



ΠΟΛΥΤΕΧΕΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
Σχολή Χημικών Μηχανικών και
Μηχανικών Περιβάλλοντος

Κατεύθυνση: Μηχανικών Περιβάλλοντος

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΙΛΟΤΙΚΩΝ ΑΕΡΙΖΟΜΕΝΩΝ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΩΝ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΑ ΣΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΣΤΙΚΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ ΠΑΡΑΓΙΟΥΔΑΚΗ



Επιβλέπων: Επίκουρος Καθηγητής Αλέξανδρος Στεφανάκης

ΧΑΝΙΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ, 2024

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικό σκοπό, εκπαιδευτικού ή ερευνητικού χαρακτήρα, με την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για άλλη χρήση θα πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης.



ΠΟΛΥΤΕΧΕΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
Σχολή Χημικών Μηχανικών και
Μηχανικών Περιβάλλοντος

Κατεύθυνση: Μηχανικών Περιβάλλοντος

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΙΛΟΤΙΚΩΝ ΑΕΡΙΖΟΜΕΝΩΝ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΩΝ ΜΕ
ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΑ ΣΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΣΤΙΚΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ ΠΑΡΑΓΙΟΥΔΑΚΗ

Τριμελής επιτροπή:

Επίκουρος Καθηγητής Αλέξανδρος Στεφανάκης (επιβλέπων)

Καθηγήτρια Δανάη Βενιέρη

Ομότιμος Καθηγητής Ευάγγελος Διαμαντόπουλος

Περίληψη

Ο τεχνητός υδροβιότοπος, είναι μια αναπτυσσόμενη τεχνολογία διαχείρισης υγρών αποβλήτων. Αυτή η διπλωματική εργασία, διερευνά την εφαρμογή τεχνητού αερισμού, σε τεχνητούς υδροβιότοπους κατακόρυφης ροής, ως τρόπο βελτίωσης αυτής της τεχνολογίας, για τη διαχείριση αστικών λυμάτων. Για τη διερεύνηση, χρησιμοποιήθηκαν τρεις πιλοτικοί τεχνητοί υδροβιότοποι κατακόρυφης ροής, με διαφορετικά υλικά πλήρωσης, στους οποίους εφαρμόζονταν τεχνητός αερισμός και οι οποίοι ήταν τοποθετημένοι σε έκταση του Πολυτεχνείου Κρήτης. Ως βάση για τον κάθε τεχνητό υδροβιότοπο, χρησιμοποιήθηκε μια δεξαμενή κατασκευασμένη από πολυαιθυλένιο. Τα υλικά πλήρωσης που χρησιμοποιήθηκαν, ήταν ανακυκλωμένο πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας και ασβεστολιθικό χαλί. Στους δύο από τους τρεις, φυτεύτηκε το είδος φυτού που ονομάζεται *Phragmites australis*, το οποίο είναι γνωστό και ως 'κοινό καλάμι' και ο άλλος χρησιμοποιήθηκε για έλεγχο. Η δεξαμενή η οποία περιείχε πολυαιθυλένιο και είχε φυτευτεί ονομάστηκε P, η δεξαμενή η οποία περιείχε χαλί και είχε φυτευτεί ονομάστηκε G και η δεξαμενή η οποία περιείχε πολυαιθυλένιο και χρησιμοποιήθηκε για έλεγχο ονομάστηκε C. Για τον αερισμό των τεχνητών υδροβιότοπων, χρησιμοποιήθηκε ένας αεριστήρας για τον κάθε έναν. Δοκιμάστηκαν διαφορετικές υδραυλικές φορτίσεις στο διάστημα παρακολούθησης των μονάδων, ενώ η εφαρμογή υγρού αποβλήτου λάμβανε χώρα κάθε δύο ημέρες. Τα αστικά λύματα που εφαρμόζονταν, ήταν πρωτοβάθμια εκροή από την εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων των Χανίων. Μετρήσεις γίνονται για την ποσότητα εκροής του κάθε πιλοτικού τεχνητού υδροβιότοπου. Κάθε οχτώ με δέκα ημέρες συλλέγονταν δείγμα από την πρωτοβάθμια εκροή η οποία εφαρμόζονταν και από την εκροή του κάθε υδροβιότοπου. Στα δείγματα, γινόντουσαν αναλύσεις BOD, COD, TOC, TSS, TN, NH_4^+-N , NO_3^--N , TP, $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$, pH και EC, στο Εργαστήριο **Τεχνολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος**, της σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης. Έγιναν επίσης μετρήσεις της φυτικής βιομάζας που αναπτύχθηκε στον κάθε τεχνητό υδροβιότοπο και λήφθηκαν δείγματα από τα φύλλα, τους κορμούς και τις ρίζες. Σε αυτά τα δείγματα έγιναν αναλύσεις ολικού αζώτου, ολικού φωσφόρου και μετάλλων. Στα αποτελέσματα της εργασίας, παρουσιάζονται οι τιμές των συγκεντρώσεων της εισροής, της εκροής του κάθε υδροβιότοπου, οι τιμές των απομακρύνσεων στον κάθε υδροβιότοπο και οι τιμές των μετρήσεων και των αναλύσεων της φυτικής βιομάζας. Από τις αναλύσεις που έγιναν στα δείγματα, η απομάκρυνση BOD ήταν $94,8 \pm 4,0\%$ στην P, $85,6 \pm 13,2\%$ στην G και $69,2 \pm 13,2\%$ στην C, η απομάκρυνση COD ήταν $91,0 \pm 5,6\%$ στην P, $84,2 \pm 16,0\%$ στην G και $74,9 \pm 13,5\%$ στην C, η απομάκρυνση TOC ήταν $69,5 \pm 13,0\%$ στην P, $57,3 \pm 21,6\%$ στην G και $56,2 \pm 25,1\%$ στην C, η απομάκρυνση TSS ήταν $83,4 \pm 16,0\%$ στην P, $86,0 \pm 11,2\%$ στην G και $63,6 \pm 18,9\%$ στην C, η απομάκρυνση TN ήταν $84,0 \pm 10,6\%$ στην P, $67,3 \pm 17,4\%$ στην G και $33,9 \pm 20,4\%$ στην C, η απομάκρυνση NH_4^+-N ήταν $96,1 \pm 9,0\%$ στην P, $79,5\%$ στην G και $63,9 \pm 19,0\%$ στην C, η απομάκρυνση TP ήταν $57,1 \pm 26,5\%$ στην P, $39,7 \pm 21,9\%$ στην G και $24,1 \pm 25,5\%$ στην C και η απομάκρυνση $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ ήταν $60,1 \pm 25,4\%$ στην P, $44,6 \pm 16,6\%$ στην G και $21,7 \pm 12,8\%$ στην C. Όπως αναλύεται και παρουσιάζεται στη συζήτηση αυτής της εργασίας, οι αποδόσεις και αυτές οι τιμές αποτελεσμάτων είναι ικανοποιητικές σε σχέση με παρόμοιες διερευνήσεις.

Abstract

Constructed wetland, is a developing technology for wastewater management. This diploma thesis investigates the application of artificial aeration in vertical flow-constructed wetlands with different substrates as a way of improving this technology, for wastewater management. For the investigation, three pilot vertical flow constructed wetlands were used, to which artificial aeration was applied and placed on an area of the Technical University of Crete. As the base for each wetland, a barrel made of polyethylene was used. The used substrates were pieces of recycled high-density polyethylene and gravel. The two out of the three wetlands were planted with the species of plant which is called *Phragmites australis*, which is also known as 'common reed' and the other was used as control. The polyethylene barrel was named P, the barrel that contained the gravel was named G, and the polyethylene barrel used as control barrel, was named C. One aerator for each constructed wetland was used for the aeration of the wetlands. Different hydraulic loads were used while monitoring the units, whereas the wastewater was added to each constructed wetland every second day. The municipal wastewater used was primary effluent from the wastewater treatment plant of the municipality of Chania. One day after the wastewater application and at the same time, the effluent from each wetland was measured. Every eight to ten days, a sample was collected from the primary effluent that was applied and from the effluent from each wetland. On the samples, analyses of BOD, COD, TOC, TSS, TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, TP, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, pH and EC took place, in the laboratory of environmental engineering and management of the School of Chemical and Environmental Engineering of Technical University of Crete. Measurements of the plant biomass of each wetland took place and samples from the leaves, the stems, and the roots were collected and on these samples analyses of total nitrogen, total phosphorus, and metals occurred. The results of this study present the concentration values of the effluent of each wetland, the values of the removals from each wetland, and the values of the measurements and the analyses of the biomass of the plants. From the sample analyses the BOD removal was $94,8 \pm 4,0\%$ of P, $85,6 \pm 13,2\%$ of G, and $69,2 \pm 13,2\%$ of C, the COD removal was $91,0 \pm 5,6\%$ at P, $84,2 \pm 16,0\%$ at G and $74,9 \pm 13,5\%$ at C, the TOC removal was $69,5 \pm 13,0\%$ of P, $57,3 \pm 21,6\%$ of G and $56,2 \pm 25,1\%$ of C, the TSS removal was $83,4 \pm 16,0\%$ of P, $86,0 \pm 11,2\%$ of G and $63,6 \pm 18,9\%$ of C, the TN removal was $84,0 \pm 10,6\%$ at P, $67,3 \pm 17,4\%$ at G, and $33,9 \pm 20,4\%$ at C, the $\text{NH}_4^+\text{-N}$ removal was $96,1 \pm 9,0\%$ at P, $79,5\%$ at G, and $63,9 \pm 19,0\%$ at C, the TP removal was $57,1 \pm 26,5\%$ at P, $39,7 \pm 21,9\%$ at G, and $24,1 \pm 25,5\%$ at C and the $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ removal was $60,1 \pm 25,4\%$ at P, $44,6 \pm 16,6\%$ at G, and $21,7 \pm 12,8\%$ at C. As this diploma thesis shows the results are satisfying compared to similar investigations.

Περιεχόμενα

| | |
|--|----|
| 1. Εισαγωγή | 1 |
| 1.1 Μεθοδολογία | 2 |
| 1.2 Επιστημονική πρωτοτυπία διπλωματικής εργασίας | 3 |
| 2. Θεωρητικό υπόβαθρο | 3 |
| 2.1 Αστικά λύματα | 3 |
| 2.1.1 Συστατικά | 3 |
| 2.1.2 Διαχείριση | 8 |
| 2.1.3 Το υφιστάμενο νομικό πλαίσιο επεξεργασίας αστικών λυμάτων | 9 |
| 2.2 Φυσικά συστήματα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων | 14 |
| 2.3 Τεχνητός υδροβιότοπος | 15 |
| 2.3.1 Τεχνητός υδροβιότοπος κατακόρυφης ροής | 17 |
| 2.3.2 Είδη και χρήση υλικών πλήρωσης | 20 |
| 2.3.3 Είδη και χρήση φυτών | 23 |
| 2.3.4 Τεχνητός αερισμός | 26 |
| 2.3.5 Βιολογική διαχείριση υγρών αποβλήτων | 27 |
| i) Διεργασίες προσκολλημένης βιομάζας | 27 |
| ii) Απομάκρυνση οργανικής ύλης | 28 |
| iii) Απομάκρυνση αζώτου | 30 |
| iv) Απομάκρυνση φωσφόρου | 32 |
| 2.3.6 Επίδραση της εξατμισοδιαπνοής στην απομάκρυνση των ρύπων | 33 |
| 2.3.7 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα | 34 |
| 2.4 Σκοπός διπλωματικής εργασίας | 35 |
| 3. Πειραματικό μέρος | 35 |
| 3.1 Πιλοτικοί τεχνητοί υδροβιότοποι | 35 |
| 3.1.1 Βάσεις | 35 |
| 3.1.2 Υλικά πλήρωσης | 36 |
| i) Ανακυκλωμένο πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας - rHDPE | 37 |
| ii) Χαλίκι | 37 |
| 3.1.3 Γένος και είδος φυτών | 38 |
| 3.1.4 Εφαρμογή τεχνητού αερισμού και κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας | 41 |
| 3.2 Συλλογή, μεταφορά και αποθήκευση των αστικών λυμάτων | 41 |
| 3.3 Εφαρμογή αστικών λυμάτων, μέτρηση εκροών και λήψη δειγμάτων | 41 |
| 3.4 Ονομασία δειγμάτων | 42 |
| 3.5 Τοποθεσία | 42 |
| 3.6 Κλιματολογικές συνθήκες | 43 |
| 3.7 Υπολογισμός εξατμισοδιαπνοής | 44 |
| 3.8 Αναλύσεις εισροών και εκροών | 44 |

| | |
|---|-----------|
| 3.8.1 Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο – Biochemical oxygen demand/BOD..... | 44 |
| 3.8.2 Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο – Chemical oxygen demand/COD | 45 |
| 3.8.3 Ολικός οργανικός άνθρακας – Total organic carbon/TOC | 46 |
| 3.8.4 Ολικά αιωρούμενα στερεά – Total suspended solids/TSS | 47 |
| 3.8.5 Ολικό άζωτο – Total nitrogen/TN..... | 48 |
| 3.8.6 Αμμωνιακό άζωτο – Ammonium nitrogen (NH ₄ -N) | 49 |
| 3.8.7 Νιτρικό άζωτο – Nitrate nitrogen (NO ₃ -N) | 50 |
| 3.8.8 Ολικός φώσφορος – Total phosphorus/TP | 51 |
| 3.8.9 Φώσφορος ορθοφωσφορικών – Orthophosphate as phosphorus (PO ₄ -P) | 51 |
| 3.8.10 Συγκέντρωση ιόντων υδρογόνου – Potential of hydrogen/pH | 52 |
| 3.8.11 Ηλεκτρική αγωγιμότητα – Electrical conductivity/EC..... | 52 |
| 3.9 Μετρήσεις και αναλύσεις φυτικής βιομάζας..... | 52 |
| 3.9.1 Μέτρηση πλήθους, μήκους και βάρους | 55 |
| 3.9.2 Υπολογισμός υγρασίας | 56 |
| 3.9.3 Ολικό άζωτο..... | 56 |
| 3.9.4 Ολικός φώσφορος..... | 56 |
| 3.9.5 Μέταλλα | 57 |
| 3.10 Υπολογισμός απομακρύνσεων..... | 57 |
| 4. Αποτελέσματα..... | 58 |
| 4.1 Εξατμισοδιαπνοή..... | 58 |
| 4.2 Αναλύσεις εισροών..... | 58 |
| 4.3 Αναλύσεις εκροών | 58 |
| 4.3.1 Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο – Biochemical oxygen demand/BOD..... | 58 |
| 4.3.2 Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο – Chemical oxygen demand/COD | 60 |
| 4.3.3 Ολικός οργανικός άνθρακας – Total organic carbon/TOC | 61 |
| 4.3.4 Ολικά αιωρούμενα στερεά – Total suspended solids/TSS | 62 |
| 4.3.5 Ολικό άζωτο – Total nitrogen/TN..... | 63 |
| 4.3.6 Αμμωνιακό άζωτο – Ammonium nitrogen (NH ₄ -N) | 65 |
| 4.3.7 Νιτρικό άζωτο – Nitrate nitrogen (NO ₃ -N) | 66 |
| 4.3.8 Ολικός φώσφορος – Total phosphorus/TP | 67 |
| 4.3.9 Φώσφορος ορθοφωσφορικών – Orthophosphate as phosphorus (PO ₄ -P) | 68 |
| 4.3.10 pH..... | 69 |
| 4.3.11 Ηλεκτρική αγωγιμότητα – Electrical conductivity/EC..... | 70 |
| 4.4 Μετρήσεις και αναλύσεις φυτικής βιομάζας..... | 71 |
| 4.4.1 Πλήθος, μήκος και βάρος..... | 71 |
| 4.4.2 Υγρασία | 72 |
| 4.4.3 Ολικό άζωτο..... | 72 |
| 4.4.4 Ολικός φώσφορος..... | 73 |

| | |
|---|------------|
| 4.4.5 Μέταλλα | 74 |
| 5. Συζήτηση | 75 |
| 5.1 Συγκεντρώσεις εισροής και εκροής και εκατοστιαίες απομακρύνσεις | 75 |
| 5.2 Επίδραση του υλικού πλήρωσης | 76 |
| 5.3 Επίδραση της ύπαρξης φυτικής βιομάζας..... | 80 |
| 5.4 Επίδραση επιφανειακής φόρτισης και απαραίτητη επιφάνεια | 85 |
| 5.5 Επίδραση εφαρμογής τεχνητού αερισμού..... | 86 |
| 5.6 Επίδραση θερμοκρασίας | 89 |
| 5.7 Έλεγχος απόρριψης | 89 |
| 6. Συμπεράσματα | 95 |
| 6.1 Προτάσεις..... | 96 |
| 7. Βιβλιογραφία..... | 96 |
| 7.1 Ελληνική..... | 96 |
| 7.2 Διεθνής..... | 97 |
| 7.3 Ιστοσελίδες | 101 |
| 8. Παραρτήματα | 102 |
| 8.1 Αποτελέσματα μετρήσεων εισροών και εκροών..... | 102 |
| 8.2 Αποτελέσματα αναλύσεων | 104 |

1. Εισαγωγή

Ο τεχνητός υδροβιότοπος, είναι μια αναπτυσσόμενη τεχνολογία διαχείρισης υγρών αποβλήτων. Είναι ένας τύπος των φυσικών συστημάτων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, που σημαίνει ότι αξιοποιεί φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες που συμβαίνουν στη φύση για τη διαχείριση υγρών αποβλήτων. Είναι μια τεχνολογία, φιλική προς το περιβάλλον καθώς δεν καταναλώνει ηλεκτρική ενέργεια, άρα μειώνεται η παραγωγή ρύπων, διοξειδίου του άνθρακα και άλλων αερίων του θερμοκηπίου και δεν είναι απαραίτητη η χρήση χημικών και οικονομική, καθώς έχει χαμηλό κόστος κατασκευής, λειτουργίας και συντήρησης. Δύο ακόμα πλεονεκτήματα, είναι η παραγωγή νερού άρδευσης και η μη παραγωγή ιλύος. Ένας τεχνητός υδροβιότοπος, αποτελείται από μια κλίνη που περιέχει υλικό πλήρωσης και στο οποίο έχει φυτευτεί κάποιο είδος φυτού. Τα υγρά απόβλητα, εφαρμόζονται εντός της κλίνης, στην οποία συμβαίνουν φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες που συμβαίνουν στη φύση και η εκροή είναι κατάλληλη για απόρριψη ή επαναχρησιμοποίηση. Αυτή η τεχνολογία, είναι ένας ορισμός της κυκλικής οικονομίας, καθώς χρησιμοποιεί κάτι το οποίο είναι απαραίτητο να διαχειριστεί και που είναι διαθέσιμο, το διαχειρίζεται με αξιοποίηση φυσικών διεργασιών και επιφέρει οικονομικά οφέλη. Αναλόγως τα υγρά απόβλητα τα οποία διαχειρίζονται, το οικονομικό όφελος, προέρχεται από κάποιο προϊόν της διαχείρισης, όπως το νερό άρδευσης, ή από τη λήψη κάποιας επιβράβευσης, όπως τα 'carbon credits', λόγω του ότι μειώνεται η παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα για τη διαχείριση των υγρών αποβλήτων.

