



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ  
Εθνικό και Καποδιστριακό  
Πανεπιστήμιο Αθηνών

Τμήμα Βιολογίας

Διπλωματική Εργασία Προπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών

**Υψηλής συχνότητας παρακολούθηση της σύνθεσης και δυναμικής  
μονοκύτταρων πλαγκτικών κοινοτήτων σε παράκτια θέση του  
Σαρωνικού Κόλπου**

Αγγελική Γεωργοπούλου

Επιβλέπων καθηγητής : Σάββας Γενίτσαρης

Επίκουρος Καθηγητής Δομής & Λειτουργίας Κοινοτήτων  
Υδατικών Οικοσυστημάτων, Τμήμα Βιολογίας ΕΚΠΑ

Αθήνα, 2024



## Πρόλογος

Θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη και εκτίμησή μου προς τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Δρ. Σάββα Γενίτσαρη, για την πολύτιμη καθοδήγηση, τη συνεχή του υποστήριξη, την κατανόηση και την υπομονή σε όλα τα στάδια της διπλωματικής μου εργασίας. Η συμβολή του ήταν καθοριστική για την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας και τον ευχαριστώ από καρδιάς για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε.

Επιπλέον, θερμές ευχαριστίες σε όλες και όλους στο εργαστήριο του Τομέα Οικολογίας, καθώς και σε όλα τα παιδιά που εκπονήσαμε τη διπλωματική μας αυτό το έτος, για την συνεργασία τους κατά τη διάρκεια της πειραματικής και ερευνητικής ανάλυσης.

Ιδιαίτερα ευχαριστώ τους γονείς μου για την αγάπη και την κατανόηση καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Δεν θα μπορούσα να μην εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στις φίλες μου, που πίστεψαν σε μένα περισσότερο από όσο πίστευα εγώ στον εαυτό μου, και που μου προσέφεραν κατανόηση, στήριξη, χαρά και πολύ αγάπη σε κάθε βήμα αυτής της διαδρομής.

Τέλος, ευχαριστώ τον Νικολάκη για όλους τους λόγους του κόσμου!



## **Περιεχόμενα:**

<b>1.1 Περίληψη</b> .....	<b>4</b>
<b>1.2 Abstract</b> .....	<b>5</b>
<b>2. Εισαγωγή</b> .....	<b>6</b>
<b>3. Υλικά και Μεθοδολογία</b> .....	<b>12</b>
<b>3.1 Περιοχή έρευνας</b> .....	<b>12</b>
<b>3.2 Συλλογή δειγμάτων</b> .....	<b>13</b>
<b>3.3 Μικροσκοπικές αναλύσεις</b> .....	<b>13</b>
<b>4. Αποτελέσματα</b> .....	<b>14</b>
<b>4.1 Σύνθεση μικροβιακής κοινότητας</b> .....	<b>14</b>
<b>4.2 Αφθονία</b> .....	<b>15</b>
<b>4.3 Βιομάζα</b> .....	<b>25</b>
<b>4.4 Δυνητικά επιβλαβή taxa</b> .....	<b>33</b>
<b>5. Συζήτηση</b> .....	<b>35</b>
<b>6. Συμπεράσματα</b> .....	<b>44</b>
<b>Βιβλιογραφία</b> .....	<b>45</b>



## 1.1 Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην υψηλής συχνότητας παρακολούθηση της σύνθεσης και δυναμικής των μονοκύτταρων ευκαρυωτικών πλαγκτικών κοινοτήτων σε παράκτια περιοχή του Σαρωνικού Κόλπου. Ο Σαρωνικός είναι μια από τις πιο σημαντικές και ταυτόχρονα επιβαρυνμένες θαλάσσιες περιοχές της Ελλάδας, με αυξημένες ανθρωπογενείς πιέσεις λόγω ρύπανσης και κλιματικής αλλαγής. Ο κύριος στόχος της μελέτης ήταν η διερεύνηση της διαδοχής στις μικροβιακές πλαγκτικές κοινότητες του φυτοπλαγκτού και του πρωτοζωοπλαγκτού με παρακολούθηση υψηλής συχνότητας ανά δύο ημέρες. Η έρευνα διεξήχθη με δειγματοληψίες κατά τη διάρκεια δύο διακριτών περιόδων, καλοκαίρι και φθινόπωρο του 2023, ώστε να αποτυπωθούν οι ταχείες αλλαγές στη δομή των κοινοτήτων του φυτοπλαγκτού και του πρωτοζωοπλαγκτού.

Συνολικά αναγνωρίστηκαν 41 taxa, με τα Διάτομα και τα Δινομαστιγωτά να κυριαρχούν. Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, τα Διάτομα είχαν κυρίαρχη παρουσία, ενώ κατά το φθινόπωρο η σύνθεση της κοινότητας μεταβλήθηκε, με τα Ετερότροφα Νανομαστιγωτά (Heterotrophic Nanoflagellates, HNF) να εμφανίζουν αξιοσημείωτη αύξηση ως προς την αφθονία. Η αφθονία των πλαγκτικών κοινοτήτων ήταν σημαντικά υψηλότερη το καλοκαίρι, φτάνοντας σε μέγιστο 6485 κύτταρα mL<sup>-1</sup> την 14<sup>η</sup> Ιουλίου. Η βιομάζα επίσης παρουσίασε διακυμάνσεις, με τη μέγιστη τιμή το καλοκαίρι να σημειώνεται την 12<sup>η</sup> Ιουλίου. Taxa που δυνητικά μπορούν να σχηματίσουν επιβλαβείς ανθίσεις φυτοπλαγκτού (HABs), όπως τα γένη *Pseudo-nitzschia* και *Dinophysis*, εντοπίστηκαν κυρίως κατά τη φθινοπωρινή περίοδο.

Η μελέτη αναδεικνύει τη σημασία και την ιδιαίτερη αξία της υψηλής συχνότητας δειγματοληψιών για την καταγραφή των δυναμικών αλλαγών στις πλαγκτικές κοινότητες. Οι ταχείες μεταβολές που καταγράφηκαν σε περιόδους λίγων ημερών καταδεικνύουν τη σημαντικότητα αυτής της προσέγγισης για την αποτελεσματική παρακολούθηση των πλαγκτικών κοινοτήτων θαλάσσιου περιβάλλοντος και κατ' επέκταση τη βελτίωση των διαχειριστικών πρακτικών παράκτιων οικοσυστημάτων.

## 1.2 Abstract

This thesis focuses on the high-frequency monitoring of the composition and dynamics of unicellular eukaryotic planktonic communities in a coastal area of the Saronikos Gulf. The Saronikos Gulf is one of the most important yet heavily impacted marine areas of Greece, facing increased anthropogenic pressures due to pollution and climate change. The main objective of the study was to investigate the succession of microbial planktonic communities, including phytoplankton and protozooplankton, through high-frequency monitoring every two days. The research was conducted with samplings during two distinct periods, summer and autumn of 2023, to capture the rapid changes in the structure of phytoplankton and protozooplankton communities.

A total of 41 taxa were identified, with Diatoms and Dinoflagellates dominating. During the summer, Diatoms had a dominant presence, while in the autumn, the community composition shifted, with Heterotrophic Nanoflagellates (HNF) showing a significant increase in abundance. The abundance of planktonic communities was significantly higher in the summer, reaching a peak of 6485 cells mL<sup>-1</sup> on July 14. Biomass also fluctuated, with the highest value in the summer recorded on July 12. Taxa that have the potential to form harmful algal blooms (HABs), such as the genera *Pseudo-nitzschia* and *Dinophysis*, were primarily detected during the autumn period.

The study highlights the importance of high-frequency sampling for recording the dynamic changes in planktonic communities. The rapid shifts observed over periods of just a few days demonstrate the significance of this approach for the effective monitoring of marine planktonic communities and, by extension, for improving management practices in coastal ecosystems.



## 2. Εισαγωγή

Οι παράκτιες περιοχές φιλοξενούν πλούσια βιοποικιλότητα και υποστηρίζουν σημαντικές οικοσυστημικές υπηρεσίες, όπως η αλιεία, η αναψυχή και ο τουρισμός. Ωστόσο, αυτές οι περιοχές είναι ιδιαίτερα ευάλωτες σε περιβαλλοντικές πιέσεις, όπως η ρύπανση και η κλιματική αλλαγή, οι οποίες έχουν αναδειχθεί ως ένας από τους κύριους παράγοντες που επηρεάζουν τη σύνθεση και τη δυναμική του φυτοπλαγκτού (Von Glasow et al., 2013). Το φυτοπλαγκτό αποτελεί τη θεμελιώδη βάση των τροφικών αλυσίδων στα υδάτινα οικοσυστήματα, καθώς λειτουργεί ως η κύρια πηγή ενέργειας και θρεπτικών ουσιών για τους ανώτερους οργανισμούς στο θαλάσσιο περιβάλλον. Σε οικοσυστήματα με χαμηλή θρεπτική διαθεσιμότητα, το μικροφυτοπλαγκτό κυριαρχεί, ενώ σε περιοχές με αυξημένη θρεπτική εισροή, μεγαλύτερα φυτοπλαγκτικά είδη όπως τα Διατόμα και τα Δινομαστιγωτά επικρατούν, διασφαλίζοντας τη μεταφορά ενέργειας προς ανώτερους καταναλωτές όπως τα ψάρια (Fenchel, 1988). Η σύνθεση και η παραγωγικότητα του φυτοπλαγκτού καθορίζονται από τόσο αβιοτικούς παράγοντες (όπως θρεπτικά στοιχεία, φως, θερμοκρασία, διαύγεια του νερού, ρεύματα) όσο και βιοτικούς (όπως ανταγωνισμός και βόσκηση) (Zhao et al., 2020; Sarkar et al., 2023).

Ένας άλλος ρόλος του φυτοπλαγκτού είναι ότι αποτελεί έναν από τους πιο κρίσιμους οργανισμούς στα θαλάσσια οικοσυστήματα, καθώς λειτουργεί ως ένας ευαίσθητος και αξιόπιστος δείκτης περιβαλλοντικών αλλαγών. Αυτό συμβαίνει λόγω της άμεσης εξάρτησής του από τις φυσικές και χημικές παραμέτρους του περιβάλλοντος, όπως η θερμοκρασία, η διαθεσιμότητα θρεπτικών συστατικών και η αλατότητα (Arhonditsis et al. 2004; Tylianakis et al. 2008). Η ταχύτατη αντίδρασή του, το καθιστά έναν ισχυρό βιοδείκτη για την παρακολούθηση των επιπτώσεων τόσο φυσικών όσο και ανθρωπογενών παραγόντων στα παράκτια και θαλάσσια οικοσυστήματα.

Οι αυξήσεις της θερμοκρασίας της θάλασσας, που συνδέονται με την κλιματική αλλαγή, έχουν ήδη οδηγήσει σε μεταβολές στη βιοποικιλότητα και τη δομή των πλαγκτικών κοινοτήτων. Ερευνητές έχουν παρατηρήσει αυξημένη επικράτηση θερμοφίλων ειδών, όπως τα Κυανοβακτήρια, εις βάρος άλλων οργανισμών, όπως των Διατόμων, που προτιμούν ψυχρότερες συνθήκες (Buchwald et al., 2024). Αυτή η μεταβολή στη σύνθεση των επικρατούντων ειδών έχει αλυσιδωτές επιπτώσεις στην τροφική αλυσίδα, καθώς διαφορετικοί τύποι φυτοπλαγκτού παρέχουν διαφορετικής ποιότητας και ποσότητας τροφή στα ανώτερα τροφικά επίπεδα, επηρεάζοντας έτσι το ζωοπλαγκτόν και τα ψάρια. Παράλληλα, οι αυξημένες θερμοκρασίες μπορούν να εντείνουν τα φαινόμενα ευτροφισμού, τα οποία ενισχύουν την ανάπτυξη φυτοπλαγκτικών ανθίσεων (Algal Blooms), προκαλώντας δυσμενείς επιπτώσεις στο οικοσύστημα και τη βιοποικιλότητα (Kostryukova et al., 2018).

Εκτός από τις αυξημένες θερμοκρασίες, οι ανθρωπογενείς επιδράσεις είναι έντονα εμφανείς στις φυτοπλαγκτικές κοινότητες. Η υπερβολική χρήση θρεπτικών και χημικών ουσιών στη γεωργία οδηγεί σε ρύπανση των θαλάσσιων υδάτων μέσω της απορροής από τους ποταμούς, αυξάνοντας τις συγκεντρώσεις του αζώτου (N) και του φωσφόρου (P) στα παράκτια νερά. Παράλληλα, τα αστικά λύματα συχνά καταλήγουν

στο υδάτινο περιβάλλον χωρίς να έχουν υποστεί την κατάλληλη επεξεργασία, ενισχύοντας ακόμα περισσότερο την παρουσία θρεπτικών συστατικών και οργανικών υλικών (Kroeze et al. 2013). Η ρύπανση των υδάτων, με την εισροή θρεπτικών ουσιών σε συνδυασμό με την άνοδο της θερμοκρασίας αυξάνει τον κίνδυνο ευτροφισμού στα παράκτια οικοσυστήματα τις επόμενες δεκαετίες (Rabalais et al., 2009; Paerl & Paul, 2012).

Το φαινόμενο του ευτροφισμού συχνά συνοδεύεται από την ανάπτυξη μεγάλης βιομάζας φυτοπλαγκτού και την εμφάνιση επιβλαβών ανθίσεων μικροφυκών (Harmful Algal Blooms – HABs) (Paerl et al., 2011; Hallegraeff, 1993; Heisler et al., 2008; Anderson et al., 2012). Σε συνδυασμό με την κλιματική αλλαγή, οι ανθίσεις αυτές έχουν αυξήσει την εμφάνιση και τη γεωγραφική τους εξάπλωση κατά τις τελευταίες δεκαετίες, ενώ στη Μεσόγειο Θάλασσα, οι συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και η χαμηλή ανταλλαγή υδάτων εντείνουν περαιτέρω την ανάπτυξή τους (Tsikoti & Genitsaris, 2021; Zingone et al., 2021). Ουσιαστικά οι επιβλαβείς ανθίσεις φυτοπλαγκτού (HABs) αναφέρονται σε φαινόμενα όπου η συγκέντρωση ενός ή περισσοτέρων ειδών φυτοπλαγκτού φτάνει σε επίπεδα που ενδέχεται να προκαλέσουν σημαντικές επιπτώσεις σε θαλάσσιους οργανισμούς. Αυτές οι επιπτώσεις μπορεί να περιλαμβάνουν μαζικούς θανάτους ψαριών ή οστρακοειδών, συσσώρευση τοξικών ουσιών στους ιστούς θαλάσσιων οργανισμών και δηλητηρίαση των ανθρώπων μέσω της κατανάλωσης μολυσμένων οστρακοειδών (Andersen et al., 1996). Γίνεται αντιληπτό λοιπόν πως τέτοια φαινόμενα διαταράσσουν την ισορροπία των οργανισμών που ζουν στα ύδατα αλλά και την ποιότητα των υδάτων (Οδηγία 91/271/ΕΟΚ). Συγκεκριμένα, οι ανθίσεις αυτές έχουν σοβαρές οικολογικές και οικονομικές συνέπειες, όπως η παραγωγή επιβλαβών τοξινών για τη θαλάσσια ζωή και την ανθρώπινη υγεία, η μείωση των επιπέδων διαλυμένου οξυγόνου στο νερό που δημιουργεί νεκρές ζώνες όπου η θαλάσσια ζωή δεν μπορεί να επιβιώσει, καθώς και η αισθητική και οσφρητική ρύπανση, που πλήττει τον τουρισμό και τις τοπικές οικονομίες (Genitsaris et al., 2019; Anderson et al., 2012). Παράλληλα, οι επιβλαβείς ανθίσεις φυτοπλαγκτού επηρεάζουν αρνητικά τις πολιτιστικές οικοσυστημικές υπηρεσίες, που είναι κρίσιμες για την ανθρώπινη ευημερία, όπως οι θεραπευτικές και εμπνευστικές εμπειρίες στη φύση. Επίσης, επιφέρουν ψυχολογικές και συναισθηματικές επιπτώσεις, όπως αυξημένα επίπεδα άγχους, συναισθήματα θλίψης και απώλεια της τοπικής ταυτότητας, πέρα από τις άμεσες οικονομικές ζημιές που προκαλούν (Willis et al., 2018). Η παγκόσμια αύξηση στη συχνότητα των HABs έχει οδηγήσει σε σημαντικές επιπτώσεις στη δημόσια υγεία, την αλιεία και τη συνολική λειτουργία των οικοσυστημάτων (Anderson et al., 2012).

Η μεγαλύτερη σχεδόν κλειστή θάλασσα στη Γη είναι η Μεσόγειος Θάλασσα, η επιφάνεια της οποίας είναι συγκρίσιμη με τις μεγαλύτερες ανοιχτές και ημι-κλειστές θάλασσες του σημερινού ωκεανού (όπως η Καραϊβική Θάλασσα και ο Κόλπος του Μεξικού) (Meybeck et al., 2007). Η φυσική δυναμική της Μεσογείου είναι πλούσια και περίπλοκη, καθώς περιλαμβάνει ασυνήθιστη πολυστρωματική κυκλοφορία. Η Chl a (χλωροφύλλη α), που είναι διαθέσιμη και τα θρεπτικά συστατικά ταξινομούν τη

θάλασσα της Μεσογείου από oligότροφη έως υπερολιγότροφη (Thingstad et al., 2005), ωστόσο φαίνεται να εμφανίζει τάσεις ευτροφισμού (Meddeb et al., 2018). Επιπροσθέτως, η περιορισμένη κυκλοφορία των υδάτων σε ημι-κλειστές περιοχές και λιμάνια, όπως στη Μεσόγειο, σε συνδυασμό με την αυξημένη ρύπανση από θρεπτικά συστατικά και την αύξηση της θερμοκρασίας, δημιουργούν ευνοϊκές συνθήκες για την ανάπτυξη επιβλαβών ανθίσεων με μεγάλη βιομάζα (Vila & Masó, 2005; Vila et al., 2005; Ismael, 2014), ενώ η εντατικότερη παρακολούθηση και η αυξημένη προσοχή στις τοξικές ανθίσεις φαίνεται να έχουν συμβάλει στην αύξηση της καταγραφής τους, παρά σε μια πραγματική αύξηση των φαινομένων αυτών (Zingone et al., 2021).

Τα παράκτια ύδατα πολλών περιοχών της Μεσογείου ακολουθούν το πρότυπο αυξημένης αφθονίας Διατόμων (Bacillariophyceae) και Δινομαστιγωτών (Dinophyceae) που παρατηρείται σε παράκτιες περιοχές με υψηλή παραγωγικότητα, επηρεασμένες από ανθρωπογενή ευτροφισμό. Σύμφωνα με τους Billen και Garnier (2007), αυτές οι περιοχές χαρακτηρίζονται από αυξημένες συγκεντρώσεις αζώτου και φωσφόρου, καθώς και περίσσεια διαλυμένου πυριτίου, κάτι που έχει επίσης καταγραφεί στη Μεσόγειο (Ciavatta et al., 2019). Συγκεκριμένα, τα Διάτομα φαίνεται να κυριαρχούν συνήθως τους ψυχρότερους μήνες (τέλη χειμώνα έως άνοιξη) λόγω αυξημένης διαθεσιμότητας θρεπτικών ουσιών και ανάμειξης, ενώ τα Δινομαστιγωτά, συμπεριλαμβανομένων των επιβλαβών ειδών φυκών, κυριαρχούν το καλοκαίρι όταν οι συγκεντρώσεις θρεπτικών συστατικών είναι χαμηλότερες και οι θερμοκρασίες υψηλότερες. Η μεγαλύτερη αφθονία φυτοπλαγκτού και βιομάζα εμφανίζεται την άνοιξη, όταν τα επίπεδα θρεπτικών ουσιών είναι υψηλά λόγω της απορροής ή της ανάμειξης με βαθύτερα νερά. Εποχικοί παράγοντες όπως η θερμοκρασία, το φως και η διαθεσιμότητα θρεπτικών συστατικών παίζουν κρίσιμο ρόλο στην εποχική διαδοχή των ειδών φυτοπλαγκτού. Ο χειμώνας και η άνοιξη προάγουν τα Διάτομα λόγω του εμπλουτισμού των θρεπτικών συστατικών και των ψυχρότερων θερμοκρασιών, ενώ η καλοκαιρινή στρωματοποίηση και οι υψηλότερες θερμοκρασίες ευνοούν τα Δινομαστιγωτά (Giani et al., 2012). Οι κύριες ομάδες φυτοπλαγκτού που κυριαρχούν σε παράκτια ενδιαιτήματα της Μεσογείου συμπληρώνονται από ομάδες όπως τα Πρασινοφύκη, Ευγληνοφύκη και Κυανοβακτήρια. Αυτές οι ομάδες αποτελούν τον πυρήνα της φυτοπλαγκτικής κοινότητας και συχνά περιλαμβάνουν δυνητικά επιβλαβή είδη.

Συγκεκριμένα ο Σαρωνικός Κόλπος, σύμφωνα με παλαιότερη μελέτη (Ignatiades et al., 1992) αντιμετωπίζει φαινόμενα εποχικού ευτροφισμού, που επηρεάζεται από την εισροή θρεπτικών ουσιών, ιδιαίτερα άζωτο και φώσφορο από ανθρωπογενείς πηγές. Παράλληλα, η εποχική διακύμανση, που σχετίζεται με τη θερμοκρασία του νερού και την περιεκτικότητα σε θρεπτικά συστατικά, έχει αποδειχθεί επίσης ότι ασκεί σημαντική επίδραση στη δομή των πλαγκτικών κοινοτήτων (Patroucheas et al., 2021).

Γίνεται λοιπόν αντιληπτό πως τα παράκτια οικοσυστήματα αποτελούν δυναμικά περιβάλλοντα, όπου οι φυσικοχημικές συνθήκες μεταβάλλονται γρήγορα και απρόβλεπτα. Παράγοντες όπως η θερμοκρασία του νερού, η διαθεσιμότητα θρεπτικών ουσιών, η αλατότητα, η ποσότητα και η ένταση του ηλιακού φωτός, καθώς και οι

υδροδυναμικές διεργασίες, παίζουν κρίσιμο ρόλο στον καθορισμό της σύνθεσης και της δομής των πλαγκτικών κοινοτήτων. Οι πλαγκτικές κοινότητες, και ειδικότερα οι μονοκύτταροι οργανισμοί, αντιδρούν άμεσα στις περιβαλλοντικές μεταβολές, καθιστώντας τη σύνθεση και την επικράτηση διαφορετικών ειδών εξαιρετικά ευμετάβλητη σε βραχυπρόθεσμο χρονικό ορίζοντα. Αυτό συμβαίνει επειδή οι μονοκύτταροι πλαγκτικοί οργανισμοί (φυτοπλαγκτό και πρωτοζωοπλαγκτό), χαρακτηρίζονται από μικρό χρόνο γενεάς, ο οποίος μπορεί να κυμαίνεται από μερικές ώρες έως λίγες ημέρες. Ως αποτέλεσμα, οι πληθυσμοί αυτών των οργανισμών έχουν την ικανότητα να ανταποκρίνονται ταχύτατα σε αλλαγές του περιβάλλοντος, όπως η διακύμανση της θερμοκρασίας, η παρουσία θρεπτικών στοιχείων και η φωτοπερίοδος (Vog & Kolasa, 2006).

Αυτή η άμεση και ταχεία απόκριση των πλαγκτικών κοινοτήτων στις περιβαλλοντικές συνθήκες αποτελεί ένα θεμελιώδες χαρακτηριστικό που καθιστά αναγκαία τη συχνή παρακολούθηση της δυναμικής τους. Σε αντίθεση με οργανισμούς με μεγαλύτερο χρόνο ζωής, οι οποίοι μπορεί να απαιτούν μεγαλύτερες χρονικές περιόδους για να παρουσιάσουν αισθητές μεταβολές στη σύνθεση και τη δομή των πληθυσμών τους, οι μονοκύτταροι οργανισμοί μπορεί να παρουσιάσουν ραγδαίες αλλαγές μέσα σε λίγες ώρες ή ημέρες. Η συνεχής μεταβολή της αφθονίας των ειδών μπορεί να οδηγήσει σε ταχύτερη αναδιαμόρφωση των κοινοτήτων, με συγκεκριμένα είδη να κυριαρχούν υπό ορισμένες περιβαλλοντικές συνθήκες και να υποχωρούν όταν οι συνθήκες αλλάζουν (Domaizon et al., 2012).

