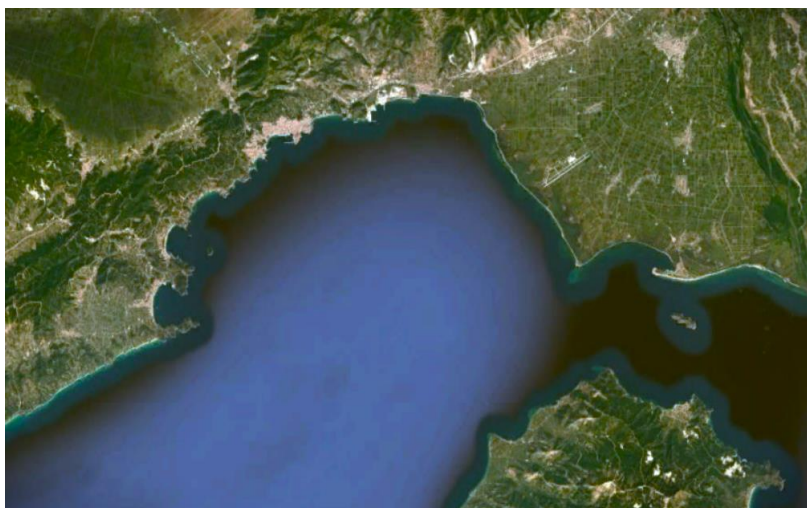




**ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΘΑΛΑΣΣΙΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΣΤΙΣ ΕΞΟΔΟΥΣ ΤΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΒΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΘΑΡΙΣΜΩΝ
ΚΑΒΑΛΑΣ ΚΑΙ ΠΑΛΗΟΥ**

Ελένη Φλωρά



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Επιβλέπουσα: Ευαγγελία Κρασακοπούλου, Καθηγήτρια Παν. Αιγαίου

Συνεπιβλέπων: Νικόλαος Καμίδης, Ερευνητής ΙΝΑΛΕ

Μυτιλήνη, Μάρτιος 2022

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Απόφοιτης του ΠΜΣ «Ολοκληρωμένη Διαχείριση Παράκτιων Περιοχών» του
Τμήματος Ωκεανογραφίας και Θαλασσίων Βιοεπιστημών**

Ελένης Φλωρά

ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ:

**ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΘΑΛΑΣΣΙΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΣΤΙΣ ΕΞΟΔΟΥΣ ΤΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΒΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΘΑΡΙΣΜΩΝ
ΚΑΒΑΛΑΣ ΚΑΙ ΠΑΛΗΟΥ**

Τριμελής Επιτροπή Επίβλεψης και Κρίσης της Εργασίας

Υπογραφές

Ευαγγελία Κρασακοπούλου

Επιβλέπουσα, Καθηγήτρια Πανεπιστημίου Αιγαίου

Νικόλαος Καμίδης

Συνεπιβλέπων, Ερευνητής Ινστιτούτου Αλιευτικής Έρευνας

Ουρανία Τζωράκη

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Πανεπιστημίου Αιγαίου

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά την επιβλέπουσα της διπλωματικής μου εργασίας κα Εύα Κρασακοπούλου, Καθηγήτρια του Τμήματος Ωκεανογραφίας και Θαλασσίων Βιοεπιστημών, για την άψογη συνεργασία και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, κατά την εκπόνηση της εργασίας. Ευχαριστώ ιδιαίτερα τον κο Νίκο Καμίδα, Ερευνητή του Ινστιτούτου Αλιευτικής Έρευνας και συνεπιβλέποντα της εργασίας, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα, για την καθοδήγηση και την πολύτιμη βοήθειά του, τόσο στο εργαστήριο, όσο και στη συγγραφή της εργασίας. Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω την κα Ράνια Τζωράκη, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια του Τμήματος Ωκεανογραφίας και Θαλασσίων Βιοεπιστημών για τη συμμετοχή της στην τριμελή εξεταστική επιτροπή της διπλωματικής.

Ευχαριστώ την ομάδα του ΙΝΑΛΕ που πραγματοποίησε τη δειγματοληψία, τους Νίκο Καμίδα, Στέλιο Τριανταφυλλίδη, Δημήτρη Καραμπέτση και Γιώτα Λίτσα. Τη Γιώτα την ευχαριστώ πολύ και για τη βοήθεια της στις εργαστηριακές αναλύσεις.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τον σύντροφό μου Δημήτρη για την υπομονή και τη στήριξη του καθ' όλη τη διάρκεια του ΠΜΣ.

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της ποιότητας του θαλάσσιου περιβάλλοντος στις περιοχές διάθεσης των επεξεργασμένων λυμάτων των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) Καβάλας και Παληού, εντός του Κόλπου Καβάλας. Για τον προσδιορισμό της επιβάρυνσης που δέχεται ο κόλπος, διεξήχθη δειγματοληψία τον Ιούλιο του 2021. Μετρήθηκαν οι συγκεντρώσεις θρεπτικών αλάτων (νιτρικά, νιτρώδη, αμμωνιακά, φωσφορικά και πυριτικά), αιωρούμενων σωματιδίων και χλωροφύλλης-α, καθώς και τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του νερού (θερμοκρασία, αγωγιμότητα / αλατότητα και διαλυμένο οξυγόνο). Επιπλέον, προσδιορίστηκε η κοκκομετρική σύσταση και η περιεκτικότητα του ιζήματος σε οργανικό υλικό και ανθρακικά. Βάσει των μετρήσεων, υπολογίστηκε ο τροφικός δείκτης TRIX, πραγματοποιήθηκε στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων και σύγκριση με προηγούμενες μελέτες. Σύμφωνα με τα τελικά αποτελέσματα, η επίδραση των δύο ΕΕΛ στα σημεία εκροής τους δεν είναι εμφανής, διότι οι ιδιαίτερες συνθήκες της περιόδου που πραγματοποιήθηκε η δειγματοληψία (πολύ υψηλή θερμοκρασία υδάτων και εμφάνιση κολλωδών μακρο-συσσωματωμάτων) έκαναν το θαλάσσιο περιβάλλον του Κόλπου Καβάλας ευτροφικό.

Abstract

This thesis aims to investigate the quality of the marine environment in the discharge areas of treated wastewater of the Wastewater Treatment Plants of Kavala and Palio, within Kavala Gulf. To determine the environmental burden on the gulf, sampling was carried out in July 2021. Nutrient concentrations (nitrates, nitrites, ammonia, phosphates and silicates), suspended particles and chlorophyll-a concentrations, as well as, physicochemical properties of water (temperature, conductivity / salinity and dissolved oxygen) were measured. Furthermore, the granulometric composition and the contents of organic matter and carbonates in sediment were determined. Based on the measurements, the trophic index TRIX was calculated, the results were statistically analyzed and compared with previous studies. According to the final results, the effect of the two Wastewater Treatment Plants on their discharge areas is not obvious, as special conditions during the sampling period (very high water temperature and the appearance of mucilage) made the marine environment of Kavala Gulf eutrophic.

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....	v
1. Εισαγωγή.....	1
1.1. Ευτροφισμός.....	1
1.1.1. Τι είναι ο ευτροφισμός και ποιες οι επιπτώσεις του στο φυσικό περιβάλλον.....	1
1.1.2. Παράγοντες πρόκλησης ευτροφισμού.....	4
1.1.3. Παράκτιες περιοχές.....	7
1.1.4. Προσδιορισμός τροφικής κατάστασης – Δείκτες τροφικής κατάστασης...	8
1.2. Βιολογικοί Καθαρισμοί.....	9
1.2.1. Λειτουργία.....	9
1.2.2. Κίνδυνοι για το φυσικό περιβάλλον.....	11
1.3. Μελετώμενοι Βιολογικοί Καθαρισμοί.....	12
1.3.1. Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων Καβάλας.....	12
1.3.2. Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων Παληού.....	13
1.3.3. Οριακές τιμές εκπομπής ρυπαντικών φορτίων και συγκεντρώσεων.....	14
1.4. Περιοχή μελέτης.....	15
1.4.1. Γενική περιγραφή.....	15
1.4.2. Κλιματικές συνθήκες.....	16
1.4.3. Μορφολογία βυθού και γεωλογία Κόλπου Καβάλας.....	17
1.4.4. Προστατευόμενες περιοχές.....	18
1.4.5. Δραστηριότητες που επηρεάζουν το θαλάσσιο περιβάλλον της περιοχής	18
1.5. Σκοπός της εργασίας.....	22
2. Μεθοδολογία.....	23
2.1. Γενικά στοιχεία.....	23
2.2. Σταθμοί δειγματοληψίας.....	23
2.3. Δειγματοληψία.....	24
2.4. Αναλύσεις.....	25
2.4.1. Ανόργανα θρεπτικά άλατα και αιωρούμενα στερεά.....	25
2.4.2. Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά νερού.....	27
2.4.3. Χλωροφύλλη-α.....	27
2.4.4. Κοκκομετρική σύσταση ιζημάτων.....	28
2.4.5. Οργανικό υλικό και ανθρακικά στα ιζήματα.....	28

2.4.6.	Υπολογισμός δείκτη τροφικής κατάστασης υδάτων – TRIX.....	29
3.	Αποτελέσματα	30
3.1.	Ανόργανα θρεπτικά άλατα	30
3.1.1.	Νιτρικά άλατα (NO ₃)	30
3.1.2.	Νιτρώδη άλατα (NO ₂).....	30
3.1.3.	Φωσφορικά άλατα (PO ₄)	31
3.1.4.	Αμμωνιακά άλατα (NH ₄)	32
3.1.5.	Πυριτικά άλατα (SiO ₂).....	33
3.2.	Ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS)	33
3.3.	Χλωροφύλλη-α	34
3.4.	Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά νερού	35
3.4.1.	Διαλυμένο οξυγόνο (DO)	35
3.4.2.	Θερμοκρασία	36
3.4.3.	Αλατότητα	37
3.4.4.	Πυκνότητα.....	38
3.5.	Κοκκομετρική σύσταση ιζημάτων	39
3.6.	Ολικό οργανικό υλικό και ολικά ανθρακικά στα ιζήματα	41
3.7.	Δείκτης τροφικής κατάστασης παράκτιων θαλάσσιων υδάτων – TRIX	42
3.8.	Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων	43
3.8.1.	Σύγκριση περιοχών και βαθών δειγματοληψίας	43
3.8.2.	Συσχέτιση χαρακτηριστικών του ιζήματος	46
4.	Συζήτηση.....	47
4.1.	Τροφική κατάσταση υδάτων.....	47
4.2.	Συγκεντρώσεις θρεπτικών αλάτων	47
4.3.	Συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων.....	52
4.4.	Συγκεντρώσεις χλωροφύλλης-α.....	52
4.5.	Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά υδάτων	53
4.6.	Χαρακτηριστικά ιζήματος.....	55
5.	Συμπεράσματα.....	57
6.	Βιβλιογραφία	59
6.1.	Ελληνική	59
6.2.	Ξενόγλωσση	59
6.3.	Διαδίκτυο	61

Εικόνες

Εικόνα 1. Φυτοπλαγκτονικές ανθίσεις σε εκβολές ποταμών και παράκτια ύδατα: α) Άνθιση Κυανοβακτηρίων στον Φινλανδικό Κόλπο στη Βαλτική Θάλασσα, β) Ερυθρή παλίρροια από άνθιση Δινομαστιγωτών σε ακτή της Ιαπωνικής Θάλασσας, γ) Άνθιση Κυανοβακτηρίων σε εκβολή ποταμού στη Φλόριντα, δ) Μικτή άνθιση Κυανοβακτηρίων – Χλωροφύτων σε λιμνοθάλασσα στη Νέα Ζηλανδία (Paerl, 2004)	3
Εικόνα 2. Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων Καβάλας (ΕΓΥ)	13
Εικόνα 3. Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων Παληού (Google Earth)	14
Εικόνα 4. Χάρτης περιοχής μελέτης.....	16
Εικόνα 5. Διάγραμμα ετήσιων βροχοπτώσεων στην περιοχή της Καβάλας για την περίοδο 2006 – 2021 (πηγή δεδομένων: Meteokan)	17
Εικόνα 6. Σταθμοί δειγματοληψίας νερού και ιζήματος στις θαλάσσιες περιοχές επίδρασης των Μονάδων Βιολογικού Καθαρισμού Παληού και Καβάλας.	24
Εικόνα 7. Αριθμημένοι σταθμοί δειγματοληψίας στις περιοχές επίδρασης των δύο ΕΕΛ	24
Εικόνα 8. Θέσεις κατακόρυφων τομών που χρησιμοποιήθηκαν στην οπτικοποίηση των κατανομών θερμοκρασίας, αλατότητας και πυκνότητας στις περιοχές επίδρασης των ΕΕΛ Καβάλας (α) και Παληού (β).....	27
Εικόνα 9. Γράφημα συγκεντρώσεων νιτρικών αλάτων σε όλους τους σταθμούς και στα τρία βάθη δειγματοληψίας.....	30
Εικόνα 10. Γράφημα συγκεντρώσεων νιτρωδών αλάτων σε όλους τους σταθμούς και στα τρία βάθη δειγματοληψίας	31
Εικόνα 11. Γράφημα συγκεντρώσεων φωσφορικών αλάτων σε όλους τους σταθμούς και στα τρία βάθη δειγματοληψίας	32
Εικόνα 12. Γράφημα συγκεντρώσεων αμμωνιακών αλάτων σε όλους τους σταθμούς και στα τρία βάθη δειγματοληψίας	32
Εικόνα 13. Γράφημα συγκεντρώσεων πυριτικών αλάτων σε όλους τους σταθμούς και στα τρία βάθη δειγματοληψίας	33
Εικόνα 14. Γράφημα συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων σε όλους τους σταθμούς και στα τρία βάθη δειγματοληψίας.....	34
Εικόνα 15. Γράφημα συγκεντρώσεων χλωροφύλλης-α σε όλους τους σταθμούς και στα τρία βάθη δειγματοληψίας.....	35
Εικόνα 16. Γράφημα συγκεντρώσεων διαλυμένου οξυγόνου σε όλους τους σταθμούς και στα τρία βάθη δειγματοληψίας.....	36
Εικόνα 17. Κατακόρυφη κατανομή θερμοκρασίας στην περιοχή επίδρασης της ΕΕΛ Καβάλας	36
Εικόνα 18. Κατακόρυφη κατανομή θερμοκρασίας στην περιοχή επίδρασης της ΕΕΛ Παληού	37
Εικόνα 19. Κατακόρυφη κατανομή αλατότητας στην περιοχή επίδρασης της ΕΕΛ Καβάλας	37

Εικόνα 20. Κατακόρυφη κατανομή αλατότητας στην περιοχή επίδρασης της ΕΕΛ Παληού .	38
Εικόνα 21. Κατακόρυφη κατανομή πυκνότητας στην περιοχή επίδρασης της ΕΕΛ Καβάλας	38
Εικόνα 22. Κατακόρυφη κατανομή πυκνότητας στην περιοχή επίδρασης της ΕΕΛ Παληού .	39
Εικόνα 23. Χάρτης κοκκομετρικής σύστασης ιζημάτων στην περιοχή επίδρασης της ΕΕΛ Καβάλας	40
Εικόνα 24. Χάρτης κοκκομετρικής σύστασης ιζημάτων στην περιοχή επίδρασης της ΕΕΛ Παληού	41
Εικόνα 25. Γράφημα περιεκτικότητας οργανικού υλικού και ανθρακικών υλικών στο ίζημα	42
Εικόνα 26. Γράφημα τιμών δείκτη TRIX και χαρακτηρισμός τροφικής κατάστασης υδάτων για κάθε σταθμό δειγματοληψίας.....	43
Εικόνα 27. Διαγράμματα διασποράς περιεκτικότητας οργανικού υλικού – ποσοστού κοκκομετρικού κλάσματος < 63 μm (α), περιεκτικότητας ανθρακικών – ποσοστού κοκκομετρικού κλάσματος < 63 μm (β), περιεκτικότητας οργανικού υλικού – περιεκτικότητας ανθρακικών (γ) στο ίζημα	46

Πίνακες

Πίνακας 1. Όρια εκροής επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων, σύμφωνα με τις Αποφάσεις Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων των ΕΕΛ Καβάλας και Παληού	14
Πίνακας 2. Προτεινόμενη κλίματα χαρακτηρισμού της τροφικής κατάστασης των υδάτων (Primpas and Karydis, 2011) βάσει των τιμών του δείκτη TRIX	42
Πίνακας 3. Σύγκριση αποτελεσμάτων για τις συγκεντρώσεις νιτρικών αλάτων μεταξύ των διαφορετικών βαθών δειγματοληψίας	44
Πίνακας 4. Σύγκριση αποτελεσμάτων για τις συγκεντρώσεις νιτρικών αλάτων μεταξύ των διαφορετικών βαθών δειγματοληψίας	44
Πίνακας 5. Σύγκριση αποτελεσμάτων για τις συγκεντρώσεις φωσφορικών αλάτων μεταξύ των διαφορετικών βαθών δειγματοληψίας.....	44
Πίνακας 6. Σύγκριση αποτελεσμάτων για τις συγκεντρώσεις αμμωνιακών αλάτων μεταξύ των διαφορετικών βαθών δειγματοληψίας.....	45
Πίνακας 7. Σύγκριση αποτελεσμάτων για τις συγκεντρώσεις πυριτικών αλάτων μεταξύ των διαφορετικών βαθών δειγματοληψίας	45
Πίνακας 8. Σύγκριση αποτελεσμάτων για τις συγκεντρώσεις χλωροφύλλης-α μεταξύ των διαφορετικών βαθών δειγματοληψίας	45
Πίνακας 9. Σύγκριση αποτελεσμάτων για τις συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου μεταξύ των διαφορετικών βαθών δειγματοληψίας.....	45
Πίνακας 10. Σύγκριση αποτελεσμάτων για τις συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου μεταξύ των διαφορετικών περιοχών.....	46
Πίνακας 11. Μέσες, ελάχιστες και μέγιστες τιμές παραμέτρων που μετρήθηκαν στον Κόλπο Καβάλας, στο πλαίσιο της παρούσας και προηγούμενων εργασιών	50

Πίνακας 12. Μέσες, ελάχιστες και μέγιστες τιμές παραμέτρων που μετρήθηκαν στις θαλάσσιες περιοχές διάθεσης των ΕΕΛ Καβάλας και Παληού, στο πλαίσιο της παρούσας και προηγούμενης εργασίας..... 51

1. Εισαγωγή

1.1. Ευτροφισμός

1.1.1. Τι είναι ο ευτροφισμός και ποιες οι επιπτώσεις του στο φυσικό περιβάλλον

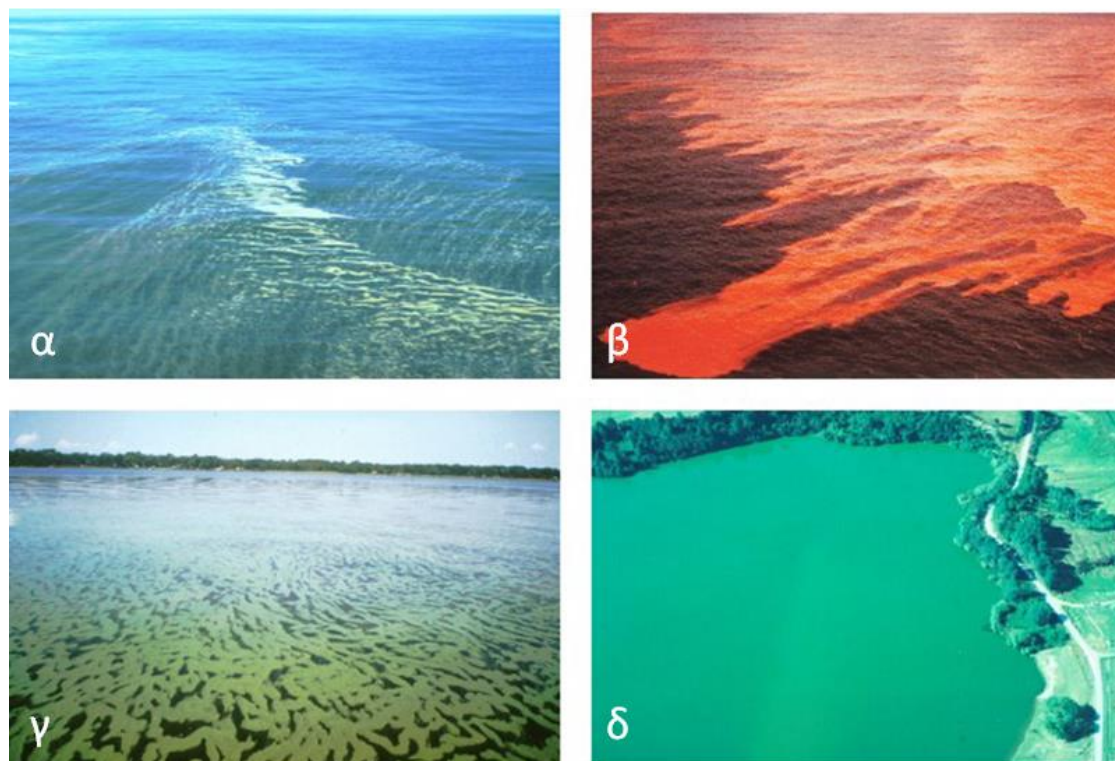
Με την έννοια του ευτροφισμού περιγράφεται η κατάσταση που βρίσκεται ένα υδατικό σύστημα, όταν σε αυτό προστίθεται μεγαλύτερη ποσότητα θρεπτικών αλάτων, κυρίως ενώσεων αζώτου (N) και φωσφόρου (P), από τη συνήθη ή από αυτή με την οποία μπορεί το οικοσύστημα να διατηρείται σε ισορροπία, με αποτέλεσμα την υπερβολική ανάπτυξη των φυτοπλακτονικών οργανισμών. Γενικά, ο ευτροφισμός είναι η αύξηση της πρωτογενούς παραγωγής, λόγω της αυξημένης προσφοράς ή διαθεσιμότητας θρεπτικών συστατικών και οι συνέπειές της (Wassmann and Olli, 2004). Το φαινόμενο του ευτροφισμού επιφέρει ανεπιθύμητες επιπτώσεις στα οικοσυστήματα, διαταράσσοντας την ισορροπία των οργανισμών και υποβαθμίζοντας την ποιότητα του νερού. Μπορεί να οδηγήσει στην οικολογική κατάρρευση του οικοσυστήματος, κυρίως λόγω ανοξίας (Δασενάκης κ.α., 2015).

Η αύξηση των εισροών αζώτου και φωσφόρου σε ένα θαλάσσιο οικοσύστημα, δύναται να προκαλέσει μια σειρά ανεπιθύμητων επιπτώσεων. Η αυξημένη ποσότητα θρεπτικών οδηγεί στην υπερβολική ανάπτυξη του φυτοπλακτού και επομένως, στην αυξημένη ποσότητα νεκρής οργανικής ύλης, η οποία καταβυθίζεται στον πυθμένα. Στη συνέχεια, προκαλούνται αλλαγές στη σύνθεση των ειδών και στη λειτουργία του θαλάσσιου τροφικού ιστού (Δασενάκης κ.α., 2015), καθώς επικρατούν τα πιο ανθεκτικά είδη. Τα δινομαστιγωτά αναπτύσσονται περισσότερο από ότι τα διάτομα (που είναι μεγαλύτερα) και αυτό προκαλεί μειωμένη θήρευση από το ζωπλαγκτόν (Δασενάκης κ.α., 2015). Η πληθυσμιακή αύξηση των πρωτογενών παραγωγών δεν μπορεί να ελεγχθεί από τους θηρευτές, με αποτέλεσμα την περίσσεια οργανικής ύλης, μέρος της οποίας παραμένει στη στήλη του νερού. Έτσι, η αυξημένη φυτική βιομάζα και η αιωρούμενη οργανική ύλη μειώνουν τη διαύγεια του νερού.

Σε αντίθεση με τα επιφανειακά ύδατα, όπου οι συγκεντρώσεις οξυγόνου είναι υψηλές, τα βαθύτερα στρώματα, ειδικά όταν υπάρχει κατακόρυφη στρωμάτωση, η οποία εμποδίζει την ανάμιξη των επιφανειακών και βαθύτερων υδάτων, χαρακτηρίζονται από χαμηλότερες συγκεντρώσεις οξυγόνου. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την απαίτηση οξυγόνου για την αποδόμηση της αυξημένης οργανικής ύλης στα ευτροφικά περιβάλλοντα, οδηγεί στην περεταίρω μείωση του διαλυμένου οξυγόνου και στη δημιουργία υποξικών ή ακόμη και ανοξικών συνθηκών. Σε περιοχές με στρωμάτωση, όπου μπορούν να δημιουργηθούν

υποξικές και ανοξικές συνθήκες, προκαλείται ο θάνατος βενθικών οργανισμών από ασφυξία (Δασενάκης κ.α., 2015) ή αλλαγές στη δομή των πλαγκτονικών και βενθικών βιοκοινωνιών (Wassmann and Olli, 2004· Δασενάκης κ.α., 2015).

Ο ευτροφισμός μπορεί, επίσης, να θεωρηθεί υπεύθυνος και για την εμφάνιση τοξικών φυτοπλαγκτονικών ανθίσεων (harmful algal blooms - HABs), δηλαδή τη ραγδαία αύξηση και συσσώρευση πληθυσμού συγκεκριμένων φυτοπλαγκτονικών οργανισμών, οι οποίοι παράγουν τοξίνες. Αυτές οι φυτοπλαγκτονικές ανθίσεις φαίνεται να συνδέονται με τον ευτροφισμό, αφού για την τόσο μεγάλη αύξηση ενός φυτοπλαγκτονικού είδους απαιτούνται αυξημένες ποσότητες θρεπτικών ουσιών. Επιπλέον, η απουσία ειδών των υψηλότερων επιπέδων της τροφικής πυραμίδας, λόγω ευτροφισμού, ενδέχεται να ευνοεί τον σχηματισμό των HABs. Ακόμη και αν η ευτροφική κατάσταση των υδάτων δεν είναι η κύρια αιτία δημιουργίας των HABs, σίγουρα επηρεάζει την ένταση και τη διάρκεια του φαινομένου (Okaichi, 1989· Granéli, 2004). Τα είδη φυτοπλαγκτού που, φυσιολογικά ή κάτω από ορισμένες περιβαλλοντικές συνθήκες, παράγουν τοξίνες είναι λιγότερα από 100 (Granéli, 2004). Πιθανές συνέπειες των φυτοπλαγκτονικών εξάρσεων είναι ο χρωματισμός των υδάτων, η δημιουργία αφρού (Δασενάκης κ.α., 2015), μαζικοί θάνατοι θαλάσσιων οργανισμών, τοξικά οστρακοειδή και ψάρια (Smith, 2003) και δηλητηριάσεις στον άνθρωπο από την κατανάλωσή τους (Granéli, 2004· Δασενάκης κ.α., 2015). Οι συνέπειες εξαρτώνται από το είδος του φυτοπλαγκτού που δημιουργεί το HAB. Για παράδειγμα, τα διάτομα κάνουν το χρώμα του νερού κιτρινοπράσινο, τα κυανοβακτήρια μπλε-πράσινο και τα δινομαστιγωτά καφεκόκκινο (ερυθρές παλίρροιες), όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.