Σε αυτήν τη διπλωματική εργασία, διερευνάται η εφαρμογή τεχνητού αερισμού σε τεχνητούς υδροβιότοπους κατακόρυφης ροής για τη διαχείριση αστικών λυμάτων. Με την εφαρμογή τεχνητού αερισμού, σε έναν τεχνητό υδροβιότοπο, ενισχύονται αερόβιες βιολογικές διεργασίες, λόγω αύξησης του διαθέσιμου οξυγόνου στα υγρά απόβλητα εντός της κλίνης, όπως η αερόβια οξείδωση, κατά την οποία απομακρύνεται οργανική ύλη, η νιτροποίηση, κατά την οποία απομακρύνεται άζωτο και οι διεργασίες προσκολλημένης βιομάζας. Με την αύξηση της αποδοτικότητας αυτών των διεργασιών, μειώνεται η απαραίτητη επιφάνεια του τεχνητού υδροβιότοπου ή ο απαραίτητος υδραυλικός χρόνος παραμονής των υγρών αποβλήτων εντός της κλίνης ή και τα δύο για τη διαχείριση των υγρών αποβλήτων με χρήση αυτής της τεχνολογίας. Για τη διερεύνηση, χρησιμοποιούνται τρεις πιλοτικοί τεχνητοί υδροβιότοποι κατακόρυφης ροής, στους οποίους εφαρμόζεται τεχνητός αερισμός και οι οποίοι είναι τοποθετημένοι σε έκταση του Πολυτεχνείου Κρήτης. Περιέχουν διαφορετικά υλικά πλήρωσης και στους δύο από τους τρεις, έχει φυτευτεί το ίδιο είδος φυτού. Στον κάθε πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο, εφαρμόζονται αστικά λύματα, τα οποία είναι πρωτοβάθμια εκροή, από την εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων του νομού Χανίων. Πρωτοβάθμια εκροή, είναι η εκροή υγρών αποβλήτων τα οποία έχουν υποβληθεί σε πρωτοβάθμια επεξεργασία και για τα αστικά λύματα είναι η εκροή από τη δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης. Από αναλύσεις και μετρήσεις που γίνονται σε δείγματα αστικών λυμάτων τα οποία εφαρμόζονται, των εκροών και της φυτικής βιομάζας του κάθε υδροβιότοπου, γίνεται αξιολόγηση της εφαρμογής τεχνητού αερισμού σε τεχνητούς υδροβιότοπους κατακόρυφης ροής για διαχείριση αστικών λυμάτων.

Ο πλανήτης βρίσκεται σε μια κρίσιμη κατάσταση η οποία είναι δύσκολο να αλλάξει. Η ύπαρξη διαφορετικών πολιτικών και οικονομικών συμφερόντων δεν επιτρέπει την πραγματοποίηση απαραίτητων αλλαγών, όπως η αλλαγή του ορίου των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα, στην Ευρώπη. Ταυτόχρονα, για τους ίδιους λόγους και λόγω έλλειψης πολιτικής σταθερότητας, σε παγκόσμιο επίπεδο, η συνεργασία μεταξύ πολλών κρατών, η οποία είναι απαραίτητη, είναι δύσκολη. Χαρακτηριστικό παράδειγμα, είναι το ότι η Αμερική, ενώ είχε συμφωνήσει για συνεργασία με τη 'Συμφωνία του Παρισιού', έκανε πίσω όταν άλλαξε η κυβέρνησή της. Ο στόχος μάλιστα που τέθηκε σε αυτήν, το 2015, για το να μην αυξηθεί περισσότερο από 1,5°C, η μέση θερμοκρασία του πλανήτη, δεν επιτεύχθηκε, καθώς σε λιγότερο από επτά χρόνια η μέση θερμοκρασία του πλανήτη είχε αυξηθεί περισσότερο από 1,5°C. Το έτος 2023 μάλιστα, ήταν το πιο θερμό έτος το οποίο έχει καταγραφεί, με τη μέση θερμοκρασία του πλανήτη να είναι κατά 0,83°C υψηλότερη σε σχέση με το 2022. Ο λανθασμένος τρόπος ενημέρωσης των πολιτών από τους επιστήμονες, όπως το ότι επέλεξαν να ενημερώσουν για 'κλιματική αλλαγή' και 'καταστροφή του στρώματος του

όζοντος' από τα οποία οι περισσότεροι πολίτες δεν γνωρίζουν το πόσο πολύ μπορούν να επηρεαστούν αυτοί και ο πλανήτης, έχει οδηγήσει σε μη σωστή/κατάλληλη ενημέρωση της πλειοψηφίας των πολιτών για την κρισιμότητα της κατάστασης του πλανήτη, στη μη ευαισθητοποίηση και κινητοποίησή τους και στη δημιουργία λανθασμένων αντιλήψεων. Για τον ίδιο λόγο, γίνεται ακόμα πιο δύσκολο το να συνεργαστούν κράτη μεταξύ τους.

Η χρησιμοποίηση τεχνολογιών, οι οποίες είναι φιλικές προς το περιβάλλον και οικονομικές, είναι απαραίτητη για την εξασφάλιση ενός υγιούς πλανήτη και μιας δυνατής οικονομίας για τις επόμενες γενεές και τη μετάβαση σε κυκλική οικονομία. Για αυτό, είναι απαραίτητη η περεταίρω διερεύνηση και χρησιμοποίηση της τεχνολογίας του τεχνητού υγροβιότοπου.

1.1 Μεθοδολογία

Για τη διερεύνηση, χρησιμοποιήθηκαν τρεις πιλοτικοί τεχνητοί υγροβιότοποι κατακόρυφης ροής, στους οποίους εφαρμόζονταν τεχνητός αερισμός και οι οποίοι είναι τοποθετημένοι σε έκταση του Πολυτεχνείου Κρήτης. Ως βάση για τον κάθε υγροβιότοπο, χρησιμοποιήθηκε μια μονάδα κατασκευασμένη από πολυαιθυλένιο. Τα υλικά πλήρωσης που χρησιμοποιήθηκαν, ήταν ανακυκλωμένο πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας στους δύο και χαλίκι στον άλλον. Στον έναν πιλοτικό τεχνητό υγροβιότοπο που περιείχε ανακυκλωμένο πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας και στον πιλοτικό τεχνητό υγροβιότοπο που περιείχε χαλίκι, φυτεύτηκε το είδος φυτού που ονομάζεται *Phragmites australis*, το οποίο είναι γνωστό και ως 'κοινό καλάμι'. Για τον αερισμό των τεχνητών υγροβιότοπων, χρησιμοποιήθηκε ένας αεριστήρας για τον κάθε έναν.



Εικόνα 1.1 Οι πιλοτικοί τεχνητοί υγροβιότοποι, την πρώτη ημέρα της διερεύνησης.

Οι πιλοτικοί τεχνητοί υγροβιότοποι, που χρησιμοποιήθηκαν για τη διερεύνηση, κατασκευάστηκαν τον Απρίλιο του 2021 και τα φυτά, φυτεύτηκαν το Μάιο του 2021. Για έναν χρόνο, από τον Ιούλιο του 2021 μέχρι και τον Ιούλιο του 2022, οι πιλοτικοί τεχνητοί υγροβιότοποι χρησιμοποιούνταν για διερεύνηση σε έκταση του Πολυτεχνείου Κρήτης, χωρίς εφαρμογή τεχνητού αερισμού. Η εφαρμογή τεχνητού αερισμού, ξεκίνησε τον Ιούλιο του 2022 και συνεχίστηκε μέχρι και την ολοκλήρωση της διερεύνησης, τον Ιούνιο του 2023.

Από τις 7 Ιανουαρίου 2023 μέχρι και τις 5 Μαΐου 2023, 12 L και από τις 7 Μαΐου 2023 μέχρι και τις 8 Ιουνίου 2023, 16 L, αστικών λυμάτων, εφαρμόζονταν στον κάθε πιλοτικό τεχνητό υγροβιότοπο, κάθε δύο ημέρες. Τα αστικά λύματα που εφαρμόζονταν, ήταν πρωτοβάθμια εκροή από την εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων του νομού Χανίων. Συλλέγονταν δείγμα από την πρωτοβάθμια εκροή η οποία εφαρμόζονταν και κάθε οχτώ με δέκα ημέρες, κατά τη διάρκεια εφαρμογής των αστικών λυμάτων, συλλέγονταν δείγμα από την εκροή του κάθε πιλοτικού τεχνητού υγροβιότοπου. Στα τέσσερα δείγματα, γινόντουσαν

αναλύσεις βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου – biochemical oxygen demand/BOD, χημικά απαιτούμενου οξυγόνου – chemical oxygen demand/COD, ολικού οργανικού άνθρακα – total organic carbon/TOC, ολικών αιωρούμενων στερεών – total suspended solids/TSS, ολικού αζώτου – total nitrogen/TN, αμμωνιακού αζώτου – ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), νιτρικού αζώτου – nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^-\text{-N}$), ολικού φωσφόρου – total phosphorus/TP, φωσφόρου ορθοφωσφορικών – orthophosphate as phosphorus ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$), συγκέντρωση ιόντων υδρογόνου – potential of hydrogen/pH και ηλεκτρικής αγωγιμότητας – electrical conductivity/EC, στο εργαστήριο **τεχνολογίας και διαχείρισης περιβάλλοντος**, της σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης. Την επόμενη ημέρα από την εφαρμογή των λυμάτων και την ίδια ώρα, μετρίονταν η ποσότητα εκροής του κάθε πιλοτικού τεχνητού υγροβιότοπου που είχε φυτευτεί. Υπολογίστηκε η εξατμισοδιαπνοή στον κάθε υγροβιότοπο και η εκατοστιαία απομάκρυνση του κάθε συστατικού. Έγιναν μετρήσεις της φυτικής βιομάζας του κάθε τεχνητού υγροβιότοπου, λήφθηκαν δείγματα από τα φύλλα, τους κορμούς και τις ρίζες και σε αυτά τα δείγματα έγιναν αναλύσεις ολικού αζώτου, ολικού φωσφόρου και μετάλλων.

1.2 Επιστημονική πρωτοτυπία διπλωματικής εργασίας

Η επιστημονική πρωτοτυπία της διπλωματικής εργασίας, είναι η εφαρμογή τεχνητού αερισμού σε πιλοτικούς τεχνητούς υγροβιότοπους, για τη διαχείριση αστικών λυμάτων. Ο τεχνητός αερισμός, αυξάνει τη συγκέντρωση οξυγόνου στα αστικά λύματα και έτσι ενισχύονται διεργασίες στις οποίες είναι απαραίτητο το οξυγόνο. Οι τιμές των απομακρύνσεων, των συστατικών, που είναι απαραίτητο να απομακρυνθούν, αυξάνονται, με αποτέλεσμα, να είναι μικρότερη η απαραίτητη επιφάνεια ή μικρότερος ο χρόνος παραμονής ή και τα δύο.

2. Θεωρητικό υπόβαθρο

2.1 Αστικά λύματα

Αστικά λύματα, ορίζονται τα οικιακά λύματα ή το μείγμα οικιακών με βιομηχανικά υγρά απόβλητα ή και όμβρια ύδατα (Άρθρο 2 της ΚΥΑ 5673/400/1997). Τα υγρά απόβλητα προέρχονται από το νερό που τροφοδοτείται σε ένα οικισμό, αφού πρώτα χρησιμοποιηθεί σε πληθώρα εφαρμογών. Ορίζονται ως το σύνολο των υγρών απορροών ή των ρύπων που μεταφέρονται και απομακρύνονται από κατοικίες, ιδρύματα, εμπορικές και βιομηχανικές εγκαταστάσεις, μαζί με υπόγεια ύδατα, επιφανειακά νερά και όμβρια ύδατα που πιθανώς να υπάρχουν στην περιοχή. Τα ανεπεξέργαστα υγρά απόβλητα περιέχουν οργανικό υλικό και παθογόνους μικροοργανισμούς που προέρχονται από το ανθρώπινο εντερικό σύστημα. Επιπρόσθετα, περιέχουν θρεπτικά συστατικά, τα οποία επιταχύνουν την ανάπτυξη των υδρόβιων φυτών, ενώ μπορεί να περιέχουν τοξικά συστατικά ή ενώσεις που δυνητικά μπορεί να είναι μεταλλαξιογόνες ή καρκινογόνες (Metcalf & Eddy 2003).

2.1.1 Συστατικά

Η κατανόηση της φύσης των υγρών αποβλήτων είναι απαραίτητη για το σχεδιασμό των διαδικασιών συλλογής, διαχείρισης και επαναχρησιμοποίησης αυτών. Τα υγρά απόβλητα χαρακτηρίζονται με όρους της φυσικής, χημικής και βιολογικής σύνθεσής τους.

Φυσικά χαρακτηριστικά

Στερεά

Το πιο σημαντικό φυσικό χαρακτηριστικό των υγρών αποβλήτων είναι η περιεκτικότητά τους σε ολικά στερεά (total solids), τα οποία αποτελούνται από επιπλέοντα, καθιζάνοντα, κολλοειδή και διαλυμένα υλικά. Τα υγρά απόβλητα περιέχουν μια ποικιλία στερεών υλικών από διάφορα κουρέλια έως κολλοειδή υλικά. Τυπικά, γύρω στο 60% των αιωρούμενων

στερεών σε αστικά υγρά απόβλητα καθιζάνουν. Η ανάλυση των στερεών ενός δείγματος, χρησιμοποιούνται για να εκτιμηθούν οι δυνατότητες επαναχρησιμοποίησης των υγρών αποβλήτων και για να προσδιοριστούν οι κατάλληλες μέθοδοι και διαδικασίες για τη διαχείρισή τους.

Ολικά στερεά – Total solids/TS

Ολικά στερεά, είναι το στερεό υπόλειμμα που μένει σε ένα δοχείο μετά την εξάτμιση του δείγματος και την ξήρανσή του για μια ώρα σε φούρνο στους 103-105°C. Χωρίζονται σε αιωρούμενα και διαλυμένα και έχουν τιμή 80-100g ανά κάτοικο ανά ημέρα.

Ολικά αιωρούμενα στερεά - Total suspended solids/TSS

Ολικά αιωρούμενα στερεά, είναι το τμήμα των αιωρούμενων στερεών που παραμένει σε φίλτρο από ίνες γυαλιού με άνοιγμα πόρων 0,45-2,0μm. Είναι αντιστρόφως ανάλογα με το άνοιγμα πόρων και τα αιωρούμενα στερεά που καλύπτουν τους πόρους του φίλτρου, χρησιμεύουν ως νέο φίλτρο. Δημιουργούν θολερότητα (εκτροπή ή απορρόφηση φωτός) η οποία περιορίζει τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης και παραγωγής φυτοπλαγκτόν. Παρέχουν προστασία στους παθογόνους μικροοργανισμούς έναντι των διαδικασιών καταστροφής τους και επηρεάζουν τη μεταφορά συστατικών, όπως του οξυγόνου μεταξύ ατμόσφαιρας και νερού. Η μέτρηση των ολικών αιωρούμενων στερεών χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της λειτουργίας των εγκαταστάσεων επεξεργασίας αποβλήτων.