Για το λόγο αυτό, η υψηλής συχνότητας δειγματοληψία, δηλαδή η παρακολούθηση της σύνθεσης των κοινοτήτων σε μικρά χρονικά διαστήματα, είναι απαραίτητη για την κατανόηση των διαδικασιών που διέπουν αυτές τις αλλαγές αλλά και των παραγόντων που επηρεάζουν άμεσα τη δομή και τη λειτουργία των πλαγκτικών κοινοτήτων. Οι συμβατικές μέθοδοι δειγματοληψίας, οι οποίες πραγματοποιούνται σε εβδομαδιαία ή μηνιαία βάση, δεν είναι επαρκείς για την αντίληψη και γνώση αυτών των ταχύτατων μεταβολών. Απεναντίας, απαιτείται πιο συχνή παρακολούθηση για την καταγραφή της συνεχούς και γρήγορης αναπροσαρμογής των κοινοτήτων στις μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες. Η κατανόηση αυτών των αλλαγών είναι κρίσιμη για την εκτίμηση των επιπτώσεων της περιβαλλοντικής μεταβολής στην οικολογική ισορροπία και τη βιωσιμότητα των παράκτιων οικοσυστημάτων. Με γνώμονα τις ανωτέρω παρατηρήσεις, αξίζει να αναφερθούν ορισμένα παραδείγματα μελετών υψηλής συχνότητας δειγματοληψίας.

Μια μακροχρόνια μελέτη παρακολούθησης στη Βόρεια Θάλασσα (Cloern & Jassby, 2010), αξιολόγησε τη δυναμική και την ποικιλομορφία του φυτοπλαγκτού ως απόκριση στις διακυμάνσεις των θρεπτικών συστατικών και τις αλλαγές θερμοκρασίας. Η έρευνα τόνισε την κυριαρχία των Διατόμων, ιδιαίτερα του *Skeletonema costatum*, κατά την πρώιμη ανθοφορία της άνοιξης και την παρουσία δυνητικά επιβλαβών ειδών όπως το *Pseudo-nitzschia* κατά τους θερμότερους μήνες. Άλλα taxa που εντοπίστηκαν είναι τα *Chaetoceros* spp. και *Thalassiosira* spp. Η μελέτη μάλιστα, υπογράμμισε την ανάγκη δειγματοληψίας υψηλής συχνότητας (ημερήσια έως εβδομαδιαία) για την

παρακολούθηση των γρήγορων αλλαγών στη σύνθεση των ειδών, ιδιαίτερα ως απόκριση στους παλμούς θρεπτικών συστατικών και τις αλλαγές θερμοκρασίας. Χωρίς συχνή παρακολούθηση, οι εποχικές ανθίσεις επιβλαβών ειδών θα μπορούσαν να χαθούν. Σε άλλη μελέτη στον κόλπο Chesapeake των ΗΠΑ, εντοπίστηκαν τα εξής taxa: *Prorocentrum minimal*, *Karlodinium veneficum*, *Skeletonema marinoi*, *Akashiwo sanguinea*. Ο κόλπος Chesapeake υφίσταται έντονη φόρτωση θρεπτικών συστατικών από γεωργική απορροή, που οδηγεί σε ποικίλες ανθίσεις φυτοπλαγκτού. Η δομή της κοινότητας κυμάνθηκε μεταξύ των Δινομαστιγωτών (*Prorocentrum minimum*) κατά τη διάρκεια περιόδων πλούσιων σε θρεπτικά συστατικά και Διατόμων όπως το *Skeletonema marinoi* κατά τους ψυχρότερους μήνες. Η παρακολούθηση που διενεργείτο εβδομαδιαία έδειξε ότι οι επιβλαβείς ανθίσεις (HABs), ιδιαίτερα αυτές που αφορούν το *Karlodinium veneficum*, θα μπορούσαν να αναπτυχθούν και να εξαφανιστούν εντός ημερών, υπογραμμίζοντας την ανάγκη δειγματοληψίας υψηλής συχνότητας για την παρακολούθηση των γρήγορων οικολογικών αποκρίσεων στις εισροές θρεπτικών ουσιών και τη μεταβολή της θερμοκρασίας (Harding et al., 2016). Μια ακόμη μελέτη στη δυτική ακτή της Ινδίας και συγκεκριμένα στην περιοχή Goa (Ká & Krishnamurthy, 2002), εξέτασε τις εποχικές αλλαγές στην ποικιλότητα του φυτοπλαγκτού ως απόκριση στον νοτιοδυτικό μουσώνα. Ανιχνεύθηκαν *Trichodesmium erythraeum*, *Thalassiosira* spp., *Ceratium furca*, *Noctiluca scintillans*. Τα Διάτομα (*Thalassiosira* spp.) κυριάρχησαν κατά την περίοδο μετά τους μουσώνες, ενώ οι ανθίσεις του *Trichodesmium erythraeum* ήταν συχνές κατά την προηγούμενη των μουσώνων περίοδο. Το καθεστώς των εποχικών μουσώνων οδήγησε σε γρήγορες αλλαγές στα επίπεδα θρεπτικών ουσιών και στη δομή της στήλης του νερού, προκαλώντας γρήγορες αλλαγές στις κοινότητες φυτοπλαγκτού. Η εβδομαδιαία δειγματοληψία εκτιμήθηκε ότι είναι κρίσιμη για την καταγραφή των δυναμικών αλλαγών μεταξύ των εποχών, ενώ ορισμένες φορές χρειάστηκαν και δεύτερη δειγματοληψία εντός της ίδιας εβδομάδας. Τέλος αξίζει να γίνει αναφορά στη μελέτη που έλαβε χώρα στον Κόλπο του Maine, στις ΗΠΑ, όπου ανιχνεύτηκαν τα *Alexandrium fundyense*, *Chaetoceros* spp., *Thalassiosira nordenskioldii*, *Ditylum brightwellii*. Αυτή η περιοχή είναι γνωστή για τα κανονικά HAB που προκαλούνται από το *Alexandrium fundyense*. Η λεπτομερής μελέτη ανέδειξε την εποχική διαδοχή Διατόμων όπως τα *Thalassiosira nordenskioldii* και *Chaetoceros* spp. την άνοιξη, με τα Δινομαστιγωτά να ακολουθούν το καλοκαίρι. Οι ερευνητές μάλιστα, παρατήρησαν ότι οι ανθίσεις του *Alexandrium fundyense* θα μπορούσαν να κλιμακωθούν γρήγορα, καθιστώντας την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο κρίσιμη για την ανίχνευση και τη διαχείριση των HABs. Η ανάγκη για συχνή δειγματοληψία (καθημερινά ή κάθε λίγες μέρες) κατά την περίοδο της ανθοφορίας επισημάνθηκε για την πρόβλεψη της έναρξης και της αιχμής των τοξικών ανθίσεων (Anderson et al., 2005).

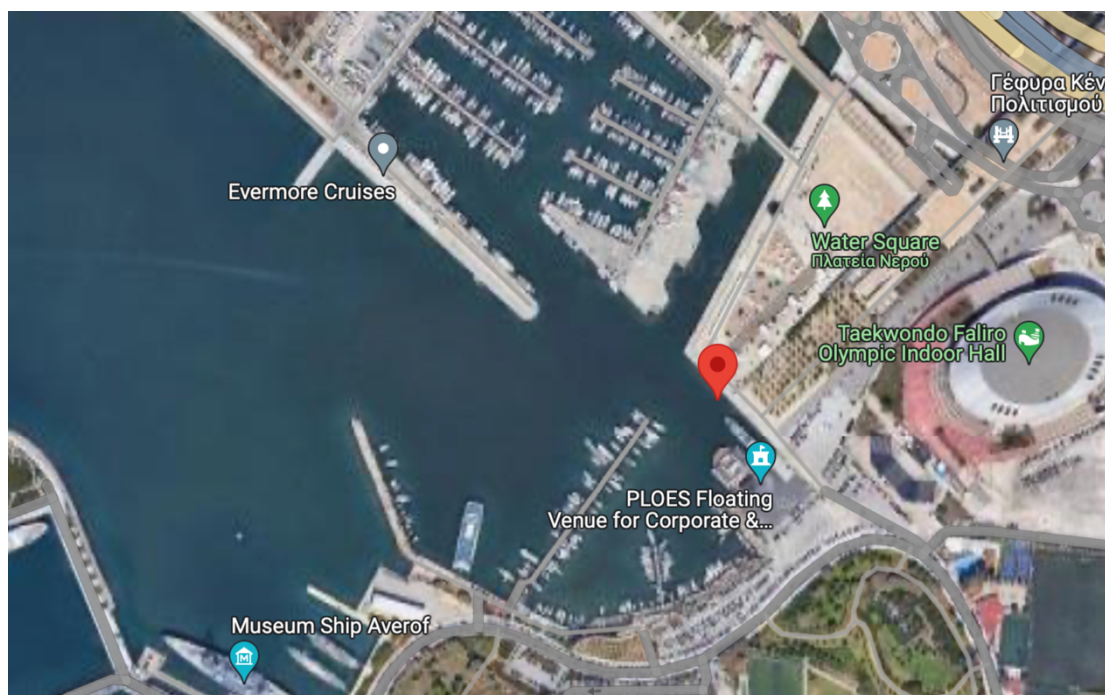
Με βάση τα παραπάνω παραδείγματα που αναδεικνύουν τη σημασία των υψηλής συχνότητας δειγματοληψιών για την παρακολούθηση του φυτοπλαγκτού παράκτιων περιοχών, ο κύριος στόχος της παρούσας εργασίας είναι η παρακολούθηση της σύνθεσης και της δυναμικής των μονοκύτταρων πλαγκτικών κοινοτήτων σε παράκτια θέση του Σαρωνικού Κόλπου με συχνότητα δειγματοληψιών κάθε δύο ημέρες. Η

υψηλή συχνότητα δειγματοληψίας επιτρέπει την καλύτερη κατανόηση των ταχέων αλλαγών στη δομή και λειτουργία των πλαγκτικών κοινοτήτων, παρέχοντας λεπτομερείς πληροφορίες για τη βιοποικιλότητα, την αφθονία και τη βιομάζα των φυτοπλαγκτικών και πρωτοζωοπλαγκτικών οργανισμών σε μικρές χρονικές κλίμακες και επιτρέποντας την καταγραφή ειδών εν δυνάμει επιβλαβών, που σε μεγαλύτερης χρονικής απόστασης δειγματοληψίες πιθανώς να μην εντοπίζονται. Οι επιμέρους στόχοι της έρευνας περιλαμβάνουν τη διερεύνηση της ποικιλότητας των φυτοπλαγκτικών και πρωτοζωοπλαγκτικών κοινοτήτων, την εκτίμηση της αφθονίας και της βιομάζας των οργανισμών αυτών, καθώς και την καταγραφή των δυνητικά επιβλαβών ειδών που ενδέχεται να επηρεάζουν τη δομή του οικοσυστήματος και να έχουν επιπτώσεις στη δημόσια υγεία και τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Τα ευρήματα της παρούσας εργασίας ήταν σε σημαντικό βαθμό ευθυγραμμισμένα με εκείνα παρόμοιων ερευνών που έχουν διεξαχθεί τόσο στη Μεσόγειο όσο και στον Σαρωνικό Κόλπο.

### 3. Υλικά & Μεθοδολογία

#### 3.4 Περιοχή έρευνας

Οι δειγματοληψίες έλαβαν χώρα σε παράκτια περιοχή του Σαρωνικού και πιο συγκεκριμένα στη νοτιοανατολική πλευρά του, στον Φλοίσβο (37.935949 N, 23.688609 E). Γενικότερα, ο Σαρωνικός Κόλπος εκτείνεται σε μια ημιπερίκλειστη περιοχή 2900 km<sup>2</sup> στα νοτιοδυτικά του νομού Αττικής και χωρίζεται από το Αιγαίο Πέλαγος με μια νοητή γραμμή σχεδόν 50 km. Το θαλάσσιο περιβάλλον σε αυτό το σημείο μπορεί να χαρακτηριστεί ως μεσότροφο (Ραγου, 2005). Ο κόλπος δέχεται τα βιομηχανικά απόβλητα της λεκάνης της Ελευσίνας καθώς και τα -συχνά ακατέργαστα, αστικά απορρίμματα της Αθήνας. Καταγράφεται έντονη ανθρωπογενής δραστηριότητα κατά μήκος όλων των ακτών της Αττικής που συνορεύουν με τον Σαρωνικό Κόλπο. Ο δυτικός κόλπος είναι η κύρια περιοχή αποθήκευσης θρεπτικών ουσιών του Σαρωνικού, συγκεντρώνοντας κυρίως νιτρικά και πυριτικά άλατα, χωρίς να παρατηρείται σαφής τάση αύξησης του ανόργανου αζώτου τα τελευταία χρόνια. Ο Φλοίσβος δεν βρίσκεται τόσο κοντά στη βιομηχανική ζώνη της Ελευσίνας. Ωστόσο, στην μαρίνα, όπου πραγματοποιήθηκαν οι δειγματοληψίες (Εικόνα 1), είναι εμφανής και έντονη η ανθρώπινη παρουσία (παρουσία μεγάλων σκαφών στο Φλοίσβο, σε συνδυασμό με έντονη δραστηριότητα καταστημάτων εστίασης). Το νερό στο Φλοίσβο ήταν εμφανώς θόλο, υποδηλώνοντας την επίδραση ανθρώπινων πιέσεων.



**Εικόνα 1.** Χάρτης της περιοχής δειγματοληψίας στη μαρίνα του Φλοίσβου. Στο σημείο που βρίσκεται η κόκκινη πινέζα είναι το σημείο συλλογής των δειγμάτων. Η εικόνα προέρχεται από δορυφόρο (εφαρμογή Google Maps).

### 3.5 Συλλογή δειγμάτων

Για τη διερεύνηση της σύνθεσης και δυναμικής μονοκύτταρων πλαγκτικών κοινοτήτων σε δειγματοληψίες υψηλής συχνότητας πραγματοποιήθηκαν 12 δειγματοληψίες ανά δύο μέρες σε δύο διαφορετικές περιόδους. Η πρώτη περίοδος περιλάμβανε τρεις δειγματοληψίες κατά την διάρκεια του καλοκαιριού: 10/07/2023 (10-Ιουλ), 12/07/2023 (12-Ιουλ) και 14/07/2023 (14-Ιουλ), ενώ η δεύτερη περίοδος αποτελούνταν από εννέα δειγματοληψίες κατά την διάρκεια του φθινοπώρου: 23/10/2023 (23-Οκτ), 25/10/2023 (25-Οκτ), 27/10/2023 (27-Οκτ), 29/10/2023 (29-Οκτ), 31/10/2023 (31-Οκτ), 02/11/2023 (02-Νοε), 05/11/2023 (05-Νοε), 07/11/2023 (07-Νοε) και 09/11/2023 (09-Νοε). Σε κάθε μία από τις παραπάνω δειγματοληψίες, συλλέγονταν 0,5 λίτρα θαλασσινού νερού από την επιφάνεια της θάλασσας, στο οποίο προστίθενταν αμέσως λίγες σταγόνες διαλύματος Lugol απαραίτητο για την μονιμοποίηση των οργανισμών. Η διατήρηση των δειγμάτων περιλάμβανε την φύλαξη και διατήρησή τους σε σκοτεινό μέρος μέχρι το πέρας του εργαστηριακού μέρους της εργασίας και τα δείγματα χρησιμοποιήθηκαν για την ποσοτική καταμέτρηση.

Εκτός από τα 12 δείγματα των 0,5L που μονιμοποιήθηκαν με το διάλυμα Lugol, συλλεχθήκαν και κάποια δείγματα ζωντανού υλικού τα οποία δεν υπέστησαν καμία επεξεργασία. Αυτά αξιοποιήθηκαν κατευθείαν μετά την κάθε δειγματοληψία για ποιοτική παρατήρηση.

### 3.6 Μικροσκοπικές αναλύσεις

Η παρατήρηση των φυτοπλαγκτικών και πρωτοζωοπλαγκτικών ειδών πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας ανάστροφο μικροσκόπιο με αντίθεση φάσης (Zeiss AxioVert 100 Inverted Microscope). Τα δείγματα που περιείχαν ζωντανό υλικό όπως και τα διατηρημένα δείγματα εξετάστηκαν σε θαλάμους καθίζησης των 25 mL. Η αναγνώριση και η ταυτοποίηση των taxa βασίστηκε στην ταξινομική κλείδα “Identifying Marine Phytoplankton” (Jomas, 1997), όσο και σε σχετικά επιστημονικά άρθρα. Επιπλέον, φωτογραφίες του ζωντανού υλικού λήφθηκαν με τη χρήση ψηφιακής κάμερας μικροσκοπίου (AmScope MU503 Microscope Digital Camera).

Ο ποσοτικός προσδιορισμός των διατηρημένων δειγμάτων φυτοπλαγκτού και πρωτοζωοπλαγκτού, πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο του ανάστροφου μικροσκοπίου (Utermöhl, 1958). Τα δείγματα που είχαν συντηρηθεί με διάλυμα Lugol αναμείχθηκαν απαλά (συνολικά 100 φορές) πριν μεταφερθούν σε θαλάμους καθίζησης των 25 mL, ανάλογα με την πυκνότητά τους. Η παρατήρηση του υλικού πραγματοποιήθηκε για κάθε δείγμα έπειτα από 24 ώρες ώστε όλοι οι οργανισμοί να έχουν καθιζάνει στην καλυπτρίδα του θαλάμου.

Ακολούθησε μια αρχική σάρωση του θαλάμου καθίζησης σε μεγέθυνση x100 για την αναγνώριση και καταγραφή των μεγάλου μεγέθους taxa. Στη συνέχεια, σε μεγέθυνση x400, εντοπίστηκαν και καταμετρήθηκαν μικρότερα κύτταρα χρησιμοποιώντας οπτικά πεδία. Οι αριθμοί προσδιορίστηκαν κατάλληλα σε κάθε δείγμα για να εξασφαλιστεί η



καταγραφή του ελάχιστου αριθμού κυττάρων που είναι απαραίτητος για μια στατιστικά αποδεκτή εκτίμηση της αφθονίας. Έτσι, μετρήθηκαν τουλάχιστον 400 κύτταρα συνολικά (με μέγιστο στατιστικό σφάλμα  $\pm 10\%$ ) και 100 κύτταρα από τα πιο άφθονα taxa (με μέγιστο στατιστικό σφάλμα  $\pm 20\%$ ) ανά δείγμα (Utermöhl, 1958), σε 30-38 οπτικά πεδία. Μετά τον προσδιορισμό της αφθονίας κάθε taxon, υπολογίστηκε η βιομάζα φυτοπλαγκτού και πρωτοζωοπλαγκτού σε κάθε δείγμα. Η διαδικασία ξεκινάει με τον υπολογισμό του όγκου των μεγαλύτερων και των πιο άφθονων taxa. Οι διαστάσεις των κυττάρων μετρήθηκαν σε μεγέθυνση X400 και χρησιμοποιήθηκαν μαθηματικοί τύποι για τον υπολογισμό του όγκου, σύμφωνα με τη μορφολογία των taxa, όπως περιγράφεται από τους Hillebrand και συνεργάτες (1999). Για την εκτίμηση του βιοόγκου κάθε γένους, μετρήθηκαν οι διαστάσεις τουλάχιστον 10 κυττάρων και υπολογίστηκε ο μέσος όρος τους. Δεδομένου ότι η πυκνότητα του νερού είναι περίπου  $1000 \text{ kg m}^{-3}$ , εκτιμήθηκε η βιομάζα ενός μέσου κυττάρου των αντίστοιχων taxa, λαμβάνοντας υπόψη ότι οι πλαγκτικοί μικροοργανισμοί αιωρούνται στη στήλη του νερού και επομένως έχουν πυκνότητα ίση με του νερού. Το αποτέλεσμα αυτών των υπολογισμών πολλαπλασιάστηκε με την αντίστοιχη αφθονία του taxon και στη συνέχεια με το  $\times 10^{-6}$  για τον υπολογισμό της βιομάζας σε  $\text{mg L}^{-1}$ .

#### 4. Αποτελέσματα

##### 4.5 Σύνθεση μικροβιακής κοινότητας

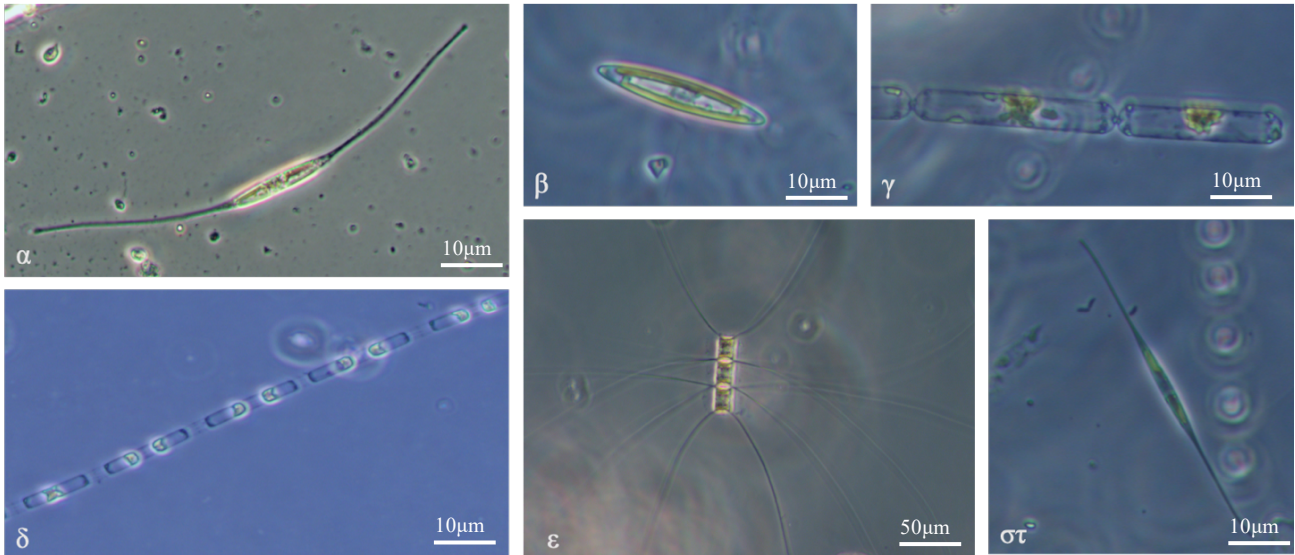
Συνολικά αναγνωρίστηκαν 41 taxa. Με 21 taxa, τα Διάτομα (Bacillariophyceae) ήταν η ανώτερη ταξινομική ομάδα με τη μεγαλύτερα ποικιλότητα ως προς τον πλούτο ειδών, ακολουθούμενα από τα Δινομαστιγωτά (Dinophyceae) με 12 taxa. Επιπλέον, παρατηρήθηκαν taxa από τις ακόλουθες ταξινομικές ομάδες: Πρασινοφύκη (Chlorophyceae) (3 taxa), Κρυπτοφύκη (2 taxa), Διχτυοχοφύκη (Dictyochophyceae) (1 taxon), Απτοφύκη (Haptophyceae) (1 taxon) και Ευγληνοφύκη (Euglenophyceae) (1 taxon) (Πίνακας 1). Στα ετερότροφα νανομαστιγωτά (Heterotrophic Nanoflagellates, HNFs) παρατηρήθηκαν επίσης ποικίλοι μορφότυποι, αλλά το μικρό τους μέγεθος δεν επέτρεψε τόσο την αναγνώριση όσο και την ταξινόμησή τους. Πρέπει επίσης να αναφερθεί η παρουσία σπορίων μυκήτων, τμημάτων από ανώτερα φυτικά και ζωικά taxa, καθώς και διάφορων γενών ζωοπλαγκτού, και βακτηριοπλαγκτού σε όλα τα δείγματα.

