*, 2005).

Η καταμέτρηση των βακτηρίων όμως παρουσιάζει και κάποιες δυσκολίες ιδίως στην περίπτωση των ιζημάτων. Μεγάλο μέρος των κυττάρων προσκολλάται στα σωματίδια του ιζήματος με αποτέλεσμα να είναι δυσδιάκριτα και να προκαλείται επικάλυψη (Epstein, 1995; Boenigk, 2004; Süß *et al.*, 2004). Η καταμέτρηση των βακτηρίων μπορεί να γίνει ακόμα πιο δύσκολη λόγω της χρώσης των σωματιδίων του ιζήματος, ή λόγω της χρώσης του υποβάθρου που μπορεί να προκαλείται λόγω της περιεκτικότητας του σε χουμικές ενώσεις, κολλοειδή και άλλου είδους οργανικές ή ανόργανες ουσίες (Kuwaie & Hosokawa 1999; Lunau *et al.*, 2005).

Όπως γίνεται αντιληπτό, η ακρίβεια των μετρήσεων είναι απαραίτητη για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων για την δομή και τη λειτουργία των βενθικών οικοσυστημάτων και για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι για την εξάλειψη των παραπάνω προβλημάτων (Santos Furtado & Casper, 2000). Οι κυριότερες τεχνικές που εφαρμόζονται είναι η αραίωση των δειγμάτων, η εφαρμογή υπερήχων, η φυγοκέντριση και ο συνδυασμός φυσικών και χημικών μηχανισμών ανάλογα με τις δυσκολίες που παρουσιάζουν οι διάφοροι τύποι ιζημάτων (Santos Furtado & Casper, 2000; Lunau *et al.*, 2005).

1.4 Διαχωρισμός ενεργών και ανενεργών βακτηρίων

Για πολύ καιρό υποθέτονταν ότι όλα τα βακτήρια που είχαν χρώση κατά την παρατήρηση τους στο μικροσκόπιο, ήταν ενεργά. Πλέον είναι γνωστό ότι μόνο ένα μέρος της βακτηριακής αφθονίας που μετράται είναι ζωντανά βακτήρια, ενώ τα υπόλοιπα είναι ανενεργά ή νεκρά. Η καταμέτρηση των ενεργών βακτηρίων έχει μεγάλη σημασία γιατί ουσιαστικά τα συγκεκριμένα βακτήρια συμμετέχουν στις βιοχημικές διεργασίες στο ίζημα (Luna *et al.*, 2002). Υπάρχουν τρεις κατηγορίες κυττάρων που έχουν οικολογική σημασία: τα ενεργά βακτήρια, που συμμετέχουν στην παραγωγή βιομάζας, τα ζωντανά αλλά μη ενεργά βακτήρια που δεν συμμετέχουν στην βακτηριακή

παραγωγή, αλλά έχουν την δυνατότητα και τα μη ενεργά ή νεκρά βακτήρια (Lebaron *et al.*, 2001).

Κατά την καταμέτρηση των ολικών βακτηρίων μπορεί να συνυπολογιστούν σε αυτά και σωματίδια με παρόμοιο μέγεθος ή σχήμα με αυτό των βακτηρίων, τα οποία μπορεί να είναι τμήματα κατεστραμμένων κυττάρων, βακτήρια που έχουν προσβληθεί από ιούς ή τμήματα κυττάρων που απέμειναν από την θήρευση των πρωτόζωων (Zweifel & Hagström, 1995) και των δινομαστιγιωτών καθώς και πολυφωσφορικά μόρια (Haglund *et al.*, 2003).

Για τον διαχωρισμό των ενεργών βακτηρίων από τα ανενεργά αλλά και από τα διάφορα σωματίδια που προαναφέρθηκαν, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι όπως η επεξεργασία των δειγμάτων με χρώση DAPI (4',6'-diamidino-2-phenylindole) και 2-προπανόλη (Zweifel & Hagström, 1995) ή η χρήση συνδυασμού χρωστικών ουσιών που βάφουν ξεχωριστά τα ολικά και τα ανενεργά βακτήρια (Luna *et al.*, 2002; Haglund *et al.*, 2003).

1.5 Περιβαλλοντικές παράμετροι του ιζήματος

1.5.1 Οργανικό υλικό και οργανικός άνθρακας

Τα ιζήματα αποτελούν σημαντικό κρίκο στη διαδικασία του κύκλου του άνθρακα στα θαλάσσια περιβάλλοντα και θεωρείται ότι στα παράκτια οικοσυστήματα 25-50% της αποδόμησης του άνθρακα πραγματοποιείται μέσω των βενθικών διεργασιών. Η μεγαλύτερη ποσοτικά απόθεση και ταφή άνθρακα συμβαίνει σε παγκόσμια κλίμακα στα θαλάσσια ιζήματα (Glud & Middelboe, 2004).

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, τα βακτήρια παίζουν σημαντικό ρόλο στην διαγένεση της οργανικής ύλης στο θαλάσσιο περιβάλλον. Τα ιζήματα βαθιάς θάλασσας είναι περιβάλλοντα φτωχά σε θρεπτικά και η αφθονία και η κατανομή των βενθικών οργανισμών έχει άμεση σχέση με την ποσότητα και ποιότητα της τροφής που φτάνει τελικά στην επιφάνεια των ιζημάτων. Έχει επιβεβαιωθεί ότι ο κύριος περιοριστικός παράγοντας για την ανάπτυξη των βενθικών μικροβιακών κοινωνιών είναι η διαθεσιμότητα οργανικών θρεπτικών και συγκεκριμένα η διαθεσιμότητα (lability) του οργανικού άνθρακα (Danovaro *et al.*, 1995; 1999b; 2000a; Tselepidis *et al.*, 2000b). Οι μικροβιακές κοινωνίες των ιζημάτων τροφοδοτούνται απ' ευθείας από την οργανική ύλη που προέρχεται από την εύρωτη ζώνη και από την αποσύνθεση μεγαλύτερων βενθικών οργανισμών. Στο πρώτο στάδιο της διατροφής τους τα βακτήρια εφαρμόζουν

εξωκυτταρική ενζυματική λύση του οργανικού υλικού μετατρέποντας το σε απλούστερες ενώσεις πιο εύκολα προσλήψιμες από τους οργανισμούς (Boetius *et al.*, 1996; Bianchi *et al.*, 2003b). Στη συνέχεια η θήρευση των βακτηρίων από άλλους ετερότροφους οργανισμούς έχει σαν αποτέλεσμα την μεταφορά της αρχικά μη προσλήψιμης οργανικής ύλης στα υψηλότερα επίπεδα του τροφικού δικτύου (Danovaro *et al.*, 1999b).

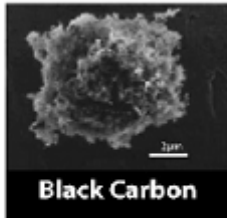
Σήμερα είναι γνωστό ότι ο υπολογισμός της συνολικής ποσότητας του οργανικού άνθρακα στα ιζήματα δεν αποτελεί αντιπροσωπευτικό δείκτη της διαθεσιμότητας της τροφής. Σημαντικό μέρος της ποσότητας του οργανικού άνθρακα δεν είναι διαθέσιμο στους καταναλωτές, γι' αυτό είναι προτιμότερο να πραγματοποιείται ανάλυση των συστατικών του οργανικού υλικού (π.χ. πρωτεΐνες, λιπίδια, υδρογονάνθρακες, νουκλεϊκά οξέα κ.α.) για τον ακριβέστερο υπολογισμό της διαθεσιμότητας του (Danovaro *et al.*, 1995).

Γίνεται αντιληπτό ότι η μελέτη της ποσότητας, της ποιότητας και της κατανομής της βενθικής οργανικής ύλης αποτελεί αναγκαίο τμήμα της μελέτης των βενθικών οικοσυστημάτων. Υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που μπορεί να επηρεάσουν τις προαναφερόμενες παραμέτρους του οργανικού υλικού. Η κυκλοφορία των υδάτων, τα βενθικά ρεύματα και η τοπογραφία του βυθού είναι παράμετροι που μπορούν να επηρεάσουν την κατανομή της οργανικής ύλης στον χώρο και το χρόνο (Tselepides *et al.*, 2000b). Πρόσθετοι παράγοντες που επηρεάζουν είναι η πίεση, η θερμοκρασία, ο χρόνος παραμονής του οργανικού υλικού στη στήλη του νερού, η τυρβώδης ροή, και διαδικασίες στοιχειοποίησης (Turley, 2000).

1.5.2 Στοιχειακός άνθρακας

Παρά το γεγονός ότι τα συστατικά του βενθικού οργανικού υλικού είναι γνωστά σε μεγάλο βαθμό, υπάρχει ένα ποσοστό άνθρακα που δεν μπορεί να χαρακτηριστεί. Ένας τύπος οργανικής ύλης που μπορεί να αποτελεί μέρος του μη προσδιορίσιμου άνθρακα είναι ο στοιχειακός ή μαύρος άνθρακας. Ο στοιχειακός άνθρακας είναι προϊόν με μεγάλη περιεκτικότητα σε άνθρακα και προκύπτει από την ατελή καύση των ορυκτών καυσίμων και της βιομάζας (σχήμα 1.3) (Middelburg *et al.*, 1999; Lee *et al.*, 2004). Έχει αναγνωριστεί ο ρόλος του στον παγκόσμιο κύκλο του άνθρακα και παρά τη χερσαία προέλευση του, βρίσκεται και στα θαλάσσια περιβάλλοντα. Οι συγκεντρώσεις στοιχειακού άνθρακα που έχουν υπολογισθεί σε θαλάσσια ιζήματα ποικίλουν αρκετά και φτάνουν μέχρι και το 30% του συνολικού οργανικού άνθρακα. Η επιφάνεια των

σωματιδίων του στοιχειακού άνθρακα είναι ιδιαίτερα ενεργή και αλληλεπιδρά έντονα με τις οργανικές ουσίες του περιβάλλοντος, γι' αυτό είναι πιθανό πολλές μορφές της θαλάσσιας οργανικής ύλης να συσχετίζονται με τον στοιχειακό άνθρακα. Η συγκεκριμένη μορφή άνθρακα αντιστέκεται ιδιαίτερα στη διάβρωση και μπορεί να προστατέψει από αυτήν και τις ουσίες που είναι προσροφημένες στην ενεργή επιφάνεια των σωματιδίων του (Lee *et al.*, 2004).



Εξήμα 1.3: Σωματίδιο στοιχειακού άνθρακα (Lee *et al.*, 2004).

Ο στοιχειακός άνθρακας μπορεί να μεταφερθεί μέσω της ατμόσφαιρας και των ποτάμιων εκροών σε πολύ μεγάλες αποστάσεις και να εξαπλωθεί σε όλους τους ωκεανούς. Η ετήσια παραγωγή του εκτιμάται σε 0,05-0,27 Gt που είναι παρόμοια με την υπολογιζόμενη εισροή σωματιδιακού άνθρακα στους ωκεανούς από τα ποτάμια (0,17 Gt/y) (Middelburg *et al.*, 1999). Έχει υπολογιστεί ότι αποτελεί περίπου το 6% της συνολικής ποσότητας οργανικού άνθρακα στα θαλάσσια ιζήματα (Massiello & Druffel, 1998).

1.5.3 Φυτοχρωστικές

Μέρος της οργανικής ύλης που έχει παραχθεί από την φωτοσύνθεση φτάνει στον βυθό με τη μορφή σωματιδίων αποδόμησης (detritus) τα οποία αποτελούν βασικό τμήμα της διατροφής των βενθικών οργανισμών (Danovaro *et al.*, 1999b; Tselepidis *et al.*, 2000a). Οι χλωροπλαστικές χρωστικές του ιζήματος, αντανακλούν την ποσότητα της οργανικής ύλης που προέκυψε από την πρωτογενή παραγωγή, και γι' αυτό χρησιμοποιούνται σαν δείκτες τροφής, καθώς αποτελούν άμεσα διαθέσιμη τροφή για τους βενθικούς οργανισμούς. (Barnes & Hughes, 1982).

Η χλωροφύλλη είναι αρκετά ευαίσθητη ουσία και εύκολα μετατρέπεται σε φαιοχρωστικές. Η ποσότητα της χλωροφύλλης-α σε σχέση με την ποσότητα των φαιοχρωστικών αποτελεί ένδειξη της κατάστασης της φυτικής βιομάζας. Για την πιο ολοκληρωμένη εικόνα του συστήματος, υπολογίζεται το άθροισμα της χλωροφύλλης α και των φαιοχρωστικών που αντιπροσωπεύει το σύνολο των χλωροπλαστικών χρωστικών ή CPE (Chloroplastic Pigments Equivalent) που αποτελεί ένδειξη της συνολικής φυτικής βιομάζας (Τσελεπίδης, 1992).

1.5.4 κ-Αλκάνια

Τα θαλάσσια περιβάλλοντα, οι οργανισμοί τους και τα ιζήματα αποτελούνται από ενώσεις άνθρακα που έχουν διάφορες πηγές προέλευσης. Η μεγάλη ποικιλομορφία

στην σύσταση και την προέλευση συγκεκριμένων ενώσεων, των υδρογονανθράκων, καθιστά την μελέτη τους πολύ χρήσιμο εργαλείο στις γεωχημικές έρευνες (Harada *et al.*, 1995).

Παρά το γεγονός ότι είναι ενώσεις που συναντώνται ευρέως στους οργανισμούς υπάρχουν κάποιες που είναι χαρακτηριστικές για κάθε ομάδα οργανισμών. Οι οργανισμοί που απαρτίζουν το θαλάσσιο φυτοπλαγκτόν παρουσιάζουν υψηλά ποσοστά κ-αλκανίων με μικρές ανθρακικές αλυσίδες (C₁₅ και C₁₇) και κυριαρχία των ανθρακικών αλυσίδων με μονό αριθμό ατόμων άνθρακα. Αντίθετα τα χερσαία φυτά παρουσιάζουν υψηλά ποσοστά κ-αλκανίων με μεγάλες ανθρακικές αλυσίδες (C₂₅-C₃₁) και κυριαρχία μονού αριθμού ατόμων άνθρακα, τα οποία βρίσκονται στην επιδερμίδα των φύλλων με τη μορφή κηρωδών ενώσεων (Harada *et al.*, 1995; Bouloubassi *et al.*, 1997; Gogou *et al.*, 2000; Hellou *et al.*, 2002; Commendatore & Esteves, 2004; Tolosa *et al.*, 2004). Η παρουσία των τελευταίων στο θαλάσσιο περιβάλλον υποδηλώνει εισροή χερσαίου οργανικού υλικού δια μέσου των ποτάμιων εκροών, αλλά και δια μέσου της αέριας μεταφοράς τους και των εναποθέσεων (Bouloubassi *et al.*, 1997).

Τα κ-αλκάνια του θαλάσσιου περιβάλλοντος, μπορούν επίσης να προέρχονται από πετρελαϊκούς υδρογονάνθρακες. Σε αυτή την περίπτωση αποτελούνται από μικρές και μεγάλες ανθρακικές αλυσίδες (π.χ. C₁₅-C₂₂ και C₂₈) ανάλογα αν πρόκειται για βαριά ή ελαφρύτερα πετρελαϊκά υπολείμματα (Hellou *et al.*, 2002; Tolosa *et al.*, 2004). Οι πετρελαϊκοί υδρογονάνθρακες μπορούν να εισέλθουν στο θαλάσσιο περιβάλλον μέσω της εκροής των ποταμών, της ναυτιλιακής δραστηριότητας, μέσω ατυχημάτων που έχουν αποτέλεσμα το σχηματισμό πετρελαιοκηλίδων και γενικά μέσω της διαδικασίας παραγωγής και μεταφοράς πετρελαίου. Μπορεί όμως να είναι ενώσεις και φυσικής προέλευσης (Bouloubassi *et al.*, 2001).

Η μελέτη των υδρογονανθράκων στα θαλάσσια περιβάλλοντα μπορεί να δώσει σημαντικές πληροφορίες για την προέλευση της οργανικής ύλης (Tran *et al.*, 1997; Simoneit, 1999). Για την μελέτη της προέλευσης των κ-αλκανίων χρησιμοποιείται ο «Δείκτης Προτίμησης Αριθμού Ατόμων Άνθρακα» (Carbon Preference Index- CPI) ο οποίος ορίζεται ως εξής:

$$CPI = \frac{1}{2} \left[\frac{(C_{25} + C_{27} + C_{29} + C_{31} + C_{33})}{(C_{24} + C_{26} + C_{28} + C_{30} + C_{32})} + \frac{(C_{25} + C_{27} + C_{29} + C_{31} + C_{33})}{(C_{26} + C_{28} + C_{30} + C_{32} + C_{34})} \right]$$

Η τιμή του δείκτη προσδιορίζει την αναλογία των ανθρακικών αλυσίδων με μονό αριθμό ανθράκων ενάντια σε εκείνες με ζυγό αριθμό. Στις περιπτώσεις που η τιμή του

CPI ισούται περίπου με 1 τότε θεωρείται ότι τα κ-αλκάνια είναι πετρελαϊκής προέλευσης (Simoneit, 1999; Killops & Killops, 2005).

1.6 Στόχοι της μελέτης

Βασικός στόχος της παρούσας μελέτης που επικεντρώθηκε στην περιοχή του Θρακικού Πελάγους ήταν η διερεύνηση της κατανομής των βακτηριακών κοινοτήτων καθώς και των περιβαλλοντικών παραμέτρων που την επηρεάζουν. Αποτελεί μια πρώτη προσέγγιση της περιοχής και ο βασικός στόχος ήταν να βρεθούν οι πιο σημαντικοί παράγοντες σχετικά με την ποιότητα και προέλευση του οργανικού υλικού που επηρεάζουν την βακτηριακή αφθονία. Πιο συγκεκριμένα οι στόχοι της παρούσας μελέτης είναι:

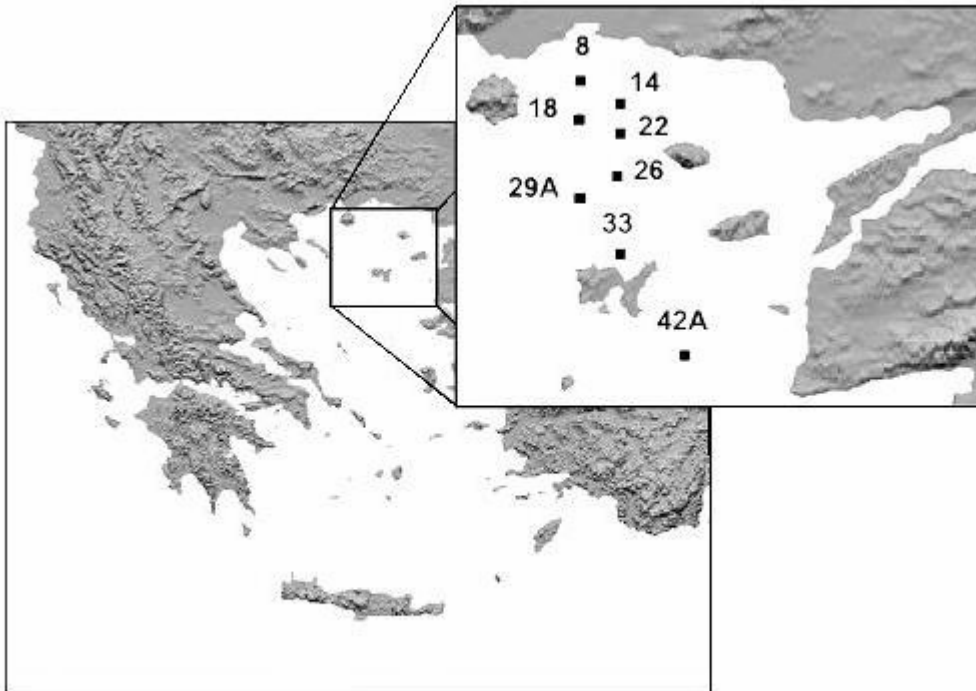
- Η μέτρηση της αφθονίας των ενεργών και ανενεργών βακτηρίων
- Ο προσδιορισμός των γεωχημικών χαρακτηριστικών των ιζημάτων της περιοχής
- Ο προσδιορισμός των παραγόντων που επηρεάζουν την κατανομή των βακτηριακών κοινοτήτων
- Η ανίχνευση πιθανών ομαδοποιήσεων μεταξύ των σταθμών δειγματοληψίας

Οι θέσεις των σταθμών δειγματοληψίας επιλέχθηκαν ώστε να καλύπτουν όλη την περιοχή του Θρακικού Πελάγους και βρίσκονται κυρίως στην ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα με εξαίρεση τρεις βαθύτερους σταθμούς. Η επιλογή των σημείων δειγματοληψίας έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε να βρίσκονται στις περιοχές επίδρασης των ποτάμιων εκβολών στα Βόρεια και της εισόδου των νερών της Μαύρης θάλασσας.

Στη συνέχεια της παρούσας μελέτης παρουσιάζονται οι μέθοδοι που ακολουθήθηκαν για την δειγματοληψία, τις αναλύσεις των δειγμάτων και την επεξεργασία των δεδομένων (Κεφάλαιο 2), ακολουθεί η παρουσίαση της στατιστικής επεξεργασίας των αποτελεσμάτων και η αποτύπωση τους σε γραφήματα (Κεφάλαιο 3) και καταλήγοντας πραγματοποιείται ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων και η εξαγωγή των τελικών συμπερασμάτων (Κεφάλαιο 4 και 5).

2.1 Δειγματοληψία

Η δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε τον Ιούλιο του 2004 στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος ANREC (Επιστημονικός υπεύθυνος: Δρ. Α. Τσελεπίδης), και κατά τη διάρκεια πλόα με το ωκεανογραφικό πλοίο «Αιγαίο». Η περιοχή από όπου συλλέχθηκαν τα δείγματα ήταν το Θρακικό Πέλαγος. Επιλέχθηκαν οχτώ σταθμοί με τέτοια διάταξη έτσι ώστε να καλύπτουν το μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής. Οι σταθμοί απεικονίζονται στο σχήμα 2.1 ενώ τα στοιχεία τους παρουσιάζονται στον Πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 2.1).



Σχήμα 2.1: Χάρτης της περιοχής δειγματοληψίας με τους σταθμούς που μελετήθηκαν.

Για την πραγματοποίηση της μελέτης, συλλέχθηκαν 2 πυρήνες ιζήματος από τον κάθε σταθμό με χρήση του πολλαπλού πυρηνολήπτη (multiple-corer) Bowers & Connelly (Barnet *et al.*, 1984) που επιτρέπει τη συλλογή αδιατάραχτων δειγμάτων. Ο κάθε πυρήνας τεμαχίστηκε σε 7 κάθετα τμήματα που αντιπροσώπευαν τα βάθη 0-1, 1-2, 2-4, 4-6, 6-8, 8-10, και 10-12 cm από την επιφάνεια του ιζήματος.

Πίνακας 2.1: Τα βάθη και οι συντεταγμένες των σταθμών δειγματοληψίας

<i>Σταθμός</i>	<i>Γεωγρ. Μήκος (°)</i>	<i>Γεωγρ. πλάτος (°)</i>	<i>Βάθος (m)</i>
8	25,060	40,772	52,1
14	25,252	40,676	83,4
18	25,054	40,609	136,7
22	25,252	40,552	109,7
26	25,238	40,375	257,7
29A	25,059	40,285	418,6
33	25,251	40,054	110,8
42A	25,340	39,380	210,7

Στους σταθμούς της μελέτης και σε όλα τα βάθη των πυρήνων του ιζήματος, έγινε καταμέτρηση των ολικών, ενεργών βακτηρίων και του δυναμικού οξειδοαναγωγής (Eh) καθώς και προσδιορισμός των συγκεντρώσεων της χλωροφύλλης-α (Chl-a), των φαιοχρωστικών, του ισοδύναμου χλωροπλαστικών χρωστικών (CPE), του οργανικού άνθρακα (oc) του στοιχειακού άνθρακα (sc) και του βιοδιαθέσιμου οργανικού άνθρακα (BOC). Στο επιφανειακό ίζημα των σταθμών έγινε προσδιορισμός της συγκέντρωσης των κ-αλκανίων. Όλες οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν στις εγκαταστάσεις του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε Κρήτης και συγκεκριμένα στα εργαστήρια του ινστιτούτου Ωκεανογραφίας.

Η μέτρηση του Eh πραγματοποιήθηκε πάνω στο καράβι αμέσως μόλις συλλέγονταν τα δείγματα. Για τον προσδιορισμό των ολικών και ενεργών βακτηρίων ποσότητα ιζήματος ίση περίπου με 3 ml αραιωνόταν με φιλτραρισμένο θαλασσινό νερό σε αναλογία 1:1, και κατόπιν το δείγμα επεξεργαζόταν για συντήρηση με 1 ml φορμόλης 37%. Τα δείγματα διατηρήθηκαν στους 4 °C μέχρι την επεξεργασία τους στο εργαστήριο ενώ για τις αναλύσεις των περιβαλλοντικών παραμέτρων καταψύχθηκαν αμέσως στους -20 °C. Για την πραγματοποίηση των αναλύσεων, τα δείγματα τοποθετήθηκαν σε ψυκτικό εξαχνωτήρα για 48 h για την ασφαλή αποξήρανση τους και στη συνέχεια κονιορτοποιήθηκαν.