Εικόνα 1. Φυτοπλαγκτονικές ανθίσεις σε εκβολές ποταμών και παράκτια ύδατα: α) Άνθιση Κυανοβακτηρίων στον Φινλανδικό Κόλπο στη Βαλτική Θάλασσα, β) Ερυθρή παλίρροια από άνθιση Δινομαστιγιωτών σε ακτή της Ιαπωνικής Θάλασσας, γ) Άνθιση Κυανοβακτηρίων σε εκβολή ποταμού στη Φλόριντα, δ) Μικτή άνθιση Κυανοβακτηρίων – Χλωροφύτων σε λιμνοθάλασσα στη Νέα Ζηλανδία (Paerl, 2004)

Συγκεντρωτικά, οι επιπτώσεις του ευτροφισμού είναι (Smith, 2003):

- αυξημένη παραγωγικότητα και βιομάζα φυτοπλαγκτού,
- αλλαγές στη σύνθεση των φυτοπλαγκτονικών ειδών προς είδη που σχηματίζουν HABs και μπορεί να είναι τοξικά ή να μην καταναλώνονται αποτελεσματικά από τους θηρευτές του οικοσυστήματος,
- αλλαγές στην παραγωγικότητα, τη βιομάζα και τη σύνθεση των ειδών ανώτερων υδρόβιων φυτών,
- αλλαγές στη σύνθεση των ζωικών ειδών,
- αυξημένη πιθανότητα για θανάτους σημαντικών ζωικών ειδών,
- μειωμένη αλιευτική παραγωγή των επιθυμητών ψαριών και οστρακοειδών,
- υποβάθμιση της υγείας και του μεγέθους των πληθυσμών των θαλάσσιων κοραλλιών,
- κίνδυνοι για τα απειλούμενα υδρόβια είδη,
- μείωση της διαύγειας στη στήλη του νερού,
- αλλαγές pH, κυρίως οξίνιση,
- μείωση διαλυμένου οξυγόνου στη στήλη του νερού,
- μείωση της αισθητικής αξίας του υδάτινου σώματος,

- οικονομικές συνέπειες στην αλιεία, τις υδατοκαλλιέργειες, τον τουρισμό,
- δευτερογενής ρύπανση μετάλλων

1.1.2. Παράγοντες πρόκλησης ευτροφισμού

Σημαντικό ρόλο στο πόσο ευαίσθητο είναι ένα υδάτινο σώμα στην ανάπτυξη ευτροφικών συνθηκών διαδραματίζουν η μορφολογία του και η κυκλοφορία των υδάτων σε αυτό. Συγκεκριμένα, το βάθος, η επικοινωνία με την ανοιχτή θάλασσα, η συχνότητα ανανέωσης των υδάτων και η ύπαρξη στρωμάτωσης λόγω θερμοκρασίας ή πυκνότητας είναι παράγοντες καθοριστικής σημασίας για το πόσο μπορεί να επηρεαστεί ένα υδάτινο οικοσύστημα από τον εμπλουτισμό του με θρεπτικά. Για παράδειγμα, η ισορροπία των οργανισμών σε μία ρηχή, ημίκλειστη λεκάνη, με ανεπαρκή ανανέωση υδάτων, εύκολα θα διαταρασσόταν από την εισροή θρεπτικών, τα οποία θα παρέμεναν σε αυτόν τον περιορισμένο όγκο νερού.

Η εισροή των θρεπτικών αλάτων σε ένα υδάτινο οικοσύστημα έχει συνήθως ανθρωπογενή προέλευση και σχετίζεται με τις απορρίψεις υγρών αποβλήτων σε αυτό ή με τη μεταφορά ρύπων από τη χέρσο, μέσω της απορροής των όμβριων υδάτων και των ποτάμιων ροών.

Συνοπτικά, η εισροή θρεπτικών αλάτων σε ένα θαλάσσιο οικοσύστημα γίνεται (Wassmann and Olli, 2004):

- από τη γεωργία και την κτηνοτροφία
- από τις υδατοκαλλιέργειες
- με τα βιομηχανικά απόβλητα
- με τα αστικά λύματα
- με τις ποτάμιες ροές και τη διάβρωση
- με την ατμοσφαιρική εναπόθεση

Ποσότητες θρεπτικών που περιέχονται στα λιπάσματα που χρησιμοποιούνται στη **γεωργία** μεταφέρονται μέσω της έκπλυσης των καλλιεργούμενων εδαφών στη θάλασσα. Τα αζωτούχα λιπάσματα επιβαρύνουν το υδάτινο περιβάλλον κυρίως με νιτρικά ιόντα (NO_3^-), αν και η κύρια μορφή αζώτου που προστίθεται είναι η αμμωνία (NH_3), η οποία γρήγορα οξειδώνεται σε νιτρικά από τα νιτροποιητικά βακτήρια του εδάφους (Δασενάκης κ.α., 2015). Τα φωσφορικά λιπάσματα καταλήγουν δυσκολότερα στους υδάτινους αποδέκτες, διότι ο φώσφορος στα εδάφη είναι δεσμευμένος (ως φωσφορικά σε ανόργανες και οργανικές ενώσεις ή προσροφημένος σε οξείδια και υδροξείδια, αργιλικά ορυκτά και

οργανική ύλη) και εκπλύνεται μόνο όταν υπάρξει κορεσμός των εδαφών, λόγω της υπερβολικής χρήσης των λιπασμάτων (Δασενάκης κ.α., 2015). Επίσης, τα θρεπτικά που φτάνουν στα θαλάσσια οικοσυστήματα προερχόμενα από τα απόβλητα της **κτηνοτροφίας** (κυρίως κοπριά των ζώων) είναι το άζωτο, ο φώσφορος και το κάλιο.

Κατά τη λειτουργία των εγκαταστάσεων **υδατοκαλλιέργειας** διαφεύγουν και απελευθερώνονται στο θαλάσσιο περιβάλλον θρεπτικά συστατικά, που είναι τόσο ανόργανες όσο και οργανικές ενώσεις αζώτου και φωσφόρου. Τα θρεπτικά συστατικά που παρέχονται στο υδάτινο περιβάλλον από τις υδατοκαλλιέργειες, προέρχονται κυρίως από τα υπολείμματα των τροφών και τα περιττώματα των οργανισμών (Holmer, 2004).

Τα **βιομηχανικά απόβλητα** περιέχουν ποσότητες θρεπτικών αλάτων και οργανικό φορτίο. Η σύστασή τους εξαρτάται από το είδος της βιομηχανίας. Για παράδειγμα, τα απόβλητα από εργοστάσια προϊόντων υάλου ή υπολογιστών περιέχουν πυριτικά άλατα (Δασενάκης κ.α., 2015), ενώ τα μεγάλα εργοστάσια παραγωγής τροφίμων μπορούν να απορρίψουν σημαντική ποσότητα διαλυμένου και σωματιδιακού οργανικού άνθρακα, καθώς και θρεπτικά συστατικά (Wassmann and Olli, 2004). Ποσότητες φωσφορικών αλάτων (PO_4^{3-}) μπορεί να περιέχονται στα εξειδικευμένα απορρυπαντικά βιομηχανικής χρήσης και να καταλήγουν στο υδάτινο περιβάλλον με τα υγρά απόβλητα των εργοστασίων. Επίσης, η παρουσία νιτρικών ιόντων (NO_2^-) σε φυσικά νερά είναι ένδειξη ρύπανσης από βιομηχανικά απόβλητα (Δασενάκης κ.α., 2015).

Τα **αστικά λύματα** περιέχουν θρεπτικά συστατικά, κυρίως νιτρικό άζωτο (NO_3-N), αμμωνιακό άζωτο (NH_4-N), φωσφορικά (PO_4), αλλά και οργανική ύλη, κατά την αποσύνθεση της οποίας απελευθερώνονται κι άλλα θρεπτικά. Τα αμμωνιακά ιόντα είναι ιδιαίτερα επιβλαβή για τους υδρόβιους οργανισμούς, ενώ συνεισφέρουν και στην κατανάλωση οξυγόνου, καθώς εύκολα οξειδώνονται σε νιτρικά ιόντα (Δασενάκης κ.α., 2015). Στις Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων πραγματοποιείται βιολογική επεξεργασία για την απομάκρυνση του αζώτου. Λίγες, όμως, είναι οι ΕΕΛ που διαθέτουν μονάδα αποφωσφόρωσης. Η διάθεση ανεπεξέργαστων αστικών λυμάτων σε υδάτινους αποδέκτες και στη θάλασσα μεταφέρει μεγάλες ποσότητες θρεπτικών και οργανικού φορτίου.

Οι **ποταμοί** και τα εποχιακά ρέματα μεταφέρουν στη θάλασσα τόσο τους ρύπους από τη λεκάνη απορροής τους, όσο και τα προϊόντα της **διάβρωσης** που προκαλεί η ροή τους. Η περιεκτικότητα των ρύπων σε θρεπτικά εξαρτάται από το είδος των ανθρώπινων

δραστηριοτήτων εντός της λεκάνης απορροής. Σημειώνεται ότι η ανθρωπογενής συνεισφορά στον εμπλουτισμό του θαλάσσιου περιβάλλοντος με πυριτικά άλατα (SiO_4^{4-}) είναι σχεδόν αμελητέα σε σύγκριση με το πυρίτιο, που προέρχεται από φυσικές πηγές, δηλαδή τη διάβρωση – αποσάθρωση των χερσαίων πετρωμάτων (Δασενάκης κ.α., 2015). Ομοίως, ο φώσφορος, μεγαλύτερη δεξαμενή του οποίου αποτελούν τα φωσφορικά πετρώματα, εισέρχεται φυσικά στο θαλάσσιο περιβάλλον από την διάβρωση των πετρωμάτων, μεταφερόμενος από τους ποταμούς και άλλα επιφανειακά ύδατα (Δασενάκης κ.α., 2015).

Τα θρεπτικά συστατικά που εισρέουν στο υδάτινο περιβάλλον μέσω **απόθεσης από την ατμόσφαιρα** είναι το άζωτο και ο φώσφορος. Η ατμοσφαιρική εναπόθεση φωσφόρου είναι αμελητέα σε σχέση με τις ποσότητες φωσφόρου που παρέχονται από άλλες πηγές. Η εισροή αζώτου από την ατμόσφαιρα, όμως, είναι σημαντική, καθώς αποτελεί μεγάλο ποσοστό των συνολικών εισροών αζώτου στα θαλάσσια οικοσυστήματα, ειδικά κατά τη θερινή περίοδο. (Frohn and Hertel, 2004)

Οι πηγές θρεπτικών συστατικών μπορεί να είναι σημειακές, όπως οι εκροές βιομηχανικών και αστικών αποβλήτων ή μη σημειακές, όπως η απόπλυση της γεωργικής γης. Οι σημειακές πηγές, σε σύγκριση με τις μη σημειακές, εντοπίζονται, παρακολουθούνται και περιορίζονται ευκολότερα.

Σε συνδυασμό με τον εμπλουτισμό των υδάτων με θρεπτικά άλατα, η κλιματική αλλαγή εντείνει την εμφάνιση ευτροφισμού (Rodgers, 2021). Σε ένα υδάτινο περιβάλλον που δέχεται μεγάλες ποσότητες θρεπτικών, οι συνέπειες της κλιματικής αλλαγής συχνά δημιουργούν ευνοϊκές συνθήκες για την υπέρμετρη ανάπτυξη φυτοπλαγκτονικών οργανισμών. Πιο συγκεκριμένα, η κλιματική αλλαγή προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας και της στάθμης της θάλασσας, επιφέρει μεταβολές στην ένταση και τη συχνότητα των βροχοπτώσεων και των ανέμων, άρα και μεταβολές στις εισροές γλυκού νερού, με αποτέλεσμα να διαταράσσεται η αναλογία των θρεπτικών (Si:N:P) και να μεταβάλλονται οι συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου και αλατότητας, κυρίως στα υδάτινα οικοσυστήματα των παράκτιων περιοχών. Κατά τη διάρκεια των δύο τελευταίων δεκαετιών, ο ανθρωπογενής ευτροφισμός σε συνδυασμό με την κλιματική αλλαγή έχει τονώσει την εμφάνιση, τη σοβαρότητα και τη γεωγραφική έκταση των επιβλαβών φυτοπλαγκτονικών ανθίσεων, που δυνητικά περιλαμβάνουν τοξικά είδη (Tsikoti and Genitsaris, 2021).

Σημειώνεται ότι, αν και συνήθως ο όρος «ευτροφισμός» χρησιμοποιείται αποκλειστικά για την περιγραφή των συνεπειών της εισροής θρεπτικών συστατικών με ανθρωπογενή προέλευση (Wassmann and Olli, 2004), υπάρχει και ο **φυσικός ευτροφισμός**, ο οποίος σχετίζεται με τη μεταβολή των περιβαλλοντικών συνθηκών στο πέρασμα των χρόνων. Σε αντίθεση με τον **ανθρωπογενή ευτροφισμό**, στην περίπτωση του φυσικού ευτροφισμού το οικοσύστημα δεν διαταράσσεται, αλλά εξελίσσεται και προσαρμόζεται ομαλά στις μεταβαλλόμενες τροφικές συνθήκες.

1.1.3. Παράκτιες περιοχές

Στις παράκτιες περιοχές και ειδικά σε κλειστούς κόλπους είναι πολύ αυξημένος ο κίνδυνος δημιουργίας ευτροφικών συνθηκών, λόγω του μεγαλύτερου χρόνου ανανέωσης των υδάτων τους, αλλά και της έντονης επίδρασης των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων, που αυτές δέχονται, ιδιαίτερα όταν βρίσκονται κοντά σε αστικά κέντρα (Δασενάκης κ.α., 2015). Η γεωργική και αστική ανάπτυξη στις παράκτιες λεκάνες απορροής έχει ως αποτέλεσμα τις αυξημένες εκφορτώσεις ρύπων στα παράκτια οικοσυστήματα, τα οποία υποβαθμίζονται (Paerl, 2004). Τα μορφολογικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά των παράκτιων ζωνών είναι οι καθοριστικοί παράγοντες εκδήλωσης ευτροφισμού, που προκαλείται από τις μεγάλες ποσότητες αζώτου ή/και φωσφόρου, σε σχέση με το φορτίο πυριτικών αλάτων, που εισέρχονται στη θάλασσα με τις ποτάμιες ροές (Garnier et al., 2021).

Ακόμη και στη Μεσόγειο Θάλασσα, η οποία χαρακτηρίζεται ως ολιγοτροφική, με χαμηλή βιομάζα φυτοπλαγκτού και πρωτογενή παραγωγή, οι παράκτιες περιοχές με υψηλή πληθυσμιακή πυκνότητα, υφίστανται πολυάριθμες περιβαλλοντικές πιέσεις και απειλούνται από τον ευτροφισμό (Tsikoti and Genitsaris, 2021). Συγκεκριμένα, στην Ελλάδα, που η ιδιαίτερη μορφολογία των ακτών της περιλαμβάνει μεγάλο αριθμό κλειστών και ημίκλειστων κόλπων, έχουν καταγραφεί HABs, ενώ ειδικότερα στον Κόλπο Καβάλας έχουν εμφανιστεί τέτοιου είδους ανθίσεις κατά τα έτη 1978, 1986, 1993 και μέσα στο διάστημα των ετών 2000 – 2004 (Tsikoti and Genitsaris, 2021).

Σχετικά με τη μελέτη των παράκτιων τροφικών διαταραχών, έχει διαπιστωθεί ότι, ενώ τα παράκτια θαλάσσια συστήματα μπορεί συχνά να είναι υδρολογικά και χωρικά περίπλοκα, η βιομάζα του φυτοπλαγκτού σε αυτά τείνει να ανταποκρίνεται προβλέψιμα στις αλλαγές των συγκεντρώσεων αζώτου και φωσφόρου. Αυτό σημαίνει ότι οι προσπάθειες διαχείρισης των εισροών θρεπτικών συστατικών στη θάλασσα θα οδηγούσαν σε σημαντικές βελτιώσεις της ποιότητας των υδάτων της παράκτιας ζώνης. (Smith, 2003)

1.1.4. Προσδιορισμός τροφικής κατάστασης - Δείκτες τροφικής κατάστασης

Ένα θαλάσσιο οικοσύστημα βρίσκεται σε καλή τροφική κατάσταση όταν:

- δεν διαταράσσονται οι αναλογίες των θρεπτικών αλάτων μεταξύ τους (πυρίτιο, άζωτο, φώσφορος)
- τα επίπεδα των ενώσεων αζώτου και φωσφόρου δεν επιταχύνουν την πρωτογενή παραγωγή
- δεν υπάρχει περίσσεια οργανικού φορτίου και αιωρούμενων φυκών
- η διαύγεια του νερού είναι ικανοποιητική και επιτρέπει τη φυσική διαδικασία της φωτοσύνθεσης
- δεν αυξάνεται η συγκέντρωση της χλωροφύλλης στην υδάτινη στήλη
- δεν μειώνεται η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου, το περιβάλλον είναι καλά οξυγονωμένο, δεν υπάρχουν υποξικές ή ανοξικές συνθήκες
- τα θρεπτικά συστατικά παραμένουν σε χαμηλά ή μέτρια επίπεδα και εμποδίζονται τα φαινόμενα ευτροφισμού
- η χλωρίδα του θαλάσσιου περιβάλλοντος δεν διαταράσσεται, ώστε να μεταβληθεί η αναλογία διατόμων προς δινομαστιγωτά ή να προκληθούν επεισόδια έξαρσης (algal blooms)
- το οικοσύστημα διατηρεί την ισορροπία του, τη βιοποικιλότητά του και την ποιότητά του

(Δασενάκης κ.α., 2015)

Ένα εργαλείο που έχει αναπτυχθεί για τον προσδιορισμό της τροφικής κατάστασης των υδάτων είναι οι **δείκτες ευτροφισμού** ή **δείκτες τροφικής κατάστασης**. Είναι βασισμένοι σε εκτιμήσεις και έρευνες του φυσικού περιβάλλοντος και αποτελούν μαθηματικές σχέσεις, οι οποίες λαμβάνουν υπόψη τη θερμοκρασία, το pH, τις συγκεντρώσεις θρεπτικών, χλωροφύλλης, διαλυμένου οξυγόνου, αιωρούμενων στερεών κ.α.. Για κάθε δείκτη αναπτύσσεται μια κλίμακα αναφοράς, σύμφωνα με την οποία εκτιμάται η τροφική κατάσταση ενός οικοσυστήματος, ανάλογα με την τιμή που προκύπτει από τον υπολογισμό του δείκτη. Στις κλίμακες ευτροφισμού, η συχνότερη κατηγοριοποίηση περιλαμβάνει την εξαιρετικά ολιγοτροφική, την ολιγοτροφική, τη μεσοτροφική, την ευτροφική και την υπερτροφική κατάσταση.

1.2. Βιολογικοί Καθαρισμοί

1.2.1. Λειτουργία

Η λειτουργία των Βιολογικών Καθαρισμών βασίζεται στην επεξεργασία των υγρών αποβλήτων κυρίως με φυσικές και βιολογικές διεργασίες, με τον περιορισμό των χημικών διεργασιών όσο αυτό είναι δυνατό. Σκοπός των μονάδων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων είναι να υποστηρίζεται και να επιταχύνεται η φυσική διαδικασία αποδόμησης των αποβλήτων, παρέχοντας τις κατάλληλες συνθήκες, όπως τον κατάλληλο χώρο, χρόνο και ποσότητα οξυγόνου. Τα χαρακτηριστικά των λυμάτων που εκμεταλλεύεται η λειτουργία των Βιολογικών Καθαρισμών είναι οι φυσικές ιδιότητές τους και οι μικροοργανισμοί που περιέχονται σε αυτά. Χημικές ουσίες προστίθενται όταν η απομάκρυνση συγκεκριμένων ρύπων δεν είναι δυνατή με τη βιολογική επεξεργασία. Η προσθήκη χημικών εξαρτάται από τη φύση (αστικά λύματα, βιομηχανικά απόβλητα κ.λπ.) και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των υγρών αποβλήτων, ανά περίπτωση.

Τα στάδια επεξεργασίας των λυμάτων συνήθως αναφέρονται ως πρωτοβάθμια, δευτεροβάθμια και τριτοβάθμια επεξεργασία. Μέχρι δευτέρου βαθμού επεξεργασία πραγματοποιείται σε όλες σχεδόν τις Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ), ενώ η τριτοβάθμια επεξεργασία σε κάποιες από αυτές. Το στάδιο της επεξεργασίας καθορίζεται από την απαιτούμενη ποιότητα του τελικού επεξεργασμένου νερού, ανάλογα με το που ή για ποιο σκοπό θα διατεθεί. Ο σχεδιασμός, το είδος των μονάδων επεξεργασίας και η σειρά των διεργασιών διαφέρουν για κάθε ΕΕΛ. Παρακάτω, γίνεται μια σύντομη περιγραφή της συνηθέστερης γραμμής επεξεργασίας, που επιλέγεται για τις περισσότερες ΕΕΛ μεγάλων οικισμών και πόλεων.

Αρχικά, το σύνολο των λυμάτων υφίσταται **Προεπεξεργασία**, η οποία περιλαμβάνει την Εσχάρωση, με την οποία αφαιρούνται τα μεγαλύτερα στερεά που βρίσκονται στα λύματα, αλλά και πολλές φορές τις μονάδες Εξάμμωσης και Λιποσυλλογής, για την απομάκρυνση της άμμου και των λιπών, αντίστοιχα. Στη συνέχεια, τα λύματα οδηγούνται στη **Δεξαμενή Πρωτοβάθμιας Καθίζησης** για την περαιτέρω απομάκρυνση στερεών, η οποία διαθέτει διάταξη αφαίρεσης των επιπλεόντων και σύστημα υπερχείλισης του διαυγασμένου νερού. Τα στερεά που καθιζάνουν στον πυθμένα της δεξαμενής αποτελούν την πρωτοβάθμια ιλύ, με την απομάκρυνση της οποίας αφαιρείται μεγάλο μέρος του αρχικού ρυπαντικού φορτίου. Έτσι, ολοκληρώνεται το στάδιο της πρωτοβάθμιας επεξεργασίας.

Το κύριο στάδιο της βιολογικής επεξεργασίας αποτελεί τη δευτεροβάθμια επεξεργασία. Σε αυτό, τα βακτήρια που περιέχονται στα λύματα, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες,

επιτυγχάνουν την απομάκρυνση του οργανικού άνθρακα, του αζώτου και σε κάποιες ΕΕΛ και του φωσφόρου. Βασική μονάδα των ΕΕΛ είναι η **Δεξαμενή Αερισμού**, όπου σε συνθήκες άφθονου οξυγόνου και τροφής, τα αερόβια βακτήρια πολλαπλασιάζονται και αποικοδομούν τους οργανικούς ρύπους. Η παραγόμενη βιομάζα ονομάζεται **ενεργός ιλύς**. Επίσης, με την προσφορά οξυγόνου, τα νιτροποιητικά βακτήρια μετατρέπουν το αμμωνιακό άζωτο ($\text{NH}_4\text{-N}$) σε νιτρικό ($\text{NO}_3\text{-N}$), ενώ σε ανοξικές συνθήκες τα αναερόβια βακτήρια καταναλώνουν το οξυγόνο των νιτρικών, τα οποία μετατρέπονται σε αέριο άζωτο, που απελευθερώνεται στη ατμόσφαιρα. Για τη βιολογική απομάκρυνση φωσφόρου, απαιτούνται αναερόβιες συνθήκες για την ανάπτυξη των μικροοργανισμών συσσώρευσης πολυφωσφορικών και αερόβιες συνθήκες, ώστε τα βακτήρια που παράχθηκαν να αυξήσουν την κατανάλωση φωσφόρου. Τελικά, ο φώσφορος απομακρύνεται με την ενεργό ιλύ. Ανάλογα με το σύστημα επεξεργασίας που επιλέγεται και μπορεί να περιλαμβάνει μία δεξαμενή με αερόβιες, αναερόβιες και ανοξικές ζώνες, διαφορετικές δεξαμενές με αντίστοιχες λειτουργίες ή αντιδραστήρα διαλείποντος έργου με διαδοχικές φάσεις λειτουργίας, πραγματοποιείται συνδυασμένη απομάκρυνση του οργανικού φορτίου, του αζώτου και του φωσφόρου (σπανιότερα). Μετά τη Δεξαμενή Αερισμού, ακολουθεί **Δεξαμενή Δευτεροβάθμιας Καθίζησης**, όπου καθιζάνει η ιλύς και προκύπτει ακόμη καθαρότερο διαυγασμένο νερό.

Η τριτοβάθμια επεξεργασία περιλαμβάνει πολύ συχνά την **απολύμανση** του επεξεργασμένου νερού με χλωρίωση ή/και με υπεριώδη ακτινοβολία (λάμπες UV). Σπανιότερα περιλαμβάνει **προσθήκη χημικών** για την περαιτέρω απομάκρυνση θρεπτικών, όπως ο φώσφορος, αλλά και **μονάδα διήθησης** με φίλτρα άμμου για την ελαχιστοποίηση των αιωρούμενων στερεών, τη βελτίωση των χαρακτηριστικών του επεξεργασμένου νερού ή την απομάκρυνση επίμονων ρύπων.

Τέλος, η λάσπη που προκύπτει από την πρωτοβάθμια καθίζηση και μέρος αυτής που προκύπτει από τη δευτεροβάθμια καθίζηση, επεξεργάζεται ανάλογα με το που θα διατεθεί. Συνήθως, πραγματοποιείται **πάχυνση**, για την απομάκρυνση του μεγαλύτερου μέρους της υγρασίας, **σταθεροποίηση** για καταστροφή των παθογόνων μικροοργανισμών με αερόβια ή αναερόβια χώνευση και **αφυδάτωση** της ιλύος σε κλίνες ξήρανσης ή φυγοκεντρική. Η ιλύς, μετά την επεξεργασία της, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό.

1.2.2. Κίνδυνοι για το φυσικό περιβάλλον

Γενικά, η κατασκευή βιολογικών καθαρισμών για την επεξεργασία των αστικών λυμάτων και των υγρών αποβλήτων των βιομηχανικών μονάδων ωφελεί το φυσικό περιβάλλον, καθώς έτσι, περιορίζεται η διάθεση των ανεπεξέργαστων αποβλήτων σε αυτό. Η ανεξέλεγκτη διάθεση υγρών αποβλήτων, χωρίς καμία επεξεργασία, αποτελεί έναν από τους βασικότερους παράγοντες υποβάθμισης του φυσικού περιβάλλοντος. Σύμφωνα με την ΚΥΑ 5673/400/1997 (ΦΕΚ 192/Β/14-03-1997), η οποία ενσωμάτωσε την Οδηγία 91/271/ΕΟΚ «για την επεξεργασία των αστικών λυμάτων», η συλλογή και επεξεργασία (τουλάχιστον δευτεροβάθμια) των αστικών λυμάτων οικισμών με ισοδύναμο πληθυσμό μεγαλύτερο των 10.000 κατοίκων (οικισμοί Β' προτεραιότητας) είναι υποχρεωτική από το τέλος του 2005, ενώ το ίδιο ισχύει για τους οικισμούς με ισοδύναμο πληθυσμό μεγαλύτερο των 2.000 κατοίκων (οικισμοί Γ' προτεραιότητας), μόνο όταν η διάθεση των επεξεργασμένων λυμάτων γίνεται σε γλυκά νερά και εκβολές ποταμών.