**Πίνακας :** Λίστα των ειδών φυτοπλαγκτού και πρωτοζωοπλαγκτού που εντοπίστηκαν και αναγνωρίστηκαν με τη μέθοδο του ανάστροφου μικροσκοπίου για κάθε δείγμα. Η απλή παρουσία ενός είδους σημειώνεται με +, η παρουσία ειδών που συμβάλλουν σε ποσοστό μεγαλύτερο του 10% της συνολικής αφθονίας στο δείγμα σημειώνεται με ++, και η απουσία ενός είδους σημειώνεται με -.

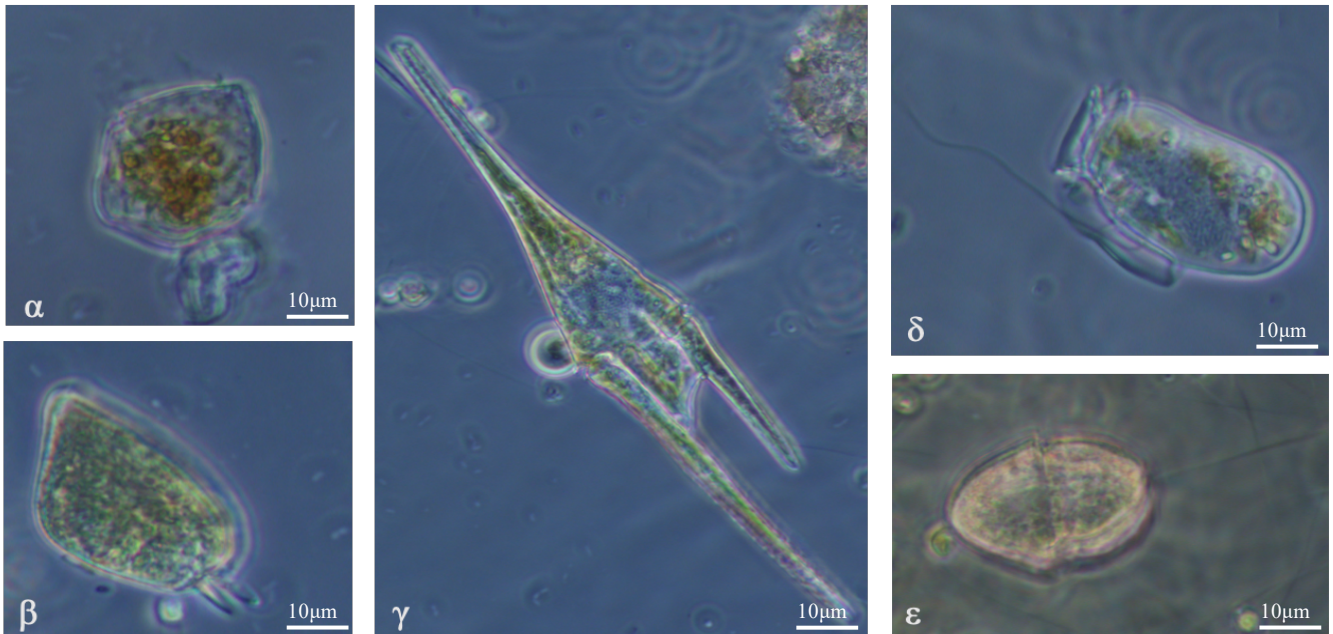
Ανώτερες ταξινομικές ομάδες	Taxa	10/7	12/7	14/7	23/10	25/10	27/10	29/10	31/10	2/11	5/11	7/11	9/11
Διάτομα (Bacillariophyceae)	<i>Asterionellopsis glacialis</i>	-	-	-	+++	+++	+	+	+	-	+	+	-
	<i>Bacillaria</i> sp.	-	-	-	+	-	+	+	+	+	+	-	+
	<i>Chaetoceros tenuissimus</i>	+	+++	+++	+++	+	+	+	+	+	+	+	+
	<i>Chaetoceros</i> spp.	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+	+++	+	+	+
	<i>Cylindrotheca closterium</i>	+	+	+	+	-	+	-	+	+	+	+	-
	<i>Dactyliosolen fragilissimus</i>	-	-	-	-	++	+	-	-	+	-	+	+
	<i>Guinardia</i> spp.	-	-	-	-	+	-	+	+	+	+	+	+
	<i>Lauderia annulate</i>	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-
	<i>Leptocylindrus danicus</i>				-	-	+	+	-	-	-	-	
	<i>Leptocylindrus minimus</i>	-	-	-	-	+	-	+	-	-	-	-	-
	<i>Licmophora</i> sp.	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-	+
	<i>Navicula</i> spp.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+
	<i>Nitzschia longissima</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	<i>Nitzschia</i> spp. (large)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	<i>Nitzschia</i> spp. (small)	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	<i>Odontella</i> spp.	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-
	<i>Pleurosigma normanii</i>	-	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-
	<i>Pseudonitzschia spp.</i>	-	+	-	+	+	-	-	+	-	+	+	+
	<i>Rhizosolenia</i> sp.	+	-		-	+	-	-	-	-	-	-	-

	<i>Skeletonema costatum</i>	+++	+++	+++	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	<i>Thalassionema</i> sp.	-	-	-	+	-	+	-	+	-	-	-	+
<b>Δινομαστιγοτά (Dinophyceae)</b>	<i>Alexandrium-like</i>	-	-	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-
	<i>Ceratium</i> spp.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+
	<i>Dinophysis</i> spp.	+	+	+	-	+	+	-	+	+	+	+	+
	<i>Gonyaulax</i> spp.	+	+	+	+	+	+++	+	+	+	+	+	+
	<i>Gymnodinium</i> spp.	+	+	+	+	-	-	+	-	+	+	+	-
	<i>Gyrodinium</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-
	<i>Heterocapsa</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+
	<i>Oxytoxum</i> sp.	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	<i>Podolampas palmipes</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-
	<i>Prorocentrum</i> spp.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	<i>Protoperidinium</i> spp.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	<i>Scrippsiella trochoidea</i>	-	-	+	-	+	+	-	+	-	+	+	-
<b>Χλωροφύκη (Chlorophyceae)</b>	<i>Chlamydomonas-like</i>	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	<i>Pyramimonas-like</i>	-	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	<i>Tetraselmis-like</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<b>Κρυπτοφύκη (Cryptophyceae)</b>	<i>Plagioselmis</i> sp.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	<i>Teleulax acuta</i>	-	-	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-
<b>Απτοφύκη (Haptophyceae)</b>	<i>Chrysochromulina</i> spp.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<b>Ευγληνοφύκη (Euglenophyceae)</b>	<i>Eutreptiella</i> sp.	-	-	-	+	-	-	-	+	-	+	+	+
<b>Διχτυοχοφύκη (Dictyochophyceae)</b>	<i>Dictyocha fibula</i>	-	-	-	+	+	+	+	+	-	-	+	+

HNFs (Heterotrophic Nanoflagellates)		+	+++	+	+	+	+	+	+	+++	+	+++	+++

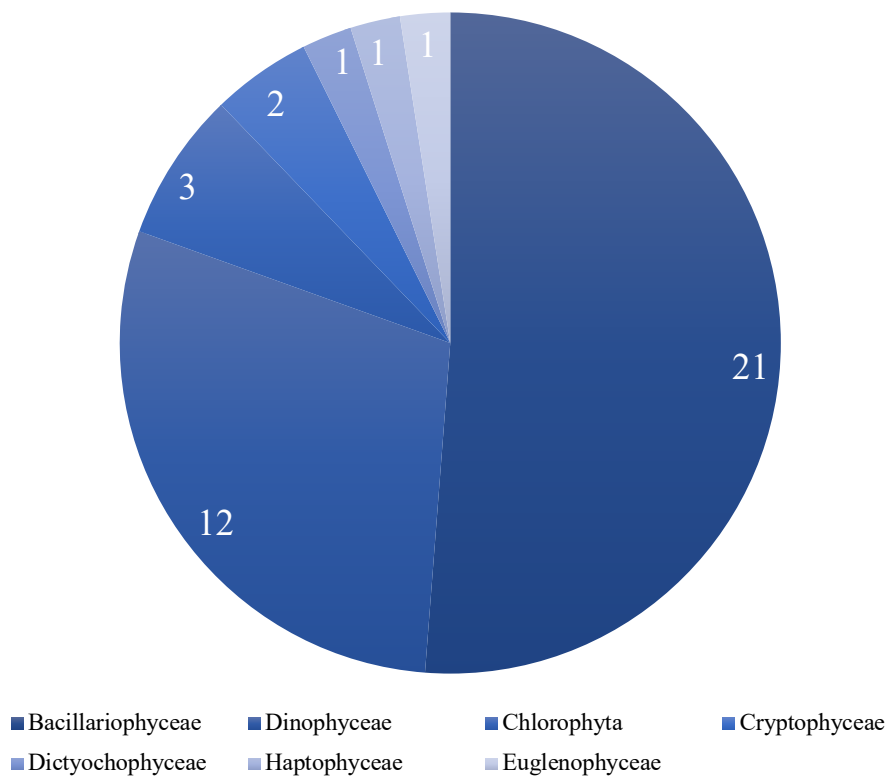


**Εικόνα 2** Φωτογραφίες Διατόμων που εντοπίστηκαν στον Φλοίσβο κατά την διάρκεια της παρακολούθησης. Τα taxa που απεικονίζονται είναι: α) *Nitzschia longissima* β) *Navicula* sp., γ) *Dactyliosolen fragilissimus*, δ) *Skeletonema costatum*, ε) *Chaetoceros* sp., στ) *Cylandrotheca closterium*.

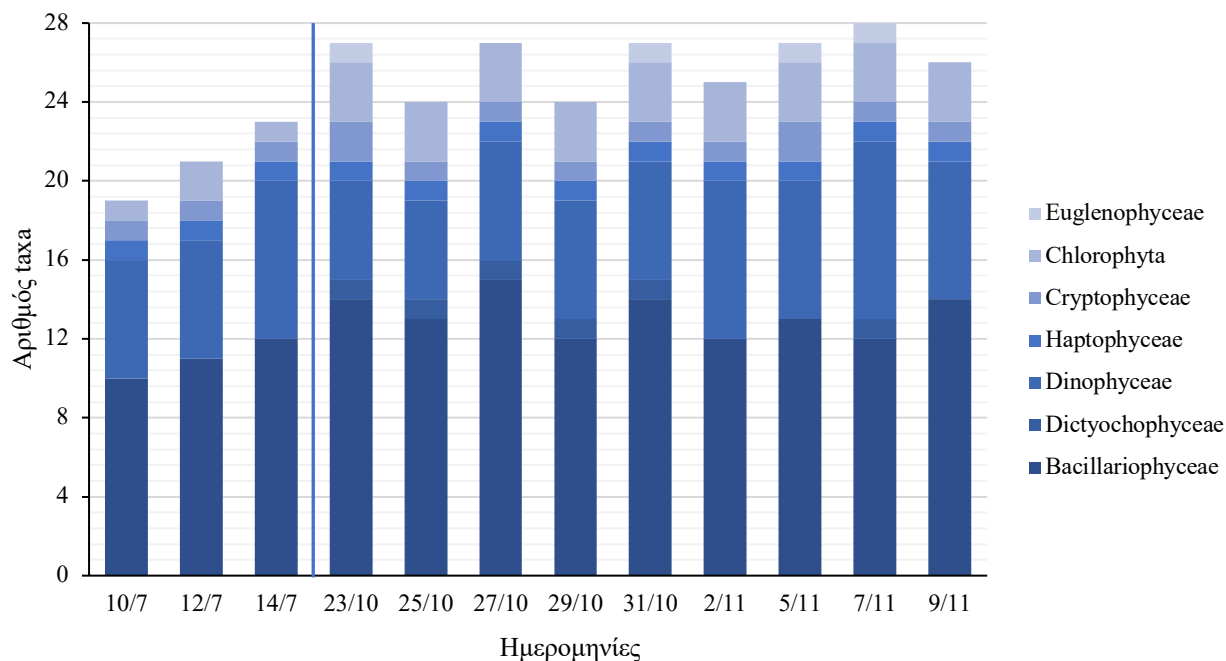


**Εικόνα 3:** Φωτογραφίες Δινομαστιγωτών που εντοπίστηκαν στον Φλοίσβο κατά την διάρκεια της παρακολούθησης. Τα taxa που απεικονίζονται είναι: α) *Gonyaulax* sp., β) *Prorocentrum* sp., γ) *Ceratium furca*, δ) *Dinophysis* sp. ε) *Gymnodinium* sp.

Στην περιοχή δειγματοληψίας, τα Διάτομα (Bacillariophyceae) αποτελούν την κυρίαρχη ταξινομική ομάδα (Εικόνα 2), με 21 είδη που αντιπροσωπεύουν το 51,22% της συνολικής ποικιλότητας. Ακολουθούν τα Δινομαστιγωτά (Dinophyceae) με 12 είδη, τα οποία αποτελούν το 29,27% της συνολικής ποικιλότητας (Εικόνα 3). Οι υπόλοιπες ομάδες περιλαμβάνουν τα Πρασινοφύκη με 3 είδη (7,32%), τα Κρυπτοφύκη με 2 είδη (4,88%), καθώς και τα Διχτυοφύκη, τα Απτοφύκη και τα Ευγληνοφύκη με 1 είδος η καθεμία, που αντιπροσωπεύουν το 2,44% της συνολικής ποικιλότητας (Εικόνα 4).



**Εικόνα 4:** Σύθεση του φυτοπλαγκτού και πρωτοζωοπλαγκτού στο σύνολο των δειγμάτων με βάση τον αριθμό των ειδών ανά ανώτερη ταξινομική ομάδα.



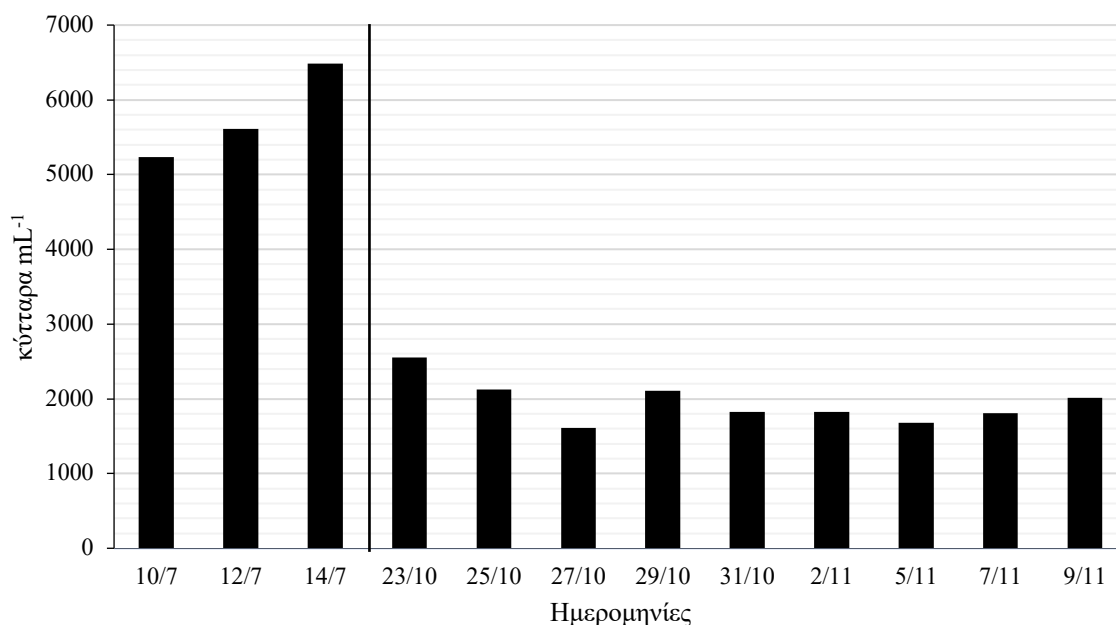
**Εικόνα 5:** Σύνθεση του φυτοπλαγκτού και πρωτοζωοπλαγκτού ανά ημερομηνία δειγματοληψίας, βάσει του αριθμού ειδών ανά ανώτερη ταξινομική ομάδα

Το ραβδόγραμμα στην Εικόνα 5 απεικονίζει την εξέλιξη της σύνθεσης των πλαγκτικών κοινοτήτων στις ημερομηνίες δειγματοληψίας. Δεν παρατηρούνται παρά μικρές διακυμάνσεις από δείγμα σε δείγμα. Τα Διάτομα κυριαρχούν καθ' όλη τη διάρκεια, όπως διαφαίνεται από την υψηλή παρουσία τους σε κάθε δειγματοληψία. Ακολουθούν τα Δινομαστιγωτά, τα οποία παρουσιάζουν σταθερή παρουσία, ενώ οι υπόλοιπες ομάδες (π.χ. Πρασινοφύκη, Κρυπτοφύκη) εμφανίζουν χαμηλότερη αφθονία.

#### 4.6 Αφθονία

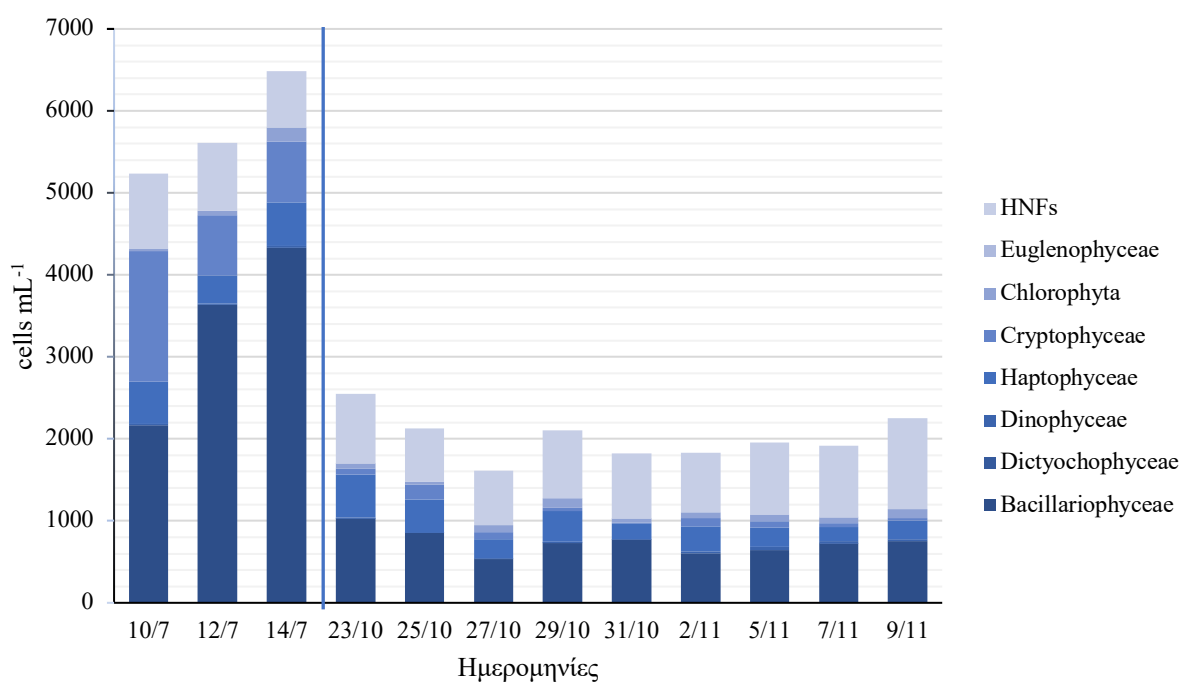
Η συνολική αφθονία των φυτοπλαγκτικών και πρωτοζωοπλαγκτικών ειδών παρουσιάζει μικρές διακυμάνσεις στις δειγματοληψίες της ίδιας εποχής, αλλά ήταν υπερδιπλάσια κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού (Εικόνα 6).

Πιο συγκεκριμένα, η ημέρα με την υψηλότερη αφθονία σε όλες τις δειγματοληψίες ήταν το καλοκαίρι, στις 14/07, με τιμή 6485 κύτταρα  $\text{mL}^{-1}$ , η οποία είναι περίπου 2,5 φορές μεγαλύτερη από την υψηλότερη αφθονία του φθινοπώρου που σημειώθηκε στις 23/10, με τιμή 2550,62 κύτταρα  $\text{mL}^{-1}$ . Κατά το φθινόπωρο, η χαμηλότερη αφθονία παρατηρήθηκε στις 27/10 (1614,23 κύτταρα  $\text{mL}^{-1}$ ).



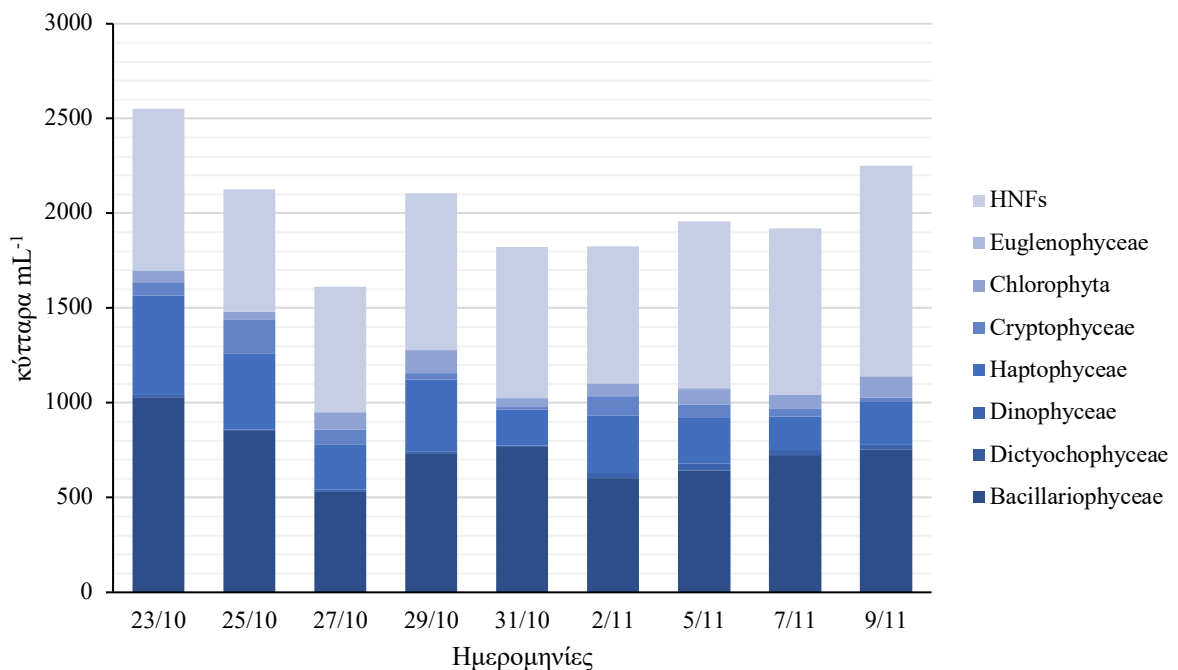
**Εικόνα 6:** Συνολική αφθονία φυτοπλαγκτού για κάθε ημερομηνία δειγματοληψίας.

Παρατηρείται ότι οι κυρίαρχες ομάδες φυτοπλαγκτού και πρωτοζωοπλαγκτού, αλλάζουν σημαντικά μεταξύ καλοκαιριού και φθινοπώρου (Εικόνα 7). Κατά τις δειγματοληψίες του καλοκαιριού, τα Διάτομα εμφανίζονται ως η κυρίαρχη ομάδα, συμβάλλοντας σημαντικά στη συνολική αφθονία με τιμές που κυμαίνονται από 2163 κύτταρα mL<sup>-1</sup> έως 4330,63 κύτταρα mL<sup>-1</sup>. Επίσης, τα Κρυπτοφύκη από 731,3 κύτταρα mL<sup>-1</sup> έως 1597,4 κύτταρα mL<sup>-1</sup> και τα Απτοφύκη με αφθονίες από 340,1 κύτταρα mL<sup>-1</sup> έως 532,5 κύτταρα mL<sup>-1</sup>, παρουσιάζουν σημαντική αφθονία κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου.