2.2 Καταμέτρηση ολικών και ενεργών βακτηρίων

Το αρχικό δείγμα με αραιώση 1:1 και προσθήκη φορμόλης, υπόκειται σε διαδοχικές αραιώσεις και επεξεργασία με υπερήχους. Η προσθήκη φορμόλης σύμφωνα με τους Tso και Taghon, (1997) ενισχύει το εξωτερικό περίβλημα των κυττάρων με αποτέλεσμα να τα προστατεύει από τυχόν «σπασίματα» κατά την εφαρμογή των υπέρηχων. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 5 αραιώσεις: 1:1, 1:9, 1:9 και 1:3 με φιλτραρισμένο και αποστειρωμένο θαλασσινό νερό και μετά από κάθε αραιώση το δείγμα τοποθετούνταν στο σύστημα υπερήχων Sonic Probe UP 100 H με συχνότητα 0,65 κύκλους και πλάτος 70% για 2 min. Η εφαρμογή των υπερήχων στα δείγματα είναι απαραίτητη ώστε να επιτευχθεί αποκόλληση των βακτηρίων από τα σωματίδια του ιζήματος. Μετά την τελευταία αραιώση προσθέτονταν στα διαλύματα 100 μl φορμόλης 37%, χρωστική DAPI και παρέμεναν στους 4 °C για 48 h.

Στη συνέχεια, πραγματοποιούνταν φιλτράρισμα μικρής ποσότητας δείγματος ίση με 1 ml, σε μαύρα πολυκαρβονικά φίλτρα τα οποία τοποθετούνταν σε αντικειμενοφόρο πλάκα με την προσθήκη ειδικού ελαίου. Η καταμέτρηση των βακτηρίων γινόταν αμέσως μετά την παρασκευή τους. Η καταμέτρηση των βακτηρίων πραγματοποιήθηκε με μικροσκόπιο φθορισμού Olympus BX 60 και σε κάθε φίλτρο καταμετρούνταν 20-30 πεδία σε μεγέθυνση $\times 100$ με δύο επαναληπτικές μετρήσεις για το κάθε δείγμα.

Για την καταμέτρηση των ενεργών βακτηρίων, εφαρμοζόταν η ίδια διαδικασία, με την προσθήκη ενός επιπλέον σταδίου. Μετά το φιλτράρισμα του δείγματος, ακολουθεί «ξέπλυμα» του φίλτρου με 10 ml ισο-προπανόλης, θερμοκρασίας 70 °C, διαδικασία η οποία προκαλεί την αφαίρεση της χρωστικής από τα μη ενεργά βακτήρια (Luna *et al.*, 2002).

2.3 Προσδιορισμός χλωροφύλλης, φαιοχρωστικών και CPE.

Για τον προσδιορισμό των φυτοχρωστικών ακολουθήθηκε η μέθοδος της μέτρησης φθορισμού όπως περιγράφεται από τους Yentsch και Menzel (1963), και Lorenzen και Jeffrey (1980). Για την εκχύλιση της χλωροφύλλης, προζυγισμένη ποσότητα ιζήματος τοποθετούνταν σε κωνική φιάλη με 10 ml ακετόνης 90% και τοποθετούνταν για 2 h σε οριζόντιο αναδευτήρα για ανάμιξη. Στη συνέχεια πραγματοποιούνταν φυγοκέντριση των δειγμάτων για 5 min στις 3500 rpm. Οι μετρήσεις για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης των ιζημάτων σε χλωροφύλλη και φαιοχρωστικές πραγματοποιήθηκαν

σε συσκευή μέτρησης φθορισμού μοντέλο TD-700 Turner και η ζητούμενη ποσότητα υπολογιζόταν σε $\mu\text{g/g}$ ξηρού βάρους ιζήματος. Για τον υπολογισμό των φαιοχρωστικών, προσθέτονταν στο αρχικό δείγμα λίγες σταγόνες HCl 0,1 N το οποίο προκαλεί αποσύνθεση της χλωροφύλλης και στη συνέχεια επαναλαμβάνονταν η μέτρηση. Η ποσότητα CPE υπολογίστηκε ως το άθροισμα των συγκεντρώσεων της χλωροφύλλης και των φαιοχρωστικών.

2.4 Προσδιορισμός συνολικού οργανικού άνθρακα, στοιχειακού και βιοδιαθέσιμου οργανικού άνθρακα

Για τον προσδιορισμό του συνολικού οργανικού άνθρακα ποσότητα ιζήματος περίπου ίση με 1-1,5 g ζυγίζονταν σε κωνική φιάλη και προσθέτονταν 5 ml ορθοφωσφορικού οξέος 85%. Οι κωνικές τοποθετούνταν σε θερμαντική πλάκα στους 110 °C για 30 min. Στη συνέχεια προσθέτονταν 10 ml διχρωμικού οξέως και επανατοποθετούνταν στη θερμαντική πλάκα για μία ώρα. Μετά το πέρας της ώρας οι φιάλες αφήνονταν σε θερμοκρασία δωματίου και αραιώνονταν με 240 ml απιονισμένου νερού. Ο προσδιορισμός του οργανικού άνθρακα πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο της υγρής οξειδωσης που βασίζεται σε τιτλοδότηση του δείγματος με FAS και χρήση του δείκτη N-phenylanthranilic acid. Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και για τον προσδιορισμό του στοιχειακού άνθρακα, με τη διαφορά ότι είχε πραγματοποιηθεί προεπεξεργασία της αρχικής ποσότητας ιζήματος με θέρμανση στους 375 °C για 24 h. Σύμφωνα με τους Gustafsson και συνεργάτες (1997) η μέθοδος απομάκρυνσης του οργανικού άνθρακα από τα δείγματα με θέρμανση στη θερμοκρασία των 375 °C είναι πολύ αποτελεσματική. Ο βιοδιαθέσιμος οργανικός άνθρακας υπολογίστηκε από την διαφορά των συγκεντρώσεων του οργανικού και του στοιχειακού άνθρακα, αφού σύμφωνα με τους Dickens et al., (2004), η συγκεκριμένη ουσία είναι ιδιαίτερα σταθερή και σχεδόν μη αποδομήσιμη από τους οργανισμούς.

2.5 Προσδιορισμός συγκεντρώσεων κ-αλκανίων

Ο προσδιορισμός των συγκεντρώσεων των κ-αλκανίων περιορίστηκε μόνο στο επιφανειακό στρώμα ιζήματος (0-1 cm) των σταθμών. Η ανάλυση των δειγμάτων έγινε με τη μέθοδο της αέριας χρωματογραφίας με ανιχνευτή μάζας (GC-MS: gas chromatography – mass spectrometry) και χρησιμοποιήθηκε το σύστημα Hewlett

Packard 6890 GC με ανιχνευτή μάζας Hewlett Packard 5972 mass selective detector. Για την αποφυγή επιμολύνσεων των δειγμάτων από ουσίες του περιβάλλοντος, διατηρήθηκαν αυστηρές συνθήκες καθαριότητας καθ' όλη τη διάρκεια των αναλύσεων. Όλοι οι διαλύτες που χρησιμοποιήθηκαν είχαν πολύ υψηλό ποσοστό καθαρότητας (Suprasolv, Merck), όλα τα γυάλινα σκεύη είχαν προθερμανθεί στους 500 °C για 24 h και η ποσότητα silica που χρησιμοποιήθηκε εκχειλίστηκε για 48 h με διάφορους διαλύτες. Για τον έλεγχο της μεθόδου, μαζί με τα δείγματα αναλύονταν και τυφλά διαλύματα (blank) για έλεγχο πιθανών επιμολύνσεων.

Η εκχείλιση των ολικών αλκανίων πραγματοποιήθηκε με σύστημα Soxhlet για 24 h με διάλυμα εξάνιο:διχλωρομεθάνιο (1:1). Το εκχειλισμένο δείγμα εξατμιζόταν μέχρι την ποσότητα του 1 ml με χρήση του κυκλικού εξατμιστήρα, και ακολουθούσε διήθηση του μέσα από κολώνα (εσωτερική διάμετρος 0,5 cm). Για την διήθηση χρησιμοποιήθηκε 1,5 gr silica (silica gel 60) και 15 ml εξανίου. Η ποσότητα δείγματος που προέκυπτε εξατμιζόταν σχεδόν μέχρι ξηρού υπό τη ροή καθαρού αζώτου και φυλάσσονταν σε αεροστεγώς κλεισμένα φιαλίδια στους -20 °C.

Για τον προσδιορισμό των κ-αλκανίων, 1 μl δείγματος εισερχόταν με ένεση στη χρωματογραφική κολώνα. Ως φέρον αέριο χρησιμοποιήθηκε το ήλιο και το πρόγραμμα θερμοκρασιών ήταν : 270 °C θερμοκρασία ένεσης, 70 °C 1 min, 70-150 °C (10 °C/min), 150-290 °C (5 °C/min) και 290 °C για 30 min. Η ταυτοποίηση των ενώσεων που ανιχνεύονταν, πραγματοποιήθηκε με σύγκριση των χρόνων έκλουσης τους, με τους αντίστοιχους χρόνους γνωστών ενώσεων που χρησιμοποιήθηκαν σαν πρότυπα. Για τον ποσοτικό προσδιορισμό τους, χρησιμοποιήθηκε γνωστή ποσότητα εσωτερικού προτύπου που στην συγκεκριμένη περίπτωση ήταν το 1-χλωροεξαδεκάνιο (Internal standard).

2.6 Στατιστική ανάλυση

Για την στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων, σε ένα πρώτο στάδιο τα πρωτογενή δεδομένα μετατράπηκαν σε δεκαδικούς λογάριθμους. Με χρήση του στατιστικού πακέτου SPSS 13.0 πραγματοποιήθηκαν συσχετίσεις μεταξύ των μεταβλητών, χρησιμοποιώντας τον συντελεστή συσχέτισης Pearson. Στη συνέχεια, οι στατιστικές Αναλύσεις Πρωταρχικών Συνιστωσών (Principal Component Analysis – PCA) και BIOENV εφαρμόστηκαν με τη χρήση του στατιστικού πακέτου PRIMER v.5.2.0 (Plymouth Routines In Multivariate Ecological Research).

Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν στο σύνολο των αποτελεσμάτων, και στο επιφανειακό ίζημα των σταθμών ξεχωριστά, με σκοπό την άντληση πληροφοριών για τις περιβαλλοντικές παραμέτρους που ρυθμίζουν τη βακτηριακή κατανομή γενικά στο ίζημα και ειδικά στο επιφανειακό στρώμα που αντιπροσωπεύει τις πρόσφατες διαγενετικές διεργασίες. Από την επεξεργασία όλων των αποτελεσμάτων εξαιρέθηκε ο σταθμός 18 γιατί δεν ήταν δυνατή η καταμέτρηση των ενεργών βακτηρίων, ενώ κατά τις αναλύσεις του επιφανειακού ιζήματος εξαιρέθηκε και ο σταθμός 14 λόγω έλλειψης δεδομένων για τα κ-αλκάνια.

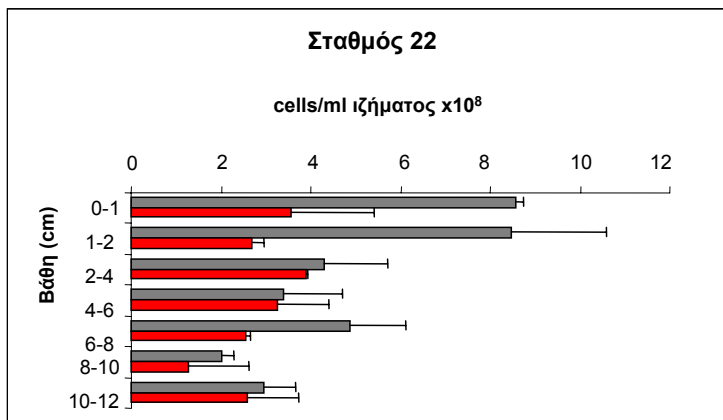
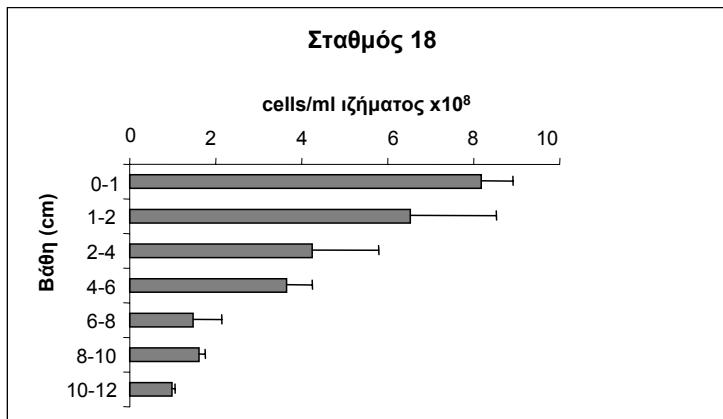
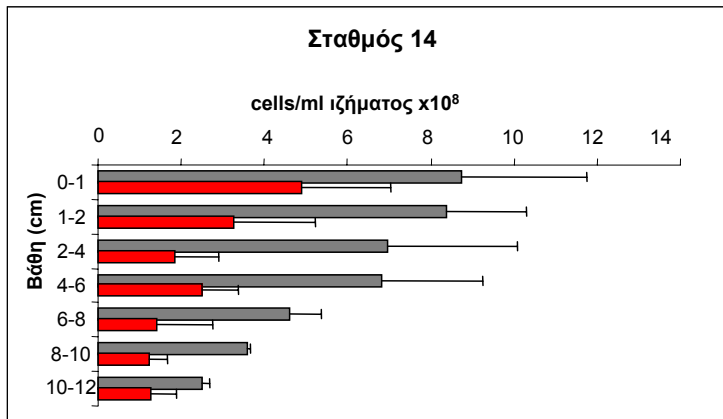
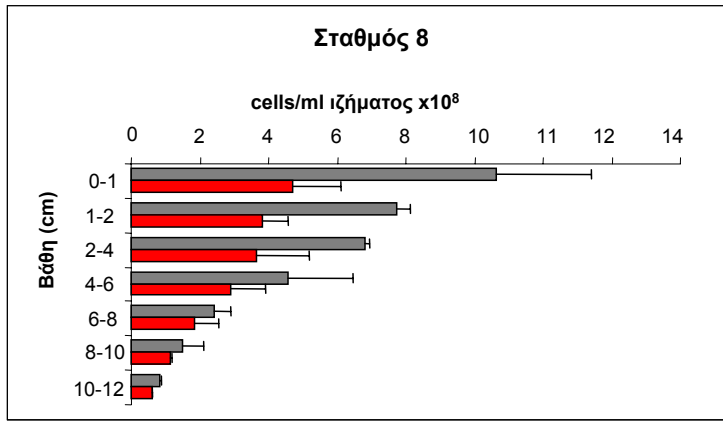
3.1 Ολικά και ενεργά βακτήρια

Η αφθονία των ολικών και ενεργών βακτηρίων παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.1. Σε όλους τους σταθμούς παρουσιάστηκε μείωση στην αφθονία των ολικών και των ενεργών βακτηρίων με το βάθος του πυρήνα και ο αριθμός των κυττάρων των ενεργών βακτηρίων διατηρήθηκε μικρότερος από τον αριθμό των ολικών βακτηρίων. Κατά μέσο όρο η αφθονία των ολικών βακτηρίων του επιφανειακού ιζήματος ήταν 6 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη αφθονία του βαθύτερου στρώματος του πυρήνα (10-12 cm) ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις ήταν έως και 15 φορές μεγαλύτερη (σταθμός 42A). Αντίστοιχα, η επιφανειακή αφθονία των ενεργών βακτηρίων ήταν κατά μέσο όρο 4 φορές μεγαλύτερη από την αφθονία του βαθύτερου στρώματος του πυρήνα ενώ σε κάποιες περιπτώσεις επταπλασιάζονταν (σταθμοί 8 και 29A). Οι τιμές του δυναμικού οξειδοαναγωγής κυμαίνονταν μεταξύ 104-525 mV υποδηλώνοντας την παρουσία αερόβιων συνθηκών για την ανάπτυξη των μικροβιακών κοινωνιών.

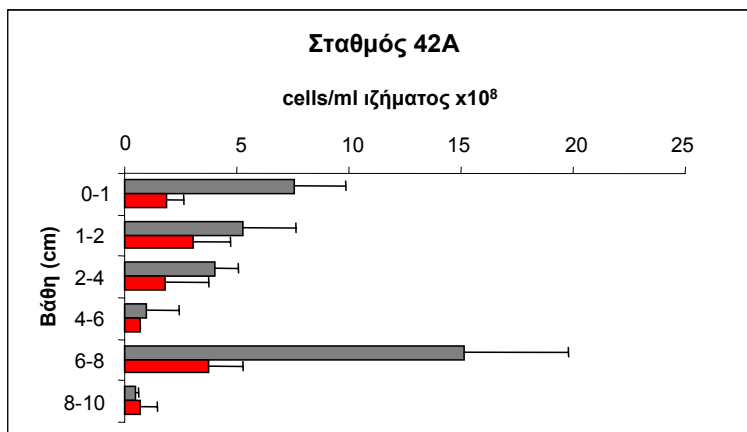
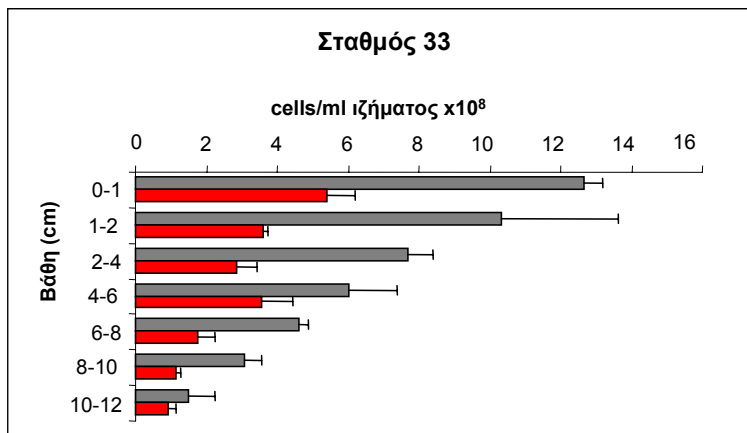
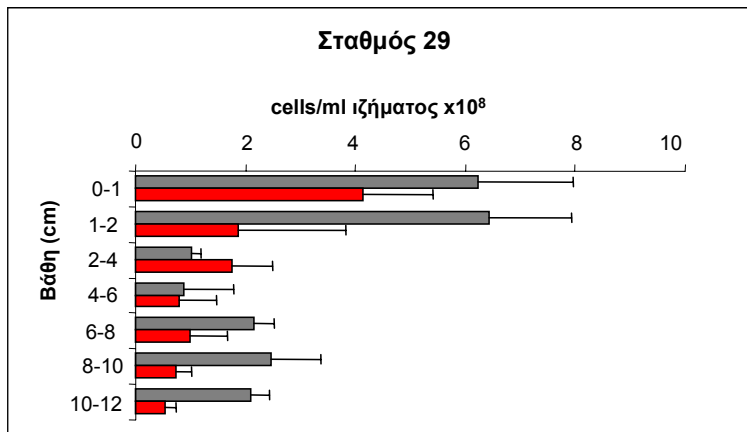
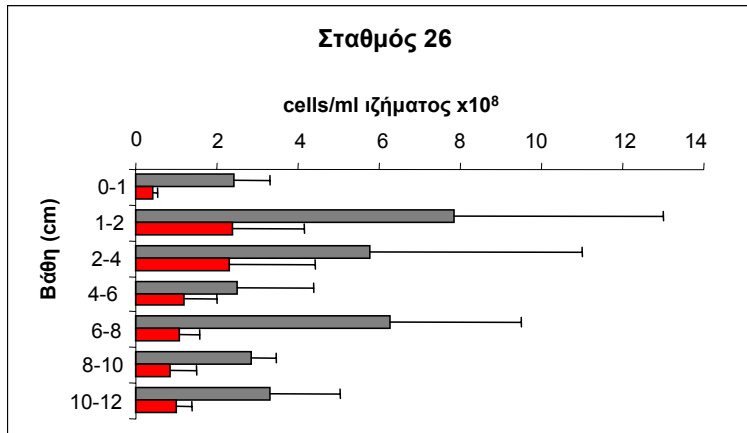
Πιο συγκεκριμένα, οι αφθονίες των ολικών βακτηρίων κυμάνθηκαν από 5×10^7 cells/ml ιζήματος (σταθμός 42A 8-10 cm) έως $1,5 \times 10^9$ cells/ml (σταθμός 42A 6-8 cm) με μέση τιμή 5×10^8 cells/ml. Οι αφθονίες των ενεργών βακτηρίων κυμάνθηκαν μεταξύ 4×10^7 και 5×10^8 cells/ml (σταθμοί 26, 0-1 cm και 33, 0-1cm αντίστοιχα), με μέση τιμή 2×10^8 cells/ml. Στη συνέχεια απεικονίζονται οι κατανομές των αφθονιών των ολικών και ενεργών βακτηρίων για όλους τους σταθμούς (Σχήμα 3.1) και για το επιφανειακό ίζημα ξεχωριστά (Σχήμα 3.2).

Πίνακας 3.1. Αφθονία ολικών και ενεργών βακτηρίων (cells x 10^8 / ml ιζήματος). Δίνεται η ελάχιστη (min) και η μέγιστη (max) τιμή για τον κάθε σταθμό και η τυπική απόκλιση. (Nd: Δεν προσδιορίστηκαν)

	Ολικά βακτήρια		Ενεργά βακτήρια	
	Min	Max	Min	Max
8	0,84 ±0,05	11 ± 2,8	0,63±0,002	4,7±1,4
14	2,5±0,2	8,7±3	1,2±0,4	4,9±2,2
18	0,9±0,09	8,2±0,8	Nd	Nd
22	2±0,3	8,6±0,1	1,3±1	3,9±0,02
26	2,5±2	7,9±5	0,4±0,09	2,4±2
29A	0,9±0,9	6,4±2	0,5±0,2	4,1±1,3
33	1,5±0,7	13±0,5	0,9±0,2	5,4±0,7
42A	0,5±0,2	15±4,6	0,7±0,05	3,8±1,5

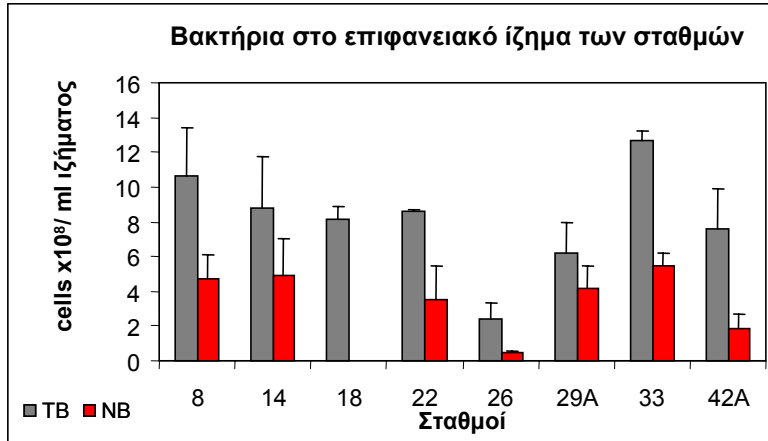


Σχήμα 3.1: Κάθετη κατανομή των ολικών (γκρι ράβδοι) και ενεργών βακτηρίων (κόκκινες ράβδοι) στους σταθμούς μελέτης.



Σχήμα 3.1: Συνέχεια

Η αναλογία της αφθονίας των ενεργών προς τα ολικά βακτήρια σε κάθε βάθος του πυρήνα, παρουσίασε τάση αύξησης στους περισσότερους σταθμούς, με εξαίρεση τους σταθμούς 14 και 29A. Η μέση τιμή της αναλογίας Nb/Tb =0,53 δηλώνει ότι τα ενεργά βακτήρια αποτελούν σχεδόν το 50% των ολικών βακτηρίων που καταμετρήθηκαν στο ίζημα.



Σχήμα 3.2: Αφθονίες των ολικών (TB) και ενεργών βακτηρίων (NB) στο επιφανειακό ίζημα των σταθμών.