Ολικά διαλυμένα στερεά – Total dissolved solids/TDS

Ολικά διαλυμένα στερεά είναι τα στερεά τα οποία περνάνε από φίλτρο από ίνες γυαλιού με άνοιγμα πόρων 0,45-2,0μm και πάνε στο διήθημα. Οφείλονται στην παρουσία ευδιάλυτων ανόργανων αλάτων (χλωριούχα, θειικά, νιτρώδη) και χαρακτηρίζουν την ηλεκτρική αγωγιμότητα του αποβλήτου. Υψηλή ιοντική ισχύς – ηλεκτρική αγωγιμότητα παρεμποδίζει την ανάπτυξη μικροοργανισμών στις διεργασίες βιολογικής οξείδωσης και περιορίζει τη δυνατότητα απορρόφησης στο έδαφος. Η τιμή τους στο πόσιμο νερό είναι μικρότερη από 500μg/L, σε ποτάμι είναι μικρότερη από 1.500μg/L και στη θάλασσα είναι μεγαλύτερη από 5.000g/L.

$$\text{Ολικά στερεά/TS} = \text{ολικά αιωρούμενα στερεά/TSS} + \text{ολικά διαλυμένα στερεά/TDS}$$

$$\text{Ολικά αιωρούμενα στερεά/TSS} = \text{πηκτικά στερεά/VS} + \text{σταθερά στερεά/FS}$$

Αγωγιμότητα

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα (Electrical conductivity/EC) του νερού αποτελεί ένα μέτρο της ικανότητας ενός διαλύματος να άγει ηλεκτρικό ρεύμα. Επειδή το ηλεκτρικό ρεύμα μεταφέρεται με τα ιόντα του διαλύματος, η αγωγιμότητα αυξάνει όσο η συγκέντρωση των ιόντων αυξάνει. Ως αποτέλεσμα, η μετρηθείσα τιμή αγωγιμότητας χρησιμοποιείται ως αντιπροσωπευτικό μέτρο της συγκέντρωσης των ολικών διαλυμένων στερεών (Total dissolved solids/TDS) σε ένα δείγμα. Επίσης, η αγωγιμότητα του νερού είναι μια από τις παραμέτρους που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της καταλληλότητας αυτού για άρδευση. Η αλατότητα των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων που προορίζονται για άρδευση εκτιμάται με τη μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα σε μονάδες SI μετράται σε mS/m (Metcalf & Eddy 2003).

Ανόργανα συστατικά

pH

Η συγκέντρωση των ιόντων υδρογόνου είναι μια ποιοτική παράμετρος που χαρακτηρίζει τόσο τα υγρά απόβλητα. Η συγκέντρωση ιόντων υδρογόνου εκφράζεται συνήθως ως pH, το οποίο ορίζεται ως ο αρνητικός λογάριθμος της συγκέντρωσης ιόντων υδρογόνου.

$$\text{pH} = -\log_{10}[\text{H}^+]$$

Για επεξεργασμένα υγρά απόβλητα, τα οποία διατίθενται στο περιβάλλον, το επιτρεπτό εύρος pH κυμαίνεται από 6,5 έως 8,5 (Metcalf & Eddy 2003).

Αζωτο

Το στοιχείο άζωτο είναι απαραίτητο για την ανάπτυξη των μικροοργανισμών, των φυτών και των ζώων. Είναι συστατικό όλων των πρωτεϊνών, οι οποίες εμπλέκονται σχεδόν σε κάθε βιοχημική διεργασία που λαμβάνει χώρα σε ζώντες οργανισμούς. Οι μορφές του αζώτου, στα υγρά απόβλητα, είναι η αμμωνία (NH_3), το αμμώνιο (NH_4^+), το αέριο άζωτο (N_2), τα νιτρώδη (NO_2^-) και τα νιτρικά (NO_3^-). Η σχετική περιεκτικότητα σε αμμωνία είναι ενδεικτική της ηλικίας των υγρών αποβλήτων. Το άζωτο, N_2 , είναι ένα αδρανές στοιχείο, λόγω της σταθερότητας του τριπλού δεσμού αζώτου-αζώτου.

Μορφές αζώτου

Το άζωτο έχει επτά στάδια οξειδωσης.

Πίνακας 2.1 Οξειδωτικά στάδια του αζώτου.

| Οξειδωτική κατάσταση | Μορφή αζώτου |
|----------------------|------------------------|
| -3 | NH_3 |
| 0 | N_2 |
| 1 | N_2O |
| 2 | NO |
| 3 | N_2O_3 |
| 4 | NO_2 |
| 5 | N_2O_5 |

Πίνακας 2.2 Οι όροι που χρησιμοποιούνται για να ορίσουν μορφές αζώτου (Metcalf & Eddy 2003).

| Μορφή αζώτου | Σύντμηση | Προσδιορισμός |
|-----------------------|-----------------------|---|
| Αέρια αμμωνία | NH_3 | NH_3 |
| Αμμώνιο | NH_4^+ | NH_4^+ |
| Ολικό αμμωνιακό άζωτο | TAN^a | $\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+$ |
| Νιτρώδη | NO_2^- | NO_2^- |
| Νιτρικά | NO_3^- | NO_3^- |
| Ολικό ανόργανο άζωτο | TIN^a | $\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+ + \text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$ |
| Ολικό άζωτο Kjeldahl | TKN^a | Οργανικό $\text{N} + \text{NH}_3 + \text{NH}_4^+$ |
| Οργανικό άζωτο | Οργανικό N^a | $\text{TKN} - (\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+)$ |
| Ολικό άζωτο | TN^a | Οργανικό $\text{N}^a + \text{NH}_3 + \text{NH}_4^+ + \text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$ |

^a Εκφράζεται ως N

Ο κύκλος του αζώτου στη φύση

Το περισσότερο διαθέσιμο άζωτο του πλανήτη, υπάρχει ως αέριο άζωτο, διάζωτο, N_2 , στην ατμόσφαιρα, η οποία αποτελείται από 78,1% N_2 , κατά μάζα. Το αέριο άζωτο, το οποίο ονομάζεται 'άζωτο', είναι άχρωμο, αεριώδες στοιχείο και συγκεντρώθηκε στην ατμόσφαιρα λόγω της σχετικής χημικής του αδράνειας. Εμφανίζεται σε ουσίες φυτικές και ζωικές. Οι περισσότεροι οργανισμοί, δεν μπορούν να χρησιμοποιήσουν το αέριο άζωτο της ατμόσφαιρας για να καλύψουν τις σχετικές τους ανάγκες. Η φυσική δέσμευση του αερίου αζώτου, πραγματοποιείται είτε με βιολογικές διεργασίες, είτε με φυσικοχημικές διεργασίες, κυρίως με την επίδραση ηλεκτρικών εκκενώσεων των καταιγίδων. Η βιολογική δέσμευση

πραγματοποιείται από ετερότροφους και κάποιους αυτότροφους-φωτοσυνθετικούς μικροοργανισμούς. Ορισμένα βακτήρια του εδάφους και βακτήρια που ζουν σε ρίζες φυτών, μπορούν να καθηλώνουν άζωτο, δηλαδή να μετατρέπουν το αέριο άζωτο, σε αμμωνιακές και νιτρικές ενώσεις. Τα φυτά, χρησιμοποιούν αυτές τις απλές ενώσεις του αζώτου για να φτιάχνουν πρωτεΐνες και άλλες πολύπλοκες αζωτούχες ενώσεις. Κάποια ζώα τρώνε τα φυτά και άλλα ζώα, σαρκοφάγα, τρώνε αυτά τα ζώα. Με αυτόν τον τρόπο, εφοδιάζονται με το απαραίτητο οργανικό άζωτο όλοι οι οργανισμοί. Το άζωτο που υπάρχει στα υγρά απόβλητα, αποτελείται κυρίως από οργανικό άζωτο, πρωτεϊνικό υλικό και ουρία. Βακτήρια, μετατρέπουν την οργανική μορφή του αζώτου σε αμμωνία. Σε αερόβιο περιβάλλον, βακτήρια οξειδώνουν το αμμωνιακό άζωτο σε νιτρώδη και νιτρικά. Τα νιτρικά, χρησιμοποιούνται από τα φυτά και τα ζώα για τη δημιουργία πρωτεϊνών. Βακτήρια που υπάρχουν σε οργανική ύλη, η οποία βρίσκεται σε αποσύνθεση, αποικοδομούν και μετατρέπουν τις οργανικές μορφές αζώτου, αζωτούχες ενώσεις, σε αέριο άζωτο και αμμωνία. Το μεγαλύτερο μέρος από αυτό το άζωτο παραμένει στο έδαφος ή στο νερό με μορφή νιτρικών ή αμμωνιακών αλάτων και ξαναχρησιμοποιείται από τα φυτά. Ένα μέρος, ελευθερώνεται ως αέριο άζωτο στην ατμόσφαιρα και κάποιες ποσότητες αζώτου, καθιζάνουν ως ιζήματα στους βυθούς των ωκεανών (Ebbing and Gammon 2014).

Το άζωτο ονομάζεται οργανικό άζωτο όταν βρίσκεται σε μορφή αζωτούχων οργανικών ενώσεων και υπολογίζεται με την τεχνική χώνευσης, μετατροπή σε ιόντα αμμωνίου, Kjeldahl, η οποία δίνει το ολικό άζωτο κατά Kjeldahl, total Kjeldahl nitrogen, TKN, αν δεν έχει γίνει αφαίρεση του αμμωνιακού αζώτου πριν από τη χώνευση (Metcalf & Eddy 2003).

Φώσφορος

Ο φώσφορος, είναι ένα αμέταλλο χημικό στοιχείο, ευρύτατα διαδεδομένο στη φύση και βρίσκεται σε χρώμα λευκό, ερυθρό ή μαύρο. Είναι ισχυρό αναγωγικό μέσο, έχει ύψιστη βιολογική σπουδαιότητα για τον άνθρωπο και τα ζώα και λαμβάνεται από τα τρόφιμα. Οι μορφές του φωσφόρου στα υγρά απόβλητα, είναι τα ορθοφωσφορικά (PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , H_2PO_4^- , H_3PO_4), τα πυροφωσφορικά, μεταφωσφορικά και πολυφωσφορικά και οργανικού φωσφόρου, οργανικά φωσφορικά. Το άζωτο και ο φώσφορος είναι γνωστά ως θρεπτικά συστατικά. Τα οικιακά υγρά απόβλητα, μπορεί να περιέχουν από 4 έως 16 mg/L φωσφόρου. Τα όρια του φωσφόρου στην εκροή μιας εγκατάστασης διαχείρισης αποβλήτων, είναι εντός του εύρους 0,1-2,0mg/L, ανάλογα με τη θέση της μονάδας και τις πιθανές επιπτώσεις στον αποδέκτη. Ο φώσφορος, αν υπάρχει σε συγκέντρωση μεγαλύτερη από 2mg/L, προκαλεί ευτροφισμό. Ευτροφισμός ονομάζεται ο εμπλουτισμός των υδάτων με θρεπτικές ουσίες, ιδίως ενώσεις αζώτου ή/και φωσφόρου, που προκαλεί την ταχύτερη ανάπτυξη φυκιών και ανώτερων μορφών φυτικής ζωής, με συνακόλουθη ανεπιθύμητη διαταραχή της ισορροπίας των οργανισμών στα ύδατα και υποβάθμιση της ποιότητας των εν λόγω υδάτων (Άρθρο 2, ΚΥΑ 5673/400/1997).

Συσσωματωμένα οργανικά συστατικά

Τα οργανικά συστατικά, αποτελούνται από ένα συνδυασμό άνθρακα, υδρογόνου και οξυγόνου, μαζί με άζωτο σε ορισμένες περιπτώσεις. Το οργανικό υλικό των υγρών αποβλήτων, αποτελείται από πρωτεΐνες (40-60%), υδρογονάνθρακες (25-50%) και λίπη και έλαια (8-12%). Η απομάκρυνση των οργανικών συστατικών και ενώσεων από τα υγρά απόβλητα γίνεται προκειμένου να αποτραπεί η εκτεταμένη μείωση του διαλυμένου οξυγόνου στα νερά του αποδέκτη, να απομακρυνθούν κολλοειδή και αιωρούμενα στερεά προκειμένου να αποφευχθεί συσσώρευση στερεών και δημιουργία μη θεμιτών συνθηκών στα νερά του αποδέκτη και να μειωθεί η συγκέντρωση των παθογόνων οργανισμών που ελκύονται στα νερά του αποδέκτη. Οι εργαστηριακές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση μεγάλων ποσοτήτων οργανικού υλικού, μεγαλύτερο από 1 mg/L, στα υγρά απόβλητα, περιλαμβάνουν το βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο – biochemical oxygen demand/BOD, το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο – chemical oxygen demand/COD και τον ολικό οργανικό άνθρακα – total organic carbon/TOC.

Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο - Biochemical oxygen demand/BOD

Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο, είναι η ποσότητα του διαλυμένου οξυγόνου που απαιτείται από τους μικροοργανισμούς για την πλήρη βιοχημική οξείδωση των οργανικών ουσιών που περιέχει ένα δείγμα υγρών αποβλήτων. Η παράμετρος που χρησιμοποιείται για αυτήν τη μέτρηση, είναι το βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο πέντε ημερών - BOD₅.

Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο - Chemical oxygen demand/COD

Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο, είναι η ποσότητα του οξυγόνου που απαιτείται για τη χημική οξείδωση της οργανικής ύλης σε διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) και νερό (H₂O). Η οξείδωση αφορά το σύνολο των οργανικών ενώσεων που περιέχονται σε ένα δείγμα και μπορούν να οξειδωθούν με ένα ισχυρό οξειδωτικό μέσο, για παράδειγμα διχρωμικό κάλιο σε όξινο περιβάλλον. Η μέτρηση του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου, χρησιμοποιείται αντί της μέτρησης του βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου ή συμπληρωματικά. Η μέτρηση ολοκληρώνεται σε 2-3 ώρες. Μετράται η βιοδιασπάσιμη αλλά και η μη βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη, για αυτό, συγκριτικά με το βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο, το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο μας δίνει λιγότερες πληροφορίες

Ολικός οργανικός άνθρακας - Total organic carbon/TOC

Ο ολικός οργανικός άνθρακας, είναι ένα κατάλληλο μέτρο για μετρήσεις μικρών συγκεντρώσεων οργανικής ύλης, οι οποίες είναι απαραίτητες στην παραγωγή πόσιμου νερού. Η ανάλυση του ολικού οργανικού άνθρακα χρησιμοποιεί θερμότητα, οξυγόνο υπεριώδη ακτινοβολία, χημικά οξειδωτικά ή ένα συνδυασμό των παραπάνω για τη μετατροπή του οργανικού άνθρακα σε διοξείδιο του άνθρακα, το οποίο μετράται με τη βοήθεια υπέρυθρου αναλυτή ή με άλλες μεθόδους. Ο ολικός οργανικός άνθρακας των υγρών αποβλήτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέτρο των ρυπογόνων συστατικών. Η ανάλυση του ολικού οργανικού άνθρακα έχει το πλεονέκτημα ότι ολοκληρώνεται σε 5 με 10 λεπτά. Τα κυριότερα κλάσματά του, είναι ο ολικός οργανικός άνθρακας σε σωματιδιακή μορφή και ο διαλυτός ολικός οργανικός άνθρακας-dissolved total organic carbon/DTOC (Metcalf & Eddy 2003).

Πίνακας 2.3 Τιμές ανεπεξέργαστων υγρών αποβλήτων.

| Παράμετρος | Συγκέντρωση (mg/L) | | |
|-------------------------|--------------------|--------|-------|
| | Χαμηλή | Μεσαία | Υψηλή |
| BOD ₅ (20°C) | 110 | 220 | 400 |
| COD | 250 | 590 | 1.000 |
| TOC | 80 | 160 | 290 |

Συσχετίσεις μεταξύ BOD, COD και TOC

Ο λόγος BOD/COD, προσδιορίζεται για την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου διαχείρισης των υγρών αποβλήτων και έχει μέγιστη τιμή ίση με ένα. Εάν ο λόγος, για ανεπεξέργαστα απόβλητα, είναι ίσος με 0,5 ή μεγαλύτερος, τότε τα απόβλητα θεωρούνται ότι είναι εύκολα επεξεργάσιμα με βιολογικές μεθόδους. Αν είναι μικρότερος από 0,3, τότε τα απόβλητα μπορεί να περιέχουν ορισμένα τοξικά στοιχεία.