Οι κίνδυνοι για το φυσικό περιβάλλον μειώνονται δραματικά, όταν πραγματοποιείται επεξεργασία των λυμάτων και στη συνέχεια, αυτά διατίθενται απαλλαγμένα από το μεγαλύτερο μέρος του ρυπαντικού τους φορτίου. Αστοχίες στον σχεδιασμό των ΕΕΛ, βλάβες στη λειτουργία τους ή ανεπαρκής παρακολούθησή τους δύνανται να επιβαρύνουν το φυσικό περιβάλλον. Οι κίνδυνοι συνοψίζονται στους εξής:

- Μεταφορά αιωρούμενων στερεών, οργανικού φορτίου και θρεπτικών αλάτων στο υδάτινο περιβάλλον, λόγω ανεπαρκούς απομάκρυνσής τους
- Μεταβολή των αναλογιών N:P, Si:N, and Si:P στο υδάτινο περιβάλλον, άρα και αλλαγή στη δομή των βιοκοινωνιών των πρωτογενών παραγωγών (Melidis and Sylaios, 2017)
- Απελευθέρωση παθογόνων μικροοργανισμών στο φυσικό περιβάλλον, λόγω ανεπαρκούς απολύμανσης
- Διάθεση μέρους ή του συνόλου της παροχής χωρίς επεξεργασία, λόγω βλάβης ή αδυναμίας πρόβλεψης της αύξησης (εποχικής ή μη) του πληθυσμού κατά το σχεδιασμό
- Ρύπανση με βαρέα μέταλλα (Stamatis et al., 2006), των οποίων η απομάκρυνση δεν προβλέπεται στην επεξεργασία
- Μεταφορά φορτίου μικρορύπων στο φυσικό περιβάλλον (Melidis and Sylaios, 2017), των οποίων η απομάκρυνση δεν προβλέπεται στην επεξεργασία
- Εκροή επεξεργασμένου νερού με τιμή pH εκτός των προβλεπόμενων ορίων
- Υποβάθμιση της ποιότητας του νερού, των ιζημάτων και της βενθικής χλωρίδας και πανίδας (Melidis and Sylaios, 2017)

1.3. Μελετώμενοι Βιολογικοί Καθαρισμοί

1.3.1. Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων Καβάλας

Η Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) Καβάλας, η οποία εξυπηρετεί την πόλη της Καβάλας και τους οικισμούς Νέας Καρβάλης και Χαλκερού, κατασκευάστηκε και λειτουργεί από τον Απρίλιο του 1990. Μετά τα έργα επέκτασης και βελτίωσης της ΕΕΛ, που ολοκληρώθηκαν το 2008, η επεξεργασία των λυμάτων που πραγματοποιείται είναι τριτοβάθμια. Σήμερα η δυναμικότητα της εγκατάστασης είναι 96.000 ι.κ., ενώ ο πληθυσμός αιχμής που εξυπηρετεί είναι 80.000 κάτοικοι (ΕΓΥ). Η συνολική εισερχόμενη παροχή λυμάτων στην ΕΕΛ ανέρχεται σε 13.500 m³/d κατά μέσο όρο, ενώ η εγκατάσταση δεν δέχεται επιπρόσθετη παροχή βοθρολυμάτων (ΕΓΥ).

Η γραμμή επεξεργασίας των λυμάτων περιλαμβάνει πρωτοβάθμια και δευτεροβάθμια επεξεργασία με απομάκρυνση αζώτου, βιολογική απομάκρυνση φωσφόρου, απολύμανση με υπεριώδη ακτινοβολία και τριτοβάθμια επεξεργασία με χρήση φίλτρων άμμου. Ταυτόχρονα πραγματοποιείται επεξεργασία της παραγόμενης ιλύος που περιλαμβάνει πάχυνση, σταθεροποίηση και αφυδάτωση αυτής. Η διάθεση των επεξεργασμένων λυμάτων γίνεται με υποθαλάσσιο αγωγό μήκους 845 m σε βάθος 20 m περίπου (ΑΕΠΟ) στον κόλπο της Άσπρης Άμμου. Σύμφωνα με την παρακολούθηση τήρησης των απαιτούμενων ορίων εκροής από το 2011, τα όρια δεν ικανοποιούνταν μόνο κατά τα έτη 2016-2018 (ΕΓΥ). Ο σχετικός έλεγχος των απαιτήσεων συμμόρφωσης που αναφέρεται στη Βάση Δεδομένων Παρακολούθησης Λειτουργίας των ΕΕΛ της Ειδικής Γραμματείας Υδάτων περιλαμβάνει τις τιμές του βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου (BOD₅), του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (COD) και των ολικών αιωρούμενων στερεών (TSS) στα επεξεργασμένα λύματα.



Εικόνα 2. Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων Καβάλας (ΕΓΥ)

1.3.2. Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων Παληού

Η ΕΕΛ Παληού, η οποία εξυπηρετεί μόνο τον οικισμό του Παληού του Δήμου Καβάλας, κατασκευάστηκε και λειτουργεί από τον Ιούλιο του 1998. Η επεξεργασία των λυμάτων που πραγματοποιείται είναι δευτεροβάθμια. Η δυναμικότητα της εγκατάστασης είναι 12.000 ι.κ., ενώ ο πληθυσμός αιχμής που εξυπηρετεί είναι 4.500 κάτοικοι (ΕΓΥ). Η συνολική εισερχόμενη παροχή λυμάτων στην ΕΕΛ ανέρχεται σε 1.200 m³/d κατά μέσο όρο, ενώ η εγκατάσταση δεν δέχεται επιπρόσθετη παροχή βοθρολυμάτων (ΕΓΥ).

Η γραμμή επεξεργασίας των λυμάτων περιλαμβάνει προεπεξεργασία και δευτεροβάθμια επεξεργασία με απομάκρυνση αζώτου, βιολογική και χημική απομάκρυνση φωσφόρου. Ταυτόχρονα πραγματοποιείται επεξεργασία της παραγόμενης ιλύος που περιλαμβάνει πάχυνση και αφυδάτωση αυτής. Η διάθεση των επεξεργασμένων λυμάτων γίνεται με υποθαλάσσιο αγωγό μήκους 1.300 m σε βάθος 30 m περίπου στα ανατολικά του κόλπου Παλαιού. Σύμφωνα με την παρακολούθηση τήρησης των απαιτούμενων ορίων εκροής από το 2009, τα όρια ικανοποιούνται καθ' όλη τη διάρκεια αυτών των ετών. Ο σχετικός έλεγχος των απαιτήσεων συμμόρφωσης που αναφέρεται στη Βάση Δεδομένων Παρακολούθησης Λειτουργίας των ΕΕΛ της Ειδικής Γραμματείας Υδάτων περιλαμβάνει τις τιμές του βιοχημικά

απαιτούμενου οξυγόνου (BOD_5), του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (COD) και των ολικών αιωρούμενων στερεών (TSS) στα επεξεργασμένα λύματα.



Εικόνα 3. Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων Παλιού (Google Earth)

1.3.3. Οριακές τιμές εκπομπής ρυπαντικών φορτίων και συγκεντρώσεων

Οι οριακές τιμές που καθορίζονται για την εκροή κάθε Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων αποτελούν τις ανώτατες τιμές συγκέντρωσης συγκεκριμένων παραμέτρων, η τήρηση των οποίων είναι απαραίτητη για τη διατήρηση της ποιότητας του φυσικού περιβάλλοντος. Ορίζονται σύμφωνα με τη σχετική νομοθεσία, ανάλογα με το είδος της διάθεσης και του αποδέκτη και συχνά σε συνδυασμό με οικίες Νομαρχιακές Αποφάσεις ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες κάθε περιοχής. Τα όρια, όπως έχουν αποφασιστεί, αναφέρονται στις ισχύουσες Αποφάσεις Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων (ΑΕΠΟ) κάθε έργου. Τα ισχύοντα όρια διάθεσης για τις ΕΕΛ της Καβάλας και του Παλιού δίνονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Όρια εκροής επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων, σύμφωνα με τις Αποφάσεις Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων των ΕΕΛ Καβάλας και Παλιού

Παράμετρος	ΕΕΛ Καβάλας *	ΕΕΛ Παλιού **
Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD_5)	< 25 mg/l	< 20 mg/l
Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD)		< 60 mg/l
Αιωρούμενα στερεά	< 35 mg/l	< 25 mg/l
Ολικό άζωτο	< 15 mg/l	< 10 mg/l
Αμμωνιακό άζωτο	< 2 mg/l	≤ 2 mg/l
Ολικός φώσφορος		< 5 mg/l

Παράμετρος	ΕΕΛ Καβάλας *	ΕΕΛ Παληού **
Επιπλέοντα στερεά	0 mg/l	0 mg/l
Λίπη – Έλαια	0 mg/l	≤ 0,1 mg/l
Κολοβακτηρίδια περιττωμάτων	< 100/100 ml	
Ολικά κολοβακτηριοειδή	< 500/100 ml	

* ΑΕΠΟ με ΑΠ 3225/26-09-2003

** Ανανέωση - Τροποποίηση ΑΕΠΟ με ΑΠ οικ.95535/21-01-2011 (ΑΔΑ: 4ΑΛΕ0-Φ)

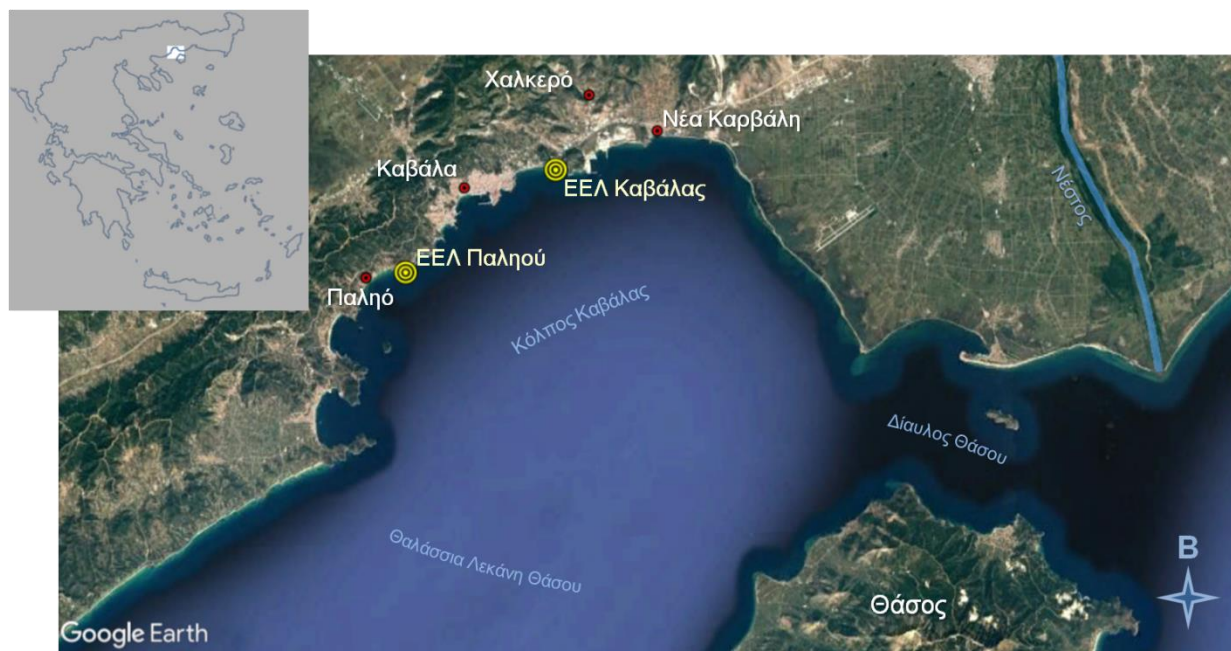
Σημειώνεται ότι, οι παράμετροι BOD₅ και COD χρησιμοποιούνται στον έλεγχο της ποιότητας των υδάτων, για τον προσδιορισμό του οργανικού φορτίου. Το BOD₅ αντιστοιχεί στο βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο, δηλαδή την ποσότητα διαλυμένου οξυγόνου που θα καταναλώναν οι μικροοργανισμοί για την αποδόμηση της οργανικής ύλης (υπολογισμένο σε πέντε ημέρες πειράματος). Το COD αντιστοιχεί στο χημικά απαιτούμενο οξυγόνο, δηλαδή την ποσότητα διαλυμένου οξυγόνου που θα καταναλωνόταν για την πλήρη χημική οξείδωση της οργανικής ύλης.

1.4. Περιοχή μελέτης

1.4.1. Γενική περιγραφή

Ο Κόλπος Καβάλας αποτελεί την ευρύτερη περιοχή μελέτης, καθώς η υποθαλάσσια διάθεση των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων της Καβάλας και του Παληού γίνεται εντός του κόλπου, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4. Ο Κόλπος Καβάλας βρίσκεται στο Βόρειο Αιγαίο και καταλαμβάνει την περιοχή από τον Όρμο Ελευθερών δυτικά έως και τον Όρμο Κεραμωτής στα ανατολικά.

Ο Κόλπος Καβάλας καλύπτει συνολική έκταση $461,155 \times 10^6 \text{ m}^2$ και μήκος ακτών 62.805 m. Αποτελεί τη δεύτερη σε μέγεθος ημίκλειστη λεκάνη του Θρακικού Πελάγους, μετά τον Στρυμονικό Κόλπο, η οποία επικοινωνεί με το ανοικτό Βόρειο Αιγαίο Πέλαγος ανατολικά μέσω του διαύλου της Θάσου και δυτικά μέσω της θαλάσσιας λεκάνης της Θάσου. Η γεωστροφική κυκλοφορία στο Βόρειο Αιγαίο Πέλαγος είναι κυκλωνική (αντι-ωρολογιακή), με αποτέλεσμα η είσοδος των υδάτινων μαζών στον Κόλπο Καβάλας να γίνεται κυρίως από τον δίαυλο Θάσου και η έξοδός τους από τη θαλάσσια λεκάνη Θάσου, δημιουργώντας μία συνεχή ροή που συμβάλλει στην ανανέωση των υδάτων του Κόλπου. (Συλαίος κ.α., 2004)

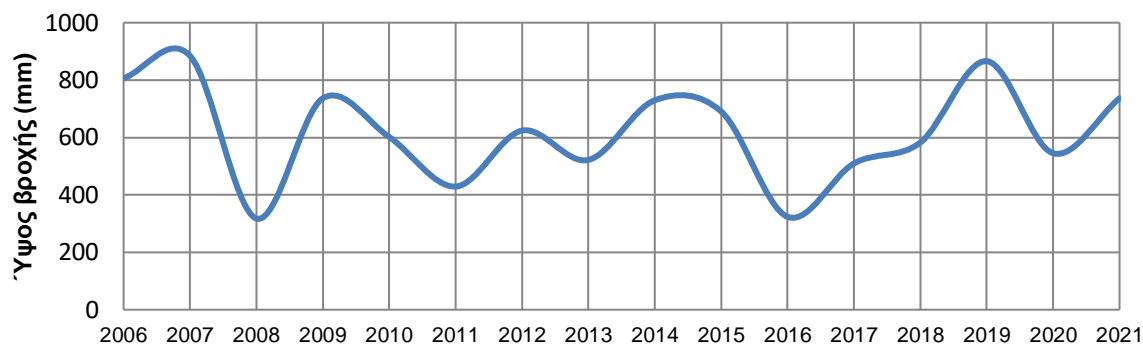


Εικόνα 4. Χάρτης περιοχής μελέτης

1.4.2. Κλιματικές συνθήκες

Το κλίμα της υπό μελέτη περιοχής χαρακτηρίζεται ως ενδιάμεσο μεταξύ μεσογειακού και ηπειρωτικού τύπου (Μαριολόπουλος, 1982), με μέτριες βροχοπτώσεις, ψυχρούς χειμώνες και ξηρές καλοκαιρινές περιόδους. Σύμφωνα με μετρήσεις ιδιωτικού μετεωρολογικού σταθμού της Καβάλας στην περιοχή της Δεξαμενής (Meteokan), κατά τα έτη 2006 έως 2021, η μέση χειμερινή θερμοκρασία είναι $7,9^{\circ}\text{C}$, ενώ η μέση θερινή $25,8^{\circ}\text{C}$. Οι χαμηλότερες και υψηλότερες μέσες τιμές τις θερμοκρασίας παρατηρούνται τον Ιανουάριο ($4,3^{\circ}\text{C}$) και τον Αύγουστο ($30,6^{\circ}\text{C}$), αντίστοιχα. Τους ίδιους μήνες έχουν καταγραφεί και οι απόλυτες ελάχιστες και μέγιστες θερμοκρασιακές τιμές που αντιστοιχούν σε $-8,6^{\circ}\text{C}$ (Ιανουάριος 2017) και $38,9^{\circ}\text{C}$ (Αύγουστος 2021).

Η μέση ετήσια βροχόπτωση για τη περίοδο 2006 – 2021 ήταν 619,1 mm, ενώ η ελάχιστη και μέγιστη ετήσια βροχόπτωση ήταν 317,6 (έτος 2008) και 884,6 (έτος 2007), αντίστοιχα. Παρατηρείται σημαντική εποχιακή διακύμανση των βροχοπτώσεων, με 230.3 mm βροχής συνολικά κατά την ξηρή περίοδο (Απρίλιος – Σεπτέμβριος) και 388.8 mm κατά την υγρή περίοδο του έτους (Οκτώβριος – Μάρτιος). Στην Εικόνα 5 φαίνεται η συνολική βροχόπτωση κάθε έτους.



Εικόνα 5. Διάγραμμα ετήσιων βροχοπτώσεων στην περιοχή της Καβάλας για την περίοδο 2006 – 2021 (πηγή δεδομένων: Meteokan)

Οι ανατολικοί και βορειοδυτικοί άνεμοι κυριαρχούν κατά τη χειμερινή περίοδο, με συχνότητες 7% και 10%, αντίστοιχα, ενώ κατά τη θερινή περίοδο οι διευθύνσεις των ανέμων αλλάζουν σε νότιες (4,7%) και νοτιοδυτικές (8,3%) (Sylaios et al., 2005). Στον Κόλπο Καβάλας το μέσο ημι-ημερήσιο παλιρροιακό εύρος κυμαίνεται μεταξύ 0,12 m και 0,30 m (Sylaios et al., 2012).

1.4.3. Μορφολογία βυθού και γεωλογία Κόλπου Καβάλας

Το μέσο βάθος του Κόλπου Καβάλας είναι 32 m, ενώ το μέγιστο φτάνει τα 60 m και απαντάται στη θαλάσσια λεκάνη της Θάσου. Ο βυθός του κόλπου είναι γενικά ομαλός, με μικρή κλίση ($0,2^\circ$) ιδιαίτερα στο βόρειο και ανατολικό τμήμα, η οποία αυξάνεται πλησιάζοντας προς την ακτή ($2,4^\circ$). Η ανατολική παράκτια ζώνη του κόλπου είναι επίπεδη, χωρίς ανάγλυφο και καλύπτεται από προσχώσεις του Ποταμού Νέστου, ο οποίος εκβάλλει περίπου 13 km ανατολικά του κόλπου. (Συλαίος κ.α., 2004)

Η ευρύτερη περιοχή ανήκει στη γεωτεκτονική ζώνη της μάζας της Ροδόπης, η οποία περιλαμβάνει κρυσταλλοσχιστώδη και πυριγενή πετρώματα. Συγκεκριμένα, στη δυτική παράκτια ζώνη του κόλπου επικρατούν μάρμαρα και γνεύσιοι (κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα), γρανίτες και διορίτες (πυριγενή πετρώματα) (Συλαίος κ.α., 2004).

Τα επιφανειακά ιζήματα του Κόλπου της Καβάλας είναι κυρίως λεπτόκοκα, αποτελούμενα σε μεγάλο ποσοστό από άμμο και ιλύ. Άμμος και ιλύς με μεγάλη περιεκτικότητα σε μαρμαρυγία και χαλαζία, συναντώνται ιδιαίτερα στο νοτιοανατολικό τμήμα και κατά μήκος των βορειοανατολικών και ανατολικών ακτών του κόλπου (Sylaios et al., 2012). Το κεντρικό τμήμα αποτελείται από αργιλώδη ιλύ, η οποία γίνεται πιο αδρομερής τόσο προς την

ακτογραμμή όσο και προς την ανοιχτή θάλασσα (Perissoratis et al., 1987). Τα επιφανειακά ιζήματα των κεντρικών και βορειοανατολικών τμημάτων του Κόλπου της Καβάλας αποτελούνται από ανόργανες αργίλους, υψηλής πλαστικότητας και χαμηλής συνεκτικότητας, χαρακτηριστικές των ποταμών.

Τα αυξημένα επίπεδα θολότητας του πυθμένα στο ανατολικό και νοτιοανατολικό τμήμα του κόλπου, σε συνδυασμό με την παρουσία του ιλλίτη, ως το πιο άφθονο αργιλικό ορυκτό, και τη γενική αριστερόστροφη κυκλοφορία των υδάτων κατά μήκος της υφαλοκρηπίδας του Θρακικού Πελάγους, οδηγούν στο συμπέρασμα ότι ο ποταμός Νέστος προμηθεύει τα περισσότερα από τα λεπτόκοκκα ιζήματα της περιοχής (Perissoratis et al., 1987). Οι μεγαλύτερες ποσότητες της άμμου προέρχονται από τις εκβολές του Νέστου και από τη διάβρωση των παρακείμενων χερσαίων περιοχών, ενώ τα αργιλικά ορυκτά εισέρχονται στον κόλπο ως αιωρήματα του Νέστου αλλά και μικρότερων τοπικών και εποχιακών ποταμών. Γενικά, η κυκλοφορία του νερού και η κοκκομετρική ταξινόμηση των ιζημάτων που δημιουργείται με τα ρεύματα κοντά στον πυθμένα είναι οι μηχανισμοί που ελέγχουν τη διασπορά των ορυκτών αργίλου μέσα στον κόλπο (Conispoliatis and Lykousis, 1986).

1.4.4. Προστατευόμενες περιοχές

Η περιοχή μελέτης αποτελεί προστατευόμενη περιοχή του δικτύου NATURA 2000, με ονομασία «Θαλάσσια περιοχή Καβάλας – Θάσου» και κωδικό «GR1150014». Πρόκειται για προστατευόμενη περιοχή, η οποία είναι ταυτόχρονα Ζώνη Ειδικής Προστασίας (ΖΕΠ) της ορνιθοπανίδας και Ειδική Ζώνη Διατήρησης (ΕΖΔ) των λοιπών ειδών και του περιβάλλοντος. Αν και τη μεγαλύτερη έκταση του Κόλπου Καβάλας καλύπτει η συγκεκριμένη προστατευόμενη περιοχή, εντός αυτού βρίσκονται άλλες τρεις περιοχές του δικτύου NATURA 2000 με ονομασίες «Κόλπος Παγγαίου – Όρμος Ελευθερών» (ΕΖΔ με κωδικό: GR1150009), «Θάσος και νησίδες Κόινυρα, Ξηρονήσι» (ΖΕΠ με κωδικό: GR1150012) και «Δέλτα Νέστου και λιμνοθάλασσες Κεραμωτής – ευρύτερη περιοχή και παράκτια ζώνη» (ΕΖΔ και ΖΕΠ με κωδικό: GR1150010).

1.4.5. Δραστηριότητες που επηρεάζουν το θαλάσσιο περιβάλλον της περιοχής

Στον Κόλπο Καβάλας συνυπάρχουν διαφορετικές δραστηριότητες που σχετίζονται κυρίως με την τοπική οικονομία και επηρεάζουν λιγότερο ή περισσότερο την ποιότητα του

θαλάσσιου περιβάλλοντος της περιοχής. Συγκεκριμένα, στο δυτικό τμήμα της μελετώμενης περιοχής, υπάρχει τουριστική δραστηριότητα στους παραθαλάσσιους οικισμούς, όπως είναι οι οικισμοί της Νέας Περάμου και της Νέας Ηρακλίτσας, αλλά και καλλιεργούμενες εκτάσεις σε κοντινές αποστάσεις από τη θάλασσα. Στο κεντρικό χερσαίο τμήμα του κόλπου βρίσκεται η πόλη της Καβάλας, όπου συναντάται μεγαλύτερη αστική κάλυψη και συγκέντρωση πληθυσμού και δραστηριοτήτων. Προς το ανατολικό τμήμα του κόλπου δραστηριοποιούνται βιομηχανίες που περιλαμβάνουν εργοστάσιο λιπασμάτων και διυλιστήριο πετρελαίου. Ακόμη πιο ανατολικά, συναντώνται μεγάλες καλλιεργούμενες εκτάσεις εντός της λεκάνης απορροής του ποταμού Νέστου αλλά και εγκαταστάσεις υδατοκαλλιεργειών.

Όσον αφορά τον **τουρισμό**, οι παραθαλάσσιοι οικισμοί της ευρύτερης περιοχής, όπως και η πόλη της Καβάλας, δέχονται μεγάλο αριθμό επισκεπτών κατά τους θερινούς μήνες. Η αύξηση του πληθυσμού το καλοκαίρι έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας και νερού αλλά και της παραγωγής στερεών και υγρών αποβλήτων, αυξάνοντας τις αντίστοιχες παροχές και επιβαρύνοντας τις αντίστοιχες μονάδες επεξεργασίας τους. Επίσης, η ενασχόληση των κατοίκων της περιοχής με τον τουρισμό σχετίζεται με τη διατήρηση μεγάλου αριθμού καταστημάτων εστίασης και καταλυμάτων στις παράκτιες περιοχές του Κόλπου Καβάλας. Οι περισσότερες από τις παραπάνω δραστηριότητες επηρεάζουν σημαντικά αλλά έμμεσα το θαλάσσιο περιβάλλον. Άμεση επιβάρυνση, σχετική με τον τουρισμό, θα μπορούσε να θεωρηθεί η αύξηση της κίνησης των επιβατικών πλοίων και των ιδιωτικών σκαφών αναψυχής στους λιμένες της περιοχής, την καλοκαιρινή περίοδο.

Αναφορικά με τις **καλλιέργειες** της υπό μελέτη περιοχής, στο δυτικό τμήμα του κόλπου, οι καλλιεργούμενες εκτάσεις καλύπτουν τα αγροκτήματα Νέας Περάμου, Ελευθερών και Ελαιοχωρίου και αποτελούνται κυρίως από αμπέλια και ελαιόδεντρα. Οι απορροές των όμβριων υδάτων σε ρέματα και χείμαρρους μεταφέρουν στη θάλασσα μέρος των ουσιών που περιέχονται στα φυτοφάρμακα και τα λιπάσματα που χρησιμοποιούνται. Στο ανατολικό τμήμα του κόλπου οι καλλιεργούμενες εκτάσεις είναι αρκετά μεγαλύτερες, καλύπτουν μεγάλο μέρος της λεκάνης απορροής του ποταμού Νέστου και περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων, καλαμπόκι, ρύζι, φασόλια, καρπούζια, βερίκοκα, ροδάκινα, ακτινίδια και σπαράγγια. Η έκπλυση των εδαφών μεταφέρει και σε αυτήν τη περίπτωση, ποσότητες λιπασμάτων, μέσω του ποταμού και των λιμνοθαλασσών, στη θάλασσα. Τα αζωτούχα λιπάσματα επιβαρύνουν το υδάτινο περιβάλλον κυρίως με νιτρικά ιόντα, ενώ ο φώσφορος

από τα φωσφορικά λιπάσματα, καταλήγει δυσκολότερα στους υδάτινους αποδέκτες, αφού δεσμεύεται από το έδαφος, μέχρι βέβαια να επέλθει κορεσμός (Δασενάκης κ.α., 2015).

Οι περισσότερες **Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων** που λειτουργούν στην ευρύτερη περιοχή του Κόλπου Καβάλας έχουν ως αποδέκτη της επεξεργασμένης εκροής τους ρέματα και αποστραγγιστικές τάφρους της περιοχής, όπως οι ΕΕΛ Νέας Περάμου, Ελευθερούπολης, Βιομηχανικής Περιοχής της Καβάλας και Χρυσούπολης. Επίσης, η ΕΕΛ Νέας Περάμου πραγματοποιεί επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων για άρδευση, κατά τους θερινούς μήνες. Οι Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων Καβάλας και Παληού, που αποτελούν το αντικείμενο της παρούσας εργασίας, πραγματοποιούν διάθεση των επεξεργασμένων λυμάτων, μέσω υποθαλάσσιου αγωγού, εντός του Κόλπου Καβάλας. Η τήρηση των ορίων εκροής από τις δύο ΕΕΛ είναι απαραίτητη, ώστε να μην υποβαθμίζεται η ποιότητα του θαλάσσιου περιβάλλοντος του κόλπου.