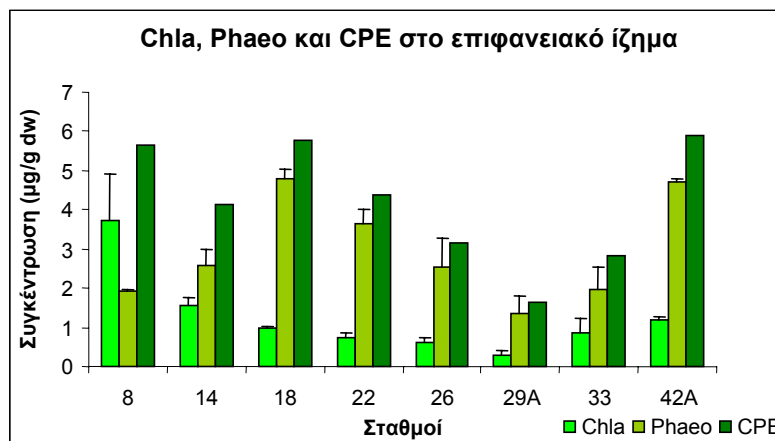
3.2 Συγκεντρώσεις χλωροφύλλης-α, φαιοφυτινών και CPE

Οι συγκεντρώσεις της χλωροφύλλης-α των φαιοφυτινών και του CPE παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2. Οι τιμές των συγκεντρώσεων για τη χλωροφύλλη-α παρουσίασαν ελάχιστο στον σταθμό 29A (10-12 cm 0,03 μg/g dw ίζήματος) και μέγιστο στον σταθμό 8 (0-1 cm 3,73 μg/g dw). Η μέση τιμή συγκέντρωσης της χλωροφύλλης-α που προσδιορίστηκε ήταν 0,452 μg/g dw. Οι συγκεντρώσεις των φαιοφυτινών κυμάνθηκαν μεταξύ 0,17 και 4,78 μg/g dw στους σταθμούς 29A (10-12 cm) και 18 (0-1 cm) αντίστοιχα. Η μέση τιμή της συγκέντρωσης των φαιοφυτινών ήταν 1,487 μg/g dw. Οι συγκεντρώσεις του CPE κυμάνθηκαν από 0,20 έως 5,90 μg/g dw (σταθμοί 29A, 10-12 cm και 42A, 0-1 cm αντίστοιχα) με μέση τιμή 1,940 μg/g dw. Όπως προκύπτει, ο σταθμός 29A παρουσίασε τις ελάχιστες τιμές και για τις τρεις μεταβλητές.

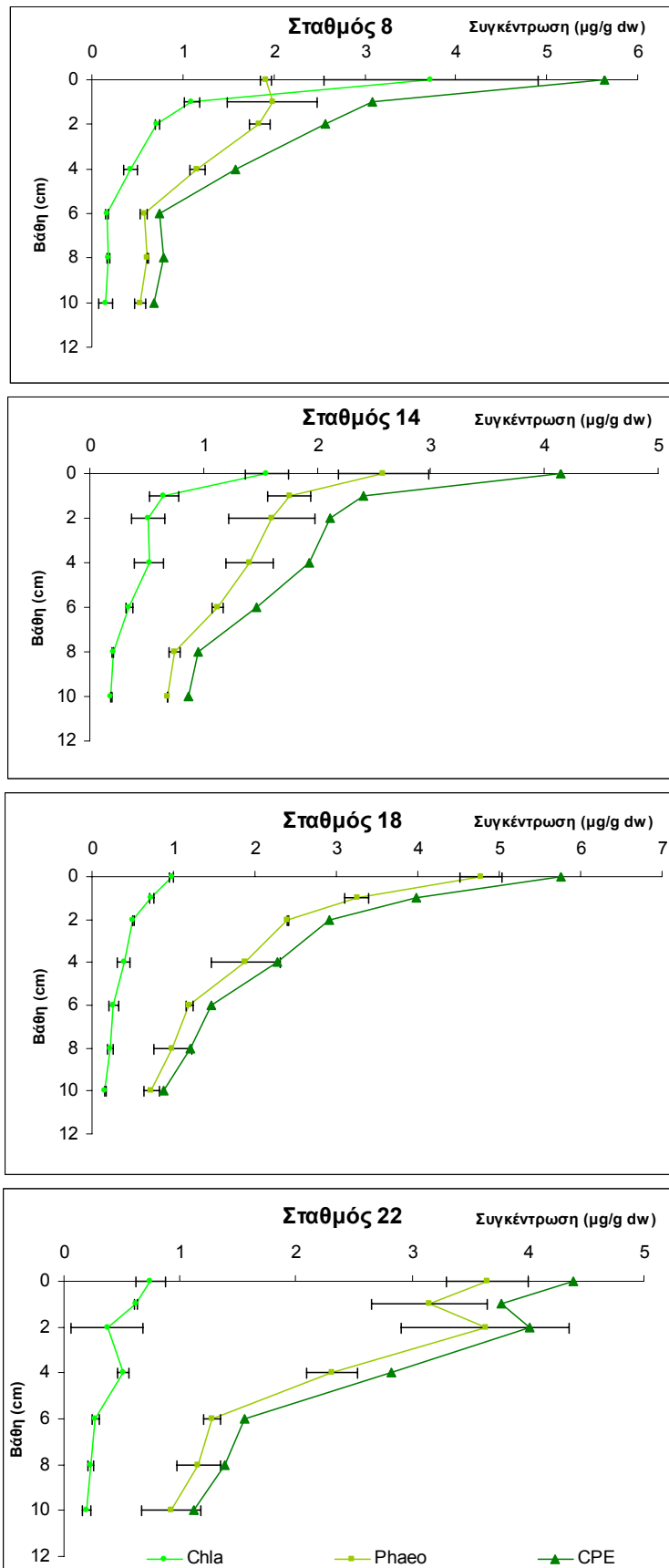
Πίνακας 3.2: Συγκεντρώσεις χλωροφύλλης-α, φαιοφυτινών και CPE (μg/g dw). Παρουσιάζονται οι μέγιστες (max), οι ελάχιστες (min) τιμές και η τυπική απόκλιση.

	Χλωροφύλλη-α		Φαιοφυτινές		CPE	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
8	0,15±0,08	3,73±1,18	0,52±0,06	1,98±0,5	0,68	5,64
14	0,19±0,01	1,56±0,19	0,69±0,02	2,59±0,4	0,87	4,14
18	0,16±0,01	0,98±0,03	0,73±0,1	4,78±0,25	0,88	5,76
22	0,20±0,04	0,75±0,129	0,93±0,26	3,65±0,35	1,12	4,39
26	0,17±0,0002	0,61±0,14	0,82±0,02	2,53±0,73	0,99	3,14
29A	0,03±0,003	0,29±0,11	0,17±0,005	1,34±0,48	0,20	1,64
33	0,09±0,003	0,86±0,36	0,35±0,02	1,98±0,55	0,44	2,84
42A	0,13±0,005	1,19±0,09	0,46±0,02	4,71±0,06	0,58	5,90

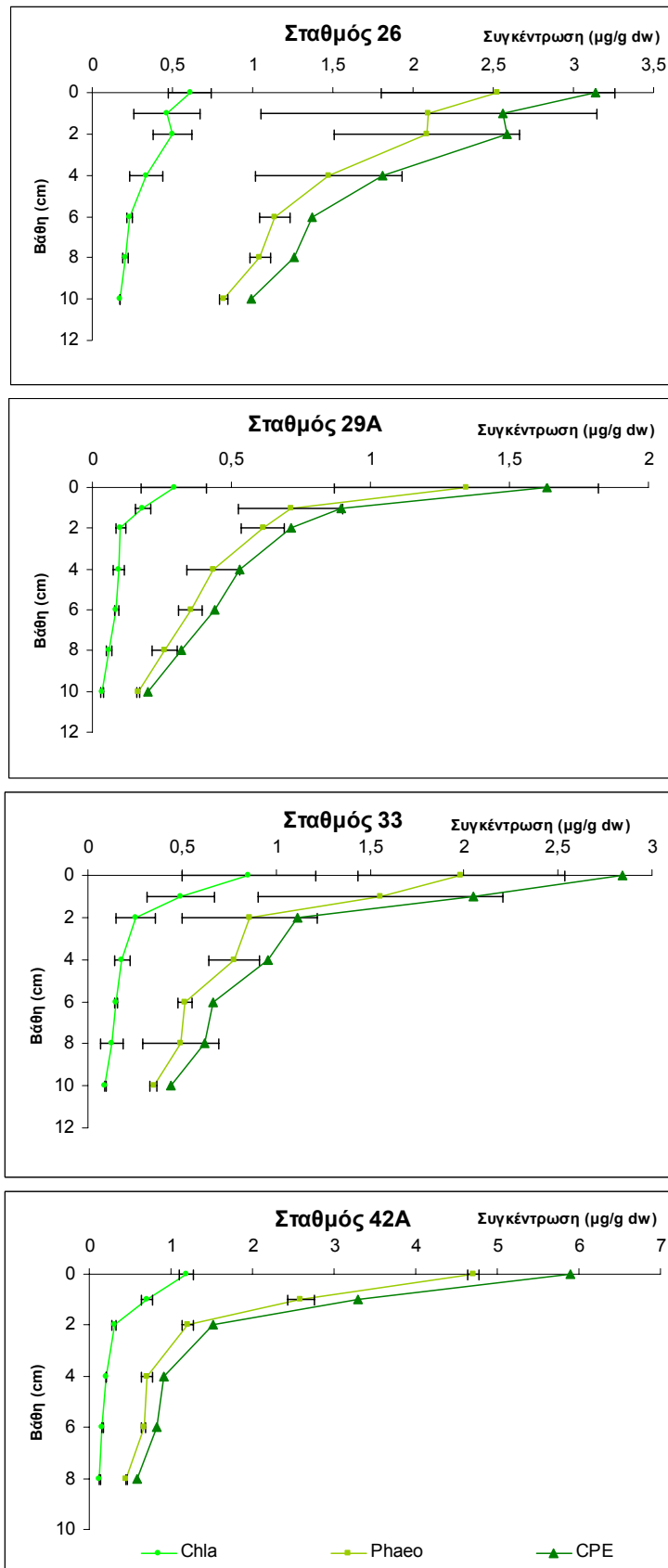
Στο Σχήμα 3.4 παρουσιάζεται η μεταβολή των συγκεντρώσεων των τριών παραμέτρων σε σχέση με το βάθος από την επιφάνεια του πυρήνα. Όπως φαίνεται, οι συγκεντρώσεις μειώνονται με το βάθος σε όλους τους σταθμούς. Με εξαίρεση το επιφανειακό ίζημα του σταθμού 8, η ποσότητα της χλωροφύλλης-α ήταν μικρότερη από την ποσότητα των φαιοφυτινών. Η αναλογία χλωροφύλλης-α / φαιοφυτινών σε κάθε βάθος του πυρήνα, δεν μεταβάλλεται με κάποιο συγκεκριμένο πρότυπο μεταξύ των σταθμών. Σε τρεις σταθμούς η συγκεκριμένη αναλογία παρουσίασε μείωση (σταθμοί 8, 14, 33), σε δύο παρέμεινε σταθερή (σταθμοί 26, 29A) και σε τρεις σταθμούς είχε τάση αύξησης (σταθμοί 18, 22, 42A), ενώ η μέση τιμή της υποδηλώνει ότι η χλωροφύλλη-α αποτελεί το 30% της συνολικής ποσότητας των φυτοχρωστικών. Στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις στο επιφανειακό ίζημα των σταθμών.



Σχήμα 3.3: Συγκεντρώσεις της χλωροφύλλης-α, των φαιοφυτινών και του CPE (μg/g dw) στο επιφανειακό ίζημα.



Σχήμα 3.4: Κάθετη κατανομή των συγκεντρώσεων της χλωροφύλλης-α, των φαιοφυτινών και του CPE



Σχήμα 3.4: Συνέχεια

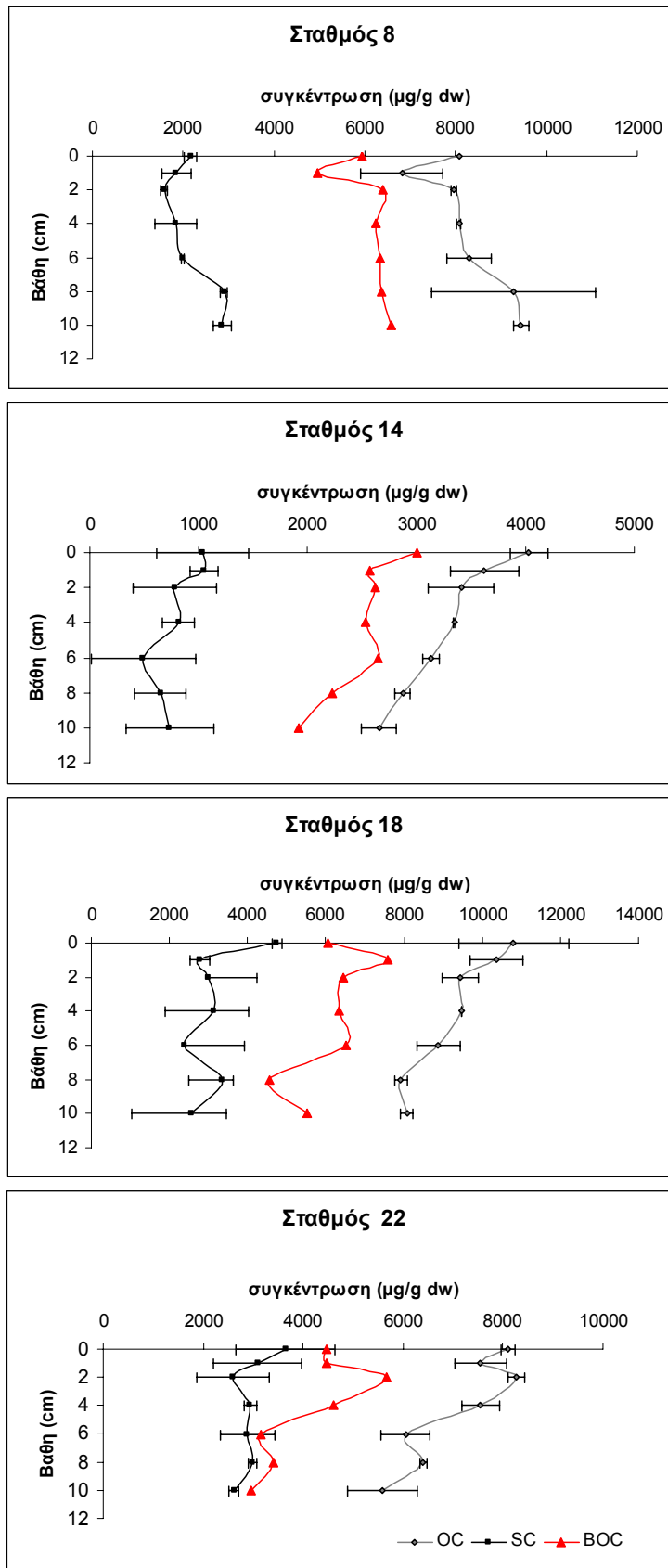
3.3 Συγκεντρώσεις συνολικού οργανικού άνθρακα, στοιχειακού και βιοδιαθέσιμου οργανικού άνθρακα

Οι τιμές του συνολικού οργανικού άνθρακα, του στοιχειακού και του βιοδιαθέσιμου οργανικού άνθρακα παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 3.3. Ο συνολικός οργανικός άνθρακας παρουσίασε ελάχιστη συγκέντρωση 2.654 μg/g dw στον σταθμό 14 (10-12 cm) και μέγιστη συγκέντρωση 12.512 μg/g dw στον σταθμό 26 (1-2 cm) ενώ η μέση τιμή του ήταν 6899 μg/g dw. Οι τιμές των συγκεντρώσεων του στοιχειακού άνθρακα κυμάνθηκαν μεταξύ 490 και 4.753 μg/g dw. Οι συγκεκριμένες τιμές αντιστοιχούν στους σταθμούς 14 (6-8 cm) και 18 (0-1 cm), με μέση τιμή 2.393 μg/g dw. Ο βιοδιαθέσιμος οργανικός άνθρακας κυμάνθηκε από 1.703 έως 10.352 μg/g dw, συγκεντρώσεις που αντιστοιχούν στους σταθμούς 33 (6-8 cm) και 26 (1-2 cm) και παρουσιάζει μέση τιμή 4.505 μg/g dw.

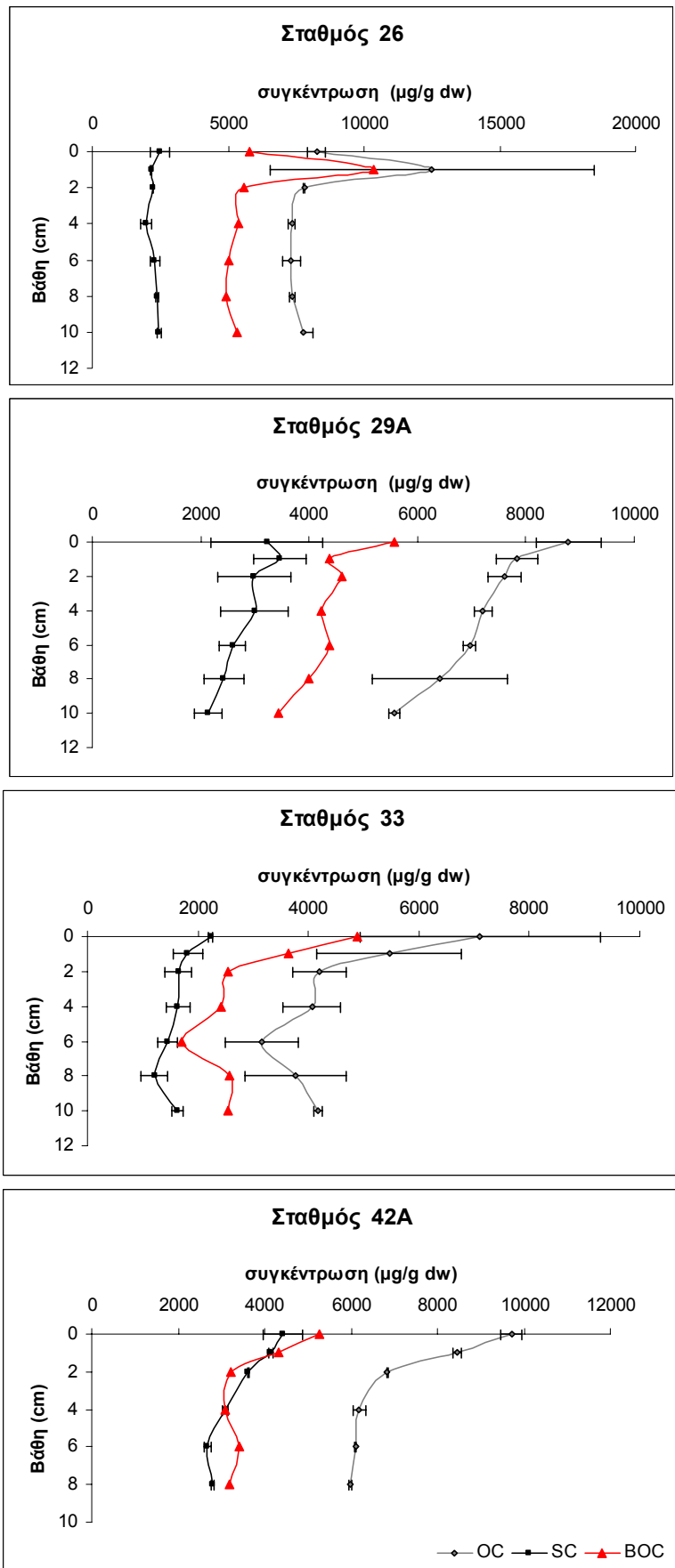
Οι συγκεντρώσεις και των τριών μεταβλητών του οργανικού υλικού μειώνονται με την αύξηση του βάθους από την επιφάνεια του ιζήματος όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.5. Σε όλες τις περιπτώσεις ο συνολικός οργανικός και ο βιοδιαθέσιμος οργανικός άνθρακας είχαν μεγαλύτερη συγκέντρωση από το στοιχειακό άνθρακα, με εξαίρεση το βάθος 2-4 cm του σταθμού 42A. Η αναλογία στοιχειακού / συνολικού οργανικού άνθρακα παρέμεινε σχεδόν σταθερή σε όλους τους σταθμούς με μέση τιμή 0,34 δηλώνοντας ότι ο στοιχειακός άνθρακας αποτελεί το 30% του οργανικού υλικού του ιζήματος. Στο Σχήμα 3.6 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις των μεταβλητών στο επιφανειακό ίζημα των σταθμών.

Πίνακας 3.3: Ελάχιστες (min) και μέγιστες (max) τιμές των συγκεντρώσεων του συνολικού οργανικού άνθρακα, του στοιχειακού και του βιοδιαθέσιμου οργανικού άνθρακα (BOC) (μg/g dw) και τυπική απόκλιση των τιμών

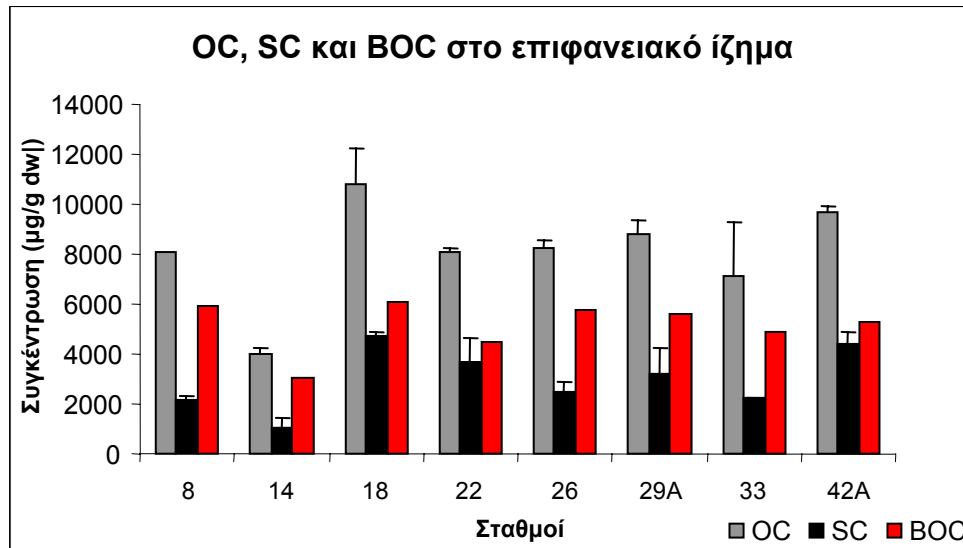
	Οργανικός άνθρακας		Στοιχειακός άνθρακας		BOC	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
8	6813±915	9433±167	1586±73	2905±77	4967	6584
14	2655±160	4031±175	490±519	1050±132	1921	3000
18	7925±173	10812±1413	2373±1545	4754±121	4564	7588
22	5587±710	8268±158	2603±722	3650±997	2965	5664
26	7322±319	12512±5975	1973±220	2476±364	4948	10352
29A	5570±108	8789±595	2133±261	3458±492	3438	5566
33	3147±661	7111±2187	1209±230	2234±34	1703	4876
42A	5983±40	9710±237	2683±91	4434±454	3100	5276



Σχήμα 3.5: Κάθετη κατανομή των συγκεντρώσεων του συνολικού οργανικού άνθρακα, του στοιχειακού και του βιοδιαθέσιμου οργανικού άνθρακα.



Σχήμα 3.5: Συνέχεια



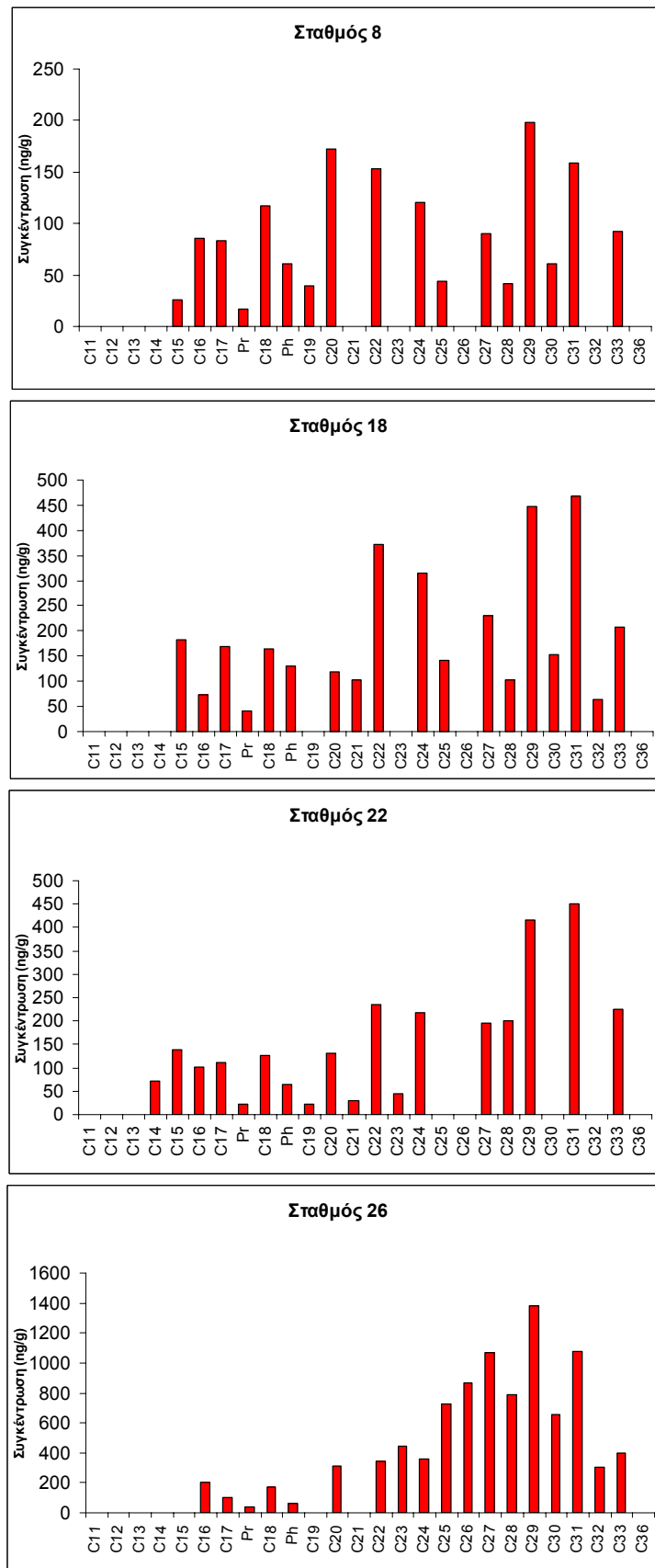
Σχήμα 3.6: Συγκεντρώσεις συνολικού οργανικού άνθρακα (OC), στοιχειακού (SC) και βιοδιαθέσιμου οργανικού άνθρακα (BOC) στο επιφανειακό ίζημα των σταθμών.

