



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΠΑΛΑΙΟΝΤΟΛΟΓΙΑΣ



ΠΙΕΡΡΟΣ Δ. ΠΑΤΟΥΧΕΑΣ

ΤΟ ΦΥΤΟΠΛΑΓΚΤΟΝ ΚΑΙ ΤΑ ΚΟΚΚΟΛΙΘΟΦΟΡΑ ΩΣ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΙ ΔΕΙΚΤΕΣ ΣΤΟ ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΑ ΤΩΝ ΜΕΘΑΝΩΝ,
ΣΑΡΩΝΙΚΟΣ ΚΟΛΠΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2020





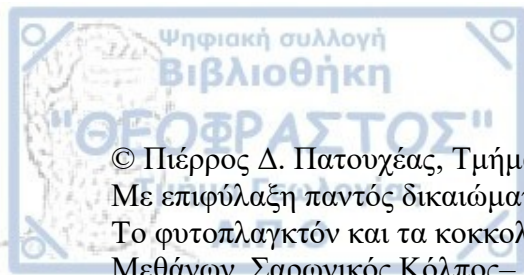
ΠΙΕΡΡΟΣ Δ. ΠΑΤΟΥΧΕΑΣ
Φοιτητής Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ: 5237

ΤΟ ΦΥΤΟΠΛΑΓΚΤΟΝ ΚΑΙ ΤΑ ΚΟΚΚΟΛΙΘΟΦΟΡΑ ΩΣ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΙ ΔΕΙΚΤΕΣ ΣΤΟ ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΑ ΤΩΝ ΜΕΘΑΝΩΝ,
ΣΑΡΩΝΙΚΟΣ ΚΟΛΠΟΣ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας, Τομέα Γεωλογίας,
Εργαστήριο Γεωλογίας και Παλαιοντολογίας

Επιβλέπων

Δρ. Όλγα Κουκουσιούρα, Ε.ΔΙ.Π.



© Πιέρρος Δ. Πατουχέας, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Γεωλογίας, 2020

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Το φυτοπλαγκτόν και τα κοκκολιθοφόρα ως περιβαλλοντικοί δείκτες στο οικοσύστημα των Μεθάνων, Σαρωνικός Κόλπος– *Διπλωματική Εργασία*

© Pierros D. Patoucheas, School of Geology, Dept. of Geology, 2020

All rights reserved.

Total phytoplankton and coccolithophores as environmental indices in the ecosystem of Methana, Saronikos Gulf– *Bachelor Thesis*

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.

Εικόνα Εξωφύλλου: Tripos sp. σε ανάστροφο μικροσκόπιο (φωτ. Πιέρρος Πατουχέας)



Πρόλογος

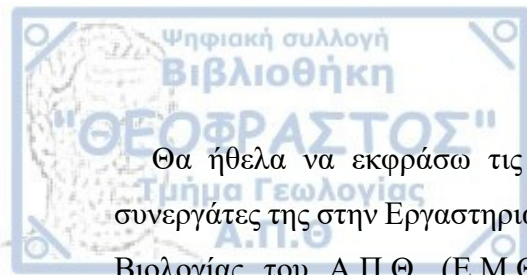
Η παρούσα διπλωματική εργασία, εκπονήθηκε στα πλαίσια του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών του Τμήματος Γεωλογίας, της Σχολής Θετικών Επιστημών, του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Ο σκοπός της είναι η μελέτη της χωροχρονικής μεταβλητότητας που παρουσιάζουν οι τρεις βασικές ομάδες φυτοπλαγκτόν (δινωμαστιγωτά, διάτομα, κοκκολιθοφόρα) και η συσχέτιση τους με αβιοτικούς παράγοντες και ανθρωπογενείς επιδράσεις. Τα αποτελέσματα οδήγησαν στην παρουσίαση εργασιών σε τρία διεθνή συνέδρια, τη δημοσίευση άρθρου σε διεθνές περιοδικό και την αποστολή ενός δεύτερου άρθρου που είναι υπό κρίση κατά την συγγραφή της παρούσας εργασίας:

- ◆ Coccolithophore community response along a natural CO₂ gradient off Methana (northeastern Peloponnese peninsula, Aegean Sea) (INA16, 2017)
- ◆ Phytoplankton dynamics influenced by geological (submarine Volcano) and anthropogenic activities in Methana, Saronicos Gulf, Greece (CEMEPE 2018)
- ◆ Estimating phytoplankton biovolume and chlorophyll-a concentration in Methana, Greece, using field data and satellite-based observations (GREENCHEM 2020)
- ◆ Coccolithophore community response along a natural CO₂ gradient off Methana (SW Saronikos Gulf, Greece, NE Mediterranean) (PLoS ONE 2018)
- ◆ Phytoplankton dynamics influenced by geological (submarine Volcano) and anthropogenic activities in Methana, Saronicos Gulf, Greece (ESPR 2020) (υπό κρίση)

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την επιβλέπουσα μου Δρ. Όλγα Κουκουσιούρα, Ε.ΔΙ.Π. του Τμήματος Γεωλογίας Α.Π.Θ., για την ανάθεση αυτής της διπλωματικής εργασίας, την εμπιστοσύνη και την καθοδήγηση που μου παρείχε σε όλα τα στάδια της εργασίας αυτής.

Το υλικό για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας μου δόθηκε από την Καθηγήτρια του Τμήματος Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών Δρ. Μαρία Τριαντάφυλλου την οποία θα ήθελα να την ευχαριστήσω ιδιαιτέρως για την εμπιστοσύνη, την καθοδήγηση και στήριξη που έλαβα

Την Επίκ. Καθηγήτρια του Τμήματος Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών Δρ. Μαργαρίτα Δήμιζα θα ήθελα να ευχαριστήσω, για τη πολύτιμη στήριξη που μου προσέφερε.



Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην Δρ. Κατερίνα Αλιγιζάκη και τους συνεργάτες της στην Εργαστηριακή Μονάδα Θαλάσσιων Τοξικών Μικροφυκών του τμήματος Βιολογίας του Α.Π.Θ. (Ε.Μ.Θ.Τ.Μ.-Α.Π.Θ.) για τη βοήθεια τους στην ανάλυση των δειγμάτων και την επίβλεψη όλης της εργαστηριακής εργασίας και ταξινόμησης του φυτοπλαγκτόν.

Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Δημήτριο Πατουχέα βιολόγο γιατί την αμέριστη συμπαράσταση, την βοήθεια στην στατιστική επεξεργασία, την ενθάρρυνση και τις συζητήσεις που οδήγησαν στο τελικό αποτέλεσμα.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και όλους τους δασκάλους και καθηγητές που στάθηκαν πλάι μου και χωρίς αυτούς θα ήταν αδύνατο να εκπονηθεί αυτή η εργασία.



Περιεχόμενα

Εισαγωγή	9
Αντικείμενο μελέτης.....	10
Περιοχή μελέτης.....	17
Μεθοδολογία	20
Αποτελέσματα	27
Συζήτηση	34
Συμπεράσματα	38
Βιβλιογραφία	40

Είναι καλά τεκμηριωμένο ότι οι ανθρώπινες δραστηριότητες επηρεάζουν το περιβάλλον με διάφορους τρόπους. Μερικές από τις σημαντικότερες επιπτώσεις είναι η υπερθέρμανση του πλανήτη, η όξινη βροχή και οι διαδικασίες ευτροφισμού στα θαλάσσια οικοσυστήματα. Τα Μέθανα βρίσκονται στο νοτιοδυτικό τμήμα του Σαρωνικού κόλπου και στο ανατολικό άκρο του ηφαιστειακού τόξου του Αιγαίου. Σε απόσταση από την ακτή, το οικοσύστημα του Σαρωνικού κόλπου χαρακτηρίζεται ως oligotroφικό.

Η περιοχή των Μεθάνων θα μπορούσε να χρησιμεύσει ως πειραματικό πεδίο έρευνας για πολλές πιθανές εξελικτικές θεωρίες λόγω της παρουσίας του υποθαλάσσιου ηφαιστείου και της υδροθερμικής δραστηριότητάς του, καθώς και του διοξειδίου του άνθρακα που απελευθερώνεται και καθιστά την περιοχή ένα φυσικό εργαστήριο που θα μπορούσε να μας δώσει απαντήσεις τόσο για γεωλογικές, όσο και για βιολογικές διεργασίες και τον τρόπο διεξαγωγής τους. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω της μελέτης της περιοχής υδροθερμικής δραστηριότητας, ενός oligotroφικού περιβάλλοντος που επηρεάζεται από τα προϊόντα του ηφαιστείου (CO₂ και ηφαιστειακά ραδιενεργά υλικά) που προσομοιώνουν συνολικά σύνθετες γεω-βιο-χημικές συνθήκες που μπορούν να δώσουν στοιχεία για την υπερθέρμανση του πλανήτη. Επιπλέον, στην κοντινή παραθαλάσσια περιοχή υπάρχει μια μικρή πόλη, τα Μέθανα, με έντονη ανθρωπογενή δραστηριότητα, ειδικά κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, και κάποιες μικρές ιχθυοκαλλιέργειες.

Η δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε σε δύο περιόδους. Η πρώτη στις αρχές του φθινοπώρου (ζεστή περίοδος, Σεπτέμβριος 2016) και η δεύτερη στις αρχές της άνοιξης (ψυχρή περίοδος, Μάρτιος 2017). Κατά τη διάρκεια του φθινοπώρου, συλλέχθηκαν δείγματα από πέντε σταθμούς κοντά στους υδροθερμικούς αγωγούς CO₂ (P), δύο σταθμούς στις υδροθερμικές θειούχες πηγές (L) και έναν σταθμό (R) στις υδροθερμικές ραδιούχες πηγές. Επίσης, συλλέχθηκε ένα δείγμα από την ιχθυοκαλλιέργεια κοντά στην πόλη των Μεθάνων (F). Η εαρινή δειγματοληψία περιορίστηκε στους πέντε ηφαιστειακούς σταθμούς (P) και στον σταθμό κοντά στο χωριό (F). Μελετήθηκαν τρεις κατηγορίες φυτοπλαγκτόν, τα δινομαστιγωτά, τα διάτομα και τα κοκκολιθοφόρα με τη χρήση ανάστροφου μικροσκοπίου. Στις αρχές του φθινοπώρου, τα δινομαστιγωτά κυριαρχούν στην πλειονότητα των σταθμών με συγκεντρώσεις του γένους *Prorocentrum* έως $\sim 1,7 \times 10^3$ cells l⁻¹ (σταθμός P4), ενώ στον σταθμό με τις ιχθυοκαλλιέργειες (F1) ήταν έως και $35,5 \times 10^3$ cells l⁻¹. Στις αρχές της άνοιξης, η κυρίαρχη τάξη ήταν Bacillariophyceae με κυρίαρχο το γένος *Nitzschia/Pseudo-nitzschia*

παρουσιάζοντας συγκεντρώσεις έως $\sim 33,9 \times 10^3 \text{ cells l}^{-1}$ (σταθμός P4). Επιπλέον, τα κοκκολιθοφόρα εμφανίζονται σε δείγματα τόσο της άνοιξης όσο και του φθινοπώρου με μικρές, σχετικά, διακυμάνσεις.

Η χωρική και χρονική κατανομή της χλωροφύλλης-α εκτιμήθηκε χρησιμοποιώντας δύο εικόνες Sentinel-2 και εμπειρικούς αλγόριθμους. Για κάθε δορυφορική εικόνα, χρησιμοποιήθηκαν τα αντίστοιχα *in situ* δεδομένα από τους πέντε σταθμούς (Triantaphyllou et al., 2018), για την ανάπτυξη και την αξιολόγηση των εμπειρικών αλγορίθμων για την εκτίμηση της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης. Η ανάλυση παλινδρόμησης που εφαρμόστηκε για τη διερεύνηση πιθανής συσχέτισης μεταξύ βιοόγκου και χλωροφύλλης-α, χρησιμοποιώντας το ίδιο σύνολο δεδομένων, έδωσε συντελεστή συσχέτισης $r=0,6$ και στις δύο περιόδους, αν και δεν βρέθηκε στατιστικά σημαντική γραμμική σχέση ($p<0,05$).

Καθώς, μέχρι τώρα, δεν υπάρχουν πολλά δεδομένα στη βιβλιογραφία, απαιτούνται πρόσθετες μελέτες πεδίου και εργαστηριακή έρευνα για μια καλύτερη βαθμονόμηση αυτών των μοντέλων στο μέλλον, που μπορεί να αποδειχθεί ως χρήσιμο εργαλείο για την παρακολούθηση των παράκτιων υδάτων.

Abstract

Human activities, it is well documented, that affect the environment in a variety of ways.

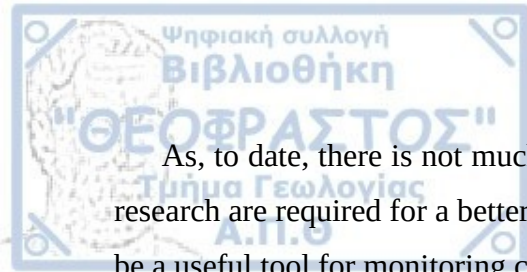
Some of the most important effects are global warming, acidification and eutrophication processes, in marine ecosystems. Methana is located in the southwestern part of the Saronic Gulf and at the eastern end of the volcanic arc of the Aegean. At a distance from the coast, the ecosystem of the Saronic Gulf is characterized as oligotrophic.

Methana area could serve as an experimental field to test many evolutionary theories due to the simultaneous presence multiple and interacting with each factors, such as the submarine volcano and its hydrothermal activity, carbon dioxide (CO₂) emissions and low intensity radiation as well as human activity near the shores especially during the summer, and one small fish farm. Thus, in a relatively small area, complex bio-geo-chemical processes such as global warming, acidification and possibly eutrophication can be simulated and studied.

Sampling was performed in two periods. The first in early autumn (warm season, September 2016) and the second in early spring (cold season, March 2017). During the autumn, samples were collected from five stations near the CO₂ (P) hydrothermal vents, two stations at the hydrothermal sulfur springs (L) and one station (R) at the hydrothermal sources of low intensity radiation. A sample was also collected from the fish farm near the town of Methana (F). Spring sampling was limited to the five volcanic stations (P) and the station near the village (F).

Three classes of phytoplankton were studied, dinoflagellates, diatoms and coccolithophores using an inverted microscope. In early autumn, dinoflagellates dominate in most samples. The abundance of *Prorocentrum* varying between 1.7×10^3 cells l⁻¹ (P4) to 35.5×10^3 cells l⁻¹ close to fish farming station (F1). In early spring, Bacillariophyceae dominate in almost all samples. Species of the genus *Nitzschia/Pseudo-nitzschia* showing concentrations up to $\sim 33.9 \times 10^3$ cells l⁻¹ (P4). In addition, coccolithophores appear in both spring and autumn samples with relatively small variations.