Οι κύριοι **λιμένες** που λειτουργούν εντός του Κόλπου της Καβάλας είναι ο κεντρικός λιμένας της Καβάλας «Απόστολος Παύλος», ο λιμένας «Φίλιππος Β΄» και οι λιμένες Ελευθερών και Κεραμωτής. Το επιβατικό λιμάνι «Απόστολος Παύλος» εξυπηρετεί την επιβατική κίνηση με καθημερινά δρομολόγια ferry boat, τον τουρισμό καθώς το προσεγγίζουν κρουαζιερόπλοια και σκάφη αναψυχής, τον αλιευτικό στόλο ως αλιευτικό καταφύγιο και τον ναυταθλητισμό. Διαθέτει συνολικό μήκος κρηπιδωμάτων 1.950 m και βάθη από 4 m έως 10 m. Ο εμπορικός λιμένας «Φίλιππος Β΄» βρίσκεται 8 km ανατολικά της Καβάλας και διαθέτει κρηπιδώματα μήκους 910 m, βάθος στα κρηπιδώματα έως και 12 m και χώρο διαχείρισης και αποθήκευσης φορτίων περίπου 282.000 m². Ο λιμένας Κεραμωτής βρίσκεται 42 km ανατολικά της Καβάλας και αποτελεί το πλησιέστερο σημείο στην Θάσο από όπου διακινείται ο κυριότερος όγκος επιβατών και εμπορευμάτων από και προς το νησί. Το λιμάνι της Κεραμωτής εξυπηρετεί την επιβατική κίνηση με καθημερινά δρομολόγια ferry boat, τη διακίνηση χύδην φορτίων και τον αλιευτικό στόλο ως αλιευτικό καταφύγιο. Διαθέτει βάθη έως και 7,5 m. Το λιμάνι Ελευθερών βρίσκεται 17 km δυτικά της Καβάλας και εξυπηρετεί τη διακίνηση χύδην φορτίων, τον αλιευτικό στόλο ως αλιευτικό καταφύγιο και τον τουρισμό, καθώς στο λιμάνι προσεγγίζουν ιδιωτικά σκάφη αναψυχής. Το λιμάνι διαθέτει βάθη έως και 10 m. (ΟΛΚ) Επίσης, υπάρχουν και μικρότερα λιμανάκια εντός του κόλπου, όπως ο λιμενίσκος Νέας Ηρακλίτσας, το λιμανάκι στην παραλία της Καλαμίτσας, ο λιμενίσκος της Ιχθυόσκαλας της Καβάλας, το λιμανάκι των Σφαγείων στην παραλία Περιγαλιού και ένα μικρό λιμανάκι στη Νέα Καρβάλη. Η λειτουργία των λιμένων σχετίζεται τουλάχιστον με την τοπική επιβάρυνση του θαλάσσιου περιβάλλοντος, καθώς μικρές

ποσότητες πετρελαίου απελευθερώνονται συνεχώς από τη «φυσιολογική» λειτουργία των μηχανών των πλοίων όλων των τύπων, ενώ κι άλλες ανεπιθύμητες ουσίες καταλήγουν στη θάλασσα από τις απορρίψεις των πλοίων (Δασενάκης κ.α., 2015). Πιθανή είναι και η μεγαλύτερης κλίμακας ρύπανση από καύσιμα λόγω κακής συντήρησης των μηχανών των σκαφών. Μεγάλη σημασία έχει και η σωστή διαχείριση των απορριμμάτων από τα αλιευτικά και επιβατικά σκάφη, αλλά και τα σκάφη αναψυχής.

Το **εργοστάσιο λιπασμάτων** στη Νέα Καρβάλη είναι μια χημική εγκατάσταση που παράγει φωσφορικά, αζωτούχα και καλιούχα λιπάσματα σε βιομηχανική κλίμακα. Η βιομηχανία λιπασμάτων χρησιμοποιεί μεγάλες ποσότητες φωσφορικών πετρωμάτων για την παραγωγή φωσφορικού οξέος, με αποτέλεσμα την παραγωγή αποβλήτων φωσφορικών και αμμωνίας. Τα απόβλητα του φωσφορικού οξέος έχουν υψηλή συγκέντρωση φθορίου, χαμηλό pH και υψηλή περιεκτικότητα σε φωσφορικά και αιωρούμενα στερεά (Melidis and Sylaios, 2017). Επίσης, παράγεται φωσφογύψος, ο οποίος αποθηκεύεται σε υπαίθριες στοίβες στην παράκτια ζώνη κοντά στο εργοστάσιο (Sylaios et al., 2005).

Οι εγκαταστάσεις του **εργοστασίου παραγωγής πετρελαίου και φυσικού αερίου** περιλαμβάνουν τη χερσαία μονάδα αποθείωσης πετρελαίου ανατολικά του οικισμού της Νέας Καρβάλης και τις υπεράκτιες εξέδρες άντλησης και μερικής επεξεργασίας του πετρελαίου στον Κόλπο Καβάλας. Η μεταφορά του πετρελαίου μεταξύ των υπεράκτιων και των χερσαίων εγκαταστάσεων γίνεται με υποθαλάσσιους αγωγούς. Πιθανές διαρροές κατά την εξόρυξη ή την υποθαλάσσια μεταφορά των προϊόντων εξόρυξης μπορούν να προκαλέσουν ρύπανση του θαλάσσιου περιβάλλοντος.

Εγκαταστάσεις **υδατοκαλλιέργειών** υπάρχουν κυρίως στο ανατολικό τμήμα του Κόλπου της Καβάλας, στις λιμνοθάλασσες της Κεραμωτής (Βάσσοβα, Ερατεινό, Αγίασμα) και στη Νέα Καρβάλη. Στις λιμνοθάλασσες της Κεραμωτής λειτουργούν ιχθυοκαλλιέργειες και οστρακοκαλλιέργειες, όπου τα κύρια εκτρεφόμενα είδη είναι τσιπούρες, σαρδέλες, κέφαλοι, καβούρια και μύδια. Μια δραστηριότητα υδατοκαλλιέργειας μπορεί να προκαλέσει ρύπανση με την παραγωγή σχετικών με τη λειτουργία της αποβλήτων. Τα απόβλητα αυτά μπορεί να είναι διαλυτά στο νερό, όπως η αμμωνία, τα φωσφορικά, ο διαλυτός οργανικός άνθρακας και τα λιπίδια από τις τροφές, αλλά και στερεά, όπως τα υπολείμματα τροφής και τα περιττώματα των οργανισμών. Γενικά, οι ποσότητες των θρεπτικών που καταλήγουν στο θαλάσσιο περιβάλλον από τις εκτατικές υδατοκαλλιέργειες είναι σχετικά μικρές συγκριτικά με τις ποσότητες από τις υπόλοιπες ανθρωπογενείς δραστηριότητες (βιομηχανία, γεωργία, διάθεση αστικών αποβλήτων κ.α.).

1.5. Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της ποιότητας του θαλάσσιου περιβάλλοντος στις περιοχές της υποθαλάσσιας διάθεσης των επεξεργασμένων λυμάτων των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) Καβάλας και Παληού. Οι υποβρύχιοι αγωγοί διάθεσης των δύο μονάδων εκρέουν σε κεντρικά σημεία του Κόλπου της Καβάλας. Η μελέτη του Κόλπου της Καβάλας, σε σχέση με την επιβάρυνση που δέχεται από τη λειτουργία των δύο ΕΕΛ, περιλαμβάνει τον προσδιορισμό των συγκεντρώσεων των ανόργανων θρεπτικών αλάτων (νιτρικά, νιτρώδη, αμμωνιακά, φωσφορικά και πυριτικά άλατα) και των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων, τη μέτρηση των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών του νερού (θερμοκρασία, αγωγιμότητα / αλατότητα και διαλυμένο οξυγόνο) σε ολόκληρη την υδάτινη στήλη και την εκτίμηση της τροφικής κατάστασης μέσω της μέτρησης της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης-α και των συγκεντρώσεων των θρεπτικών αλάτων. Επίσης, περιλαμβάνει τον προσδιορισμό της κοκκομετρικής σύστασης και του οργανικού υλικού και ολικών ανθρακικών στο ίζημα, ούτως ώστε να εξακριβωθεί η επίδραση των ΕΕΛ στα ιζήματα που βρίσκονται εκατέρωθεν των υποθαλάσσιων αγωγών σε κάθε περιοχή. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων θα συγκριθούν με προηγούμενες μελέτες για τη συγκεκριμένη περιοχή.

2. Μεθοδολογία

2.1. Γενικά στοιχεία

Η δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος «Βιολογικοί Καβάλας», του Ινστιτούτου Αλιευτικής Έρευνας (ΙΝΑΛΕ) στην Καβάλα, για τη διερεύνηση της ποιότητας του θαλάσσιου περιβάλλοντος στις εξόδους των Βιολογικών Καθαρισμών Καβάλας και Παληού. Η δειγματοληψία διενεργήθηκε στις 27/07/2021 με το ερευνητικό σκάφος «ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ» (NK 282). Οι αναλύσεις, επίσης, πραγματοποιήθηκαν σε εργαστήριο του ΙΝΑΛΕ.

2.2. Σταθμοί δειγματοληψίας

Αναφορικά με τους σταθμούς δειγματοληψίας, για τη θαλάσσια περιοχή επίδρασης της Μονάδας Βιολογικού Καθαρισμού της Καβάλας, ο σχεδιασμός του καννάβου περιλαμβάνει την οριοθέτηση εννέα σταθμών και καταλαμβάνει συνολική θαλάσσια έκταση ίση με 1,1 km². Η μέγιστη απόσταση από την ακτογραμμή ανέρχεται σε 1,56 km, ενώ κατά μήκος της ακτογραμμής οι πιο απομακρυσμένοι σταθμοί εκατέρωθεν της εξόδου του αγωγού διάθεσης έχουν απόσταση ίση με 0,5 km. Το πλέγμα δειγματοληψίας δεν εκτείνεται υπερβολικά στον άξονα ανατολή-δύση, ώστε να περιορίζεται στο ελάχιστο η επιρροή άλλων πηγών ρύπανσης, όπως της αστικής περιοχής της Καβάλας (καρνάγιο, λιμάνι) στα δυτικά, καθώς και του εμπορικού λιμένα Φίλιππος Β' και της Βιομηχανίας Φωσφορικών Λιπασμάτων στα ανατολικά.

Για τη θαλάσσια περιοχή επίδρασης της Μονάδας Βιολογικού Καθαρισμού του Παληού, δημιουργήθηκε πλέγμα εννέα σταθμών, κατανεμημένων ακτινωτά ως προς το σημείο απόληξης του αγωγού διάθεσης. Οι σταθμοί εκτείνονται έως και 0,55 km από την ακτογραμμή, ενώ η συνολική θαλάσσια έκταση που καλύπτει το συγκεκριμένο πλέγμα ανέρχεται σε 0,44 km².

Επιπλέον δείγματα ιζήματος και υδάτων ελήφθησαν από έναν απομακρυσμένο σταθμό που επιλέχθηκε ως σημείο αναφοράς (reference).

Το σύνολο των 19 σταθμών δειγματοληψίας παρουσιάζεται στην Εικόνα 6 και η αρίθμηση των σταθμών κάθε Μονάδας στην Εικόνα 7.



Εικόνα 6. Σταθμοί δειγματοληψίας νερού και ιζήματος στις θαλάσσιες περιοχές επίδρασης των Μονάδων Βιολογικού Καθαρισμού Παλιού και Καβάλας.



Εικόνα 7. Αριθμημένοι σταθμοί δειγματοληψίας στις περιοχές επίδρασης των δύο ΕΕΛ

2.3. Δειγματοληψία

Σε κάθε σταθμό δειγματοληψίας ελήφθησαν τρία δείγματα νερού, ένα από την επιφάνεια, ένα από το μέσο βάθος και ένα από τον πυθμένα, χρησιμοποιώντας δειγματολήπτη νερού τύπου Niskin. Πιο συγκεκριμένα, ελήφθησαν 500 ml νερού και από τα τρία βάθη κάθε σταθμού, για τον προσδιορισμό των συγκεντρώσεων πέντε θρεπτικών αλάτων (νιτρικά, νιτρώδη, αμμωνιακά, φωσφορικά και πυριτικά άλατα) και της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων. Επίσης, ελήφθησαν 1000 ml νερού και από τα τρία βάθη κάθε σταθμού, για τον προσδιορισμό των συγκεντρώσεων της χλωροφύλλης-α. Σημειώνεται ότι, για τον προσδιορισμό της χλωροφύλλης-α, ελήφθησαν δείγματα από 14 σταθμούς

(σταθμοί 1-11, 14, 16 και 19). Κατά την διάρκεια της δειγματοληψίας, τα δείγματα νερού τοποθετούνταν σε φιάλες πολυαιθυλενίου και μέσα σε φορητά ψυγεία για την πρόσκαιρη συντήρησή τους με παγοκύστες.

Η συλλογή δεδομένων σχετικά με τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του νερού (θερμοκρασία, αγωγιμότητα / αλατότητα και διαλυμένο οξυγόνο) διενεργήθηκε στην υδάτινη στήλη των μελετώμενων θαλάσσιων περιοχών, με τη χρήση ενός θερμοαλατόμετρου – CTD (conductivity – temperature – depth) μοντέλου SBE 19plus της εταιρείας Seabird Electronics και ενός οξυγονόμετρου τύπου Oxi 197 της WTW. Το θερμοαλατόμετρο ποντιζόταν στο επιθυμητό βάθος με την βοήθεια σκοινιού. Το συγκεκριμένο όργανο διαθέτει αισθητήρα πίεσης, οπότε τα βάθη στα οποία καταγράφονται οι φυσικές παράμετροι είναι γνωστά. Το θερμοαλατόμετρο έχει την δυνατότητα καταγραφής 4 μετρήσεων ανά δευτερόλεπτο και έτσι η πυκνότητα των μετρήσεων στο προφίλ της υδάτινης στήλης είναι πολύ μεγάλη. Ταυτόχρονα, με το οξυγονόμετρο μετριόταν η συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου στα επιφανειακά ύδατα, στο μέσο βάθος και κοντά στον πυθμένα της θάλασσας, με την πόντιση του αισθητήρα του οργάνου στα επιθυμητά βάθη.

Η συλλογή των δειγμάτων ιζήματος διενεργήθηκε με αρπάγη τύπου Van Veen, η οποία είναι κατασκευασμένη από ανοξείδωτο χάλυβα. Η αρπάγη κατεβαίνει ανοιχτή και όταν αγγίξει τον πυθμένα κλείνει, παγιδεύοντας με αυτόν τον τρόπο το επιφανειακό ίζημα βάθους περίπου 10 cm. Ελήφθησαν 5 δείγματα ιζήματος από την περιοχή διάθεσης της ΕΕΛ Καβάλας (σταθμοί 2, 4, 5, 6 και 8), 4 δείγματα από την περιοχή διάθεσης της ΕΕΛ Παληού (σταθμοί 11, 13, 14 και 15) και ένα δείγμα ιζήματος από τον σταθμό αναφοράς (σταθμός 19). Τα δείγματα τοποθετήθηκαν σε σακούλες πολυαιθυλενίου και αποθηκεύτηκαν σε θερμοκρασία -20°C μέχρι την ανάλυση τους.

2.4. Αναλύσεις

2.4.1. Ανόργανα θρεπτικά άλατα και αιωρούμενα στερεά

Την επόμενη από την ημέρα της δειγματοληψίας, 500 ml περίπου από κάθε υδάτινο δείγμα φιλτραρίστηκαν μέσω προ-ξηραμένων ηθμών 0,45 μm της Millipore υπό πίεση, για τον διαχωρισμό της υγρής από την στερεή φάση του δείγματος. Το διηθημένο νερό διαχωρίστηκε σε 5 μπουκάλια πολυαιθυλενίου των 100 ml, καθένα από τα οποία θα

χρησιμοποιούνταν για την ανάλυση διαφορετικών θρεπτικών αλάτων. Τα δείγματα του διηθημένου νερού καταψύχθηκαν μέχρι την ανάλυση.

Ο προσδιορισμός όλων των θρεπτικών αλάτων πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο της φασματοφωτομετρίας μοριακής απορρόφησης. Η μέθοδος βασίζεται στο χρωματισμό των δειγμάτων με κατάλληλα αντιδραστήρια και τον υπολογισμό της συγκέντρωσης των αλάτων μέσω της απορρόφησης ακτινοβολίας συγκεκριμένου μήκους κύματος, χρησιμοποιώντας καμπύλες αναφοράς. Για τις μετρήσεις σε όλα τα θρεπτικά άλατα χρησιμοποιήθηκε φασματοφωτόμετρο τύπου DU-65 UV/Vis της Beckman.

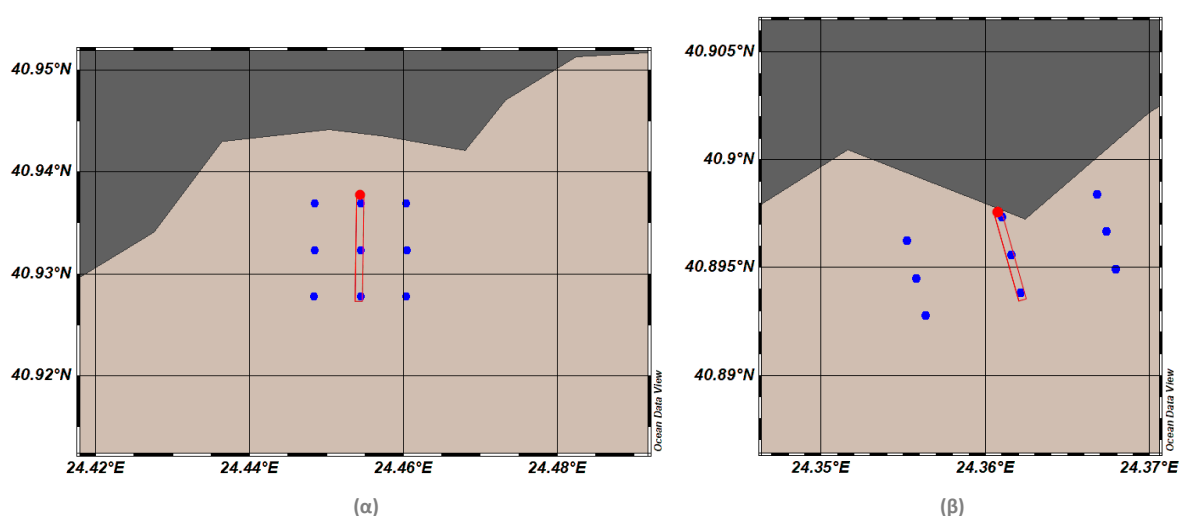
Ο προσδιορισμός του αζώτου των νιτρικών ($N-NO_3$) πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο των Parsons et al. (1984). Η μέθοδος βασίζεται στην αναγωγή των νιτρικών σε νιτρώδη. Η αναγωγή πραγματοποιείται με το πέρασμα των δειγμάτων νερού από γυάλινη στήλη, η οποία έχει πληρωθεί με ρινίσματα καδμίου. Ο προσδιορισμός του αζώτου των νιτρωδών ($N-NO_2$), του φωσφόρου των φωσφορικών ($P-PO_4$), του αζώτου των αμμωνιακών ($N-NH_4$) και του πυριτίου των πυριτικών ($Si-SiO_2$) πραγματοποιήθηκε, επίσης, με τις μεθόδους που περιγράφονται από τους Parsons et al. (1984). Οι εργαστηριακές αναλύσεις επαναλήφθηκαν για το 18% των δειγμάτων (duplicates), ώστε να επαληθευτούν τα αποτελέσματα.

Τα μήκη κύματος στα οποία ρυθμίστηκε να λειτουργεί το φασματοφωτόμετρο κατά τις αναλύσεις των νιτρικών – νιτρωδών, αμμωνιακών, φωσφορικών και πυριτικών αλάτων ήταν 540 nm, 630 nm, 880 nm και 810 nm, αντίστοιχα. Για να υπολογιστούν, τελικά, οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών αλάτων, μέσω των τιμών μοριακής απορρόφησης, χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση της καμπύλης αναφοράς κάθε θρεπτικού.

Για τον προσδιορισμό των συγκεντρώσεων των ολικών αιωρούμενων στερεών (TSS), πραγματοποιήθηκε περαιτέρω επεξεργασία των φίλτρων, που χρησιμοποιήθηκαν για τη διήθηση των 500 ml κάθε δείγματος. Αρχικά, τα φίλτρα είχαν ξηραθεί στους 100°C με σκοπό την απομάκρυνση της υγρασίας τους και ζυγιστεί σε ζυγό ακριβείας. Μετά τη διήθηση των δειγμάτων, τα φίλτρα τοποθετήθηκαν και πάλι σε φούρνο στους 100°C, μέχρι να ξηραθούν και στη συνέχεια επαναζυγίστηκαν. Τέλος, υπολογίστηκε η διαφορά του βάρους των φίλτρων μεταξύ των δύο ζυγίσεων, που αντιστοιχεί στην ποσότητα των αιωρούμενων στερεών σε κάθε δείγμα και η συγκέντρωσή τους σε αυτό.

2.4.2. Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά νερού

Τα πρωτογενή δεδομένα που συλλέχθηκαν με το θερμοαλατόμετρο – CTD υπέστησαν επεξεργασία σύμφωνα με το εγχειρίδιο της Seabird. Στη συνέχεια, δημιουργήθηκαν θεματικοί χάρτες με τη χρήση του λογισμικού Ocean Data View, στους οποίους αποτυπώνονται οι κατακόρυφες κατανομές των φυσικοχημικών παραμέτρων που μετρήθηκαν. Για την οπτικοποίηση των κατακόρυφων κατανομών των παραμέτρων που μετρήθηκαν σε ολόκληρη την υδάτινη στήλη (θερμοκρασία, αλατότητα και πυκνότητα), επιλέχθηκαν τομές στο μέσο της κάθε περιοχής δειγματοληψίας, οι οποίες παρουσιάζονται στην Εικόνα 8.



Εικόνα 8. Θέσεις κατακόρυφων τομών που χρησιμοποιήθηκαν στην οπτικοποίηση των κατανομών θερμοκρασίας, αλατότητας και πυκνότητας στις περιοχές επίδρασης των ΕΕΛ Καβάλας (α) και Παλιού (β)

2.4.3. Χλωροφύλλη-α

Για τον προσδιορισμό των συγκεντρώσεων της χλωροφύλλης-α, περίπου 1000 ml δείγματος διηθήθηκαν μέσω φίλτρων GFF (glass fiber filter) με μέγεθος πόρων 0,7 μm. Μετά τη διήθηση, τα φίλτρα τυλίχθηκαν ξεχωριστά σε αλουμινόχαρτο και καταψύχθηκαν έως την στιγμή της επεξεργασίας και ανάλυσης τους.

Η ανάλυση της χλωροφύλλης-α στηρίχθηκε στην τριχρωματική φωτομετρική μέθοδο (APHA, 1988). Αρχικά, κάθε φίλτρο τοποθετήθηκε σε δοκιμαστικό σωλήνα με διάλυμα ακετόνης 90%, μέσα στον οποίο λειοτρίφθηκε με τη χρήση γυάλινης ράβδου. Τα δείγματα, μετά από 24 ώρες, φυγοκεντρήθηκαν και το υπερκείμενο υγρό μετρήθηκε σε φασματοφωτόμετρο τύπου UV-1800 UV-Vis της Shimadzu στα 630 nm, 647 nm, 664 nm και 750 nm. Η τιμή της μετρούμενης απορρόφησης στα 750 nm αποτελεί διόρθωση για τη θολερότητα του νερού

και αφαιρείται από τις υπόλοιπες τιμές. Η συγκέντρωση της χλωροφύλλης προκύπτει από την εξίσωση:

$$Chl-a = 11,85 * LB_{664} - 1,54 * LB_{647} - 0,08 * LB_{630}$$

όπου LB η απορρόφηση στο συγκεκριμένο μήκος κύματος, μετά τη διόρθωση της θολερότητας.

2.4.4. Κοκκομετρική σύσταση ιζημάτων

Από κάθε δείγμα ιζήματος ένα υπο-δείγμα 50 g χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση της κοκκομετρικής σύστασης. Ο προσδιορισμός της κοκκομετρικής σύστασης διενεργήθηκε αφού πρώτα τα υπο-δείγματα αποψύχθηκαν και ξηράνθηκαν στους 100°C μέχρι την πλήρη αφαίρεση της υγρασίας τους. Τα υπο-δείγματα ιζήματος πέρασαν από συστοιχία κοσκίνων οπών 2 mm, 1 mm, 710 μm, 500 μm, 250 μm, 125 μm, 80 μm και 63 μm, με τη βοήθεια μηχανικής διάταξης τύπου EFL 2000/1 της Endecotts, η οποία πραγματοποιεί τρισδιάστατη δόνηση ρυθμιζόμενης διάρκειας. Μετά από κάθε κοσκίνιση, η ποσότητα ιζήματος, που είχε συγκρατηθεί στο κάθε κόσκινο, ζυγίζοταν σε ζυγό ακριβείας και με βάση το αρχικό βάρος του υπο-δείγματος, υπολογίστηκαν τα ποσοστά των διαφορετικών κοκκομετρικών κλασμάτων στο δείγμα.

2.4.5. Οργανικό υλικό και ανθρακικά στα ιζήματα

Για τον προσδιορισμό του ολικού οργανικού υλικού χρησιμοποιήθηκε ένα υπο-δείγμα από κάθε δείγμα ιζήματος, το οποίο περάστηκε από κόσκινο οπών 1 mm, ώστε στην ανάλυση να χρησιμοποιηθεί το κοκκομετρικό κλάσμα που είναι μικρότερο του 1 mm. Στη συνέχεια, 1 g από το συγκεκριμένο κοκκομετρικό κλάσμα κάθε δείγματος τοποθετήθηκε σε χωνευτήρι πορσελάνης και σε φούρνο στους 550°C για 24 ώρες. Μετά την καύση και αφού τα ιζήματα επανήλθαν σε θερμοκρασία δωματίου, ζυγίστηκαν και πάλι και καταγράφηκε η διαφορά βάρους. Η απώλεια του βάρους ύστερα από καύση στους 550°C αντιστοιχεί στην περιεκτικότητα του δείγματος σε οργανικό υλικό, η οποία εκφράστηκε ως επί τοις εκατό ποσοστό του αρχικού ξηρού βάρους.

Για τον προσδιορισμό των ολικών ανθρακικών στο ίζημα, τα χωνευτήρια πορσελάνης με τα ιζήματα τοποθετήθηκαν και πάλι στον φούρνο για καύση στους 950°C για 24 ώρες. Μετά την καύση και αφού τα ιζήματα επανήλθαν σε θερμοκρασία δωματίου, ζυγίστηκαν και πάλι

και καταγράφηκε η διαφορά βάρους. Η απώλεια του βάρους μεταξύ της καύσης στους 550°C και της καύσης στους 950°C αντιστοιχεί στην περιεκτικότητα του δείγματος σε ανθρακικά υλικά, η οποία εκφράστηκε ως επί τοις εκατό ποσοστό του αρχικού ξηρού βάρους.