3.4 Συγκεντρώσεις κ-αλκανίων

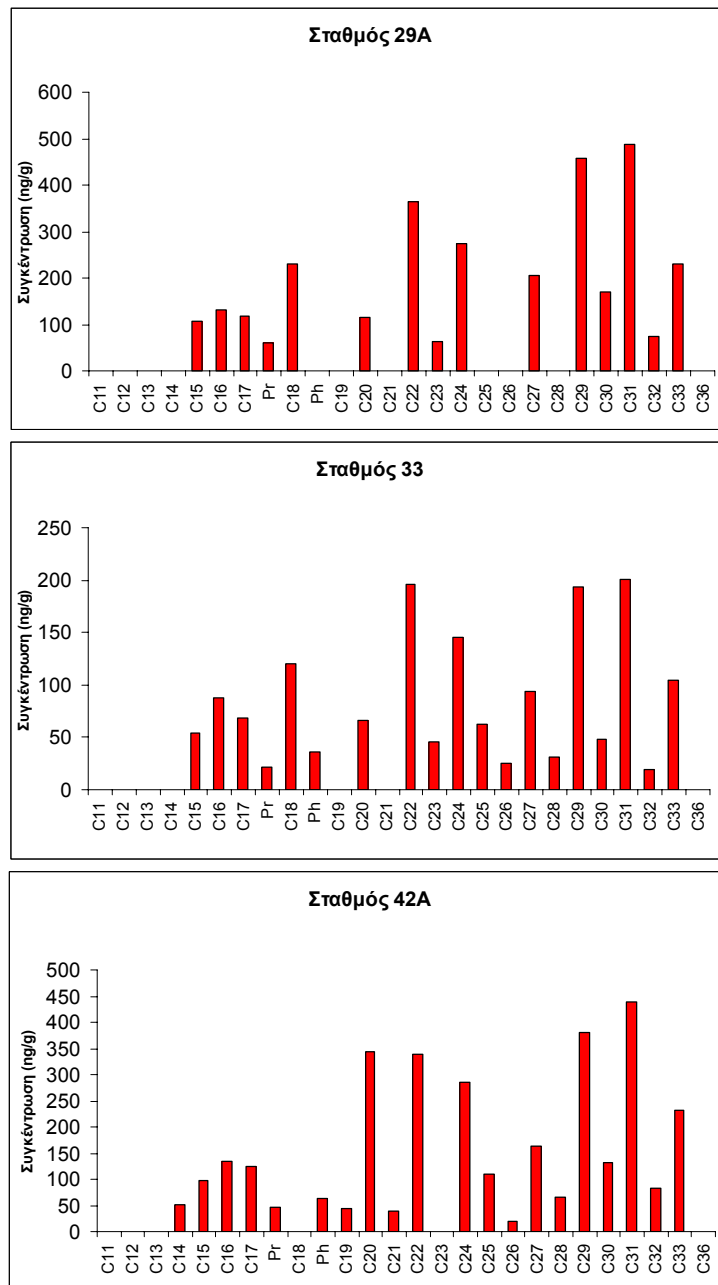
Στον Πίνακα 3.4 παρουσιάζονται αναλυτικά οι τιμές των συγκεντρώσεων των κ-αλκανίων και οι τιμές των δεικτών που τις περιγράφουν. Οι ενώσεις που προσδιορίστηκαν είχαν ανθρακική αλυσίδα από 14 έως 33 άτομα άνθρακα και το εύρος των συγκεντρώσεων των κ-αλκανίων ήταν από 1.482,4 έως 9.211,8 ng/g dw με τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή να καταγράφονται στους σταθμούς 8 και 26 αντίστοιχα, ενώ η μέση συγκέντρωση υπολογίστηκε 3.500 ng/g dw. Στο Σχήμα 3.4 απεικονίζονται τα κ-αλκάνια που προσδιορίστηκαν για κάθε σταθμό.

Πίνακας 3.4: Οι συγκεντρώσεις των κ-αλκανίων στο επιφανειακό ίζημα των σταθμών σε ng/g dw (NA), οι κανονικοποιημένες συγκεντρώσεις τους ως προς τον οργανικό άνθρακα σε µg/g dw (NA/OC), ο δείκτης CPI για τα κ-αλκάνια με ανθρακική αλυσίδα 21 έως 36 ατόμων άνθρακα, τα αλκάνια με θαλάσσια προέλευση σε ng/g (Mar), τα αλκάνια με χερσαία προέλευση σε ng/g (Ter) το ποσοστό των θαλάσσιων αλκανίων σε σχέση με την ολική συγκέντρωση των κ-αλκανίων (% Mar to NA) και το ποσοστό των χερσαίων αλκανίων σε σχέση με ολική συγκέντρωση των κ-αλκανίων (% Ter to NA).

	8	18	22	26	29A	33	42A
NA ng/g	1482,4	3416,9	2714,5	9211,8	3028,4	1563,4	3086,9
NA/OC µg/g	0,183	0,316	0,335	1,116	0,345	0,220	0,318
CPI (C ₂₁ -C ₃₆)	1,55	1,43	2,09	1,54	1,64	1,51	1,47
Mar ng/g	147,4	350,7	272,3	104,3	225,9	122,4	267,2
Ter ng/g	447,4	1144,1	1062,2	3530,4	1149,8	489,4	983,3
% Mar to NA	9,94	10,26	10,03	1,13	7,46	7,83	8,66
% Ter to NA	30,18	33,48	39,13	38,33	37,97	31,30	31,85



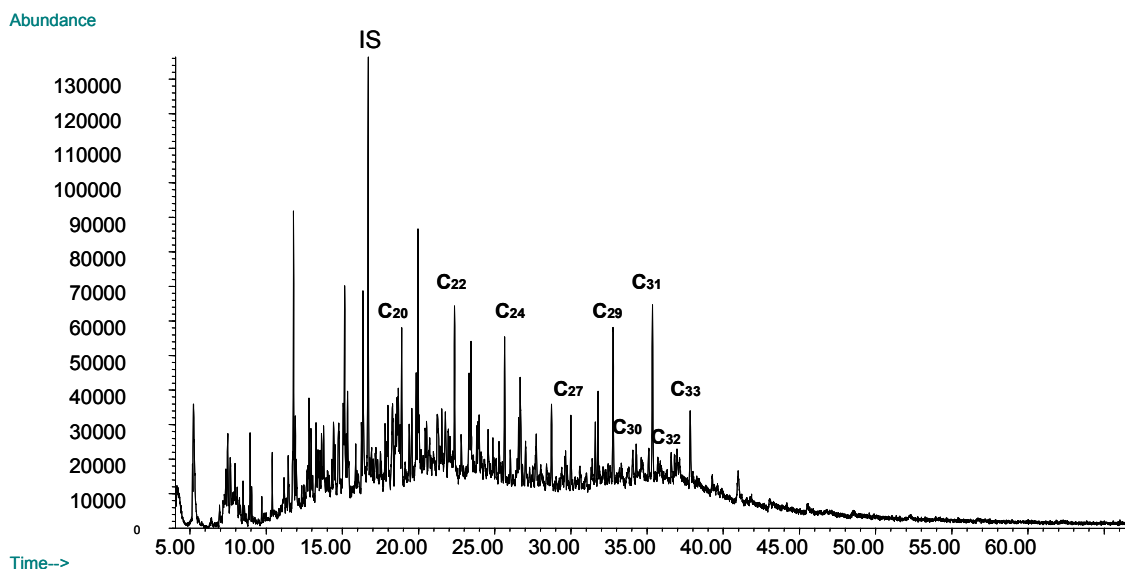
Σχήμα 3.4 : Συγκεντρώσεις των κ-αλκανίων στους σταθμούς μελέτης



Σχήμα 3.4 : Συνέχεια

Όπως προκύπτει και από τον Πίνακα 3.4 οι τιμές του C_{PI} κυμάνθηκαν μεταξύ 1,43 και 2,09 δηλώνοντας την αυξημένη συγκέντρωση των ενώσεων με μονό αριθμό ατόμων άνθρακα στην ανθρακική τους αλυσίδα έναντι των ζυγών. Το μεγαλύτερο ποσοστό των κ-αλκανίων ήταν χερσαίας προέλευσης και αποτελεί κατά μέσο όρο το 34,6% της ολικής συγκέντρωσης των κ-αλκανίων, ενώ τα θαλάσσια προέλευσης κ-αλκάνια αποτελούν μόλις το 7,9 % της συνολικής ποσότητας. Όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα 3.4, τα κ-αλκάνια που επικρατούν είναι τα χερσαία με μεγάλες ανθρακικές αλυσίδες και κυρίως τα κ-αλκάνια με 29 και 31 άτομα άνθρακα. Στο Σχήμα 3.5

παρουσιάζεται ενδεικτικά ένα χρωματογράφημα του κλάσματος των αλειφατικών υδρογονανθράκων του σταθμού 42Α.



Σχήμα 3.5: Ενδεικτικό χρωματογράφημα του επιφανειακού ιζήματος του σταθμού 42Α. Στον οριζόντιο άξονα παρουσιάζονται οι χρόνοι έκλυσης των ενώσεων (σε min) και στον κάθετο οι σχετικές αφθονίες τους. IS: εσωτερικό πρότυπο (1-chlorohexadecane)

3.5 Συσχετίσεις μεταξύ των μεταβλητών

Οι συσχετίσεις μεταξύ των μεταβλητών πραγματοποιήθηκαν για το κάθε βάθος από την επιφάνεια του πυρήνα ξεχωριστά, αλλά και για το σύνολο των δειγμάτων. Στο επιφανειακό ίζημα επιχειρήθηκε συσχέτιση όλων των μεταβλητών: της χλωροφύλλης-α, των φαιοφυτινών, του CPE, του οργανικού και του στοιχειακού άνθρακα, του BOC, των ολικών κ-αλκανίων καθώς και των κ-αλκανίων χερσαίας και θαλάσσιας προέλευσης ξεχωριστά, του δείκτη CPI, του βάθους του σταθμού, του δυναμικού οξειδοαναγωγής και της αφθονίας των ολικών και ενεργών βακτηρίων. Τα αποτελέσματα των συσχετίσεων του επιφανειακού ιζήματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.5. Για τα υπόλοιπα βάθη και το σύνολο των αποτελεσμάτων ελέγχθηκε η συσχέτιση μεταξύ των ολικών και ενεργών βακτηρίων, του οργανικού, του στοιχειακού και του βιοδιαθέσιμου οργανικού άνθρακα, της χλωροφύλλης-α, των φαιοφυτινών και του CPE και παρουσιάζονται στους πίνακες που ακολουθούν.

Πίνακας 3.5: Συντελεστής συσχέτισης Pearson μεταξύ των λογαριθμημένων μεταβλητών logdepth (βάθος σταθμού), logeh (δυναμικό οξειδοαναγωγής) logalkanes (κ-αλκάνια) logCPI (δείκτης προτίμησης αριθμού ατόμων άνθρακα) logter (χερσαία αλκάνια) logmar (θαλάσσια αλκάνια) logoc (συνολικός οργανικός άνθρακας) logsc (στοιχειακός άνθρακας) logboc (βιοδιαθέσιμος οργανικός άνθρακας) logchla (χλωροφύλλη) logphaeo (φαιωφτίνες) logCPE (ισοδύναμο χλωροπλυστικών χρωστικών) logtb (ολικά βακτήρια) lognb (ενεργά βακτήρια) στο επιφανειακό ζήτημα των σταθμών. Οι συσχετίσεις που είναι στατιστικά σημαντικές ($P < 0.05$) επισημειώνονται με έντονα γράμματα.

	logdepth	logeh	logalkanes	logCPI	logter	logmar	logoc	logsc	logboc	logchla	logphaeo	logCPE	logtb
logeh	-,585 ,223												
logalkanes	,658 ,156	-,901 * ,014											
logCPI	,195 ,712	-,303 ,559	,058 ,914										
logter	,677 ,140	-,869 * ,025	,993 ** ,000	,001 ,998									
logmar	,178 ,736	,198 ,706	-,184 ,727	,522 ,288	-,131 ,805								
logoc	,495 ,318	-,296 ,568	,351 ,495	,750 ,086	,332 ,521	,623 ,186							
logsc	,446 ,376	-,270 ,605	,200 ,705	,733 ,098	,226 ,667	,882 * ,020	,774 ,071						
logboc	,139 ,792	-,050 ,926	,246 ,638	-,047 ,929	,182 ,730	-,440 ,383	,281 ,590	-,386 ,450					
logchla	-,862 * ,027	,419 ,408	-,502 ,311	,157 ,767	-,566 ,242	-,157 ,766	-,097 ,865	-,314 ,545	,231 ,659				
logphaeo	-,103 ,845	-,454 ,366	,213 ,685	,717 ,109	,187 ,722	,420 ,407	,412 ,416	,642 ,170	-,435 ,388	,221 ,674			
logCPE	-,654 ,159	,045 ,932	-,206 ,696	,510 ,301	-,260 ,618	,173 ,743	,215 ,682	,177 ,738	-,065 ,903	,825 * ,043	,726 ,102		
logtb	-,624 ,185	,817 * ,047	-,977 ** ,001	,057 ,915	-,965 ** ,002	,295 ,570	-,314 ,544	-,049 ,927	-,422 ,404	,444 ,377	-,045 ,932	,257 ,624	
lognb	-,440 ,382	,918 ** ,010	-,939 ** ,006	-,156 ,765	-,897 * ,015	,344 ,504	-,306 ,555	-,073 ,891	-,344 ,505	,210 ,690	-,333 ,519	-,054 ,919	,924 ** ,008

*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα, προέκυψαν κάποιες αναμενόμενες συσχετίσεις όπως η αρνητική συσχέτιση του βάθους των σταθμών με τις συγκεντρώσεις των χλωροφυλλών καθώς και η σημαντική συσχέτιση μεταξύ ολικών και ενεργών βακτηρίων. Σημαντική αρνητική συσχέτιση παρατηρήθηκε επίσης μεταξύ της αφθονίας των ολικών και ενεργών βακτηρίων με την συγκέντρωση των κ-αλκανίων ($r = -0,977$; $P < 0,01$ και $r = -0,939$; $P < 0,01$) και των κ-αλκανίων χερσαίας προέλευσης ($r = -0,965$; $P < 0,05$ και $r = -0,897$; $P < 0,05$ αντίστοιχα). Αντίθετα, τα ολικά και ενεργά βακτήρια φαίνεται να συσχετίζονται θετικά με το δυναμικό οξειδοαναγωγής του επιφανειακού ιζήματος ($r = 0,817$; $P < 0,05$ και $r = 0,918$; $P < 0,05$ αντίστοιχα). Μεταξύ των χημικών παραμέτρων του ιζήματος παρατηρήθηκε ισχυρή συσχέτιση της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης-α και του CPE ($r = 0,825$; $P < 0,05$), των κ-αλκανίων θαλάσσιας προέλευσης και του στοιχειακού άνθρακα ($r = 0,882$; $P < 0,05$) και της συγκέντρωσης των ολικών κ-αλκανίων με τα κ-αλκάνια χερσαίας προέλευσης ($r = 0,993$; $P < 0,01$). Αντίθετα, αρνητικά συσχετίστηκαν τα ολικά κ-αλκάνια και τα κ-αλκάνια χερσαίας προέλευσης με το δυναμικό οξειδοαναγωγής ($r = -0,901$; $P < 0,05$ και $r = -0,817$; $P < 0,05$ αντίστοιχα).

Στον Πίνακα 3.7 παρουσιάζονται οι συσχετίσεις μεταξύ των μεταβλητών στα υπόλοιπα βάθη του ιζήματος (1-2, 2-4, 4-6, 6-8, 8-10 και 10-12 cm). Στο υποεπιφανειακό ιζημα, τα ολικά βακτήρια δεν παρουσίασαν συσχέτιση με καμία παράμετρο σε αντίθεση με τα ενεργά βακτήρια που συσχετίστηκαν ισχυρά με την συγκέντρωση της χλωροφύλλης-α ($r = 0,853$; $P < 0,05$). Στο συγκεκριμένο βάθος η χλωροφύλλη-α παρουσίασε επίσης σημαντική συσχέτιση με το CPE και την συγκέντρωση των φαιοφυτινών ($r = 0,882$; $P < 0,05$ και $r = 0,983$; $P < 0,01$ αντίστοιχα). Σημαντική συσχέτιση παρατηρήθηκε επίσης μεταξύ του συνολικού οργανικού άνθρακα και του βιοδιαθέσιμου οργανικού άνθρακα ($r = 0,916$; $P < 0,01$).

Σε βάθος 2-4 cm από την επιφάνεια του ιζήματος, παρουσιάστηκε σημαντική συσχέτιση μεταξύ των ολικών βακτηρίων με την χλωροφύλλη-α ($r = 0,834$; $P \leq 0,05$), ενώ τα ενεργά βακτήρια δεν συσχετίστηκαν με καμία παράμετρο. Οι σχέσεις μεταξύ των υπόλοιπων μεταβλητών δεν μεταβλήθηκαν σε σχέση με το υποεπιφανειακό ιζημα. Υπήρξε συσχέτιση του βιοδιαθέσιμου και του συνολικού οργανικού άνθρακα ($r = 0,883$; $P < 0,05$), ενώ εξακολούθησε να υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών CPE – χλωροφύλλης-α και CPE- φαιοφυτινών ($r = 0,818$; $P < 0,05$ και $r = 0,991$; $P < 0,00$, αντίστοιχα).

Στο βάθος 4-6 cm εμφανίστηκε αρνητική συσχέτιση μεταξύ των ολικών βακτηρίων και του στοιχειακού άνθρακα ($r = -0,782$; $P \leq 0,05$), εξακολουθησαν να παρατηρούνται οι συσχετίσεις μεταξύ βιοδιαθέσιμου και συνολικού οργανικού άνθρακα, CPE–χλωροφύλλης και CPE – φαιοφυτινών (βλέπε Πίνακα 3.7) ενώ θετικά συσχετίστηκαν ο οργανικός με τον στοιχειακό άνθρακα ($r = 0,767$; $P < 0,05$) και η χλωροφύλλη με τις φαιοφυτίνες ($r = 0,93$; $P < 0,05$).

Σε μεγαλύτερο βάθος από την επιφάνεια του ιζήματος (> 6 cm έως 10-12 cm), παρατηρήθηκε να διαμορφώνονται οι ίδιες σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών με αυτές που επικράτησαν στο βάθος 4-6 cm (βλέπε Πίνακα 3.7). Οι σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών παρέμειναν σταθερές, με εξαίρεση την αφθονία των βακτηρίων (ολικών και ενεργών), που δεν συσχετίστηκε με καμία μεταβλητή.

Αν εξεταστούν όλα τα βάθη μαζί προκύπτουν διαφορετικά αποτελέσματα (Πίνακας 3.6). Σε αυτή την περίπτωση παρουσιάστηκε συσχέτιση των ολικών και ενεργών βακτηρίων με τις συγκεντρώσεις της χλωροφύλλης-α, των φαιοφυτινών και του CPE (βλέπε Πίνακας 3.6). Ανάλογη συσχέτιση παρατηρήθηκε στο υποεπιφανειακό ίζημα 1-2 cm (χλωροφύλλη-ενεργά βακτήρια) και στο βάθος 2-4 cm (χλωροφύλλη- ολικά βακτήρια). Επίσης παρατηρήθηκε έντονη συσχέτιση μεταξύ των παραμέτρων της χλωροφύλλης των φαιοφυτινών και του CPE μεταξύ τους, καθώς και μεταξύ του οργανικού, του στοιχειακού και του βιοδιαθέσιμου οργανικού άνθρακα (Πίνακας 3.6).

Πίνακας 3.6: Συντελεστής συσχέτισης Pearson μεταξύ των μεταβλητών logoc (συνολικός οργανικός άνθρακας), logsc (στοιχειακός άνθρακας), logchla (χλωροφύλλη), logphaeo (φαιοφυτίνες), logCPE (ισοδύναμο χλωροπλαστικών χρωστικών), logTb (ολικά βακτήρια), logNb (ενεργά βακτήρια), logBOC (βιοδιαθέσιμος οργανικός άνθρακας), εφαρμοσμένος σε όλα τα βάθη του πυρήνα. Οι στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις ($P < 0,05$) παρουσιάζονται με έντονη γραφή.

	logoc	logsc	logchla	logphaeo	logCPE	logTb	logNb	
logsc	,817 ** ,000							
logchla	,158 ,285	-,061 ,681						
logphaeo	,272 ,061	,098 ,507	,889 ** ,000					
logCPE	,252 ,084	,058 ,694	,952 ** ,000	,984 ** ,000				
logTb	-,064 ,668	-,178 ,227	,650 ** ,000	,605 ** ,000	,632 ** ,000			
logNb	,025 ,868	-,046 ,756	,658 ** ,000	,612 ** ,000	,645 ** ,000	,783 ** ,000		
logBOC	,924 ** ,000	,541 ** ,000	,258 ,076	,320 * ,027	,318 * ,028	,020 ,891	,061 ,679	

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

* . Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

Πίνακας 3.7: Συντελεστής συσχέτισης Pearson μεταξύ των μεταβλητών logoc (συνολικός οργανικός άνθρακας), logsc (στοιχειακός άνθρακας), logchla (χλωροφύλλη), logphaeo (φαιοφυτίνες), logCPE (ισοδύναμο χλωροπλαστικών χρωστικών), logTb (ολικά βακτήρια), logNb (ενεργά βακτήρια), logBOC (βιοδιαθέσιμος οργανικός άνθρακας) για το κάθε βάθος πυρήνα ξεχωριστά. Οι στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις ($P < 0,05$) παρουσιάζονται με έντονη γραφή.