The spatial and temporal distribution of surface chlorophyll-*a* was estimated using two Sentinel-2 images and empirical algorithms. For each satellite image, the corresponding in situ data from the five stations (Triantaphyllou et al., 2018) were used to develop and evaluate the empirical algorithms for estimating the chlorophyll-*a* concentration. The regression analysis applied to investigate a possible correlation between biomass and chlorophyll-*a*, using the same data set, gave a correlation coefficient $r=0.6$ in both periods, although no statistically significant for linear relationship was found ($p<0.05$).

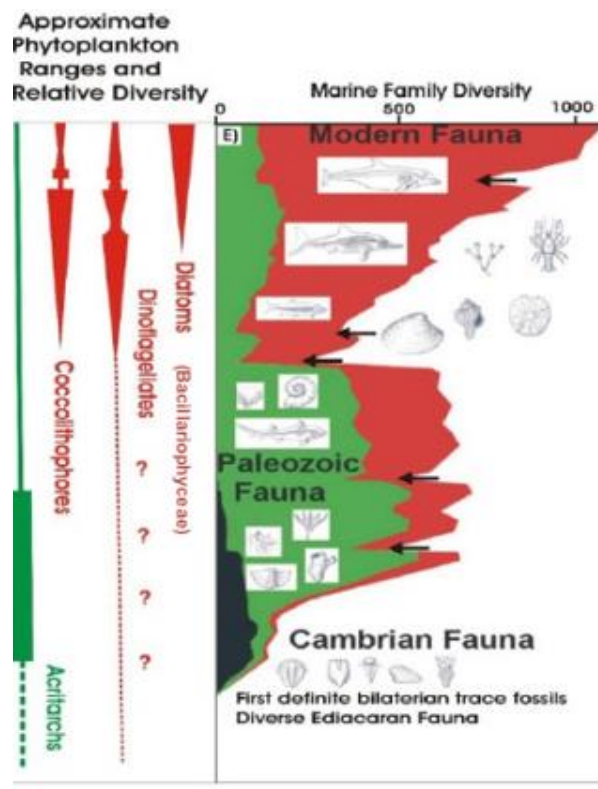


As, to date, there is not much data in the literature, additional field studies and laboratory research are required for a better calibration of these models in the future, which may prove to be a useful tool for monitoring coastal waters.

Εισαγωγή

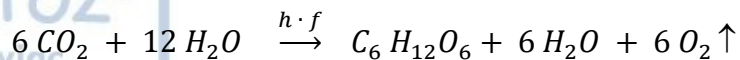
Το παρόν είναι η τομή μεταξύ του παρελθόντος και του μέλλοντος. Για το λόγο αυτό η μελέτη σύγχρονων οργανισμών όπως ζώα φυτά ακόμα και τόσο βραχύβιων όπως το πλαγκτόν είναι απόλυτα αναγκαία. Όσο καλύτερα κατανοούμε τις διαδικασίες του παρόντος τόσο καλύτερα θα μπορέσουμε να προσεγγίσουμε διαδικασίες που έλαβαν χώρα στο μακρινό παρελθόν. Ενώ παράλληλα θα μπορέσουμε με πιο ασφαλή τρόπο να προβλέψουμε, με τη χρήση αξιόπιστων μοντέλων, το μέλλον.

Παλαιοντολογικές έρευνες έχουν δείξει ότι η εμφάνιση των πρώτων φωτοσυνθετικών κυανοβακτηρίων και στη συνέχεια των πρώτων φωτοσυνθετικών ευκαρυωτικών μικροοργανισμών (φυτοπλαγκτόν) ήταν αυτή που οδήγησε την ατμόσφαιρα από την αναγωγική στην οξειδωτική της φάση και καθόρισε αμετάκλητα την εξέλιξη της ζωής αλλά και του περιβάλλοντος στη γη (Εικ. 1).

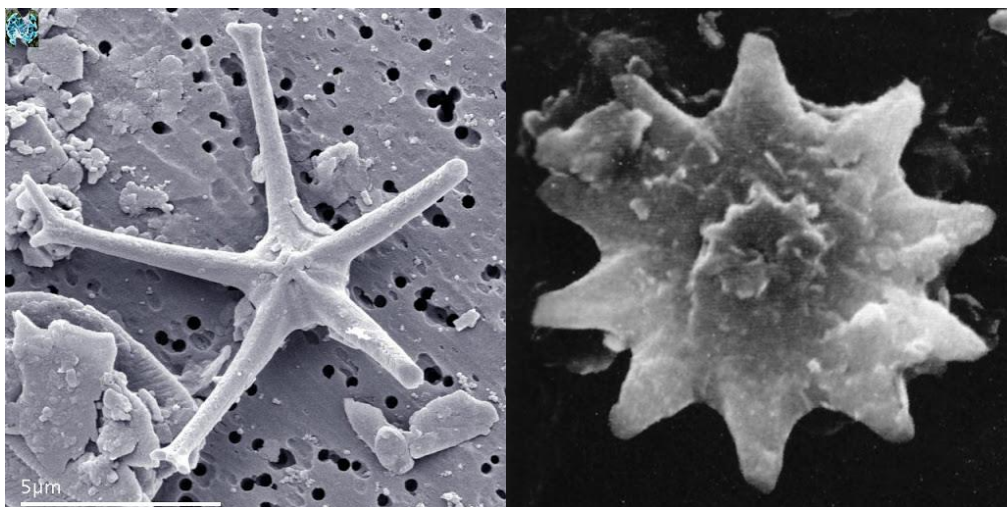


Εικόνα 1. Εμφάνιση του φυτοπλαγκτόν στον γεωλογικό χρόνο (από Martin and Quigg, 2012).

Η φωτοσύνθεση είναι το κλειδί αυτών των δραματικών αλλαγών στο γήινο περιβάλλον. Αυτή αποτελεί μια σύνθετη διαδικασία που μπορεί να αποδοθεί σε σχέση με τα αρχικά και τελικά προϊόντα από την αντίδραση:



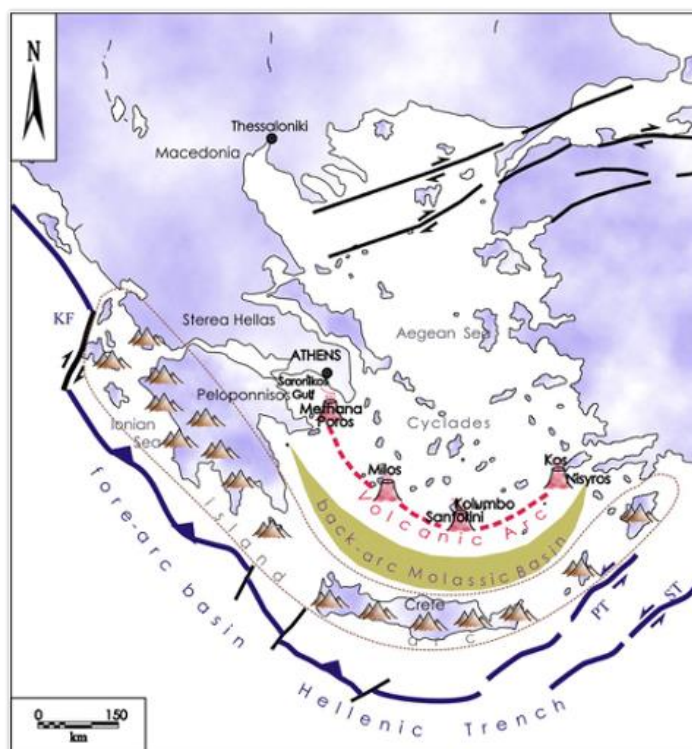
Αν και το φυτοπλαγκτόν αντιπροσωπεύει ένα πολύ μικρό μέρος της συνολικής βιομάζας των παραγωγών στη γη (μόλις το 0,2%), εντούτοις πραγματοποιεί περίπου 50 % της συνολικής πρωτογενούς παραγωγής (Field et al., 1998) και κατά συνέπεια του παραγόμενου οξυγόνου. Αλλά ακόμα και μετά τη λήξη του κύκλου ζωής τους, τα σκελετικά τους υπολείμματα έχουν καθοριστική συνεισφορά στα βιογενή ιζήματα. Στη συνέχεια, μετά την καθίζηση σχηματίζουν ιζηματογενή πετρώματα με τη διαδικασία της διαγένεσης. Επιπλέον, το απολιθωμένο πλαγκτόν είναι ένας δείκτης βιολογικών και γεωλογικών συνθηκών σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό και τον προσδιορισμό των γεωλογικών περιόδων (index fossil). Η εμφάνιση τους καθορίζει συγκεκριμένες περιόδους του γεωλογικού χρόνου, όπως στην Εικόνα 2, όπου τα δύο είδη του γένους *Discoaster* είναι δείκτες διαφορετικών γεωλογικών περιόδων, και ξεχωρίζουν από τη μορφολογία τους. Το είδος *Discoaster pentaradiatus* επικρατεί κατά το Τεταρτογενές, ενώ το *Discoaster mediusus* είχε την μεγαλύτερη αφθονία κατά το Παλαιόκαινο.



Εικόνα 2. *Discoaster pentaradiatus* (από J.R. Joung) και *Discoaster mediusus* (Bybell and Self-Trail, 1995).

Περιοχή μελέτης

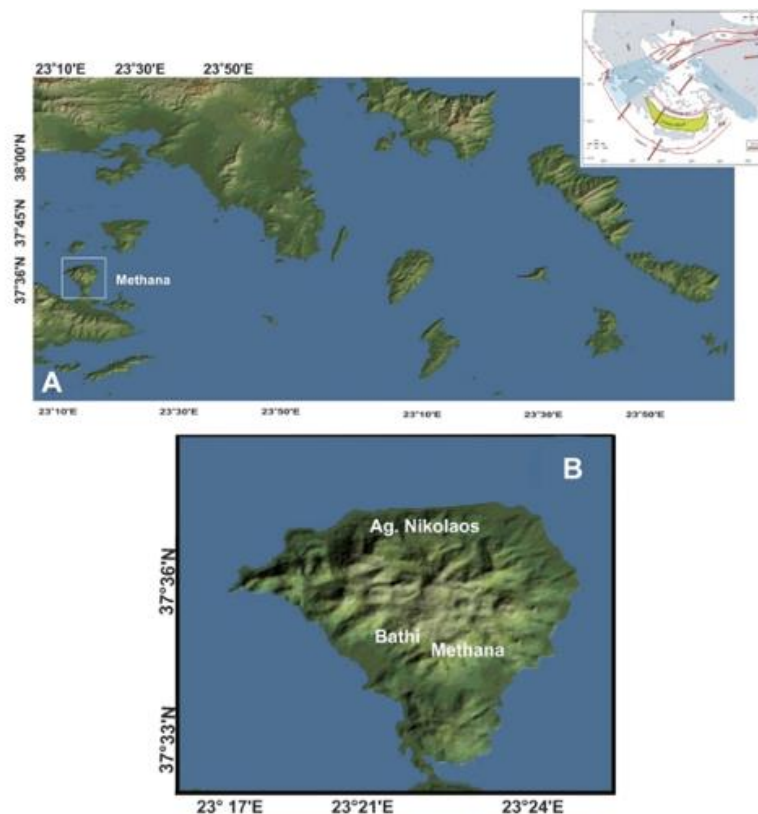
Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στο νοτιοδυτικό τμήμα του Αιγαίου Πελάγους, μια θαλάσσια περιοχή που ανήκει στη Μεσόγειο. Το κλίμα της περιοχής χαρακτηρίζεται από ετήσιες θερμοκρασίες αέρα 16-19,5°C, βροχόπτωση περίπου 500 mm yr⁻¹ και η εξάτμιση φτάνει περίπου τα 4 mm d⁻¹ (Dando et al., 2000). Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, οι (βορειοδυτικοί) Ετήσιοι άνεμοι (μελτέμια) είναι οι κυρίαρχοι πάνω από τη θάλασσα. Οι μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες στην επιφάνεια της θάλασσας κυμαίνονται από 8°C στο βορρά κατά τη διάρκεια του χειμώνα, έως 26°C στο νότο κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Η αλατότητα της επιφάνειας της θάλασσας ποικίλλει επίσης χωρικά και εποχικά, κυμαίνόμενη από λιγότερο από 31 psu, στο βορρά, έως περισσότερα από 39 psu, στα νοτιοανατολικά. Χαμηλότερες τιμές (<25 psu) εμφανίζονται δίπλα στις εκβολές ποταμών. Η αλατότητα παρουσιάζει μέγιστες διαφορές κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, ενώ κατά τη διάρκεια του χειμώνα και του φθινοπώρου η κατανομή της είναι πιο ομοιόμορφη (Poulos, 1997). Στο Αιγαίο έχουν γίνει πολλές μετρήσεις για το pH που φτάνουν από το 3 σε περιοχές με υψηλή ηφαιστειακή δραστηριότητα (Μήλος) μέχρι και το 6-7 σε άλλες περιοχές. (Dando et al., 2000).



Εικόνα 3. Χάρτης του ηφαιστειακού τόξου του Αιγαίου (από Papanikolaou and Papanikolaou, 2007).

Ο Σαρωνικός κόλπος καλύπτει έκταση περίπου 2600 km² και παρουσιάζει σύνθετη βαθυμετρία και γεωμετρία. Ο εξωτερικός κόλπος, στα ΝΑ, συνδέεται με το Αιγαίο Πέλαγος και έχει βάθος σταδιακά μειούμενο προς τον εσωτερικό κόλπο και την ακτή της Αττικής από περίπου 200 m έως 100 m. Ο δυτικός κόλπος εμφανίζει μεγάλη μεταβλητότητα βάθους, με βάθη τοπικά άνω των 400 m και ανταλλαγή μαζών νερού μέσω των διόδων μεταξύ των νησιών της Αίγινας και της Σαλαμίνας προς τα βόρεια και του νησιού της Αίγινας και της χερσονήσου των Μεθάνων στα νότια (Triantaphyllou et al., 2018).