Πίνακας 2.4 Σύγκριση των λόγων παραμέτρων που χρησιμοποιούνται για το χαρακτηρισμό των υγρών αποβλήτων (Metcalf & Eddy 2003).

| Είδος υγρού αποβλήτου | BOD/COD | BOD/TOC |
|----------------------------------|----------------------|----------------------|
| Ανεπεξέργαστα | 0,3-0,8 | 1,2-2,0 |
| Μετά την πρωτοβάθμια επεξεργασία | 0,4-0,6 | 0,8-1,2 |
| Τελική εκροή | 0,1-0,3 ¹ | 0,2-0,5 ² |

¹ CBOD/COD

² CBOD/TOC

CBOD: βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο του άνθρακα - carbonaceous biochemical oxygen demand

Πίνακας 2.5 Τυπικές συγκεντρώσεις ανεπεξεργαστων αστικών λυμάτων.

| Ρύπος | Μονάδα | Συγκέντρωση | | |
|--|---------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | | Χαμηλή | Μεσαία | Υψηλή |
| Ολικά στερεά (TS) | mg/L | 350 | 720 | 1.200 |
| Ολικά διαλυμένα στερεά (TDS) | mg/L | 250 | 500 | 850 |
| Σταθερά (FDS) | mg/L | 145 | 300 | 525 |
| Πτητικά (VDS) | mg/L | 105 | 200 | 325 |
| Ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS) | mg/L | 100 | 220 | 350 |
| Σταθερά (FSS) | mg/L | 20 | 55 | 75 |
| Πτητικά (VSS) | mg/L | 80 | 165 | 275 |
| Καθιζάνοντα στερεά | mg/L | 5 | 10 | 20 |
| Βιοχημική απαίτηση οξυγόνου, 5-d, 20°C | mg/L | 110 | 220 | 400 |
| Ολικός οργανικός άνθρακας (TOC) | mg/L | 80 | 160 | 290 |
| Χημική απαίτηση οξυγόνου (COD) | mg/L | 250 | 500 | 1.000 |
| Αζωτο (ως ολικό N) | mg/L | 20 | 40 | 85 |
| Οργανικό | mg/L | 8 | 15 | 35 |
| Ελεύθερη αμμωνία | mg/L | 12 | 25 | 50 |
| Νιτρικά | mg/L | 0 | 0 | 0 |
| Νιτρώδη | mg/L | 0 | 0 | 0 |
| Φώσφορος (ως ολικός P) | mg/L | 4 | 8 | 15 |
| Οργανικός | mg/L | 1 | 3 | 5 |
| Ανόργανος | mg/L | 3 | 5 | 10 |
| Χλωριώντα | mg/L | 30 | 50 | 100 |
| Θειικά | mg/L | 20 | 30 | 50 |
| Έλαια και λίπη | mg/L | 50 | 100 | 150 |
| Πτητικές Οργανικές Ενώσεις (VOC) | μg/L | <100 | 100-400 | >400 |
| Ολικά κολοβακτηρίδια | Αριθμός/100mL | 10^6 - 10^7 | 10^7 - 10^8 | 10^7 - 10^9 |
| Κοπρανώδη κολοβακτηρίδια | Αριθμός/100mL | 10^3 - 10^5 | 10^4 - 10^6 | 10^5 - 10^8 |
| Cryptosporidium ωκύστεις | Αριθμός/100mL | 10^{-1} - 10^0 | 10^{-1} - 10^1 | 10^{-1} - 10^2 |
| Giardia lamblia κύστεις | Αριθμός/100mL | 10^{-1} - 10^1 | 10^{-1} - 10^2 | 10^{-1} - 10^3 |

2.1.2 Διαχείριση

Οι βασικές διεργασίες καθαρισμού νερού και λυμάτων κατατάσσονται σε τέσσερις διαφορετικές κατηγορίες, την προεπεξεργασία, τις φυσικές, χημικές και φυσικοχημικές διεργασίες.

Στάδια επεξεργασίας υγρών αποβλήτων

- Προεπεξεργασία: Χρήση φυσικών διεργασιών, όπως εσχάρωση, αμμοσυλλογή, λιπосуλλογή και εξισορρόπηση. Απομάκρυνση των υλικών που περιέχονται στα απόβλητα, όπως κουρέλια, ξύλα, επιπλέοντα υλικά, χαλίκια-άμμος και γράσο, τα οποία μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα συντήρησης ή λειτουργίας στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας, στις διεργασίες και στα βοηθητικά συστήματα.
- Πρωτοβάθμια: Χρήση φυσικών διεργασιών, όπως καθίζηση και επίπλευση. Απομάκρυνση μέρους των αιωρούμενων στερεών και του οργανικού υλικού από τα υγρά απόβλητα.
Πρωτοβάθμια επεξεργασία, ορίζεται η επεξεργασία των αστικών λυμάτων με φυσική ή/και χημική μέθοδο που περιλαμβάνει την καθίζηση των αιωρούμενων στερεών, ή με άλλες μεθόδους με τις οποίες το BOD₅ των εισερχομένων λυμάτων μειώνεται τουλάχιστον κατά 20% πριν από την έξοδο και το συνολικό φορτίο των αιωρούμενων στερεών στα εισερχόμενα λύματα μειώνεται κατά 50% τουλάχιστον (Άρθρο 2 της ΚΥΑ 5673/400/1997).
- Προχωρημένη πρωτοβάθμια: Ενισχυμένη απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών και του οργανικού υλικού από τα υγρά απόβλητα. Πραγματοποιείται με προσθήκη χημικών και διήθηση.
- Δευτεροβάθμια: Χρήση βιολογικών και φυσικοχημικών διεργασιών. Απομάκρυνση κολλοειδών και των βιοαποικοδομήσιμων οργανικών υλικών (διαλυμένων ή αιωρούμενων) και των αιωρούμενων στερεών.
Δευτεροβάθμια επεξεργασία, ορίζεται η επεξεργασία των αστικών λυμάτων με μέθοδο που, κατά κανόνα, περιλαμβάνει βιολογική επεξεργασία με δευτεροβάθμια καθίζηση, ή με άλλες μεθόδους δια των οποίων τηρούνται οι απαιτήσεις που καθορίζονται στο άρθρο 16 της απόφασης αυτής. (Άρθρο 2 της ΚΥΑ 5673/400/1997).
- Δευτεροβάθμια με απομάκρυνση θρεπτικών ουσιών: Απομάκρυνση των βιοαποικοδομήσιμων οργανικών υλικών, των αιωρούμενων στερεών και των θρεπτικών ουσιών (άζωτο, φώσφορος ή και τα δύο μαζί).
- Τριτοβάθμια: Απομάκρυνση των υπολειπόμενων αιωρούμενων στερεών, συνήθως με χρήση μέσου διήθησης ή μικροσχάρας. Η απολύμανση είναι επίσης μέρος της τριτοβάθμιας επεξεργασίας. Σε αυτόν τον ορισμό, συμπεριλαμβάνεται συνήθως η απομάκρυνση των θρεπτικών συστατικών.
- Προχωρημένη: Απομάκρυνση των διαλυμένων και αιωρούμενων υλικών που παραμένουν μετά τη βιολογική επεξεργασία όταν απαιτείται σε διάφορες εφαρμογές επαναχρησιμοποίησης του νερού.

2.1.3 Το υφιστάμενο νομικό πλαίσιο επεξεργασίας αστικών λυμάτων

- Νόμος 1650/86 (ΦΕΚ 160Α/18-10-86): Νόμος πλαίσιο για το περιβάλλον.
- ΚΥΑ 5673/400 (ΦΕΚ 192β/14-3-97) & τροποποίηση με τις ΚΥΑ 19661/1982 (ΦΕΚ 1811β/29-9-99) και 48392/939 (ΦΕΚ 405β/3-4-02): Μέτρα και όροι για την επεξεργασία αστικών λυμάτων - καθορισμός ευαίσθητων περιοχών.
- ΥΓΕΙΟΝΟΜΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ: Ε1β 221 (ΦΕΚ 138β/24-2-65) & τροποποίηση με τις Ρ1/17831(ΦΕΚ 986β/10-12-71) και Ρ4/1305 (ΦΕΚ 801β/9-8-74): Περί διαθέσεως λυμάτων και βιομηχανικών αποβλήτων.
- ΚΥΑ 19396/1546 (ΦΕΚ 604β/18-7-97): Μέτρα και όροι για τη διαχείριση επικινδύνων αποβλήτων
- ΚΥΑ 46399/1352 (ΦΕΚ 438β/3-7-86): Περί ποιότητας των επιφανειακών νερών
- ΚΥΑ 13440/Β 464 (ΦΕΚ 641β/7-8-91): Περί διαθέσεως στην γεωργία της ιλύος προερχόμενης από επεξεργασία λυμάτων

Πίνακας 2.6 Ο ελάχιστος ετήσιος αριθμός δειγμάτων ανάλογα με το μέγεθος του σταθμού επεξεργασίας (παράγραφος 3., σημείο Γ., Παράρτημα Ι, άρθρο 16, ΦΕΚ 192β/14-3-97, ΚΥΑ 5673/400/1997).

| | |
|--------------------|--|
| 2000-9999 Ι.Π. | 12 δείγματα τον πρώτο χρόνο. 4 δείγματα τα επόμενα χρόνια εφόσον αποδειχθεί ότι τον πρώτο χρόνο το νερό πληροί τις διατάξεις της παρούσας οδηγίας εάν κανένα από τα δείγματα δεν είναι ικανοποιητικό, τον επόμενο χρόνο πρέπει να λαμβάνονται 12 δείγματα |
| 10000-19999 Ι.Π. | 12 δείγματα |
| άνω των 50000 Ι.Π. | 24 δείγματα |

Πίνακας 2.7 Απαιτήσεις για απορρίψεις από αριθμούς επεξεργασίας αστικών λυμάτων που διέπονται από τα άρθρα 4 και 5 του ΦΕΚ 192β/14-3-97. Εφαρμόζεται η τιμή συγκέντρωσης ή το ποσοστό μείωσης (πίνακας 1, Παράρτημα Ι, ΦΕΚ 192β/14-3-97, ΚΥΑ 5673/400/1997).

| Παράμετρος | Συγκέντρωση | Ελάχιστη εκατοστιαία μείωση | Μέθοδοι μέτρησης αναφοράς |
|---|--|---|---|
| Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο - BOD ₅ στους 20°C χωρίς νιτροποίηση | 25 mg/L O ₂ | 70-90 40 δυνάμει άρθ. 4 παρ. 2 | Ομογενοποιημένο, αδιήθητο ακατακάθιστο δείγμα προσδιορισμός του διαλελυμένου οξυγόνου πριν και μετά πενθήμερη επώαση στους 20°C, σε απόλυτο σκότος. Προσθήκη παρεμποδιστή της νιτροποίησης. |
| Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο - COD | 125 mg/L O ₂ | 75 | Ομογενοποιημένο αδιήθητο ακατακάθιστο δείγμα. Διχρωμικό κάλιο. |
| Ολικά αιωρούμενα στερεά | 35 mg/L δυνάμει άρθ.4 παρ. 2 (άνω των 1.000 Ι.Π.) 60 δυνάμει άρθρου 4 παρ. 2 2.000-1.000 Ι.Π. | 90 δυνάμει άρθρου 4 παρ. 2 (άνω των 10.000 Ι.Π.) 70 δυνάμει άρθρου 4 παρ. 2 2.000-1.000 Ι.Π. | Διήθηση αντιπροσωπευτικού δείγματος μέσω φίλτρου μεμβράνης των 0,45μm ξήρανση σε θερμοκρασία 105°C και ζύγιση. |

Πίνακας 2.8 Απαιτήσεις για διάθεση από σταθμούς επεξεργασίας λυμάτων σε ευαίσθητες περιοχές όπου παρουσιάζεται ευτροφισμός, όπως προσδιορίζονται στο Παράρτημα ΙΙ

σημείο Α στοιχείο α), του ΦΕΚ 192β/14-3-97. Εφαρμόζεται η τιμή συγκέντρωσης ή το ποσοστό μείωσης (πίνακας 2, Παράρτημα Ι, ΦΕΚ 192β/14-3-97, ΚΥΑ 5673/400/1997).

| Παράμετρος | Συγκέντρωση | Ελάχιστη εκατοστιαία μείωση | Μέθοδος μέτρησης αναφοράς |
|-----------------|--|-----------------------------|--|
| Ολικός φώσφορος | 2 mg/L P (10.000-100.000 ι.π.) 1 mg/L P (άνω των 100.000 ι.π.) | 80 | Φασματοφωτομετρία μοριακής απορρόφησης |
| Ολικό άζωτο | 15 mg/L N (1.000-100.000 ι.π.) 10 mg/L N (άνω των 100.000 ι.π.) | 70-80 | Φασματοφωτομετρία μοριακής απορρόφησης |

Πίνακας 2.9 Ανώτατοι επιτρεπτοί αριθμοί δειγμάτων που αποκλίνουν σε σχέση με τον αριθμό δειγμάτων που λαμβάνονται κατά τη διάρκεια οποιουδήποτε έτους (πίνακας 3, Παράρτημα Ι, ΦΕΚ 192β/14-3-97, ΚΥΑ 5673/400/1997).

| Αριθμός δειγμάτων που λαμβάνονται κατά τη διάρκεια οποιουδήποτε έτους | Ανώτατος επιτρεπτός αριθμός δειγμάτων που αποκλίνουν |
|---|--|
| 4-7 | 1 |
| 6-16 | 2 |
| 17-28 | 3 |
| 29-40 | 4 |
| 51-53 | 5 |
| 54-67 | 6 |
| 69-81 | 7 |
| 82-95 | 8 |
| 96-110 | 9 |
| 111-125 | 10 |
| 126-140 | 11 |
| 141-155 | 12 |
| 156-171 | 13 |
| 172-187 | 14 |
| 188-203 | 15 |
| 204-219 | 16 |
| 220-235 | 17 |
| 236-251 | 18 |
| 252-268 | 19 |
| 269-284 | 20 |
| 285-300 | 21 |
| 301-317 | 22 |
| 318-334 | 23 |
| 335-350 | 24 |
| 351-365 | 25 |

Εκτός από την ΚΥΑ 5673/400/1997, για την απόρριψη των επεξεργασμένων λυμάτων σε κάποιο αποδέκτη πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν και η ΚΥΑ 46399/1352/1986.

Στην ΚΥΑ 46399/1352/1986 καθορίζεται η ποιότητα των επιφανειακών νερών για διάφορες χρήσεις, και γίνεται αναφορά στις επιτρεπόμενες συγκεντρώσεις ρύπων όπως:

- Οργανοληπτικά χαρακτηριστικά: χρώμα, οσμή, διαφάνεια, θερμοκρασία
- Φυσικοχημικά-βιοχημικά χαρακτηριστικά: BOD₅, COD, pH, DO, SS, αγωγιμότητα, σκληρότητα

- Συγκεντρώσεις ιόντων αλάτων: NO₃⁻, NO₂⁻, PO₄³⁻, SO₄²⁻, Cl⁻, F⁻, NH₄⁺, CN⁻
- Συγκεντρώσεις ιόντων βαρέων μετάλλων: Fe, Mn, Cu, Zn, B, As, Cd, Cr, Pb, Se, Hg, Ba
- Συγκεντρώσεις οργανικών ενώσεων: Φαινόλες, πετρελαϊκοί υδρογονάνθρακες, αρωματικοί υδρογονάνθρακες, αλογονομένοι υδρογονάνθρακες

| Τύπος επαναχρησιμοποίησης | Escherichia coli (EC/100ml) | BOD ₅ | SS | Θολότητα (NTU) |
|---|-----------------------------|---|---|----------------|
| Περιορισμένη άρδευση Βιομηχανική χρήση | ≤200 διάμεση τιμή | Σύμφωνα με τις επιταγές της ΚΥΑ 5673/400/1997 | Σύμφωνα με τις επιταγές της ΚΥΑ 5673/400/1997 | - |

Περιορισμένη άρδευση: Περιοχές όπου δεν αναμένεται πρόσβαση του κοινού, καλλιέργειες ζωοτροφών, βιομηχανικές καλλιέργειες, λιβάδια, δένδρα (μη συμπεριλαμβανομένων των οπωροφόρων), με την προϋπόθεση ότι κατά τη συλλογή οι καρποί δεν βρίσκονται σε επαφή με το έδαφος, καλλιέργειες σπόρων και καλλιέργειες που παράγουν προϊόντα τα οποία υποβάλλονται σε περαιτέρω επεξεργασία πριν την κατανάλωσή τους. Άρδευση με καταιονισμό δε θα εφαρμόζεται.

Βιομηχανική χρήση: Νερό ψύξης μιας χρήσης.

Τροφοδότηση υπόγειων υδροφορέων που δεν εμπίπτουν στις διατάξεις του άρθρου 7 του ΠΔ 51/2-3-2007, (με την επιφύλαξη των παραγράφων 4 και 5 του άρθρου 5 του ΦΕΚ 354/Β' 8.3.2011, Υ.Α. οικ. 145116/2011), με διήθηση διαμέσου εδαφικού στρώματος με επαρκές πάχος και κατάλληλα χαρακτηριστικά.

Οι συγκεντρώσεις αζώτου στην εκροή πρέπει να διατηρούνται χαμηλότερα από 45 mg/L, με εξαίρεση τις περιπτώσεις όπου υπάρχει μεγάλης διάρκειας αποθήκευση των υγρών αποβλήτων σε ταμιευτήρες, γίνεται άρδευση ευπρόσβλητων στη νιτρορρύπανση ζωνών ή γίνεται εμπλουτισμός του υπόγειου υδροφορέα. Στις περιπτώσεις αυτές οι μέσες συγκεντρώσεις αζώτου πρέπει να μην υπερβαίνουν τα 15 mg/L.

Πίνακας 2.10 Όρια για μικροβιολογικές και συμβατικές παραμέτρους καθώς και η κατ' ελάχιστον απαιτούμενη επεξεργασία και συχνότητα δειγματοληψιών και αναλύσεων στην περίπτωση επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων για περιορισμένη άρδευση, βιομηχανική χρήση νερού ψύξης μιας χρήσης και εμπλουτισμό υπόγειου υδροφορέα, που δεν χρησιμοποιείται για πόση και με διήθηση διαμέσου κατάλληλου εδαφικού στρώματος (Παράρτημα Ι, ΦΕΚ 354/Β' 8.3.2011, Υ.Α. οικ. 145116/2011).

| Τύπος επαναχρησιμοποίησης | Escherichia coli (EC/100ml) | BOD ₅ | SS | Θολότητα (NTU) |
|---|--|------------------------------|------------------------------|-----------------|
| Απεριόριστη άρδευση Βιομηχανική χρήση πλην νερού ψύξης μιας χρήσης | ≤5 για το 80% των δειγμάτων και ≤50 για το 95% των δειγμάτων | ≤10 για το 80% των δειγμάτων | ≤10 για το 80% των δειγμάτων | ≤2 διάμεση τιμή |

Απεριόριστη άρδευση: Όλες οι καλλιέργειες όπως οπωροφόρα δένδρα, λαχανικά, αμπέλια ή καλλιέργειες των οποίων τα προϊόντα καταναλώνονται ωμά, θερμοκήπια. Η απεριόριστη άρδευση επιτρέπει την εφαρμογή διαφόρων μεθόδων εφαρμογής της άρδευσης συμπεριλαμβανομένου του καταιονισμού.