1-2 cm

	logoc	logsc	logchla	logphaeo	logCPE	logTb	logNb	
logsc	,669 ,100							
logchla	-,210 ,651	-,332 ,467						
logphaeo	,133 ,776	,019 ,967	,780* ,039					
logCPE	,048 ,919	-,079 ,867	,882** ,009	,983** ,000				
logTb	-,410 ,361	-,672 ,098	,139 ,766	,071 ,880	,095 ,840			
logNb	-,510 ,243	-,516 ,236	,853* ,015	,483 ,272	,610 ,146	,382 ,397		
logBOC	,916** ,004	,318 ,487	-,087 ,852	,156 ,738	,102 ,828	-,136 ,771	-,365 ,420	

2-4 cm

	logoc	logsc	logchla	logphaeo	logCPE	logTb	logNb	
logsc	,752 ,051							
logchla	-,063 ,893	-,506 ,246						
logphaeo	,285 ,535	-,121 ,796	,736 ,059					
logCPE	,231 ,619	-,204 ,661	,818* ,025	,991** ,000				
logTb	-,424 ,343	-,587 ,166	,834* ,020	,490 ,264	,576 ,176			
logNb	,312 ,495	-,057 ,904	,467 ,290	,621 ,136	,628 ,131	,446 ,316		
logBOC	,883** ,008	,364 ,422	,219 ,638	,485 ,270	,457 ,302	-,216 ,642	,496 ,257	

4-6 cm

	logoc	logsc	logchla	logphaeo	logCPE	logTb	logNb	
logsc	,767* ,044							
logchla	-,074 ,875	-,469 ,288						
logphaeo	,044 ,925	-,276 ,549	,930** ,002					
logCPE	,016 ,974	-,329 ,471	,960** ,001	,996** ,000				
logTb	-,529 ,223	-,782* ,038	,669 ,100	,588 ,165	,617 ,140			
logNb	-,310 ,499	-,498 ,255	,595 ,159	,583 ,169	,595 ,159	,913** ,004		
logBOC	,900** ,006	,414 ,356	,206 ,658	,262 ,570	,253 ,584	-,206 ,658	-,077 ,870	

Πίνακας 3.7: Συνέχεια

6-8 cm

	logoc	logsc	logchla	logphaeo	logCPE	logTb	logNb	
logsc	.762* .046							
logchla	-,340 .456	-,511 .242						
logphaeo	-,125 .790	-,236 .610	.944** .001					
logCPE	-,169 .718	-,293 .524	.963** .000	.998** .000				
logTb	-,148 .751	.099 .833	.332 .467	.412 .359	.399 .376			
logNb	-,014 .976	.257 .578	.174 .709	.178 .702	.178 .703	.649 .115		
logBOC	.909** .005	.425 .342	-,178 .703	-,053 .909	-,078 .867	-,282 .539	-,221 .635	

8-10 cm

	logoc	logsc	logchla	logphaeo	logpCPE	logpTb	logpNb	
logsc	.927** .003							
logchla	-,023 .961	-,115 .807						
logphaeo	.041 .931	-,013 .977	.951** .001					
logpCPE	.031 .947	-,030 .948	.967** .000	.998** .000				
logpTb	-,406 .366	-,568 .183	.109 .817	.216 .642	.197 .672			
logpNb	-,307 .503	-,410 .361	.629 .130	.571 .180	.586 .167	.544 .207		
logpBOC	.939** .002	.743 .056	.031 .947	.059 .901	.055 .906	-,190 .684	-,187 .689	

10-12 cm

	logoc	logsc	logchla	logphaeo	logCPE	logTb	logNb	
logsc	.921** .009							
logchla	.005 .993	-,097 .854						
logphaeo	.042 .937	-,018 .972	.976** .001					
logCPE	.036 .946	-,034 .950	.985** .000	.999** .000				
logTb	-,321 .535	-,201 .703	.168 .751	.347 .500	.312 .547			
logNb	-,317 .540	-,124 .816	.670 .146	.748 .087	.735 .096	.574 .233		
logBOC	.969** .001	.795 .059	.046 .931	.054 .919	.054 .920	-,378 .460	-,436 .388	

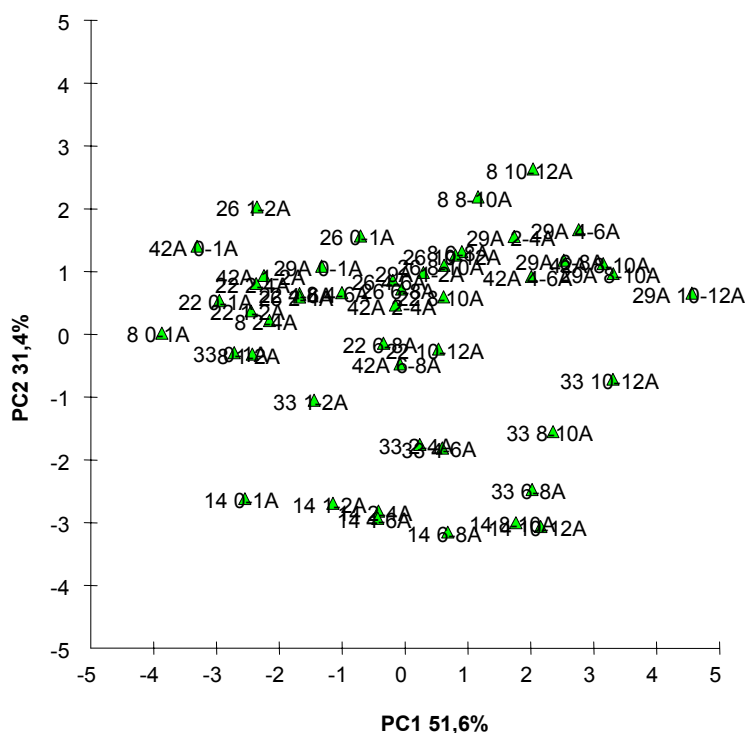
** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

* . Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

3.6 Ανάλυση πρωταρχικών συνιστωσών

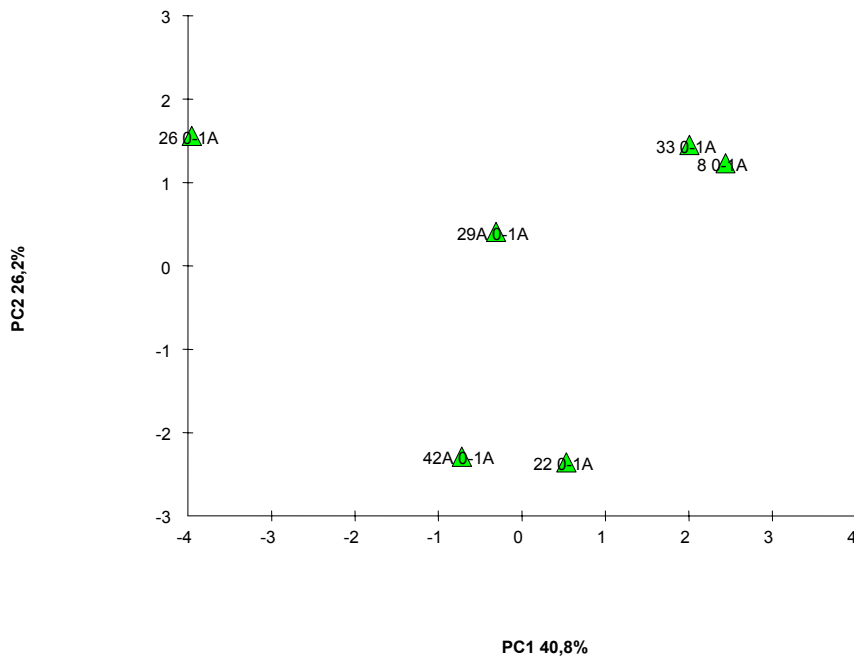
Για τη μελέτη της σχέσης μεταξύ των σταθμών ως προς τις βιολογικές και χημικές παραμέτρους που προσδιορίστηκαν πραγματοποιήθηκε η στατιστική ανάλυση πρωταρχικών συνιστωσών (Principal Component Analysis ή PCA). Η ανάλυση εφαρμόστηκε στο σύνολο των δειγμάτων (Σχήμα 3.6) και στο επιφανειακό ίζημα (Σχήμα 3.7). Οι μεταβλητές που συμπεριλήφθηκαν στην ανάλυση ήταν τα ολικά και ενεργά βακτήρια, ο συνολικός οργανικός άνθρακας, ο στοιχειακός και ο βιοδιαθέσιμος οργανικός άνθρακας, η χλωροφύλλη-α, οι φαιοφυτίνες και το CPE.

Με την εξέταση του συνόλου των δειγμάτων (Σχήμα 3.6), προέκυψε ότι η μεταβλητότητα τους μπορεί να ερμηνευθεί από δύο και μόνο συνιστώσες που αντιστοιχούν στο 83% της συνολικής μεταβλητότητας. Η πρώτη συνιστώσα PC1 (51,6 %) στον οριζόντιο άξονα δείχνει ότι υπάρχει τάση μείωσης των μεταβλητών από αριστερά προς τα δεξιά στο διάγραμμα, διαχωρίζοντας ουσιαστικά τα πρώτα εκατοστά του ιζήματος από τα βαθύτερα στρώματα. Η συνιστώσα αυτή φαίνεται να εξαρτάται από τις συγκεντρώσεις των φυτοχρωστικών στα δείγματα. Η δεύτερη συνιστώσα PC2 (31,4%), αναφέρεται στη συγκέντρωση του συνολικού οργανικού άνθρακα. Οι σταθμοί διατάσσονται στο διάγραμμα με τάση μείωσης προς τις αρνητικές τιμές του άξονα. Αν εξαιρεθούν οι σταθμοί 14 και 33, δεν φαίνεται να υπάρχει σαφής διαχωρισμός ή ομαδοποίηση μεταξύ των σταθμών.



Σχήμα 3.6: Ανάλυση πρωταρχικών συνιστωσών στο σύνολο των δειγμάτων

Στη στατιστική ανάλυση του επιφανειακού ιζήματος, προστέθηκαν επιπλέον οι εξής μεταβλητές: το δυναμικό οξειδοαναγωγής, οι συγκεντρώσεις των κ-αλκανίων, καθώς και των κ-αλκανίων χερσαίας και θαλάσσιας προέλευσης και ο δείκτης προτίμησης αριθμού ατόμων άνθρακα (CPI). Από την ανάλυση προέκυψε ότι το 67% της συνολικής μεταβλητότητας ερμηνεύεται από δύο πρωταρχικές συνιστώσες, την PC1 (40,8%) και την PC2 (26,2%) (Σχήμα 3.7). Συγκεκριμένα, η PC1 ερμηνεύει την μεταβλητότητα σε σχέση με τη συγκέντρωση των ολικών και χερσαίας προέλευσης κ-αλκανίων και τοποθετεί τους σταθμούς στο διάγραμμα με τάση μείωσης των συγκεντρώσεων των μεταβλητών προς τα δεξιά. Η δεύτερη συνιστώσα, εξηγεί τη μεταβλητότητα με βάση την συγκέντρωση των κ-αλκανίων θαλάσσιας προέλευσης παρουσιάζοντας μείωση των τιμών προς τις θετικές τιμές του άξονα (Σχήμα 3.7).



Σχήμα 3.7: Ανάλυση πρωταρχικών συνιστωσών στο επιφανειακό ίζημα

Η μεγαλύτερη ομοιότητα παρουσιάζεται μεταξύ των σταθμών 33 και 8. Ακολουθεί η ομαδοποίηση των σταθμών 42A και 22, ενώ οι σταθμοί 26 και 29A δεν συμμετέχουν σε καμία ομαδοποίηση.

3.7 Ανάλυση BIOENV: Συσχέτιση της βακτηριακής αφθονίας και των περιβαλλοντικών παραμέτρων

Η στατιστική ανάλυση BIOENV επιχειρεί την συσχέτιση των αβιοτικών και βιοτικών παραμέτρων ενός συστήματος μελέτης, μέσω της ανάλυσης δύο σταδίων. Στο πρώτο στάδιο κατασκευάζεται Πίνακας ομοιότητας μεταξύ των βιοτικών παραμέτρων, στην συγκεκριμένη περίπτωση των ολικών και ενεργών βακτηρίων, και στο δεύτερο στάδιο υπολογίζονται οι συσχετίσεις με τις αβιοτικές παραμέτρους που στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι όλες οι περιβαλλοντικές παράμετροι του ιζήματος.

Η ανάλυση εφαρμόστηκε στο σύνολο των δειγμάτων και στο επιφανειακό ίζημα ξεχωριστά. Οι περιβαλλοντικές παράμετροι που συμπεριλήφθηκαν στην ανάλυση του συνόλου των δειγμάτων ήταν η χλωροφύλλη-α, οι φαιοφυτίνες, το CPE, ο συνολικός οργανικός άνθρακας, ο στοιχειακός και ο βιοδιαθέσιμος οργανικός άνθρακας, ενώ στην ανάλυση για το επιφανειακό ίζημα συνυπολογίστηκαν τα ολικά, τα χερσαίας και θαλάσσιας προέλευσης κ-αλκάνια, ο δείκτης προτίμησης αριθμού ατόμων άνθρακα και το δυναμικό οξειδοαναγωγής.

Όπως προέκυψε για το σύνολο των δειγμάτων, η μέγιστη τιμή του συντελεστή συσχέτισης Spearman είναι $r_s=0,372$ και αναφέρεται στην ταυτόχρονη επίδραση δύο παραμέτρων, της χλωροφύλλης-α και του CPE. Η χαμηλή τιμή του συντελεστή όμως, δείχνει ότι δεν υπάρχει πραγματική επίδραση των παραπάνω μεταβλητών στην βακτηριακή αφθονία της περιοχής που μελετάται. Αντίθετα, στο επιφανειακό ίζημα παρατηρείται ισχυρή συσχέτιση της βακτηριακής αφθονίας και της συγκέντρωσης των κ-αλκανίων με $r_s=0,893$. Οι υπόλοιπες μεταβλητές δεν φαίνεται να επηρεάζουν το σύστημα.

4.1 Βακτηριακή αφθονία και κατανομή των βακτηριακών κοινοτήτων

Τα αποτελέσματα της καταμέτρησης της ολικής βακτηριακής αφθονίας της παρούσας εργασίας συμφωνούν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της έρευνας των Bianchi και συνεργατών (2003b), σύμφωνα με τα οποία η βακτηριακή αφθονία στην περιοχή του Θρακικού Πελάγους κυμαίνεται μεταξύ $0,8$ και $8,3 \times 10^8$ cells/ml ιζήματος.

Όπως αναμενόταν, η αφθονία που καταμετρήθηκε στα ιζήματα της περιοχής του Θρακικού Πελάγους είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη αφθονία περιοχών που βρίσκονται σε μεγαλύτερα βάθη. Πιο συγκεκριμένα, στο Θρακικό Πέλαγος παρατηρήθηκαν μεγαλύτεροι πληθυσμοί βακτηρίων από περιοχές με μεγάλα βάθη όπως στο Βόρειο Ατλαντικό Ωκεανό (5×10^7 - $34,8 \times 10^7$ cells/cm³) (Eardly *et al.*, 2001), στον Ειρηνικό Ωκεανό ($3,5 \times 10^5$ - $3,5 \times 10^8$ cells/ml) (Wellsbury *et al.*, 2002), σε βαθιές περιοχές γύρω από τη Γροιλανδία ($0,8 \times 10^8$ - $5,4 \times 10^8$ cells/cm³) (Quètic *et al.*, 2004), ακόμα και από βαθιά ιζήματα της Δυτικής Μεσογείου ($7,9 \times 10^6$ - $1,01 \times 10^9$ cells/ml) (Cragg *et al.*, 1999).

Από την άλλη, η αφθονία των μικροβίων των ιζημάτων του Θρακικού Πελάγους βρέθηκε να είναι μικρότερη σε σχέση με τα βαθιά ιζήματα ορισμένων περιοχών της Ανατολικής Μεσογείου ($1,55 \times 10^9$ - $3,94 \times 10^9$ cells/cm³) (Boetius *et al.*, 1996) και της Θάλασσας Wadden ($1,8 \times 10^9$ - $4,5 \times 10^9$ cells/ cm³) (Llobet-Brossa *et al.*, 1998). Επιπρόσθετα, η προσδιορισμένη βακτηριακή αφθονία του Θρακικού Πελάγους βρέθηκε να είναι μικρότερη από την αντίστοιχη άλλων παράκτιων περιοχών ή περιοχών με μικρό βάθος όπως για παράδειγμα σε αμμώδη ιζήματα κοντά στη Βοστώνη ($3,28 \times 10^8$ - $2,8 \times 10^9$ cells/cm³) (Epstein, 1997).

Η διάκριση ολικών και ενεργών βακτηρίων κατά την καταμέτρηση της αφθονίας των πληθυσμών, πραγματοποιείται σπάνια σε ωκεανογραφικές μελέτες (Luna *et al.*, 2002; 2004; Quètic *et al.*, 2004). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, η αφθονία των ενεργών βακτηρίων του Θρακικού Πελάγους είναι μικρότερη από εκείνη που προσδιορίστηκε σε βαθιά ιζήματα γύρω από τη Γροιλανδία ($0,2 \times 10^8$ - $3,9 \times 10^8$ cells/cm³) (Quètic *et al.*, 2004). Στην παρούσα έρευνα το ποσοστό των ενεργών βακτηρίων σε σχέση με τα συνολικά είναι μεγαλύτερο από το ποσοστό που κατέγραψαν οι Luna και συνεργάτες (2004) σε παράκτια ιζήματα (26-30% επί των ολικών βακτηρίων), ενώ είναι αρκετά μικρότερο από το αντίστοιχο ποσοστό των Quètic και συνεργατών (2004) που προσδιορίστηκε σε βαθιά ιζήματα (71-74% επί των ολικών βακτηρίων). Μεγαλύτερες αφθονίες καταγράφηκαν στους σταθμούς που

βρίσκονται στα όρια της ηπειρωτικής υφαλοκρηπίδας και χαμηλότερες στους σταθμούς που ανήκουν στην ηπειρωτική κατωφέρεια. Ο παραπάνω διαχωρισμός μεταξύ σταθμών υφαλοκρηπίδας και κατωφέρειας μπορεί να αποδοθεί σε διάφορους λόγους. Σύμφωνα με τους Danovato και συνεργάτες (1999b), η υφαλοκρηπίδα είναι ένα σύστημα που χαρακτηρίζεται από χαμηλή εισροή θρυμμάτων φυτοπλαγκτονικής προέλευσης, από σχετικά υψηλή συγκέντρωση πρωτεϊνών, λιπιδίων και υδρογονανθράκων σε σχέση με την κατωφέρεια και χαμηλό ρυθμό μείωσης των συγκεντρώσεων των θρεπτικών με το βάθος του ιζήματος. Αντίθετα, η κατωφέρεια χαρακτηρίζεται από χαμηλότερη εισροή οργανικής ύλης οι ποσότητες της οποίας είναι δύσκολα προσλήψιμες από τους οργανισμούς και από πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις ουσιών απαραίτητων για την διαβίωση των οργανισμών όπως πρωτεΐνες και λιπίδια.

Η μεγαλύτερη αφθονία ολικών και ενεργών βακτηρίων καταμετρήθηκε στον σταθμό 33, ο οποίος βρίσκεται βόρεια της Λήμνου. Οι τιμές των βακτηρίων που καταμετρήθηκαν φαίνεται να είναι υψηλές λόγω του ότι ο σταθμός έχει σχετικά μικρή απόσταση από τις ακτές που σύμφωνα με τους Boetius και συνεργάτες (1996), παίζει καθοριστικό ρόλο στη διαθεσιμότητα της τροφής στους βενθικούς οργανισμούς. Επίσης, λόγω της γεωγραφικής του θέσης φαίνεται να επηρεάζεται και από την εισροή των νερών της Μαύρης Θάλασσας (Kourafalou & Barboroulos, 2003). Η επίδραση της Μαύρης Θάλασσας στην περιοχή του Βορείου Αιγαίου έχει διαπιστωθεί από αρκετούς ερευνητές (Zeri *et al.*, 2000; Sempere *et al.*, 2002; Siokou-Frangou *et al.*, 2002; Giresse *et al.*, 2003; Kourafalou & Barboroulos 2003) και αφορά στον εμπλουτισμό των νερών με θρεπτικά συστατικά και οργανικό υλικό, με συνέπεια να επηρεάζεται σημαντικά το οικοσύστημα της περιοχής.

Ο σταθμός που παρουσίασε την μικρότερη αφθονία ολικών βακτηρίων ήταν ο σταθμός 42A, ενώ την μικρότερη αφθονία ενεργών βακτηρίων ο σταθμός 26. Ο σταθμός 26 βρίσκεται σχεδόν στο κέντρο της υπό μελέτη περιοχής και είναι βαθύς σταθμος (257 m). Η χαμηλές αφθονίες βακτηρίων στο σταθμό 26, συνοδεύεται από χαμηλές συγκεντρώσεις φυτοχρωστικών και χλωροφύλλης-α.

Οι χαμηλές βακτηριακές αφθονίες που καταγράφηκαν στον σταθμό 42A (βάθος 210 m), με εξαίρεση το βάθος 6-8 cm που παρουσιάζει τιμές βακτηριακών αφθονιών αρκετά υψηλές, μπορεί να οφείλονται στο ότι ο σταθμός αυτός βρίσκεται σε σημείο που δέχεται έντονη επιρροή από τα νερά της Μαύρης Θάλασσας γεγονός που τον κάνει να διαφοροποιείται από τους υπόλοιπους σταθμούς της ηπειρωτικής κατωφέρειας.

Το κοινό συμπέρασμα της παρούσας μελέτης και όλων των σχετικών ερευνών είναι η μείωση της αφθονίας των βακτηρίων καθώς αυξάνεται το βάθος από την επιφάνεια του πυρήνα του ιζήματος (βλέπε σχήμα 3.1, κεφάλαιο 3) (Boetius *et al.*, 1996; Epstein, 1997; Llobet-Brossa *et al.*, 1998; Cragg *et al.*, 1999; Danovaro *et al.*, 1999c; 2000a; Eardly *et al.*, 2001; Danovaro *et al.*, 2002; Lykousis *et al.*, 2002; Wellsbury *et al.*, 2002; Bianchi *et al.*, 2003b; Haglund *et al.*, 2003; Quèric *et al.*, 2004), γεγονός που πιθανότατα οφείλεται στην μείωση της ποσότητας και της ποιότητας της τροφής στα βαθύτερα στρώματα του ιζήματος (Danovaro *et al.*, 1995; Boetius *et al.*, 1996; Danovaro *et al.*, 1998; 2000a; Tselepidis *et al.*, 2000a; Tselepidis & Lampadariou 2004; Quèric *et al.*, 2004).

Στους περισσότερους σταθμούς ο λόγος των ενεργών προς τα ολικά βακτήρια παρουσιάζει τάση αύξησης στα βαθύτερα στρώματα του πυρήνα, σε άλλους μείωση ενώ σε ορισμένους παραμένει σταθερός. Το γεγονός αυτό έρχεται σε αντίθεση με την παρατηρούμενη σταθερότητα της αναλογίας ενεργών προς ολικά βακτήρια που προκύπτει από την έρευνα των Haglund και συνεργατών (2003) και των Luna και συνεργατών (2002; 2004). Η σταθερότητα του λόγου των ενεργών προς τα ολικά βακτήρια σε όλα τα στρώματα του πυρήνα του ιζήματος αποτελεί ένδειξη ότι η θήρευση των βακτηρίων από πρωτόζωα ή η προσβολή τους από ιούς δεν είναι σημαντική (Haglund *et al.*, 2003), όπως επίσης ότι η μεταβολή διαφόρων μεταβλητών με το βάθος, όπως για παράδειγμα το οξειδοαναγωγικό δυναμικό (Eh), δεν επηρεάζουν την κατανομή των ενεργών βακτηρίων (Luna *et al.*, 2002). Στην παρούσα εργασία δεν παρατηρήθηκε κάποια συγκεκριμένη τάση στην αναλογία ενεργών /ολικών βακτηρίων μεταξύ των σταθμών δειγματοληψίας γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι, μεταξύ των σταθμών, ασκείται διαφορετική πίεση (π.χ. θηρευτική) στους πληθυσμούς των ενεργών βακτηρίων.

4.2 Συγκεντρώσεις φυτοχρωστικών

Οι παρατηρούμενες συγκεντρώσεις φυτοχρωστικών και το ισοδύναμο των χλωροπλαστικών χρωστικών (CPE) της παρούσας εργασίας μπορούν να συγκριθούν με τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις της Πολυμενάκου (2005), στην ίδια περιοχή του Θρακικού Πελάγους (chl_a: 0,03-2,3 μg/g, phaeo: 0,37-2,87 μg/g, CPE: 0,45-5,17 μg/g). Οι Danovaro και συνεργάτες (1999c), σε έρευνα που πραγματοποίησαν στην περιοχή του Θρακικού Πελάγους, κατέγραψαν αρκετά υψηλότερες τιμές συγκεντρώσεων

φυτοχρωστικών σε σχέση με τις αναφερόμενες στην παρούσα εργασία (chl_a: 0,33-10,07 μg/g, phaeo: 2,67-26,07 μg/g, CPE: 3-35,42 μg/g). Η διαφοροποίηση αυτή είναι δύσκολο να εξηγηθεί και πιθανόν να οφείλεται σε καθαρά τεχνικούς λόγους. Οι Lykousis και συνεργάτες (2002) σε μελέτη που πραγματοποίησαν στο Βόρειο Αιγαίο κατέγραψαν ιδιαίτερα χαμηλές συγκεντρώσεις χλωροφύλλης-α που γενικά κυμάνθηκαν μεταξύ 0,1 και 0,5 μg/g ξηρής μάζας ιζήματος. Οι τιμές των συγκεντρώσεων της χλωροφύλλης-α και των φυτοχρωστικών της παρούσας εργασίας είναι μεγαλύτερες από αυτές που μέτρησαν οι Fabiano και Danovaro (1998) στην θάλασσα Ross στην Ανταρκτική (chl_a: 0,3-0,4 μg/g, phaeo: 0-0,1 μg/g). Παρόμοιες τιμές χλωροφύλλης-α και φαιοχρωστικών καταμετρήθηκαν και στο Κρητικό Πέλαγος (Danovaro *et al.*, 1998) με συγκεντρώσεις που κυμάνθηκαν από 0,51-2,57 μg/g και 0,52-4,71 μg/g αντίστοιχα. Ο ίδιος ερευνητής και οι συνεργάτες του σε μεταγενέστερη έρευνα στο Κρητικό Πέλαγος (2000a), κατέγραψαν υψηλότερες συγκεντρώσεις CPE σε σχέση με της παρούσας εργασίας (0,51-8,25 μg/g), αλλά και σχετικά χαμηλές (όπως τις χαρακτήρισαν οι ίδιοι οι συγγραφείς) συγκεντρώσεις χλωροφύλλης-α (μέγιστη τιμή 3,08 μg/g). Οι τιμή της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης-α στην Αδριατική Θάλασσα (chl_a: 0,5-4,9 μg/g) είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του Θρακικού Πελάγους, ενώ η συγκέντρωση των φαιοχρωστικών αρκετά μικρότερη (phaeo: 0-0,4 μg/g) (Danovaro *et al.*, 2001) Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της έρευνας των Danovaro και συνεργατών (1999b), περιοχές της Δυτικής Μεσογείου παρουσιάζουν ιδιαίτερα υψηλές συγκεντρώσεις φυτοχρωστικών γεγονός που αποδίδεται στην εισροή υδάτων πλούσιων σε οργανικό υλικό από μεγάλα ποτάμια. Η παρουσία ποταμών στο Θρακικό Πέλαγος φαίνεται να είναι ένας από τους βασικούς λόγους διαφοροποίησής του ως προς τις συγκεντρώσεις φυτικής οργανικής ύλης από το Κρητικό Πέλαγος. Τα αποτελέσματα έρευνας στην Β.Δ. Μεσόγειο (Riaux-Gobin *et al.*, 2004), δείχνουν ότι ενώ οι συγκεντρώσεις της χλωροφύλλης-α είναι ανάλογες με τις αντίστοιχες του Θρακικού Πελάγους (κατά μέσο όρο 0,37 μg/g), οι συγκεντρώσεις των φαιοφυτινών είναι ιδιαίτερα υψηλότερες (κατά μέσο όρο 4,49 μg/g) με αποτέλεσμα στη Β.Δ. Μεσόγειο να υπάρχουν υψηλότερες συγκεντρώσεις συνολικής φυτικής βιομάζας. Σε αντίστοιχη έρευνα στην Ανατολική Μεσόγειο παρατηρήθηκαν μεγάλες συγκεντρώσεις χλωροφύλλης-α με τιμές που κυμαίνονται στο διάστημα 0,01-7,67 μg/g (Polymenakou *et al.*, 2005a), όπως επίσης και στην περιοχή του Θερμαϊκού Κόλπου με συγκεντρώσεις 0,39-7,68 μg/g (Polymenakou *et al.*, 2005b). Όλοι οι παραπάνω ερευνητές συμφωνούν με την παρατηρούμενη και στην παρούσα εργασία μείωση των συγκεντρώσεων των

φυτοχρωστικών με το βάθος από την επιφάνεια του πυρήνα (βλέπε σχήμα 3.4, κεφάλαιο 3).