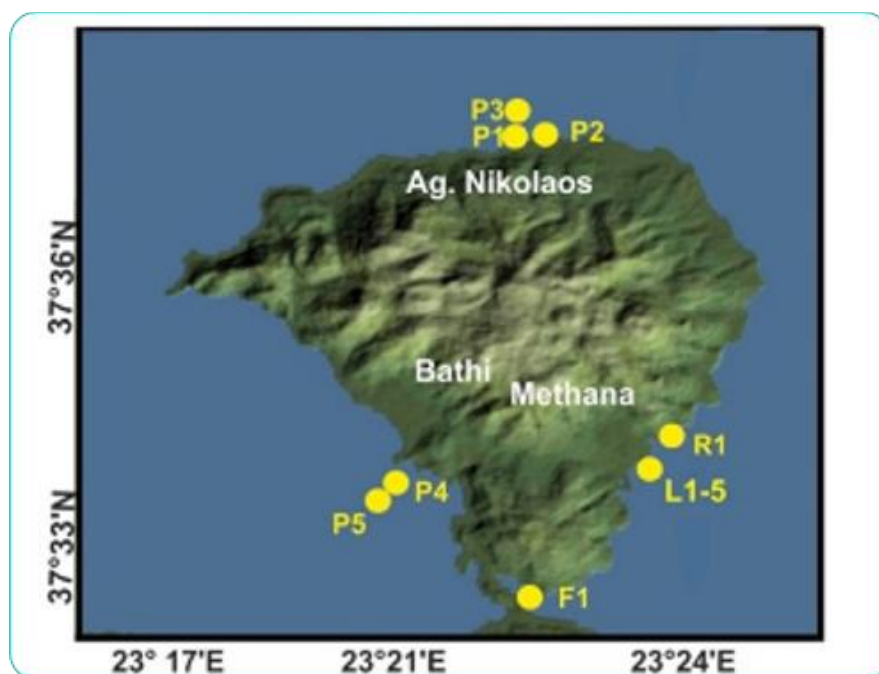
Ο Σαρωνικός κόλπος χαρακτηρίζεται από ισχυρές εποχιακές ροές που προκαλούν διαφορά πυκνότητας με τα εισερχόμενα νερά του Αιγαίου και μπορούν να τροποποιηθούν από τον άνεμο (Kontoyiannis, 2010). Το καλοκαίρι υπάρχει μια αντικυκλωνική και μια κυκλωνική ροή σε όλο τον κόλπο πάνω και κάτω από το πυκνοκλινές, ενώ το χειμώνα και τις αρχές της άνοιξης επικρατεί μια αντικυκλωνική ροή στα ανώτερα ~100 m (Εικ. 4B). Οι κυρίαρχοι βόρειοι άνεμοι το καλοκαίρι και το χειμώνα ωθούν τα νερά από τον εσωτερικό κόλπο προς τα νοτιοανατολικά, ενώ οι βορειοδυτικοί, δυτικοί και νότιοι άνεμοι ευνοούν τη βόρεια μαιάνδρωση της ροής του νερού στον εσωτερικό κόλπο (Kontoyiannis, 2010).



Εικόνα 4. Χάρτης του Σαρωνικού κόλπου και της χερσονήσου των Μεθάνων (από Triantaphyllou et al., 2018).

Η ηφαιστειακή περιοχή των Μεθάνων βρίσκεται στην ανατολική χερσόνησο της Πελοποννήσου στη νοτιοδυτική περιοχή του εσωτερικού του Σαρωνικού κόλπου και αντιπροσωπεύει το δυτικό άκρο του ηφαιστειακού τόξου του Αιγαίου (Εικ. 3, 4Α). Η τελευταία έκρηξη στα Μέθανα ήταν το 230 π.Χ. όπως περιγράφεται από τον αρχαίο Έλληνα γεωγράφο Πausανία. Πρόσφατα ανακαλύφθηκε ένα ενεργό υποθαλάσσιο ηφαίστειο ΒΔ της χερσονήσου των Μεθάνων (Pavlakis, 1989). Στη χερσόνησο των Μεθάνων υπάρχουν ιαματικές πηγές και η παράκτια περιοχή στο βόρειο τμήμα εξακολουθεί να είναι υδροθερμικά ενεργή με εκπομπές αερίων κυρίως διοξειδίου του άνθρακα και μικρότερων ποσοτήτων αζώτου, μονοξειδίου του άνθρακα και μεθανίου (Baggini et al., 2014; Dando et al., 2000). Ο χημισμός των θαλασσινών υδάτων μαζί με την εποχιακή μεταβλητότητα των κοινοτήτων μακροφυκών στις περιοχές με εκκροές CO₂ στα Μέθανα παρακολουθούνται ήδη από το 2011 έως το 2013 (Baggini et al., 2014), δείχνοντας ότι το pH του θαλασσινού νερού μειώθηκε σε επίπεδα που προβλέπονται για τα τέλη αυτού του αιώνα στην περιοχή του βυθού χωρίς συγκλονιστικές αποκλίσεις. Οι συγκεντρώσεις ελεύθερου θείου ήταν κάτω από το μετρήσιμο όριο (1 μM) (Baggini et al., 2014). Αντιθέτως, τα δείγματα κοντά στα ιαματικά λουτρά (νοτιοανατολικό τμήμα της χερσονήσου) είχαν συγκέντρωση ελεύθερων σουλφιδίων 35 μM (Baggini et al., 2014).

Οι δειγματοληψίες πραγματοποιήθηκαν τον Σεπτέμβριο του 2016 και τον Μάρτιο του 2017 και συλλέχθηκαν 44 δείγματα νερού χρησιμοποιώντας φιάλη Niskin. Οι σταθμοί P1, P2, P3 βρίσκονται στην κύρια περιοχή του ηφαιστείου με τις χαμηλότερες τιμές pH εξαιτίας των εκπομπών CO₂. Οι P4 και P5 είναι οι πελαγικοί σταθμοί σε ένα oligότροφο περιβάλλον. Οι σταθμοί L1-5 επηρεάζονται από τις θερμές θειούχες πηγές, ενώ ο σταθμός R1 από θερμές ραδιούχες πηγές. Τέλος, ο σταθμός F1 βρίσκεται σε μικρή απόσταση από μια μονάδα ιχθυοκαλλιέργειας κοντά στην πόλη των Μεθάνων (Εικ. 4B, 5).



Εικόνα 5. Η χερσόνησος των Μεθάνων με τους σταθμούς δειγματοληψίας (από Triantaphylou et al., 2018).

Τα δείγματα διατηρήθηκαν σε διάλυμα Lugol. Για την ανάλυση των φυτοπλαγκτονικών οργανισμών, δείγματα θαλασσινού νερού (25 ml) εξετάστηκαν σε ανάστροφο μικροσκόπιο (Utermöhl, 1958; Sandgren and Robinson, 1984). Οι πλακτονικοί οργανισμοί κατατάχθηκαν σε τρεις κύριες ομάδες: διάτομα (Bacillariophyceae), δινομαστιγωτά (Dinophyceae) και κοκκολιθοφόρα. Για την κάθε ομάδα, στα δείγματα που αναλύθηκαν, υπολογίστηκαν τρεις παράμετροι που σχετίζονται με τη δομή και το μέγεθος του πληθυσμού: α) η αφθονία (αριθμός κυττάρων ανά όγκο νερού cells l⁻¹ β) ο βιοόγκος και γ) η χλωροφύλλη-α.

Η αφθονία μπορεί να δώσει χρήσιμες πληροφορίες για τη δομή του πληθυσμού καθώς επίσης και να αποτελέσει ένα δείκτη της επίδρασης που μπορεί να ασκήσουν στις κοινωνίες του φυτοπλαγκτόν βιοτικοί και αβιοτικοί παράγοντες καθώς και ανθρωπογενείς επιδράσεις.

Η βιομάζα ως συνολικός κυτταρικός όγκος $\mu\text{m}^3 \text{ l}^{-1}$ μπορεί να δώσει μαζί με τη χλωροφύλλη-α σημαντικές πληροφορίες για την τροφική κατάσταση του οικοσυστήματος αφού το πλαγκτόν αποτελεί τη βάση της τροφικής αλυσίδας. Θεωρώντας ότι η πυκνότητα των κυττάρων είναι περίπου ίδια με αυτή του θαλασσινού νερού ($1,025 \text{ kg/m}^3$) για να αποφεύγεται η γρήγορη βύθιση των κυττάρων μπορούμε να έχουμε μια εκτίμηση της βιομάζας σύμφωνα με:

$$1 \text{ m}^3 = 10^9 \text{ mm}^3 (1000\text{mm} * 1000\text{mm} * 1000\text{mm}) \text{ ή } 10^{18} \mu\text{m}^3 (10^6 \mu\text{m} * 10^6 \mu\text{m} * 10^6 \mu\text{m})$$

Κατά συνέπεια αν ο βιοόγκος μιας ομάδας εκτιμηθεί σε $a \mu\text{m}^3$ τότε μπορεί εύκολα να εκτιμηθεί η βιομάζα σύμφωνα με:

Τα $10^{18} \mu\text{m}^3$ από πλαγκτόν έχουν μάζα **1,025 kg**

Τα **a** **X**

$$X = 1,025 \text{ Kg} * a \mu\text{m}^3 / 10^{18} \mu\text{m}^3$$

γ) Επιπλέον πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ της αφθονίας, του κυτταρικού όγκου και της επιφανειακής χλωροφύλλη-α (Chl-a) όπως αυτή εκτιμήθηκε χρησιμοποιώντας δύο εικόνες Sentinel-2 και εμπειρικούς αλγόριθμους. Για κάθε δορυφορική εικόνα, χρησιμοποιήθηκαν τα αντίστοιχα in situ δεδομένα από τους πέντε σταθμούς (Triantaphyllou et al., 2018) για την ανάπτυξη και την αξιολόγηση των αλγορίθμων. Στα αποτελέσματα εφαρμόστηκε ανάλυση παλινδρόμησης για τη διερεύνηση πιθανής συσχέτισης μεταξύ συγκεντρώσεων βιοόγκου και χλωροφύλλης-α.

B) Στατιστική ανάλυση

Στις έρευνες πεδίου, όταν εξετάζονται δείγματα ίδιων πληθυσμών (ομάδων) από διαφορετικές περιοχές ή σε διαφορετικές χρονικές στιγμές πολλές φορές εμφανίζονται διαφορές μεταξύ τους είτε ως προς το χώρο είτε ως προς το χρόνο. Είναι λοιπόν σημαντικό να ελεγχθεί αν οι παρατηρούμενες χώρο-χρονικές διαφορές οφείλονται σε τυχαία πειραματικά σφάλματα και κατά συνέπεια μπορεί να θεωρηθεί ότι δεν είναι σημαντικές ή αν κάποιοι συστηματικοί λόγοι προκαλούν σημαντικές διαφορές.

Σε αυτές τις περιπτώσεις εξετάζονται οι παράμετροι της κεντρικής τάσης από κάθε δείγμα, που είναι ο αριθμητικός μέσος όρος ή απλά μέσος όρος και η διάμεσος. Ενώ πολλές φορές το

ενδιαφέρον εστιάζεται στις παρατηρούμενες συχνότητες και στην εξέταση αν αυτές διαφέρουν στατιστικά μεταξύ τους.

Σε όλες τις περιπτώσεις η μηδενική υπόθεση θεωρεί ότι οι εξεταζόμενοι παράμετροι δε διαφέρουν στατιστικά σημαντικά μεταξύ τους σε ένα επίπεδο σημαντικότητας (α) που ορίζεται από τον ερευνητή, συνήθως (0,05). Τα στατιστικά προγράμματα υπολογίζουν την πιθανότητα p κάτω από την οποία δεν εμφανίζεται στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των δειγμάτων έτσι αν $p < \alpha$ τότε η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται και συνεπώς θεωρείται ότι οι διαφορές που παρατηρούνται είναι στατιστικά σημαντικές.

Αν τα δείγματα ακολουθούν κανονική κατανομή (μέσος όρος και διάμεσος συμπίπτουν) τότε η σύγκριση των μέσων όρων γίνεται με τη χρήση της ανάλυσης διακύμανσης (ANOVA) με μηδενική υπόθεση:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_n$$

Αν $p < 0,05$ τότε απορρίπτεται η μηδενική υπόθεση και τουλάχιστον ένα μέσος διαφέρει στατιστικά σημαντικά.

Αν τα δείγματα δεν ακολουθούν κανονική κατανομή τότε εξετάζονται η διάμεσοι που είναι πιο ανθεκτικοί εκτιμητές αφού δεν επηρεάζονται από ακραίες τιμές, με μηδενική υπόθεση

$$H_0: \delta_1 = \delta_2 = \dots = \delta_n$$

Η εξέταση της ύπαρξης ή μη στατιστικής διαφοράς μεταξύ των θεωρητικά αναμενόμενων συχνοτήτων και των παρατηρούμενων συνήθως χρησιμοποιείται το χ^2 τεστ.

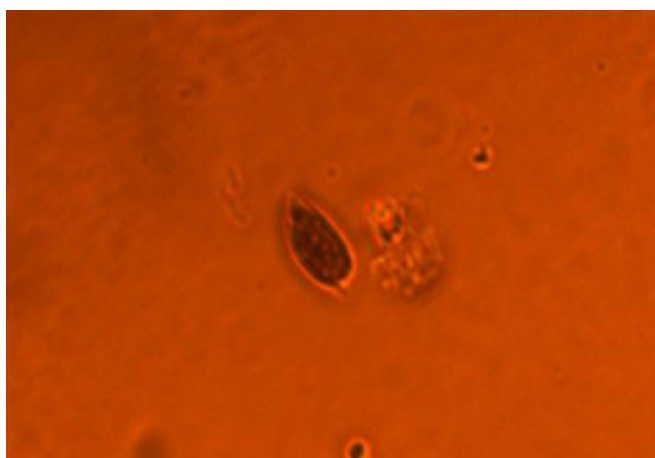
Στη παρούσα εργασία ο έλεγχος της κανονικότητας πραγματοποιήθηκε με τα τεστ των Anderson-Darlin και Kolmogorov-Smirnov. Για τον έλεγχο των υποθέσεων πραγματοποιήθηκε one-way ANOVA (σε δείγματα που ακολουθούν κανονική κατανομή) και Kruskal-Wallis (μη κανονική). Principal Component Analysis (PCA) και Hierarchical Cluster analysis εφαρμόστηκαν για την ομαδοποίηση των παρατηρήσεων. Σε όλες τις περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Minitab v.16.1.1.

Αποτελέσματα

Από τις δειγματοληψίες που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή (Μάρτιος 2017 και Σεπτέμβριος 2016) προσδιορίστηκαν τα εξής γένη:

Dinophyceae (8 γένη)

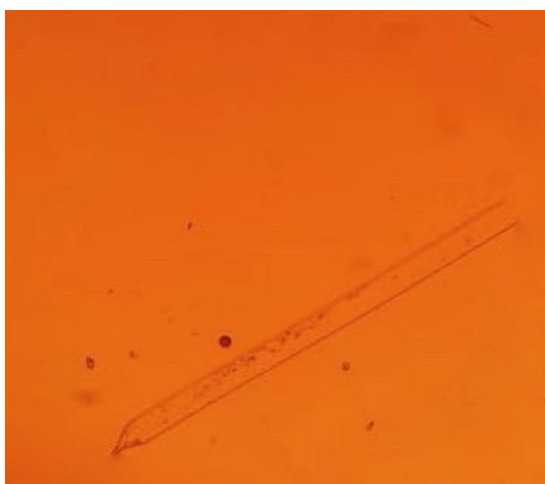
Prorocentrum, *Protoperdinium*, *Tripes*, *Dinophysis*, *Scripsiella*, *Gonyaulax*, *Gyrodinium*, *Diplopsalis*. Ορισμένα άτομα που δεν ήταν δυνατόν να προσδιοριστούν σε επίπεδο γένους εξαιτίας αντικειμενικών δυσχερειών χαρακτηρίστηκαν ως «Unidentified dinoflagellate».