Βιομηχανική χρήση πλην νερού ψύξης μιας χρήσης: επανακυκλοφορούμενο νερό ψύξης, νερό για λέβητες, νερό διεργασιών κ.λ.π.

Στην περίπτωση άρδευσης σε περιοχές που έχουν χαρακτηριστεί ως ευπρόσβλητες λόγω νιτρορύπανσης απαιτείται απομάκρυνση αζώτου μέσω νιτροποίησης – απονιτροποίησης, ώστε οι συγκεντρώσεις αμμωνιακού αζώτου και ολικού αζώτου να είναι μικρότερες από 2 mg/L και 15 mg/L αντίστοιχα.

Πίνακας 2.11 Όρια για μικροβιολογικές και συμβατικές παραμέτρους καθώς και η κατ' ελάχιστον απαιτούμενη επεξεργασία και συχνότητα δειγματοληψιών και αναλύσεων στην περίπτωση επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων για απεριόριστη άρδευση και βιομηχανική χρήση πλην νερού ψύξης μιας χρήσης (Παράρτημα Ι του ΦΕΚ 354/Β' 8.3.2011 της Υ.Α. οικ. 145116/2011).

Πίνακας 2.12 Όρια για μικροβιολογικές και συμβατικές παραμέτρους καθώς και η κατ' ελάχιστον απαιτούμενη επεξεργασία και συχνότητα δειγματοληψιών και αναλύσεων στην περίπτωση επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων για αστική και περιαστική χρήση και εμπλουτισμό υπόγειων υδροφορέων με γεωτρήσεις (Παράρτημα Ι του ΦΕΚ 354/Β' 8.3.2011 της Υ.Α. οικ. 145116/2011).

| Τύπος επαναχρησιμοποίησης | Escherichia coli (EC/100ml) | BOD ₅ | SS | Θολότητα (NTU) |
|----------------------------------|---------------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------|
| Αστική χρήση | ≤2 για το 80% των δειγμάτων και | ≤10 για το 80% των δειγμάτων | ≤2 για το 80% των δειγμάτων | ≤2 διάμεση τιμή |
| Εμπλουτισμός υπόγειων υδροφορέων | ≤20 για το 95% των δειγμάτων | | | |
| Περιαστικό πράσινο | | | | |

Αστική χρήση: Μεγάλες εκτάσεις (νεκροταφεία, πρηνή αυτοκινητόδρομων, γήπεδα γκολφ, δημόσια πάρκα), εγκαταστάσεις αναψυχής κατάσβεση πυρκαγιών, συμπύκνωση εδαφών, καθαρισμός οδών και πεζοδρόμων, διακοσμητικά σιντριβάνια. Πότισμα με καταιονισμό απαγορεύεται.

Εμπλουτισμός υπόγειων υδροφορέων που δεν εμπίπτουν στις διατάξεις του άρθρου 7 του ΠΔ 51/2-3-2007 (ΦΕΚ54Α/8-3-2007), με γεωτρήσεις.

Περιαστικό πράσινο συμπεριλαμβανομένων των αλσών και δασών.

Πρόσθετη απαίτηση να επιτυγχάνεται απομάκρυνση αζώτου μέσω νιτροποίησης-απονιτροποίησης, ώστε οι συγκεντρώσεις αμμωνιακού αζώτου και ολικού αζώτου να είναι μικρότερες από 2 mg/L και 15 mg/L αντίστοιχα.

Πίνακας 2.13 Μέγιστες επιτρεπόμενες συγκεντρώσεις μετάλλων και στοιχείων (Παράρτημα ΙΙ του ΦΕΚ 354/Β' 8.3.2011 της Υ.Α. οικ. 145116/2011).

Για εγκαταστάσεις επεξεργασίας με ισοδύναμο πληθυσμό μικρότερο των 2,000 και οικιακά ιδιωτικά συστήματα επεξεργασίας δεν απαιτείται έλεγχος για τη διαπίστωση τήρησης των ορίων του Πίνακα 11(Παράρτημα ΙΙ, ΦΕΚ 354/Β' 8.3.2011, Υ.Α. οικ. 145116/2011).

| Μέταλλο | Μέγιστη συγκέντρωση [mg/L] |
|---------------|----------------------------|
| Al (αργίλιο) | 5 |
| As (αρσένιο) | 0,1 |
| Be (βηρύλλιο) | 0,1 |
| Cd (κάδμιο) | 0,01 |
| Co (κοβάλτιο) | 0,05 |
| Cr (χρώμιο) | 0,1 |
| Cu (χαλκός) | 0,5 |
| F (φθόριο) | 1,0 |

| | |
|------------------|-------|
| Fe (σίδηρος) | 3,0 |
| Li (λίθιο) | 2,5 |
| Mn (μαγγάνιο) | 0,2 |
| Mo (μόλυβδαίνιο) | 0,01 |
| Ni (νικέλιο) | 0,2 |
| Pb (μόλυβδος) | 0,1 |
| Se (σελίνιο) | 0,02 |
| V (βανάδιο) | 0,1 |
| Zn (ψευδάργυρος) | 2,0 |
| Hg (υδράργυρος) | 0,002 |
| B (Βόριο) | 2 |

2.2 Φυσικά συστήματα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων

Τα φυσικά συστήματα διαχείρισης υγρών αποβλήτων, είναι τεχνητές περιοχές, οι οποίες αποτελούνται από έδαφος, φυτά και νερό και χρησιμοποιούνται για αφαίρεση ρύπων από υγρά απόβλητα, με αξιοποίηση των φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών που συμβαίνουν στο περιβάλλον έδαφος-υγρά απόβλητα-φυτό-ατμόσφαιρα. Σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο, ώστε οι διεργασίες αυτές να συμβαίνουν ελεγχόμενα.

Φυσικές διεργασίες, ανέκαθεν καθάριζαν νερό, καθώς αυτό έρεε στα ποτάμια, στις λίμνες στα ρέματα και στους υδροβιότοπους. Η ανακάλυψη και αξιοποίησή τους, χρονολογείται στη δεύτερη π.Χ. χιλιετία, όπου στην Κνωσσό στην Κρήτη, γινόταν εκμετάλλευση των υπογείων νερών για αστική και γεωργική χρήση. Δεξαμενές καθίζησης, είχαν κατασκευαστεί και ενσωματωθεί στο υδραυλικό και στο αποχετευτικό δίκτυο. Διεργασίες οι οποίες είναι οικονομικές και φιλικές προς το περιβάλλον είναι απαραίτητο να χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση υγρών αποβλήτων.

Οι διεργασίες που διενεργούνται στα φυσικά συστήματα επεξεργασίας είναι οι ίδιες με αυτές που χρησιμοποιούνται στα μηχανικά ή συμβατικά συστήματα επεξεργασίας, όπως καθίζηση, προσρόφηση, μεταφορά αέριων ρύπων, διήθηση, ιοντική εναλλαγή, χημική οξείδωση, χημική κατακρήμνιση, αναγωγή, βιολογική μετατροπή, αποδόμηση αλλά και άλλες οι οποίες είναι μοναδικές στα φυσικά συστήματα επεξεργασίας όπως η φωτοσύνθεση, φωτοοξείδωση και η λήψη από τα φυτά.

Στα φυσικά συστήματα, συμβαίνουν περισσότερες από μία διεργασίες συγχρόνως σε αντίθεση με τα μηχανικά συστήματα επεξεργασίας στα οποία οι διεργασίες εκτελούνται διαδοχικά και σε διαφορετικούς αντιδραστήρες ή δεξαμενές.

Τύποι φυσικών συστημάτων διαχείρισης υγρών αποβλήτων

Οι τύποι φυσικών συστημάτων διαχείρισης υγρών αποβλήτων είναι οι ακόλουθοι:

- Εδαφικά:
 - Βραδείας εφαρμογής
 - Επιφανειακής ροής
 - Ταχείας διήθησης
- Δεξαμενές σταθεροποίησης:
 - Αναερόβιες
 - Επαμφοτερίζουσες
 - Μερικής ανάμειξης αεριζόμενες
 - Ωρίμανσης
- Υδροχαρών φυτών:
 - Επιπλεόντων
 - Βυθισμένων
- Υδροβιότοποι:
 - Φυσικοί
 - Τεχνητοί

Για όλους τους τύπους φυσικών συστημάτων, είναι απαραίτητη η προεπεξεργασία των υγρών αποβλήτων με κάποια μηχανική διεργασία.

2.3 Τεχνητός υγροβιότοπος

Ο τεχνητός υγροβιότοπος, είναι μια αναπτυσσόμενη τεχνολογία, η οποία χρησιμοποιείται ως διεργασία διαχείρισης υγρών αποβλήτων. Σε έναν τεχνητό υγροβιότοπο, συμβαίνουν ελεγχόμενα φυσικές διεργασίες οι οποίες αξιοποιούνται για διαχείριση υγρών αποβλήτων. Αυτό κάνει αυτήν την τεχνολογία φιλική προς το περιβάλλον, καθώς δεν καταναλώνει ηλεκτρική ενέργεια και άρα μειώνεται η παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα και δεν χρησιμοποιούνται χημικά και οικονομική, καθώς έχει χαμηλό κόστος κατασκευής, λειτουργίας και συντήρησης. Δύο ακόμα πλεονεκτήματα, είναι η παραγωγή νερού άρδευσης και η μη παραγωγή ιλύος.

Ένας τεχνητός υγροβιότοπος, αποτελείται από μια κλίνη, η οποία περιέχει υλικό πλήρωσης, στο οποίο έχει φυτευτεί κάποιο είδος φυτού. Τα υλικά πλήρωσης και τα είδη φυτών τα οποία χρησιμοποιούνται είναι συγκεκριμένα. Υγρά απόβλητα προστίθενται σε αυτή την κλίνη και η εκροή είναι αποδεκτή για απόρριψη ή για επαναχρησιμοποίηση.

Οι πρώτες προσπάθειες για τη χρήση της τεχνολογίας των υγροβιότοπων με βλάστηση με σκοπό την απομάκρυνση ρύπων από το νερό, πραγματοποιήθηκε από την Δρα. K. Seidel στο ινστιτούτο Max Planck στη Γερμανία, στις αρχές του 1950 (Vymazal 2005).

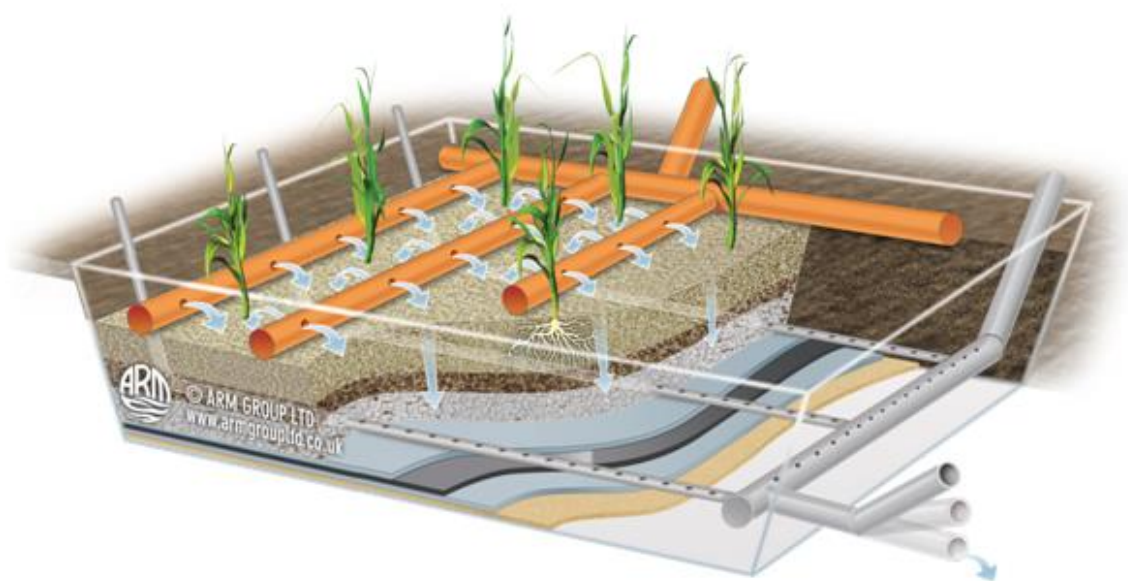
Τα υγρά απόβλητα τα οποία εφαρμόζονται σε τεχνητούς υγροβιότοπους, είναι τα ακόλουθα:

- Οικιακά αστικά
- Πρωτοβάθμια εκροή αστικών
- Δευτεροβάθμια εκροή αστικών
- Τεταρτοβάθμια εκροή αστικών
- Αστικά με άλατα
- Υπερχείλιση βόθρων
- Βιομηχανικά
- Γαλακτοκομείων
- Αγροτικά
- Αστική απορροή, αποκατάσταση αστικών ρευμάτων
- Απορροή από αυτοκινητόδρομο
- Βιομηχανία μετάλλου
- Οργανικά υλικά, διαλυμένα και μη
- Βιομηχανίας ζάχαρης
- Οινοποιείου
- Ελαιοτριβείου
- Εκροή υφαντουργίας
- Με αργό πετρέλαιο και τοξικά βαρέα μέταλλα
- Με βαρέα μέταλλα, από μεταλλεία και χωματερές
- Μεταλλείου Pb/Zn
- Εκροή από την κορυφή αναερόβιας μονάδας ενεργού ιλύος
- Ρυπασμένο νερό λίμνης
- Διασταλάγματα Χ.Υ.Τ.Α.
- Απορροή με εντομοκτόνα
- Υπόγεια νερά
- Κτηνοτροφείου
- Ορυχείων

Τύποι τεχνητών υγροβιότοπων

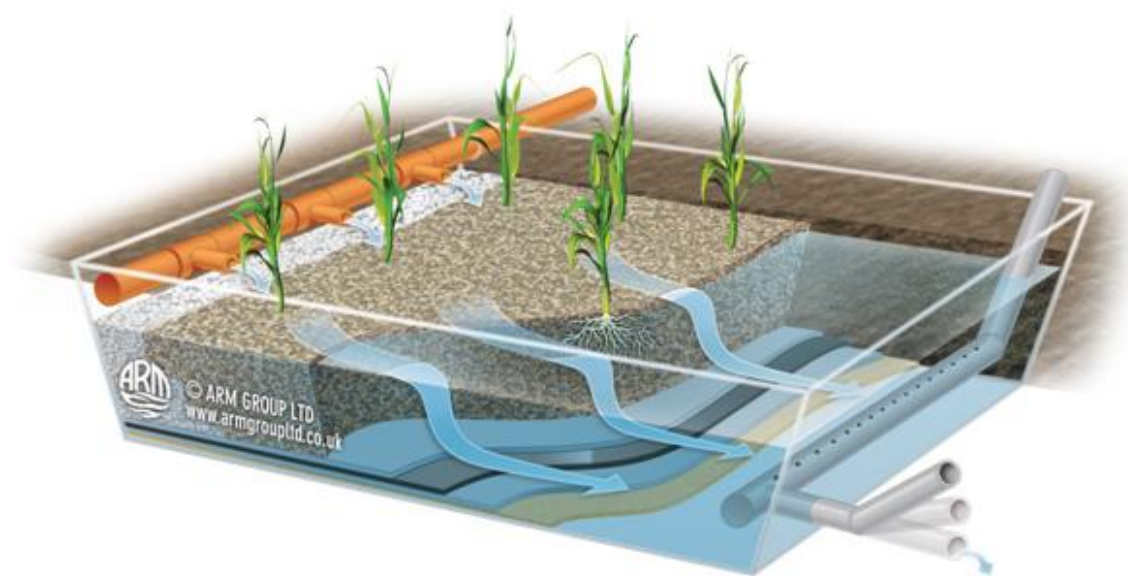
Οι τύποι των τεχνητών υγροβιότοπων είναι οι ακόλουθοι:

- Κατακόρυφης ροής



Εικόνα 2.1 Τεχνητός υγροβιότοπος κατακόρυφης ροής (Global Wetland Technology).

- Οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής
Η απαραίτητη επιφάνεια είναι 5-10m²/l.κ. (Cooper 1999, Vymazal et al. 2006, Vymazal 2011).