Στην παρούσα εργασία οι φαιοφυτίνες αποτελούν κατά μέσο όρο το 78% της συγκέντρωσης του ισοδύναμου των χλωροπλαστικών χρωστικών. Στο Κρητικό Πέλαγος οι Danovaro και συνεργάτες (1999b) βρήκαν το αντίστοιχο ποσοστό 60%, ενώ οι Tselepides και συνεργάτες (2000a) παρατήρησαν ότι το ποσοστό μεταβάλλεται ανάλογα με το βάθος του σταθμού και διαμορφώνεται στο 60% και 90% για τους σταθμούς της ηπειρωτικής κατωφέρειας και τους βαθύτερους αντίστοιχα, γεγονός που επιβεβαιώνει την αύξηση της αποδόμησης της οργανικής ύλης σε μεγαλύτερα βάθη.

Το μικρότερο ποσοστό φαιοφυτινών στην παρούσα εργασία παρατηρήθηκε στους δύο πιο ρηχούς σταθμούς σε συμφωνία με τα ευρήματα της παραπάνω έρευνας. Η εξήγηση για την μείωση των φυτοχρωστικών με το βάθος δίνεται από τους Danovaro και συνεργάτες (1999b) και αποδίδεται στον αυξημένο χρόνο παραμονής του οργανικού υλικού στη στήλη του νερού μέχρι την καθίζησή του στο βυθό και στη μείωση της πρωτογενούς παραγωγικότητας καθώς αυξάνεται η απόσταση από τη χέρσο.

Στην παρούσα εργασία, η υψηλότερη συγκέντρωση χλωροφύλλης-α παρατηρήθηκε στον σταθμό 8 ενώ η χαμηλότερη στον σταθμό 29A. Ο σταθμός 8 είναι παράκτιος, ρηχός σταθμός που δέχεται έντονα την επίδραση της εισροής των υδάτων του ποταμού Νέστου. Η ποσότητα της χλωροφύλλης-α υπόκεινται στην μικρότερη αποδόμηση κατά την πορεία της προς το βυθό ενώ οι ποτάμιες εισροές τροφοδοτούν την περιοχή με πλούσιο οργανικό φυτικής προέλευσης. Αντίθετα, ο σταθμός 29A είναι ο βαθύτερος σταθμός και βρίσκεται σε περιοχή μακριά από την επιρροή ποτάμιων εισροών. Εξάλλου είναι αρκετές οι έρευνες που συμφωνούν ότι οι συγκεντρώσεις των φαιοχρωστικών μειώνονται με το βάθος του σταθμού δειγματοληψίας (Boetius *et al.*, 1996; Danovaro *et al.*, 1998; 1999b; 2000a; Tselepides *et al.*, 2000a; Bianchi *et al.*, 2003; Luna *et al.*, 2004;).

Στη συγκεκριμένη έρευνα πάντως δεν μπορεί να ειπωθεί ότι οι συγκεντρώσεις των φυτοχρωστικών στους διάφορους σταθμούς ακολουθούν κάποιο πρότυπο, ούτε ότι οι σταθμοί μπορούν να χωριστούν με βάση τις συγκεντρώσεις τους σε σταθμούς ηπειρωτικής υφαλοκρηπίδας και ηπειρωτικής κατωφέρειας. Για παράδειγμα ο σταθμός 42A (βάθος 210m) παρουσιάζει υψηλότερες συγκεντρώσεις χλωροφύλλης-α ακόμα και από πιο ρηχούς σταθμούς. Όπως όμως προαναφέρθηκε, αυτό πιθανώς οφείλεται στην έντονη επίδραση που δέχεται από τα νερά της Μαύρης Θάλασσας.

Όσον αφορά στις φαιοχρωστικές, οι συγκεντρώσεις ανά σταθμό διαφοροποιούνται σε σχέση με τις συγκεντρώσεις της χλωροφύλλης-α. Την μεγαλύτερη συγκέντρωση παρουσιάζει ο σταθμός 22 και την μικρότερη ο σταθμός 29Α ενώ το ίδιο πρότυπο παρατηρείται και για το ισοδύναμο χλωροπλαστικών χρωστικών. Ο σταθμός 22 φαίνεται να έχει την μεγαλύτερη ποσότητα οργανικής ύλης φυτικής προέλευσης, γεγονός που φανερώνει η αυξημένη συγκέντρωση CPE και που σύμφωνα με τους Fabiano και Danovaro (1998), αποτελεί εκτίμηση της ποσότητας της οργανικής ύλης που καθιζάνει και προέρχεται από την πρωτογενή παραγωγή. Ο συγκεκριμένος σταθμός χαρακτηρίζεται από τη μεγαλύτερη ποσότητα φυτικής οργανικής ύλης λόγω της θέσης του, που δέχεται την επιρροή της χέρσου (σχετικά κοντά στις ακτές) και την επιρροή των ποτάμιων εκβολών (βρίσκεται αρκετά Βόρεια). Οι λόγοι που ο σταθμός 29Α είναι «φτωχός» σε φυτική οργανική ύλη αναλύθηκαν προηγουμένως. Και στην περίπτωση των φαιοφυτινών δεν παρατηρείται κάποιο πρότυπο κατανομής των συγκεντρώσεων μεταξύ των σταθμών.

Στο σύνολο των φυτοχρωστικών, διαφαίνεται μια τάση οι πιο ρηχοί σταθμοί να συγκεντρώνουν μεγαλύτερες ποσότητες φυτοχρωστικών ενώ οι βαθύτεροι μικρότερες, με εξαίρεση το σταθμό 33 ο οποίος παρουσιάζει χαμηλές συγκεντρώσεις φυτοχρωστικών παρά το γεγονός ότι είναι σχετικά ρηχός σταθμός και βρίσκεται κοντά στις ακτές της Λήμνου.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, θα αναμενόταν οι δύο πιο ρηχοί και παράκτιοι σταθμοί (8 και 14) να συγκεντρώνουν τις μεγαλύτερες ποσότητες φυτοχρωστικών, ιδιαίτερα μάλιστα λόγω της εγγύτητας τους στις εκβολές των ποταμών στην περιοχή. Στην πραγματικότητα όμως αυτό δεν συμβαίνει υποδηλώνοντας ότι υπάρχουν διάφοροι τρόποι μεταφοράς και συσσώρευσης του φυτικού οργανικού υλικού. Το γεγονός ότι έχουν τις υψηλότερες συγκεντρώσεις χλωροφύλλης-α φανερώνει ότι στους σταθμούς αυτούς αποτίθεται το πιο «φρέσκο» φυτικό υλικό

4.3 Συγκεντρώσεις οργανικού και στοιχειακού άνθρακα και βιοδιαθέσιμου οργανικού άνθρακα

Η μέσες τιμές των συγκεντρώσεων του οργανικού και στοιχειακού άνθρακα καθώς και του βιοδιαθέσιμου οργανικού άνθρακα που υπολογίστηκαν στην περιοχή του Θρακικού Πελάγους ήταν 0,69%, 0,24% και 0,45% αντίστοιχα και είναι σχετικά υψηλότερες από τις συγκεντρώσεις που καταγράφηκαν πρόσφατα στην ίδια περιοχή με

τις αντίστοιχες τιμές να κυμαίνονται από 0,25-0,55%, 0,01-0,22% και 0,11-0,43% (Πολυμενάκου, 2005). Συγκρίσιμα ήταν τα αποτελέσματα των συγκεντρώσεων του οργανικού άνθρακα με τα αντίστοιχα που υπολόγισαν οι Lykousis και συνεργάτες (2002), (0,71%) και οι Giresse και συνεργάτες (2003) επίσης στην περιοχή του Βορείου Αιγαίου (0,8-1,2%).

Σε γενικές γραμμές οι συγκεντρώσεις του οργανικού άνθρακα είναι μεγαλύτερες στο Βόρειο Αιγαίο σε σχέση με το Κρητικό πέλαγος (3-6,7 mg/g) (Danovaro *et al.*, 1999b), με περιοχές της Ανατολικής Μεσογείου (0,1-0,5%) (Boetius *et al.*, 1996), με θαλάσσιες περιοχές στην Κίνα όπου εκβάλλουν ποτάμια (0,11-0,65%) (Bouloubassi *et al.*, 2001) και με ιζήματα της Ανταρκτικής (0,02-0,3%) (Harada *et al.*, 1995). Αντίθετα, οι παρατηρούμενες συγκεντρώσεις είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες σε περιοχές ανάβλυσης στη Μάλαγα (0,7-1,4%) (Bianchi *et al.*, 2003a), σε διάφορες περιοχές της Ανατολικής Μεσογείου (0,38-1,47%) (Polymenakou *et al.*, 2005a) στην περιοχή του Θερμαϊκού Κόλπου (0,29-1,47%) (Polymenakou *et al.*, 2005b), καθώς και σε ιζήματα του Αρκτικού Ωκεανού (0,3-2,1%) (Schubert & Stein, 1996). Οι συγκεντρώσεις της παρούσας εργασίας εμφανίζουν μείωση με το βάθος από την επιφάνεια του πυρήνα αλλά όχι σε σχέση με το βάθος του σταθμού, παρατήρηση που έρχεται σε αντίθεση με τα αποτελέσματα άλλων ερευνητών (Danovaro *et al.*, 1999b; 1999c; Tselepides *et al.*, 2000a; Bianchi *et al.*, 2003).

Σε μελέτες βιολογικής ωκεανογραφίας δεν υπολογίζεται συνήθως η ποσότητα του στοιχειακού άνθρακα (μία μελέτη στην περιοχή του Β. Αιγαίου: Polymenakou *et al.*, in press) παρά το γεγονός ότι είναι πλέον γνωστό ότι δεν είναι όλη η ποσότητα του οργανικού άνθρακα διαθέσιμη στους οργανισμούς. Σύμφωνα με τους Middelburg και συνεργάτες (1999), το εύρος τιμών του στοιχειακού άνθρακα στα θαλάσσια ιζήματα είναι 0,03-0,9% και αποτελεί περίπου το 15-30 % του συνολικού οργανικού άνθρακα. Οι Cornelissen και συνεργάτες (2005), κατέληξαν μετά από εκτενή βιβλιογραφική έρευνα, ότι το ποσοστό του στοιχειακού άνθρακα (BC) σε σχέση με τον συνολικό οργανικό άνθρακα (OC) είναι 9%. Στην παρούσα εργασία ο λόγος BC/OC είναι κατά μέσο όρο 0,3 και παραμένει σταθερός σε όλο το βάθος του πυρήνα. Με βάση τις τιμές των συγκεντρώσεων που υπάρχουν στη βιβλιογραφία από τους παραπάνω ερευνητές, το ποσοστό του στοιχειακού άνθρακα (30% του συνολικού άνθρακα) που υπολογίστηκε είναι αρκετά μεγάλο. Η μεταβολή της συγκέντρωσης του στοιχειακού άνθρακα μεταξύ των σταθμών δεν φαίνεται να επηρεάζεται ούτε από το βάθος ούτε από τη θέση των σταθμών.

Ομοίως, για το βιοδιαθέσιμο οργανικό άνθρακα, δεν παρατηρείται κάποιο συγκεκριμένο πρότυπο στην κατανομή των συγκεντρώσεων μεταξύ των σταθμών. Όπως φαίνεται οι συγκεντρώσεις του BOC είναι ανεξάρτητες από το βάθος των σταθμών και τη θέση τους στην περιοχή δειγματοληψίας. Η μόνη σταθερή παρατήρηση όσον αφορά στον βιοδιαθέσιμο οργανικό άνθρακα είναι η μείωση της συγκέντρωσης του με το βάθος από την επιφάνεια του πυρήνα (βλέπε σχήμα 3.5, Κεφάλαιο 3).

4.4 Συγκεντρώσεις κ-αλκανίων και προέλευση της προσδιορισμένης οργανικής ύλης

Στην παρούσα εργασία το εύρος των συγκεντρώσεων των κ-αλκανίων που ανιχνεύτηκαν είναι 1482-9211 ng/g dw ιζήματος ενώ οι κανονικοποιημένες ως προς τον οργανικό άνθρακα τιμές είναι 0,18-1,11 μg/g dw ιζήματος τιμές υψηλότερες από τις αντίστοιχες που είχαν υπολογιστεί σε έρευνα στην ίδια περιοχή (812,5-2444,7 ng/g) (Πολυμενάκου, 2005) αλλά και σε ιζήματα από περιοχές της ανατολικής Μεσογείου (105-3313 ng/g) (Polymenakou *et al.*, 2005a). Οι παρατηρούμενες συγκεντρώσεις είναι αρκετά μεγαλύτερες και από τις συγκεντρώσεις που υπολόγισαν οι Gogou και συνεργάτες (2000) στην περιοχή του Κρητικού Πελάγους (80-896 ng/g), αλλά και από ιζήματα της Δυτικής Μεσογείου, με συγκεντρώσεις που κυμαίνονται στο διάστημα 2-27,1 pg/g που υπολόγισαν οι Bouloubassi και συνεργάτες, (1997). Μικρότερες συγκεντρώσεις υπολόγισαν και οι Tolosa και συνεργάτες (1996), επίσης σε περιοχές της δυτικής Μεσογείου (κατά μέσο όρο 1100 ng/g). Αντίθετα, οι συγκεντρώσεις του Θρακικού Πελάγους είναι μικρότερες από τις συγκεντρώσεις που υπολογίστηκαν στη Νότια Κασπία Θάλασσα (500-17000 ng/g) (Tolosa *et al.*, 2004) και σε ιζήματα της Ανταρκτικής (160-12200 ng/g) (Harada *et al.*, 1995).

Η υψηλότερη συγκέντρωση ολικών κ-αλκανίων καταγράφηκε στο σταθμό 26 ενώ η χαμηλότερη στον παράκτιο σταθμό 8. Στην συγκεκριμένη περίπτωση δεν φαίνεται η συγκέντρωση των κ-αλκανίων να επηρεάζεται από το βάθος του σταθμού. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η χαμηλή περιεκτικότητα του πιο ρηχού και παράκτιου σταθμού σε κ-αλκάνια (σταθμός 8), δεδομένου ότι θα αναμενόταν να έχει την μεγαλύτερη χερσαία επιρροή. Η μικρή επιρροή που δέχεται από τη χέρσο αντανακλάται και στη συγκέντρωση των χερσαίων κ-αλκανίων (που είναι το άθροισμα των βασικών κ-αλκανίων χερσαίας προέλευσης: C₂₇ C₂₉ και C₃₁) που είναι χαμηλότερη από όλους τους σταθμούς. Αντίθετα ο σταθμός 26 διατηρεί τη μεγαλύτερη συγκέντρωση χερσαίων

κ-αλκανίων γεγονός που δείχνει ότι δέχεται έντονη χερσαία επιρροή. Στη χερσαία επιρροή που δέχεται ο σταθμός μπορεί ίσως να αποδοθεί το αρκετά υψηλό ποσοστό οργανικού άνθρακα που διατηρεί. Οι τιμές των συγκεντρώσεων των υπόλοιπων σταθμών κυμαίνονται σε ενδιάμεσα επίπεδα. Αξίζει να σημειωθεί η αρκετά υψηλή συγκέντρωση του σταθμού 29Α σε χερσαία κ-αλκάνια σε αντίθεση με τις πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις φυτοχρωστικών. Μια πιθανή εξήγηση είναι ο δύσκολα αποδομήσιμος χαρακτήρας των χερσαίων κ-αλκανίων (Bouloubassi *et al.*, 1997) που τα καθιστά ανθεκτικά ακόμα και σε μεγάλα βάθη περισσότερο από άλλες πιο ευαίσθητες ουσίες όπως τις φυτοχρωστικές με αποτέλεσμα να συσσωρεύονται στα ιζήματα. Σε όλους τους σταθμούς πάντως τα χερσαία κ-αλκάνια αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό των ολικών κ-αλκανίων που κατά μέσο όρο φτάνει το 34% ποσοστό συγκρίσιμο με αντίστοιχες τιμές για το Κρητικό Πέλαγος (35-47%) (Gogou *et al.*, 2000) αλλά μικρότερο από το αντίστοιχο για τη Δυτική Μεσόγειο (25-72%) (Bouloubassi *et al.*, 1997).

Αντίθετα, οι συγκεντρώσεις των πιο χαρακτηριστικών κ-αλκανίων θαλάσσιας προέλευσης (C₁₅, C₁₇, C₁₉) είναι χαμηλές σε όλους τους σταθμούς ενώ κατά μέσο όρο αποτελούν το 8% των ολικών κ-αλκανίων. Η χαμηλή συγκέντρωση των κ-αλκανίων θαλάσσιας προέλευσης μπορεί να οφείλεται στις έντονες βιογενείς διεργασίες στο ίζημα από ετερότροφους οργανισμούς, ή μπορεί ακόμα να είναι και αποτέλεσμα της γρήγορης πρόσληψης των συγκεκριμένων κ-αλκανίων από τους οργανισμούς (Gogou *et al.*, 2000; 2004).

Ο δείκτης προτίμησης αριθμού ατόμων άνθρακα (CPI), που κυμαίνεται μεταξύ 1,4-2, είναι παρόμοιος με αντίστοιχες τιμές της ίδιας περιοχής (1,5-1,8) (Πολυμενάκου, 2005) και μικρότερος από τις τιμές που έχουν καταγραφεί για το Κρητικό Πέλαγος (2,1-4,4) (Gogou *et al.*, 2000) τη Δυτική Μεσόγειο (2,3-4,3) (Bouloubassi *et al.*, 1997) ακόμα και από απομακρυσμένες περιοχές όπως στην Κίνα (1,13-4,75) (Bouloubassi *et al.*, 2001).

Οι τιμές CPI της παρούσας εργασίας παρουσιάζουν μικρή επικράτηση των μονών ανθρακικών αλυσίδων, επομένως σύμφωνα με τον Simoneit (1999), μπορούν να δοθούν διάφορες ερμηνείες για την προέλευση των κ-αλκανίων και κατά συνέπεια της οργανικής ύλης. Τιμές CPI μικρότερες της μονάδας αποτελούν ένδειξη πετρελαϊκής ρύπανσης μιας περιοχής, ενώ τιμές μεγαλύτερες από δύο (>2) δηλώνουν την ύπαρξη κ-αλκανίων χερσαίας προέλευσης στα ιζήματα (Gogou *et al.*, 1998; Rullkötter *et al.*, 1998 Simoneit, 1999), κύριος τρόπος μεταφοράς των οποίων είναι μέσω της ατμόσφαιρας (Gogou *et al.*, 1998). Η παρατήρηση αυτή στηρίζεται στα αποτελέσματα έρευνας κατά την οποία μελετήθηκε η σύσταση των αερολυμάτων πάνω από την ανατολική

Μεσόγειο και εξακριβώθηκε ότι αποτελούν μεταφορείς διαφόρων ουσιών όπως και των κ-αλκανίων (Gogou *et al.*, 1996).

Σύμφωνα με τους Brodskii και συνεργάτες (2002), η ύπαρξη του κ-αλκανίου με 16 άτομα άνθρακα στην αλυσίδα είναι χαρακτηριστική σε περιοχές με πετρελαϊκή ρύπανση. Παρά το γεγονός ότι το συγκεκριμένο αλκάνιο υπάρχει στα ιζήματα του Θρακικού Πελάγους, η μικρή του συγκέντρωση δεν επιτρέπει την εξαγωγή του συμπεράσματος ότι πρόκειται για περιοχή που χαρακτηρίζεται από πετρελαϊκή ρύπανση. Εξάλλου οι Mazeas και Budzinski (2002) υποστηρίζουν ότι εφόσον οι υψηλότερες συγκεντρώσεις κ-αλκανίων βρίσκονται μεταξύ των ενώσεων με 21-33 άτομα άνθρακα, πρόκειται για τυπικό πρότυπο ιζήματος με κ-αλκάνια χερσαίας προέλευσης.

Σύμφωνα με τις παρατηρήσεις των Tolosa και συνεργατών (2004), τιμές του CPI κοντά στη μονάδα αποτελούν ένδειξη ρύπανσης ενώ όσο αυξάνει η τιμή του δείκτη συνεπάγεται αύξηση των συγκεντρώσεων των βιογενών υδρογονανθράκων. Στο Θρακικό Πέλαγος παρατηρήθηκε χερσαία επιρροή στα ιζήματα, χωρίς όμως να αποτελεί μοναδική πηγή υδρογονανθράκων. Είναι αρκετά ριψοκίνδυνο να αποδοθεί η χαμηλή τιμή του σε πετρελαϊκή ρύπανση καθώς η ποσότητα του UCM (Unresolved Complex Mixture) που εντοπίστηκε στα χρωματογραφήματα των κ-αλκανίων (αποτελέσματα που δεν παρουσιάζονται) και αποτελεί καθαρό δείκτη ρύπανσης ήταν ιδιαίτερα χαμηλή και σε μερικές περιπτώσεις μη ανιχνεύσιμη (Bourbonniere & Meyers, 1996). Ενδεικτικό της χερσαίας επίδρασης είναι και το υψηλό ποσοστό των χερσαίων κ-αλκανίων σε σχέση με την ολική τους συγκέντρωση.

Ένας επιπλέον δείκτης προέλευσης της προσδιορισμένης οργανικής ουσίας στα ιζήματα είναι ο λόγος των ενώσεων Πριστάνιο/Φυτάνιο. Η παρουσία μεγαλύτερης συγκέντρωσης πριστανίου (Pr) έναντι του φυτανίου (Ph) αποτελεί ένδειξη συνεισφοράς της χερσαίας βλάστησης στην οργανική ύλη των ιζημάτων (Brodskii *et al.*, 2002) και μάλιστα υψηλά επίπεδα συγκεντρώσεων πριστανίου συνδέονται με αυξημένα επίπεδα μικροβιακής αποδόμησης (Tran *et al.*, 1997). Αντίθετα με τη βιογενούς προέλευσης οργανική ύλη, σε δείγματα με πετρελαϊκή ρύπανση ο λόγος των δύο ενώσεων ισούται με τη μονάδα αφού οι συγκεντρώσεις τους τείνουν να εξισωθούν (Tran *et al.*, 1997). Στην παρούσα εργασία ο λόγος των παραπάνω ενώσεων κυμαίνεται μεταξύ 0,27 και 0,72 ενώ στον σταθμό 29Α δεν υπάρχει τιμή λόγω απουσίας φυτανίου. Ο λόγος των συγκεντρώσεων Pr/Ph αυξάνει στους σταθμούς με κατεύθυνση προς το Νότο και αποκτά την μέγιστη τιμή του στο σταθμό 42Α τον κοντινότερο σταθμό στα στενά των

Δαρδανελίων. Οι συγκεκριμένες τιμές είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες των Louati και συνεργατών (2001) που μελέτησαν ιζήματα από την περιοχή της Τυνησίας (0,22-0,65). Οι ίδιοι ερευνητές θεώρησαν σημαντική την συνεισφορά των πετρελαϊκών υδρογονανθράκων στα δείγματά τους.

Συνοψίζοντας, θεωρείται ότι η χερσαία συνεισφορά στην οργανική ύλη των ιζημάτων του Θρακικού Πελάγους είναι ιδιαίτερα σημαντική και πιθανότατα οφείλεται σε αιολική μεταφορά, γεγονός που εξηγεί τις χαμηλές συγκεντρώσεις χερσαίων αλκανίων των παράκτιων σταθμών κοντά στις εκβολές των ποταμών. Οι σχετικά χαμηλές τιμές του δείκτη CPI, αντανακλούν μεν την χερσαία προέλευση των αλκανίων, αλλά και την ύπαρξη χαμηλών συγκεντρώσεων πετρελαϊκών υδρογονανθράκων, η αύξηση της συγκέντρωσης των οποίων συμβαίνει προς τα Νότια. Όσον αφορά στο βαθμό επίδρασης της χέρσου στους διάφορους σταθμούς, φαίνεται να είναι υψηλότερος στους σταθμούς που βρίσκονται στο κέντρο της περιοχής δειγματοληψίας (26,29Α, 18 και 22) λόγω αιολικής μεταφοράς της οργανικής ύλης, ενώ οι πιο παράκτιοι σταθμοί δέχονται μικρότερη επίδραση, η οποία είναι αποτέλεσμα των ποτάμιων εκροών.