Εικόνα 6. *Prorocentrum* sp.

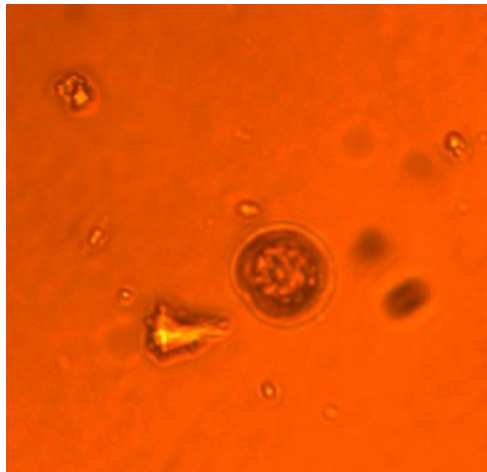
Bacillariophyceae (5 γένη)

Chaetocheros, *Rhizosolenia*, *Nitzschia*/*Pseudo-Nitzschia*, *Thalassiosira*, *Navicula*.



Εικόνα 7. *Pseudo-nitzschia* sp.

Coccolithophores (1 γένος)
Emiliania.



Εικόνα 8. *Emiliania* sp.

Οι παραπάνω φωτογραφίες ανήκουν στο κυρίαρχο γένος από κάθε ομάδα φυτοπλαγκτόν και είναι εικόνες από το ανάστροφο μικροσκόπιο.

Όπως προκύπτει από την ανάλυση των δεδομένων οι θερμοκρασίες νερού κατά τη διάρκεια του Σεπτεμβρίου είχαν σχετικά υψηλές τιμές, μεταξύ 22,7°C στα 60 m και 27,5°C στα 2 m, ενώ τον Μάρτιο του 2017 οι θερμοκρασίες κυμάνθηκαν με μικρότερο εύρος τιμών μεταξύ 14,4-15,5°C (Triantaphyllou et al., 2018). Η αλατότητα ήταν γενικά μεγαλύτερη από 38 psu (εύρος τιμών μεταξύ 37.1 και 38.9 psu), με τις χαμηλότερες τιμές να παρατηρούνται κυρίως κατά τη δειγματοληψία Σεπτεμβρίου. Οι μέσες τιμές pH κυμαίνονταν μεταξύ 7,61 και 8,18 κατά τη διάρκεια δειγματοληψίας Σεπτεμβρίου, ενώ στη δειγματοληψία του Μαρτίου οι τιμές ήταν σχετικά μικρότερες με τις μέσες τιμές να κυμαίνονται μεταξύ 7,17 και 7,92 (Πίνακας 1).

Από την ανάλυση των δειγμάτων ταυτοποιήθηκαν πέντε γένη διατόμων (Baccillariophyceae) εννέα δινομαστιγωτών (Dinophyceae) (Πίνακας 2) και από τα κοκκολιθοφόρα επικρατέστερο ήταν η *Emiliania*. Για κάθε μια από τις τρεις ομάδες και σε κάθε σταθμό υπολογίστηκε η μέση αφθονία (κύτταρα ανά λίτρο) σε διάφορα βάθη όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 1. Χημική σύσταση του νερού στα δείγματα που αναλύθηκαν (από Triantaphyllou et al., 2018).

station	SEEP (P1)			P2			P3		P3		P4		P4		P5		F1		R1		L5
depth interval (m)	0-20			0-20			0-20		40-60		0-20		40-60		0-20		0-20		0-20		0-20
sampling period	Sept-2011 (n = 40)	Sept-2016 (n = 3)	March 2017 (n = 3)	Sept-2011 (n = 26)	Sept-2016 (n = 3)	March 2017 (n = 3)	Sept-2016 (n = 4)	March 2017 (n = 4)	Sept-2016 (n = 2)	March 2017 (n = 2)	Sept-2016 (n = 4)	March 2017 (n = 4)	Sept-2016 (n = 2)	March 2017 (n = 2)	Sept-2016 (n = 3)	March 2017 (n = 3)	Sept-2016 (n = 2)	March 2017 (n = 2)	Sept-2016 (n = 3)	March 2017 (n = 3)	Sept-2016 (n = 1)
pH min	6.53*	6.93	7.61	7.27*	7.57	7.65	7.66	7.73	7.81	7.66	8.15	7.83	8.09	7.82	8.15	7.86	7.95	7.20	8.06	7.08	7.80
Ω _{Al} min	0.09*	0.51	1.03	0.57*	1.40	1.12	1.72	1.31	2.10	1.13	4.39	1.60	3.57	1.57	4.34	1.71					
Ω _{Ca} min	0.13*	0.34	1.60	0.88*	2.11	1.74	2.59	2.03	3.19	1.75	6.59	2.49	5.42	2.44	6.54	2.65					
pH median	7.69*	7.61	7.69	7.88*	7.66	7.70	7.73	7.73	7.84	7.71	8.17	7.85	8.10	7.84	8.18	7.92	7.99	7.39	8.13	7.17	7.80
Ω _{Al} median	1.16*	1.51	1.23	2.3*	1.69	1.25	1.99	1.31	2.23	1.25	4.54	1.67	3.63	1.64	4.57	1.93					
Ω _{Ca} median	2.45*	2.27	1.91	3.5*	2.54	1.94	2.99	2.03	3.39	1.95	6.83	2.60	5.52	2.54	6.88	3.00					
pH max	7.99*	7.61	7.77	8.13*	7.66	7.70	7.76	7.77	7.87	7.75	8.21	8.02	8.11	7.85	8.22	7.95	8.03	7.57	8.14	7.60	7.80
Ω _{Al} max	3.45*	1.51	1.46	4.05*	1.69	1.25	2.12	1.42	2.37	1.36	4.86	2.36	3.70	1.67	4.89	2.05					
Ω _{Ca} max	5.20*	2.27	2.26	6.10*	2.54	1.94	3.18	2.21	3.60	2.12	7.30	3.67	5.62	2.59	7.36	3.19					
NO ₃ + NO ₂	0.12*	0.02	15.22	0.14*	0.03	15.32	0.04	15.49	0.08	15.71	0.04	16.38	0.05	16.21		16.40	0.07	16.02	0.24	16.27	
NH ₄	0.23*	0.14	0.42	0.26*	0.06	0.29	0.18	1.72	0.07	0.92	0.07	1.33	0.06	1.43		2.00	0.10	0.56	0.14	0.34	
PO ₄	0.025*	0.00	0.10	0.03*	0.02	0.08	0.02	0.06	0.00	0.16	0.03	0.03	0.03	0.57		0.08	0.09	0.11	0.06	0.03	
SiO ₂	4.02**	0.54	0.87	6.37**	0.74	0.35	0.54	0.79	0.75	2.52	0.73	0.19	0.72	0.57		0.22	0.38	0.65	2.15	0.61	
total chl-a		0.374		no data	0.358	0.980	0.423	1.536	0.314	1.902	0.073	0.886	0.157	3.708							

Πίνακας 2. Παρουσία (+) ή απουσία (-) των κυριότερων ταξινομικών ομάδων ανά σταθμό και εποχή. **+(M)** or **+(S)** δείχνουν την εμφάνιση μόνο τον Μάρτιο ή το Σεπτέμβριο αντίστοιχα.

Genus	P1	P2	P3	P4	P5	L2	L3	L5	F1	R1	Season of max value
Dinophyceae											
<i>Dinophysis</i>	+	+	+	+	+	+	-	-	+	-	March
<i>Diplopsalis</i>	+	+	-	-	+	-	-	-	+	+	September
<i>Gonyaulax</i>	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	September
<i>Gyrodinium</i>	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	September
<i>Prorocentrum</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	September
<i>Protoperdinium</i>	+	+	+(S)	+(S)	+	+	-	+	+	+	September
<i>Scropsiella</i>	+	+(S)	+(S)	+(S)	+(S)	+	+	+	-	+	September
<i>Tripes</i>	+	+	+(S)	+(M)	+(M)	+	-	-	+	+	March
<i>Unidentified dinoflagellate</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	March
Bacillariophyceae											
<i>Chaetocheros</i>	+(M)	+	+(M)	+	+(M)	-	-	-	+	-	March
<i>Navicula</i>	+(M)	+(M)	+(M)	-	+	-	-	-	-	-	March
<i>Nitzschia/Pseudo-nitzschia</i>	+(M)	+(M)	+(M)	+(M)	+(M)	-	+	-	+(M)	-	March
<i>Rhizosolenia</i>	+	+	+(M)	+(M)	+(M)	+	-	-	+	-	March
<i>Thalassiosira</i>	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	September
Coccolithophores	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	September

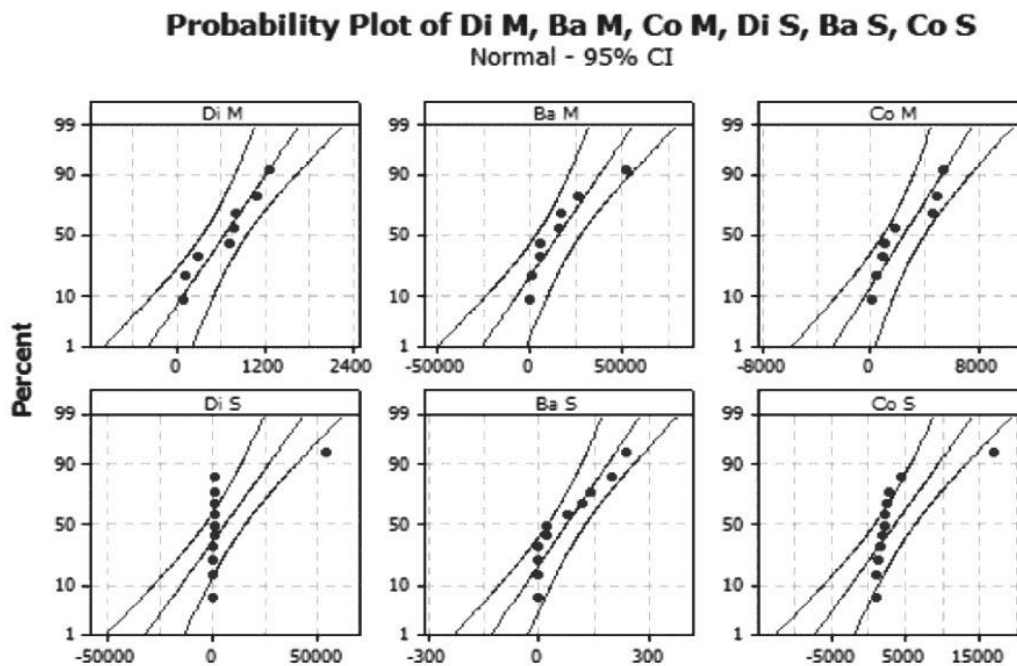
Στις αρχές της άνοιξης, τα διάτομα έχουν υψηλή πυκνότητα πληθυσμών με κυρίαρχο γένος *Nitzschia/Pseudo-nitzschia*, το οποίο είναι πολύ συνηθισμένο στις κύριες περιοχές καλλιέργειας και συλλογής οστρακοειδών της Ελλάδας (Moschandreu and Nikolaidis, 2010). Τον Σεπτέμβριο, τα διάτομα εκπροσωπούνται από χαμηλές πυκνότητες σε όλους τους σταθμούς, και σε τέσσερα διαφορετικά δείγματα από τρεις σταθμούς δεν ανιχνεύθηκαν καθόλου. Κατά την ίδια περίοδο, τα δινομαστιγωτά εμφανίστηκαν με μέγιστες συγκεντρώσεις κυττάρων, ενώ τα κοκκολιθοφόρα εμφανίζουν μικρές διακυμάνσεις (Πίνακας 3).

Από τα δινομαστιγωτά τον Σεπτέμβριο και τον Μάρτιο επικρατέστερο εμφανίζεται το γένος *Prorocentrum* με μέγιστες τιμές στον F1 κατά το φθινόπωρο ($35,5 \times 10^3$ cells l⁻¹). Στα διάτομα τον Σεπτέμβριο κυριαρχεί το γένος *Rhizosolenia*, ενώ τον Μάρτιο το γένος *Nitzschia* ή *Pseudo-nitzschia* ($33,9 \times 10^3$ cells l⁻¹) με μέγιστες τιμές στους P σταθμούς. Ενώ από τα κοκκολιθοφόρα το γένος *Emiliania* επικρατεί σε όλους τους σταθμούς με μέγιστες τιμές στους F1 (Σεπτέμβριο) και P5 (Μάρτιο).

Πίνακας 3. Μέση αφθονία για την κάθε ομάδα του φυτοπλαγκτον (κύτταρα ανά λίτρο) για κάθε σταθμό και βάθος τις δύο εποχές.

station	samples	depth (m)	Din Mar-17	Bacc Mar-17	Coccos Mar-17	samples	Din Sep-16	Bacc Sep-16	Coccos Sep-16
P1	2	0-5	820	1640	280	2	1400	200	1480
P2	2	0-5	740	26550	4860	2	1840	120	1070
P3	1	0-20	120	5960	1000	2	480	n.de.	2300
P3	3	20-60	307	6200	800	3	200	n.de.	947
P4	1	0-20	1280	53000	4600	2	340	80	2060
P4	3	20-60	93	393	60	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
P5	2	0-20	780	16550	5400	2	860	20	880
F1	2	0-5	1100	17800	1760	2	55250	240	16950
L2	n.d.	0-5	n.d.	n.d.	n.d.	2	1760	140	2100
L3	n.d.	3	n.d.	n.d.	n.d.	1	1040	n.de.	4360
L5	n.d.	3	n.d.	n.d.	n.d.	1	1000	n.de.	1800
R1	n.d.	0-5	n.d.	n.d.	n.d.	2	1780	20	5240

Για να εξεταστεί η σημαντικότητα της μεταβλητότητας μεταξύ των τριών ταξινομικών ομάδων και των δύο εποχών πρώτα έγινε έλεγχος της κανονικότητας με το τεστ των Anderson-Darlin (Εικ. 9). Το τεστ υπολόγισε την πιθανότητα να ισχύει η μηδενική υπόθεση ίση με 0. Αυτό σημαίνει ότι μεταξύ των δύο εποχών εμφανίζεται στατιστικά σημαντική διαφορά.



Εικόνα 9. Έλεγχος της κανονικότητας των δειγμάτων με το τεστ Anderson-Darlin.