2.4.6. Υπολογισμός δείκτη τροφικής κατάστασης υδάτων - TRIX

Ο TRIX των Vollenweider et al. (1998) είναι δείκτης χαρακτηρισμού της τροφικής κατάστασης των παράκτιων θαλάσσιων υδάτων και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$TRIX = [\log_{10} (Chl-a * aD\%O * minN * PO_4) + k] / m$$

όπου: *Chl-a* : συγκέντρωση χλωροφύλλης-α, σε µg/l

aD%O : απόλυτη % απόκλιση από την συγκέντρωση κορεσμού σε οξυγόνο

minN : διαλυτό ανόργανο άζωτο (N-NO₃ + N-NO₂ + N-NH₄), σε µg/l

PO₄ : ολικός ανόργανος φώσφορος ως φωσφορικά, σε µg/l

παράμετροι *k* = 1,5 και *m* = 1,2 : συντελεστές ώστε να καθοριστεί το κατώτερο

και ανώτερο όριο του δείκτη και να δημιουργηθεί κλίμακα από το 0 έως το 10

Για τον υπολογισμό της απόκλισης από τη συγκέντρωση κορεσμού σε οξυγόνο *aD%O*, λαμβάνονται υπόψη οι τιμές θερμοκρασίας και αλατότητας, που μετρήθηκαν. Χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό της διαλυτότητας του οξυγόνου στο νερό, με τη σχετική εξίσωση των Benson και Krause (1984).

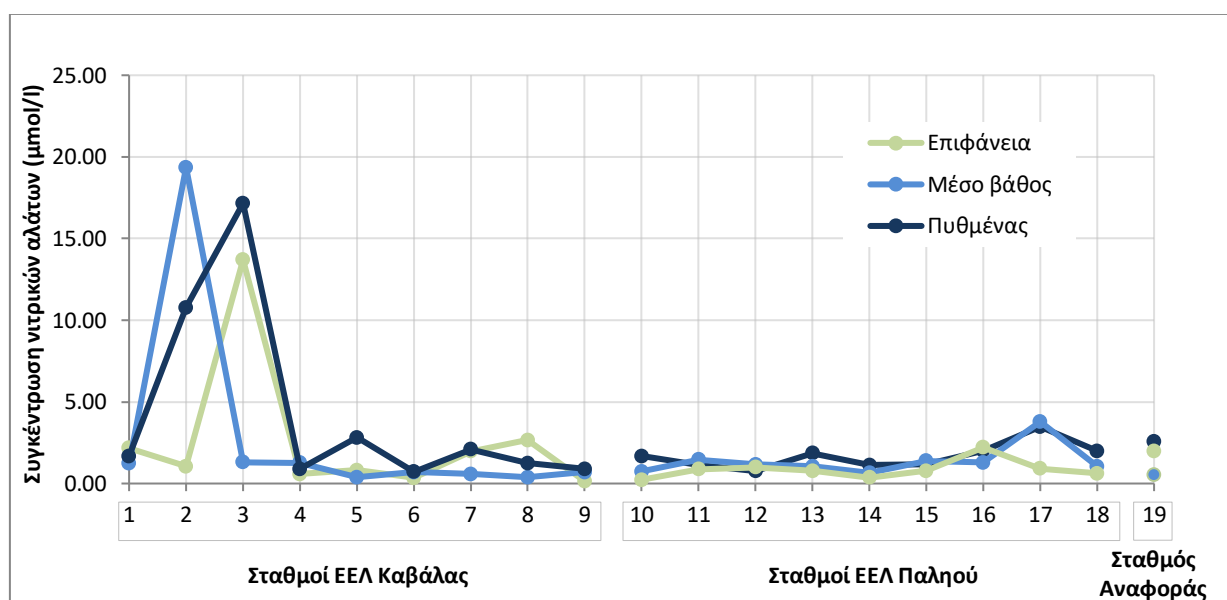
Ο χαρακτηρισμός των υδάτων έγινε με βάση την προτεινόμενη κλίμακα των Primpas και Karydis (2011), οι οποίοι προσαρμόσαν την αρχική κλίμακα του TRIX στα ολιγοτροφικά θαλάσσια περιβάλλοντα, με βάση δεδομένα από το Αιγαίο Πέλαγος.

3. Αποτελέσματα

3.1. Ανόργανα θρεπτικά άλατα

3.1.1. Νιτρικά άλατα (NO_3)

Οι μέγιστες συγκεντρώσεις νιτρικών αλάτων καταγράφηκαν στους σταθμούς δειγματοληψίας 2 και 3 στην περιοχή επίδρασης της ΕΕΛ Καβάλας. Στον σταθμό 2 εμφανίζονται υψηλές συγκεντρώσεις νιτρικών στα νερά του μέσου βάθους και κοντά στον πυθμένα, που είναι 19,36 $\mu\text{mol/l}$ και 10,77 $\mu\text{mol/l}$, αντίστοιχα. Στον σταθμό 3 υψηλές συγκεντρώσεις νιτρικών εμφανίζονται στα επιφανειακά νερά και κοντά στον πυθμένα και αντιστοιχούν σε 13,69 $\mu\text{mol/l}$ και 17,16 $\mu\text{mol/l}$. Όσον αφορά τις υπόλοιπες μετρήσεις, οι συγκεντρώσεις νιτρικών κυμαίνονται από 0,15 $\mu\text{mol/l}$ έως 3,79 $\mu\text{mol/l}$, με μέση τιμή τα 1,27 $\mu\text{mol/l}$. Οι συγκεντρώσεις νιτρικών αλάτων που μετρήθηκαν στις δύο μελετώμενες περιοχές και στον σταθμό αναφοράς παρουσιάζονται στο γράφημα της Εικόνας 9.

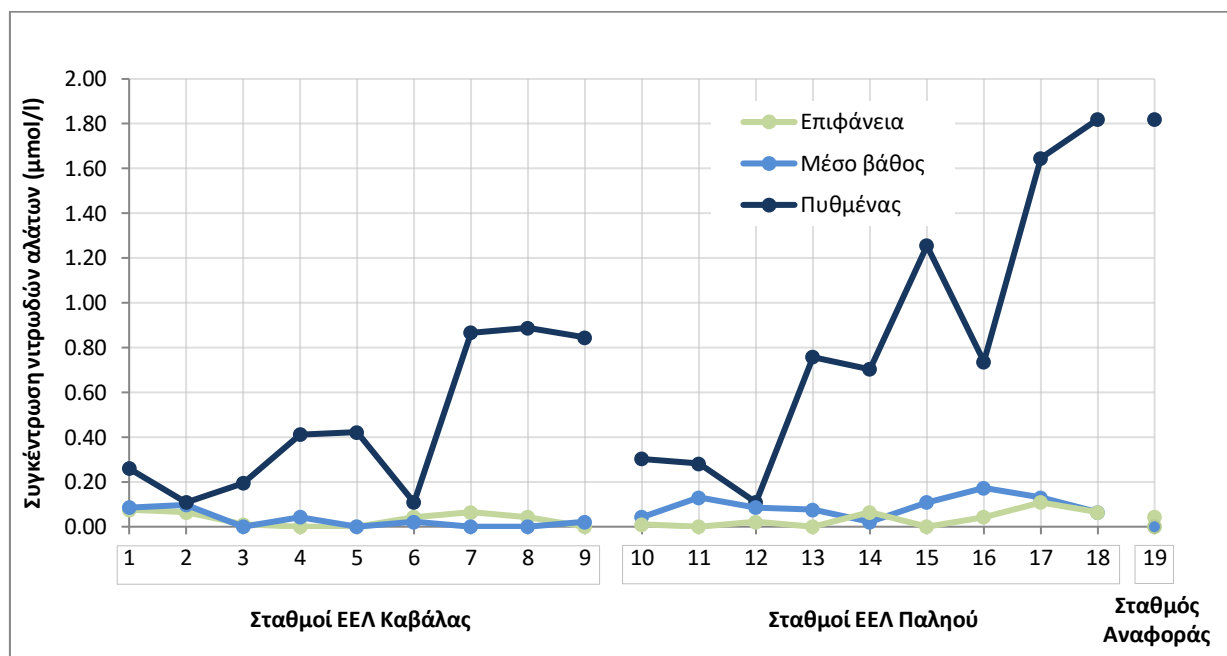


Εικόνα 9. Γράφημα συγκεντρώσεων νιτρικών αλάτων σε όλους τους σταθμούς και στα τρία βάθη δειγματοληψίας

3.1.2. Νιτρώδη άλατα (NO_2)

Οι συγκεντρώσεις νιτρωδών αλάτων εμφανίζονται αυξανόμενες από τα επιφανειακά προς τα βαθύτερα νερά και τον πυθμένα. Συγκεκριμένα, η μέση τιμή των συγκεντρώσεων νιτρωδών των επιφανειακών υδάτων είναι 0,035 $\mu\text{mol/l}$, του μέσου βάθους 0,058 $\mu\text{mol/l}$ και κοντά στον πυθμένα 0,713 $\mu\text{mol/l}$. Παρατηρούνται, επίσης, υψηλότερες συγκεντρώσεις νιτρωδών στην περιοχή εκροής της ΕΕΛ Παληού σε σχέση με τις συγκεντρώσεις στην περιοχή εκροής της ΕΕΛ Καβάλας, όπως φαίνεται και στο γράφημα της Εικόνας 10. Η

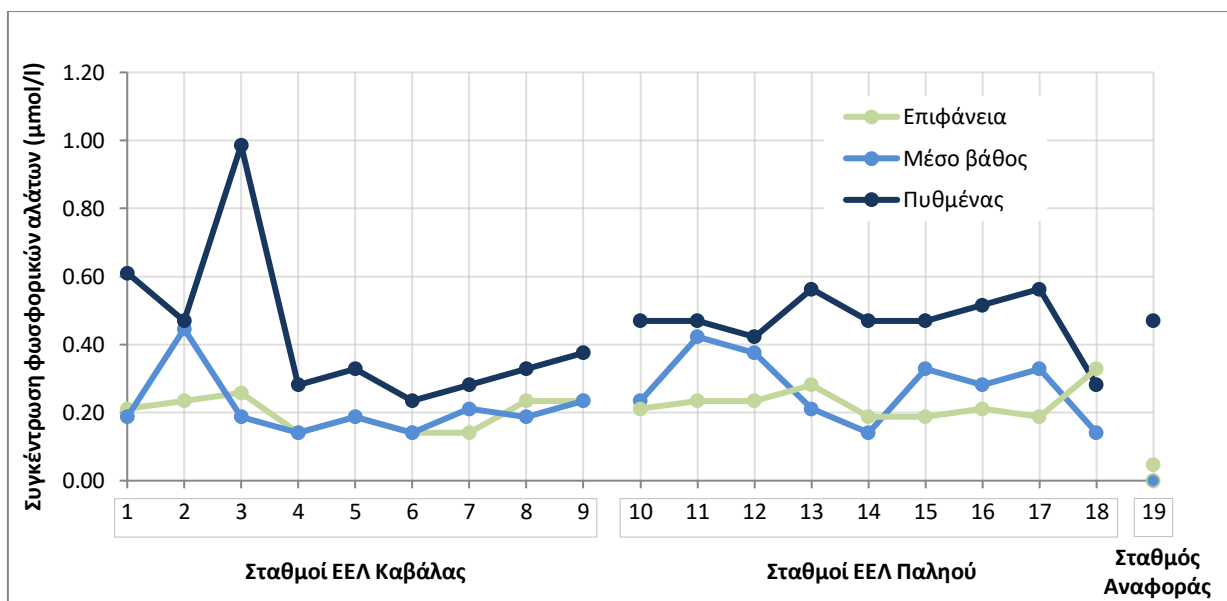
υψηλότερη συγκέντρωση νιτρωδών αλάτων εντοπίζεται στα νερά του πυθμένα στους σταθμούς 18 και 19 (σταθμός αναφοράς) και είναι 1,819 $\mu\text{mol/l}$, ενώ μηδενική συγκέντρωση καταγράφηκε στα επιφανειακά ύδατα 6 σταθμών και στο μέσο βάθος 5 σταθμών.



Εικόνα 10. Γράφημα συγκεντρώσεων νιτρωδών αλάτων σε όλους τους σταθμούς και στα τρία βάρη δειγματοληψίας

3.1.3. Φωσφορικά άλατα (PO_4)

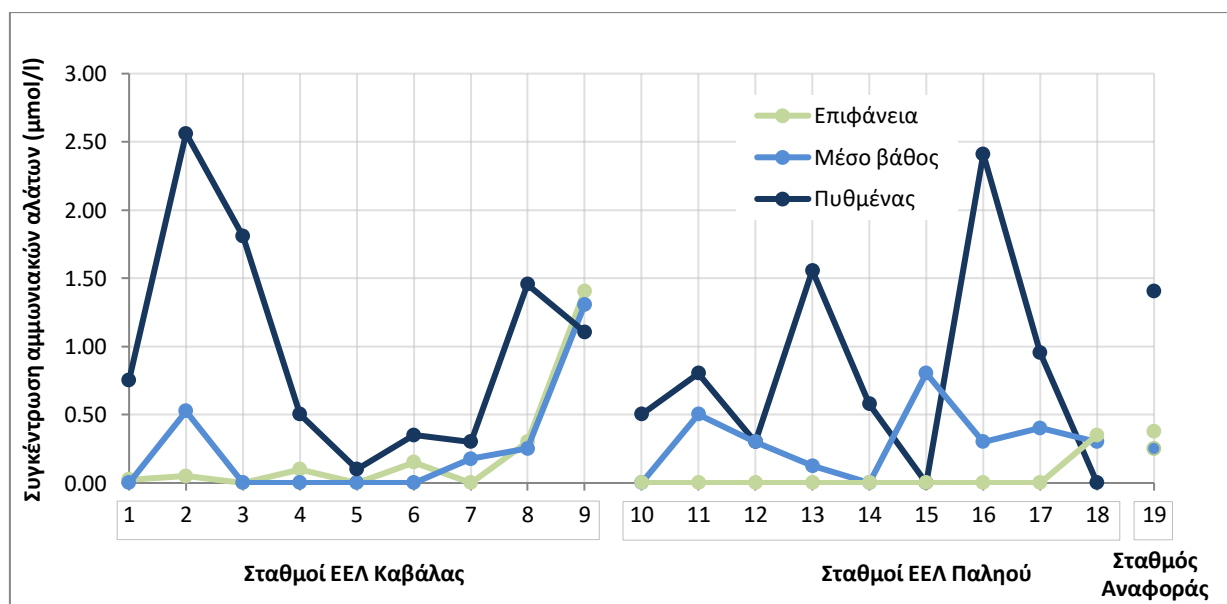
Οι μέσες τιμές των συγκεντρώσεων φωσφορικών αλάτων των επιφανειακών υδάτων, του μέσου βάθους και των υδάτων του πυθμένα αντιστοιχούν σε 0,20 $\mu\text{mol/l}$, 0,23 $\mu\text{mol/l}$ και 0,45 $\mu\text{mol/l}$. Η αύξηση της συγκέντρωσης φωσφορικών με το βάθος φαίνεται και στο γράφημα της Εικόνας 11. Η υψηλότερη συγκέντρωση φωσφορικών, που ήταν 0,99 $\mu\text{mol/l}$, καταγράφηκε στον πυθμένα του σταθμού 3 της περιοχής επίδρασης της ΕΕΛ Καβάλας, ενώ μηδενική συγκέντρωση καταγράφηκε στο μέσο βάθος του σταθμού αναφοράς.



Εικόνα 11. Γράφημα συγκεντρώσεων φωσφορικών αλάτων σε όλους τους σταθμούς και στα τρία βάρη δειγματοληψίας

3.1.4. Αμμωνιακά άλατα (NH_4)

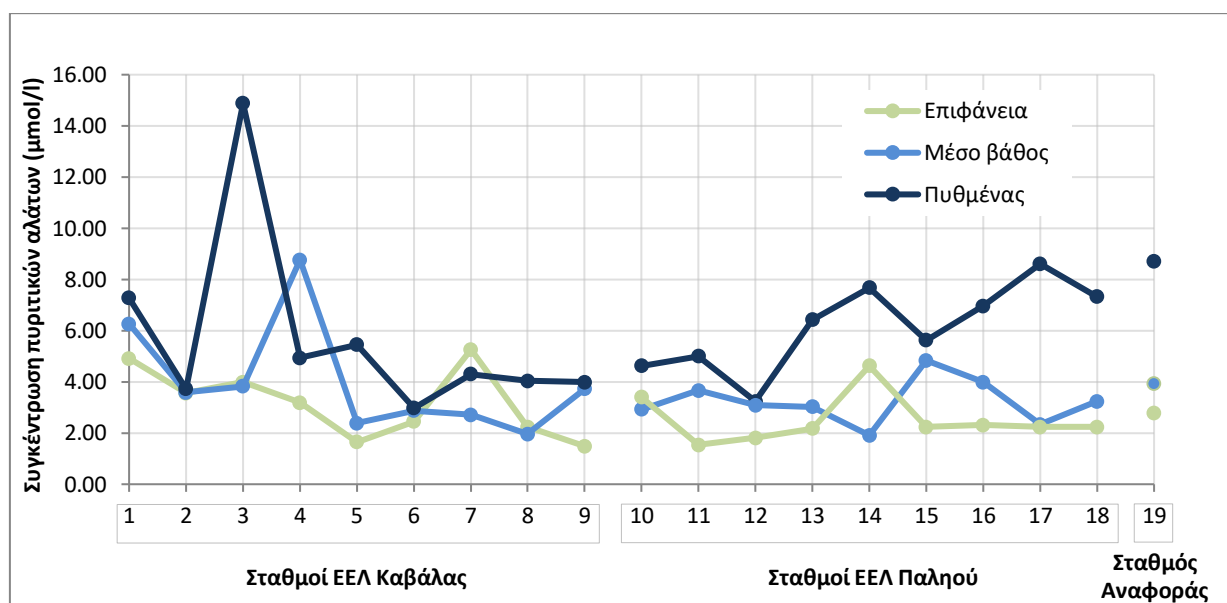
Οι μέσες τιμές των συγκεντρώσεων αμμωνιακών αλάτων των επιφανειακών υδάτων, του μέσου βάρους και των υδάτων του πυθμένα αντιστοιχούν σε 0,15 $\mu\text{mol/l}$, 0,28 $\mu\text{mol/l}$ και 0,92 $\mu\text{mol/l}$. Η αύξηση των συγκεντρώσεων αμμωνιακών με το βάθος είναι πιο εμφανής στην περιοχή εκροής της ΕΕΛ Παληού (Εικόνα 12). Η υψηλότερη συγκέντρωση αμμωνιακών, που είναι 2,56 $\mu\text{mol/l}$, εντοπίζεται στον σταθμό 2 στα νερά του πυθμένα, ενώ μηδενικές συγκεντρώσεις αμμωνιακών καταγράφηκαν σε πολλούς σταθμούς και κυρίως στα επιφανειακά ύδατα.



Εικόνα 12. Γράφημα συγκεντρώσεων αμμωνιακών αλάτων σε όλους τους σταθμούς και στα τρία βάρη δειγματοληψίας

3.1.5. Πυριτικά άλατα (SiO_2)

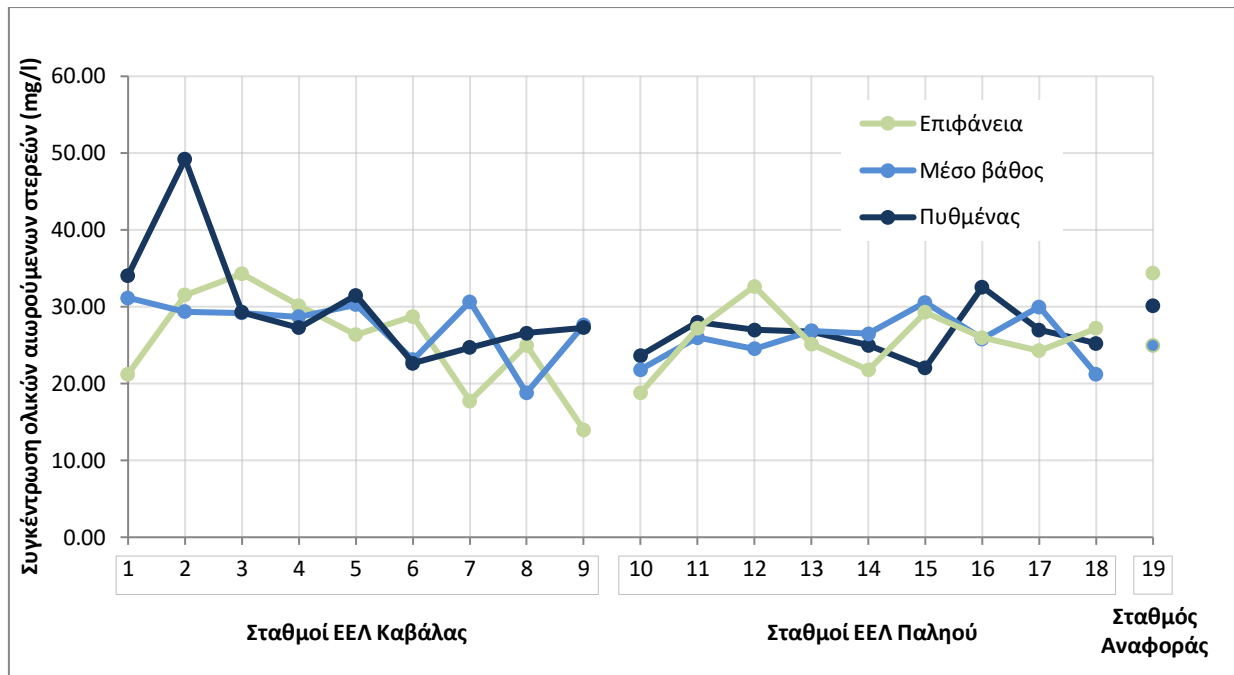
Οι μέσες τιμές των συγκεντρώσεων πυριτικών αλάτων των επιφανειακών υδάτων, του μέσου βάθους και των υδάτων του πυθμένα αντιστοιχούν σε 2,85 $\mu\text{mol/l}$, 3,63 $\mu\text{mol/l}$ και 6,09 $\mu\text{mol/l}$. Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις πυριτικών, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 13, εμφανίζονται κοντά στον πυθμένα, με τη μέγιστη να φτάνει τα 14,88 $\mu\text{mol/l}$, στον σταθμό 3. Η χαμηλότερη συγκέντρωση πυριτικών αλάτων καταγράφηκε στα επιφανειακά ύδατα του σταθμού 9 και ήταν 1,49 $\mu\text{mol/l}$.



Εικόνα 13. Γράφημα συγκεντρώσεων πυριτικών αλάτων σε όλους τους σταθμούς και στα τρία βάρη δειγματοληψίας

3.2. Ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS)

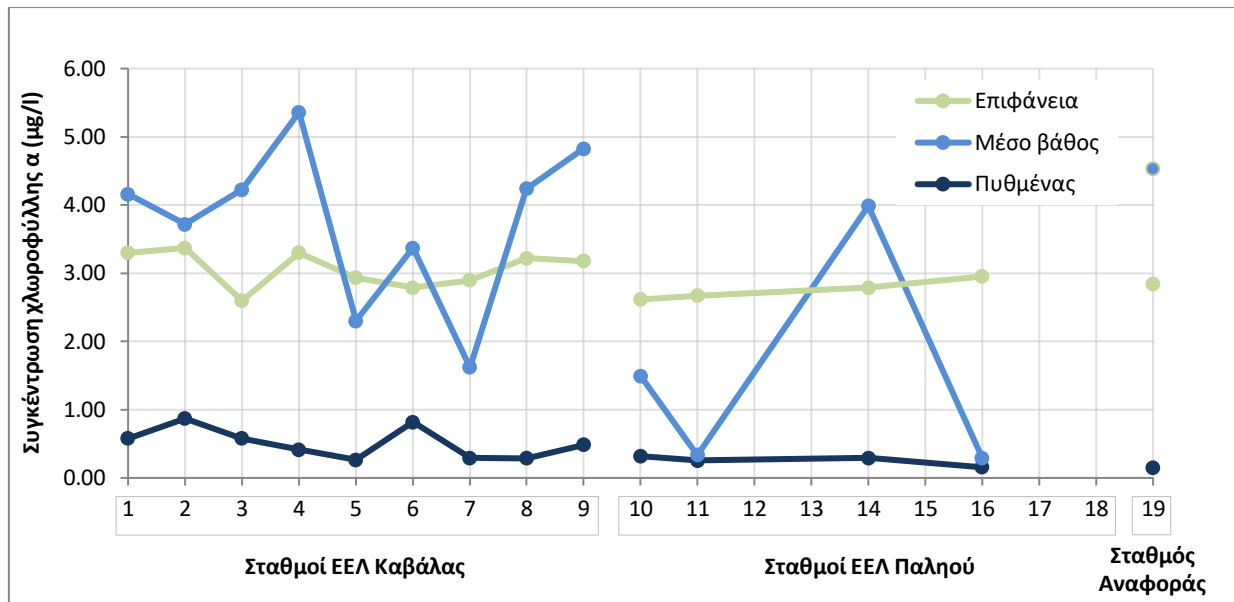
Οι συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων που μετρήθηκαν κυμαίνονται από 14 mg/l έως 34 mg/l περίπου, με εξαίρεση τη συγκέντρωση κοντά στον πυθμένα του σταθμού 2, που ήταν 49,2 mg/l . Η μέση τιμή των συγκεντρώσεων αιωρούμενων στερεών ήταν 27,1 mg/l , ενώ η χαμηλότερη συγκέντρωση ήταν 14 mg/l και καταγράφηκε στα επιφανειακά νερά του σταθμού 9. Για το 70% περίπου των δειγμάτων, οι συγκεντρώσεις αιωρούμενων στερεών ήταν μεταξύ 20 mg/l και 30 mg/l , ενώ η αυξομείωση των συγκεντρώσεων σε σχέση με το βάθος διαφέρει από σταθμό σε σταθμό, όπως φαίνεται και σχηματικά στην Εικόνα 14. Επίσης, οι μέσες τιμές συγκέντρωσης αιωρούμενων στερεών στην επιφάνεια, το μέσο βάθος και τον πυθμένα αντιστοιχούν σε 26,1 mg/l , 26,7 mg/l και 28,4 mg/l .



Εικόνα 14. Γράφημα συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων σε όλους τους σταθμούς και στα τρία βάθη δειγματοληψίας

3.3. Χλωροφύλλη-α

Οι συγκεντρώσεις χλωροφύλλης-α στο νερό κοντά στον πυθμένα εμφανίζονται χαμηλές, με μέση τιμή 0,41 $\mu\text{g/l}$. Μεγαλύτερες συγκεντρώσεις χλωροφύλλης-α καταγράφηκαν στην επιφάνεια του νερού, αλλά και το μέσο βάθος, με μέση τιμή 2,96 $\mu\text{g/l}$ και 3,18 $\mu\text{g/l}$, αντίστοιχα. Η υψηλότερη συγκέντρωση χλωροφύλλης-α (5,36 $\mu\text{g/l}$) βρέθηκε στο μέσο βάθος του σταθμού 4, και η χαμηλότερη (0,15 $\mu\text{g/l}$) στον πυθμένα του σταθμού αναφοράς. Όπως φαίνεται και στο γράφημα της Εικόνας 15, οι υψηλότερες συγκεντρώσεις εμφανίζονται στη θαλάσσια περιοχή επίδρασης της ΕΕΛ Καβάλας.