4.5 Συσχετίσεις μεταξύ των μεταβλητών

Κατά τους υπολογισμούς για τη διερεύνηση συσχετίσεων μεταξύ των μεταβλητών στο σύνολο των δειγμάτων, προέκυψε η σημαντική συσχέτιση των ολικών και ενεργών βακτηρίων με τις συγκεντρώσεις των φυτοχρωστικών, αποτέλεσμα στο οποίο καταλήγουν αρκετές μελέτες (Boetius *et al.*, 1996; Danovaro *et al.*, 1999b; 1999c; 2000a; Lykousis *et al.*, 2002; Turley *et al.*, 2002; Πολυμενάκου, 2005) και σύμφωνα με τις οποίες υποδεικνύεται η στενή σχέση των βακτηριακών κοινωνιών με το οργανικό υλικό πλαγκτονικής προέλευσης. Η μεταξύ τους σχέση δείχνει ότι το οργανικό υλικό του βυθού αποτελείται από υλικό πλαγκτονικής προέλευσης (Bianchi *et al.*, 2003b). Στο σύνολο των δειγμάτων δεν παρατηρήθηκαν συσχετίσεις των μεταβλητών, βιοτικών και μη, με το βάθος των σταθμών, συμπέρασμα στο οποίο καταλήγουν αρκετοί ερευνητές (Boetius *et al.*, 1996; Danovaro *et al.*, 1999c; Bianchi *et al.*, 2003a; 2003b) και πιθανότατα οφείλεται στο γεγονός ότι οι βαθυμετρικές διαφορές μεταξύ των σταθμών δεν είναι τόσο μεγάλες ώστε να προκαλέσουν σημαντικές διαφορές στις κατανομές των μεταβλητών.

Τα αποτελέσματα των συσχετίσεων διαφοροποιούνται από τα παραπάνω αν εξεταστεί κάθε στρώμα του πυρήνα ξεχωριστά. Στο επιφανειακό ίζημα παρατηρείται

αρνητική συσχέτιση μεταξύ των ολικών και ενεργών βακτηρίων με τις συγκεντρώσεις των ολικών και των χερσαίας προέλευσης κ-αλκανίων. Σε παρόμοια μελέτη, η Πολυμενάκου (2005) παρατήρησε ταυτόχρονη αύξηση των φωσφολιπιδίων που προέρχονται από βακτηριακές κοινωνίες και των συγκεντρώσεων των υδρογονανθράκων. Ερμηνεύοντας το αποτέλεσμα πρότεινε την ύπαρξη βακτηρίων που έχουν την ικανότητα αποδόμησης των συγκεκριμένων ουσιών, ενώ σε παρόμοιο συμπέρασμα κατέληξαν οι Braddock και συνεργάτες (2004) και οι Massias και συνεργάτες (2003). Θα μπορούσε συνεπώς να υποτεθεί, ότι στην παρούσα έρευνα, η αρνητική συσχέτιση βακτηρίων-αλκανίων μπορεί να οφείλεται στην αδυναμία των βακτηρίων να αποδομούν τις ενώσεις αυτές με αποτέλεσμα να αποτελούν ανασταλτικό παράγοντα για την ανάπτυξή τους.

Θετική συσχέτιση παρατηρείται μεταξύ των βακτηριακών κοινωνιών με το δυναμικό οξειδοαναγωγής, αποτέλεσμα που έρχεται σε αντίθεση με την έρευνα των Danovaro και συνεργατών (2002), οι οποίοι βρήκαν ότι οι αλλαγές του δυναμικού οξειδοαναγωγής δεν επηρεάζουν την παρουσία των βακτηρίων στα ιζήματα. Αντίθετα είναι και τα αποτελέσματα των Tselepidis και Lampadariou (2004), σύμφωνα με τους οποίους υπάρχει αρνητική συσχέτιση μεταξύ του δυναμικού οξειδοαναγωγής και των πληθυσμών της μειοπανίδας.

Αρκετό ενδιαφέρον παρουσιάζει η ύπαρξη θετικής συσχέτισης μεταξύ του στοιχειακού άνθρακα και των κ-αλκανίων θαλάσσιας προέλευσης. Οι ενώσεις αυτές διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό μεταξύ τους, καθώς ο στοιχειακός άνθρακας αποτελεί ένωση ιδιαίτερα σταθερή, σχεδόν μη προσλήψιμη από τους οργανισμούς, ενώ αντίθετα τα θαλάσσια κ-αλκάνια είναι ενώσεις που προσλαμβάνονται εύκολα από τους οργανισμούς και δεν έχουν μεγάλο χρόνο ζωής στα ιζήματα. Ο πιθανότερος λόγος της συσχέτισης μεταξύ τους είναι η ικανότητα του στοιχειακού άνθρακα να προσροφά οργανικές ουσίες στην ενεργή επιφάνεια των σωματιδίων του. Λόγω της μεγάλης αντίστασης του στοιχειακού άνθρακα στην αποδόμηση οι προσροφημένες στα σωματίδια του ενώσεις, όπως τα θαλάσσιας προέλευσης κ-αλκάνια, προστατεύονται από την αποδόμηση (Lee *et al.*, 2004).

Στα βαθύτερα στρώματα του πυρήνα, εξακολουθούν να υπάρχουν συσχετίσεις των μικροβιακών κοινωνιών με τη χλωροφύλλη-α, υποδεικνύοντας τη στενή σχέση των βακτηρίων με την οργανική ύλη πλαγκτονικής προέλευσης, στα βαθύτερα στρώματα. Η παραπάνω «εξάρτηση» των βενθικών μικροβίων από την πρωτογενή παραγωγικότητα φαίνεται να σταματάει στο στρώμα του πυρήνα που αντιστοιχεί στα 4-6 cm. Τα

βακτήρια από αυτό το βάθος δεν παρουσιάζουν συσχέτιση με καμία μεταβλητή, με εξαίρεση την αρνητική συσχέτιση τους με το στοιχειακό άνθρακα στο επίπεδο 4-6 cm, που οφείλεται πιθανότατα στη μη διαθεσιμότητα της ουσίας στους οργανισμούς σε ένα βάθος στο οποίο η ποσότητα των τροφικών αποθεμάτων έχει μειωθεί αισθητά. Από τον ορίζοντα των 4-6 cm και βαθύτερα, παρατηρείται θετική συσχέτιση του οργανικού και του στοιχειακού άνθρακα, που σύμφωνα με τους Middelburg και συνεργάτες (1999), οφείλεται στο γεγονός ότι και οι δύο μορφές άνθρακα εξαρτώνται κατά την απόθεση τους από το μέγεθος των κόκκων του ιζήματος και την υδροδυναμική του συστήματος.

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα στατιστικά αποτελέσματα των συσχέτισεων μεταξύ των μεταβλητών θα πρέπει να αντιμετωπίζονται με επιφύλαξη καθώς λόγω της μεθόδου διερεύνησης τους, υπάρχει πιθανότητα κάποιες στατιστικά σημαντικές συσχέτισεις να προκύπτουν τυχαία χωρίς να έχουν κάποια φυσική σημασία. Βεβαιότητα για τα αποτελέσματα των αναλύσεων μπορεί να προκύψει από την υποστήριξη της υπάρχουσας βιβλιογραφίας και από τη διερεύνηση πολλών δειγμάτων.

4.6 Ανίχνευση ομαδοποιήσεων μεταξύ των σταθμών

Κατά την στατιστική ανάλυση πρωταρχικών συνιστωσών (PCA) επιχειρήθηκε η διερεύνηση πιθανών σχέσεων μεταξύ των σταθμών, βάση κάποιων μεταβλητών που μπορεί να είναι υπεύθυνες για την ομαδοποίηση τους. Εξετάζοντας το σύνολο των δειγμάτων, δεν προέκυψε κάποια ομαδοποίηση μεταξύ των σταθμών και κατά συνέπεια δε βρέθηκε καμία μεταβλητή που να μπορεί να ερμηνεύσει σε μεγάλο ποσοστό την μεταβλητότητα μεταξύ των σταθμών. Η παρατηρούμενη ανομοιογένεια στο Θρακικό Πέλαγος μπορεί να αποδοθεί σύμφωνα με τον Τσελεπίδη (1992), στο γεγονός ότι είναι περιοχή έντονων φυσικών διαταράξεων που οφείλονται στην τεκτονική αστάθεια της περιοχής. Οι Stavrakakis και συνεργάτες (2000), παρατήρησαν ότι στις περιοχές με έντονη σεισμική δραστηριότητα επικρατεί ανισορροπία στα επιφανειακά ιζήματα με αποτέλεσμα να προκαλείται επαναιώρηση του επιφανειακού υλικού. Η προκαλούμενη αναταραχή είναι ικανή να προκαλέσει σημαντικές αλλαγές στις μικροβιακές κοινωνίες αλλά και στη βιογεωχημεία των ιζημάτων (Fiordelmondo *et al.*, 2003; Fiordelmondo & Puscaddu, 2004). Στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξε έρευνα που πραγματοποιήθηκε στον Θερμαϊκό Κόλπο, στον οποίο η ανατάραξη των ιζημάτων ήταν αποτέλεσμα έντονης δραστηριότητας από τράτες βυθού (Polymenakou *et al.*, 2005b). Στα αποτελέσματα της τεκτονικής δραστηριότητας προστίθεται η επίδραση των ρευμάτων του βυθού που επίσης προκαλούν επαναιώρηση και μεταφορά υλικού (Chronis *et al.*, 2000).

4.7 Παράγοντες που επηρεάζουν την κατανομή των βακτηρίων

Κατά την στατιστική ανάλυση BIOENV, πραγματοποιήθηκε διερεύνηση της σχέσης των αβιοτικών και βιοτικών παραμέτρων που μελετήθηκαν. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα στο σύνολο των δειγμάτων, δεν φαίνεται να υπάρχει κάποια παράμετρος η οποία να εξηγεί ικανοποιητικά την κατανομή των βακτηρίων στα ιζήματα συμπεράσμα στο οποίο καταλήγουν αρκετοί μελετητές (Danovaro *et al.*, 1993; Boetius *et al.*, 1996; Tholosan & Bianchi 1998; Soltwedel & Vopel, 2001; Bianchi *et al.*, 2003). Η παρατηρούμενη σχέση μεταξύ μικροβιακών κοινωνιών και φυτοχρωστικών δεν μπορεί να υποστηριχθεί στατιστικά. Αντίθετα, αντίστοιχη διερεύνηση στο επιφανειακό ιζήμα, αποκαλύπτει την ισχυρή επίδραση των κ-αλκανίων στις μικροβιακές κοινωνίες των ιζημάτων. Για διάφορες περιοχές της ανατολικής Μεσογείου οι Polymenakou και συνεργάτες (2005a) τόνισαν ότι πρωταρχικό ρόλο στην κατανομή των βακτηριακών κοινωνιών στα ιζήματα παίζουν οι συγκεντρώσεις του οργανικού άνθρακα και της χλωροφύλλης-α.

Σε διάφορες έρευνες εκτός από τη σημασία της ποσότητας της τροφής που χρησιμοποιούν τα βακτήρια (π.χ. οργανικός άνθρακας, φυτοχρωστικές), σημαντικό ρόλο αποδεικνύεται ότι παίζει η ποιότητα της διαθέσιμης τροφής (Danovaro *et al.*, 1999b; 1999c; 2000a; Lykousis *et al.*, 2002; Tselepidis & Lampadariou, 2004) υποστηρίζοντας ότι η περιεκτικότητα της οργανικής ύλης σε πρωτεΐνες καθορίζει ουσιαστικά τις κατανομές των μικροοργανισμών. Εκτός βέβαια από την ποσότητα και την ποιότητα της τροφής, η διαθεσιμότητα του οργανικού υλικού αποτελεί σημαντικό παράγοντα ανάπτυξης των κοινωνιών (Danovaro *et al.*, 1999b; 2000a; Tselepidis *et al.*, 2000a).

Για την απόκτηση ολοκληρωμένης εικόνας των παραμέτρων που επηρεάζουν τις βακτηριακές κοινωνίες, απαιτείται η εξέταση πολλών περισσότερων παραγόντων από αυτούς που έχουν ήδη αναφερθεί. Παράμετροι όπως: η θήρευση των βακτηρίων από δινομαστιγωτά και πρωτόζωα (Epstein 1997; Danovaro *et al.*, 1998), μεταβολές της πρωτογενούς παραγωγής που συνεπάγονται μεταβολές στη ροή του οργανικού υλικού προς το βένθος (Tselepidis *et al.*, 2000a), η κοκκομετρία των ιζημάτων (Llobet-Brossa *et al.*, 1998; Bühring *et al.*, 2005) αλλά και πληθώρα άλλων παραγόντων που μπορεί να παραμένουν ακόμα άγνωστοι είναι υπεύθυνοι για τη δημιουργία και την εξάπλωση των τόσο πολύπλοκων και ευαίσθητων σε αλλαγές μικροβιακών κοινοτήτων. Πολύ

σημαντικά στοιχεία για την ερμηνεία της κατανομής των βακτηριακών κοινωνιών θα ήταν ο προσδιορισμός των επί μέρους συστατικών της οργανικής ύλης (πρωτεΐνες υδρογονάνθρακες, λιπίδια), αλλά και η ανάλυση της σύστασης των βακτηριακών κοινωνιών με ανάλυση του γονιδίου 16S rRNA, στοιχεία που μπορούν να οδηγήσουν σε συμπεράσματα.

Η πραγματοποίηση της συγκεκριμένης μελέτης στο χώρο του Θρακικού Πελάγους, είχε ως γενικότερο στόχο τη διερεύνηση των συνθηκών που επικρατούν στα ιζήματα της περιοχής, δεδομένου του μικρού όγκου πληροφορίας που είναι διαθέσιμος για το Βόρειο Αιγαίο. Επιχειρήθηκε η συσχέτιση βιοτικών και αβιοτικών παραμέτρων και διερευνήθηκε ο τρόπος αλληλεπίδρασής τους. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της έρευνας, εξάχθηκαν τα ακόλουθα συμπεράσματα.

5.1 Βακτηριακή κατανομή:

- Όσον αφορά στους βακτηριακούς πληθυσμούς, παρατηρήθηκε μείωση των ενεργών και ολικών βακτηρίων με την αύξηση του βάθους από την επιφάνεια του πυρήνα, γεγονός που συνδέθηκε με την ταυτόχρονη μείωση του οργανικού υλικού και κατά συνέπεια των τροφικών αποθεμάτων τους προς τα βαθύτερα στρώματα των πυρήνων. Η συσχέτιση των βακτηρίων με τις συγκεντρώσεις των φυτοχρωστικών σε ορισμένα βάθη του πυρήνα, αντικατοπτρίζει την άμεση τροφική σχέση που έχουν με ύλη φυτοπλαγκτονικής προέλευσης, ακόμα και σε βαθύτερα στρώματα πέραν του επιφανειακού.
- Η κατανομή των πληθυσμών των βακτηρίων στο χώρο, δεν φαίνεται να μεταβάλλεται βάση κάποιου συγκεκριμένου προτύπου ή να εξαρτάται από κάποια συγκεκριμένη μεταβλητή όταν εξετάζεται το σύνολο των δειγμάτων. Οι βακτηριακοί πληθυσμοί φαίνεται να μένουν ανεπηρέαστοι από το βάθος των σταθμών, από την περιεκτικότητά τους σε οργανικό υλικό ή από το βαθμό των χερσαίων επιρροών που δέχονται. Αντίθετα, οι πληθυσμοί τους φαίνεται να επηρεάζονται αρνητικά από τις συγκεντρώσεις των κ-αλκανίων.

5.2 Κατανομή οργανικού υλικού:

- Παρατηρήθηκε μείωση όλων των παραμέτρων του οργανικού υλικού (chl_a, CPE, φαιοφυτινών, οργανικού άνθρακα, στοιχειακού άνθρακα, BOC) με το βάθος. Στους παράκτιους σταθμούς υπήρχε πιο «φρέσκο» οργανικό υλικό, γεγονός που καταγράφεται από την παρουσία αυξημένων ποσοτήτων χλωροφύλλης-α, ενώ στους βαθύτερους βρέθηκαν μεγαλύτερες ποσότητες

αποδομημένης φυτικής ύλης και μη διαθέσιμου οργανικού υλικού με τη μορφή του στοιχειακού άνθρακα.

- Η κατανομή του οργανικού υλικού δεν μπορεί να ερμηνευθεί πλήρως, αλλά μπορεί να υποτεθεί ότι η πολύπλοκη υδρογραφία της περιοχής και οι ποτάμιες εισροές αποτελούν πηγή χερσαίου οργανικού υλικού που φτάνει στα ιζήματα.
- Στο επιφανειακό ίζημα φαίνεται ότι οι σταθμοί με πλουσιότερο οργανικό υλικό είναι αυτοί που δέχονται τις περισσότερες χερσαίες εισροές, όπως αυτό αντικατοπτρίζεται από την ανάλυση των κ-αλκανίων.

5.3 Προέλευση οργανικού υλικού και κατανομή κ-αλκανίων:

- Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων των κ-αλκανίων φαίνεται καθαρά η χερσαία επιρροή στα ιζήματα, με την κυριαρχία των κ-αλκανίων χερσαίας προέλευσης. Οι υψηλές συγκεντρώσεις όμως των παραπάνω κ-αλκανίων βρίσκονται στους σταθμούς που βρίσκονται στο κεντρικό τμήμα του Θρακικού Πελάγους και όχι σε σταθμούς που θα αναμενόταν έντονη χερσαία επίδραση λόγω π.χ. της εγγύτητας τους στις εκβολές ποταμών. Το γεγονός αυτό πιθανότατα οφείλεται στο ότι τα κ-αλκάνια μεταφέρονται κυρίως μέσω της ατμόσφαιρας σε αντίθεση με το υπόλοιπο οργανικό υλικό που μεταφέρεται μέσω των θαλάσσιων ρευμάτων.
- Οι χαμηλές ποσότητες κ-αλκανίων θαλάσσιας προέλευσης, αντικατοπτρίζουν τις έντονες βιογενείς διεργασίες που επικρατούν στα ιζήματα.
- Συνολικά οι δείκτες των κ-αλκανίων δεν υποστηρίζουν την ύπαρξη ρύπανσης από πετρελαϊκούς υδρογονάνθρακες στην περιοχή.

5.4 Ομαδοποιήσεις μεταξύ των σταθμών:

- Από τη μελέτη των κατανομών όλων των μεταβλητών που μελετήθηκαν, προκύπτει ότι στο Θρακικό Πέλαγος δεν παρατηρούνται ομαδοποιήσεις μεταξύ των σταθμών, ούτε φαίνεται οι μεταβλητές να ακολουθούν κάποιο πρότυπο στην κατανομή τους. Η έλλειψη σχηματισμού ομοιογενών περιβαλλόντων και η γενικότερη ανομοιομορφία της περιοχής, πιθανότατα

είναι αποτέλεσμα της έντονης τεκτονικής δραστηριότητας που επικρατεί και των συνεχώς μεταβαλλόμενων συνθηκών στον πυθμένα.

Από όλα τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι απαιτείται περαιτέρω έρευνα και περισσότερα στοιχεία για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων σε θέματα που αφορούν την βενθική μικροβιακή οικολογία, ιδιαίτερα στη συγκεκριμένη περιοχή η οποία έχει ερευνηθεί σε πολύ μικρό βαθμό παρά το γεγονός ότι αποτελεί ένα πολύ δυναμικό οικοσύστημα.

Βιβλιογραφία:

- Amann R., Ludwig W., and Schleifer K. (1995) Phylogenetic Identification and In Situ Detection of Individual Microbial Cells without Cultivation. *Microbiological reviews* **59**(1), 143-169.
- Barnes R.S.K., Hughes R.N. (1982) *An Introduction to Marine Ecology*. Blackwell Science Publications, Oxford.
- Barnett P.R.P., Watson J. and Connelly D. (1984) A multiple corer for taking virtually undisturbed sediment samples from shelf bathyal and abyssal sediments. *Oceanologica Acta* **7**, 399–408.
- Bianchi A., Calafat A., De Wit R., Garcin J., Tholosan O., Cacho I., Canals M., Fabrès J., Grout G., Masqué P., Sanchez-Cabeza J.-A., and Sempéré R. (2003a) Microbial activity at the deep water sediment boundary layer in two highly productive systems in the Western Mediterranean: the Almeria-Oran front and the Malaga upwelling. *Oceanologica acta* **25**, 315-324.
- Bianchi A., Tholosan O., Garcin J., Polychronaki T., Tselepides A., Buscail R., and Duineveld G. (2003b) Microbial activities at the benthic boundary layer in the Aegean sea. *Progress in oceanography* **57**, 219-236.
- Boenigk. (2004) A disintegration method for direct counting of bacteria in clay-dominated sediments: dissolving silicates and subsequent fluorescent staining of bacteria. *Journal of microbiological methods* **56**, 151-159.
- Boetius A., Scheibe S., Tselepides A., and Thiel H. (1996) Microbial biomass and activities in deep-sea sediments of the Eastern Mediterranean: trenches are benthic hotspots. *Deep sea research I* **43**(9), 1439-1460.
- Bouloubassi I., Fillaux J., and Saliot A. (2001) Hydrocarbons in surface sediments from the Changjiang estuary East China sea. *Marine Pollution Bulletin* **42**(12), 1335-1346.
- Bouloubassi I., Lipiatou E., Saliot A., Tolosa I., Bayona J., and Albaiges J. (1997) Carbon sources and cycle in the western Mediterranean-the use of molecular markers to determine the origin of organic matter. *Deep sea research I* **44**(3-4), 781-799.
- Bourbonniere R. and Meyers P. (1996) Anthropogenic influences on hydrocarbon contents of sediments deposited in eastern Lake Ontario since 1800. *Environmental Geology* **28**(1), 22-28.
- Braddock J., Gannon K., and Rasley B. (2004) Petroleum Hydrocarbon-degradind microbial communities in Beaufort- Chukchi sea sediments, pp. 1-37, Institute of Arctic Biology, University of Alaska.

- Brodskii E., Lukashenko I., Kalinkevich G., and Savchuk S. (2002) Identification of Petroleum Products in Environmental Samples Using Gas Chromatography and Gas Chromatography–Mass Spectrometry. *Journal of Analytical Chemistry*, **57**(6), 486-490.
- Buhring S., Elvert M., and Witte U. (2005) The microbial community structure of different permeable sandy sediments characterized by the investigation of bacterial fatty acids and fluorescence in situ hybridization. *Environmental Microbiology* **7**(2), 281-293.
- Chronis G., Lykousis V., Georgopoulos D., Zervakis V., Stavrakis S. and Poulos S. (2000). Suspended particulate matter and nepheloid layers over the southern margin of the Cretan Sea (NE Mediterranean): seasonal distribution and dynamics. *Progress in Oceanography* **46** (2–4), 163–185.
- Cole J. (1999) Aquatic Microbiology for Ecosystem Scientists: New and Recycled Paradigms in Ecological Microbiology. *Ecosystems* **2**, 215-225.
- Commendatore M. and Esteves J. (2004) Natural and anthropogenic hydrocarbons in sediments from the Chubut River (Patagonia, Argentina). *Marine Pollution Bulletin* **48**, 910-918.
- Cornelissen G., Gustafsson O., Bucheli T., Jonker M., Koelmans A., and Vannoort P. (2005) Extensive Sorption of Organic Compounds to Black Carbon, Coal, and Kerogen in Sediments and Soils: Mechanisms and Consequences for Distribution, Bioaccumulation, and Biodegradation. *Environmental Science & Technology* **39**(18), 6881-6895.
- Cragg B., Law K., O'Sullivan G., and Parkes R. (1999) Bacterial profiles in deep sediments of the Alboran Sea, western Mediterranean, sites 976–9781. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 433-438.
- Danovaro R., Armeni M., Dell'Anno A., Fabiano M., Manini E., Marrale D., Pusceddu A., and Vanucci S. (2001) Small scale distribution of bacteria, enzymatic activities and organic matter in coastal sediments. *Microbial Ecology* **42**, 177-185.
- Danovaro R., (1996) Detritus–bacteria–meiofauna interactions in a seagrass bed (*Posidonia oceanica*) of the NW Mediterranean. *Marine Biology* **127**, 1–13.
- Danovaro R., Della Croce N., Eleftheriou A., Fabiano M., Papadopoulou N., Smith C., and Tselepides A. (1995) Meiofauna of the deep Eastern Mediterranean Sea: distribution and abundance in relation to bacterial biomass, organic matter composition and other environmental factors. *Progress in oceanography* **36**, 329-341.
- Danovaro, R., Dell'Anno, A., Pusceddu, A., & Fabiano, M. (1999a). Nucleic acid concentrations (DNA, RNA) in the continental and deep-sea sediments of the Eastern Mediterranean: relationships with seasonal varying organic input and bacterial dynamics. *Deep-Sea Research*, **46**, 1077–1094.
- Danovaro R., Dinet A., Duineveld G., and Tselepides A. (1999b) Benthic response to particulate fluxes in different trophic environments: a comparison between the Gulf

- of Lions–Catalan Sea (western-Mediterranean) and the Cretan Sea (eastern-Mediterranean). *Progress in oceanography* **44**, 287-312.
- Danovaro, R., Fabiano, M., Della Croce, N., (1993) Labile organic matter and microbial biomasses in deep sea sediments (Eastern Mediterranean Sea). *Deep Sea Research*, **40**, 953-965
- Danovaro R., Manini E., and Dell'Anno A. (2002) Higher abundance of bacteria than of viruses in deep Mediterranean sediments. *Applied and Environmental Microbiology* **68**(3), 1468-1472.
- Danovaro R., Marrale D., Della Croce N., Dell'Anno A., and Fabiano M. (1998) Heterotrophic Nanoflagellates, Bacteria, and Labile Organic Compounds in Continental Shelf and Deep-Sea Sediments of the Eastern Mediterranean. *Microbial Ecology* **36**, 244-255.
- Danovaro R., Marrale D., Della Croce N., Parodi P., and Fabiano M. (1999c) Biochemical composition of sedimentary organic matter and bacterial distribution in the Aegean Sea: trophic state and pelagic–benthic coupling. *Journal of sea research* **42**, 117-129.
- Danovaro R., Marrale D., Dell'Anno A., Della Croce N., Tselepides A., and Fabiano M. (2000a) Bacterial response to seasonal changes in labile organic matter composition on the continental shelf and bathyal sediments of the Cretan Sea. *Progress in oceanography* **46**, 345-366.
- Danovaro R., Tselepides A., Otegui A., & Della Croce N. (2000b) Dynamics of meiofaunal assemblages on the continental shelf, slope and deep-sea sediments of the Cretan Sea: relationships with seasonal changes in food supply. *Progress in Oceanography*, **46**, 367–400.
- Dickens A., Gélinas Y., Masiello C., Wakeham S. and Hedges J. (2004) Reburial of fossil organic carbon in marine sediments. *Nature* **427**, 336-339
- Dixon J. and Turley C., (2002) Measuring bacterial production in deep sea sediments using ³H-thymidine incorporation: ecological significance. *Microbial ecology* **42**, 49-561
- Dugdale C. and Wilkerson R., (1988) Nutrient sources and primary production in the Eastern Mediterranean. *Oceanologica Acta* **9**, 178–184.
- Eardly D., Carton M., Gallagher J., and Patching J. (2001) Bacterial abundance and activity in deep-sea sediments from the eastern North Atlantic. *Progress in oceanography* **50**, 245-259.
- Epstein S. (1997) Microbial food webs in marine sediments. II Seasonal changes in trophic interactions in a sandy tidal flat community. *Microbial Ecology* **34**, 199-209.
- Epstein S. and Rossel J. (1995) Enumeration of sandy sediment bacteria: search for optimal protocol. *Marine Ecology Progress Series* **117**, 289-298.