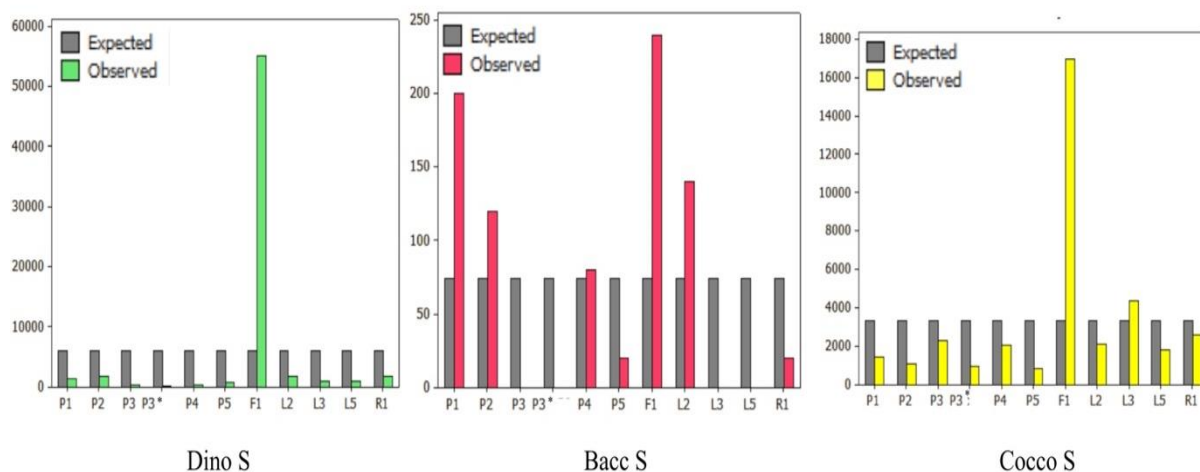
Όπως φαίνεται τον Σεπτέμβρη τα δείγματα δεν ακολουθούν κανονική κατανομή, για το λόγο αυτό αντι για ANOVA εφαρμόστηκε το τεστ των Kruskal-Wallis (μη παραμετρική στατιστική) με H_0 : οι διάμεσοι των δειγμάτων δεν διαφέρουν στατιστικά σημαντικά και εναλλακτική υπάρχει διαφορά μεταξύ τους.

Η ανάλυση παρουσιάζεται στον Πίνακα 4 που ακολουθεί.

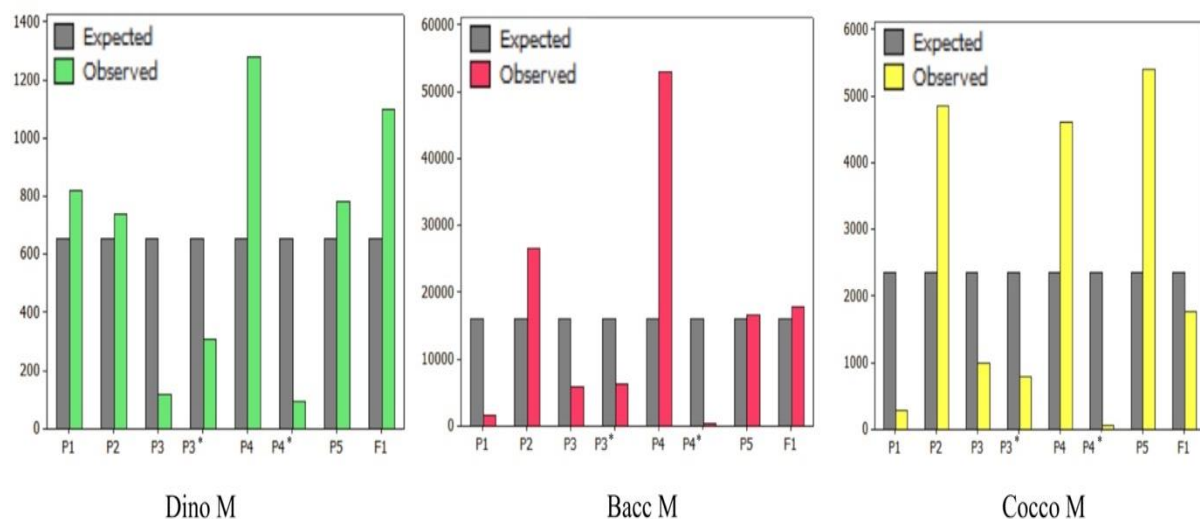
Πίνακας 4. Kruskal-Wallis τεστ για την εξέταση των διαφορών μεταξύ των τριών ομάδων και των εποχών.

	N	Median	Ave Rank	Z
Ba M	8	11375.00	46.6	3.24
Ba S	11	20.00	7.3	-4.83
Co M	8	1380.00	32.0	0.55
Co S	11	2060.00	39.3	2.28
Di M	8	760.00	21.1	-1.46
Di S	11	1040.00	31.2	0.50
Overall	57		29.0	p=0.0

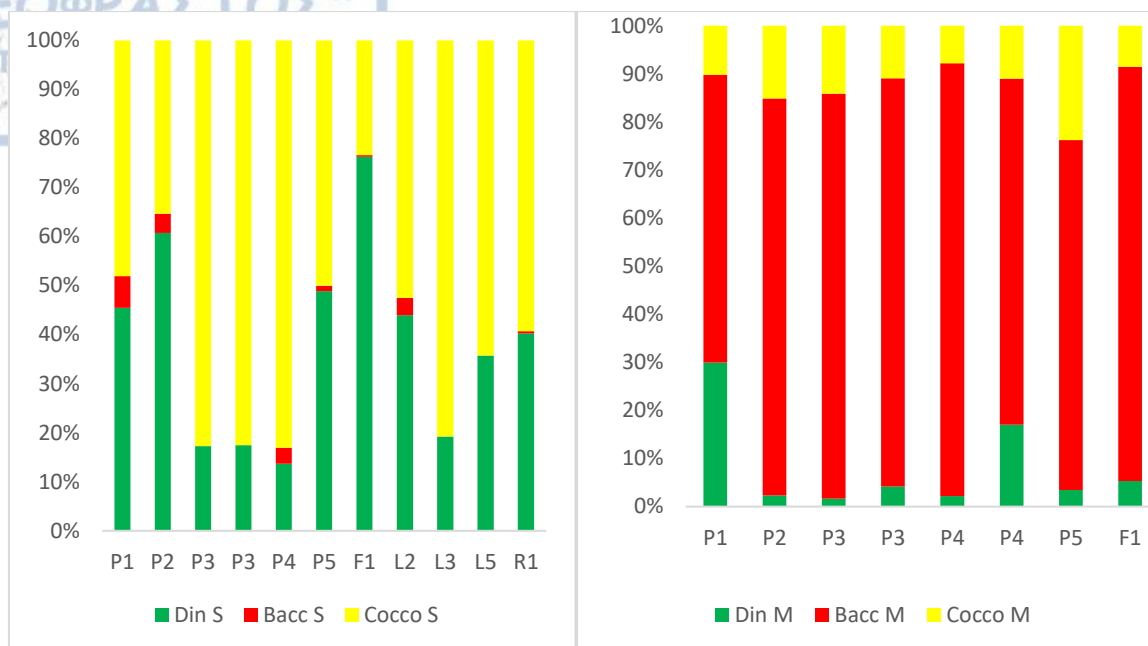
Εφόσον η εποχιακή μεταβλητότητα, που παρατηρήθηκε, βρέθηκε στατιστικά σημαντική, στη συνέχεια για την κάθε ομάδα (διάτομα, δινωμαστιγγωτά και κοκκολιθοφόρα) και την κάθε εποχή διερευνήθηκε αν εμφανίζονται στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των σταθμών. Εφαρμόστηκε το χ^2 test (chi square test) (Εικ. 10 και 11). Σε όλες τις περιπτώσεις η μηδενική υπόθεση (μη ύπαρξη διαφορών μεταξύ των σταθμών) απορρίπτεται αφού οι διαφορές στις τιμές μεταξύ των θεωρητικά αναμενόμενων (στη περίπτωση της ισότητας) και αυτών που μετρήθηκαν στο πεδίο είναι στατιστικά σημαντικές ($p < 0.05$).



Εικόνα 10. Θεωρητικά αναμενόμενες τιμές (γκρι) και μετρήσεις πεδίου (έγχρωμα) για την κάθε ομάδα τον Σεπτέμβρη.



Εικόνα 11. Θεωρητικά αναμενόμενες τιμές (γκρι) και μετρήσεις πεδίου (έγχρωμα) για την κάθε ομάδα τον Μάρτη.



Εικόνα 12. Ποσοστιαία συμμετοχή της αφθονίας των ομάδων του φυτοπλαγκτόν ως τμήμα της συνολικής αφθονίας σε κάθε σταθμό το Σεπτέμβριο (αριστερά) και τον Μάρτιο (δεξιά).

Στη συνέχεια εκτιμήθηκε ο συνολικός κυτταρικός όγκος ($\mu\text{m}^3/\text{L}$), για το κάθε γένος ξεχωριστά ανά σταθμό και βάθος, καθώς επίσης και ο συνολικός όγκος της κάθε μια από τις τρεις κύριες ομάδες (Πίνακας 5 και 6). Επειδή έχει αναφερθεί ότι η συντήρηση των δειγμάτων σε διαλύματα Lugol μπορεί να επηρεάζει τον κυτταρικό όγκο (Sarno et al. 1993, Zarauz and Irigoien 2008, Yang et al. 2017), οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν αναζητήθηκαν στη διεθνή βιβλιογραφία (Strom and Morello 1998, Harrison et al. 2015). Δόθηκε έμφαση οι τιμές να προέρχονται από την περιοχή της Μεσογείου και ιδιαίτερα, όπου ήταν δυνατόν, από παράκτιες περιοχές.

Πίνακας 5. Συνολικός βιο όγκος ($\mu\text{m}^3/\text{l}$) για το κάθε γένος φυτοπλαγκτόν σε όλους τους σταθμούς και σε διαφορά βάθη όπως εκτιμήθηκαν από τα δείγματα του Σεπτεμβρίου.

	<i>p1-2m</i>	<i>p1-5m</i>	<i>p2-2m</i>	<i>p2-5m</i>	<i>p3-2m</i>	<i>p3-10m</i>	<i>p3-20m</i>	<i>p3-40m</i>	<i>p4-10m</i>	<i>p5-2m</i>
<i>Prorocentrum</i>	1,3E+06	8,0E+05	1,5E+05	2,2E+06	3,5E+05	1,0E+05	2,5E+05	3,5E+05	3,0E+05	1,5E+05
<i>Protoperdinium</i>	3,4E+06	0	0	7,7E+06	1,9E+06	0	0	0	0	9,6E+05
<i>Tripos</i>	3,3E+06	3,3E+06	3,3E+06	1,6E+06	1,6E+06	1,6E+06	0	3,3E+06	0	0
<i>Dinophysis</i>	1,7E+06	1,7E+06	0	0	0	1,7E+06	0	0	0	0
<i>Scrippsiella</i>	9,5E+05	1,9E+05	1,9E+05	3,0E+06	0	0	3,8E+05	9,5E+05	3,8E+05	1,9E+05
<i>Gonyaulax</i>	0	1,4E+06	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Diplopsalis</i>	0	1,8E+06	0	3,6E+06	0	0	0	0	0	3,6E+06
<i>Gyrodinium</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Unidentified dinoflagellate</i>	3,1E+06	2,3E+06	3,1E+06	3,1E+06	0	7,6E+05	0	7,6E+05	0	0
Dinophyceae sum	1,4E+07	1,1E+07	6,7E+06	2,1E+07	3,9E+06	4,2E+06	6,3E+05	5,3E+06	6,8E+05	4,9E+06
<i>Chaetochros</i>	0	0	2,4E+05	0	0	0	0	0	0	0
<i>Rhizosolenia</i>	1,5E+07	1,1E+07	1,5E+07	0	0	0	0	0	0	0
<i>Nitzschia/Pseudo-nitzschia</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Thalassiosira</i>	0	1,8E+06	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Navicula</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Baccillaroophyceae sum	1,5E+07	1,3E+07	1,5E+07	0	0	0	0	0	0	0
<i>Coccolithophors</i>	1,5E+05	1,2E+05	1,1E+05	8,1E+04	1,2E+05	2,3E+05	6,5E+04	1,5E+05	2,4E+05	7,9E+04

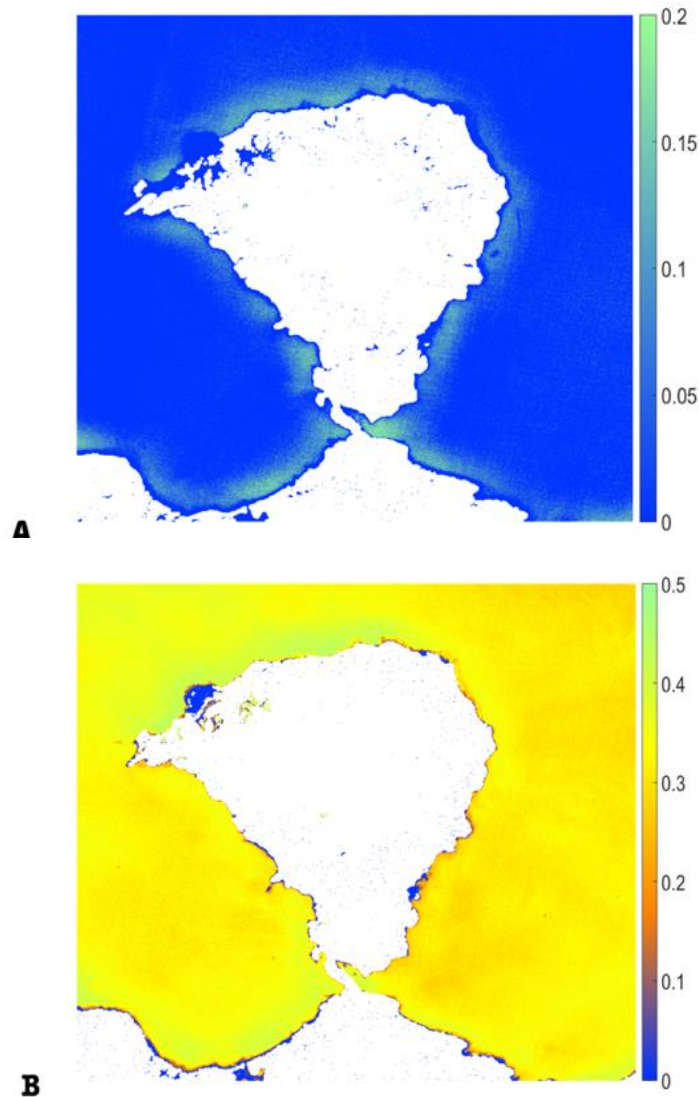
Continue	<i>p5-5m</i>	<i>L2-2m</i>	<i>L2-5m</i>	<i>L3-3m</i>	<i>L5-3m</i>	<i>R1-2m</i>	<i>R1-5m</i>	<i>F1-2m</i>	<i>F1-5m</i>
<i>Prorocentrum</i>	1,0E+06	1,2E+06	1,4E+06	1,0E+06	7,5E+05	2,1E+06	1,5E+06	9,3E+07	4,4E+07
<i>Protoperdinium</i>	2,4E+06	2,4E+06	2,9E+06	0	0	0	9,6E+05	0	0
<i>Tripos</i>	0	1,6E+06	3,3E+06	0	0	1,6E+06	1,6E+06	1,6E+06	3,3E+06
<i>Dinophysis</i>	0	3,4E+06	3,4E+06	0	3,4E+06	0	5,0E+06	1,7E+06	0
<i>Scrippsiella</i>	9,5E+05	1,1E+06	9,5E+05	1,9E+05	7,6E+05	3,8E+05	1,9E+05	0	0
<i>Gonyaulax</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Diplopsalis</i>	1,8E+06	0	0	0	0	0	1,8E+06	0	3,6E+06
<i>Gyrodinium</i>	1,7E+06	3,4E+06	0	0	0	0	0	0	0
<i>Unidentified dinoflagellate</i>	2,3E+06	3,8E+06	1,5E+06	3,8E+06	3,1E+06	3,1E+06	1,5E+06	7,6E+05	1,5E+06
Dinophyceae sum	1,0E+07	1,7E+07	1,3E+07	5,0E+06	7,9E+06	7,2E+06	1,3E+07	9,7E+07	5,3E+07
<i>Chaetochros</i>	0	0	0	0	0	0	0	3,6E+05	3,6E+05
<i>Rhizosolenia</i>	0	7,5E+06	7,5E+06	0	0	3,8E+06	0	1,1E+07	3,8E+06
<i>Nitzschia/Pseudo-nitzschia</i>	0	0	1,3E+05	0	0	0	0	8,7E+04	0
<i>Thalassiosira</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Navicula</i>	6,4E+04	0	0	0	0	0	0	0	0
Baccillaroophyceae sum	6,4E+04	7,5E+06	7,7E+06	0	0	3,8E+06	0	1,2E+07	4,1E+06
<i>Coccolithophores</i>	7,9E+04	1,6E+05	2,2E+05	3,9E+05	1,6E+05	2,2E+05	2,6E+05	5,3E+05	2,5E+06

Πίνακας 6. Συνολικός βιο όγκος ($\mu\text{m}^3/\text{l}$) για το κάθε γένος φυτοπλαγκτόν σε όλους τους σταθμούς και σε διαφορά βάθη όπως εκτιμήθηκαν από τα δείγματα του Μάρτη.