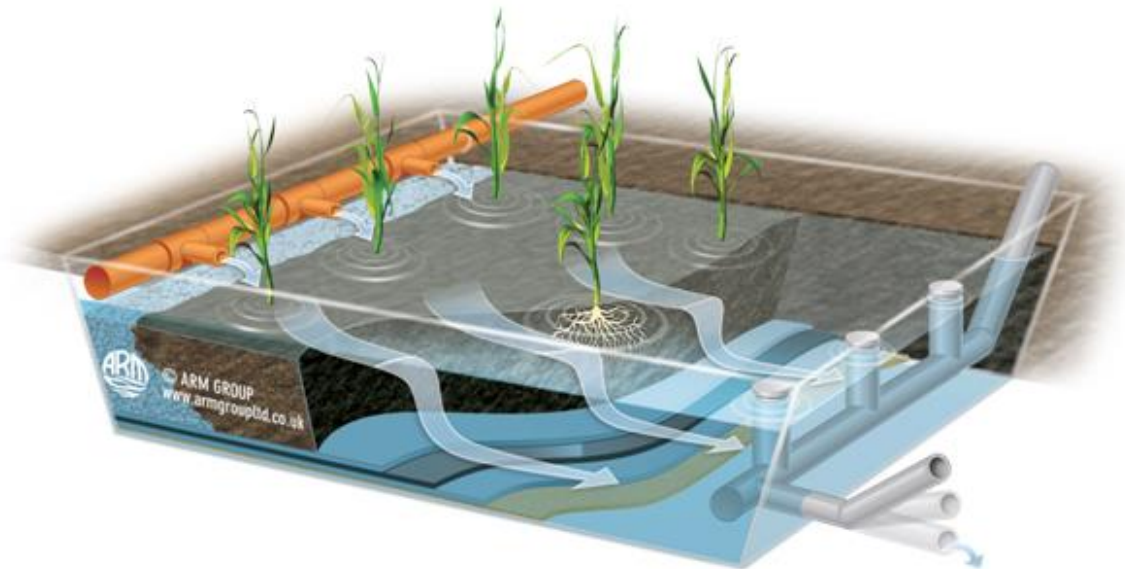


Εικόνα 2.2 Τεχνητός υγροβιότοπος οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής (Global Wetland Technology).

Σε αυτά τα συστήματα, η επιφάνεια του νερού

- Επιφανειακής ροής
Οι τεχνητοί υγροβιότοποι επιφανειακής ροής, αποτελούνται συνήθως από παράλληλες λεκάνες, κανάλια ή τάφρους με αδιαπέρατους πυθμένες, με αναφυόμενη

φυτική βλάστηση και μικρό βάθος νερού, 0,1-0,5m. Σε τέτοια συστήματα εφαρμόζεται προεπεξεργασμένο υγρό απόβλητο και η περαιτέρω επεξεργασία του διενεργείται καθώς ρέει με μικρή ταχύτητα δια μέσου των στελεχών και ριζών της υφιστάμενης φυτικής βλάστησης (Hammer, 1992). Η απαραίτητη επιφάνεια είναι 5-10m²/ι.κ. (Cooper 1999, Vymazal et al. 2006, Vymazal 2011).



Εικόνα 2.3 Τεχνητός υγροβιότοπος επιφανειακής ροής (Global Wetland Technology).

Υβριδικά συστήματα

Τα υβριδικά συστήματα αποτελούνται από ποικίλους συνδυασμούς των τύπων των τεχνητών υγροβιότοπων και στοχεύουν στη βελτιστοποίηση της αποδοτικότητας απομάκρυνσης των ρύπων από τα συστήματα των τεχνητών υγροβιότοπων μέσω της αντιστάθμισης των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων κάθε τύπου (Stefanakis et al., 2014).

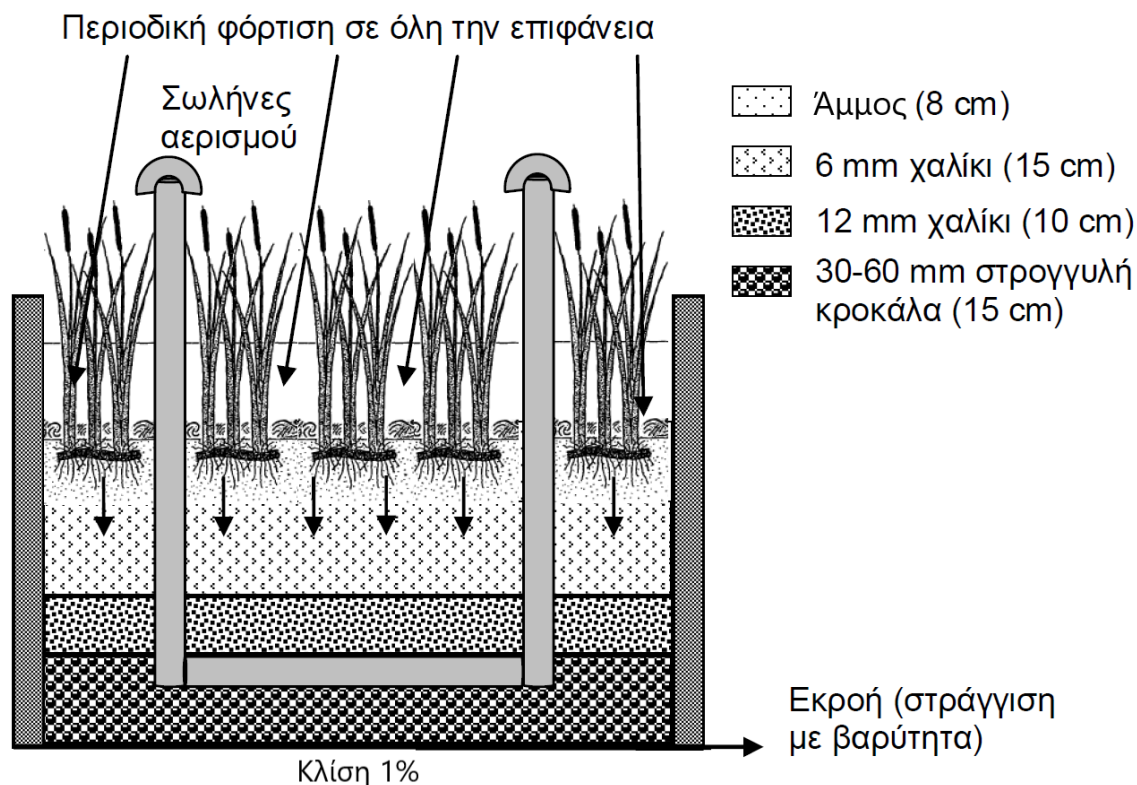
2.3.1 Τεχνητός υγροβιότοπος κατακόρυφης ροής

Ο τεχνητός υγροβιότοπος κατακόρυφης ροής, ξεκίνησε να χρησιμοποιείται το 1975, και είχε σκοπό την επεξεργασία υγρού αποβλήτου από μια τοποθεσία αναψυχής. Η εισαγωγή αυτού του τύπου, έγινε διότι είναι μεγαλύτερος ο ρυθμός μεταφοράς οξυγόνου σε σχέση με τα συστήματα οριζόντιας ροής. Τα συστήματα οριζόντιας ροής, δεν πετυχαίνουν την απαιτούμενη οξείδωση αμμωνιακού αζώτου για τα σπάνια δευτεροβάθμιας επεξεργασίας (Cooper 2007).

Σε έναν τεχνητό υγροβιότοπο κατακόρυφης ροής, τα πρανή και ο πυθμένας της κλίνης, καλύπτονται από γεωμεμβράνη ή κατασκευάζονται από σκυρόδεμα. Το βάθος της κλίνης, έχει τιμή μεταξύ 0,45-1,20m και η κλίση του πυθμένα της, έχει τιμή μεταξύ 1-2%. Στην κλίνη, προστίθεται υλικό πλήρωσης, το οποίο είναι άμμος και χαλίκια ή πλαστικά ή άλλο αδρανές υλικό και φυτεύεται κάποιος είδος φυτού. Σωλήνες, τοποθετούνται κατακόρυφα, σε απόσταση 2m μεταξύ τους για εισαγωγή επιπλέον οξυγόνου (Ακράτος 2006). Η απαραίτητη επιφάνεια είναι 1-3m²/ι.κ. (Cooper 1999, Vymazal et al. 2006, Vymazal 2011).

Σε έναν τεχνητό υγροβιότοπο κατακόρυφης ροής, το είδος φυτού δεν επηρεάζει την απόδοση του συστήματος, σε αντίθεση με ότι έχει παρατηρηθεί σε συστήματα οριζόντιας υπόγειας ροής και επιφανειακής ροής (Akratos and Tsihrintzis 2007, Kotti et al. 2010, Στεφανάκης 2011).

Οι τεχνητοί υδροβιότοποι κατακόρυφης ροής, στους οποίους χρησιμοποιούνται άμμος και χαλίκια για υλικό πλήρωσης, αποτελούνται από μια επίπεδη κλίση, η οποία γεμίζει με χαλίκια διαφορετικής κοκκομετρίας και από επάνω καλύπτονται με άμμο (Vyamazal 2011). Στον πυθμένα προστίθενται χαλίκια με μέγεθος 30-60mm και στο ανώτερο στρώμα χαλίκια με μέγεθος 6mm. Μια στρώση άμμου και μάλιστα με αυξημένο πάχος, επιβραδύνει την καθοδική ροή του υγρού (Torrens et al. 2009), επιτρέποντας έτσι έναν μεγαλύτερο χρόνο επαφής μεταξύ του υγρού αποβλήτου, των πορωδών υλικών και των ριζών των φυτών (Στεφανάκης 2011).



Εικόνα 2.4 Διατομή τεχνητού υδροβιότοπου κατακόρυφης ροής (Στεφανάκης 2011).

Τα υγρά απόβλητα, προστίθενται σε όλη την επιφάνεια του υλικού πλήρωσης, μέσω διάτρητων αγωγών τοποθετημένων στην επιφάνεια του υλικού πλήρωσης. Από τις οπές των διάτρητων αγωγών, εκρέει η ίδια παροχή, πετυχαίνοντας ομοιόμορφη κατάκλυση σε όλη την επιφάνεια (Reed et al. 1995, Kadlec and Knight 1996). Η ροή των λυμάτων, συμβαίνει με τη βαρύτητα. Τα υγρά απόβλητα, έρχονται σε επαφή με το υλικό πλήρωσης, τις ρίζες των φυτών και διέρχονται μέσω τους, πιέζοντας προς τα κάτω τον παγιδευμένο στους πόρους αέρα και ρουφώντας αέρα από την ατμόσφαιρα, ο οποίος εισέρχεται στο υλικό πλήρωσης, ενισχύοντας τον αερισμό. Η εφαρμογή των υγρών αποβλήτων με τη δημιουργία επιφανειακής πλημμύρας, ακολουθούμενη από μια περίοδο ανάπαυσης, έχει ως αποτέλεσμα τη λειτουργία του συστήματος σε συνθήκες ακόρεστης ροής, επιτρέποντας την εισαγωγή αέρα στο σώμα του υδροβιότοπου (Platzer and Mauch 1997, Cooper 1999, Sun et al. 2006, Kadlec and Wallace 2009). Τα υγρά απόβλητα, συλλέγονται από διάτρητους αγωγούς, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στον πυθμένα της κλίσης, σε αποστάσεις 1 m μεταξύ τους, απαρτίζοντας ένα πυκνό υπόγειο στραγγιστικό δίκτυο για τη συλλογή των αποβλήτων (Ακράτος 2006). Τα άκρα αυτών των αγωγών, καταλήγουν έξω από το υλικό πλήρωσης, περιμετρικά της κλίσης, με σκοπό την εισαγωγή οξυγόνου στο υλικό πλήρωσης (Ακράτος 2006).

Η ικανότητα καθαρισμού των τεχνητών υδροβιότοπων κατακόρυφης ροής, βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στον αποτελεσματικό αερισμό του υποστρώματος, για αυτό παρέχουν

πολύ ικανοποιητική απομάκρυνση οργανικών υλικών (COD και BOD₅), αιωρούμενων στερεών (SS) (Arias et al. 2005, Prochaska et al. 2007, Vymazal 2011) και μπορούν να επιτύχουν υψηλό βαθμό νιτροποίησης (απομάκρυνση αμμωνιακού αζώτου) (Platzer and Mauch 1997, Langergraber et al. 2007). Αντιθέτως, οι τεχνητοί υδροβιότοποι κατακόρυφης ροής, δεν παρέχουν τις κατάλληλες συνθήκες για απονιτροποίηση για την ολοκληρωτική μετατροπή σε αέριο άζωτο, που διαφεύγει στην ατμόσφαιρα (Vymazal 2011). Έτσι, το αμμωνιακό άζωτο συνήθως μετατρέπεται μόνο σε νιτρικό άζωτο, με αποτέλεσμα μια πιο χαμηλή σχετικά απομάκρυνση ολικού αζώτου, συνήθως μικρότερη από αυτή των αντίστοιχων συστημάτων οριζόντιας ροής (Vymazal et al. 2006). Η απομάκρυνση φωσφόρου είναι περιορισμένη (Luederitz et al. 2001, Prochaska et al. 2007a), εκτός και αν χρησιμοποιηθεί ειδικό υλικό πλήρωσης με υψηλή ικανότητα προσρόφησης, όπως υλικά πλούσια σε Ca, Al ή Fe. Οι τεχνητοί υδροβιότοποι κατακόρυφης ροής, είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικοί στην απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών και οργανικού υλικού και στην νιτροποίηση σε υψηλούς ρυθμούς φόρτισης, ακόμα και σε χαμηλές θερμοκρασίες (Brix et al. 2002).

Ένα πρόβλημα που έχει παρουσιαστεί σε τεχνητούς υδροβιότοπους κατακόρυφης ροής, είναι η εμφάνιση φαινομένων έμφραξης του υλικού πλήρωσης (Platzer and Mauch 1997, Cooper 1999, Langergraber et al. 2003, Rousseau et al. 2004, Molle et al. 2006, Sun et al. 2007, Vymazal 2011). Οι τρόποι έμφραξης είναι (α) η εναπόθεση οργανικών και ανόργανων στερεών στην επιφάνεια, εμποδίζοντας την επιφανειακή διήθηση, καθώς και στην επιφάνεια των κόκκων της άμμου, (β) παραγωγή βιομάζας στους πόρους του υλικού λόγω της σταθερής παροχής θρεπτικών και της μικροβιακής ανάπτυξης και αποσύνθεσης και (γ) χημική καθίζηση και εναπόθεση στους πόρους (Platzer and Mauch 1997, Vymazal et al. 1998). Η συνεισφορά των φυτών στην αποφυγή φαινομένων έμφραξης είναι πολύ σημαντική. Η παρουσία των φυτών, παίζει ρόλο κλειδί για την αποφυγή φαινομένων έμφραξης, διότι η κίνησή τους από τον άνεμο δημιουργεί τρύπες στο υπόστρωμα και διαταράσσει την επιφάνεια, διατηρώντας έτσι υδραυλικές διόδους (Cooper 2007).

Οι τεχνητοί υδροβιότοποι κατακόρυφης ροής τοποθετούνται παράλληλα. Τα υγρά απόβλητα εφαρμόζονται στον κάθε υδροβιότοπο για κάποιες ημέρες, υγρή περίοδος και ακολουθεί περίοδος ανάπαυσης, ξηρή περίοδος.

$$\Delta = 2v-2$$

όπου: Δ = η διάρκεια της περιόδου ανάπαυσης σε ημέρες

v = ο αριθμός των παράλληλων μονάδων

Εξίσωση 2.1 Εξίσωση υπολογισμού διάρκειας περιόδου ανάπαυσης (Τσιχριντζής 2000).

Η περίοδος ανάπαυσης είναι πολύ σημαντική για την αποτελεσματική λειτουργία των συστημάτων τεχνητών υδροβιότοπων κατακόρυφης ροής, διότι επιτρέπει την επαρκή οξείδωση του συσσωρευμένου οργανικού υλικού μέσα στο υπόστρωμα και στην επιφάνεια της κλίνης, προλαμβάνοντας έτσι φαινόμενα έμφραξης (Στεφανάκης 2011). Για ταυτόχρονη αποτελεσματική απομάκρυνση αζώτου και ενίσχυση της διεργασίας της νιτροποίησης, απαιτείται πιο μακρά περίοδος ανάπαυσης για την αποκατάσταση των αερόβιων συνθηκών μέσα στην κλίνη (Στεφανάκης 2011).

Διαφορετικοί τύποι τεχνητών υδροβιότοπων μπορούν να συνδυαστούν για την επίτευξη υψηλότερων αποδόσεων, ειδικά για το άζωτο (Cooper 1999, Tuszyńska and Obarska-Pempkowiak 2008). Ο σχεδιασμός τέτοιων, υβριδικών συστημάτων συνίσταται σε δύο στάδια, αρκετές παράλληλες κλίνες τεχνητών υδροβιότοπων κατακόρυφης ροής, ακολουθούμενες από 2 ή 3 συστήματα τεχνητών υδροβιότοπων οριζόντιας ροής σε σειρά. Ο τεχνητός υδροβιότοπος κατακόρυφης ροής προορίζεται για την απομάκρυνση οργανικών, ολικών αιωρούμενων στερεών και για νιτροποίηση, ενώ στους τεχνητούς υδροβιότοπους οριζόντιας ροής λαμβάνει χώρα απονιτροποίηση και περαιτέρω απομάκρυνση οργανικών και ολικών αιωρούμενων στερεών (Öövel et al. 2008, Vymazal 2011). Ένας ακόμα συνδυασμός, είναι το σύστημα τεχνητού υδροβιότοπου κατακόρυφης ροής-τεχνητού υδροβιότοπου οριζόντιας ροής (Masi and Martinuzzi 2007). Ένα μεγάλο σύστημα οριζόντιας ροής τοποθετείται πρώτο για την απομάκρυνση οργανικών και ολικών

αιωρούμενων στερεών. Στη συνέχεια, ακολουθεί ένα κατακόρυφο σύστημα με περιοδική φόρτιση για επιπρόσθετη απομάκρυνση οργανικών και ολικών αιωρούμενων στερεών και για οξείδωση της αμμωνίας σε νιτρικά. Για τη μέγιστη απομάκρυνση ολικού αζώτου, πρέπει η εκροή του τεχνητού υγροβιότοπου να ανακυκλοφορήσει προς τη δεξαμενή καθίζησης (Vymazal 2011).