**Εικόνα 7:** Συνολικές αφθονίες ανώτερων ταξινομικών ομάδων για κάθε ημερομηνία δειγματοληψίας.

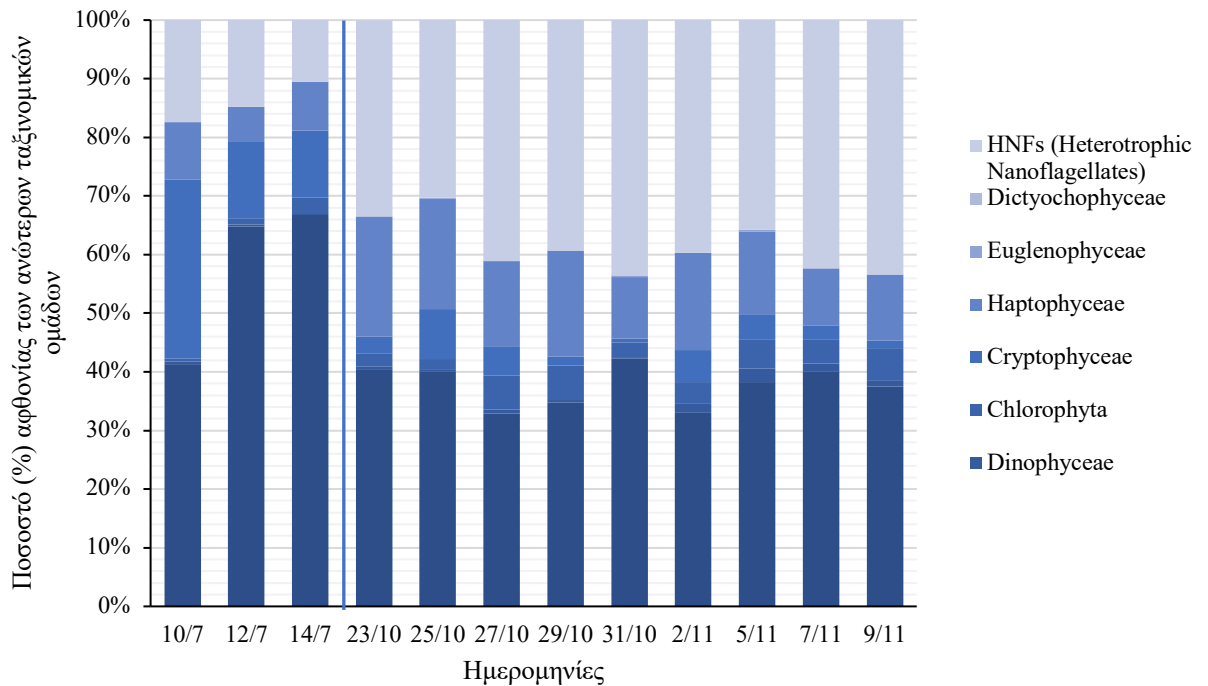
Αντίθετα, το φθινόπωρο παρατηρείται μια σημαντική μεταβολή στη σύνθεση της φυτοπλαγκτικής και πρωτοζωοπλαγκτικής κοινότητας (Εικόνα 8), με τα Heterotrophic Nanoflagellates (HNF) να υπερτερούν σε αφθονία σε σχέση με τις άλλες ομάδες με τιμές που κυμαίνονταν από 599,8 κύτταρα mL<sup>-1</sup> έως 874,8 κύτταρα mL<sup>-1</sup>. Παρόλο που τα Διάτομα διατηρούν σημαντική παρουσία, η αφθονία τους είναι μειωμένη σε σχέση με το καλοκαίρι με τον μέσο όρο αφθονίας να είναι στα 737,6 κύτταρα mL<sup>-1</sup>. Επιπλέον, τα Δινομαστιγωτά εμφανίζουν αξιοσημείωτη αφθονία και κατά τη διάρκεια του φθινοπώρου.



**Εικόνα 8:** Συνολικές αφθονίες ανώτερων ταξινομικών ομάδων για κάθε ημερομηνία στις φθινοπωρινές δειγματοληψίες.

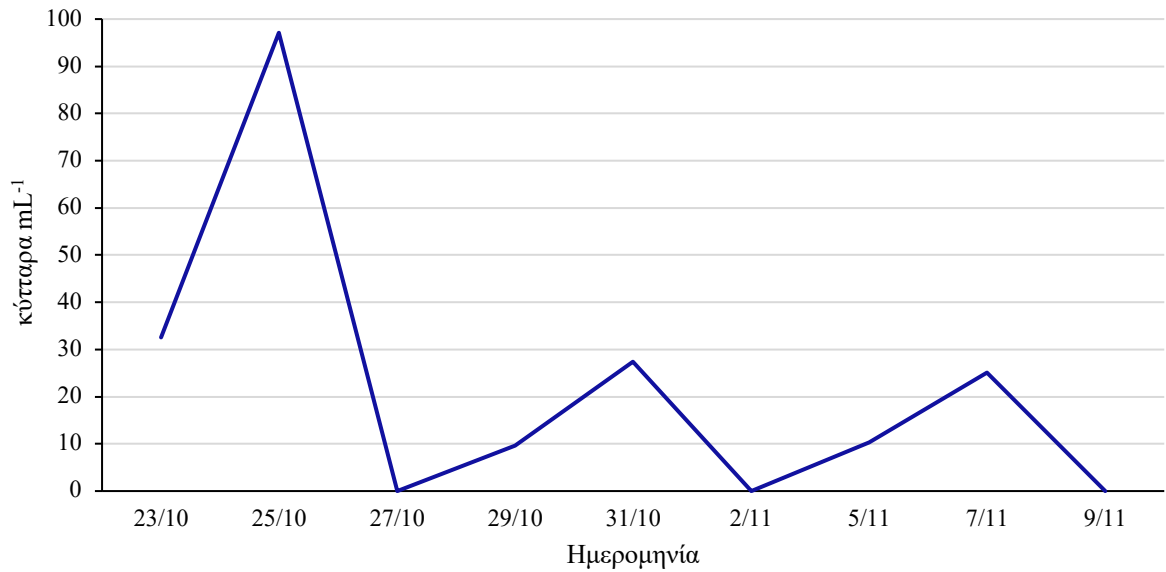
Συγκεκριμένα, στο διάγραμμα της Εικόνας 9, παρουσιάζεται η σύγκριση της ποσοστιαίας σύνθεσης των πλαγκτικών κοινοτήτων. Κατά τις καλοκαιρινές δειγματοληψίες, τα Διάτομα συμμετείχαν από 40% έως 67% στην συνολική αφθονία των δειγμάτων, ενώ τα ποσοστά αφθονίας των HNFs κυμαίνονταν από 10% έως 17%. Η ισορροπία αυτή ανατρέπεται στις φθινοπωρινές δειγματοληψίες, καθότι σε όλα τα δείγματα, η συμμετοχή των HNFs αυξήθηκε ξεπερνώντας το 30% της συνολικής αφθονίας και φτάνοντας έως και 43,4% στις αρχές Νοεμβρίου (05/11). Τα Κρυπτοφύκη συνεισέφεραν με ποσοστά από 1,5% έως και 30,5%, με υψηλότερες τιμές κατά την θερινή περίοδο. Οι υπόλοιπες ομάδες όπως τα Πρασινοφύκη και Δινομαστιγωτά είχαν μειωμένη συμμετοχή στην αφθονία (συμμετοχή <6%), ενώ τα Απτοφύκη παρουσίασαν αυξομειώσεις. Οι ταξινομικές ομάδες των Ευγληνοφυκών και των Δικτυοφυκών ήταν σχεδόν ανύπαρκτες σε όλα τα δείγματα με ποσοστά <1%.





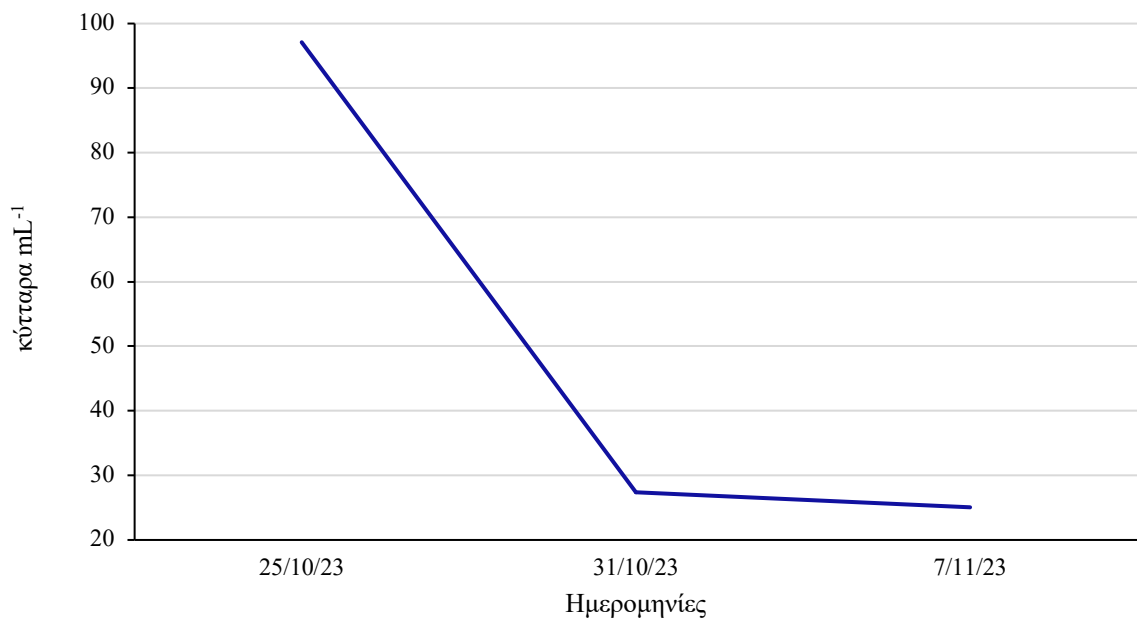
**Εικόνα 9:** Ποσοστό (%) αφθονίας των ανώτερων ταξινομικών σε κάθε δειγματοληψία.

Για την ανάδειξη της σημασίας της υψηλής συχνότητας παρακολούθησης, είναι απαραίτητη η λεπτομερέστερη εξέταση των δεδομένων συγκεκριμένων ειδών. Στα επόμενα διαγράμματα παρουσιάζονται οι αφθονίες ορισμένων ειδών, αποκαλύπτοντας κρίσιμες διακυμάνσεις και κορυφές στους πληθυσμούς τους. Αυτές οι αναλύσεις υπογραμμίζουν πως η δειγματοληψία κάθε δύο μέρες επιτρέπει την καταγραφή δυναμικών αλλαγών που θα μπορούσαν να παραλειφθούν με εβδομαδιαία δειγματοληψία.



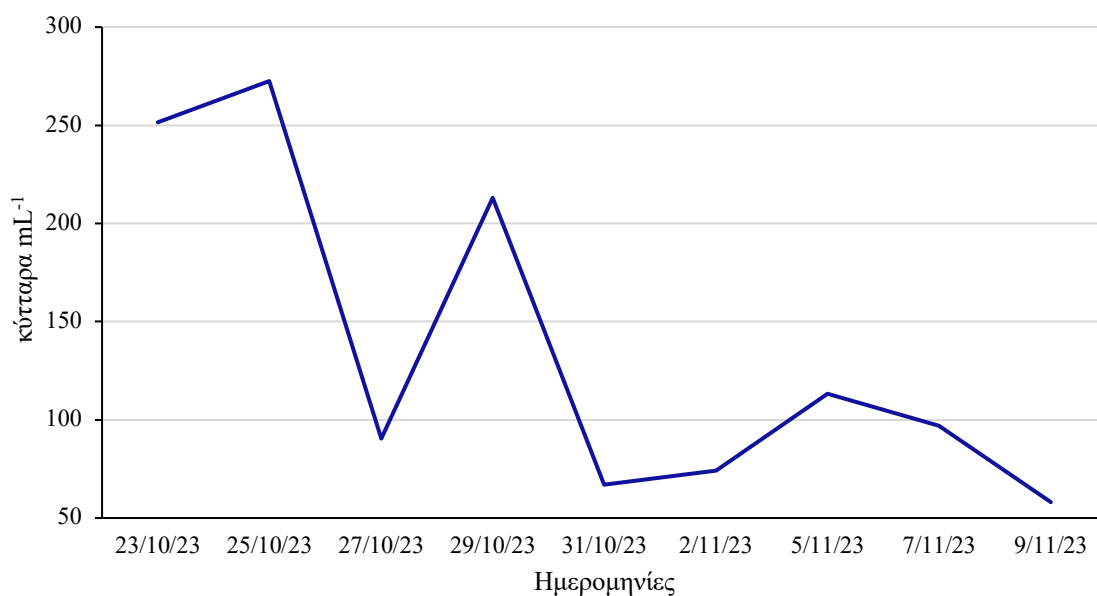
**Εικόνα 10α:** Η αφθονία του Διατόμου *Asterionellopsis glacialis* από 23/10/2023 έως 9/11/2023.

Στην αφθονία του Διατόμου *Asterionellopsis glacialis* από τις 23/10/2023 έως τις 9/11/2023 (Εικόνα 10α), υπάρχει μια κορυφή στις 25/10/23 με αφθονία 97,09 κύτταρα mL<sup>-1</sup> και έπειτα από δύο μέρες στις 27/10/23 0,002 κύτταρα mL<sup>-1</sup>, η οποία ενδεχομένως να μην είχε εντοπιστεί με εβδομαδιαίες δειγματοληψίες. Αν οι δειγματοληψίες γίνονταν εβδομαδιαία (π.χ., στις 25/10, 31/10, και 7/11) (Εικόνα 10β), θα διαμορφωνόταν η εσφαλμένη αντίληψη ότι ο πληθυσμός μειώνεται συνεχώς.

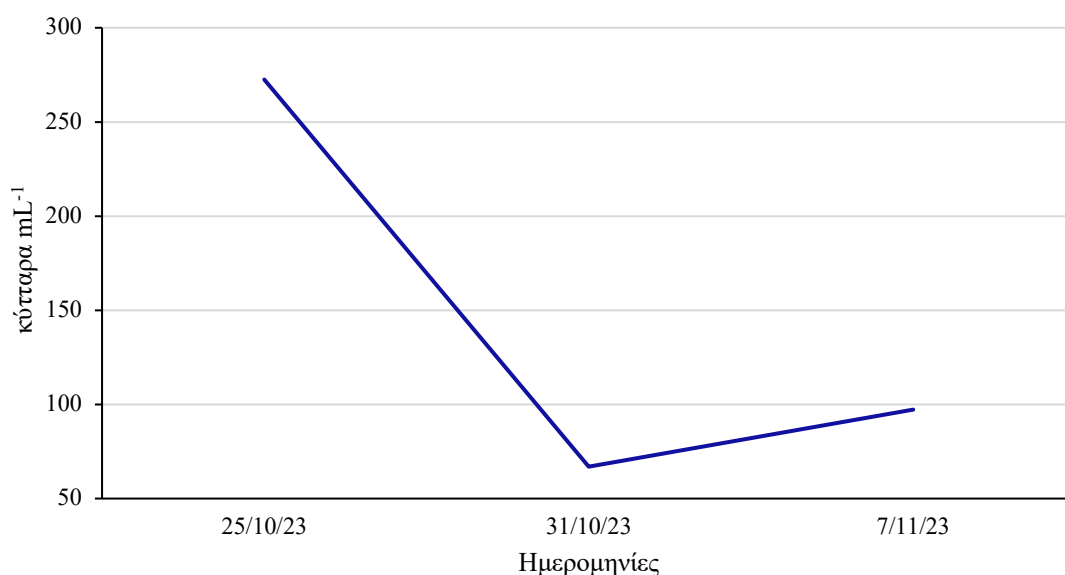


**Εικόνα 10β:** Η αφθονία του Διατόμου *Asterionellopsis glacialis* με βάση υποθετικές εβδομαδιαίες δειγματοληψίες.

Επιπλέον, η αφθονία του *Chaetoceros tenuissimus* παρουσιάζει σημαντικές διακυμάνσεις από τις 23/10/2023 έως τις 9/11/2023 (Εικόνα 11α), με πιο χαρακτηριστικά, την κορυφή στις 25/10/2023 και πτώση στις 27/10/2023. Στη συνέχεια, υπάρχει ανάκαμψη και νέες διακυμάνσεις. Αν οι δειγματοληψίες γίνονταν στις 25/10 και στη συνέχεια στις 31/10, θα είχε χαθεί η πτώση της αφθονίας στις 27/10 και η κορυφή στις 29/10 (Εικόνα 11β). Αυτές οι κρίσιμες αλλαγές δεν θα καταγράφονταν, οδηγώντας σε μια εσφαλμένη εικόνα της δυναμικής του πληθυσμού.



**Εικόνα 11α:** Η αφθονία του Διατόμου *Chaetoceros tenuissimus* από 23/10/2023 έως 9/11/2023.



**Εικόνα 11β:** Η αφθονία του Διατόμου *Chaetoceros tenuissimus* με βάση υποθετικές εβδομαδιαίες δειγματοληψίες.

#### 4.7 Βιομάζα

Τα άτομα που ανήκουν στις κατηγορίες των Πρασινοφύκων, των Κρυπτοφύκων, των Απτοφύκων, καθώς και των HNFs, και ορισμένα διάτομα όπως τα *Chaetoceros tenuissimus*, *Cylindrotheca closterium*, *Leptocylindrus minimus*, *Nitzschia* sp., *Pseudonitzschia* spp., *Skeletonema costatum*, έχουν μικρό βιοόγκο (Πίνακας 2). Από την άλλη πλευρά, τα μέλη της ομάδας των Δινομαστιγωτών παρουσιάζουν υψηλότερο βιοόγκο, με κάποια από αυτά να είναι ιδιαίτερα αξιοσημείωτα, όπως τα *Ceratium* spp., *Dinophysis* spp., *Gonyaulax* spp., *Prorocentrum* spp. Τα Δινομαστιγωτά, μαζί με ορισμένα είδη διατόμων όπως τα *Guinardia striata* και *Rhizosolenia styliformis*, έπαιξαν σημαντικό ρόλο στη συνολική διαμόρφωση της βιομάζας (Πίνακας 2).

**Πίνακας 2:** Βιοόγκος ( $\mu\text{m}^3$ ) του κυττάρου για κάθε taxon

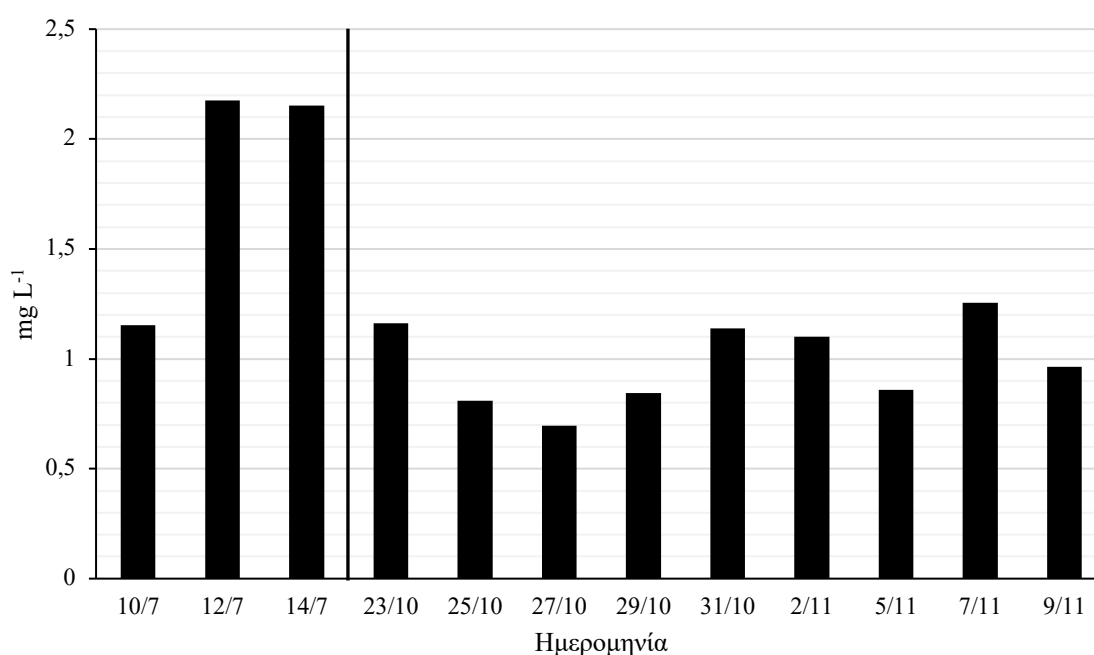
Ανώτερες ταξινομικές ομάδες	Taxa	Βιοόγκος (μm <sup>3</sup> )
<b>Διάτομα (Bacillariophyceae)</b>		2538
	<i>Asterionellopsis glacialis</i>	
	<i>Bacillaria</i> sp.	2000
	<i>Chaetoceros tenuissimus</i>	68
	<i>Chaetoceros</i> spp.	1800
	<i>Cylindrotheca closterium</i>	139
	<i>Dactyliosolen fragilissimus</i>	6176
	<i>Guinardia</i> spp.	3000
	<i>Lauderia annulate</i>	5000
	<i>Leptocylindrus danicus</i>	899
	<i>Leptocylindrus minimus</i>	20
	<i>Licmophora</i> sp.	3500
	<i>Navicula</i> spp.	2139
	<i>Nitzschia longissima</i>	734
	<i>Nitzschia</i> spp. (large)	1200
	<i>Nitzschia</i> spp. (small)	450
	<i>Odontella</i> spp.	168411
	<i>Pleurosigma normanii</i>	20040
	<i>Pseudonitzschia</i> spp.	314
	<i>Rhizosolenia</i> sp.	6000
<i>Skeletonema costatum</i>	42	
<i>Thalassionema</i> sp.	179	
<b>Δινομαστιγωτά (Dinophyceae)</b>		
	<i>Alexandrium</i> -like	8182
	<i>Ceratium</i> spp.	25000

	<i>Dinophysis</i> spp.	6000
	<i>Gonyaulax</i> spp.	10000
	<i>Gymnodinium</i> spp.	3233
	<i>Gyrodinium</i> sp.	18326
	<i>Heterocapsa</i> sp.	910
	<i>Oxytoxum</i> sp.	8232
	<i>Podolampas palmipes</i>	16212
	<i>Prorocentrum</i> spp.	8000
	<i>Protoperidinium</i> spp.	11650
	<i>Scrippsiella trochoidea</i>	6985
<b>Χλωροφύκη (Chlorophyceae)</b>		90
	<i>Chlamydomonas</i> -like	
	<i>Pyramimonas</i> -like	78
	<i>Tetraselmis</i> -like	236
<b>Κρυπτοφύκη (Cryptophyceae)</b>		67
	<i>Plagioselmis</i> sp.	
	<i>Teleulax acuta</i>	100
<b>Απτοφύκη (Haptophyceae)</b>		
	<i>Chrysochromulina</i> spp.	35
<b>Euglenophyceae (Ευγληνοφύκη)</b>		1507
	<i>Eutreptiella</i> sp.	
<b>Διχτυοφύκη (Dictyochophyceae)</b>		
	<i>Dictyocha fibula</i>	943
<b>HNFs (Heterotrophic Nanoflagellates)</b>		39

Η βιομάζα είναι αρκετά υψηλότερη το καλοκαίρι σε σχέση με το φθινόπωρο, καταδεικνύοντας σημαντικές εποχικές διαφορές (Εικόνα 12). Κατά τις καλοκαιρινές δειγματοληψίες, η υψηλότερη βιομάζα καταγράφηκε στις 12/7/23 με τιμή 2,17 mg L<sup>-1</sup>. Αντίθετα, κατά τις φθινοπωρινές δειγματοληψίες, η υψηλότερη βιομάζα σημειώθηκε στις 07/11/23 με τιμή 1,26 mg L<sup>-1</sup>, ενώ η χαμηλότερη βιομάζα καταγράφηκε στις 27/10/23 με τιμή 0,69 mg L<sup>-1</sup>.