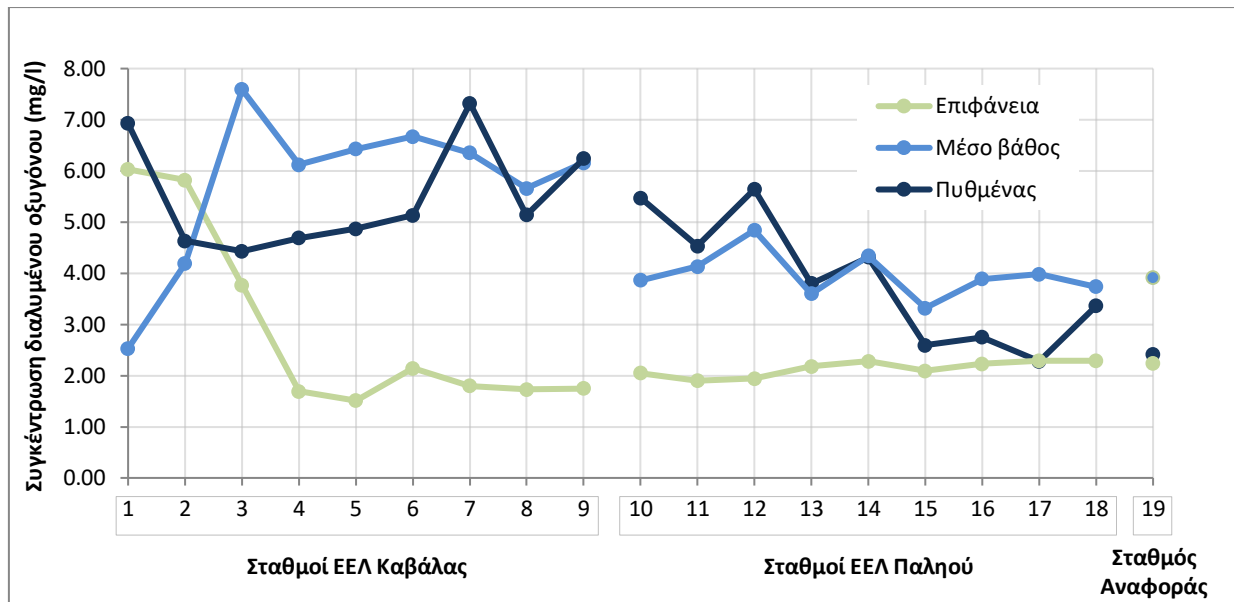


Εικόνα 15. Γράφημα συγκεντρώσεων χλωροφύλλης-α σε όλους τους σταθμούς και στα τρία βάθη δειγματοληψίας

3.4. Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά νερού

3.4.1. Διαλυμένο οξυγόνο (DO)

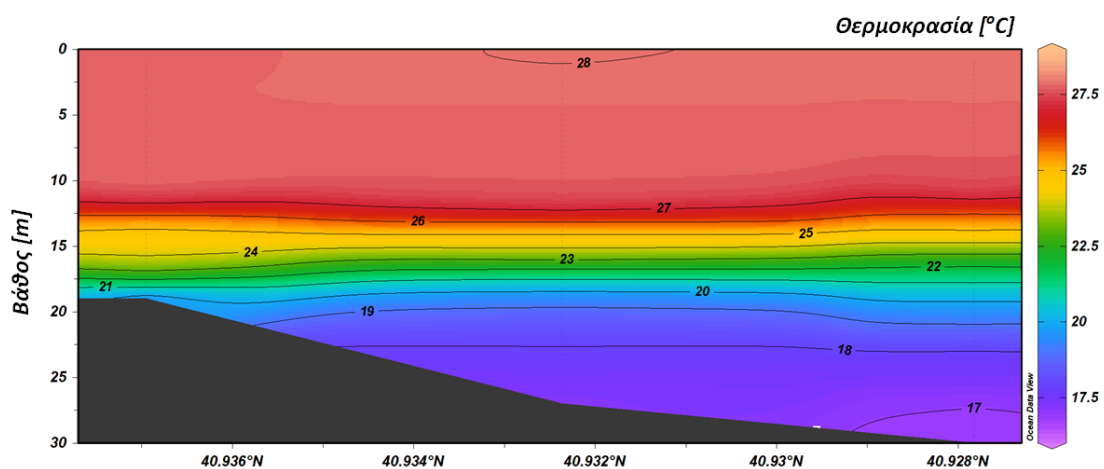
Οι συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου που μετρήθηκαν στα επιφανειακά ύδατα, στους περισσότερους σταθμούς, εμφανίζονται χαμηλότερες από τις συγκεντρώσεις των βαθύτερων υδάτων, όπως φαίνεται και στο γράφημα της Εικόνας 16. Οι μέσες τιμές των συγκεντρώσεων διαλυμένου οξυγόνου στην επιφάνεια, το μέσο βάθος και τον πυθμένα είναι 2,51 mg/l, 4,81 mg/l και 4,55 mg/l, αντίστοιχα. Η υψηλότερη συκέντρωση οξυγόνου μετρήθηκε στο μέσο βάθος του σταθμού 3 και ήταν 7,59 mg/l, ενώ η χαμηλότερη μετρήθηκε στα επιφανειακά νερά του σταθμού 5 και ήταν 1,51 mg/l.



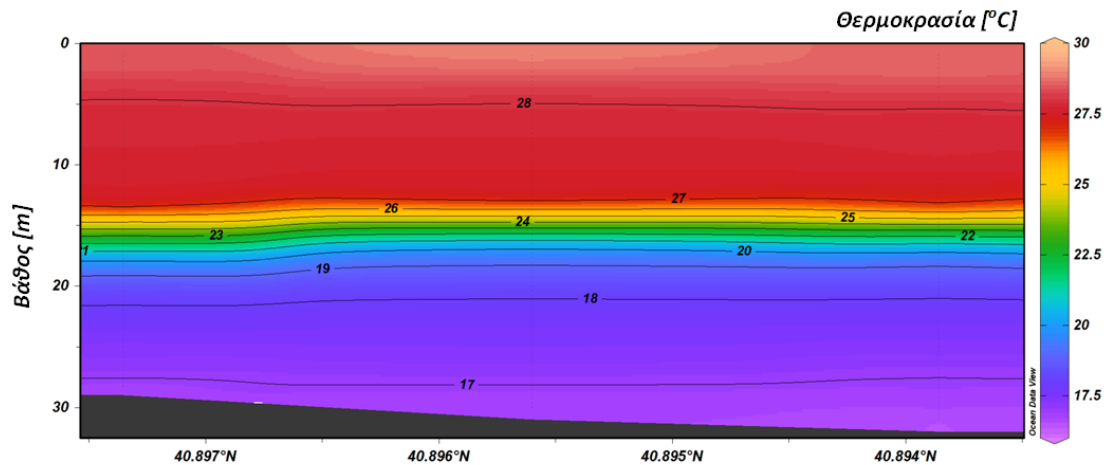
Εικόνα 16. Γράφημα συγκεντρώσεων διαλυμένου οξυγόνου σε όλους τους σταθμούς και στα τρία βάθη δειγματοληψίας

3.4.2. Θερμοκρασία

Υψηλές θερμοκρασίες καταγράφηκαν στην επιφάνεια της θάλασσας (μέγιστη 29°C), αλλά και μέχρι το βάθος των 15 m περίπου. Στις Εικόνες 17 και 18 είναι εμφανής η ύπαρξη θερμικής στρωμάτωσης (θερμοκλινές) και στις δύο περιοχές μελέτης. Κάτω από το θερμοκλινές και ως των πυθμένα της θάλασσας η θερμοκρασία του νερού μειώνεται έως τους 17°C στους περισσότερους σταθμούς δειγματοληψίας, που το βάθος τους δεν ξεπερνάει τα 30 m, ενώ 16°C και 15°C καταγράφηκαν κάτω από τα 30 m και 35 m, αντίστοιχα.



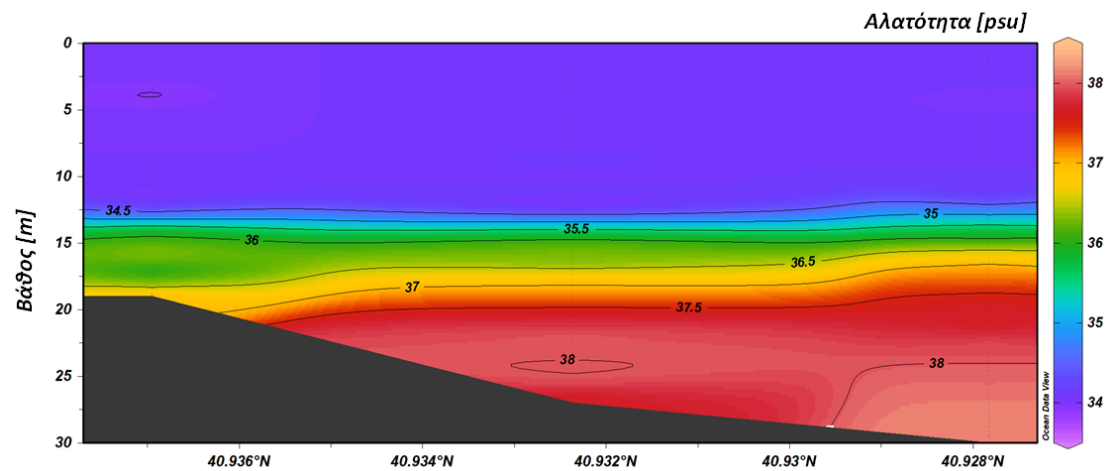
Εικόνα 17. Κατακόρυφη κατανομή θερμοκρασίας στην περιοχή επίδρασης της ΕΕΛ Καβάλας



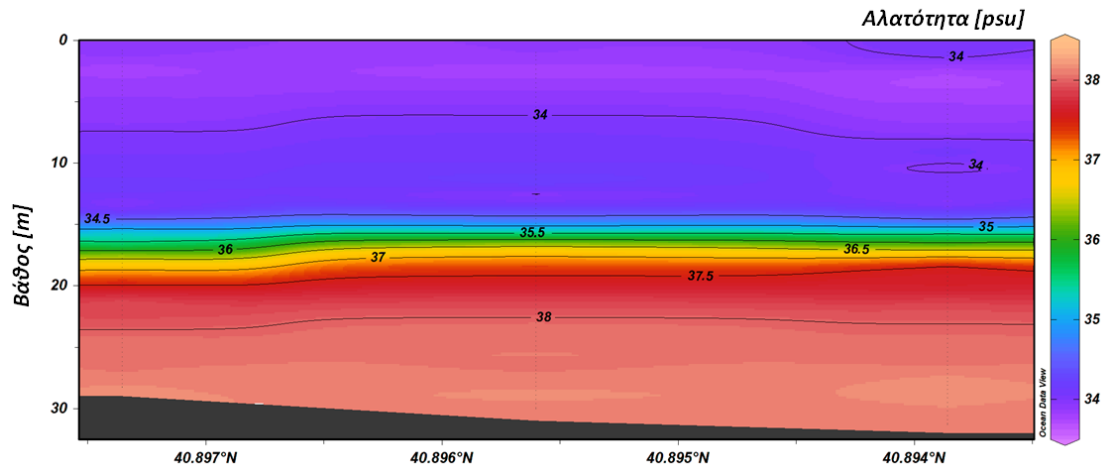
Εικόνα 18. Κατακόρυφη κατανομή θερμοκρασίας στην περιοχή επίδρασης της ΕΕΛ Παλιού

3.4.3. Αλατότητα

Η αλατότητα του νερού αυξάνεται από την επιφάνεια προς τον πυθμένα, όπως φαίνεται και στις Εικόνες 19 και 20. Συνολικά, καταγράφηκαν τιμές αλατότητας από 33,7 psu έως 38,5 psu. Έντονη διαβάθμιση της αλατότητας σε σχέση με το βάθος (αλοκλινές) παρατηρείται κυρίως στην περιοχή επίδρασης της ΕΕΛ Παλιού, μεταξύ των 15 m και των 20 m.



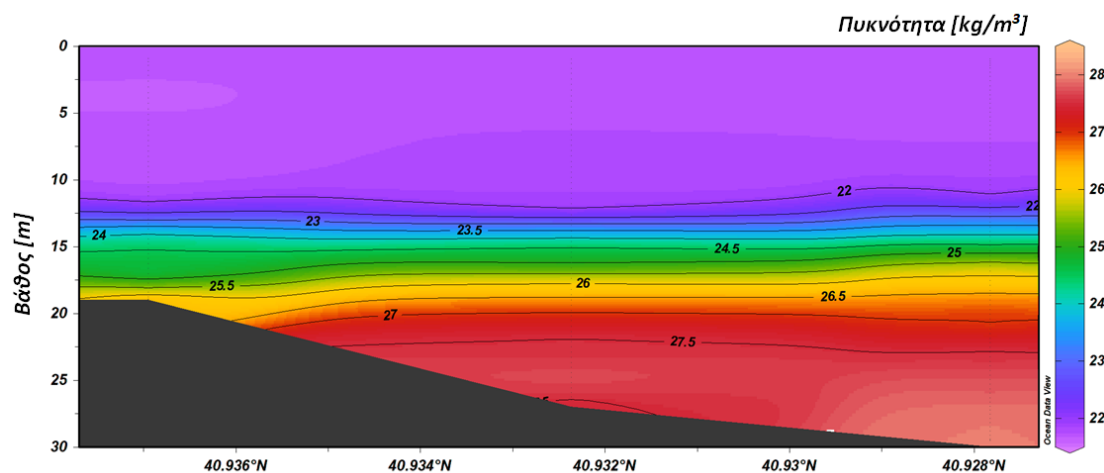
Εικόνα 19. Κατακόρυφη κατανομή αλατότητας στην περιοχή επίδρασης της ΕΕΛ Καβάλας



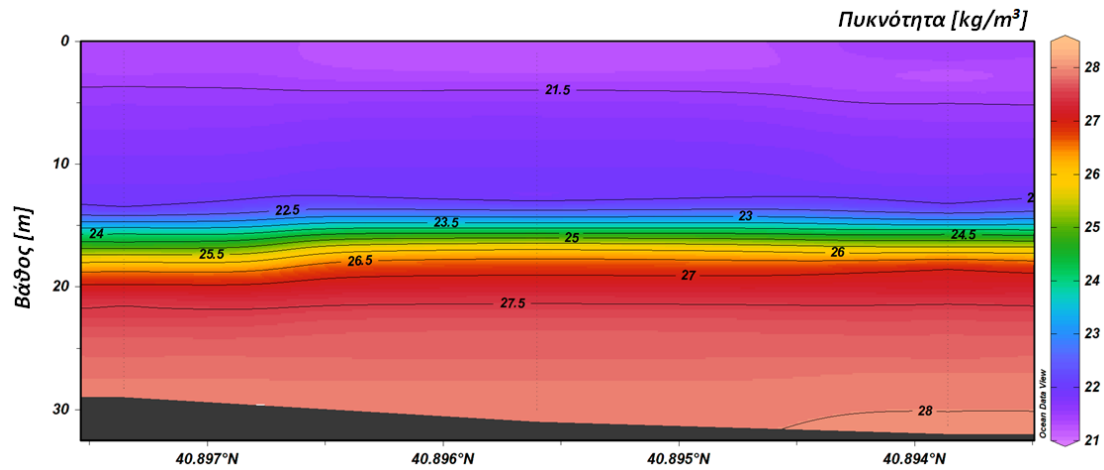
Εικόνα 20. Κατακόρυφη κατανομή αλατότητας στην περιοχή επίδρασης της ΕΕΛ Παλιού

3.4.4. Πυκνότητα

Η πυκνότητα του νερού αυξάνεται από την επιφάνεια προς τον πυθμένα, όπως φαίνεται και στις Εικόνες 21 και 22. Συνολικά, καταγράφηκαν πυκνότητες από $21,6 \text{ kg/m}^3$ έως $28,6 \text{ kg/m}^3$ (τιμές επιτόπιας πυκνότητας). Η απότομη διαβάθμιση της πυκνότητας σε σχέση με το βάθος και η δημιουργία λεπτών στρωμάτων διαφορετικής πυκνότητας (πυκνοκλινές) είναι και εδώ εμφανής, ιδιαίτερα στην περιοχή επίδρασης της ΕΕΛ Παλιού.



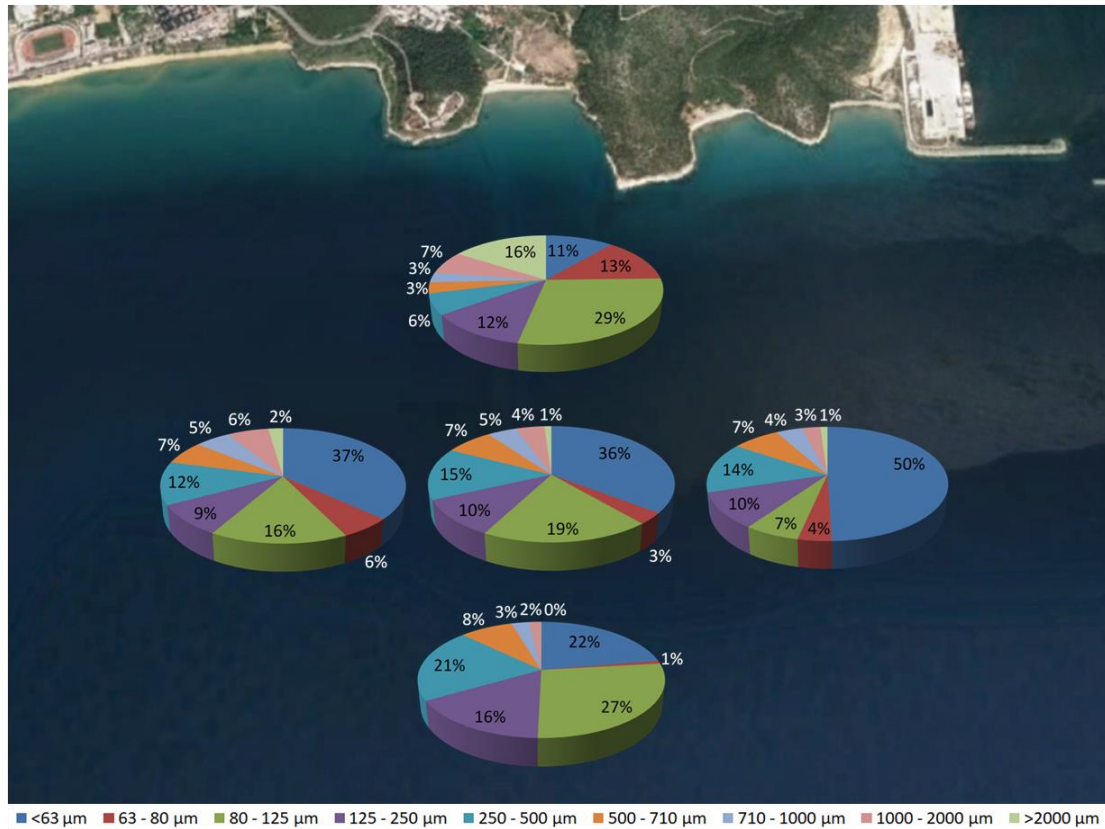
Εικόνα 21. Κατακόρυφη κατανομή πυκνότητας στην περιοχή επίδρασης της ΕΕΛ Καβάλας



Εικόνα 22. Κατακόρυφη κατανομή πυκνότητας στην περιοχή επίδρασης της ΕΕΛ Παληού

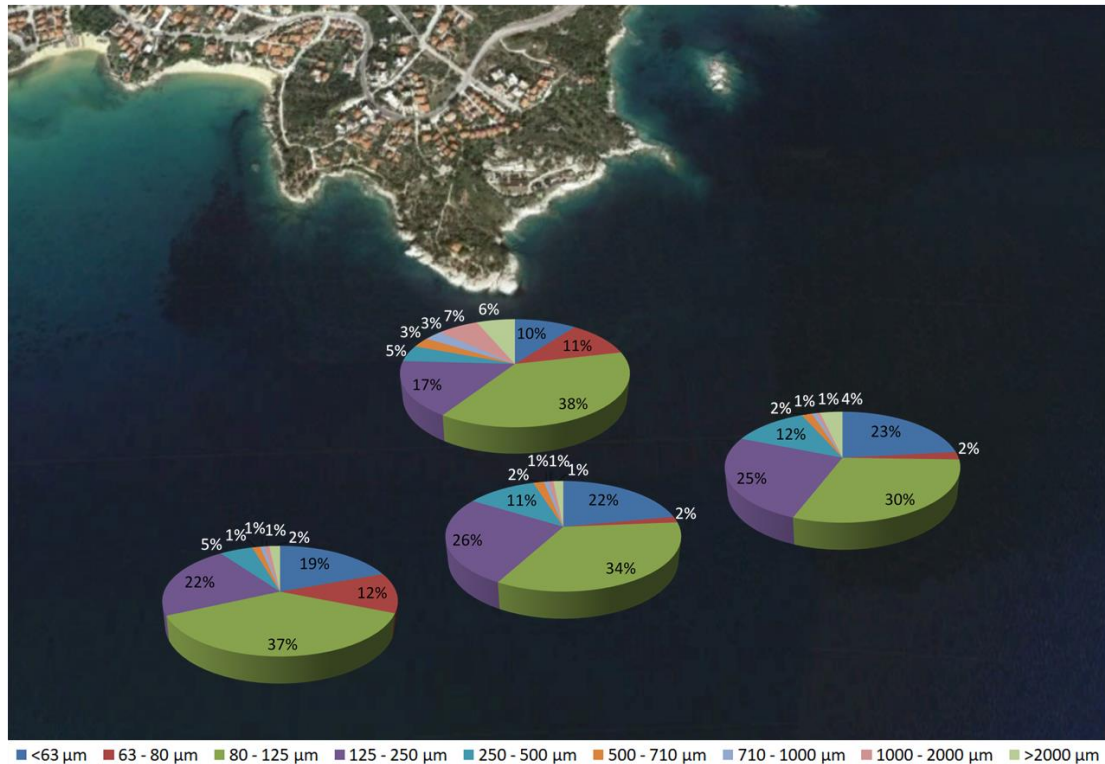
3.5. Κοκκομετρική σύσταση ιζημάτων

Η κοκκομετρική σύσταση των ιζημάτων της περιοχής εκροής της ΕΕΛ Καβάλας παρουσιάζεται στην Εικόνα 23. Σε όλους τους σταθμούς δειγματοληψίας της Καβάλας οι τρεις πρώτες κοκκομετρικές κλάσεις, δηλαδή το κοκκομετρικό κλάσμα με διαμέτρο κόκκων μικρότερη των 125 μm , καλύπτουν ποσοστό μεγαλύτερο του 50%. Ειδικότερα, στον κεντρικό, στον δυτικό και ανατολικό σταθμό το ποσοτό του πολύ λεπτόκοκκου κλάσματος (<63 μm) είναι μεγαλύτερο του 35%.



Εικόνα 23. Χάρτης κοκκομετρικής σύστασης ιζημάτων στην περιοχή επίδρασης της ΕΕΛ Καβάλας

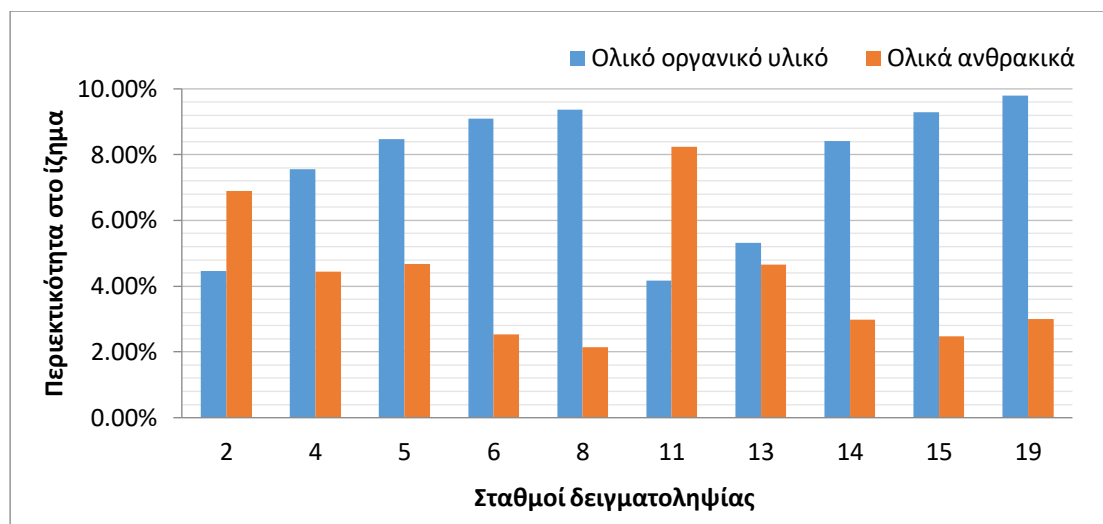
Η κοκκομετρική σύσταση των ιζημάτων της περιοχής εκροής της ΕΕΛ Παληού παρουσιάζεται στην Εικόνα 24. Σε όλους τους σταθμούς δειγματοληψίας του Παληού, όπως και στις Καβάλας, το κοκκομετρικό κλάσμα με διάμετρο κόκκων μικρότερη των 125 μm καταλαμβάνει ποσοστό μεγαλύτερο του 50%. Συγκεκριμένα, στην περιοχή αυτή το κοκκομετρικό κλάσμα 80 – 125 μm αποτελεί το μεγαλύτερο ποσοστό (>30%) στη σύσταση των ιζημάτων.



Εικόνα 24. Χάρτης κοκκομετρικής σύστασης ιζημάτων στην περιοχή επίδρασης της ΕΕΛ Παλιού

3.6. Ολικό οργανικό υλικό και ολικά ανθρακικά στα ιζήματα

Η περιεκτικότητα των ιζημάτων σε οργανικό υλικό και ανθρακικά αντιστοιχεί σε 7,79% και 4,14%, για την περιοχή επίδρασης της ΕΕΛ Καβάλας και σε 6,80% και 4,59%, για την περιοχή επίδρασης της ΕΕΛ Παλιού. Η περιεκτικότητα ολικού οργανικού υλικού και ολικών ανθρακικών στα ιζήματα των θαλάσσιων περιοχών Καβάλας (σταθμοί 2 – 8), Παλιού (σταθμοί 11 – 15) και του σταθμού αναφοράς (σταθμός 19) παρουσιάζονται με γράφημα στην Εικόνα 25. Παρατηρείται ότι, όπου η περιεκτικότητα σε οργανικό υλικό είναι υψηλή, η περιεκτικότητα σε ανθρακικά είναι χαμηλή και το αντίστροφο.



Εικόνα 25. Γράφημα περιεκτικότητας οργανικού υλικού και ανθρακικών υλικών στο ιζημα

3.7. Δείκτης τροφικής κατάστασης παράκτιων θαλάσσιων υδάτων – TRIX

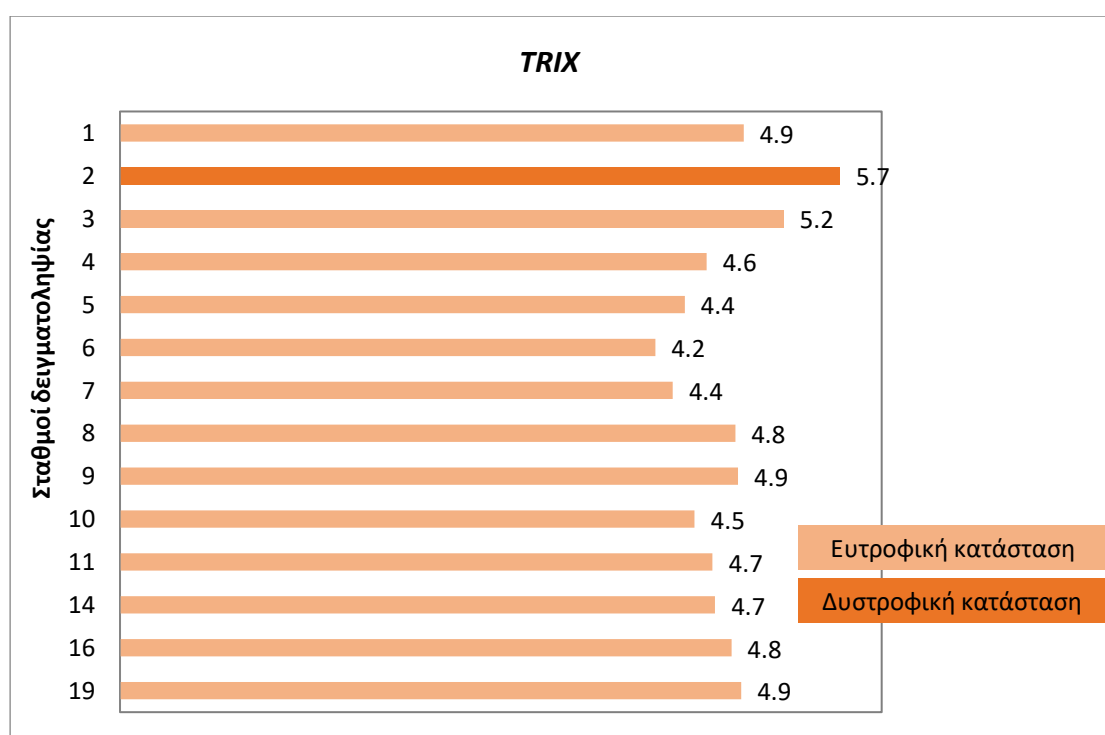
Για τον προσδιορισμό της τροφικής κατάστασης των υδάτων της περιοχής μελέτης χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης TRIX (Vollenweider et al., 1998), ο υπολογισμός του οποίου βασίζεται στις τιμές θερμοκρασίας και αλατότητας, στις συγκεντρώσεις του διαλυμένου οξυγόνου, της χλωροφύλλης-α και των ανόργανων θρεπτικών αλάτων αζώτου (NO_3 , NO_2 και NH_4) και φωσφόρου (PO_4). Ο χαρακτηρισμός των υδάτων έγινε με βάση την προτεινόμενη κλίμακα των Primpas και Karydis (2011) (Πίνακας 2), οι οποίοι προσάρμοσαν την αρχική κλίμακα του TRIX στα oligotροφικά θαλάσσια περιβάλλοντα, με δεδομένα από το Αιγαίο Πέλαγος.