Είδη αποβλήτων τα οποία εφαρμόζονται σε τεχνητούς υγροβιότοπους κατακόρυφης ροής:

- Αστικά υγρά
- Υφάλμυρα νερά
- Αγροτικά, χοιροστάσιο
- Επεξεργασίας ζαχαρότευτλων
- Διαστάλαγμα Χ.Υ.Τ.Α.
- Διυλιστηρίου πετρελαίου
- Ευτροφικά νερά ποταμού
- Κτηνοτροφείου
- Κλωστοϋφαντουργίας
- Γαλακτοκομείου
- Αστική απορροή

2.3.2 Είδη και χρήση υλικών πλήρωσης

Το υλικό πλήρωσης, τοποθετείται εντός της κλίνης του τεχνητού υγροβιότοπου.

Οι ρόλοι του υλικού πλήρωσης, είναι οι ακόλουθοι:

- Αποθηκευτικός χώρος για βιοτικά και αβιοτικά συστατικά που συναντώνται σε τεχνητούς υγροβιότοπους.
- Συμβάλλει στην στήριξη και ανάπτυξη των φυτών.
- Παρέχει την απαραίτητη και κατάλληλη επιφάνεια για ανάπτυξη μικροοργανισμών και δημιουργία βιοφίλμ.
- Συμβάλλουν στη διήθηση και καθίζηση αιωρούμενων στερεών των υγρών αποβλήτων.
- Συμβάλλει στο να συμβούν χημικοί και βιολογικοί μετασχηματισμοί.
- Λειτουργούν ως αποθήκη ρυπαντικών συστατικών.

| Κατηγορία | Τυπικά υλικά | Πλεονεκτήματα | Μειονεκτήματα | Βιβλιογραφικές αναφορές |
|---------------------|---|--|---|--|
| Φυσικά ορυκτά υλικά | Χώμα, χαλίκι, άμμος, ασβεστόλιθος, 'Cocopeat', φυσικός ζεόλιθος, ανθρακικό άλας, βωξίτης, Ηφαιστειακά εδάφη-πετρώματα, Βολαστονίτης, Δολομίτης, Σιδηροπυρίτης, 'Cobblestone', Βερμικουλίτης | 1. Αποθέματα μεγάλης κλίμακας και ευρεία διανομή 2. Χαμηλό κόστος εξαγωγής και προετοιμασίας 3. Χαμηλή πιθανότητα περιβαλλοντικών κινδύνων 4. Ανώτερη μηχανική αντοχή | 1. Ανεπαρκής ικανότητα επεξεργασίας 2. Οι επιδόσεις διαφέρουν ανάλογα με τις περιοχές παραγωγής 3. Ορισμένα υλικά δεν είναι κατάλληλά για τη βιολογία | Brooks et al., 2000; Prochaska and Zouboulis, 2006; Zhu et al., 2011; Lizama Allende et al., 2012; Stefanakis and Tsihrintzis, 2012; Maucieri et al., 2017; Li et al., 2018; Grace et al., 2019; Ge et al., 2020 |
| Χημικά προϊόντα | Ιλύς-κεραμσίτης, σχιστολιθικός κεραμσίτης, συνθετικός ζεόλιθος, ενεργή αλουμίνα, πλαστικά μέσα, αφρός πολυστυρενίου | 1. Ρυθμιζόμενη δομή πόρων και φυσικών χαρακτηριστικών 2. Αξιόπιστος έλεγχος προετοιμασίας και ποιότητας 3. Επωφελούμενη επαναχρησιμοποίηση των αποβλήτων | 1. Υψηλή ενεργειακή απαίτηση της διαδικασίας παραγωγής τους 2. Οι επιδόσεις διαφέρουν ανάλογα με τις πρώτες ύλες | Bandura et al., 2017; Yang et al., 2018b; Khalifa et al., 2020; Liu et al., 2020 |
| Υλικά βιομάζας | Βιοεξανθράκωμα/Biochar, υπολείμματα καλαμιών, 'solid carbon source', κέλυφος στρεπιδιού, άχυρο ρυζιού, 'Maerl' | 1. Υλικά δότες ηλεκτρονίων 2. Πηγές οργανικού και ανόργανου άνθρακα 3. Αποθέματα μεγάλης κλίμακας και ευρεία διανομή 4. Επαναχρησιμοποίηση ενός αποβλήτου 5. Ανεπτυγμένη δομή πόρων και ειδικής επιφάνειας | 1. Χαμηλή μηχανική δύναμη/αντοχή 2. Χαμηλή διάβρωση και αντίσταση στη γήρανση 3. Απελευθέρωση θρεπτικών συστατικών στο νερό 4. Περιορίζεται από τον χρόνο συγκομιδής | Gray et al., 2000; Wu et al., 2011; Wang et al., 2013; Cao et al., 2016; Yang et al., 2018b |

| | | | | |
|--------------------------------------|--|--|---|--|
| | | 6.Χρησιμοποιείται εύκολα από τη βιολογία | | |
| Βιομηχανικά και δημοτικά υποπροϊόντα | Σκωρία, ιπτάμενη τέφρα, εξυαλωμένος άνθραξ, σπασμένα τούβλα, Υπολείμματα επεξεργασίας πόσιμου νερού, θρυμματισμένα μπουκάλια τερεφθαλικού πολυαιθυλενίου | 1. Επαναχρησιμοποίηση ενός αποβλήτου 2. Χαμηλό κόστος προετοιμασίας 3. Αποθέματα μεγάλης κλίμακας και ευρεία διανομή 4. Ισχυρότερη ικανότητα επεξεργασίας για ειδικούς ρύπους | 1. Σημαντική διαφορά ανάμεσα στα απόβλητα 2. Ελλιπής προετοιμασία και ποιοτικός έλεγχος 3. Υψηλή πιθανότητα περιβαλλοντικών κινδύνων 4. Κάποια υλικά δεν είναι φιλικά προς το περιβάλλον | Babatunde and Zhao, 2009; Wang et al., 2013; Park et al., 2017; Miranda et al., 2019 |
| Λειτουργικά τροποποιημένα υλικά | ‘Magnetic magnesia’, τροποποιημένος κεραμσίτης, βιολογικός κεραμσίτης, μεταλλικά τροποποιημένος ζεόλιθος, βιώσιμα τροποποιημένος κεραμσίτης, θερμικά-τροποποιημένος αταπουλγίτης | 1. Ισχυρότερες ικανότητες επεξεργασίας 2. Στοχευμένη βελτίωση λειτουργιών | 1. Υψηλό κόστος προετοιμασίας 2. Λιγότερες πρακτικές εφαρμογές μεγάλης κλίμακας 3. Υψηλή πιθανότητα περιβαλλοντικών κινδύνων 4. Ελλιπής προετοιμασία και ποιοτικός έλεγχος | Liu et al., 2014; Yin et al., 2017; Cheng et al., 2018; Lan et al., 2018 |
| Νέα υλικά | Πορώδες γεωπολυμερές, ελαφρώς διογκωμένη αδρανής άργιλος, πολυσιλοξάνη/μικρού μεγέθους αλουμίνα | 1. Ισχυρότερες ικανότητες επεξεργασίας 2. Στοχευμένη βελτίωση λειτουργιών 3. Επαναχρησιμοποίηση ενός αποβλήτου 4. Ρυθμιζόμενη μηχανική αντοχή | 1. Λιγότερες πρακτικές εφαρμογές και πιστοποιήσεις 2. Υψηλή ενεργειακή απαίτηση της διαδικασίας κατασκευής 3. Ελλιπής προετοιμασία και ποιοτικός έλεγχος 4. Υψηλό κόστος προετοιμασίας | Lynch et al., 2018; Schmidt et al., 2019; Mlih et al., 2020 |

Πίνακας 2.14 Τα υλικά πλήρωσης που χρησιμοποιούνται σε τεχνητούς υγροβιότοπους και τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους (Ji Z. et al. 2021).

Τα πλεονεκτήματα χρήσης πλαστικών ως υλικό πλήρωσης, είναι τα ακόλουθα (Tatoulis et al. 2017, Luis et al. 2021):

- Έχουν υψηλό πορώδες. Το υδραυλικό επιφανειακό φορτίο το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί σε έναν τεχνητό υδροβιότοπο που περιέχει πλαστικό, είναι τρεις φορές μεγαλύτερο από το αντίστοιχο φορτίο το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί έναν τεχνητό υδροβιότοπο που περιέχει χαλίκι.
- Μικρή απαραίτητη επιφάνεια τεχνητού υδροβιότοπου. Η απαραίτητη επιφάνεια τεχνητού υδροβιότοπου είναι τέσσερις φορές μικρότερη, από την αντίστοιχη επιφάνεια ενός τεχνητού υδροβιότοπου που περιέχει χαλίκι, χωρίς αλλαγή της συνολικής του απόδοσης.
- Μπορούν να δέχονται υψηλά ρυπογόνα φορτία.
- Μπορούν να δέχονται υψηλά οργανικά φορτία. Το οργανικό επιφανειακό φορτίο το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί έναν τεχνητό υδροβιότοπο που περιέχει πλαστικό, είναι τέσσερις φορές μεγαλύτερο από το αντίστοιχο φορτίο το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί έναν τεχνητό υδροβιότοπο που περιέχει χαλίκι.
- Είναι ελαφριά. Για αυτό, έχουν χαμηλό κόστος μεταφοράς, είναι εύκολα στο χειρισμό και μειώνεται η πιθανότητα ζημιάς του πυθμένα ή και των πρανών της κλίνης.
- Αδρανές υλικό, δεν αλληλοεπιδράει με το βιοφίλμ το οποίο δημιουργείται επάνω του και με τα υγρά απόβλητα.
- Η χρησιμοποίηση ανακυκλωμένων πλαστικών ως υλικά πλήρωσης, αυξάνει τη βιωσιμότητα αυτής της τεχνολογίας.

Τα πλεονεκτήματα χρήσης χαλικιών ως υλικό πλήρωσης, είναι τα ακόλουθα:

- Υψηλή διαπερατότητα, εξασφαλίζουν μεγάλη υδραυλική αγωγιμότητα και μειώνουν την φραγή των πόρων-bed clogging.
- Αδρανές υλικό και δεν απελευθερώνει διαλυτά συστατικά όταν έρχεται σε επαφή με τα υγρά απόβλητα.
- Αντοχή σε υψηλά ρυπαντικά και υδραυλικά φορτία.
- Υψηλό πορώδες.
- Χαμηλό κόστος.
- Το λεπτόκοκκο χαλίκι επιτυγχάνει υψηλές αποδόσεις στην απομάκρυνση ορθοφωσφορικών (Akratos et al. 2009).
- Το πέτρωμα τους είναι ασβεστολιθικό, κύριο συστατικό τους είναι ο ασβεστόλιθος (CaCO_3) και εντάσσεται στην κατηγορία των ιζηματογενών πετρωμάτων. Τα ασβεστολιθικά υλικά θεωρούνται κατάλληλα για να προάγουν την κατακρήμνιση Ca και είναι αρκετά αποδοτικά στην αφαίρεση φωσφόρου μέσω προσρόφησης κυρίως σε τιμές αλκαλικού pH.

2.3.3 Είδη και χρήση φυτών

Τα γένη και τα είδη φυτών, τα οποία χρησιμοποιούνται στους τεχνητούς υδροβιότοπους, συγκεκριμένα. Αυτά είναι, επιπλέοντα φυτά ή αναδυόμενα υδρόφυτα ή βυθισμένα υδρόφυτα. Τα φυτά, τα οποία χρησιμοποιούνται στους τεχνητούς υδροβιότοπους, είναι απαραίτητο να έχουν την ικανότητα να απορροφούν οξυγόνο από την ατμόσφαιρα, να το μεταφέρουν στις ρίζες τους και να το απελευθερώνουν από αυτές. Με αυτόν τον τρόπο, προσφέρουν παθητικό αερισμό, στην υδάτινη περιοχή γύρω από τις ρίζες τους.

Ο κύριος ρόλος των φυτών σε τεχνητούς υδροβιότοπους είναι η πρόσληψη και αποθήκευση θρεπτικών ουσιών και βαρέων μετάλλων. Ο έμμεσος και πιο σημαντικός ρόλος

των φυτών είναι η λειτουργία τους σαν πηγή άνθρακα για τον μικροβιακό μεταβολισμό, η προσφορά περιοχών προσκόλλησης για τα μικρόβια πάνω στο εκτεταμένο ριζικό τους σύστημα και η μεταφορά οξυγόνου μέσω των ριζών τους (Στεφανάκης 2011).

Σε έναν τεχνητό υδροβιότοπο, στον οποίο έχει φυτευτεί κάποιο είδος φυτού, το βιοφίλμ δημιουργείται στις επιφάνειες των ριζών και στις επιφάνειες του υλικού πλήρωσης, για αυτό, το βιοφίλμ το οποίο δημιουργείται, είναι περισσότερο από ότι σε έναν τεχνητό υδροβιότοπο στον οποίο δεν έχει φυτευτεί κάποιο είδος φυτού και στον οποίο το βιοφίλμ αναπτύσσεται μόνο επάνω στην επιφάνεια του υλικού πλήρωσης. Επίσης, το οξυγόνο το οποίο παρέχεται από τις ρίζες των φυτών, αποτρέπει τη δημιουργία αναερόβιων συνθηκών στο βάθος του βιοφίλμ, όταν πολλά διάκενα φράζουν και το οξυγόνο δεν αρκεί για να διεισδύσει στο εσωτερικό των προσκολλημένων βιοφίλμ. Οι μικροοργανισμοί το λαμβάνουν και συνεχίζουν να λειτουργούν κανονικά και κατά συνέπεια το βιοφίλμ δεν αποκολλάται και δεν συμπαρασύρεται προς την έξοδο.

Σημαντικές διαφορές έχουν παρατηρηθεί στη σύγκριση των αποδόσεων φυτεμένων μονάδων με αφύτευτη, κάτι που υποδεικνύει τη μεγάλη σημασία της παρουσίας των φυτών (Keffala and Ghrabi 2005, Torrens et al. 2009, Στεφανάκης 2011). Οι διαφορές στις συγκεντρώσεις εκροής είναι στατιστικά σημαντικές για τα οργανικά και το άζωτο, καθώς και για τον ολικό φώσφορο (Στεφανάκης 2011). Η παρουσία των φυτών βελτιώνει την απομάκρυνση οργανικών υλικών, αζώτου και φωσφόρου κατά 6, 10 και 11%, αντίστοιχα, κατά μέσο όρο (Στεφανάκης 2011).

Η ανάπτυξη των φυτών σημαίνει και επέκταση του ριζικού τους συστήματος, κάτι που ευνοεί τη μεταφορά περισσότερου οξυγόνου στο εντός της κλίνης και συμβάλλει στο σχηματισμό του βιοφίλμ στις ρίζες και το υλικό πλήρωσης. Σε διερεύνηση διαχείρισης αστικών λυμάτων με πιλοτικούς τεχνητούς υδροβιότοπους κατακόρυφης ροής, αποδείχτηκε η σημασία που έχει για την απόδοση του συστήματος ο σχηματισμός του βιοφίλμ και, κατά συνέπεια, ένα εκτεταμένο ριζικό σύστημα που θα συμβάλλει στην ανάπτυξη του βιοφίλμ (Στεφανάκης 2011).

Τα κριτήρια, για να είναι ένα είδος φυτού κατάλληλο να χρησιμοποιηθεί σε έναν τεχνητό υδροβιότοπο επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, είναι τα ακόλουθα:

- Οικολογική αποδεκτικότητα, απουσία μεγάλης πιθανότητας εμφάνισης ζιζανίων, ασθενειών ή κινδύνων για την οικολογική ή γενετική ακεραιότητα των περιβαλλομένων φυσικών οικοσυστημάτων.
- Αντοχή στις τοπικές κλιματικές συνθήκες.
- Αντοχή στις συνθήκες των τεχνητών υδροβιότοπων, όπως η υψηλή υγρασία και οι χαμηλές θερμοκρασίες.
- Αντοχή στους ρύπους και στις συνθήκες υπερτροφικού στάσιμου νερού.
- Γρήγορη ανάπτυξη και εξάπλωση.
- Υψηλή ικανότητα απομάκρυνσης συστατικών, διαμέσου απευθείας αφομοίωσης και αποθήκευσης ή έμμεσα με αύξηση των μικροβιακών μετατροπών.