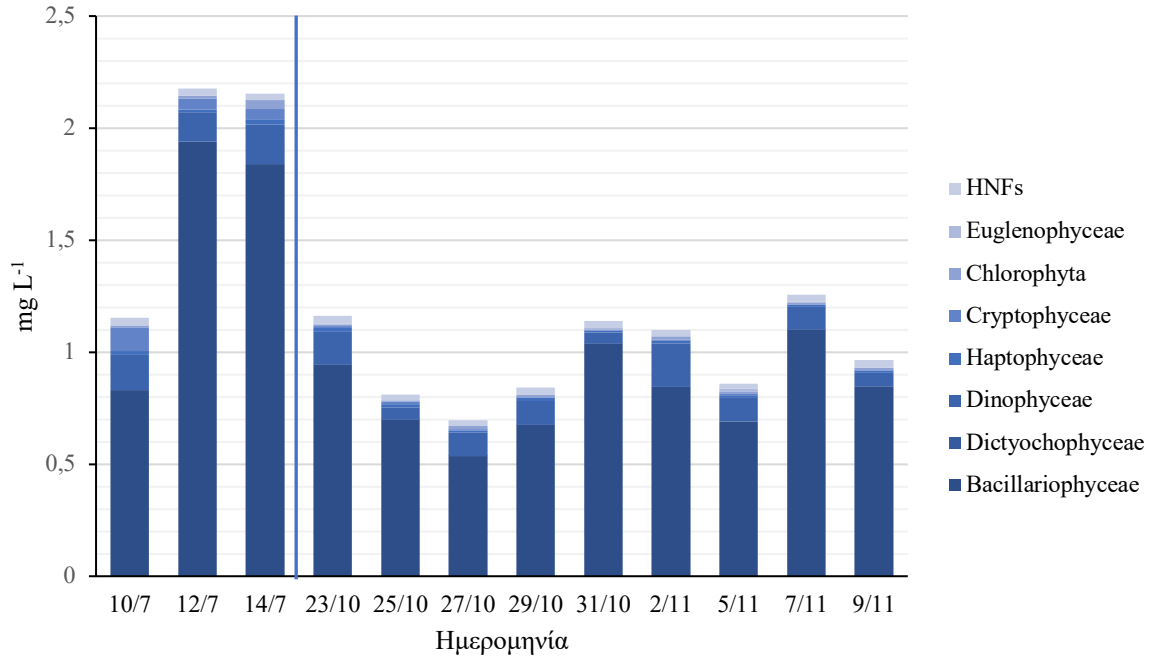
Είναι ενδιαφέρον ότι, ενώ η υψηλότερη αφθονία φυτοπλαγκτού και πρωτοζωοπλαγκτού κατά το καλοκαίρι σημειώθηκε στις 14/07, η υψηλότερη βιομάζα καταγράφηκε στις 12/07. Αυτό υποδεικνύει ότι στις 12/07 κυριαρχούσαν μεγαλύτερα σε μέγεθος είδη φυτοπλαγκτού και πρωτοζωοπλαγκτού, συμβάλλοντας περισσότερο στη συνολική βιομάζα.

Οι ανωτέρω παρατηρήσεις καταδεικνύουν τις διαφορές της συνολικής βιομάζας ανάμεσα στις δύο περιόδους, καθώς και μέσα στην περίοδο του φθινοπώρου, καθιστώντας αναγκαία την λεπτομερή παρακολούθηση των αλλαγών στις πλαγκτικές κοινότητες.



**Εικόνα 12:** Συνολική βιομάζα όλων των taxa για κάθε μέρα δειγματοληψίας.

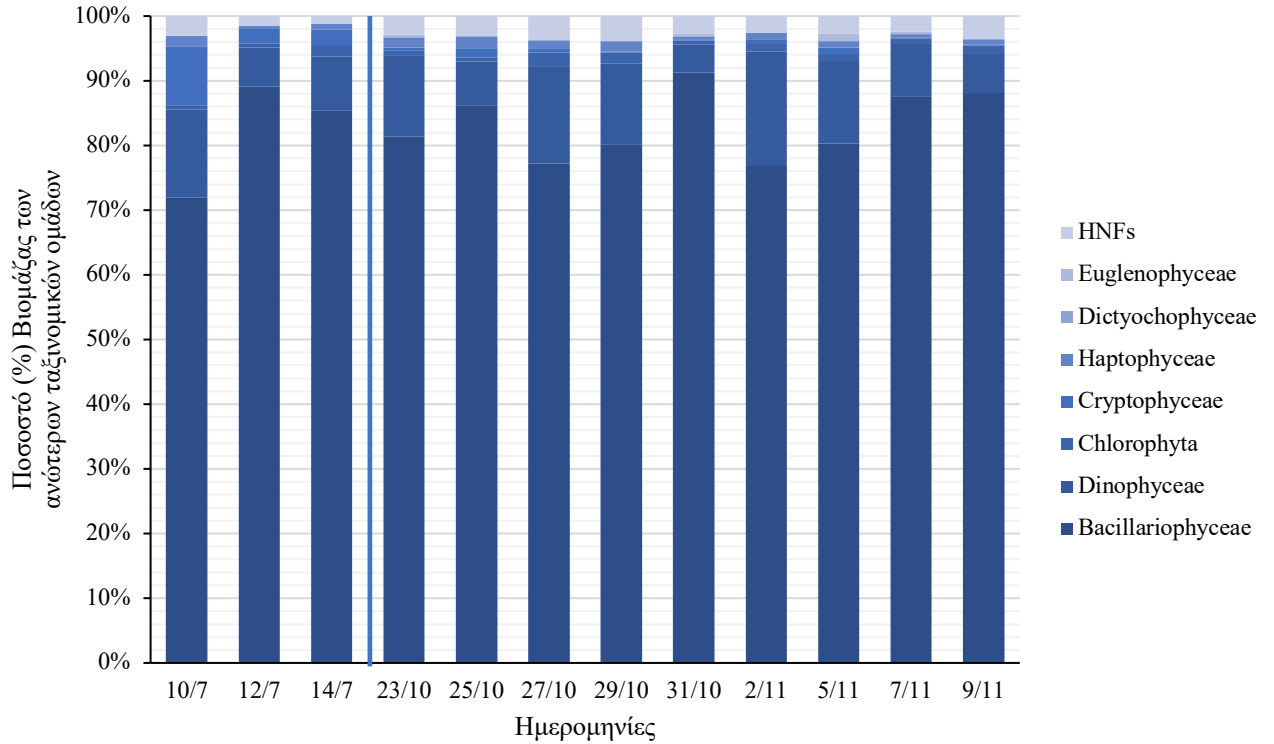
Η σημαντική συμβολή των Διατόμων παρατηρείται καθ' όλη τη διάρκεια των δειγματοληψιών, γεγονός που τα καθιστά κυρίαρχη ομάδα όσον αφορά την βιομάζα. Εκτός από τα Διάτομα, τα Δινομαστιγωτά επίσης συμβάλλουν σημαντικά στη βιομάζα, ειδικά κατά τις φθινοπωρινές δειγματοληψίες. Κατά την καλοκαιρινή περίοδο, τα Κρυπτοφύκη παίζουν σημαντικό ρόλο στη συνολική βιομάζα, σε αντίθεση με την φθινοπωρινή περίοδο, όπου η συμβολή τους είναι ελάχιστη. Οι υπόλοιπες ομάδες, όπως τα Απτοφύκη, Χλωροφύκη, Ευγληνοφύκη και τα HNFs, δεν φαίνεται να επηρεάζουν σημαντικά τη συνολική βιομάζα κατά τις περιόδους δειγματοληψίας (Εικόνα 13).



**Εικόνα 14:** Συνολική βιομάζα ανώτερων ταξινομικών ομάδων για κάθε μέρα δειγματοληψίας.

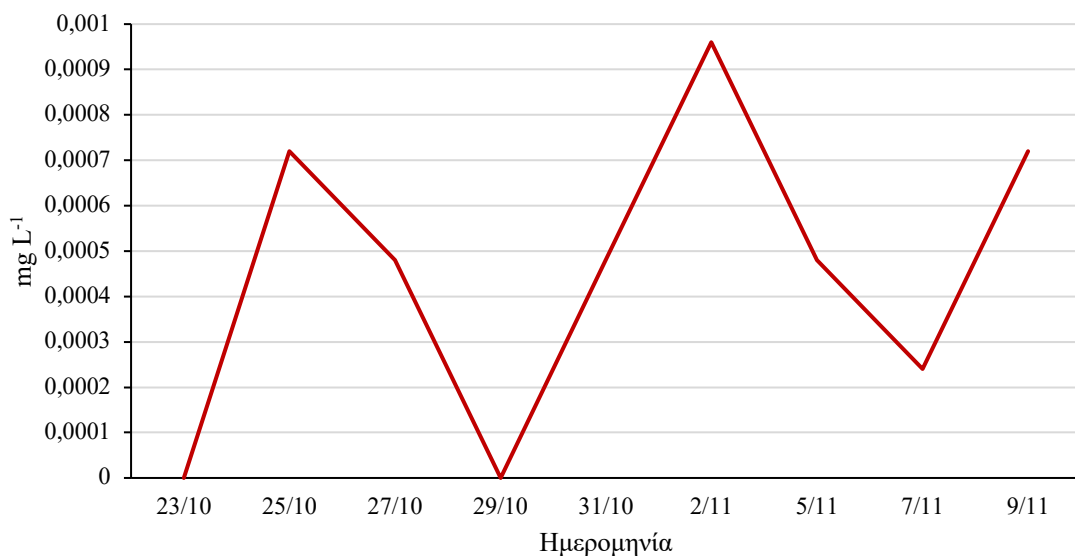
Συγκεκριμένα, τα Διάτομα κυριάρχησαν σε όλες τις δειγματοληψίες με ποσοστά που κυμαίνονται από 77% έως 91%. Τα Δινομαστιγωτά, το φθινόπωρο φαίνεται να συμβάλλουν σημαντικά στα ποσοστά της βιομάζας, με μέγιστο ποσοστό 17,8% στις 02/11, σε αντίθεση με το καλοκαίρι όπου τα ποσοστά τους ήταν χαμηλότερο. Τα HNFs διατηρούν σταθερή συμμετοχή καθ' όλη τη διάρκεια των δειγματοληψιών με ποσοστά που κυμαίνονται από 1,5% έως 3,7. Οι υπόλοιπες ταξινομικές ομάδες όπως τα Κρυπτοφύκη και τα Απτοφύκη, είχαν συνήθως μικρή συμμετοχή < 2% στη συνολική βιομάζα (Εικόνα 15).





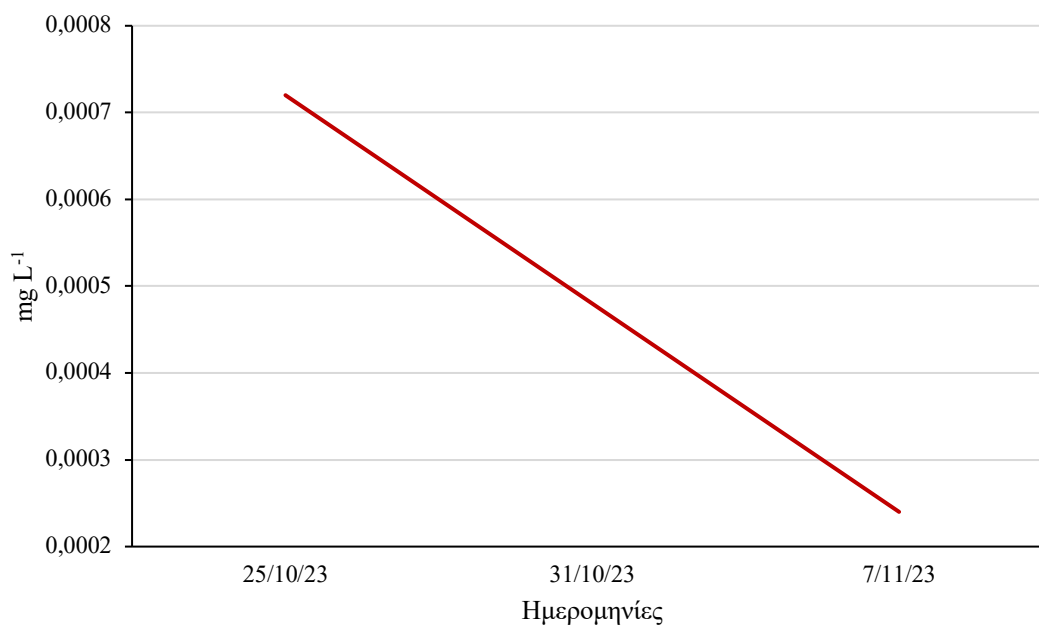
**Εικόνα 15:** Ποσοστό (%) Βιομάζας των ανώτερων ταξινομικών ομάδων σε κάθε δειγματοληψία.

Για να τονιστεί η σημασία της παρακολούθησης υψηλής συχνότητας, απαιτείται μια πιο προσεκτική εξέταση των δεδομένων που αφορούν ορισμένα είδη. Η βιομάζα κάποιων ειδών παρουσιάζεται στα παρακάτω διαγράμματα, αναδεικνύοντας σημαντικές κορυφές και διακυμάνσεις στους πληθυσμούς τους. Αυτά τα αποτελέσματα υπογραμμίζουν πώς η δειγματοληψία κάθε δύο ημέρες επιτρέπει την καταγραφή δυναμικών αλλαγών που θα μπορούσαν να παραληφθούν με εβδομαδιαία δειγματοληψία.

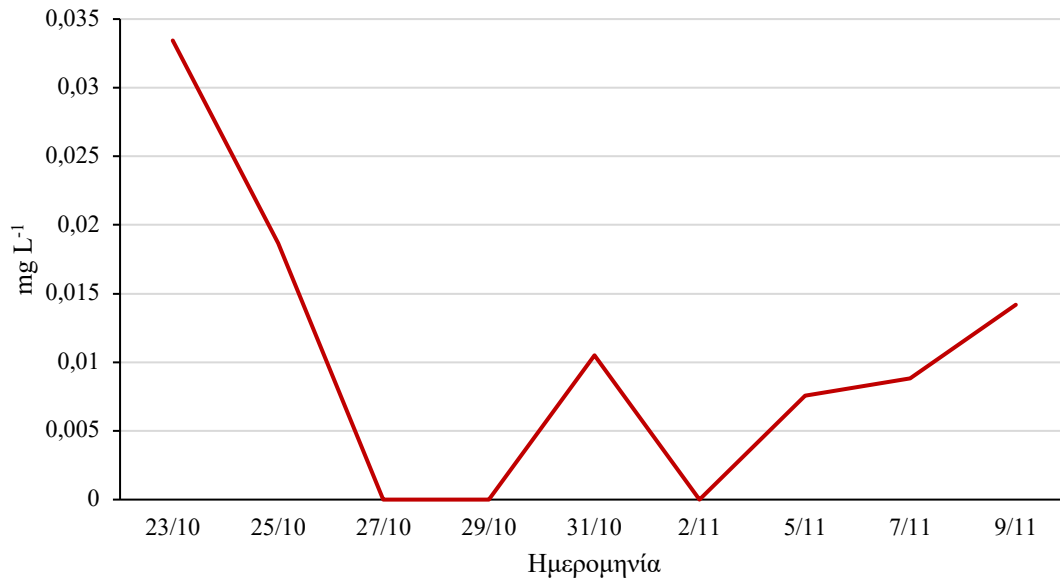


**Εικόνα 16α:** Η βιομάζα του *Dinophysis* spp. από 23/10 έως 9/11

Η βιομάζα παρουσιάζει σημαντικές διακυμάνσεις σε σύντομο χρονικό διάστημα (Εικόνα 16α). Συγκεκριμένα, παρατηρούνται αιχμές στις 25/10 και 2/11, οι οποίες θα μπορούσαν να παραλειφθούν αν οι δειγματοληψίες γίνονταν σε εβδομαδιαία βάση. Για παράδειγμα, αν οι δειγματοληψίες λάμβαναν χώρα μόνο στις 25/10, 31/10 και 7/11, οι αιχμές στις 25/10 και 2/11 δεν θα καταγράφονταν, με αποτέλεσμα να μην αποτυπωθούν οι δυναμικές αλλαγές στη βιομάζα (Εικόνα 16β). Αυτό θα οδηγούσε σε μια λανθασμένη εντύπωση μείωσης του πληθυσμού.

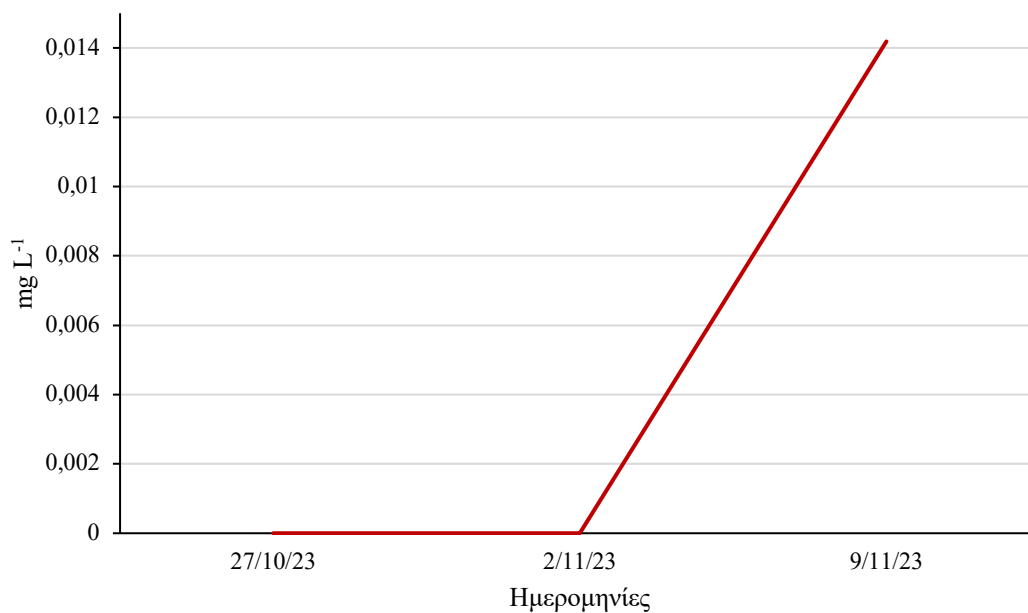


**Εικόνα 16β:** Η βιομάζα του *Dinophysis* spp. με βάση υποθετικές εβδομαδιαίες δειγματοληψίες.



**Εικόνα 17α:** Η βιομάζα του *Pseudo-nitzschia* spp. από 23/10 έως 9/11

Η βιομάζα του *Pseudo-nitzschia* spp. παρουσιάζει αξιοσημείωτες διακυμάνσεις σε σύντομο χρονικό διάστημα (Εικόνα 17<sup>α</sup>). Συγκεκριμένα, παρατηρούνται κορυφές στις 23/10 και 31/10, οι οποίες θα μπορούσαν να μην καταγραφούν αν οι δειγματοληψίες γίνονταν εβδομαδιαία. Για παράδειγμα, με δειγματοληψίες στις 27/10, 02/10 και 09/11, οι αιχμές στις 31/10, καθώς και οι μικρότερες διακυμάνσεις στις 5/11 και 9/11, δεν θα εντοπίζονταν (Εικόνα 17<sup>β</sup>). Αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα να παραληφθούν σημαντικές πληροφορίες για τις δυναμικές αλλαγές στη βιομάζα, δημιουργώντας μια παραπλανητική εικόνα της σταθερότητας του πληθυσμού.



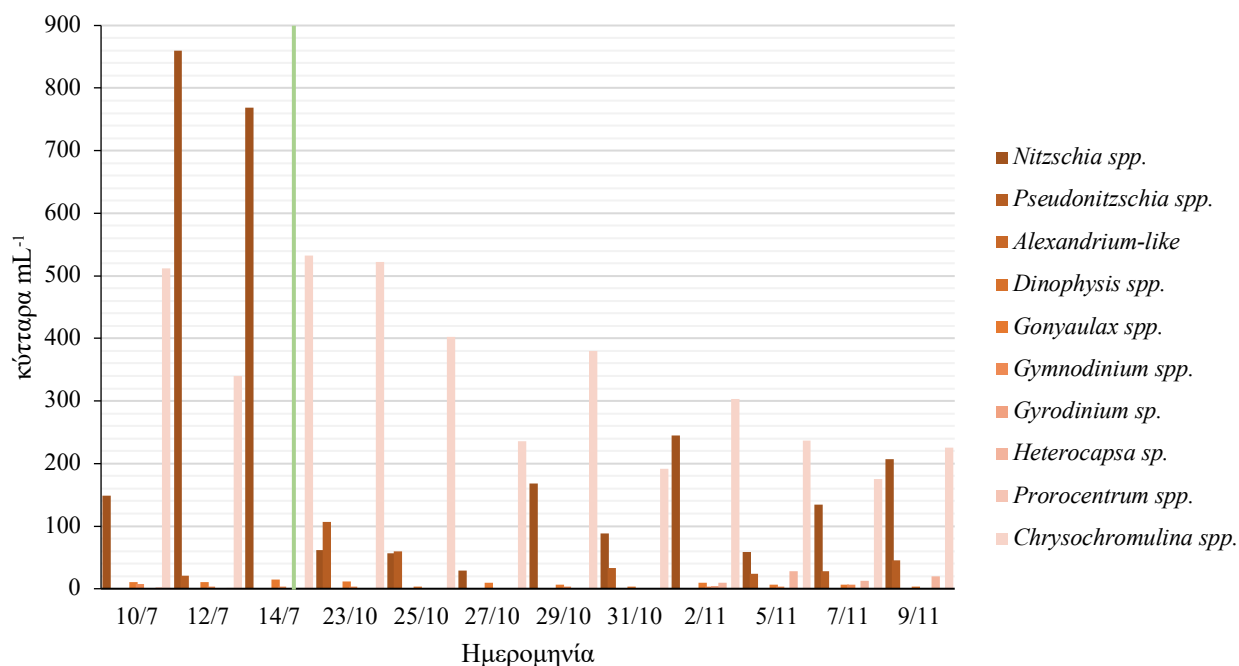
**Εικόνα 17β:** Η βιομάζα του *Pseudo-nitzschia* spp. με βάση υποθετικές εβδομαδιαίες δειγματοληψίες.

#### 4.8 Δυνητικά επιβλαβή taxa

Όλα τα αναγνωρισμένα taxa κατά τη διάρκεια της εργασίας ελέγχθηκαν στην λίστα επιβλαβών μικροφυκών της UNESCO (πρόσθεσε την αναφορά στο site). Κατά τη διάρκεια της μελέτης, καταγράφηκαν δέκα δυνητικά επιβλαβή taxa. Από αυτά, δύο ανήκουν στην κατηγορία των Διατόμων, επτά στα Δινομαστιγωτά και ένα στα Απτοφύκη. Τα αναγνωρισμένα taxa περιλαμβάνουν τα εξής: *Nitzschia* spp., *Pseudonitzschia* spp. από τα Διάτομα, *Alexandrium*-like, *Dinophysis* spp., *Gonyaulax* spp., *Gymnodinium* spp., *Gyrodinium* sp., *Heterocapsa* sp., *Prorocentrum* spp. από τα Δινομαστιγωτά, και *Chrysochromulina* spp. από τα Απτοφύκη.