	P1-0m	P1-5m	P2-0m	P2-2m	P2-4m	P3-20m	P3-40m	p3-60m
<i>Prorocentrum</i>	2,5E+05	2,5E+05	3,5E+05	2,5E+05	3,0E+05	5,0E+04	0	1,0E+06
<i>Protoperdinium</i>	1,4E+06	0	1,4E+06	0	0	0	0	0
<i>Triplos</i>	0	6,6E+06	3,3E+06	3,3E+06	1,6E+06	0	0	0
<i>Dinophysis</i>	3,4E+06	6,7E+06	6,7E+06	1,7E+06	5,0E+06	3,4E+06	0	3,4E+06
<i>Scrippsiella</i>	3,8E+05	3,8E+05	0	0	0	0	0	0
<i>Unidentified dinoflagellate</i>	6,9E+06	3,8E+06	7,6E+05	1,5E+06	0	0	0	7,6E+05
Dinophyceae sum	1,2E+07	1,8E+07	1,3E+07	6,7E+06	7,0E+06	3,4E+06	0	5,1E+06
<i>Chaetoceros</i>	0	2,4E+05	1,1E+06	2,6E+06	9,3E+05	4,8E+05	1,6E+06	1,1E+06
<i>Rhizosolenia</i>	0	7,5E+06	1,5E+07	7,5E+06	3,8E+07	3,8E+06	1,1E+07	0
<i>Nitzschia/Pseudonitzschia</i>	3,5E+05	3,0E+06	1,1E+07	2,2E+07	2,2E+07	6,2E+06	9,5E+06	9,4E+06
<i>Navicula</i>	0	1,3E+05	5,7E+05	1,9E+05	6,4E+04	0	0	3,2E+05
Baccillariophyceae sum	3,5E+05	1,1E+07	2,7E+07	3,2E+07	6,1E+07	1,0E+07	2,2E+07	1,1E+07
<i>Coccolithophores</i>	1,8E+04	3,2E+04	2,3E+05	3,9E+05	2,5E+05	9,0E+04	6,5E+04	1,5E+05

Continue	P4-2m	P4-20m	P4-40m	P4-60m	P5-2m	P5-10m	P5-20m	F1-2m	F1-5m
<i>Prorocentrum</i>	7,0E+05	0	5,0E+04	1,3E+07	7,5E+05	5,0E+04	0	1,5E+06	4,0E+05
<i>Protoperdinium</i>	0	0	0	0	9,6E+05	0	0	4,8E+05	4,8E+05
<i>Triplos</i>	1,6E+06	4,9E+06	1,6E+06	0	3,3E+06	0	4,9E+06	3,3E+06	6,6E+06
<i>Dinophysis</i>	1,7E+07	3,4E+06	8,4E+06	2,0E+07	5,0E+06	1,2E+07	8,4E+06	3,4E+06	5,0E+06
<i>Scrippsiella</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Unidentified dinoflagellate</i>	1,5E+06	0	1,5E+06	0	0	0	7,6E+05	2,3E+06	1,5E+06
Dinophyceae sum	2,1E+07	8,3E+06	1,2E+07	3,3E+07	1,0E+07	1,2E+07	1,4E+07	1,1E+07	1,4E+07
<i>Chaetoceros</i>	2,7E+06	1,1E+06	4,8E+05	8,6E+06	1,8E+06	2,7E+06	9,3E+05	4,8E+05	1,4E+06
<i>Rhizosolenia</i>	7,5E+06	1,1E+07	1,1E+07	0	7,5E+07	2,3E+07	7,5E+06	3,8E+06	1,5E+07
<i>Nitzschia/Pseudonitzschia</i>	1,9E+07	3,7E+07	2,5E+07	2,2E+07	9,0E+06	1,4E+07	9,8E+06	1,3E+07	2,4E+07
<i>Navicula</i>	1,9E+05	6,4E+04	1,9E+05	6,4E+04	1,3E+05	1,3E+05	6,4E+04	0	0
Baccillariophyceae sum	2,9E+07	4,9E+07	3,7E+07	3,1E+07	8,6E+07	3,9E+07	1,8E+07	1,8E+07	4,1E+07
<i>Coccolithophores</i>	3,2E+05	9,7E+04	4,1E+05	2,3E+05	2,1E+05	5,3E+05	2,3E+05	1,6E+05	1,6E+05

Η χλωροφύλλη-α για κάθε εποχή εκτιμήθηκε με τη χρήση δορυφορικών εικόνων. Για κάθε δορυφορική εικόνα, χρησιμοποιήθηκαν τα αντίστοιχα δεδομένα πεδίου από τους πέντε σταθμούς (Triantaphyllou et al., 2018) για την ανάπτυξη και την αξιολόγηση των αλγορίθμων που αναπτύχθηκαν (Εικ. 13). Η ανάλυση της απλής γραμμικής παλινδρόμησης έδειξε ότι δεν υφίσταται γραμμική σχέση μεταξύ του βιο όγκου και της χλωροφύλλης-α στα επιφανειακά στρώματα της περιοχής μελέτης.



Εικόνα 13. Οι συγκεντρώσεις της χλωροφύλλης-α στην επιφάνεια των υδάτων όπως εκτιμήθηκε από την ανάλυση δορυφορικών δεδομένων.

Συζήτηση

Εξετάζοντας συνολικά τις τρεις κύριες ομάδες από το φυτοπλαγκτόν, αλλά και ξεχωριστά το κάθε γένος, παρατηρήθηκε στατιστικά σημαντική χωρο-χρονική μεταβλητότητα ως προς την αφθονία, τον βιο όγκο και τη συγκέντρωση της χλωροφύλλης-α. Στην εργασία αυτή γίνεται μια πρώτη προσπάθεια να μελετηθεί αν οι μεταβολές αβιοτικών παραγόντων που σχετίζονται με το φαινόμενο του θερμοκηπίου (όπως της θερμοκρασίας του pH και της αλατότητας) αλλά και των θρεπτικών που σχετίζονται με το φαινόμενο του ευτροφισμού μπορούν να ερμηνεύσουν την μεταβλητότητα παρατηρήθηκε.

Οι συγκεντρώσεις θρεπτικών ουσιών (Νιτρώδη, Νιτρικά, φωσφορικά και πυρίτιο) καθώς και της χλωροφύλλης-α σε όλα τα δείγματα που αναλύθηκαν βρέθηκε ότι εμφανίζουν τις τυπικές ολιγοτροφικές συνθήκες του Αιγαίου κατά η διάρκεια του καλοκαιριού, ενώ τον Μάρτιο οι τιμές των συγκεντρώσεων σε $\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$ αντικατοπτρίζει τον εποχικό εμπλουτισμό των θρεπτικών συστατικών και την επακόλουθη αύξηση της χλωροφύλλης-α (Triantaphyllou et al., 2018).

Οι μέγιστες τιμές τόσο στην αφθονία όσο και στη βιομάζα εμφανίζουν πολύ ισχυρή εποχικότητα. Τα δινομαστιγωτά εμφανίζουν τις μέγιστες τιμές τους το φθινόπωρο ενώ τα διάτομα την άνοιξη. Τα κοκολιθοφόρα εμφανίζουν μέγιστες τιμές το φθινόπωρο αλλά οι διαφορές από την άνοιξη είναι σχετικά μικρότερες (Πίνακας 3, 5, 6). Τα δεδομένα φαίνεται ότι ακολουθούν το πρότυπο της διαδοχής όπως προτάθηκε από τον Margalef (1967), και έρχεται σε συμφωνία με δεδομένα από άλλες περιοχές της Μεσογείου (Gilabert, 2001; Patoucheas and Dasiou, 2002; Patoucheas and Haritonidis 2002, Paches et al., 2019).

Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ισχυρά χρονικά μεταβαλλόμενοι παράγοντες οδηγούν σε αυτή την εμφάνιση. Από τους βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν το πολλαπλασιασμό των μονοκύτταρων φωτοσυνθετικών οργανισμών είναι η θερμοκρασία (Eppley, 1972), η ένταση (Steele, 1962) και η διάρκεια φωτός (φωτοπερίοδος) και τα διαλυμένα στο νερό θρεπτικά (Mercado et al. 2019).

Οι φυτοπλαγκτονικοί οργανισμοί, ως μονοκύτταροι ευκαρυωτικοί, πολλαπλασιάζονται με απλή διχοτόμηση σύμφωνα με:

$$N_t = N_0 \cdot 2^{rt},$$

όπου N_0 : αρχικός πληθυσμός,

N_t : ο πληθυσμός μετά από t ημέρες

και r : ο ρυθμός αύξησης (growth rate)

Ο Erppley (1972) αναλύοντας μια σειρά δεδομένων πεδίου βρήκε μια εμπειρική σχέση μεταξύ του ρυθμού αύξησης (r) και της θερμοκρασίας T (σε $^{\circ}\text{C}$):

$$\text{Log}_{10} r = 0.0275 T - 0.07 \quad \text{για } T < 40^{\circ}\text{C}.$$

Όπως φαίνεται από τα δεδομένα (Πίνακας 1) η μεταβολή της θερμοκρασίας μεταξύ των δύο εποχών είναι πολύ μεγάλη, από $22,7^{\circ}\text{C}$ - $27,5^{\circ}\text{C}$ τον Σεπτέμβριο σε $14,4$ - $15,5^{\circ}\text{C}$ τον Μάρτιο, ενώ επιπλέον, τον Σεπτέμβριο επηρεάζεται σημαντικά από το βάθος. Στα 60 m μετρήθηκε η μικρότερη τιμή $22,7^{\circ}\text{C}$ ενώ κοντά στην επιφάνεια η μέγιστη $27,5^{\circ}\text{C}$. Το ότι οι μεταβολές της θερμοκρασίας επιδρούν με ένα σχετικά ενιαίο τρόπο και στα τρία γένη φαίνεται στην εικόνα 14 όπου μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η ομοιότητα είναι ίδια και περίπου 70% και στα τρία γένη. Η παρατήρηση αυτή δείχνει πιθανά και τη τάση που μπορεί να εμφανιστεί στο μέλλον ως αποτέλεσμα του φαινομένου του θερμοκηπίου. Συνεπώς η αύξηση της θερμοκρασίας κατά τον Σεπτέμβριο μπορεί να ερμηνεύσει τη μεγάλη αύξηση της συνολικής αφθονίας και του βιοόγκου που παρατηρήθηκαν. Αδυνατεί όμως να ερμηνεύσει τις παρατηρούμενες μεταβολές ως προς τις ομάδες (Εικ. 12), όπου τον Μάρτιο επικρατούν τα διάτομα ενώ τον Σεπτέμβριο τα δινομαστιγωτά αλλά και ως προς τους σταθμούς και τα βάθη, όταν αναφερόμαστε στην ίδια εποχή (Πίνακας 3, 5, 6).

Το φως και τα θρεπτικά είναι αυτά που καθορίζουν τις διαφορές που αναφέραμε, αφού επιδρούν στο ρυθμό αύξησης των οργανισμών με τρόπο διαφορετικό ανάμεσα σε διαφορετικά είδη σε κάθε οικοσύστημα.

Έχει βρεθεί ότι ο συντελεστής r , όπως αυτός εκτιμήθηκε από τον Erppley (1972), αποτελεί μια μέγιστη τιμή όταν το φως και τα θρεπτικά δεν αποτελούν περιοριστικούς παράγοντες. Στο πεδίο όμως τόσο η ένταση και η διάρκεια της μέρας εμφανίζουν ετήσια περιοδικότητα (Μέγιστη τιμή 22 Ιουνίου ελάχιστη 22 Δεκεμβρίου).

Σύμφωνα με τον Steele (1962) ο ρυθμός αύξησης r περιορίζεται από την ένταση του φωτός σύμφωνα με την εξίσωση:

$$r = r(T) \frac{I}{I_{opt}} e^{(1 - \frac{I}{I_{opt}})}, \text{ όπου}$$

$r(T)$: ο ρυθμός αύξησης ως συνάρτηση της θερμοκρασίας

I : η ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και

I_{opt} : η άριστη ένταση για την ανάπτυξη του φυτοπλαγκτού.

Ο εκθέτης δηλώνει ότι για κάθε είδος υπάρχει μια άριστη τιμή έντασης πάνω από την οποία αρχίζει η φωτοαναστολή. Έχει βρεθεί ότι η άριστη τιμή για τα διάτομα είναι από 70 μέχρι 100

Watt, ενώ για τα δινομαστιγωτά οι αντίστοιχες τιμές κυμαίνονται μεταξύ 110 και 140 Watt (Paasche 1968, Brand and Guillard 1981, Valiela, 1984).