Πίνακας 2. Προτεινόμενη κλίμακα χαρακτηρισμού της τροφικής κατάστασης των υδάτων (Primpas and Karydis, 2011) βάσει των τιμών του δείκτη TRIX

Τροφική Κατάσταση Υδάτων	Τιμές TRIX
Εξαιρετικά oligotροφικά	< 1,6
Oligotροφικά	1,6 – 2,8
Μεσοτροφικά	2,8 – 4,0
Ευτροφικά	4,0 – 5,3
Δυστροφικά	> 5,3

Στο γράφημα της Εικόνας 26 παρουσιάζονται οι τιμές του δείκτη που υπολογίστηκαν για κάθε σταθμό δειγματοληψίας και ο χαρακτηρισμός των υδάτων, όπως προέκυψε, σύμφωνα με τον Πίνακα 2. Ο TRIX δεν υπολογίστηκε για τους σταθμούς 12, 13, 15, 17 και 18, λόγω

έλλειψης δεδομένων συγκεντρώσεων χλωροφύλλης-α. Οι τροφικές συνθήκες στο υπό μελέτη θαλάσσιο περιβάλλον χαρακτηρίστηκαν από ευτροφικές έως δυστροφικές. Συγκεκριμένα, μόνο στον σταθμό 2, εντός της περιοχής επίδρασης της ΕΕΛ Καβάλας, ο δείκτης *TRIX* πήρε τιμή μεγαλύτερη του 5,3 και η τροφική του κατάσταση χαρακτηρίστηκε δυστροφική. Παρατηρείται, επίσης, ότι δεν υπάρχει διαφοροποίηση της τροφικής κατάστασης των υδάτων μεταξύ των μελετώμενων περιοχών και του σταθμού αναφοράς (σταθμός 19). Οι τιμές του δείκτη *TRIX* για τους κεντρικούς σταθμούς δειγματοληψίας (σταθμοί 5 και 14), όπου βρίσκονται οι υποθαλάσσιοι αγωγοί διάθεσης των ΕΕΛ Καβάλας και Παληού, φανερώνουν ότι η κατάσταση των υδάτων στα σημεία αυτά είναι όμοια με αυτήν της ευρύτερης περιοχής.



Εικόνα 26. Γράφημα τιμών δείκτη *TRIX* και χαρακτηρισμός τροφικής κατάστασης υδάτων για κάθε σταθμό δειγματοληψίας

3.8. Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων

3.8.1. Σύγκριση περιοχών και βαθών δειγματοληψίας

Για το σύνολο των αποτελεσμάτων, πραγματοποιήθηκε ο στατιστικός έλεγχος Kruskal – Wallis, που αποτελεί μη παραμετρική μέθοδο σύγκρισης τριών ή περισσότερων πληθυσμών, οι τιμές των οποίων δεν ακολουθούν κανονική κατανομή. Ο στατιστικός έλεγχος πραγματοποιήθηκε με σκοπό να διαπιστωθεί αν τα αποτελέσματα των μετρήσεων για τις δύο μελετώμενες περιοχές και τον σταθμό αναφοράς διαφέρουν στατιστικά μεταξύ

τους, αλλά και αν υπάρχει διαφορά μεταξύ των διαφορετικών βαθών δειγματοληψίας. Οι διαφορές θεωρούνται στατιστικά σημαντικές όταν το χ^2 παράγοντας KW παίρνει υψηλές τιμές και το p -value είναι μικρότερο του 0,05 (επίπεδο σημαντικότητας 5%).

Όσον αφορά στη σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ επιφάνειας – μέσου βάρους (S – M), επιφάνειας – πυθμένα (S – B) και μέσου βάρους – πυθμένα (M – B), καμία διαφορά δεν εντοπίστηκε στις συγκεντρώσεις ολικών αιωρούμενων στερεών (TSS) στα τρία διαφορετικά βάθη, ενώ οι διαφορές που βρέθηκαν με τον στατιστικό έλεγχο για τις υπόλοιπες μετρήσεις σημειώνονται με κόκκινη γραμματοσειρά στους Πίνακες 3 έως 9. Ειδικότερα, στατιστική διαφοροποίηση εντοπίζεται μεταξύ των συγκεντρώσεων νιτρικών αλάτων (NO_3) των επιφανειακών υδάτων και του πυθμένα, ενώ στις συγκεντρώσεις νιτρικών (NO_2), φωσφορικών (PO_4), αμμωνιακών (NH_4), πυριτικών αλάτων (SiO_2) και χλωροφύλλης-α εντοπίζονται διαφορές μεταξύ των επιφανειακών υδάτων και του πυθμένα και μεταξύ του μέσου βάρους και του πυθμένα. Στατιστικά σημαντική διαφορά βρέθηκε, επίσης, μεταξύ των συγκεντρώσεων διαλυμένου οξυγόνου επιφανειακών νερών – μέσου βάρους και επιφανειακών νερών – πυθμένα.

Πίνακας 3. Σύγκριση αποτελεσμάτων για τις συγκεντρώσεις νιτρικών αλάτων μεταξύ των διαφορετικών βαθών δειγματοληψίας

Sample 1 – Sample 2	KW	p-value
S – M	1,211	1,000
S – B	13,158	0,044
M – B	11,947	0,080

Πίνακας 4. Σύγκριση αποτελεσμάτων για τις συγκεντρώσεις νιτρικών αλάτων μεταξύ των διαφορετικών βαθών δειγματοληψίας

Sample 1 – Sample 2	KW	p-value
S – M	5,105	1,000
S – B	30,105	0,000
M – B	25,000	0,000

Πίνακας 5. Σύγκριση αποτελεσμάτων για τις συγκεντρώσεις φωσφορικών αλάτων μεταξύ των διαφορετικών βαθών δειγματοληψίας

Sample 1 – Sample 2	KW	p-value
S – M	2,447	1,000
S – B	26,053	0,000
M – B	23,605	0,000

Πίνακας 6. Σύγκριση αποτελεσμάτων για τις συγκεντρώσεις αμμωνιακών αλάτων μεταξύ των διαφορετικών βαθών δειγματοληψίας

Sample 1 – Sample 2	KW	p-value
S – M	7,000	0,551
S – B	22,132	0,000
M – B	15,132	0,012

Πίνακας 7. Σύγκριση αποτελεσμάτων για τις συγκεντρώσεις πυριτικών αλάτων μεταξύ των διαφορετικών βαθών δειγματοληψίας

Sample 1 – Sample 2	KW	p-value
S – M	8,132	0,393
S – B	25,737	0,000
M – B	17,605	0,003

Πίνακας 8. Σύγκριση αποτελεσμάτων για τις συγκεντρώσεις χλωροφύλλης-α μεταξύ των διαφορετικών βαθών δειγματοληψίας

Sample 1 – Sample 2	KW	p-value
S – M	2,929	1,000
S – B	18,143	0,000
M – B	21,071	0,000

Πίνακας 9. Σύγκριση αποτελεσμάτων για τις συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου μεταξύ των διαφορετικών βαθών δειγματοληψίας

Sample 1 – Sample 2	KW	p-value
S – M	23,658	0,000
S – B	22,368	0,000
M – B	1,289	1,000

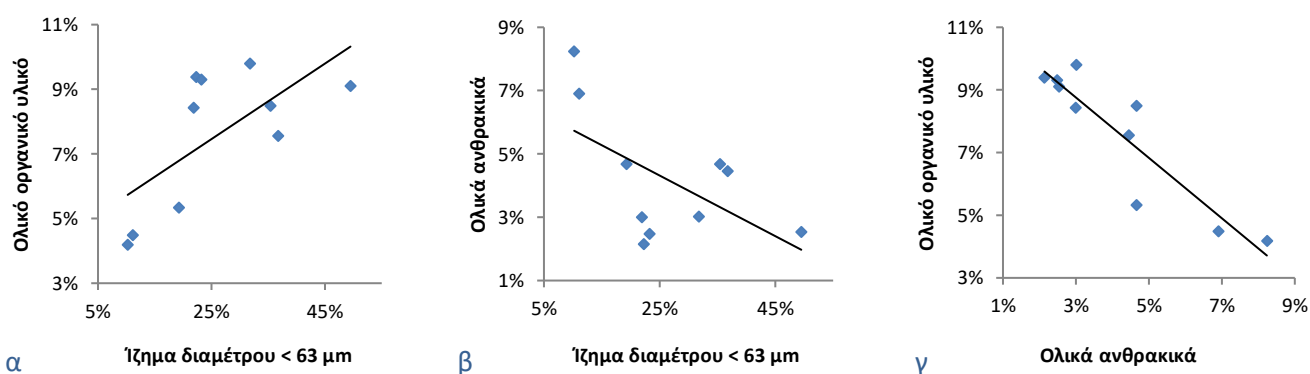
Στη σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ σταθμού αναφοράς – περιοχής εκροής ΕΕΛ Παληού (REF – PAL), σταθμού αναφοράς – περιοχής εκροής ΕΕΛ Καβάλας (REF – KAV) και περιοχής εκροής ΕΕΛ Παληού – περιοχής εκροής ΕΕΛ Καβάλας (PAL – KAV), βρέθηκε στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των συγκεντρώσεων διαλυμένου οξυγόνου της Καβάλας και του Παληού (Πίνακας 10). Οι τιμές των συγκεντρώσεων νιτρικών, νιτρωδών, φωσφορικών, αμμωνιακών και πυριτικών αλάτων, χλωροφύλλης-α και αιωρούμενων στερεών, αλλά και περιεκτικότητας οργανικού υλικού και ανθρακικών αλάτων στο ίζημα δεν παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των τριών συγκρινόμενων περιοχών.

Πίνακας 10. Σύγκριση αποτελεσμάτων για τις συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου μεταξύ των διαφορετικών περιοχών

Sample 1 – Sample 2	KW	p-value
REF – PAL	3,074	1,000
REF – KAV	15,222	0,395
PAL – KAV	12,148	0,021

3.8.2. Συσχέτιση χαρακτηριστικών του ιζήματος

Για να εξεταστεί η πιθανή συσχέτιση μεταξύ του λεπτόκοκκου ιζήματος, της περιεκτικότητας οργανικού υλικού και της περιεκτικότητας ανθρακικών στο ίζημα, κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα διασποράς (Εικόνα 27) και υπολογίστηκε ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης του Pearson r , ο οποίος χρησιμοποιείται για την ανάδειξη της πιθανής γραμμικής εξάρτησης δύο ποσοτικών μεταβλητών.



Εικόνα 27. Διαγράμματα διασποράς περιεκτικότητας οργανικού υλικού – ποσοστού κοκκομετρικού κλάσματος $< 63 \mu\text{m}$ (α), περιεκτικότητας ανθρακικών – ποσοστού κοκκομετρικού κλάσματος $< 63 \mu\text{m}$ (β), περιεκτικότητας οργανικού υλικού – περιεκτικότητας ανθρακικών (γ) στο ίζημα

Σύμφωνα με τις τιμές του συντελεστή συσχέτισης του Pearson, υπάρχει μέση θετική γραμμική συσχέτιση ($r = 0,67$) της περιεκτικότητας των ιζημάτων σε οργανικό υλικό με το πολύ λεπτόκοκκο ίζημα, κοκκομετρικής διαμέτρου μικρότερης των $63 \mu\text{m}$, μέση αρνητική γραμμική συσχέτιση ($r = -0,58$) της περιεκτικότητας των ιζημάτων σε ανθρακικά υλικά με το πολύ λεπτόκοκκο ίζημα και τέλος, πολύ ισχυρή αρνητική γραμμική συσχέτιση ($r = -0,91$) της περιεκτικότητας των ιζημάτων σε οργανικό υλικό με την περιεκτικότητά τους σε ανθρακικά.

4. Συζήτηση

4.1. Τροφική κατάσταση υδάτων

Σύμφωνα με τις τιμές του δείκτη TRIX, για τον υπολογισμό του οποίου ελήφθησαν υπόψη η θερμοκρασία, η αλατότητα, οι συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου, χλωροφύλλης-α και οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών αλάτων αζώτου και φωσφόρου, η τροφική κατάσταση των υδάτων σε έναν σταθμό δειγματοληψίας στη θαλάσσια περιοχή επίδρασης της ΕΕΛ Καβάλας (σταθμός 2, βόρεια του σημείου διάθεσης) χαρακτηρίζεται δυστροφική ($TRIX > 5,3$), ενώ στους υπόλοιπους σταθμούς της περιοχής και στην περιοχή επίδρασης της ΕΕΛ Παληού ευτροφική ($TRIX = 4,0 - 5,3$).

Η κακή τροφική κατάσταση των υδάτων στις μελετώμενες περιοχές, πιθανόν να μην σχετίζεται μόνο με τη λειτουργία των ΕΕΛ Καβάλας και Παληού. Κατά τους θερινούς μήνες του έτους 2021, άρα και κατά τη δειγματοληψία, σε πολλά σημεία εντός του Κόλπου της Καβάλας, όπως και σε άλλες περιοχές του Βόρειου Αιγαίου, υπήρχαν άμορφες μάζες βλέννας καφέ χρώματος, αποτελούμενες από αιωρούμενα οργανικά συσσωματώματα, τα οποία προέρχονταν από την ανάπτυξη συγκεκριμένων φυτοπλακτονικών οργανισμών. Η ευτροφική κατάσταση των υδάτων και στον σταθμό αναφοράς ($TRIX = 4,9$) δείχνει ότι το φαινόμενο αυτό, που επηρέασε την ποιότητα των υδάτων της ευρύτερης περιοχής, καθιστά δύσκολη τη διερεύνηση της επίδρασης των ΕΕΛ στο θαλάσσιο περιβάλλον του Κόλπου Καβάλας, κατά το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

Οι υψηλές τιμές του TRIX οφείλονται κυρίως στις υψηλές συγκεντρώσεις χλωροφύλλης-α και στις εξαιρετικά υψηλές τιμές θερμοκρασίας των υδάτων που καταγράφηκαν και επηρέασαν αρνητικά τη διαλυτότητα του οξυγόνου στο νερό.

4.2. Συγκεντρώσεις θρεπτικών αλάτων

Όσον αφορά στις συγκεντρώσεις των θρεπτικών αλάτων, η στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων έδειξε ότι τα επίπεδα των συγκεντρώσεων είναι ίδια τόσο μεταξύ των δύο περιοχών μελέτης, όσο και με τον σταθμό αναφοράς. Επομένως, δεν φαίνεται η διάθεση των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων από τις ΕΕΛ Καβάλας και Παληού να αυξάνει τα επίπεδα των ανόργανων θρεπτικών αλάτων στις θαλάσσιες περιοχές, όπου αυτή πραγματοποιείται. Επιπλέον, η μη διαφοροποίηση του σταθμού αναφοράς σχετίζεται με τις γενικότερες συνθήκες, που επικρατούσαν κατά την περίοδο που έγινε η δειγματοληψία

(Ιούλιος 2021), αναφορικά με την υπερβολική αύξηση της θερμοκρασίας και την εμφάνιση μαζών βλέννας σε πολλά σημεία του κόλπου.

Βάσει της στατιστικής ανάλυσης, προέκυψε, επίσης, ότι τα επίπεδα των συγκεντρώσεων των θρεπτικών αλάτων διαφοροποιούνται μεταξύ των υδάτων της επιφάνειας και του πυθμένα, αλλά και μεταξύ του μέσου βάρους και του πυθμένα. Η διαφορά μεταξύ επιφάνειας και πυθμένα ήταν αναμενόμενη, λόγω των διαφορετικών συνθηκών θερμοκρασίας, φωτός και βιολογικής δραστηριότητας. Η διαφορά, όμως, μεταξύ των υδάτων του μέσου βάρους και του πυθμένα και η ταυτόχρονη ομοιότητα των μετρήσεων επιφάνειας – μέσου βάρους, φαίνεται να σχετίζονται με την ύπαρξη θερμοκλινούς (και αλοκλινούς και πυκνοκλινούς) στο βάθος των 15 m περίπου. Το στρώμα του νερού που βρίσκεται από την επιφάνεια της θάλασσας μέχρι και πάνω από το θερμοκλινές δεν αναμειγνύεται με τα βαθύτερα ύδατα και τείνει να γίνεται ομοιογενές. Το μέσο βάθος δειγματοληψίας ήταν μικρότερο των 15 m για τους περισσότερους σταθμούς δειγματοληψίας, γεγονός που θα μπορούσε να δικαιολογήσει τις παρόμοιες συγκεντρώσεις επιφάνειας – μέσου βάρους και τη διαφορά τους με τις συγκεντρώσεις θρεπτικών στον πυθμένα.

Ο σχηματισμός του θερμοκλινούς δικαιολογεί και τις υψηλότερες συγκεντρώσεις θρεπτικών στον πυθμένα, καθώς τα θρεπτικά άλατα που συνήθως βρίσκονται άφθονα κοντά στον πυθμένα, όπου γίνεται η βακτηριακή αποδόμηση της νεκρής οργανικής ύλης, δεν μπορούν να μεταφερθούν στην εύφωτη ζώνη, λόγω της εποχικής στρωμάτωσης των υδάτων. Τα θρεπτικά άλατα των επιφανειακών υδάτων καταναλώνονται από το φυτοπλακτόν, το οποίο σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών πεθαίνει και βυθίζεται. Μετά την αποδόμηση των κυττάρων στον πυθμένα, η στήλη του νερού επανατροφοδοτείται με θρεπτικά, τα οποία σε αυτήν την περίπτωση μένουν στον πυθμένα. Τα υψηλά επίπεδα θρεπτικών αλάτων παραμένουν σχεδόν σταθερά κοντά στον πυθμένα, όπου η φωτοσυνθετική δραστηριότητα του φυτοπλακτού είναι περιορισμένη και δεν μπορούν να καταναλωθούν. Οι αναμενόμενες υψηλές συγκεντρώσεις θρεπτικών αλάτων κοντά στον πυθμένα, δεδομένης της εποχής που πραγματοποιήθηκε η δειγματοληψία και της ύπαρξης στρωμάτωσης, δυσκολεύουν τη διερεύνηση του αν και κατά πόσο η υποβρύχια διάχυση των επεξεργασμένων λυμάτων κοντά στον πυθμένα (άρα και κάτω από το θερμοκλινές) επηρεάζει τα επίπεδα των συγκεντρώσεων θρεπτικών.

Σε σύγκριση με προηγούμενες μελέτες για τον Κόλπο Καβάλας, των Sylaios et al. (2005) με περίοδο παρακολούθησης από το 1997 έως το 1999 και των Συλαίος κ.α. (2004) με περίοδο

παρακολούθησης από το 2002 έως το 2004, οι συγκεντρώσεις θρεπτικών που μετρήθηκαν για την παρούσα εργασία φαίνεται να είναι στα ίδια και σε χαμηλότερα επίπεδα. Οι μέγιστες συγκεντρώσεις νιτρικών και νιτρωδών είναι λίγο υψηλότερες από αυτές της περιόδου 2002 – 2004 (Πίνακας 11). Αποτελούν, όμως, μεμονωμένες μετρήσεις και δεν αντιπροσωπεύουν το σύνολο των μετρήσεων, η μέση τιμή των οποίων είναι στα επίπεδα των προηγούμενων μελετών. Οι ελαφρώς αυξημένες συγκεντρώσεις πυριτικών σε σχέση με την περίοδο 2002 – 2004, δεν λαμβάνονται υπόψη στη διερεύνηση της ποιότητας του θαλάσσιου περιβάλλοντος, σε σχέση με την επιβάρυνσή του από τη διάθεση επεξεργασμένων λυμάτων, καθώς τα πυριτικά άλατα έχουν φυσική προέλευση και δεν θεωρούνται ανθρωπογενής ρύπος.

Οι συγκεντρώσεις θρεπτικών, που μετρήθηκαν κατά την περίοδο 1997 – 1999 και δίνονται στον Πίνακα 11, αφορούν σε όλο τον Κόλπο Καβάλας. Στο συγκεκριμένο άρθρο, όμως, αναφέρονται, μεταξύ των υψηλότερων τιμών που καταγράφηκαν, συγκεντρώσεις νιτρικών (25,50 $\mu\text{mol/l}$), αμμωνιακών (15,60 $\mu\text{mol/l}$), νιτρωδών (4,02 $\mu\text{mol/l}$) και φωσφορικών (9,14 $\mu\text{mol/l}$) στην περιοχή εκροής της ΕΕΛ Καβάλας, οι οποίες είναι αρκετά υψηλότερες από τις μέγιστες συγκεντρώσεις που καταγράφηκαν τον Ιούλιο του 2021 στην ίδια περιοχή. Στο ίδιο άρθρο των Sylaios et al. (2005), αναφέρεται επίσης, υψηλή συγκέντρωση αμμωνιακών (20,87 $\mu\text{mol/l}$) τον Ιούνιο του 1998, στην περιοχή εκροής της ΕΕΛ Παληού, η οποία ξεκίνησε να λειτουργεί το καλοκαίρι του ίδιου έτους.

Στον Πίνακα 12, γίνεται αναλυτικότερη σύγκριση, μόνο για τις συγκεντρώσεις επιφάνειας και πυθμένα και μόνο για τις υπό μελέτη περιοχές εντός του Κόλπου Καβάλας. Εδώ είναι εμφανές ότι οι υψηλές συγκεντρώσεις νιτρωδών αλάτων, που είναι και αρκετά υψηλότερες από αυτές της περιόδου 2002 – 2004, αφορούν στον πυθμένα. Οι χαμηλές συγκεντρώσεις οξυγόνου που καταγράφηκαν και ο μεγάλος αριθμός βακτηρίων στον πυθμένα δύνανται να προκαλούν απονιτροποίηση και σε συνδυασμό με την ύπαρξη στρωμάτωσης, να αυξάνουν τις συγκεντρώσεις νιτρωδών κοντά στον πυθμένα. Σημειώνεται ότι, οι μετρήσεις της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκαν κατά τον μήνα Ιούλιο, ενώ οι μετρήσεις των Sylaios κ.α. (2004) πραγματοποιήθηκαν καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Οι αυξημένες συγκεντρώσεις πυριτικών δεν αποτελούν αρνητική επίπτωση της εκροής των ΕΕΛ.

Οι μέσες συγκεντρώσεις νιτρικών, νιτρωδών, αμμωνιακών και φωσφορικών που μετρήθηκαν στα επιφανειακά ύδατα είναι πολύ χαμηλότερες από αυτές της περιόδου 2002 – 2004. Επίσης, οι μέσες συγκεντρώσεις νιτρικών, αμμωνιακών και φωσφορικών που

μετρήθηκαν στα ύδατα του πυθμένα είναι χαμηλότερες από αυτές της περιόδου 2002 – 2004.

Πίνακας 11. Μέσες, ελάχιστες και μέγιστες τιμές παραμέτρων που μετρήθηκαν στον Κόλπο Καβάλας, στο πλαίσιο της παρούσας και προηγούμενων εργασιών

Παράμετρος	Μέση τιμή			Ελάχιστη τιμή			Μέγιστη τιμή		
	1997-1999 *	2002-2004 **	7/2021 ***	1997-1999 *	2002-2004 **	7/2021 ***	1997-1999 *	2002-2004 **	7/2021 ***
N-NO ₃ (μmol/l)	2,95	6,19	2,25	0,00	1,67	0,15	32,48	16,52	19,36
N-NO ₂ (μmol/l)	0,20	0,09	0,27	0,00	0,03	0,00	4,02	0,24	1,82
N-NH ₄ (μmol/l)	1,53	1,14	0,45	0,00	0,31	0,00	31,01	2,69	2,56
P-PO ₄ (μmol/l)	0,80	1,26	0,30	0,00	0,25	0,00	17,95	2,11	0,99
Si-SiO ₂ (μmol/l)	5,50	2,13	4,19	0,00	0,03	1,49	56,09	4,23	14,88
TSS (mg/l)	7,48	-	27,07	0,21	-	14,00	15,10	-	49,20
Chl-α (μg/l)	-	0,66	2,18	-	0,20	0,15	-	1,49	5,36

* Μετρήσεις στον Κόλπο Καβάλας (Sylaios et al., 2005)

** Μετρήσεις επιφανειακών υδάτων και πυθμένα στις περιοχές διάθεσης των ΕΕΛ Καβάλας και Παληού (Συλαίος κ.α., 2004)

*** Μετρήσεις επιφανειακών υδάτων, μέσου βάρους και πυθμένα στις περιοχές διάθεσης των ΕΕΛ Καβάλας και Παληού, για την παρούσα εργασία

Πίνακας 12. Μέσες, ελάχιστες και μέγιστες τιμές παραμέτρων που μετρήθηκαν στις θαλάσσιες περιοχές διάθεσης των ΕΕΛ Καβάλας και Παληού, στο πλαίσιο της παρούσας και προηγούμενης εργασίας

Παράμετρος / Περιοχή	Επιφάνεια						Πυθμένας					
	2002 – 2004 (Συλαίος κ.α., 2004)			Ιούλιος 2021			2002 – 2004 (Συλαίος κ.α., 2004)			Ιούλιος 2021		
	Μέση τιμή	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή	Μέση τιμή	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή	Μέση τιμή	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή	Μέση τιμή	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή
<i>N-NO₃ (μmol/l)</i>												
ΕΕΛ Καβάλας	4,18	0,82	14,75	2,60	0,15	13,69	7,43	1,25	23,19	4,25	0,71	17,16
ΕΕΛ Παληού	7,53	1,79	15,82	0,86	0,23	2,20	5,62	2,81	12,33	1,69	0,76	3,48
<i>N-NO₂ (μmol/l)</i>												
ΕΕΛ Καβάλας	0,12	0,08	0,17	0,03	0,00	0,08	0,05	0,02	0,09	0,46	0,11	0,89
ΕΕΛ Παληού	0,11	0,01	0,43	0,03	0,00	0,11	0,08	0,00	0,25	0,85	0,11	1,82
<i>N-NH₄ (μmol/l)</i>												
ΕΕΛ Καβάλας	1,01	0,66	2,00	0,23	0,00	1,41	1,09	0,06	3,96	0,99	0,10	2,56
ΕΕΛ Παληού	1,56	0,44	3,14	0,04	0,00	0,35	0,90	0,06	1,65	0,79	0,00	2,41
<i>P-PO₄ (μmol/l)</i>												
ΕΕΛ Καβάλας	1,32	0,16	2,42	0,20	0,14	0,26	1,08	0,19	1,75	0,43	0,23	0,99
ΕΕΛ Παληού	1,22	0,15	2,15	0,23	0,19	0,33	1,40	0,50	2,13	0,47	0,28	0,56
<i>Si-SiO₂ (μmol/l)</i>												
ΕΕΛ Καβάλας	1,34	0,00	3,63	3,19	1,49	5,26	2,56	0,00	5,52	5,73	2,98	14,88
ΕΕΛ Παληού	1,83	0,04	3,33	2,51	1,54	4,62	2,79	0,09	4,42	6,17	3,24	8,61
<i>Chl-α (μg/l)</i>												
ΕΕΛ Καβάλας	0,83	0,24	1,70	3,07	2,60	3,37	0,56	0,31	1,07	0,51	0,27	0,87
ΕΕΛ Παληού	0,50	0,24	1,33	2,76	2,62	2,95	0,73	0,00	1,87	0,26	0,16	0,32

4.3. Συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων

Όσον αφορά τα αιωρούμενα σωματίδια, η συγκέντρωσή τους δεν συσχετίζεται ούτε με την περιοχή, ούτε με το βάθος δειγματοληψίας, όπως αποδεικνύεται και από τη στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων. Οι συγκεντρώσεις τους κυμαίνονται σε σταθερά επίπεδα. Στη σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις τιμές αιωρούμενου σωματιδιακού υλικού προηγούμενης μελέτης των Sylaios et al. (2005), οι συγκεντρώσεις που μετρήθηκαν για την παρούσα εργασία είναι εμφανώς υψηλότερες, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 11.