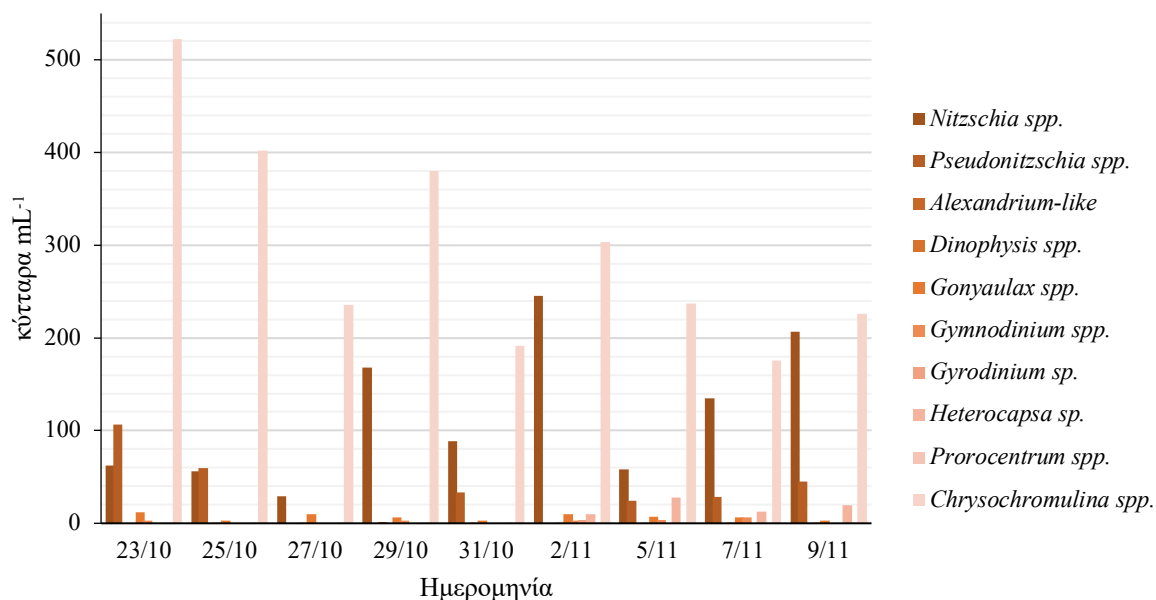
Υπολογίστηκαν επίσης οι αφθονίες δυνητικά επιβλαβών ειδών (Εικόνα 14), όπου το *Nitzschia* spp. αναδείχθηκε ως το πιο κυρίαρχο είδος, παρουσιάζοντας τις υψηλότερες τιμές αφθονίας, ειδικά στις καλοκαιρινές δειγματοληψίες στις 12/7/23 (860,2 κύτταρα mL<sup>-1</sup>) και 14/7/23 (768,3 κύτταρα mL<sup>-1</sup>). Αντίθετα, το λιγότερο κυρίαρχο είδος ήταν το *Gyrodinium* sp., το οποίο παρουσιάζει τις χαμηλότερες τιμές αφθονίας σε όλες τις δειγματοληψίες, αφού ανιχνεύθηκε μία φορά στις 02/11 με αφθονία 3,2 κύτταρα mL<sup>-1</sup>.

Συγκρίνοντας τις καλοκαιρινές (10/7/23, 12/7/23, 14/7/23) με τις φθινοπωρινές δειγματοληψίες (23/10/23 έως 9/11/23), παρατηρείται ότι η συνολική αφθονία των δυνητικά επιβλαβών taxa ήταν υψηλότερη κατά την καλοκαιρινή περίοδο. Κατά το φθινόπωρο, οι τιμές αφθονίας ήταν χαμηλότερες και λιγότερο μεταβλητές, υποδεικνύοντας εποχικές διαφορές στις περιβαλλοντικές συνθήκες και την παρουσία των δυνητικά επιβλαβών ειδών.



**Εικόνα 14:** Αφθονίες δυνητικά επιβλαβών taxa κατά τις ημερομηνίες δειγματοληψίας.

Για την καλύτερη κατανόηση των εποχικών μεταβολών στις αφθονίες των δυνητικά επιβλαβών ειδών, το επόμενο διάγραμμα (Εικόνα 15) εστιάζει στις συνολικές αφθονίες των ειδών μόνο κατά τη δεύτερη περίοδο δειγματοληψιών, το φθινόπωρο. Αυτή η διάκριση επιτρέπει την ακριβέστερη σύγκριση μεταξύ των δύο εποχικών περιόδων και την ανάδειξη των διαφοροποιήσεων που παρατηρούνται στις αφθονίες των συγκεκριμένων taxa.



**Εικόνα 15:** Αφθονία δυνητικά επιβλαβών ειδών στη 2η φάση δειγματοληψιών.

## 5. Συζήτηση

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε η σύνθεση των ειδών και η δυναμική των μονοκύτταρων πλαγκτικών κοινοτήτων σε μια παράκτια περιοχή του Σαρωνικού Κόλπου, με υψηλής συχνότητας δειγματοληψία και παρακολούθηση. Οι δειγματοληψίες πραγματοποιήθηκαν σε δύο διακριτές φάσεις ώστε να αποτυπωθούν οι εποχικές αλλαγές. Η πρώτη φάση έλαβε χώρα κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, από τις 10 έως τις 14 Ιουλίου 2023, διάρκεια μίας εβδομάδας, με δειγματοληψίες κάθε δύο μέρες. Η δεύτερη φάση πραγματοποιήθηκε το φθινόπωρο, από τις 23 Οκτωβρίου έως τις 9 Νοεμβρίου 2023, με δειγματοληψίες που διεξάγονταν κάθε δύο έως τρεις ημέρες. Αυτός ο συνδυασμός δειγματοληψιών σε δύο διαφορετικές εποχικές περιόδους επιτρέπει την παρακολούθηση των δυναμικών αλλαγών στην κοινότητα του πλαγκτού και την καταγραφή των εποχικών διακυμάνσεων. Επιπλέον, αναγνωρίστηκαν δυνητικά επιβλαβή taxa, με στόχο την ανίχνευση ειδών που θα μπορούσαν να αποτελέσουν απειλή για το θαλάσσιο οικοσύστημα ή να προκαλέσουν φαινόμενα άνθισης τοξικών φυκιών.

Βάσει των αποτελεσμάτων της εργασίας, διαπιστώθηκε ότι η βιοποικιλότητα των μονοκύτταρων πλαγκτικών οργανισμών δεν εμφάνισε αξιοσημείωτες διαφορές ανάμεσα στις δύο φάσεις δειγματοληψίας. Αυτή η σταθερότητα πιθανώς αντικατοπτρίζει την ικανότητα των διαφόρων ειδών να προσαρμόζονται στις περιβαλλοντικές συνθήκες των εποχικών αλλαγών. Συγκεκριμένα, η αναμενόμενη μείωση της βιοποικιλότητας κατά την περίοδο του φθινοπώρου συγκριτικά με το καλοκαίρι, όπως αναφέρεται στην σχετική βιβλιογραφία, λόγω των εποχικών διακυμάνσεων του ευτροφισμού και των διάφορων επιπέδων των θρεπτικών ουσιών στον Σαρωνικό Κόλπο (Ignatiades et al., 2014), δεν επιβεβαιώθηκε από τα δεδομένα που συλλέχθηκαν. Αντιθέτως, τα δεδομένα επιδεικνύουν μια ελαφρά αυξημένη βιοποικιλότητα κατά τις φθινοπωρινές δειγματοληψίες.

Η πολυπληθέστερη και συνεπώς κυρίαρχη ταξινομική ομάδα που παρατηρήθηκε σε όλα τα δείγματα και στις δύο φάσεις δειγματοληψίας ήταν τα Διάτομα, γεγονός που τεκμηριώνεται και από την προαναφερθείσα βιβλιογραφία. Τα Διάτομα, τα οποία αποτελούν μια σημαντική ομάδα φυτοπλαγκτού, εμφανίζονται να κυριαρχούν και να ευδοκιμούν σε παράκτια ενδιαιτήματα διότι παρουσιάζουν εξαιρετική προσαρμοστικότητα σε μια πληθώρα περιβαλλοντικών συνθηκών, όπως αλλαγές στη θερμοκρασία, την ένταση και την ποιότητα του φωτός, καθώς και στη συγκέντρωση θρεπτικών ουσιών (Sournia, 1982). Αυτή η προσαρμοστικότητα τους επιτρέπει να διατηρούν υψηλά επίπεδα αφθονίας ακόμη και υπό διαφορετικές περιβαλλοντικές πιέσεις. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται από αντίστοιχα ευρήματα έχουν αναφερθεί και σε άλλες περιοχές της Μεσογείου, όπως σε εγχώριες μελέτες στα επιφανειακά ύδατα τόσο του Σαρωνικού Κόλπου (Pavlidou et al., 2014) όσο και του Θερμαϊκού κόλπου (Genitsaris et al., 2020; Zaponidou, 2020), αλλά και σε άλλες μεσογειακές περιοχές, όπως στην Τουρκία (Türkoğlu, 2010), την Ιταλία (Zingone et al., 2022) και την Ισπανία (Gasol et al., 2016), όπου καταγράφεται παρόμοιο πρότυπο κυριαρχίας των Διατόμων. Αυτές οι παρατηρήσεις ενισχύουν την υπόθεση ότι τα Διάτομα

διαθέτουν παγκόσμια προσαρμοστικότητα, επιτρέποντάς τους να ευδοκιμούν σε μια ποικιλία περιβαλλοντικών συνθηκών.

Παράλληλα με την παρατηρούμενη αύξηση της βιοποικιλότητας, εξίσου σημαντική είναι και η εξέταση της αφθονίας των ειδών, η οποία παρέχει επιπλέον πληροφορίες για την κατανομή και την κυριαρχία των διαφορετικών ταξινομικών ομάδων και ειδών στο οικοσύστημα. Η αφθονία του φυτοπλαγκτού συχνά συνδέεται άμεσα με τον ευτροφισμό, καθώς η υπερβολική παροχή θρεπτικών ουσιών, όπως το άζωτο και ο φώσφορος, από ανθρώπινες δραστηριότητες ή φυσικές διεργασίες μπορεί να οδηγήσει σε ταχεία αύξηση της φυτοπλαγκτικής βιομάζας και της παραγωγικότητας των οικοσυστημάτων (Spatharis et al., 2007; Smith, Joye, & Howarth, 2006; Anderson, Glibert, & Burkholder, 2002). Ειδικότερα, σε παράκτια και εκβολικά οικοσυστήματα, ο ευτροφισμός μπορεί να προκαλέσει εκρηκτικές αυξήσεις της αφθονίας φυτοπλαγκτού, οι οποίες ενδέχεται να συνοδεύονται από επιβλαβείς ανθίσεις φυτοπλαγκτού, μεταβάλλοντας τη δομή της κοινότητας και επηρεάζοντας την ποιότητα του νερού και τη βιοποικιλότητα (Paerl & Otten, 2013; Cloern, 2001; Heisler et al., 2008).

Για παράδειγμα, στην έρευνα του Κόλπου της Erdek, που βρίσκεται στο νότιο τμήμα της θάλασσας του Μαρμαρά στην Τουρκία, βρέθηκαν διάφορες ταξινομικές ομάδες φυτοπλαγκτού και πρωτοζωοπλαγκτού. Συγκεκριμένα ταυτοποιήθηκαν Δινομαστιγωτά, Διάτομα, Δικτυοφύκη, Ευγληνοφύκη, Πρασινοφύκη και Χλωροφύκη, με κυριαρχία Διατόμων και Δινομαστιγωτών. Από τα Διάτομα, τα γένη με τον μεγαλύτερο αριθμό ειδών ήταν τα *Pseudo-nitzschia*, *Guinardia* και *Coscinodiscus*, με το γένος *Pseudo-nitzschia* να παρουσιάζει τη μεγαλύτερη αφθονία. Στα Δινομαστιγωτά, τα γένη με τον μεγαλύτερο αριθμό ειδών ήταν τα *Protoperidinium*, *Tripos* και *Dinophysis*, ενώ τα γένη *Prorocentrum* και *Gonyaulax* ήταν αυτά με τη μεγαλύτερη αφθονία (Balkis-Ozdelice et al., 2020). Οι μεγαλύτερες αφθονίες και βιομάζες παρατηρήθηκαν κατά τη διάρκεια της άνοιξης, με το γένος *Pseudo-nitzschia* να κυριαρχεί. Στην έρευνα καταγράφηκαν επίσης 20 δυνητικά επιβλαβή είδη, μεταξύ των οποίων τα *Alexandrium minutum*, *Dinophysis acuminata*, *D. caudata*, *Gonyaulax fragilis* (που προκαλούν τοξικές ανθίσεις και παραγωγή βλεννογόνου), καθώς και τα *Prorocentrum micans* και *Pseudo-nitzschia* sp., τα οποία είναι γνωστά για τις τοξίνες τους που μπορούν να προκαλέσουν δηλητηριάσεις οστρακοειδών και άλλα αρνητικά φαινόμενα στο θαλάσσιο περιβάλλον (Balkis-Ozdelice et al., 2020). Σε αντίστοιχη έρευνα στην θάλασσα του Αλμποράν, η οποία βρίσκεται στο δυτικό τμήμα της Μεσογείου Θάλασσας, μεταξύ της νότιας Ισπανίας και της βόρειας ακτής του Μαρόκου, οι ταξινομικές ομάδες που κυριάρχησαν ήταν Διάτομα, Δινομαστιγωτά, Πρασινοφύκη, Ευγληνοφύκη, Χλωροφύκη, Κρυπτοφύκη και Κυανοβακτήρια. Ειδικότερα, κυρίαρχη ομάδα ήταν τα Διάτομα, με τον μεγαλύτερο αριθμό ειδών να κατέχουν τα γένη *Chaetoceros* και *Nitzschia*, ενώ τη μεγαλύτερη αφθονία παρουσίασαν τα γένη *Skeletonema* και *Thalassiosira*. Όσον αφορά τα Δινομαστιγωτά, τα γένη με τον μεγαλύτερο αριθμό ειδών ήταν τα *Gymnodinium* και *Ceratium*, ενώ τα γένη με τη μεγαλύτερη αφθονία ήταν τα *Prorocentrum* και *Dinophysis*. Οι μεγαλύτερες

αφθονίες και βιομάζες παρατηρήθηκαν κατά τη διάρκεια της άνοιξης και του φθινοπώρου, καταδεικνύοντας τη σημασία της ποικιλότητας και της αφθονίας των Διατόμων και Δινομαστιγωτών, ανάλογα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν στη θάλασσα του Αλμποράν (Agin et al., 2002).

Όσον αφορά τα ελληνικά δεδομένα, ο Σαρωνικός και ο Θερμαϊκός Κόλπος είναι οι περιοχές που πλήττονται περισσότερο από έντονα φαινόμενα ευτροφισμού με ανθίσεις φυτοπλαγκτού και ανθίσεις δυνητικά επιβλαβών ειδών να παρατηρούνται σε αμφοτέρως τις περιοχές. Σε έρευνα που πραγματοποιήθηκε στον Θερμαϊκό κόλπο, μεταξύ των Διατόμων, τα γένη *Chaetoceros* και *Skeletonema* παρουσίασαν τον μεγαλύτερο αριθμό ειδών, ενώ τα ίδια γένη ήταν και τα πιο άφθονα. Όσον αφορά τα Δινομαστιγωτά, τα γένη *Gymnodinium* και *Gonyaulax* είχαν τον μεγαλύτερο αριθμό ειδών, με τα γένη *Noctiluca scintillans*, *Gonyaulax fragilis* και *Scrippsiella trochoidea* να εμφανίζουν τη μεγαλύτερη αφθονία. Οι μεγαλύτερες αφθονίες και βιομάζες καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια της άνοιξης και του καλοκαιριού, με κυρίαρχα γένη τα *Noctiluca scintillans*, *Chaetoceros* spp., *Skeletonema costatum*, και *Gonyaulax fragilis*. Τα επιβλαβή είδη που εντοπίστηκαν περιλαμβάνουν τα *Noctiluca scintillans*, *Dinophysis* cf. *acuminata*, *Scrippsiella trochoidea*, *Gonyaulax fragilis*, και *Gymnodinium aureolum*, τα οποία συνδέονται με ανθίσεις επιβλαβών μικροφυκών, ερυθρές παλίρροιας και τη δημιουργία βλεννογόνων συγκεντρώσεων (Genitsaris et al., 2020).

Κατά τη διάρκεια του χειμώνα και στις αρχές της άνοιξης, οι υψηλές συγκεντρώσεις θρεπτικών συστατικών υποστηρίζουν την άνθιση Διατόμων (*Skeletonema costatum*, *Thalassiosira* spp, *Chaetoceros* spp, *Nitzschia longissima*, *Leptocylindrus danicus*, *Asterionella japonica*, *Rhizosolenia delicatula*, *Coscinodiscus radiatus*, *Pseudonitzschia* spp.), ενώ η θερινή στρωματοποίηση και οι αυξημένες θερμοκρασίες ευνοούν την άνθηση των Δινομαστιγωτών (*Prorocentrum micans*, *Ceratium furca*, *Ceratium fusus*, *Dinophysis acuminata* (γνωστά για την παραγωγή τοξινών), *Alexandrium minutum* (δυνητικά επιβλαβή), *Gonyaulax polyedra*, *Gymnodinium catenatum*). Από την άλλη, κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, γίνεται πιο έντονη η ανθρώπινη δραστηριότητα, σε συνδυασμό με την αυξημένη και συνεχή αστικοποίηση των παράκτιων περιοχών, λόγω της παρουσίας μεγαλύτερων σκαφών, καταστημάτων εστίασης και της γεινιάσής της με την Ελευσίνα, όπου πραγματοποιείται απόρριψη βιομηχανικών λυμάτων (Memos et al., 1982). Όλα τα παραπάνω, αυξάνουν σημαντικά τον κίνδυνο ευτροφισμού, καθώς συμβάλλουν στην εισροή θρεπτικών ουσιών από γεωργικές εκροές, αστικά απόβλητα, και την εκβολή ανεπεξέργαστων λυμάτων, γεγονός που οδηγεί σε αυξημένη παραγωγικότητα του φυτοπλαγκτού και σε υποβάθμιση των υδάτινων οικοσυστημάτων (Rabalais et al., 2009, Voss et al., 2011). Στον Σαρωνικό Κόλπο έχουν επίσης καταγραφεί 28 taxa, τα οποία είναι ικανά να προκαλέσουν επιβλαβείς ανθίσεις φυτοπλαγκτού (HABs) (Triantaphyllou et al., 2018).

Σε μια πιο άλλη μελέτη στον Σαρωνικό Κόλπο, οι ανθίσεις οφείλονταν κυρίως σε Διάτομα, ακολουθούμενες από Δινομαστιγωτά (Friligos, 2008). Τρία είδη διατόμων: το *Skeletonema costatum*, το *Nitzschia* spp. και το *Leptocylindrus danicus*, βρέθηκαν



να είναι υπεύθυνα για αυτή την καλοκαιρινή άνθιση. Αντίστοιχα αποτελέσματα σημειώνονται και στην μελέτη των Genitsaris et al. (2019), όπου οι ανθίσεις ήταν πιο έντονες την άνοιξη και το καλοκαίρι, με κυριότερα είδη τα *Leptocylindrus danicus*, *Leptocylindrus minimus* και *Skeletonema costatum*.

Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι κατά τη θερινή περίοδο σημειώθηκε αύξηση στην αφθονία των ειδών φυτοπλαγκτού, με κυριαρχία των Διατόμων. Συγκεκριμένα, θα αναφερθούν τρία taxa: Το είδος *Chaetoceros tenuissimus* έδειξε υψηλές τιμές αφθονίας κατά τη θερινή φάση, φτάνοντας τα 725,5 κύτταρα mL<sup>-1</sup> στις 14/7/23, αλλά μειώθηκε σημαντικά κατά το φθινόπωρο. Αντίστοιχα, το *Chaetoceros* spp., αν και είχε υψηλές τιμές το καλοκαίρι, σημείωσε μείωση της αφθονίας του κατά το φθινόπωρο, με τις τιμές να κυμαίνονται γύρω από τα 400-450 κύτταρα mL<sup>-1</sup>. Το είδος *Skeletonema costatum* παρουσίασε πολύ υψηλή αφθονία κατά τη θερινή φάση, ξεπερνώντας τα 2000 κύτταρα mL<sup>-1</sup>, ενώ στη συνέχεια μειώθηκε δραστικά κατά το φθινόπωρο, με τιμές που κυμαίνονται από 38 έως 158 κύτταρα mL<sup>-1</sup>. Η παραπάνω παρατήρηση ευθυγραμμίζεται με τη βιβλιογραφία που υποδεικνύει ότι κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, καταγράφεται σημαντική άνθιση με αυξημένη ποικιλότητα φυτοπλαγκτού, ενώ η αφθονία επηρεάζεται επίσης (Spatharis et al., 2007). Κατά τις φθινοπωρινές δειγματοληψίες, επικρατούσαν τα Ετερότροφα Νανομαστιγωτά (Heterotrophic Nanoflagellates, HNF). Τα μικρότερα μεγέθη ειδών, όπως τα *Nitzschia* spp., *Cylindrotheca closterium*, και *Navicula* spp., υπερίσχυσαν έναντι των μεγαλύτερων ειδών, όπως τα *Ceratium* spp. και *Gyrodinium* sp. Αξιοσημείωτη ήταν η παρουσία του γένους *Nitzschia*, που επικράτησε σε πολλά δείγματα, ενώ από τα Δινομαστιγωτά, το γένος *Gonyaulax* spp., διατηρούσε υψηλές αφθονίες κατά τη διάρκεια του φθινοπώρου.

Η αφθονία φυτοπλαγκτού και πρωτοζωοπλαγκτού, καθώς και οι ανθρωπογενείς πιέσεις που επηρεάζουν την κατανομή του είναι καθοριστικοί παράγοντες για την κατανόηση της οικολογικής δυναμικής της περιοχής (Cloern J.E. et al., 2014). Ωστόσο, για μια πληρέστερη εκτίμηση της οικολογικής κατάστασης του Σαρωνικού Κόλπου, είναι απαραίτητη η ανάλυση της βιομάζας του φυτοπλαγκτού και πρωτοζωοπλαγκτού, η οποία προσφέρει κρίσιμες πληροφορίες σχετικά με την παραγωγικότητα και τη ροή ενέργειας στο οικοσύστημα (Cloern J.E. et al., 2014). Εξετάζοντας τη βιομάζα της πλαγκτικής κοινότητας, μπορούν να διαπιστωθούν οι διαφορές στην παραγωγικότητα μεταξύ των διαφόρων ταξινομικών ομάδων.

Γενικότερα, η κυριαρχία των Διατόμων και των Δινομαστιγωτών έχει καταγραφεί σε προηγούμενες αναλύσεις για τον Σαρωνικό Κόλπο, υποδεικνύοντας τη σταθερή παρουσία και σημαντικό ρόλο αυτών των ομάδων φυτοπλαγκτού στην περιοχή (Ignatiades et al., 2010; Pavlidou et al., 2015; Patoucheas et al., 2021). Αυτά τα ευρήματα ενισχύουν την κατανόηση της οικολογικής δυναμικής του κόλπου και της δομής των πλαγκτονικών κοινοτήτων του.

Από την ανάλυση των δεδομένων, προκύπτει ότι η συμβολή των διαφορετικών ταξινομικών ομάδων στη συνολική βιομάζα παρουσιάζει σημαντικές διαφοροποιήσεις. Συγκεκριμένα, τα Διάτομα αποτελούν την κυρίαρχη ομάδα στη συνολική βιομάζα καθ'

όλη τη διάρκεια των δειγματοληψιών, ιδιαίτερα το καλοκαίρι, όπου η βιομάζα τους είναι σημαντικά υψηλότερη. Αυτό πιθανώς αντικατοπτρίζει την ικανότητά τους να προσαρμόζονται σε διαφορετικές συνθήκες θρεπτικών ουσιών και φωτός, συνεισφέροντας καθοριστικά στη συνολική παραγωγικότητα του οικοσυστήματος (Spatharis et al., 2007). Τα Δινομαστιγωτά συμβάλλουν σημαντικά στη βιομάζα, ιδιαίτερα κατά τη φθινοπωρινή περίοδο, όπου η παρουσία τους είναι αυξημένη σε σχέση με το καλοκαίρι, πιθανώς λόγω της ικανότητάς τους να προσαρμόζονται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες (Patoucheas, 2021). Άλλες ομάδες, όπως τα Κρυπτοφύκη και τα Απτοφύκη, συνεισφέρουν λιγότερο στη συνολική βιομάζα, με την παρουσία και την συμβολή τους να είναι πιο περιορισμένη. Επίσης, οι μικρότερες ταξινομικές ομάδες, όπως τα Πρασινοφύκη και τα Ευγληνοφύκη, παρότι καταγράφονται σε μικρότερους αριθμούς, φαίνεται να έχουν μικρότερη αλλά συνεχή παρουσία, υποδεικνύοντας ότι διατηρούν ένα σταθερό ρόλο στη δομή και την λειτουργία της πλαγκτικής κοινότητας. Αυτή η διαφοροποίηση στη συμβολή των διαφορετικών taxa αποδίδεται στο ότι τα taxa με υψηλή αφθονία αποτελούνται από μικρότερα κύτταρα, ενώ άλλα taxa, που παρατηρούνται σε χαμηλότερη αφθονία, έχουν μεγαλύτερα κύτταρα και κατά συνέπεια συμβάλλουν περισσότερο στη συνολική βιομάζα.