Η ένταση του φωτός και η φωτοπερίοδος εμφανίζουν πολύ μεγαλύτερες τιμές τον Σεπτέμβριο σε σχέση με τον Μάρτιο. Έτσι οργανισμοί όπως τα διάτομα έχουν προσαρμοστεί να εμφανίζουν τις μέγιστες τιμές σε σχετικά χαμηλές τιμές θερμοκρασίας και έντασης ηλιακής ακτινοβολίας αφού υψηλές τιμές προκαλούν φωτοαναστολή. Αντίθετα τα δινομαστιγωτά είναι καλύτερα προσαρμοσμένα τον Σεπτέμβριο. Ο μόνος σταθμός όπου οι βιο-όγκοι των διατόμων και δινομαστιγωτών είχαν παραπλήσιες τιμές το Σεπτέμβριο ήταν στην περιοχή του ηφαιστείου και αυτό χρειάζεται επιπλέον διερεύνηση.

Οι στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των σταθμών την ίδια εποχή φανερώνει την ύπαρξη μεταβαλλόμενων παραγόντων ως προς το χώρο με αποτέλεσμα να εμφανίζεται ένα μωσαϊκό από μικρο-περιβάλλοντα που οδηγεί στη διαφορετική ανάπτυξη των φυτοπλαγκτονικών οργανισμών (Εικ. 14). Τέτοιοι μπορεί να είναι τα θρεπτικά, και οι ηφαιστειακές εκροές.

Ο τρόπος πρόσληψης των θρεπτικών συστατικών (που είναι απαραίτητα για τη διατήρηση και τον πολλαπλασιασμό) διαφέρει από είδος σε είδος. Έχει βρεθεί ότι επηρεάζουν το ρυθμό αύξησης ακολουθώντας την εξίσωση των Michaelis Menten (Walsh, 1975; Andersen et al., 1987):

$$r = r(T,I) \frac{S}{K_s + S} \quad , \text{ όπου}$$

$r(T,I)$: ο ρυθμός αύξησης όπως καθορίζεται από την θερμοκρασία και το φως

S : η συγκέντρωση του εξεταζόμενου θρεπτικού και

K_s : συντελεστής ημικορεσμού

Από την παραπάνω εξίσωση γίνεται φανερό ότι το r θα έπαιρνε την μέγιστη τιμή αν ο συντελεστής K_s έτεινε στο μηδέν. Κατά συνέπεια όσο μικρότερος είναι ο K_s τόσο πιο γρήγορα ανταποκρίνεται στις μεταβολές των θρεπτικών.

Ο συντελεστής K_s διαφέρει σημαντικά μεταξύ διατόμων και δινομαστιγωτών. Ως προς το άζωτο (N) ο συντελεστής για τα μεν διάτομα παίρνει τιμές από 0,25-4 μM , ενώ για τα δινομαστιγωτά από 0,4 έως 10 μM . (Andersen and Nival, 1989).

Αφού τα διάτομα εμφανίζουν μικρό I_{opt} και μικρό συντελεστή ημικορεσμού αναμένεται με το που αρχίζει να αυξάνεται η θερμοκρασία και τα θρεπτικά να πολλαπλασιάζονται με ταχύτερους ρυθμούς αυξάνοντας με το τρόπο αυτό την αφθονία τους και το συνολικό βιο-όγκο επικρατώντας με το τρόπο αυτό των δινομαστιγωτών. Αντίθετα τα δινομαστιγωτά εμφανίζουν

τα μέγιστα πολύ αργότερα αφού οι αντίστοιχες τιμές των παραμέτρων είδαμε ότι είναι μεγαλύτερες. Στην Εικόνα 14 φαίνεται ότι τα διάτομα εμφανίζουν μεγαλύτερο ποσοστό ομοιότητας με τα θρεπτικά και την αλατότητα, επιβεβαιώνοντας τις παραπάνω παρατηρήσεις.

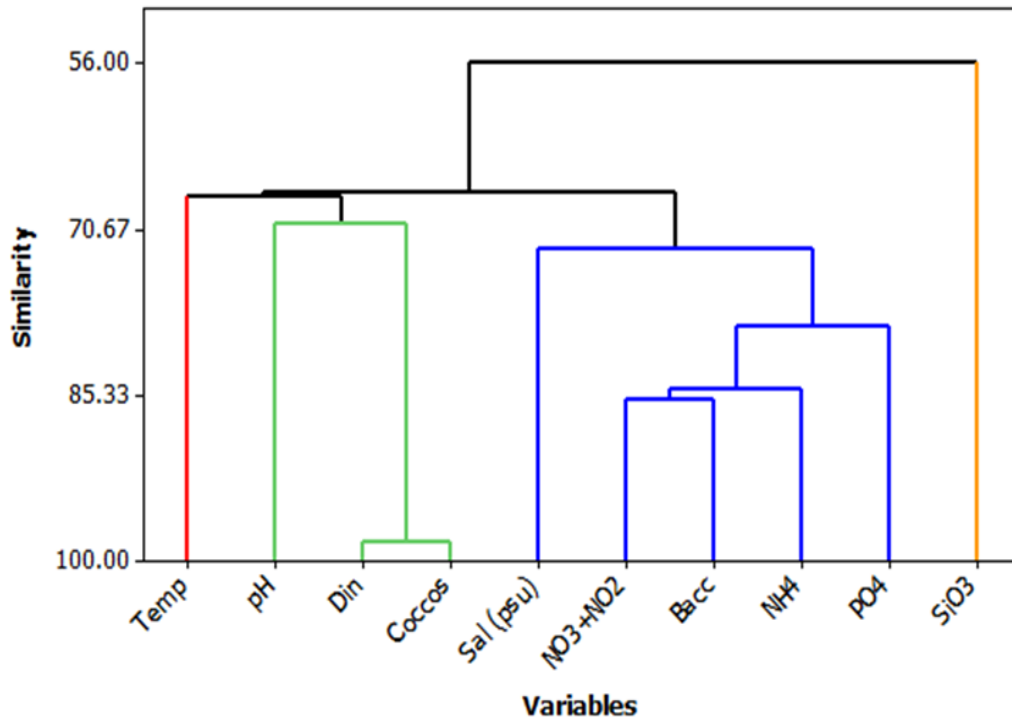
Το γεγονός ότι οι μεταβολές των δινομαστιγωτών και κοκκολιθοφόρων εμφανίζουν μεγάλες τιμές ομοιότητας μεταξύ τους αλλά και με το pH, χρειάζεται περισσότερη διερεύνηση αφού μπορεί να αποτελούν ενδείξεις για την τάση που είναι δυνατόν να εμφανιστεί στην περίπτωση αύξησης της μείωση του pH. Έτσι οι πρώτες ενδείξεις δείχνουν ότι η αύξηση της θερμοκρασίας τείνει να οδηγήσει σε αύξηση της βιομάζας ενώ η μείωση του pH των υδάτων πιθανά να ευνοεί περισσότερο τα κοκκολιθοφόρα και τα δινομαστιγωτά.

Ως προς την χλωροφύλλη α μπορεί να παρατηρηθεί ότι πολλές φορές εμφανίζονται διαφορές μεταξύ των μετρήσεων του πεδίου και των εκτιμήσεων με την ανάλυση δορυφορικών φωτογραφιών, για το λόγο αυτό κρίνεται πάντα απαραίτητο η χρήση διαφόρων αλγορίθμων (Ansper. and Alikas 2019). Όμως τόσο τα δεδομένα πεδίου όσο και η δορυφορική ανάλυση έδειξαν ότι οι μέγιστες τιμές χλωροφύλλης α παρατηρούνται την άνοιξη όπου επικρατούν τα διάτομα και τα κοκκολιθοφόρα.

Η διαφορετική τροφική συμπεριφορά των δινομαστιγωτών σε σχέση με τα διάτομα και τα κοκκολιθοφόρα μπορεί να συμβάλλει επιπλέον στην εμφάνιση της χωρο-χρονικής μεταβλητότητας. Τα διάτομα και τα κοκκολιθοφόρα είναι αποκλειστικά φωτοσυνθετικά και κατά συνέπεια επηρεάζονται απόλυτα από τους παράγοντες που προαναφέρθηκαν αντίθετα τα δινομαστιγωτά εμφανίζουν μια μεγάλη τροφική ποικιλομορφία αφού άλλα είναι αποκλειστικά φωτοσυνθετικά αλλά αποκλειστικά ετερότροφα (Jacobson and Anderson, 1993, Jeong and Latz 1994. Tiselius and Kuylenstierna, 1996, Ignatiades 2012), και πολλά επιλέγουν ανάλογα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες το τρόπο διατροφής τους (μιζότροφα) (Li et al. 1999) ενώ ορισμένα είδη μπορούν να «κρατήσουν» τους χλωροπλάστες από τα άτομα που θηρεύουν και να τους χρησιμοποιούν (Skonsgaard 1998). Το γεγονός ότι τα περισσότερα θηρεύουν διάτομα μπορεί να αποτελέσει μια επιπλέον ερμηνεία για την μη ανίχνευση διατόμων σε αρκετούς σταθμούς το Σεπτέμβριο. Επιπλέον αυτό μπορεί να ερμηνεύσει και το γεγονός ότι ενώ οι απόλυτα μεγαλύτερες τιμές βιο όγκων εμφανίζονται το Σεπτέμβριο οι μεγαλύτερες τιμές χλωροφύλλης α εκτιμήθηκαν τον Μάρτιο (Εικ. 5), και επιπλέον η ανάλυση γραμμικής παλινδρόμησης δεν έδειξε την ύπαρξη γραμμικής σχέσης.

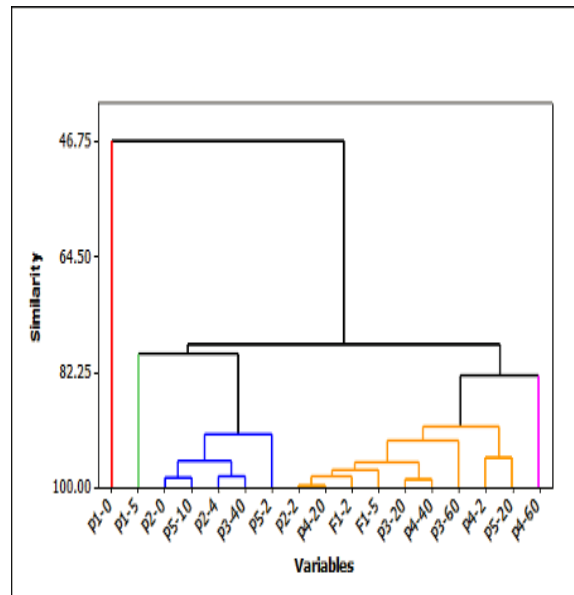
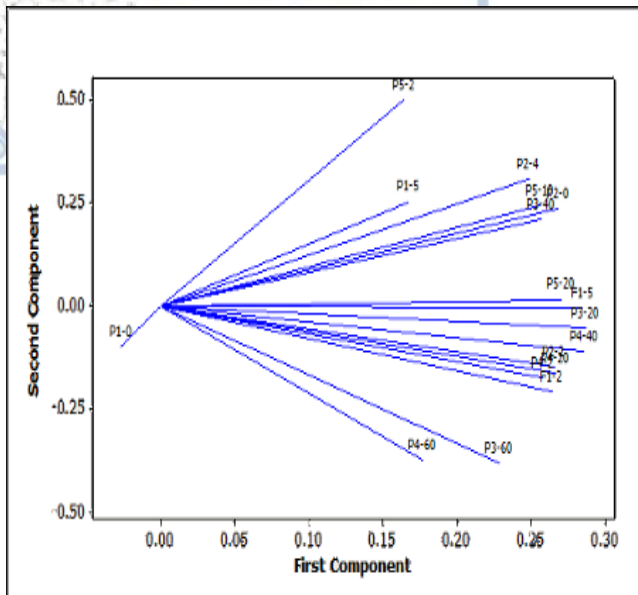
Η ανάλυση κατά Συστάδες (Cluster analysis) μεταξύ επτά αβιοτικών παραγόντων και των τριών ομάδων του φυτοπλαγκτόν (Εικ. 14) έδειξε ότι οι μεταβολές στα δινομαστιγωτά και τα κοκκολιθοφόρα εμφανίζουν μεγάλη ομοιότητα μεταξύ τους (μεγαλύτερη από 90%) και με το

pH, ενώ ως προς τα δινομαστιγωτά περισσότερη ομοιότητα εμφανίζεται με τα θρεπτικά και την αλατότητα (Patoucheas et al. 2019).

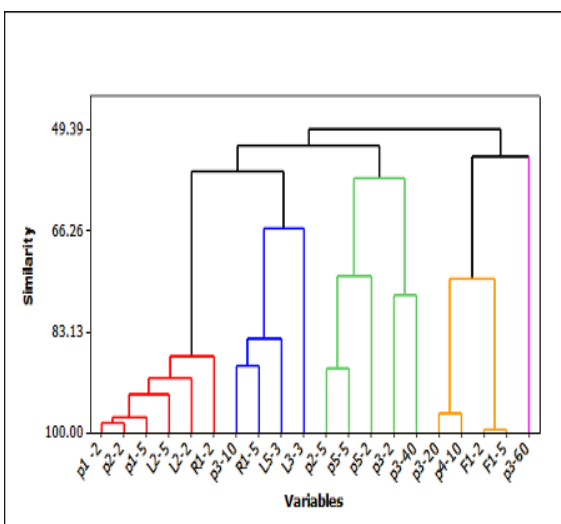
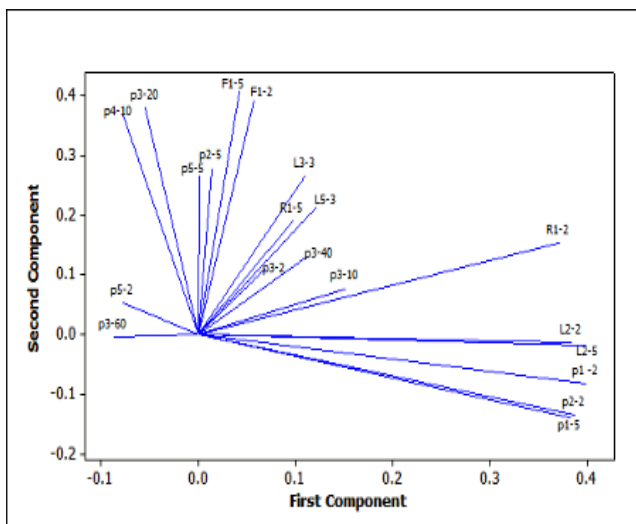


Εικόνα 14. Cluster analysis μεταξύ επτά αβιοτικών παραγόντων και των τριών ομάδων φυτοπλαγκτόν.