Κατά τους θερινούς μήνες του έτους 2021, άρα και κατά τη δειγματοληψία, σε πολλά σημεία εντός του Κόλπου της Καβάλας, όπως και σε άλλες περιοχές του Βόρειου Αιγαίου, υπήρχε ένα στρώμα βλέννας καφέ χρώματος, αποτελούμενο από αιωρούμενα οργανικά συσσωματώματα, τα οποία προέρχονταν από την ανάπτυξη συγκεκριμένων φυτοπλαγκτονικών οργανισμών. Το γεγονός αυτό φαίνεται να επηρέασε τις συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων, αφού ίδιες συγκεντρώσεις μετρήθηκαν και στον σταθμό αναφοράς.

4.4. Συγκεντρώσεις χλωροφύλλης-α

Οι συγκεντρώσεις χλωροφύλλης-α των επιφανειακών νερών και του μέσου βάρους ήταν υψηλές σε σχέση με τις συγκεντρώσεις του πυθμένα, όπως ήταν αναμενόμενο, αφού η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στο βάθος των 20 – 30 m είναι μειωμένης έντασης, ώστε να υπάρξει φωτοσύνθεση και πρωτογενής παραγωγή. Η ομοιότητα των αποτελεσμάτων για την επιφάνεια και το μέσο βάθος, αλλά και η διαφοροποίηση τους από τον πυθμένα, αποδεικνύεται και από τη στατιστική ανάλυση. Επίσης, σύμφωνα με τους στατιστικούς ελέγχους, οι συγκεντρώσεις χλωροφύλλης-α κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα στις δύο περιοχές μελέτης, αλλά και στον σταθμό αναφοράς.

Σημειώνεται ότι, οι συγκεντρώσεις χλωροφύλλης-α στην επιφάνεια της θάλασσας δεν ήταν υψηλότερες από του μέσου βάρους. Στα επιφανειακά ύδατα, το φυτοπλαγκτόν καταναλώνει τα θρεπτικά άλατα και σε συνδυασμό με τις υψηλές θερμοκρασίες πεθαίνει και βυθίζεται. Στον πυθμένα, συντελείται η αποδόμηση των κυττάρων και η επανατροφοδότηση της υδάτινης στήλης με θρεπτικά, τα οποία, υπό συνθήκες στρωμάτωσης, δύσκολα μεταφέρονται ως την επιφάνεια.

Οι συγκεντρώσεις χλωροφύλλης-α στα επιφανειακά νερά είναι αρκετά υψηλότερες από αυτές που καταγράφηκαν την περίοδο 2002 – 2004 από τους Sylaios κ.α. (2004), όπως

φαίνεται και στους Πίνακες 11 και 12. Οι μετρήσεις της παρούσας εργασίας, βέβαια, αφορούν τον μήνα Ιούλιο και όχι όλο το έτος, γεγονός που δικαιολογεί την αυξημένη πρωτογενή παραγωγή. Επίσης, οι υψηλές συγκεντρώσεις σχετίζονται με το φαινόμενο που προκάλεσε τη συσσώρευση των αιωρούμενων οργανικών συσσωματωμάτων εντός του Κόλπου Καβάλας.

Την άνοιξη του 2021, εμφανίστηκαν στα επιφανειακά ύδατα του Βόρειου Αιγαίου άμορφες μάζες βλέννας, αποτελούμενες από κολλώδη μακρο-συσσωματώματα. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται κατά τους εαρινούς μήνες των τελευταίων ετών και έχει μεταβαλλόμενη ένταση. Τον Απρίλιο του 2021 οι μάζες βλέννας εμφανίστηκαν στον Κόλπο της Καβάλας και σε κοντινές ακτές. Βάσει αναλύσεων που πραγματοποίησε το ΙΝΑΛΕ στην Καβάλα, ήταν έντονη η παρουσία αιωρούμενων οργανικών συσσωματωμάτων καφέ χρώματος και μέτρια η συσσώρευση φυτοπλαγκτονικών κυττάρων στα δείγματα νερού. Το κυρίαρχα φυτοπλαγκτονικά είδη ήταν του γένους των δινομαστιγιωτών *Gonyaulax* και τα γένη των διατόμων *Navicula*, *Bidulphia* και *Melosira*. (Ορφανίδης, 2021)

Το καλοκαίρι του 2021, οι ακραίες τιμές θερμοκρασίας των υδάτων, επιδείνωσαν το φαινόμενο εντός του Κόλπου Καβάλας. Ποσότητες βλέννας παρέμεναν στην επιφάνεια της θάλασσας αλλά και στη στήλη του νερού. Είναι πιθανό να ενισχύθηκε η ανάπτυξη των φυτοπλαγκτονικών οργανισμών που εντοπίστηκαν την άνοιξη ή ακόμη και να ευνοήθηκαν άλλα είδη φυτοπλαγκτού (δεν βρέθηκε σχετική βιβλιογραφία).

4.5. Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά υδάτων

Οι πολύ υψηλές τιμές θερμοκρασίας που μετρήθηκαν κατά τη δειγματοληψία, με μέγιστη τιμή τους 29,04°C στην επιφάνεια του σταθμού 14, επηρέασαν αρνητικά τη διαλυτότητα του οξυγόνου στο νερό. Σημειώνεται ότι, η υψηλότερη θερμοκρασία που καταγράφηκε κατά τα έτη 1997 – 1999 ήταν 26,29°C (Sylaios et al., 2005), ενώ και η υψηλότερη θερμοκρασία του αέρα στην Καβάλα, κατά τη διάρκεια των ετών 2006 – 2021, καταγράφηκε τον Αύγουστο του 2021 και ήταν 38,9°C (Meteokan).

Οι συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου που μετρήθηκαν κατά τη δειγματοληψία είναι γενικά χαμηλές, αλλά και αρκετά χαμηλότερες από τις τιμές που καταγράφηκαν από τους Sylaios et al. (2005). Συγκεκριμένα, για την περίοδο 1997 – 1999, η μέση, η ελάχιστη και η μέγιστη συγκέντρωση ήταν 8,02 mg/l, 7,08 mg/l και 12,15 mg/l, αντίστοιχα (Sylaios et al., 2005), ενώ τον Ιούλιο του 2021 ήταν 3,96 mg/l, 1,51 mg/l και 7,59 mg/l, αντίστοιχα.

Οι χαμηλότερες τιμές διαλυμένου οξυγόνου μετρήθηκαν στην επιφάνεια της θάλασσας. Η στατιστική ανάλυση έδειξε διαφοροποίηση μεταξύ των θερμοκρασιών επιφάνειας – μέσου βάρους και επιφάνειας – πυθμένα, ενώ οι τιμές μέσου βάρους – πυθμένα ήταν στα ίδια επίπεδα. Οι πολύ υψηλές τιμές θερμοκρασίας, η κατανάλωση οξυγόνου από την παραγωγή φυτοπλαγκτού και η μειωμένη μεταφορά οξυγόνου από την ατμόσφαιρα, λόγω μείωσης της έντασης των ανέμων, κατά τους θερινούς μήνες, ευθύνονται σε μεγάλο βαθμό για το πολύ χαμηλό διαλυμένο οξυγόνο των επιφανειακών υδάτων.

Οι ιδιαίτερες συνθήκες που επικρατούσαν στα θαλάσσια ύδατα της ευρύτερης περιοχής μελέτης τον Ιούλιο του 2021, που πραγματοποιήθηκε η δειγματοληψία, όσον αφορά τις πολύ υψηλές θερμοκρασίες και τη συσσώρευση αιωρούμενων οργανικών συσσωματωμάτων και φυτοπλαγκτού, καθόρισαν τις χαμηλές συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου. Στην περίπτωση εμφάνισης φυτοπλαγκτονικών ανθίσεων, αυξημένα οργανικά φορτία εξαπλώνονται στα θαλάσσια οικοσυστήματα, με αποτέλεσμα να μειώνεται η διαθεσιμότητα διαλυμένου οξυγόνου, τόσο στη στήλη του νερού (πελαγική ενότητα), όσο και στον θαλάσσιο πυθμένα, γεγονός που, επαγωγικά, δημιουργεί σοβαρά προβλήματα στα παράκτια, κυρίως, θαλάσσια οικοσυστήματα (Κουτσούμπας, 2021).

Βάσει των στατιστικών ελέγχων, οι συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου διαφέρουν μεταξύ των θαλάσσιων περιοχών Καβάλας και Παληού. Οι συγκεντρώσεις είναι χαμηλότερες στην περιοχή εκροής της ΕΕΛ Παληού, όπου ταυτόχρονα καταγράφηκαν και υψηλότερες τιμές θερμοκρασίας στην επιφάνεια της θάλασσας. Οι υψηλότερες τιμές θερμοκρασίας οφείλονται στη διαφορετική ώρα δειγματοληψίας, καθώς η δειγματοληψία ξεκίνησε από την περιοχή της Καβάλας τις πρωινές ώρες και συνεχίστηκε στην περιοχή του Παληού πλησιάζοντας προς το μεσημέρι. Επίσης, η περιοχή επίδρασης της ΕΕΛ Παληού έχει μεγαλύτερο βάθος, όπως και ο σταθμός αναφοράς, άρα το μέσο και το τελικό βάθος δειγματοληψίας αυτών των σταθμών επηρεάζονται περισσότερο από τις βιοχημικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κοντά στον πυθμένα, όπως τη βακτηριακή αποδόμηση της οργανικής ύλης και την περιορισμένη φωτοσύνθεση. Το βάθος της περιοχής επίδρασης της ΕΕΛ Παληού, σε συνδυασμό με το εντονότερο θερμοκλίνο της, συμβάλουν στις μειωμένες συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου σε σχέση με την περιοχή της Καβάλας.

Όσον αφορά την αλατότητα, οι τιμές της στα επιφανειακά ύδατα είναι πολύ χαμηλές, με ελάχιστη τιμή τα 33,67 psu, ενώ κοντά στον πυθμένα της θάλασσας καταγράφηκαν μεγαλύτερες τιμές, έως και 38,48 psu. Στην περιοχή μελέτης, οι τιμές αλατότητας είναι γενικά χαμηλές σε σχέση με το υπόλοιπο Αιγαίο, εξαιτίας της επίδρασης των υδάτων της

Μαύρης Θάλασσας (Καμίδης, 2011). Το νερό της Μαύρης Θάλασσας χαρακτηρίζεται από πολύ χαμηλή αλατότητα την άνοιξη (Απρίλιος), λόγω των μέγιστων ποτάμιων απορροών. Η μεγαλύτερη επίδραση των υδάτων της Μαύρης Θάλασσας στην υπό μελέτη περιοχή, παρατηρείται κατά τους θερινούς μήνες, καθώς η μεταφορά των υδάτων στην περιοχή ολοκληρώνεται 3 έως 4 μήνες αργότερα (Yüce, 1995).

Για την πυκνότητα του νερού, η οποία φτάνει τις ελάχιστες τιμές της το καλοκαίρι, εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία και την αλατότητα, καταγράφηκαν τιμές έως και 21,23 kg/m³ στα επιφανειακά ύδατα, μικρότερες από την ελάχιστη καταγεγραμμένη πυκνότητα της περιόδου 2002 – 2004 (22,89 kg/m³). Η πολύ μικρή πυκνότητα του νερού πάνω από το πυκνοκλινές, είναι επηρεασμένη από τις πολύ υψηλές τιμές θερμοκρασίας, που μετρήθηκαν στο βάθος αυτό.

4.6. Χαρακτηριστικά ιζήματος

Στα λεπτόκοκκα ιζήματα μετρήθηκαν οι μεγαλύτερες ποσότητες οργανικού υλικού, όπως αποδεικνύεται και από την ύπαρξη θετικής γραμμικής συσχέτισης μεταξύ της περιεκτικότητας των ιζημάτων σε οργανικό υλικό και του ποσοστού του πολύ λεπτόκοκκου κλάσματος (διαμέτρου < 63 μm) σε αυτά. Τα λεπτόκοκκα ιζήματα είναι συνήθως πλούσια σε οργανική ύλη και έχουν σκούρο γκρι χρώμα. Το οργανικό υλικό μπορεί να αποδομείται από τα βακτήρια έως το βάθος του ιζήματος που υπάρχει το απαραίτητο οξυγόνο για τη διαδικασία. Οι συγκεντρώσεις οργανικού υλικού που μετρήθηκαν στο ίζημα είναι μεγαλύτερες από αυτές που καταγράφηκαν από τους Sylaios et al. (2012) στις περιοχές εκροής των ΕΕΛ Καβάλας (7,79% > 2,20%) και Παληού (6,80% > 4,59%).

Όσον αφορά την περιεκτικότητα των ιζημάτων σε ανθρακικά, και αυτή συσχετίζεται με το λεπτόκοκκο ίζημα, αλλά μεταξύ τους υπάρχει αρνητική γραμμική συσχέτιση. Μεγαλύτερα ποσοστά ανθρακικών υλικών βρίσκονται, συνήθως, σε πιο αδρομερή ιζήματα. Τα ανθρακικά υλικά σχετίζονται άμεσα με την πρωτογενή παραγωγή στη στήλη του νερού. Η προέλευσή τους μπορεί να είναι σε μεγάλο βαθμό βιογενής, όταν αυτά προέρχονται από κελύφη, σκελετικά υπολείμματα οργανισμών κ.α.. Οι μεγαλύτερες ποσότητες ανθρακικών βρίσκονται στο επιφανειακό στρώμα του ιζήματος. Τα ολικά ανθρακικά που μετρήθηκαν στο ίζημα είναι χαμηλότερα από αυτά που καταγράφηκαν από τους Sylaios et al. (2012) στις περιοχές εκροής των ΕΕΛ Καβάλας (4,14% < 6,70%) και Παληού (4,59% < 15,51%).

Πολύ ισχυρή αρνητική συσχέτιση εντοπίστηκε μεταξύ του περιεχόμενου οργανικού υλικού και των περιεχόμενων ανθρακικών στα ιζήματα της περιοχής μελέτης. Είναι πιθανό αυτό να συνδέεται με τις ιδιαίτερες συνθήκες κάθε εποχής και περιοχής. Για παράδειγμα, όταν οι συνθήκες ευνοούν τον ρυθμό πρωτογενούς παραγωγής, αυξάνεται η παραγόμενη ποσότητα οξυγόνου, αλλά και οι συγκεντρώσεις ανθρακικών. Σε συνθήκες επαρκούς οξυγόνου, αυξάνεται και ο ρυθμός βακτηριακής αποδόμησης της οργανικής ύλης και η ποσότητά της στο ίζημα μειώνεται.

Τέλος, η στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων δεν έδειξε διαφοροποιήσεις μεταξύ των δύο περιοχών εκροής των ΕΕΛ, ούτε μεταξύ αυτών και του σταθμού αναφοράς, όσον αφορά στην περιεκτικότητα οργανικού υλικού και ανθρακικών στα ιζήματά τους.

5. Συμπεράσματα

Η διάθεση των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων από τις Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων στη θάλασσα, συχνά, επιβαρύνει τα παράκτια οικοσυστήματα. Ακόμη και όταν τηρούνται τα όρια εκροής, η συνεχής ροή θρεπτικών προς το θαλάσσιο περιβάλλον, αναγκάζει το οικοσύστημα να προσαρμοστεί σε νέες συνθήκες.

Η ΕΕΛ Καβάλας και η ΕΕΛ Παληού έχουν αποτελέσει κι άλλες φορές αντικείμενο μελέτης, καθώς οι υποθαλάσσιοι αγωγοί διάθεσής τους εκρέουν εντός του Κόλπου της Καβάλας, ο οποίος δέχεται την επίδραση πολλών διαφορετικών δραστηριοτήτων που συγκεντρώνονται στις παράκτιες περιοχές του και επηρεάζουν την ποιότητα του θαλάσσιου περιβάλλοντος.

Με βάση τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, η τροφική κατάσταση των υδάτων στις θαλάσσιες περιοχές επίδρασης των δύο μελετώμενων ΕΕΛ χαρακτηρίζεται ευτροφική. Οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών αλάτων είναι χαμηλότερες από αυτές που καταγράφηκαν σε προηγούμενες μελέτες, αν και η δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε καλοκαίρι, που λόγω της αύξησης του εξυπηρετούμενου πληθυσμού, οι Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας δέχονται μεγαλύτερες παροχές αστικών λυμάτων. Μετρήθηκαν, όμως, υψηλές συγκεντρώσεις χλωροφύλλης-α και χαμηλές συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου στη στήλη του νερού. Επιπλέον, το οργανικό υλικό που περιέχεται στα ιζήματα βρέθηκε αυξημένο σε σχέση με προηγούμενη εργασία.

Οι τιμές χλωροφύλλης-α και διαλυμένου οξυγόνου σχετίζονται με ρύπανση, που μπορεί να προκαλέσουν οι ΕΕΛ. Όμως, κατά τους θερινούς μήνες του 2021, επικράτησαν ιδιαίτερες συνθήκες εντός του Κόλπου Καβάλας, αναφορικά με τις πολύ υψηλές τιμές της θερμοκρασίας των υδάτων και τη συγκέντρωση των αιωρούμενων οργανικών συσσωματωμάτων (βλέννας) σε πολλά σημεία του κόλπου. Οι ιδιαίτερες αυτές συνθήκες, σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα των αναλύσεων για τον σταθμό αναφοράς, που ήταν ακριβώς στα ίδια επίπεδα με τον υπόλοιπων σταθμών, δεν δείχνουν ότι η ευτροφική κατάσταση των υδάτων είναι αποτέλεσμα της διάθεσης των επεξεργασμένων λυμάτων. Υπό κανονικές συνθήκες, πιθανότατα θα υπήρχε διαφοροποίηση μεταξύ των αποτελεσμάτων των μετρήσεων και αναλύσεων για τον σταθμό αναφοράς και για τους υπόλοιπους σταθμούς δειγματοληψίας. Η συχνότερη παρακολούθηση της ποιότητας των περιοχών εκροής των ΕΕΛ θα συνέβαλλε στη διεξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων για το αν οι ΕΕΛ Καβάλας και Παληού υποβαθμίζουν την ποιότητα του θαλάσσιου περιβάλλοντος.

Σε κάθε περίπτωση, η διάθεση των λυμάτων στη θάλασσα, μετά από κατάλληλη επεξεργασία, είναι προτιμότερη από την ανεξέλεγκτη διάθεση ανεπεξέργαστων υγρών αποβλήτων στο φυσικό περιβάλλον. Για την προστασία των ευαίσθητων παράκτιων οικοσυστημάτων, θα ήταν χρήσιμος ο συχνός έλεγχος όλων των παραμέτρων ποιότητας του επεξεργασμένου νερού, όχι μόνο των BOD₅, COD και TSS, ή ακόμα και η αυστηροποίηση των ανώτατων τιμών εκροής, σύμφωνα με τις ιδιαιτερότητες του φυσικού αποδέκτη. Επιπλέον, η επιλογή του εμπλουτισμού του υπόγειου υδροφορέα και της επαναχρησιμοποίησης του νερού για άρδευση ή βιομηχανική χρήση, ως τρόπο διάθεσης των επεξεργασμένων λυμάτων, όπου είναι δυνατό, θα συνέβαλλε στην αναβάθμιση του φυσικού περιβάλλοντος.

Αν και σκοπός της εργασίας ήταν η διερεύνηση της ποιότητας του θαλάσσιου περιβάλλοντος στις περιοχές διάθεσης των επεξεργασμένων λυμάτων από τις ΕΕΛ Καβάλας και Παληού, οι συνθήκες που επικρατούσαν την εποχή της δειγματοληψίας καθόρισαν τα αποτελέσματα, καθώς υπερίσχυσαν της επίδρασης των ΕΕΛ στην περιοχή μελέτης. Προέκυψε ότι, το θαλάσσιο περιβάλλον του Κόλπου Καβάλας ήταν υποβαθμισμένο και η κατάσταση των υδάτων του ευτροφική.

6. Βιβλιογραφία

6.1. Ελληνική

Δασενάκης Μ., Λαδάκης Μ., Καραβόλτσος Σ., Παρασκευοπούλου Β., 2015. Χημική Ωκεανογραφία (e-book), ΣΕΑΒ, Κάλυππος.

Καμίδης Ν., 2011. Περιγραφή και προσομοίωση συμπεριφοράς πλουμίου του ποταμού Νέστου – Διερεύνηση των επιπτώσεων στα εκβολικά συστήματα. Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, ΔΠΘ, Ξάνθη.

Μαριολόπουλος Η., 1982. Το κλίμα της Ελλάδος: Επιτομή. Ακαδημία Αθηνών, Κέντρον Ερεύνης Φυσικής της Ατμόσφαιρας και Κλιματολογίας, Δημοσίευμα 7.

Συλαίος Γ., Σταμάτης Ν., Καμίδης Ν., Μάρκου Δ., Πηγαδά Π., Στεργίου Δ., 2004. Επεξεργασία και αξιολόγηση του περιβάλλοντος στο Νομό Καβάλας. ΕΘΙΑΓΕ, ΙΝΑΛΕ.

6.2. Ξενόγλωσση

American Public Health Association (APHA), 1988. Standard methods for the examination of water and wastewater. Eigenferlag, APHA, Washington D.C.

Benson B.B., Krause D., Jr., 1984. The concentration and isotopic fractionation of oxygen dissolved in freshwater and seawater in equilibrium with the atmosphere. *Limnology and Oceanography*, 29(3), 620-632.

Conispoliatis N. & Lykousis V., 1986. Mineralogy of the surficial sediments of Kavala Bay, northern Aegean Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 23(5), 739-749.

Frohn L. M. & Hertel O., 2004. Atmospheric deposition of nutrients. 2-24 of: Wassmann P. & Olli K., Drainage basin nutrient inputs and eutrophication: an integrated approach. University of Tromsø, Norway.

Garnier J., Billen G., Lassaletta L., Vigiak O., Nikolaidis N., Grizzetti B., 2021. Hydromorphology of coastal zone and structure of watershed agro-food system are main determinants of coastal eutrophication. *Environmental Research Letters*, 16(2), IOP Publishing.

- Granéli E., 2004. Eutrophication and Harmful Algal Blooms. 99-112 of: Wassmann P. & Olli K., Drainage basin nutrient inputs and eutrophication: an integrated approach. University of Tromsø, Norway.
- Holmer M., 2004. Maricultures and eutrophication. 186-195 of: Wassmann P. & Olli K., Drainage basin nutrient inputs and eutrophication: an integrated approach. University of Tromsø, Norway.
- Melidis P. & Sylaios G., 2017. Assessment of Urban Pollution Footprint in a Typical Mediterranean Semi-Enclosed Gulf. *Environmental Processes*, 4(2), 421-437.
- Okaichi, T., 1989. Red tide problems in the Seto Inland Sea. 137-142 of: Okaichi T., Anderson D. M., Nemoto T., *Red Tides: Biology, Environmental Science, and Toxicology*. Elsevier, New York.
- Paerl H. W., 2004. Interactive impacts of human activities and storm events on coastal nutrient loading and eutrophication. 113-125 of: Wassmann P. & Olli K., Drainage basin nutrient inputs and eutrophication: an integrated approach. University of Tromsø, Norway.
- Parsons T.R., Maita Y., Lalli C.M., 1984. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Oxford, Pergamon Press.
- Perissoratis C., Moorby S. A., Papavasiliou C., Cronan D. S., Angelopoulos I., Sakellariadou F., Mitropoulos D., 1987. The geology and geochemistry of the surficial sediments off Thraki, northern Greece. *Marine Geology*, 74(3-4), 209-224.
- Primpas I. & Karydis M., 2011. Scaling the trophic index (TRIX) in oligotrophic marine environments. *Environmental Monitoring and Assessment*, 178(1-4), 257-269.
- Rodgers E. M., 2021. Adding climate change to the mix: responses of aquatic ectotherms to the combined effects of eutrophication and warming. *Biology Letters*, 17(10).
- Smith V.H., 2003. Eutrophication of freshwater and coastal marine ecosystems a global problem. *Environmental Science and Pollution Research*, 10(2), 126-139.
- Stamatis N., Kamidis N., Sylaios G., 2006. Sediment and suspended matter lead contamination in the Gulf of Kavala, Greece. *Environmental Monitoring and Assessment*, 115(1-3), 433-449.

Sylaios G., Kamidis N., Stamatis N., 2012. Assessment of trace metals contamination in the suspended matter and sediments of a semi-enclosed mediterranean gulf. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 21(6), 673-700.

Sylaios G., Stamatis N., Kallianiotis A., Vidoris P., 2005. Monitoring and assessment of landbased nutrient loadings, distributions and cycling within Kavala Gulf. *Water Resources Management*, 19(6), 713-735.

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.

Vollenweider R. A., Giovanardi F., Montanari G., Rinaldi A., 1998. Characterization of the trophic conditions of marine coastal waters with special reference to the NW adriatic sea: Proposal for a trophic scale, turbidity and generalized water quality index. *Environmetrics*, 9(3), 329-357.

Wassmann P. & Olli K., 2004. Drainage basin nutrient inputs and eutrophication: an integrated approach. University of Tromsø, Norway.

Yüce H., 1995. Northern Aegean water masses. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 41, 325-343.

6.3. Διαδίκτυο

Ειδική Γραμματεία Υδάτων (ΕΓΥ), Βάση δεδομένων παρακολούθησης λειτουργίας των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων, <http://astikalimata.ypeka.gr/>

Κουτσούμπας Δ., 2021. Συνέντευξη, EPTnews, <https://www.ertnews.gr/eidiseis/ellada/mporei-i-quot-thalassia-vlenna-quot-stis-aktes-toy-marmara-na-epireasei-tis-ellinikes-aktes-ti-apantoy-n-kataxiomenoi-epistimones/>

Οργανισμός Λιμένα Καβάλας Α.Ε. (ΟΛΚ), <https://www.portkavala.gr/>

Ορφανίδης Σ., 2021. Δελτίο Τύπου, Εφημερίδα «Πρωινή», <https://www.proininews.gr/amorfi-vlenna-fytoplagktoy-sto-voreio-aigaiο-fotografies/>

Meteokav, Ιδιωτικός Μετεωρολογικός Σταθμός, <https://www.meteokav.gr/>