Ο ευτροφισμός συνήθως συνοδεύεται από την αύξηση της βιομάζας του φυτοπλαγκτού και την εμφάνιση τοξικών ανθίσεων (HABs - Harmful Algal Blooms) (Paerl et al., 2011), δηλαδή περιστατικά όπου η συγκέντρωση ενός ή περισσοτέρων διαφορετικών επιβλαβών ειδών φυτοπλαγκτού φτάνει σε αφθονία δυνητικά επιβλαβή (Andersen et al., 1996). Βάσει των Ignatiades et al. (2010) στα εγχώρια ύδατα τα περισσότερα είδη που μπορούν να προκαλέσουν τοξικές ανθίσεις ανήκουν στην ταξινομική ομάδα των Δινομαστιγωτών, ωστόσο επιβεβαιώνεται και από την διεθνή βιβλιογραφία (Smayda & Reynolds, 2001; Davidson et al., 2014; Zingone et al., 2020, Riegman et al., 1990). Αυτό ενδεχομένως να οφείλεται αρχικά στο γεγονός ότι έχουν συγκεκριμένες ιδιότητες, όπως η ισχυρή κίνηση (φωτοταξία, κάθετες μεταναστεύσεις), καθώς και μορφολογικές προσαρμογές (π.χ. σχηματισμός αλυσίδων), που τους επιτρέπουν να εκμεταλλεύονται διάφορες συνθήκες θρεπτικών συστατικών και να αναπτύσσονται τόσο σε θρεπτικά πλούσια νερά όσο και σε περιοχές με περιορισμένα θρεπτικά συστατικά (Smayda & Reynolds, 2001). Επιπροσθέτως, η ικανότητα των Δινομαστιγωτών να παράγουν τοξίνες τους δίνει πλεονέκτημα έναντι άλλων ομάδων φυτοπλαγκτού, όπως τα Διάτομα, αποτρέποντας τη θήρευση και περιορίζοντας τον ανταγωνισμό. Οι τοξίνες αυτές επιτρέπουν στα Δινομαστιγωτά να επιβιώνουν σε μεταβαλλόμενα και δύσκολα περιβάλλοντα, καθώς μειώνουν την ανάπτυξη άλλων μικροοργανισμών και τα βοηθούν να κυριαρχούν στα θαλάσσια οικοσυστήματα (Zingone et al. 2020). Τέλος, βάσει των Davidson et al. (2014), η δυνατότητα των Δινομαστιγωτών να ευδοκιμούν σε περιβάλλοντα με διαφορετικές αναλογίες θρεπτικών συστατικών και να χρησιμοποιούν τόσο φωτοσυνθετικούς όσο και ετεροτροφικούς τρόπους διατροφής (μικτοτροφία), μπορεί να τους δίνουν πλεονέκτημα σε παράκτια ύδατα όπου υπάρχουν μεταβολές στις αναλογίες των θρεπτικών. Από την άλλη, τα Διάτομα απαιτούν μια συγκεκριμένη ισορροπία όλων των θρεπτικών για να ευδοκιμήσουν. Χρειάζονται πυρίτιο (Si) για να σχηματίσουν τα

κελύφη τους, σε συνδυασμό με άζωτο (N) και φώσφορο (P). Εάν η στοιχειομετρία των θρεπτικών ουσιών αποκλίνει από τις φυσιολογικές της συνθήκες στο θαλασσινό νερό, τα Διάτομα γίνονται φτωχότεροι ανταγωνιστές σε σύγκριση με τα Δινομαστιγωτά, τα οποία δεν έχουν την απαίτηση του πυριτίου για την ανάπτυξή τους και επομένως μπορούν να εκμεταλλευτούν πιο ευέλικτα τις διαφορετικές συνθήκες θρεπτικών συστατικών (Klausmeier et al., 2004).

Σε αυτή την εργασία, αναγνωρίστηκαν συνολικά δέκα taxa φυτοπλαγκτού που ενδέχεται να είναι επιβλαβή: δύο από αυτά ανήκουν στα Διάτομα, επτά στα Δινομαστιγωτά και ένα στα Απτοφύκη. Σε μία μελέτη αναφέρονται επίσης κάποια είδη του γένους *Ceratium* ως τοξικά, καθώς επίσης και το *Scrippsiella trochoide* ως δυνητικά επιβλαβές λόγω της τάσης του να εμφανίζει μεγάλη βιομάζα (Ignatiades et al., 2010), ωστόσο δεν αναφέρονται στην λίστα επιβλαβών μικροφυκών της UNESCO. Έτσι παρότι αναγνωρίστηκαν και ταυτοποιήθηκαν, δεν συμπεριλήφθηκαν στην κατηγορία των πιθανώς επιβλαβών.

Όσον αφορά τα Διάτομα, τα δύο taxa που αναγνωρίστηκαν ως δυνητικώς επιβλαβή ήταν τα *Nitzschia* και *Pseudo-nitzschia*, με το *Nitzschia* να είναι παρόν και μάλιστα σε μεγάλες αφθονίες που κυμαίνονταν από 29,04 έως και 860,16 κύτταρα mL<sup>-1</sup>, καθ' όλη τη διάρκεια των δειγματοληψιών. Ορισμένα είδη των δυο γενών συνδέονται με την παραγωγή δομοϊκού οξέος (DA). Η τοξίνη αυτή συνδέεται με την αμνησιακή δηλητηρίαση από οστρακοειδή (Amnesic Shellfish Poisoning - ASP), που προκαλεί σοβαρά νευρολογικά συμπτώματα στους ανθρώπους, όπως απώλεια μνήμης (Ruggiero et al., 2005; Bates et al., 2008; ; Leblad et al., 2020 Zigone et al., 2021). Η τοξίνη έχει την ικανότητα να συσσωρεύεται σε θαλάσσιους οργανισμούς όπως τα οστρακοειδή, που τρέφονται με το φυτοπλαγκτόν που την παράγει, με αποτέλεσμα να εισέρχεται έτσι και στην ανθρώπινη διατροφική αλυσίδα (Mos, 2001).

Σε συμφωνία με τη βιβλιογραφία η πολυπλυθέστερη ταξινομική ομάδα με δυνητικώς επιβλαβή είναι αυτή των Δινομαστιγωτών. Αναφορικά με το γένος *Alexandrium* spp., που παράγει τοξίνες όπως η σαξιτοξίνη και η γονουαυτοξίνη, οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν παραλυτική δηλητηρίαση από οστρακοειδή (PSP) όταν καταναλωθούν μέσω μολυσμένων οστρακοειδών από τον άνθρωπο (Ignatiades et al., 2010). Ωστόσο, μόνο σε 2 από τις 12 δειγματοληψίες καταγράφηκε παρουσία με σημαντικά χαμηλή αφθονία, φτάνοντας μόλις τα 0,04 κύτταρα mL<sup>-1</sup>. Παρόμοια περιορισμένη παρουσία παρατηρήθηκε και για το γένος *Gyrodinium* spp., βρέθηκε μόνο σε μία δειγματοληψία στις 2/11/2023, με μόλις ένα κύτταρο. Παρότι το γένος δεν παράγει τοξίνες, μπορεί να επιβαρύνει τα θαλάσσια οικοσυστήματα μέσω της συμμετοχής τους στις ερυθρές παλίρροιες. Οι ερυθρές παλίρροιες μπορεί να προκαλέσουν μείωση οξυγόνου στο νερό, μαζικούς θανάτους ιχθύων και άλλες περιβαλλοντικές διαταραχές (Kim & Jeong, 2004). Ανάλογη παρουσία είχε το γένος *Heterocapsa* spp., το οποίο καταγράφηκε στις 4 τελευταίες φθινοπωρινές δειγματοληψίες με σχετικά χαμηλή αφθονία. Η μέγιστη αφθονία καταγράφηκε στις 5/11/2023, φτάνοντας τα 27,48 κύτταρα mL<sup>-1</sup>. Η τοξικότητα αφορά ένα είδος του γένους το *Heterocapsa circularisquama* (Matsuyama, 1999).

Παράλληλα, το γένος *Gymnodinium* spp. παρουσιάστηκε κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού σε όλες τις δειγματοληψίες, ενώ το φθινόπωρο η παρουσία του δεν ήταν πάντα σταθερή. Η αφθονία του ήταν σημαντικά αυξημένη κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, φτάνοντας έως και τα 7,01 κύτταρα mL<sup>-1</sup>, ενώ το φθινόπωρο παρέμεινε σχετικά σταθερή, περίπου στα 3 κύτταρα mL<sup>-1</sup>. Αξίζει να σημειωθεί ότι το γένος *Gymnodinium* περιλαμβάνει είδη που παράγουν τοξίνες, οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν παραλυτική δηλητηρίαση από οστρακοειδή (PSP) (Rijal et al., 2020). Επιπλέον, κάποια είδη του γένους έχουν συνδεθεί με θανάτους θαλάσσιων οργανισμών όπως χέλια, τσιπούρες, πλατύψαρα και κέφαλους σε διάφορες περιοχές (Hallegraeff, 1992). Ανάλογη παρουσία παρατηρήθηκε και για το γένος *Gonyaulax*, το οποίο καταγράφηκε σε όλες τις δειγματοληψίες με τις αφθονίες του να κυμαίνονται από 3,22 έως 10,64 κύτταρα mL<sup>-1</sup>, παραμένοντας σχετικά σταθερό σε όλες τις περιόδους δειγματοληψίας. Το γένος *Gonyaulax* περιλαμβάνει είδη που είναι γνωστά ως δυνητικά επιβλαβή, καθώς παράγουν τοξίνες που μπορούν να προκαλέσουν PSP και έτσι να επηρεάσουν την υγεία τόσο των θαλάσσιων οργανισμών όσο και του ανθρώπου. Συμπληρωματικά, το γένος *Dinophysis* spp. καταγράφηκε σε όλες τις δειγματοληψίες, με αισθητά υψηλότερες αφθονίες το καλοκαίρι συγκριτικά με το φθινόπωρο. Η μέγιστη συγκέντρωση το καλοκαίρι έφτασε τα 2,04 κύτταρα ανά mL στις 10 Ιουλίου, ενώ το χειμώνα η υψηλότερη τιμή ήταν μόλις 0,56 κύτταρα ανά mL στις 7 Νοεμβρίου. Κάποια είδη του γένους *Dinophysis* είναι γνωστά για την παραγωγή τοξικών ουσιών, όπως το οκαδαϊκό οξύ και η παλιτοξίνη. Το οκαδαϊκό οξύ το οποίο παράγεται, μπορεί να συγκεντρωθεί σε θαλάσσιους οργανισμούς, όπως τα σφουγγάρια και τα οστρακοειδή (Reguera et al., 2014). Αποτελεί μία από τις βασικές αιτίες της διαρροϊκής δηλητηρίασης από οστρακοειδή (DSP), προκαλώντας σοβαρά γαστρεντερικά προβλήματα. Η παλιτοξίνη από την άλλη, είναι μία από τις πιο ισχυρές μη πρωτεϊνικές τοξίνες που έχουν αναγνωριστεί, με έντονες αγγειοσυσπαστικές ιδιότητες, οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν την ανθρώπινη υγεία (Budavari et al., 2001). Παράλληλα, κάποια είδη του γένους *Prorocentrum* είναι επίσης παραγωγοί τοξινών. Οι τοξίνες εκτός του ότι μπορούν να προκαλέσουν σοβαρές επιπτώσεις στη δημόσια υγεία, είναι πιθανό να επηρεάσουν την οικονομία των υδατοκαλλιεργειών, ειδικά κατά την καλοκαιρινή περίοδο όταν οι αφθονίες αυτών των μικροοργανισμών είναι υψηλότερες.

Τέλος από την ταξινομική ομάδα των Απτοφύκων, το γένος *Chrysochromulina* φαίνεται να είναι δυνητικά επιβλαβές καθότι περιλαμβάνει είδη που είναι τοξικά και ενδέχεται να επηρεάσουν την υγεία των ψαριών (Zingone et al, 2021), μέχρι της θανάτωσής τους (Edvardsen et al., 1998).

Η διακύμανση των πλαγκτικών κοινοτήτων και η εποχική εναλλαγή των κυρίαρχων ειδών, όπως έχει καταγραφεί στις προαναφερθείσες μελέτες, υπογραμμίζει τη σημασία της παρακολούθησης των παράκτιων οικοσυστημάτων. Η συνεχής και δυναμική αλλαγή στις συγκεντρώσεις θρεπτικών ουσιών και στις συνθήκες θερμοκρασίας και φωτός επηρεάζει άμεσα τη σύνθεση και την αφθονία του φυτοπλαγκτού, ιδιαίτερα σε ευτροφικές περιοχές όπως ο Σαρωνικός Κόλπος. Για το λόγο αυτό, η δειγματοληψία υψηλής συχνότητας είναι ζωτικής σημασίας στα παράκτια οικοσυστήματα λόγω των

γρήγορων μεταβολών των περιβαλλοντικών συνθηκών (π.χ. εισροή θρεπτικών ουσιών, θερμοκρασία, αλατότητα και στρωματοποίηση στήλης νερού) που μπορούν να αλλάξουν τη σύνθεση και την αφθονία των κοινοτήτων φυτοπλαγκτού σε λίγες μέρες ή ακόμη και ώρες.

Η εκπόνηση της παρούσας εργασίας συντελέστηκε με δειγματοληψίες υψηλής συχνότητας. Αυτού του τύπου οι δειγματοληψίες επιτρέπουν την πληρέστερη παρακολούθηση των μονοκύτταρων πλαγκτικών κοινοτήτων και παρέχουν σημαντικά πλεονεκτήματα συγκριτικά με τις πιο παραδοσιακές μεθόδους δειγματοληψίας (εβδομαδιαίες ή μηνιαίες) (Cloern & Jassby, 2009; Romagnan et al., 2015), που συνήθως απαντώνται στη βιβλιογραφία. Συμπερασματικά τεκμηριώνεται ότι μία πιο λεπτομερής και δομημένη πληροφόρηση για τις πλαγκτικές κοινότητες είναι επειγόντως αναγκαία για την πλήρη κατανόηση θαλάσσιων οικοσυστημάτων και των μηχανισμών που οδηγούν στην ανάπτυξη των ανθίσεων (Tan et al., 2024). Ένα από τα βασικά οφέλη είναι η δυνατότητα καταγραφής των συχνών χρονικών αλλαγών στους πληθυσμούς πλαγκτού, απαραίτητων για τη μελέτη των οικολογικών δυναμικών και των αντιδράσεων τους στις περιβαλλοντικές μεταβολές, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα όπως ο Σαρωνικός Κόλπος, όπου οι συνθήκες μπορούν να αλλάξουν γρήγορα λόγω φυσικών ή ανθρωπογενών επιδράσεων. Η συνεχής παρακολούθηση παρέχει πληροφορίες για τη μεταβλητότητα του πλαγκτού σε μικρές χρονικές κλίμακες, όπως ημερήσιες ή ακόμα και ωριαίες αλλαγές, που είναι κρίσιμες για την κατανόηση της επίδρασης γεγονότων, όπως καταιγίδες και αναβλύσεις. Επιπλέον, τα δεδομένα υψηλής ανάλυσης επιτρέπουν πιο ακριβή ανίχνευση εποχικών τάσεων, μακροπρόθεσμων αλλαγών και των αντιδράσεων των πλαγκτονικών κοινοτήτων στην κλιματική αλλαγή.

Μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις των παραδοσιακών προσεγγίσεων δειγματοληψίας είναι η πιθανότητα να χαθούν σημαντικές κορυφές ή πτώσεις στην αφθονία και την βιομάζα ή ακόμα στην παρουσία κάποιων ειδών, γεγονός που αποδεικνύεται κι από την παρούσα εργασία. Για παράδειγμα, είδη με σύντομο χρόνο γενεάς, μπορούν να εμφανίσουν ραγδαίες αυξομειώσεις στην αφθονία τους εντός μερικών ημερών (Zingone et al., 2020). Σε εβδομαδιαία ή μηνιαία δειγματοληψία, αυτές οι αυξομειώσεις μπορεί να περάσουν απαρατήρητες, περιορίζοντας την κατανόησή μας για τις δυναμικές αυτών των πληθυσμών.

Επιπλέον, η υψηλής συχνότητας δειγματοληψία είναι ιδιαίτερα σημαντική για την ανίχνευση και την κατανόηση των φαινομένων ανθοφορίας και την παρακολούθηση της δυναμικής των επιβλαβών φυκών (HABs), τα οποία μπορεί να αναπτυχθούν και να εξαφανιστούν σε σύντομο χρονικό διάστημα (Smayda, 1997), όπως φάνηκε κι από τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας για το γένος *Pseudo-nitzschia* spp., το οποίο φάνηκε να παρουσιάζει αξιοσημείωτες διακυμάνσεις σε σύντομο χρονικό διάστημα (Εικόνα 17α). Με συχνότερες δειγματοληψίες, οι ερευνητές μπορούν να εντοπίσουν γρήγορα την έναρξη, την κορύφωση και την ύφεση των ανθίσεων, επιτρέποντας την πιο αποτελεσματική παρακολούθηση και διαχείριση των επιπτώσεών τους στην οικολογία των παράκτιων περιοχών και στη δημόσια υγεία. Αυτά τα δεδομένα μπορούν να οδηγήσουν σε πλέον στοχευμένες στρατηγικές διαχείρισης και προστασίας των

θαλάσσιων πόρων, όπως αναγνωρίζεται και σε πρόσφατες μελέτες στη Μεσόγειο (Totti et al., 2019).

Η παρακολούθηση των πλαγκτονικών κοινοτήτων με υψηλή συχνότητα προσφέρει πολύτιμες πληροφορίες για τη δυναμική τους (Cullen & MacIntyre, 2020), συνοδεύεται ωστόσο από προκλήσεις, όπως το αυξημένο κόστος και τις τεχνικές δυσκολίες. Ένα από τα κύρια προβλήματα είναι η οικονομική επιβάρυνση που σχετίζεται με την εγκατάσταση και τη συντήρηση του εξοπλισμού, όπως τα συστήματα απεικόνισης *in-situ*, τα οποία μπορούν να είναι ιδιαίτερα δαπανηρά τόσο σε αρχικό στάδιο όσο και σε συνεχή λειτουργία και επεξεργασία δεδομένων. Επιπρόσθετα, η συλλογή και ανάλυση μεγάλου όγκου δεδομένων υψηλής συχνότητας απαιτεί αρκετό χρόνο και εργασία. Η επεξεργασία λεπτομερών δεδομένων σε καθημερινή ή ωριαία βάση απαιτεί εξειδικευμένο λογισμικό και συχνά χειροκίνητη επικύρωση, γεγονός που επιβαρύνει σημαντικά τις ερευνητικές ομάδες (Barth & Stone, 2024). Έτσι, η ανάγκη για συνεχή αποθήκευση και διαχείριση δεδομένων αυξάνει την πολυπλοκότητα και το κόστος λειτουργίας.

Συμπερασματικά, αν και οι παραδοσιακές μέθοδοι δειγματοληψίας μπορεί να είναι επαρκείς για ορισμένες εφαρμογές, ωστόσο, η υψηλής συχνότητας δειγματοληψία παρέχει μια πιο λεπτομερή εικόνα των ταχέως μεταβαλλόμενων οικοσυστημάτων και των δυναμικών των πλαγκτικών κοινοτήτων, επιτρέποντας τη λήψη πιο ενημερωμένων αποφάσεων για τη διαχείριση και τη διατήρηση των θαλάσσιων οικοσυστημάτων.

## 6. Συμπεράσματα

Η έρευνα αυτή παρέχει πολύτιμα δεδομένα για τη σύνθεση και δυναμική των μονοκύτταρων πλαγκτικών κοινοτήτων στον Σαρωνικό Κόλπο, με εστίαση στις ταχείες περιβαλλοντικές αλλαγές και την αντίδραση των κοινοτήτων φυτοπλαγκτού και πρωτοζωοπλαγκτού. Τα αποτελέσματα της μελέτης επιβεβαιώνουν την κρίσιμη σημασία των δειγματοληψιών υψηλής συχνότητας, ειδικά σε περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές, όπως τα παράκτια οικοσυστήματα της Μεσογείου.

Κατά τη διάρκεια των δειγματοληψιών, τα Διάτομα κυριάρχησαν το καλοκαίρι, ενώ το φθινόπωρο παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση των Heterotrophic Nanoflagellates, επιβεβαιώνοντας την εποχική διαδοχή των ειδών. Η μείωση της βιομάζας κατά το φθινόπωρο συνοδεύτηκε από αυξημένη παρουσία δυνητικά επιβλαβών ειδών, όπως τα *Pseudo-nitzschia* spp. και *Dinophysis* spp., που είναι γνωστά για την παραγωγή τοξινών. Αυτή η μεταβολή υπογραμμίζει τη σύνθετη αλληλεπίδραση μεταξύ ανθρωπογενών παραγόντων, όπως η ρύπανση, και φυσικών αλλαγών στις θαλάσσιες κοινότητες.

Μία από τις πιο σημαντικές παρατηρήσεις ήταν η ταχεία μεταβολή της αφθονίας και βιομάζας συγκεκριμένων ειδών σε διάστημα λίγων ημερών, κάτι που δεν θα μπορούσε να καταγραφεί με λιγότερο συχνές δειγματοληψίες. Αυτές οι παρατηρήσεις επιβεβαιώνουν τη σημασία της συνεχούς παρακολούθησης για τη σωστή κατανόηση των οικοσυστημικών αλλαγών και των επιπτώσεων των περιβαλλοντικών πιέσεων. Επιπλέον, η αναγνώριση δυνητικά επιβλαβών taxa προσφέρει μια πρώτη εκτίμηση του κινδύνου για το θαλάσσιο περιβάλλον και τις ανθρώπινες δραστηριότητες, ειδικά στον τομέα της αλιείας και της δημόσιας υγείας.

Συνολικά, η έρευνα δείχνει ότι η παρακολούθηση των πλαγκτικών κοινοτήτων με υψηλή συχνότητα μπορεί να αποτελέσει ένα ισχυρό εργαλείο για την περιβαλλοντική διαχείριση και την πρόληψη των φαινομένων ευτροφισμού και HABs, καθότι παρά την εφαρμογή της ευρωπαϊκής νομοθεσίας (Οδηγία 2000/60/EK στον Σαρωνικό Κόλπο), οι πιέσεις των ανθρώπινων δραστηριοτήτων συνεχίζουν να εντείνουν το φαινόμενο του ευτροφισμού. Συνεπώς, εκτιμάται ότι είναι απαραίτητη η διεξαγωγή μακροχρόνιων μελετών και ερευνών για την πλήρη αξιολόγηση της παράκτιας ζώνης του Σαρωνικού Κόλπου και τον ακριβή εντοπισμό των παραγόντων που επηρεάζουν την ποιότητα των υδάτων. Τα αποτελέσματα των ερευνών θα οδηγήσουν στην λήψη των κατάλληλων μέτρων από τους αρμόδιους φορείς για την βελτίωση της ποιότητας των υδάτων και κατ' επέκταση της ποιότητας της θαλάσσιας και ανθρώπινης ζωής.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Andersen, P., & Conseil international pour l'exploration de la mer. (1996). Design and implementation of some harmful algal monitoring systems (Vol. 44). Paris, France:: Unesco.
- Anderson, D. M., Glibert, P. M., & Burkholder, J. M. (2002). Harmful algal blooms and eutrophication: Nutrient sources, composition, and consequences. *Estuaries*, 25(4), 704-726.
- Anderson, D. M., Keafer, B. A., McGillicuddy, D. J., Mickelson, M. J., Keay, K. E., Liberatore, C. A., ... & Turner, J. T. (2005). *Toxicity in Pseudo-nitzschia blooms in the Gulf of Maine: Evidence for a link to high fresh water runoff and coastal circulation*. *Harmful Algae*, 4(6), 1021–1032.
- Anderson, D. M., Cembella, A. D., & Hallegraeff, G. M. (2012). Progress in understanding harmful algal blooms (HABs): Paradigm shifts and new technologies for research, monitoring and management. *Annual review of marine science*, 4, 143.
- Arhonditsis GB, Winder M, Brett MT, Schindler DE (2004) Patterns and mechanisms of phytoplankton variability in Lake Washington (USA). *Water Res* 38(18):4013–4027
- Arin, L., Moran, X. A. G., & Estrada, M. (2002). Phytoplankton size distribution and growth rates in the Alboran Sea (SW Mediterranean): The role of environmental conditions. *Journal of Plankton Research*, 24(10), 1017-1033.
- Balkis-Ozdelice, N., Durmus, T., Toklu-Alicli, B., & Balci, M. (2020). Phytoplankton composition related to the environmental conditions in the coastal waters of the Gulf of Erdek. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, 49(9), 1546-1557.
- Bates, S. S., Garrison, D. L., & Horner, R. A. (2008). Bloom dynamics and physiology of domoic-acid-producing *Pseudo-nitzschia* species. In E. Graneli & J. Turner (Eds.), *Ecology of Harmful Algae* (pp. 267-292). Springer.
- Bianchi, C. N. and Morri, C. (2000). Marine biodiversity of the Mediterranean Sea: situation, problems and prospects for future research, *Mar. Pollut. Bull.*, 40, 367–376
- Bianchi, C.N.(2007) Biodiversity issues for the forthcoming tropical Mediterranean Sea, *Hydrobiologia*, 580, 7–21.
- Billen, G., & Garnier, J. (2007). River basin nutrient delivery to the coastal sea: assessing its potential to sustain new production of non-siliceous algae. *Marine Chemistry*, 106(1-2), 148-160.
- Budavari, S., O'Neil, M. J., Smith, A., Heckelman, P. E., & Kinneary, J. F. (2001). *The Merk Index. An Encyclopedia of Chemicals, Drugs and Biologicals* 13 Ed), Merck and Co. Inc., whitehouse station, NJ, 1097, 1946.