Επειδή οι μεταβολές του βιο-όγκου εμφανίζουν σχετικές ομοιότητες μεταξύ των διαφόρων σταθμών εξετάστηκε αν μπορούν να ομαδοποιηθούν κάποιοι σταθμοί μεταξύ τους έτσι ώστε σε μελλοντικές μετρήσεις να ελαττωθούν οι σταθμοί δειγματοληψίας χωρίς την απώλεια σημαντικής πληροφορίας. Μια τέτοια προσέγγιση θα μπορούσε να ελαττώσει το κόστος των παρατηρήσεων χωρίς την απώλεια σημαντικής πληροφορίας. Για το λόγο αυτό εφαρμόστηκαν για κάθε εποχή τόσο η ανάλυση κατά Συστάδες (Cluster analysis) όσο και η ανάλυση Κύριων Συνιστωσών (PCA) (Εικ. 15 και 16).



Εικόνα 15. Principal Component Analysis (PCA) and Hierarchical Cluster analysis για όλους σταθμούς το Μάρτιο ως προς τους βιο-όγκους.



Εικόνα 16. Principal Component Analysis (PCA) and Hierarchical Cluster analysis για όλους σταθμούς το Σεπτέμβριο ως προς τους βιο-όγκους.

Σύμφωνα με τις Εικόνες 15 και 16 μπορούμε να πούμε ότι υψηλές ομοιότητες, ως προς τους βιο όγκους, κατά τον Σεπτέμβριο εμφανίζουν οι σχετικά ρηχοί σταθμοί κοντά στη ακτή (P1, P2, L2, R1). Οι σταθμοί στα βαθιά νερά ομοιότητα μικρότερη του 50%, ενώ η ομοιότητα στους υπόλοιπους κυμαίνεται μεταξύ 55-83%. Τον Μάρτιο ο P1 εμφανίζει την μικρότερη ομοιότητα ως προς τους υπόλοιπους ακολουθούμενος από τον P4, σε μεγάλο όμως βάθος και πιθανά να οφείλεται στις μεγάλες τιμές από διάτομα σε αυτούς τους σταθμούς. Η ομοιότητα μεταξύ των υπολοίπων σταθμών ξεπερνά το 85% (Patoucheas et al. 2020)

Συμπεράσματα

Από τη μελέτη του φυτοπλαγκτόν στους σταθμούς των Μεθάνων στις δύο περιόδους μελέτης εξήχθησαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- ♦ Οι αβιοτικοί παράγοντες (T, pH, chl-a, sal, CO₂, NO₂+NO₃, NH₄PO₄, SiO₂) ανταποκρίνονται στο ολιγοτροφικό περιβάλλον του Σαρωνικού κόλπου.
- ♦ Βρέθηκαν 8 διαφορετικά γένη δινομαστιγωτών, 5 διαφορετικά γένη διατόμων, ενώ μετρήθηκε ο αριθμός των κοκκολιθοφορών. Δεν υπήρξαν ενδείξεις για τοξικό φυτοπλαγκτόν.
- ♦ Τα δινομαστιγωτά είναι κυρίαρχα κατά τον Σεπτέμβρη, τόσο σε αριθμό κυττάρων, όσο και σε βιο όγκο. Αντίστοιχα τα διάτομα κυριαρχούν τον Μάρτιο. Οι τιμές βιοόγκου και αριθμού κυττάρων των κοκκολιθοφόρων δεν παρουσιάζουν μεταβολές και παραμένουν σταθερές.
- ♦ Η χρονική διακύμανση μεταξύ των ιδίων σταθμών μπορεί να εξηγηθεί από την έντονη μεταβλητότητα της θερμοκρασίας και της ηλιακής ακτινοβολίας ενώ η χωρική διακύμανση επηρεάζεται από τη μεταβλητότητα των οικοτόπων ως προς τη θερμοκρασία, το pH και τις συγκεντρώσεις των θρεπτικών συστατικών.
- ♦ Η αύξηση της θερμοκρασίας και η μείωση του pH φαίνεται να ευνοούν τα δινομαστιγωτά και τα κοκκολιθοφόρα και να επηρεάζουν με αρνητικό τρόπο τα διάτομα.
- ♦ Όταν η χλωροφύλλη-α χρησιμοποιείται ως εκτιμητής της πρωτογενούς παραγωγής, πρέπει να εξετάζεται και η σύνθεση του φυτοπλαγκτού, καθώς πολλές φορές η χλωροφύλλη-α και ο βιοόγκος ενδέχεται να διαφέρουν λόγω διαφόρων παραγόντων όπως, περιβαλλοντικές συνθήκες, μιζότροφες συμπεριφορές ορισμένων πλαγκτονικών οργανισμών κ.α.
- ♦ Κοντά στην ακτή, η σύνθεση του φυτοπλαγκτού επηρεάζεται από ανθρωπογενείς δραστηριότητες καθώς και την ηφαιστειακή δραστηριότητα, ιδιαίτερα κατά το τέλος του καλοκαιριού-αρχές του φθινοπώρου. Οι συνολικές συγκεντρώσεις κυττάρων φυτοπλαγκτού, στην περιοχή που επηρεάζεται από την υδροθερμία παρουσιάζουν παρόμοιες τιμές με άλλες περιοχές του Αιγαίου, επιβεβαιώνοντας την ύπαρξη ολιγοτροφικών συνθηκών, ενώ πολύ υψηλές τιμές τεκμηριώθηκαν στην περιοχή με μονάδες ιχθυοκαλιέργειας.



Βιβλιογραφία

- Andersen, V., Nival, P. and Harris, R.P., 1987. Modelling of a planktonic ecosystem in an enclosed water column. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 67(2), 407-430.
- Andersen, V. and Nival, P., 1989. Modelling of phytoplankton population dynamics in an enclosed water column. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 69(3), 625-646.
- Ansper, A. and Alikas, K., 2019. Retrieval of chlorophyll *a* from Sentinel-2 MSI data for the European Union water framework directive reporting purposes. *Remote Sensing*, 11.1, 64.
- Baggini, C., Salomidi, M., Voutsinas, E., Bray, L., Krasakopoulou, E. and Hall-Spencer, J.M., 2014. Seasonality affects macroalgal community response to increases in p CO₂. *PLoS One*, 9(9), p.e106520.
- Brand, L.E. and Guillard, R.R.L., 1981. The effects of continuous light and light intensity on the reproduction rates of twenty-two species of marine phytoplankton. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 50(2-3), 119-132.
- Bybell, L. M. and Self-Trail, J., 1995. Evolutionary, biostratigraphic and taxonomic study of calcareous nanofossils from a continuous Palaeocene-Eocene boundary section in New Jersey. U.S. *Geological Survey, Professional Paper*, 1554, 1-36.
- Caroppo, C., Roselli, L. and Di Leo, A., 2018. Hydrological conditions and phytoplankton community in the Lesina lagoon (southern Adriatic Sea, Mediterranean). *Environmental Science and Pollution Research*, 25(2), 1784-1799.
- Dando, P.R., Aliani, S., Arab, H., Bianchi, C.N., Brehmeg, M., Cocito, S., Fowle, S.W., Guodersen, J., Hooper, L.E., Kollbl, R., Kuever, J., Linke, P., Makropoulos, K.C., Meloni, R., Miquel, J-C., Morri, C., Miiller, S., Robinson, C., Scblesne, H., Sievert, S., Stijhr, R., Stiiben, D., Thomm, M., Varnavas S.P. and W. Ziebis, 2000. Hydrothermal studies in the Aegean Sea. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 25.1, 1-8.
- Eppley, R.W., 1972. Temperature and phytoplankton growth in the sea. *Fish. bull*, 70(4), 1063-1085.
- Field, C.B., Behrenfeld, M.J., Randerson, J.T. and Falkowski, P., 1998. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. *Science*, 281(5374), 237-240.

- Gilabert, J., 2001. Seasonal plankton dynamics in a Mediterranean hypersaline coastal lagoon: the Mar Menor. *Journal of Plankton Research*, 23(2), 207-218.
- Harrison, P.J., Zingone, A., Mickelson, M.J., Lehtinen, S., Ramaiah, N., Kraberg, A.C., Sun, J., McQuatters-Gollop, A. and Jakobsen, H.H., 2015. Cell volumes of marine phytoplankton from globally distributed coastal data sets. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 162, 130-142.
- Ignatiades, L., 2012. Mixotrophic and heterotrophic dinoflagellates in eutrophic coastal waters of the Aegean Sea (eastern Mediterranean Sea). *Botanica Marina*, 55(1), 39-48.
- Jacobson, D.M. and Anderson, D.M., 1993. Growth and grazing rates of *Protoperidinium hirobis* Abe, a thecate heterotrophic dinoflagellate. *Journal of plankton research*, 15(7), 723-736.
- Jeong, H.J. and Latz, M.I., 1994. Growth and grazing rates of the heterotrophic dinoflagellates *Protoperidinium* spp. on red tide dinoflagellates. *Marine Ecology-Progress Series*, 106, 173-173.
- Kontoyiannis, H., 2010. Observations on the circulation of the Saronikos Gulf: a Mediterranean embayment sea border of Athens, Greece. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(C6).
- Li, A., Stoecker, D.K. and Adolf, J.E., 1999. Feeding, pigmentation, photosynthesis and growth of the mixotrophic dinoflagellate *Gyrodinium galatheanum*. *Aquatic Microbial Ecology*, 19(2), 163-176.
- Margalef, R., 1967. The food web in the pelagic environment. *Helgoländer Wissenschaftliche Meeresuntersuchungen*, 15(1-4), 548-559.
- Martin, R. and Quigg, A., 2012. Evolving phytoplankton stoichiometry fueled diversification of the marine biosphere. *Geosciences*, 2(2), 130-146.
- Mercado, J.M., Cortés, D., Salles, S., Ramírez, T., Figueroa, F.L., Segovia, M., Korbee, N., Liger, E., Medina-Sánchez, J.M., Durán, C. and Carrillo, P., 2019. Short term primary production in western Mediterranean Sea phytoplankton communities subjected to the combined stress of high irradiance and low nutrients during summer stratification. *Continental Shelf Research*, 186, 48-63.
- Moschandreou, K.K. and Nikolaidis, G., 2010. The genus *Pseudo-nitzschia* (Bacillariophyceae) in Greek coastal waters. *Botanica Marina*, 53(2), 159-172.
- Paasche, E., 1968. Marine plankton algae grown with light-dark cycles. II. *Ditylum brightwellii* and *Nitzschia turgidula*. *Physiologia plantarum*, 21(1), 66-77.

- Paches, M., Aguado, D., Martínez-Guijarro, R. and Romero, I., 2019. Long-term study of seasonal changes in phytoplankton community structure in the western Mediterranean (Valencian Community). *Environmental Science and Pollution Research*, 26(14), 14266-14276.
- Papanikolaou, I.D. and Papanikolaou, D.I., 2007. Seismic hazard scenarios from the longest geologically constrained active fault of the Aegean. *Quaternary international*, 171, 31-44.
- Patoucheas, D.P. and Dasiou, V., 2002, September. Spatial and temporal growth rate changes of Thermaikos Gulf dinoflagellates: simulation and analysis. In *1st Scientific Conference of EFMS: Oceanographical Aspects for a Sustainable Mediterranean*, Athens, 27-29.
- Patoucheas, D.P. and Haritonidis, S., 2002. Modeling Thermaikos gulf's diatoms growth rate as a function of temperature, light and nutrients. *Fresenius Environmental Bulletin*, 11(10), 810-816.
- Patoucheas, P., Koukousioura, O., Psarra, S., Aligizaki, K., Dimiza, M.D., Skampa, E., Michailidis, I., Nomikou, P. and Triantaphyllou, M.V., 2019. Phytoplankton dynamics influenced by geological (submarine Volcano) and anthropogenic activities in Methana, Saronikos Gulf, Greece. *Proceedings of the Seventh International Conference on Environmental Management, Engineering, Planning & Economics*, Mykonos Island, Greece, May 19-24.
- Patoucheas, P., Koukousioura, O., Aligizaki, K., Perivolioti, T., Mouratidis, A., Dimiza, M.D. and Triantaphyllou, M.V., 2020. Estimating phytoplankton biovolume and chlorophyll-a concentration in Methana, Greece, using field data and satellite-based observations. *Proceedings 223 of the Sixth International Symposium on Green Chemistry, Sustainable Development and Circular Economy*. Thessaloniki, Greece, September 20-23, 2020.
- Pavlakakis, P., Papanikolaou, D., Chronis, G., Lykoussis, B. and Anagnostou, G., 1989. Geological structure of inner Messiniakos Gulf. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 23, (3), 333-347.
- Poulos, S.E., Drakopoulos, P.G. and Collins, M.B., 1997. Seasonal variability in sea surface oceanographic conditions in the Aegean Sea (Eastern Mediterranean): an overview. *Journal of Marine Systems*, 13(1-4), 225-244.
- Sandgren, C.D. and Robinson, J.V., 1984. A stratified sampling approach to compensating for non-random sedimentation of phytoplankton cells in inverted microscope settling chambers. *British Phycological Journal*, 19(1), 67-72.
- Sarno, D., Zingone, A., Saggiomo, V. and Carrada, G.C., 1993. Phytoplankton biomass and species composition in a Mediterranean coastal lagoon. *Hydrobiologia*, 271(1), 27-40.

- Skovgaard, A., 1998. Role of chloroplast retention in a marine dinoflagellate. *Aquatic Microbial Ecology*, 15(3), 293-301.
- Steele, J.H., 1962. *Environmental control of photosynthesis in the sea. Limnology and oceanography*, 7(2), 137-150.
- Strom, S.L. and Morello, T.A., 1998. Comparative growth rates and yields of ciliates and heterotrophic dinoflagellates. *Journal of Plankton Research*, 20(3), 571-584.
- Tiselius, P. and Kuylensstierna, M., 1996. Growth and decline of a diatom spring bloom phytoplankton species composition, formation of marine snow and the role of heterotrophic dinoflagellates. *Journal of Plankton Research*, 18(2), 133-155.
- Triantaphyllou MV, Baumann KH, Karatsolis BT, Dimiza MD, Psarra S, Skampa E, Patoucheas P, Vollmar NM, Koukousioura O, Katsigera A, Krasakopoulou E. Coccolithophore community response along a natural CO₂ gradient off Methana (SW Saronikos Gulf, Greece, NE Mediterranean). *PloS One*, e0200012.
- Utermöhl, H., 1958. Zur vervollkommnung der quantitativen phytoplankton-methodik: Mit 1 Tabelle und 15 abbildungen im Text und auf 1 Tafel. *Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie: Mitteilungen*, 9(1), 1-38.
- Valiela, I., 1984. Marine ecological processes. Springer, New York, NY.
- Walsh, J.J., 1975, April. A spatial simulation model of the Peru upwelling ecosystem. In *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 22 (4), 201-236.
- Yang, Y., Sun, X. and Zhao, Y., 2017. Effects of Lugol's iodine solution and formalin on cell volume of three bloom-forming dinoflagellates. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 35(4), 858-866.
- Zarauz, L. and Irigoien, X., 2008. Effects of Lugol's fixation on the size structure of natural nano-microplankton samples, analyzed by means of an automatic counting method. *Journal of Plankton Research*, 30(11), 1297-1303.