- Fabiano M. and Danovaro R. (1998) Enzymatic Activity, Bacterial Distribution, and Organic Matter Composition in Sediments of the Ross Sea (Antarctica). *Applied and Environmental Microbiology*, **64**(10), 3838-3845.
- Fiordelmondo C., Manini E., Gambi C. and Pusceddu A. (2003) Short-term impact of clam harvesting on sediment chemistry, benthic microbes and meiofauna in the Goro lagoon (Italy). *Chemistry and Ecology* **19**, 173–187.
- Fiordelmondo C. and Pusceddu A. (2004) Short-term response of benthic bacteria and nano.agellates to sediment resuspension: an experimental study. *Chemistry and Ecology* **20**, 107–121.
- Giresse P., Buscail R., and Charrière B. (2003) Late Holocene multisource material input into the Aegean Sea: depositional and post-depositional processes. *Oceanologica Acta* **26**, 657-672.
- Glud R. and Middelboe M. (2004) Virus and bacteria dynamics of a coastal sediment: Implication for benthic carbon cycling. *Limnology Oceanography* **49**(6), 2073-2081.
- Gogou A., Apostolaki M., and Stephanou E. (1998) Determination of organic molecular markers in marine aerosols and sediments: one-step flash chromatography compound class fractionation and capillary gas chromatographic analysis. *Journal of Chromatography A* **799**, 215-231.
- Gogou A., Bouloubasi I., and Stephanou E. (2000) Marine organic geochemistry of the Eastern Mediterranean: 1. Aliphatic and polyaromatic hydrocarbons in Cretan Sea surficial sediments. *Marine chemistry* **68**, 265-282.
- Gogou A. and Stephanou E. (2004) Marine organic geochemistry of the Eastern Mediterranean: 2. Polar biomarkers in Cretan Sea surficial sediments. *Marine chemistry* **85**, 1-25.
- Gogou A., Stratigakis N., Kanakidou M., and Stephanou E. (1996) Organic aerosols in Eastern Mediterranean: components source reconciliation by using molecular markers and atmospheric back trajectories. *Organic Geochemistry* **25**(1/2), 79-96.
- Gustafsson F., Haghseta C., Chan J., MacFarlane P., and Gschwend. (1997) Quantification of the dilute sedimentary soot phase: Implications for PAH speciation and bioavailability. *Environmental science and technology* **31**, 203-209.
- Haglund A.-L., Lantz P., Toornblom T., and Tranvik L. (2003) Depth distribution of active bacteria and bacterial activity in lake sediment. *FEMS Microbiology Ecology* **46**, 31-38.
- Harada N., Handa N., Fukuchi M., and Ishiwatari R. (1995) Source of hydrocarbons in marine sediments in Liitzow-Holm Bay, Antarctica. *Organic Geochemistry* **23**(3), 229-237.
- Hellou J., Steller S., and Leonard J. (2002) Alkanes, terpanes, and aromatic hydrocarbons in surficial sediments of Halifax harbor. *Polycyclic Aromatic compounds* **22**, 631-641.

- Horton C., Clifford M., Schmitz J., and Kantha L. (1997) A real-time oceanographic nowcast/forecast system for the Mediterranean sea. *Journal of geophysical research* **102**, 25,123-25,156.
- Ignatiades, L., (1969) Annual cycles, species diversity and succession of phytoplankton in lower Saronikos Bay, Aegean Sea. *Marine Biology*, **3**, 196-200.
- Kilops S. and Kilops V. (2005) *An introduction to organic Geochemistry*, 2nd edition, Blackwell scientific
- Kourafalou V. and Barbopoulos K. (2003) High resolution simulations on the North Aegean Sea seasonal circulation. *Annales Geophysicae* **21**, 251-265.
- Kuwae T. and Hosokawa Y. (1999) Determination of Abundance and Biovolume of Bacteria in Sediments by Dual Staining with 49,6-Diamidino-2-Phenylindole and Acridine Orange: Relationship to Dispersion Treatment and Sediment Characteristics. *Applied and Environmental Microbiology* **65**(8), 3407-3412.
- Lebaron P., Servais P., Agogue H., Courties C., and Joux F. (2001) Does the High Nucleic Acid Content of Individual Bacterial Cells Allow Us To Discriminate between Active Cells and Inactive Cells in Aquatic Systems? *Applied and Environmental Microbiology* **67**(4), 1775-1782.
- Lee C., Wakeham S., and Arnosti C. (2004) Particulate Organic Matter in the Sea: The Composition Conundrum. *Ambio* **33**(8), 565-575.
- Llobet-Brossa E., Rosselo-Mora R., and Amann R. (1998) Microbial Community Composition of Wadden Sea Sediments as Revealed by Fluorescence In Situ Hybridization. *Applied and Environmental Microbiology* **64**(7), 2691-2696.
- Lorenzen C. and Jeffrey J. (1980) Determination of chlorophyll in seawater. *UNESCO Technical Papers in Marine Sciences* **35**, 1-20.
- Louath A., Elleuch B., Kellel M., Saliot A., Dagaut J., and Oudot J. (2001) Hydrocarbon contamination of coastal sediments from the Sfax area (Tunisia), Mediterranean sea. *Marine Pollution Bulletin* **42**(6), 445-452.
- Luna G., Dell'Anno A., Giuliano L., and Danovaro R. (2004) Bacterial diversity in deep Mediterranean sediments: relationship with the active bacterial fraction and substrate availability. *Environmental Microbiology* **6**(7), 745-753.
- Luna G., Manini E., and Danovaro R. (2002) Large Fraction of Dead and Inactive Bacteria in Coastal Marine Sediments: Comparison of Protocols for Determination and Ecological Significance. *Applied and Environmental Microbiology* **68**(7), 3509-3513.
- Lunau M., Lemke A., Walther K., Martens-Habbena W., and Simon M. (2005) An improved method for counting bacteria from sediments and turbid environments by epifluorescence microscopy. *Environmental Microbiology* **7**(7), 961-968.
- Lykousis V., Chronis G., Tselepidis A., Price N., Theocharis A., Siokou-Frangou I., Van Wambeke F., Danovaro R., Stavrakakis S., Duineveld G., Georgopoulos D., Ignatiades L., Souvermezoglou A., and Voutsinou-Taliadouri F. (2002) Major

- outputs of the recent multidisciplinary biogeochemical researches undertaken in the Aegean sea. *Journal of Marine systems* **33-34**, 313-334.
- Masiello C. and Druffel E. (1998) Black carbon in deep sea sediments. *Science* **280**, 1911-1913.
- Massias D., Grossi V., and Bertrand J.-C. (2003) In situ anaerobic degradation of petroleum alkanes in marine sediments: preliminary results. *C. R. Geoscience* **335**, 435-439.
- Mazeas L. and Budzinski H. (2002) Improved accuracy of GC-MS quantification of aliphatic and aromatic hydrocarbons in marine sediments and petroleum. Validation on reference matrices and application to the Erika oil spill. *International Journal of environmental and analytical chemistry* **82(3)**, 157-173.
- Middelburg J., Nieuwenhuize J., and van Breugel P. (1999) Black carbon in marine sediments. *Marine chemistry* **65**, 245-252.
- Pfannkuche O., (1993) Benthic response to the sedimentation of particulate organic matter at the BIOTRANS station, 47 °N, 20 °W. *Deep-Sea Research*, **40**, 135-149.
- Krom, M.D., Brenner, S., Kress, N. and Gordon, L.I., 1991. Phosphorous limitation of primary productivity in the Eastern Mediterranean Sea. *Limnology Oceanography*, **36**, 424-432
- Polymenakou P., Bertilsson S., Tselepides A., and Stephanou E. (2005a) Links between Geographic Location, Environmental Factors, and Microbial Community Composition in Sediments of the Eastern Mediterranean Sea. *Microbial Ecology* **49**, 367-378.
- Polymenakou P., Pusceddu A., Tselepides A., Polychronaki T., Giannakourou A., Fiordelmondo C., Hatziyannia E., and Danovaro R. (2005b) Benthic microbial abundance and activities in an intensively trawled ecosystem (Thermaikos Gulf, Aegean Sea). *Continental shelf research* **25** (19-20), 2570-2584
- Polymenakou P., Tselepides A., Stephanou E. and Bertilsson S. Carbon speciation and composition of natural microbial communities in polluted and pristine sediments of the Eastern Mediterranean Sea. *Marine Pollution Bulletin, In Press*
- Poulos S., Drakopoulos P., and Collins M. (1997) Seasonal variability in sea surface oceanographic conditions in the Aegean sea (Eastern Mediterranean): An overview. *Journal of Marine systems* **13**, 225-244.
- Queric N., Soltwedel T., and Arntz W. (2004) Application of a rapid direct viable count method to deep-sea sediment bacteria. *Journal of microbiological methods* **57**, 351-367.
- Riaux-Gobin C., Dinet A., Dugue G., Vétion G., Maria E., and Gremare A. (2004) Phytodetritus at the sediment water interface NW Mediterranean basin: spatial repartition living cells signatures meiofaunal relationships. *Scientia Marina* **68(1)**, 7-21.

- Rullkötter J., Rinna J., Bouloubassi I., Scholz-Böttcher B., Meyers P., Johns L., and Rowland S. (1998) Biological marker significance of organic matter origin and transformation in sapropels from the Pisano plateau, site 9641. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 271-283.
- Santos Furtado A. and Casper P. (2000) Different methods for extracting bacteria from freshwater sediment and a simple method to measure bacterial production in sediment samples. *Journal of Microbiological Methods* **41**, 249-257.
- Salihiglu I., Saydam C., Basturk O., Yilmaz K., Go D., Hatipoglu E., Yilmaz A., (1990) Transport of nutrients and chlorophyll-a by mesoscale eddies in the northeastern Mediterranean. *Marine Chemistry* **29**, 375-390.
- Schubert C. and Stein R. (1996) Deposition of organic carbon in Arctic Ocean sediments: terrigenous supply vs marine productivity. *Organic Geochemistry* **24**(4), 421-436.
- Sempere R., Panagiotopoulos C., Lafont R., Marroni B., and Van Wambeke F. (2002) Total organic carbon dynamics in the Aegean Sea. *Journal of Marine systems* **33-34**, 355-364.
- Simoneit B. (1999) A review of biomarker compounds as source indicators and tracers for air pollution. *Environmental Science and Pollution* **6**, 159-169
- Siokou-Frangou I., Bianchi M., Christaki U., Christou E., Giannakourou A., Gotsis O., Ignatiades L., Pagou K., Pitta P., Psarra S., Souvermezoglou E., Van Wambeke F., and Zervakis V. (2002) Carbon flow in the planktonic food web along a gradient of oligotrophy in the Aegean Sea (Mediterranean Sea). *Journal of Marine systems* **33-34**, 335-353.
- Soltwedel T. and Vopel K. (2001) Bacterial abundance and biomass in response to organism-generated habitat heterogeneity in deep-sea sediments. *Marine Ecology Progress Series* **219**, 291-298.
- Stavrakakis S., Chronis G., Tselepides A., Heussner S., Monaco A., and Abassi A. (2000) Downward fluxes of settling particles in the deep Cretan Sea (NE Mediterranean). *Progress in oceanography* **46**(2-4), 217-240.
- Stergiou K., Christou, Georgopoulos D., Zanetos A., and Souvermezoglou C. (1997) The Hellenic seas: Physics, chemistry, biology and fisheries. *Oceanography and Marine biology: an annual review* **35**, 415-538.
- Suß J., Engelen B., Cypionka H., and Sass H. (2004) Quantitative analysis of bacterial communities from Mediterranean sapropels based on cultivation-dependent methods. *FEMS Microbiology Ecology* **51**, 109-121.
- Tholosan O. and Bianchi A. (1998) Bacterial distribution and activity at the water-sediment boundary layer on NW Mediterranean continental margin. *Mar. Ecol. Prog. Ser* **168**, 273-283.
- Tolosa I., Bayona J. M. and Albaigés J. (1996) Aliphatic and polycyclic aromatic hydrocarbons and sulfur/ oxygen derivatives in NW Mediterranean sediments:

- spatial and temporal variability, fluxes and budgets. *Environmental science and technology* **30**, 2495-2503
- Tolosa I., de Mora S., Sheikholeslami M., Villeneuve J.-P., Bartocci J., and Cattini C. (2004) Aliphatic and aromatic hydrocarbons in coastal Caspian Sea sediments. *Marine Pollution Bulletin* **48**, 44-60.
- Tran K., Yu C., and Zeng E. (1997) Organic pollutants in the coastal environment off san diego, california. 2. Petrogenic and biogenic sources of aliphatic hydrocarbons. *Environmental toxicology and chemistry* **16**(2), 189-195.
- Tselepides A. and Lampadariou N. (2004) Deep-sea meiofaunal community structure in the Eastern Mediterranean: are trenches benthic hotspots? *Deep sea research I* **51**, 833-847.
- Tselepides A., Polychronaki T., Marrale D., Akoumianaki I., Dell'Anno A., Pusceddu A., and Danovaro R. (2000a) Organic matter composition of the continental shelf and bathyal sediments of the Cretan Sea (NE Mediterranean). *Progress in oceanography* **46**, 311-344.
- Tselepides A., Zervakis V., Polychronaki T., Danovaro R., and Chronis G. (2000b) Distribution of nutrients and particulate organic matter in relation to the prevailing hydrographic features of the Cretan Sea (NE Mediterranean). *Progress in oceanography* **46**, 113-142.
- Tso S.F. and Taghon G.L. (1997) Enumeration of protozoa and bacteria in muddy sediment. *Microbial Ecology* **33**, 144-148.
- Turley C. (2000) Bacteria in the cold deep-sea benthic boundary layer and sediment-water interface of the NE Atlantic. *FEMS Microbiology Ecology* **33**, 89-99.
- Van Wambeke F., Christaki U., Bianchi M., Psarra S., and Tselepides A. (2000) Heterotrophic bacterial production in the Cretan Sea (NE Mediterranean). *Progress in oceanography* **46**, 205-216.
- Weikert H., Koppelman R., (1993) Vertical structural patterns of deep-living zooplankton in the northeast Atlantic, the Levantine Sea and the Red Sea, a comparison. *Oceanologica Acta* **16**, 163-177.
- Wellsbury P., Mather I., and Parkes R. (2002) Geomicrobiology of deep, low organic carbon sediments in the Woodlark Basin, Pacific Ocean. *FEMS Microbiology Ecology* **42**, 59-70.
- Yentsch C. S. and Menzel D. W. (1963). A method for the determination of phytoplankton chlorophyll and phaeophytin by fluorescence. *Deep-Sea Research* **10**, 221-231.
- Zeri C., Voutsinou-Taliadouri F., Romanov A., Ovsjany E., and Moriki A. (2000) A Comparative Approach of Dissolved Trace Element Exchange in Two Interconnected Basins: Black Sea and Aegean Sea. *Marine Pollution Bulletin* **40**(8), 666-673.

Zervakis V., Georgopoulos D., and Drakopoulos P. (2000) The role of North Aegean in triggering the recent Eastern Mediterranean climatic changes. *Journal of geophysical research* **105**(C11), 26.103-22.116.

Zodiatis. (1994) Advection of the Black Sea water in North Aegean sea. *The global atmosphere and ocean system* **2**, 41-60.

Zweifel and Hagstrom. (1995) Total counts of marine bacteria include a large fraction of non-nucleoid containing bacteria (ghosts). *Applied and Environmental Microbiology* **61**(6), 2180-2185.

Ελληνική βιβλιογραφία:

Πολυμενάκου Π., (2005) Περιβαλλοντική μελέτη της βακτηριακής ποικιλότητας και των σχετιζόμενων με αυτή μοριακών δεικτών σε ιζήματα της ανατολικής Μεσογείου, Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Κρήτης, Ηράκλειο

Τσελεπίδης Α. (1992) Οικολογική μελέτη του βαθύαλου οικοσυστήματος του Αιγαίου Πελάγους, Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Κρήτης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	1
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	
1.1 Γενικά στοιχεία	4
1.2 Περιγραφή της υπό μελέτη περιοχής	5
1.2.1 Η Ανατολική Μεσόγειος	5
1.2.2 Το Βόρειο Αιγαίο και το Θρακικό πέλαγος	6
1.3 Καταμέτρηση της αφθονίας των βενθικών βακτηρίων	9
1.4 Διαχωρισμός ενεργών και ανενεργών βακτηρίων	10
1.5 Περιβαλλοντικές παράμετροι του ιζήματος	11
1.5.1 Οργανικό υλικό και οργανικός άνθρακας	11
1.5.2 Στοιχειακός άνθρακας	12
1.5.3 Φυτοχρωστικές	13
1.5.4 κ-Αλκάνια	13
1.6 Στόχοι της μελέτης	15
2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ	
2.1 Δειγματοληψία	16
2.2 Καταμέτρηση ολικών και ενεργών βακτηρίων	18
2.3 Προσδιορισμός χλωροφύλλης, φαιοχρωστικών και CPE	18
2.4 Προσδιορισμός συνολικού οργανικού άνθρακα, στοιχειακού και βιοδιαθέσιμου οργανικού άνθρακα	19
2.5 Προσδιορισμός συγκεντρώσεων κ-αλκανίων	19
2.6 Στατιστική ανάλυση	20
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	
3.1 Ολικά και ενεργά βακτήρια	22
3.2 Συγκεντρώσεις χλωροφύλλης-α, φαιοφυτινών και CPE	25
3.3 Συγκεντρώσεις συνολικού οργανικού άνθρακα, στοιχειακού και βιοδιαθέσιμου οργανικού άνθρακα	29
3.4 Συγκεντρώσεις κ-αλκανίων	32
3.5 Συσχετίσεις μεταξύ των μεταβλητών	35
3.6 Ανάλυση πρωταρχικών συνιστωσών	41
3.7 Ανάλυση BIOENV: Συσχέτιση της βακτηριακής αφθονίας και των περιβαλλοντικών παραμέτρων	43
4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ	
4.1 Βακτηριακή αφθονία και κατανομή των βακτηριακών κοινωνιών	44
4.2 Συγκεντρώσεις φυτοχρωστικών	46
4.3 Συγκεντρώσεις οργανικού και στοιχειακού άνθρακα και βιοδιαθέσιμου οργανικού άνθρακα	49
4.4 Συγκεντρώσεις κ-αλκανίων και προέλευση της προσδιορισμένης οργανικής ύλης	51
4.5 Συσχετίσεις μεταξύ των μεταβλητών	54
4.6 Ανίχνευση ομαδοποιήσεων μεταξύ των σταθμών	56
4.7 Παράγοντες που επηρεάζουν την κατανομή των βακτηρίων	57

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	
5.1 Βακτηριακή κατανομή:	59
5.2 Κατανομή οργανικού υλικού:	59
5.3 Προέλευση οργανικού υλικού και κατανομή κ-αλκανίων:	60
5.4 Ομαδοποιήσεις μεταξύ των σταθμών:	60
Βιβλιογραφία:	62

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Αναστάσιο Τσελεπίδη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αλλά και την πολύτιμη βοήθεια που μου πρόσφερε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου διατριβής σε όλα της τα στάδια, αλλά και τον καθηγητή κ. Μιχάλη Παυλίδη για τις συμβουλές και τις παρατηρήσεις του.

Ιδιαίτερα σημαντική ήταν η συμβολή της Βούλας Πολυμενάκου στη δειγματοληψία, στις εργαστηριακές αναλύσεις, στο γράψιμο αλλά και στην παρουσίαση, γι' αυτό και την ευχαριστώ ιδιαίτερα.

Σημαντική βοήθεια υπήρξαν όλοι από την ωκεανογραφία με τον ένα ή τον άλλο τρόπο, ο Δημήτρης Ποδάρας, ο Νίκος Λαμπαδαρίου, ο Φώτης Πανταζόγλου και η Στέλλα Ψαρά. Τον Πέσμα τον ευχαριστώ και σαν φίλο και γιατί λασπωθήκαμε αρκετά μαζί στο καράβι!

Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε στα εργαστήρια του Ινστιτούτου Ωκεανογραφίας του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. Κρήτης. Η δειγματοληψία έγινε με το Ωκεανογραφικό Πλοίο «Αιγαίο» στα πλαίσια του προγράμματος AN.REC. γι' αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καπετάνιο και τα μέλη του πληρώματος του πλοίου.

Δεν θα μπορούσα να μην αναφερθώ στην Κορ και τη Μαρία, αλλά και σε όλους τους φίλους που έκαναν το Ηράκλειο πιο όμορφο!

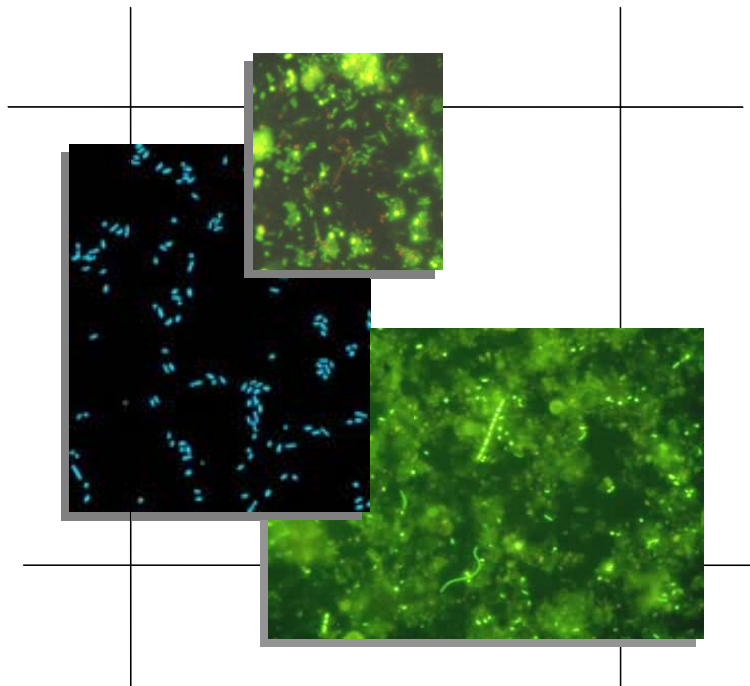
Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την συμπαράσταση τους όλα αυτά τα χρόνια.

ΜΠΣ: «ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΒΙΟΛΟΓΙΑ: Διαχείριση χερσαίων και θαλάσσιων βιολογικών πόρων»

Μεταπτυχιακή διατριβή

«Κατανομή των βακτηριακών κοινοτήτων και των περιβαλλοντικών παραμέτρων που τις επηρεάζουν, σε θαλάσσια ιζήματα του Θρακικού Πελάγους»

Γλυκερία Φραγκιουδάκη



Ηράκλειο
Σεπτέμβριος 2006

Φωτογραφίες εξωφύλλου: Βακτήρια όπως φαίνονται με φθορίζον μικροσκόπιο και διαφορετικές χρώσεις σε ίζημα και νερό.

Πηγές: <http://www.naturesocean.com/images/nsw2.gif>

<http://www.icbm.de/pmbio/mikrobiologischer-garten/eng/enwat04.htm>

<http://serc.carleton.edu/microbelife/microobservatories/oligocean/methods.html>