Buchwald, S. Z., Herzsuh, U., Nürnberg, D., Harms, L., & Stoof-Leichsenring, K. R. (2024). Plankton community changes during the last 124,000 years in the subarctic Bering Sea derived from sedimentary ancient DNA. *The ISME Journal*, 18(1), 1-14. <https://doi.org/10.1038/ismej.wrad006>

Busch, J. A., Andree, K. B., Diogène, J., Fernández-Tejedor, M., Toebe, K., John, U., ... & Cembella, A. D. (2016). Toxicogenic algae and associated phycotoxins in two coastal embayments in the Ebro Delta (NW Mediterranean). *Harmful Algae*, 55, 191-201.

Cerino F, Fornasaro D, Kralj M, Giani M, Cabrini M (2019) Phytoplankton temporal dynamics in the coastal waters of the north-eastern Adriatic Sea (Mediterranean Sea) from 2010 to 2017. In: Mazzocchi MG, Capotondi L, Freppaz M, Lugliè A, Campanaro A (Eds) Italian Long-Term Ecological Research for understanding ecosystem diversity and functioning. Case studies from aquatic, terrestrial and transitional domains. *Nature Conservation* 34: 343–372

Christaki, U., Giannakourou, A., Van Wambeke, F., and Gregor'ı, G.(2001). Nanoflagellate predation on auto- and heterotrophic picoplankton in the oligotrophic Mediterranean Sea, *J. Plankton Res.*, 23, 1297–1310.

Cloern, J. E. (2001). Our evolving conceptual model of the coastal eutrophication problem. *Marine Ecology Progress Series*, 210, 223-253. <https://doi.org/10.3354/meps210223>

Cloern, J. E., & Jassby, A. D. (2009). *Patterns and Scales of Phytoplankton Variability in Estuarine–Coastal Ecosystems*. *Estuaries and Coasts*, 33(2), 230–241. doi:10.1007/s12237-009-9195-3

Cloern, J. E., & Jassby, A. D. (2010). *Patterns and scales of phytoplankton variability in estuarine–coastal ecosystems*. *Estuaries and Coasts*, 33(2), 230–241.

Cloern, J. E., Foster, S. Q., & Kleckner, A. E. (2014). Phytoplankton primary production in the world's estuarine-coastal ecosystems. *Biogeosciences*, 11(9), 2477-2501. <https://doi.org/10.5194/bg-11-2477-2014>

Ciavatta, S., Kay, S., Brewin, R. J. W., Cox, R., Di Cicco, A., Nencioli, F., Polimene, L., Sammartino, M., Santoleri, R., Skákala, J., & Tsapakis, M. (2019). Ecoregions in the Mediterranean Sea Through the Reanalysis of Phytoplankton Functional Types and Carbon Fluxes. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(10), 6737–6759. <https://doi.org/10.1029/2019JC015128>

Cullen, J. J., & MacIntyre, J. G. (2000). Behavior, physiology, and the niche of depth-regulating phytoplankton. In B. R. Wood (Ed.), *The Physiological Ecology of Harmful Algal Blooms* (pp. 559-579). Springer.

Domaizon, I., Lepère, C., Debroas, D., Bouvy, M., Ghiglione, J. F., Jacquet, S., Bettarel, Y., Bouvier, C., Torrèton, J. P., Vidussi, F., Mostajir, B., Kirkham, A., LeFloc'h, E., Fouilland, E., Montanié, H., & Bouvier, T. (2012). Short-term responses of unicellular planktonic eukaryotes to increases in temperature and UVB radiation. *BMC Microbiology*, 12, 202. <https://doi.org/10.1186/1471-2180-12-202>

Edvardsen, B., & Paasche, E. (1998). Bloom dynamics and physiology of *Prymnesium* and *Chrysochromulina*. NATO ASI SERIES G ECOLOGICAL SCIENCES, 41, 193-208.

Evangelidou, N., & Florou, H. (2013). Spatial distribution and mobility of organic carbon (POC and DOC) in a coastal Mediterranean environment (Saronikos Gulf, Greece) during 2007–2009 period. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(8), 5708-5721.

Fenchel, T. (1988). *Marine plankton food chains*. Annual Review of Ecology and Systematics, 19, 19-38.

Frehi, H., Coute, A., Mascarell, G., Perrette-Gallet, C., Ayada, M., & Kara, M. H. (2007). Harmful and red-tide dinoflagellates in the Annaba bay (Algeria). *Comptes Rendus Biologies*, 330(8), 615-628. <https://doi.org/10.1016/j.crvi.2007.05.002>

Friligos, N. (2008). Hydrographic and plankton variability in the Saronikos Gulf. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 90(2), 259-274.

Gasol, J. M., Cardelús, C., Morán, X. A. G., Balagué, V., Forn, I., Marrasé, C., Massana, R., Pedrós-Alió, C., Sala, M. M., Simó, R., Vaqué, D., & Estrada, M. (2016). Seasonal patterns in phytoplankton photosynthetic parameters and primary production at a coastal NW Mediterranean site. *Scientia Marina*, 80(S1), 63-77. <https://doi.org/10.3989/scimar.04480.06E>

Genitsaris, Stefanidou, Sommer, & Moustaka-Gouni. (2019). Phytoplankton Blooms, Red Tides and Mucilaginous Aggregates in the Urban Thessaloniki Bay, Eastern Mediterranean. *Diversity*, 11(8), 136. <https://doi.org/10.3390/d11080136>

Genitsaris, S., Stefanidou, N., Moustaka-Gouni, M., Sommer, U., & Tsiapas, G. (2020). Variability and community composition of marine unicellular eukaryote assemblages in a eutrophic Mediterranean urban coastal area with marked plankton blooms and red tides. *Diversity*, 12(4), Article 4.

Giani, M., Djakovac, T., Degobbis, D., Cozzi, S., Solidoro, C., & Umani, S. F. (2012). *Recent changes in the marine ecosystems of the northern Adriatic Sea*. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 115, 1–13.

Hallegraeff, G. M. (1992). Harmful algal blooms in the Australian region. *Marine pollution bulletin*, 25(5-8), 186-190

Harding, L. W., Adolf, J. E., Mallonee, M. E., & Paerl, H. W. (2016). *Phytoplankton community responses to nutrient and climate variability in Chesapeake Bay*. *Estuaries and Coasts*, 39(3), 732–751.

Heinrichs M.E., Mori C., Dlugosch L.. (2020) Complex Interactions between Aquatic Organisms and their Chemical Environment Elucidated from Different Perspectives. In: S. Jungblut, V. Liebich, M. Bode-Dalby. (Eds) YOUMARES 9-The Oceans: Our Research, Our Future, 279-97. Springer.

Heisler, J., Glibert, P. M., Burkholder, J. M., Anderson, D. M., Cochlan, W., Dennison, W. C., ... & Suddleson, M. (2008). Eutrophication and harmful algal blooms: a scientific consensus. *Harmful algae*, 8(1), 3-13. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2008.08.006>

Hillebrand, H., Dürselen, C. D., Kirschtel, D., Pollinger, U., & Zohary, T. (1999). Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae. *Journal of Phycology*, 35(2), 403-424.

Ignatiades, L., Karydis, M., & Vounatsou, P. (1992). *A possible method for evaluating oligotrophy and eutrophy of the marine environment*. *Marine Pollution Bulletin*, 24(5), 238–243.

Ignatiades, L., & Gotsis-Skretas, O. (2010). A review on toxic and harmful algae in Greek coastal waters (E. Mediterranean Sea). *Toxins*, 2(5), 1019-1037.

Ismael, A. A. (2014). Coastal engineering and Harmful Algal Blooms along Alexandria coast, Egypt. *The Egyptian Journal of Aquatic Research*, 40(2), 125–131. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2014.07.005>

Jahan S., Singh A. (2023) The Role of Phytoplanktons in the Environment and in Human Life, a Review. *Basra Journal of science* 41(2):392-411

Jomas, A. (1997). *Identifying Marine Phytoplankton*. [Εκδότης].

Kâ, S., & Krishnamurthy, V. (2002). *Phytoplankton dynamics in relation to hydrographic conditions in the coastal waters off Goa, India*. *Marine Biology*, 140(1), 41–57.

Kalaroni, S., Tsiaras, K., Petihakis, G., Economou-Amilli, A., & Triantafyllou, G. (2019). Modelling the Mediterranean pelagic ecosystem using the POSEIDON ecological model. Part II: Biological dynamics. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 104711. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2019.104711>

Kim, J. S., & Jeong, H. J. (2004). Feeding by the heterotrophic dinoflagellates *Gyrodinium dominans* and *G. spirale* on the red-tide dinoflagellate *Prorocentrum minimum*. *Marine Ecology Progress Series*, 280, 85–94. <https://doi.org/10.3354/meps280085>

Kitsiou, D., & Karydis, M. (2011). Coastal marine eutrophication assessment: a review on data analysis. *Environment international*, 37(4), 778-801.

Klausmeier, C. A., Litchman, E., & Levin, S. A. (2004). Phytoplankton growth and stoichiometry under multiple nutrient limitation. *Limnology and Oceanography*, 49(4, part 2), 1463–1470. [https://doi.org/10.4319/lo.2004.49.4\\_part\\_2.1463](https://doi.org/10.4319/lo.2004.49.4_part_2.1463)

Kostryukova A.M., Mashkova I.V., Krupnova T., Gegerov N.O. (2018). Phytoplankton biodiversity and its relationship with aquatic environmental factors in Lake Uvildy, South Urals, Russia. *Biodiversities*, 19(2018) 1422–1428

Kroeze, C., Hofstra, N., Ivens, W., Löhr, A., Strokal, M., & van Wijnen, J. (2013). The links between global carbon, water and nutrient cycles in an urbanizing world—the case of coastal eutrophication. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 5(6), 566-572.

Longhurst, A. R.(2006). *Ecological Geography of the Sea*, 2nd edn., Elsevier Science Publishers, New York.

Makri P., Hermides D., Kontakiotis G., Zarkogiannis S.D., Besiou E., Janjuhah H.T., Antonarakou A. (2022). Integrated Ecological Assessment of Heavily Polluted Sedimentary Basin within the Broader Industrialized Area of Thriassion Plain (Western Attica, Greece). *Water* 14(3), 382, <https://doi.org/10.3390/w14030382>.

Marine Species Identification Portal. (n.d.). Harmful Algal Bloom (HAB) Species. <https://www.marinespecies.org/hab/>

Matsuyama, Y. (1999). Harmful Effect of Dinoflagellate *Heterocapsa circularisquama* on Shellfish Aquaculture in Japan. *JARQ*, 33, 283-293.

Meddeb, M., Grami, B., Chaalali, A., Haraldsson, M., Niquil, N., Pringault, O., & Sakka Hlaili, A. (2018). Plankton food-web functioning in anthropogenically impacted coastal waters (SW Mediterranean Sea): An ecological network analysis. *Progress in Oceanography*, 162, 66–82.

Memos, C. D. (1982). Water waves diffracted by two breakwaters. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 108(3), 352-367.

Meybeck, M., Durr, H., Roussennac, S., and Ludwig, W.(2007). Regional seas and their interception of riverine fluxes to oceans, *Mar. Chem.*, 106, 301–325.

Mos, L. (2001). Domoic acid: a fascinating marine toxin. *Environmental toxicology and Pharmacology*, 9(3), 79-85.

Paerl, H. W., Hall, N. S., & Calandrino, E. S. (2011). Controlling harmful cyanobacterial blooms in a world experiencing anthropogenic and climatic-induced

change. *Science of The Total Environment*, 409(10), 1739-1745.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.02.001>

Paerl, H. W., & Paul, V. J. (2012). Climate change: Links to global expansion of harmful cyanobacteria. *Water Research*, 46(5), 1349–1363.  
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.08.002>

Paerl, H. W., & Otten, T. G. (2013). Harmful cyanobacterial blooms: Causes, consequences, and controls. *Microbial Ecology*, 65(4), 995-1010.  
<https://doi.org/10.1007/s00248-012-0159-y>

Pagou K. (2005). Eutrophication in Hellenic coastal areas. *State of the Hellenic Marine Environment*, 311-317.

Patoucheas, P., Koukousioura, O., Psarra, S., Aligizaki, K., Dimiza, M. D., Skampa, E., Michailidis, I., Nomikou, P., & Triantaphyllou, M. V. (2021). Phytoplankton community structure changes during autumn and spring in response to environmental variables in Methana, Saronikos Gulf, Greece. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12272-z>

Parmar T.K., Rawtani D., Agrawal Y.K.(2016). Bioindicators: The natural indicator of environmental pollution, *Frontiers Life Sci.*, 9 110–118.

Pavlidou, A. (2011). Nutrient distribution in selected coastal areas of Aegean Sea (East Mediterranean Sea). *Journal of Environmental Science and Engineering A*, 1, 78-88

**Pavlidou, A., Papageorgiou, E., Simboura, N., Assimakopoulou, G., & Pagou, K. (2014).** "Nutrient and phytoplankton distribution in Saronikos Gulf (Aegean Sea): Long-term response to wastewater treatment plant operation." *Marine Pollution Bulletin*, **88**(1-2), 282-295.

Polat, S., & Isik, O. (2001). Phytoplankton Distribution, Diversity and Nutrients at the North- eastern Mediterranean Coast of Turkey (Karatafl-Adana). 10.

Rabalais, N. N., Turner, R. E., Díaz, R. J., & Justić, D. (2009). Global change and eutrophication of coastal waters. *ICES Journal of Marine Science*, 66(7), 1528-1537.

Reguera, B., Riobó, P., Rodríguez, F., Díaz, P. A., Pizarro, G., Paz, B., ... & Blanco, J. (2014). Dinophysis toxins: causative organisms, distribution and fate in shellfish. *Marine drugs*, 12(1), 394-461.

Rijal Leblad, B., Amnhir, R., Reqia, S., Sitel, F., Daoudi, M., Marhraoui, M., Ouelad Abdellah, M. K., Veron, B., Er-Raioui, H., & Laabir, M. (2020). Seasonal variations of phytoplankton assemblages in relation to environmental factors in Mediterranean coastal waters of Morocco, a focus on HABs species. *Harmful Algae*, 96, 101819.  
<https://doi.org/10.1016/j.hal.2020.101819>

- Romagnan J-B, Legendre L, Guidi L, Jamet J-L, Jamet D, Mousseau L, et al. (2015) Comprehensive Model of Annual Plankton Succession Based on the Whole-Plankton Time Series Approach. *PLoS ONE* 10(3): e0119219. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0119219>
- Ruggiero, M. V., Sarno, D., Barra, L., Kooistra, W. H., Montresor, M., & Zingone, A. (2015). Diversity and temporal pattern of Pseudo-nitzschia species (Bacillariophyceae) through the molecular lens. *Harmful Algae*, 42, 15-24.
- Sarkar S., Hossain M. S., Sonia M.I., Samiul Huda A.N.M, Chowdhary S., Riya, N. Das, E. Liyana , Chandra S., Basak M.A.K (2023) Predicting the impacts of environmental variability on phytoplankton communities of a subtropical estuary, *J Sea Res*, 194 102404
- Smayda, T. J., & Reynolds, C. S. (2001). Community assembly in marine phytoplankton: Application of recent models to harmful dinoflagellate blooms. *Journal of Plankton Research*, 23(5), 447-461. <https://doi.org/10.1093/plankt/23.5.447>
- Smith, V. H., Joye, S. B., & Howarth, R. W. (2006). Eutrophication of freshwater and marine ecosystems. *Limnology and Oceanography*, 51(1part2), 351-355. [https://doi.org/10.4319/lo.2006.51.1\\_part\\_2.351](https://doi.org/10.4319/lo.2006.51.1_part_2.351)
- Sommer, U., Charalampous, E., Genitsaris, S., & Moustaka-Gouni, M. (2017). Benefits, costs and taxonomic distribution of marine phytoplankton body size. *Journal of Plankton Research*, 39(3), 494-508.
- Sournia, A. (1982). Form and function in marine phytoplankton. *Biological Reviews*, 57(3), 347-394. <https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.1982.tb00702.x>
- Spatharis, S., Tsirtsis, G., Danielidis, D. B., Do Chi, T., & Mouillot, D. (2007). Effects of pulsed nutrient inputs on phytoplankton assemblage structure and blooms in an enclosed coastal area. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 73(1-2), 807-815. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.03.016>
- Tan, L., Wang, L., & Cai, Q. (2024). Daily process and key characteristics of phytoplankton bloom during a low-water level period in a large subtropical reservoir bay. *Frontiers in Plant Science*, 15, Article 1390019. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1390019>
- Tas, S. (2019). Microalgal blooms in a eutrophic estuary (Golden Horn, Sea of Marmara) following a remediation effort. *Botanica Marina*, 62(6), 537-547.
- Thingstad, F. T., Krom, M. D., Mantoura, R. F. C., Flaten, G., Groom, S., Herut, B., Kress, N., Law, C. S., Pasternak, A., Pitta, P., Psarra, S., Rassoulzadegan, F., Tanaka, T., Tselepidis, A., Wassmann, P., Woodward, E. M. S., Wexels-Riser, C., Zodiatis, G.,

and Zohary, T. (2005). Nature of phosphorus limitation in the ultraoligotrophic Eastern Mediterranean, *Science*, 309, 1068–1071.

Tylianakis JM, Didham RK, Bascompte J, Wardle DA (2008) Global change and species interactions in terrestrial ecosystems. *Ecol lett* 11(12):1351–1363.

Totti, C., Romagnoli, T., Accoroni, S., Coluccelli, A., Pellegrini, M., Campanelli, A., ... Marini, M. (2019). Phytoplankton communities in the northwestern Adriatic Sea: Interdecadal variability over a 30-years period (1988–2016) and relationships with meteorological drivers. *Journal of Marine Systems*. doi:10.1016/j.jmarsys.2019.01007

Triantaphyllou, M. V., Baumann, K. H., Karatsolis, B. T., Dimiza, M. D., Psarra, S., Skampa, E., ... & Nomikou, P. (2018). Coccolithophore community response along a natural CO<sub>2</sub> gradient off Methana (SW Saronikos Gulf, Greece, NE Mediterranean). *PloS one*, 13(7), e0200012.

Tsiaras, K. P., Petihakis, G., Kourafalou, V. H., & Triantafyllou, G. (2014). Impact of the river nutrient load variability on the North Aegean ecosystem functioning over the last decades. *Journal of sea research*, 86, 97-109.

Tsikoti, C., & Genitsaris, S. (2021). Review of Harmful Algal Blooms in the Coastal Mediterranean Sea, with a Focus on Greek Waters. *Diversity*, 13(8), 396.

Türkoğlu, M. (2010). Temporal variations of surface phytoplankton, nutrients and chlorophyll a in the Dardanelles (Turkish Straits System): A coastal station sample in weekly time intervals. *Turkish Journal of Biology*, 34(3), 319-333. <https://doi.org/10.3906/biy-0810-17>

TÜRKOĞLU, M. (2010). Temporal variations of surface phytoplankton, nutrients and chlorophyll a in the Dardanelles (Turkish Straits System): a coastal station sample in weekly time intervals. *Turkish Journal of Biology*, 34(3), 319-333.

Utermöhl, H. (1958). Zur Vervollkommnung der quantitativen Phytoplankton-Methodik. *Mitteilungen Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie*, 9, 1-38.

**Voss, M., Altabet, M. A., Bange, H. W., Dippner, J. W., Johansen, A. M., Karstensen, J., & Struck, U. (2011).** Nitrogen processes in coastal and marine ecosystems. In M. Voss (Ed.), *Nitrogen in the Marine Environment* (2nd ed., pp. 1221-1279). Academic Press.

Vila, M., & Masó, M. (2004). Phytoplankton functional groups and harmful algal species in anthropogenically impacted waters of the NW Mediterranean Sea. 16.

Vila, M., Giacobbe, M. G., Masó, M., Gangemi, E., Penna, A., Sampedro, N., Azzaro, F., Camp, J., & Galluzzi, L. (2005). A comparative study on recurrent blooms of

Alexandrium minutum in two Mediterranean coastal areas. *Harmful Algae*, 4(4), 673–695. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2004.07.006>

Viličić, D., Marasović, I., & Mioković, D. J. A. B. C. (2002). Checklist of phytoplankton in the eastern Adriatic Sea. *Acta Botanica Croatica*, 61(1), 57-91.

Vogt, R. J., & Kolasa, J. (2006). Cascading effects of climate change on plankton community structure. *Limnology and Oceanography*, 51(1), 271-283.

Von Glasow, R., Jickells, T. D., Baklanov, A., Carmichael, G. R., Church, T. M., Gallardo, L., ... & Zhu, T. (2013). Megacities and large urban agglomerations in the coastal zone: interactions between atmosphere, land, and marine ecosystems. *Ambio*, 42(1), 13-28.

Willis, C., Papathanasopoulou, E., Russel, D., & Artioli, Y. (2018). Harmful algal blooms: the impacts on cultural ecosystem services and human well-being in a case study setting, Cornwall, UK. *Marine Policy*, 97, 232-238 <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2018.06.002>

Zapounidou, M. (2020). Ecological water quality assessment of the coastal area of Olympiaki Akti based on phytoplankton community.

Zhao, K., Cao, Y., Pang, W., Wang, L., Song, K., You, Q., & Wang, Q. (2020). Long-term plankton community dynamics and influencing factors in a man-made shallow lake, Lake Dishui, China. *Aquatic Sciences*, 83(1). doi:10.1007/s00027-020-00758-4

Zingone, A., Escalera, L., Aligizaki, K., Fernández-Tejedor, M., Ismael, A., Montresor, M., Mozetič, P., Taş, S., & Totti, C. (2020). Toxic marine microalgae and noxious blooms in the Mediterranean Sea: A contribution to the Global HAB Status Report. *Harmful Algae*, 99, 101843. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2020.101843>

Zingone, A., Escalera, L., Aligizaki, K., Fernández-Tejedor, M., Ismael, A., Montresor, M., ... & Totti, C. (2021). Toxic marine microalgae and noxious blooms in the Mediterranean Sea: A contribution to the Global HAB Status Report. *Harmful Algae*, 102, 101843. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2020.101843>

Zingone, A., Tortora, C., D'Alelio, D., Margiotta, F., & Sarno, D. (2022). Assembly rules vary seasonally in stable phytoplankton associations of the Gulf of Naples (Mediterranean Sea). *Marine Ecology*, 44(3), e12730. <https://doi.org/10.1111/maec.12730>