Τα γένη και τα είδη φυτών, τα οποία είναι κατάλληλα να χρησιμοποιηθούν σε τεχνητό υδροβιότοπο, είναι τα ακόλουθα:

- Καλάμι – *Phragmites*: *Phragmites australis*, *Phragmites communis*, *Phragmites mauritianus*
- Ψαθί – *Typha* spp: *Typha latifolia*, *Typha angustifolia*, *Typha domingensis*
- Τύφη ή σύφη – *Scirpus* spp: *Scirpus cypernius*, *Scirpus validus*, *Scirpus mauritimus*
- Βούρλο – *Juncus* spp: *Juncus effusus*, *Juncus articulatus*
- Σπαθόχορτο ή κύπερη – *Carex* spp: *Carex aquatilis*, *Carex stricata*
- Καλάμι μαναγράφ – *Glyceria maxima*

Πίνακας 2.15 Χαρακτηριστικά αναδυόμενων υδρόφυτων (EPA 1988).

| Ονομασία | Διάδοση | Θερμοκρασία (°C) | | Μέγιστη αλατότητα (‰) | Δραστικό εύρος pH |
|---|-------------------|------------------|-----------------|-----------------------|-------------------|
| | | Επιθυμητή | Εκκόλαψη σπόρου | | |
| Καλάμι - <i>Phragmites</i> | Σε όλον τον κόσμο | 12-23 | 10-30 | 45 | 2-8 |
| Ψαθί - <i>Typha</i> spp | | 10-30 | 12-24 | 30 | 4-10 |
| Βούρλο - <i>Juncus</i> spp | | 16-26 | | 20 | 5-7,5 |
| Σύφη ή τύφη - <i>Scirpus</i> spp | | 18-27 | | 20 | 4-9 |
| Σπαθόχορτο ή κύπερη - <i>Carex</i> spp | | 14-32 | | 20 | 5-7,5 |
| Κίτρινη ίριδα - <i>Iris pseudacorus</i> | | | | | 5-7,5 |

Πίνακας 2.16 Ρόλοι μακρόφυτων στους τεχνητούς υγροβιότοπους.

| Τμήμα υδρόβιου φυτού | Ρόλος |
|-----------------------|--|
| Ιστός εκτός του νερού | Μείωση φωτός→ μειωμένη ανάπτυξη φυτοπλαγκτόν |
| | Επίδραση στο μικροκλίμα→ μόνωση στη διάρκεια του χειμώνα |
| | Μειωμένη ταχύτητα ανέμου→ μειωμένη επαναιώρηση στερεών |
| | Αισθητική αναβάθμιση |
| Ιστός εντός του νερού | Διήθηση μεγάλων υλικών |
| | Μειωμένη ταχύτητα νερού→ αυξημένος βαθμός ιζηματοπόθεσης, μειωμένη επαναιώρηση |
| | Επιφάνεια για επαφή με μικροοργανισμούς |
| | Έκκριση φωτοσυνθετικού οξυγόνου→ αυξημένη αερόβια αποδόμηση |
| | Κατανάλωση θρεπτικών |
| Ρίζες και ρίζωμα | Σταθεροποίηση επιφάνειας ιζημάτων→ μικρότερη διάβρωση εδάφους |
| | Αποτροπή έμφραξης του υλικού πλήρωσης στους τεχνητούς υγροβιότοπους κατακόρυφης ροής |
| | Απελευθέρωση οξυγόνου→ αύξηση οργανικής αποδόμησης και νιτροποίησης |
| | Κατανάλωση θρεπτικών |

Τα είδη *Phragmites australis* και *Typha latifolia*, έχουν μεγάλες ποσότητες βιομάζας πάνω, φύλλα και κορμός και κάτω, υπόγειο ριζικό σύστημα, από την επιφάνεια του υλικού πλήρωσης. Ο υπόγειος ιστός τους, αναπτύσσεται οριζόντια και κατακόρυφα, δημιουργώντας ένα εκτεταμένο πλέγμα που συνδέεται και μπλέκεται με τα σωματίδια του υλικού πλήρωσης. Αυτό έχει ως συνέπεια μια μεγάλη διαθέσιμη επιφάνεια για την απορρόφηση θρεπτικών και ιόντων. Η σύγκριση των δύο ειδών, κοινό καλάμι και ψαθί,

δείχνει ότι τα καλάμια χρησιμοποιούν περισσότερο TKN και TP από ότι το ψαθί (Στεφανάκης 2011). Το ψαθί, απορροφά νιτρικά σε μεγαλύτερο βαθμό, μαζί με την αμμωνία (Brix 2002). Παρ' όλα αυτά, οι αποδόσεις μιας μονάδας στην οποία έχει φυτευτεί κοινό καλάμι και μιας μονάδας στην οποία έχει φυτευτεί ψαθί, έχουν παρατηρηθεί πρακτικά παρόμοιες και η στατιστική ανάλυση δεν έδωσε σημαντικές διαφορές (Στεφανάκης 2011).

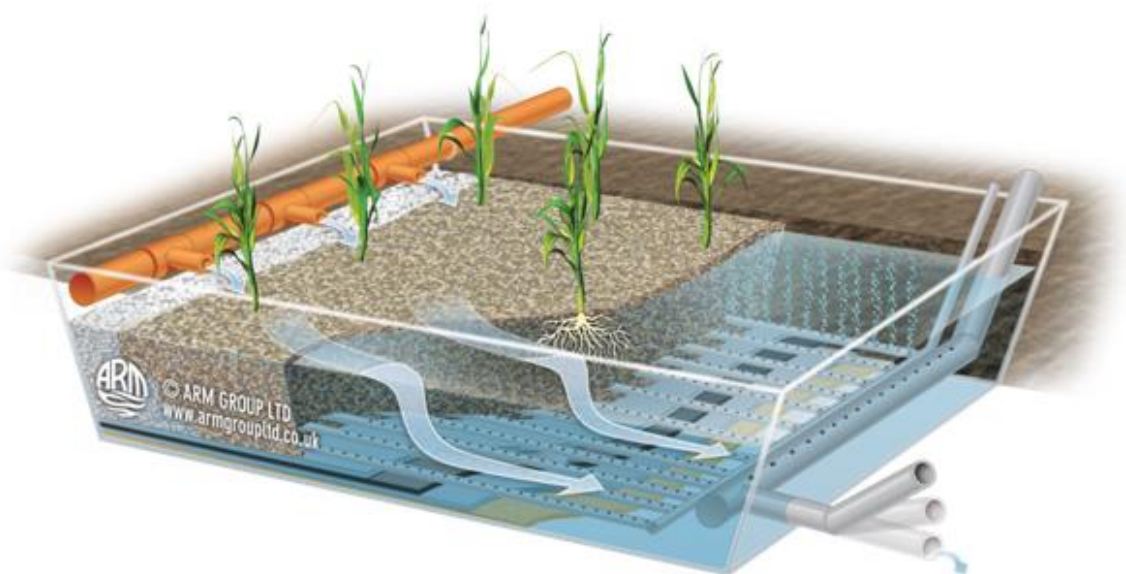
Σε διερεύνηση διαχείρισης αστικών λυμάτων με πιλοτικούς τεχνητούς υγροβιότοπους κατακόρυφης ροής, αναλύσεις της φυτικής βιομάζας, έδειξαν ότι η λήψη θρεπτικών από τα φυτά, είναι μικρή (Στεφανάκης 2011).

Ο ρυθμός απευθείας λήψη θρεπτικών, όπως άζωτο και φώσφορος, από τα φυτά, αυξάνεται καθώς τα φυτά αναπτύσσονται.

Η ξηραμένη βιομάζα, είναι απαραίτητο, να απομακρυνθεί από τον τεχνητό υγροβιότοπο, έτσι ώστε τα θρεπτικά συστατικά και τα βαρέα μέταλλα να μην διοχετευτούν εντός της κλίνης του. Η βέλτιστη περίοδος κλαδέματος και συλλογής της φυτικής βιομάζας, προκειμένου να απομακρυνθούν τα συσσωρευμένα μέταλλα και θρεπτικά συστατικά-στοιχεία, είναι ο μήνας Αύγουστος ή ο Σεπτέμβριος (Mulkeen et al. 2017). Η λήψη από τα φυτά και το κλάδεμα, απομακρύνουν ένα πολύ μικρό μέρος μόνο του φορτίου θρεπτικών, ακόμη και όταν οι φορτίσεις είναι υψηλότερες από τις συνηθισμένες (Στεφανάκης 2011).

2.3.4 Τεχνητός αερισμός

Με την εφαρμογή τεχνητού αερισμού, σε έναν τεχνητό υγροβιότοπο, ενισχύονται αερόβιες βιολογικές διεργασίες, λόγω αύξησης του διαθέσιμου οξυγόνου στα υγρά απόβλητα εντός της κλίνης, όπως η αερόβια οξειδωση, κατά την οποία απομακρύνεται οργανική ύλη, η νιτροποίηση, κατά την οποία απομακρύνεται άζωτο και οι διεργασίες προσκολλημένης βιομάζας. Με την αύξηση της αποδοτικότητας αυτών των διεργασιών, μειώνεται η απαραίτητη επιφάνεια του τεχνητού υγροβιότοπου ή ο απαραίτητος υδραυλικός χρόνος παραμονής των υγρών αποβλήτων εντός της κλίνης ή και τα δύο για τη διαχείριση των υγρών αποβλήτων με χρήση αυτής της τεχνολογίας.



Εικόνα 2.5 Αεριζόμενος τεχνητός υγροβιότοπος οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής (Global Wetland Technology).

2.3.5 Βιολογική διαχείριση υγρών αποβλήτων

Η διαχείριση των υγρών αποβλήτων σε έναν τεχνητό υδροβιότοπο, συμβαίνει με κάποιες διεργασίες, οι οποίες επηρεάζονται από κάποιους παράγοντες. Τρεις από αυτούς τους παράγοντες, είναι ο χρόνος παραμονής – hydraulic retention time/HRT των υγρών αποβλήτων στον τεχνητό υδροβιότοπο, το είδος φυτού που έχει φυτευτεί στον τεχνητό υδροβιότοπο και η θερμοκρασία. Η τιμή της θερμοκρασίας επηρεάζει τη μικροβιακή δραστηριότητα και την ανάπτυξη των φυτών και επομένως την απόδοση απομάκρυνσης των ρύπων.

Η φυσική διήθηση στο υπόστρωμα συμβάλλει στην απομάκρυνση πολλών ρύπων και μικροοργανισμών (Shutes 2001).

Πίνακας 2.17 Διεργασίες απομάκρυνσης και μετατροπής ρύπων σε έναν τεχνητό υδροβιότοπο.

| Ρύπος | Διεργασία |
|-------------------------------------|--|
| Οργανικό υλικό | Βιολογική αποδόμηση, ιζηματοπόθεση, προσρόφηση, διήθηση, μικροβιακή κατανάλωση |
| Οργανικά συστατικά όπως φυτοφάρμακα | Προσρόφηση, αεριοποίηση, φωτόλυση και βιοτική/αβιοτική αποδόμηση |
| Αιωρούμενα στερεά | Ιζηματοπόθεση, διήθηση |
| Άζωτο | Ιζηματοπόθεση, νιτροποίηση, απονιτροποίηση, μικροβιακή κατανάλωση, λήψη από τα φυτά, αεριοποίηση |
| Φώσφορος | Ιζηματοπόθεση, διήθηση, προσρόφηση, μικροβιακή κατανάλωση, λήψη από τα φυτά |
| Παθογόνα μικρόβια | Φυσική αποικοδόμηση, ιζηματοπόθεση, διήθηση, προσρόφηση |
| Βαρέα μέταλλα | Ιζηματοπόθεση, προσρόφηση, λήψη από τα φυτά |

Όταν χρησιμοποιείται το οξυγόνο ως δέκτης ηλεκτρονίων, η αντίδραση καλείται αερόβια και αντιδράσεις στις οποίες χρησιμοποιούνται άλλοι δέκτες ηλεκτρονίων καλούνται αναερόβιες. Αερόβιες διεργασίες, συμβαίνουν σε ένα λεπτό στρώμα γύρω από τις ρίζες, όπου και αναπτύσσονται αερόβιοι μικροοργανισμοί και στην επιφάνεια των υγρών αποβλήτων, ενώ αναερόβιοι μικροοργανισμοί είναι παρόντες στο υποκείμενο χώμα.

i) Διεργασίες προσκολλημένης βιομάζας

Σε έναν τεχνητό υδροβιότοπο, οι μικροοργανισμοί που είναι υπεύθυνοι για τη μετατροπή της οργανικής ύλης και των θρεπτικών, είναι προσκολλημένοι σε ένα αδρανές υλικό πλήρωσης. Μικροοργανισμοί προσκολλώνται στην επιφάνεια του υλικού πλήρωσης, καταναλώνουν οργανικό άνθρακα και κατά συνέπεια παράγουν ενέργεια, πολλαπλασιάζονται, παράγουν πολυσακχαρίτες και σχηματίζουν ένα βιοφίλμ το οποίο αποτελείται από μικροοργανισμούς, σωματιδιακό υλικό και εξωτερικά πολυμερή και το οποίο προσκολλάται και καλύπτει το υλικό πλήρωσης. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνονται μεγάλες συγκεντρώσεις μικροοργανισμών, χωρίς να είναι απαραίτητοι μεγάλοι υδραυλικοί χρόνοι παραμονής. Με την πάροδο του χρόνου πολλά διάκενα φράζουν με αποτέλεσμα το οξυγόνο να μην αρκεί για να δεισδύσει στο εσωτερικό των προσκολλημένων βιοφίλμ. Έτσι, δημιουργούνται αναερόβιες συνθήκες, οι μικροοργανισμοί που βρίσκονται στο βάθος του βιοφίλμ, κοντά στην επιφάνεια του υλικού πλήρωσης σταματάνε να λειτουργούν κανονικά και κατά συνέπεια το βιοφίλμ αποκολλάται και συμπαρασύρεται προς την έξοδο.

Η ανάπτυξη ενός βιοφίλμ αποτελείται από τα τέσσερα ακόλουθα στάδια: α) προσκόλληση των μικροοργανισμών στην επιφάνεια του υλικού πλήρωσης β) αποικισμός και συσσώρευση μικροοργανισμών οι οποίοι δημιουργούν μια ζωντανή κοινότητα γ) ανάπτυξη βιοφίλμ λόγω πολλαπλασιασμού των μικροοργανισμών και τη συνεχόμενη προσκόλληση είτε καινούργιων μικροοργανισμών είτε αδρανών σωματιδίων από την υγρή φάση δ) αποκόλληση, μερική ή ολική, του βιοφίλμ το οποίο συμπαρασύρεται με το υγρό ρεύμα.

Ανάλογα με τις συνθήκες ανάπτυξης και την υδροδυναμική του συστήματος, το πάχος του βιοφίλμ μπορεί να κυμαίνεται από 100 μm έως 10 mm (WEF 2000). Το βιοφίλμ, έχει πολύπλοκη μικροβιακή σύνθεση, ανάλογα με το πάχος του, περιέχει βακτήρια, μύκητες, πρωτόζωα, τροχόζωα και πιθανότατα σκουλήκια του φύλλου Annelida, πλατυέλμινθες και νηματώδεις (WEF 2000). Οι μικροοργανισμοί από τους οποίους αποτελείται το βιοφίλμ, ευθύνονται για την αφαίρεση των ρύπων. Μια στάσιμη στοιβάδα υγρού, στοιβάδα διάχυσης, διαχωρίζει το βιοφίλμ από τον κύριο όγκο του υγρού το οποίο ρέει επάνω από την επιφάνεια του βιοφίλμ ή αναμιγνύεται έξω από το σταθερό φιλμ. Το υπόστρωμα, το οξυγόνο και τα θρεπτικά διαχέονται διαμέσου της στάσιμης υγρής στοιβάδας προς το βιοφίλμ και τα προϊόντα της βιοαποικοδόμησης από το βιοφίλμ εισέρχονται στον κύριο όγκο του υγρού ύστερα από διάχυση από διάχυση διαμέσου της στάσιμης στοιβάδας.

Η στοιβάδα του βιοφίλμ δεν είναι μια επίπεδη επιφάνεια, είναι πολύπλοκες μη ομοιόμορφες δομές με ανώμαλες προεξοχές που μοιάζουν με κορυφές και κοιλάδες και θεωρείται ότι έχουν οριζόντιους και κάθετους πόρους διαμέσου των οποίων κυλά το υγρό. Οι συγκεντρώσεις των VSS στο βιοφίλμ κυμαίνονται από 40 έως 100 g/L (Metcalf & Eddy 2003).

ii) Απομάκρυνση οργανικής ύλης

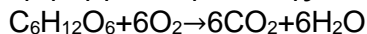
Η απομάκρυνση της οργανικής ύλης, συμβαίνει με γρήγορα σε όλους τους τύπους τεχνητών υγροβιότοπων και οφείλεται στις αδιατάρακτες συνθήκες στα συστήματα επιφανειακής ροής και στη διήθηση και καθίζηση στα συστήματα υπόγειας ροής (Reed et al. 1995, Kadlec and Knight 1996). Άλλη μια διεργασία απομάκρυνσης οργανικής ύλης, είναι η βιοαποδόμηση από μικροοργανισμούς. Η αποδόμηση της οργανικής ύλης προκύπτει είτε μέσω αερόβιων είτε μέσω αναερόβιων διεργασιών ανάλογα με το οργανικό φορτίο και την παροχή οξυγόνου (Αγιουτάντη, 2018). Αερόβιες διεργασίες επικρατούν κυρίως κοντά στην επιφάνεια των συστημάτων επιφανειακής ροής και σε αερόβιες μικροπεριοχές στα συστήματα υπόγειας ροής, ενώ στο υπόλοιπο σύστημα επικρατούν αναερόβιες διεργασίες (Σωτηροπούλου, 2010). Τα ρέοντα σωματίδια, απορροφούν τους οργανικούς ρύπους εντός του υγροβιότοπου, καθιζάνουν και διασπώνται από μικροοργανισμούς (Bakhshoodeh et al., 2020). Το BOD₅, το οποίο καθιζάνει, αποσυντίθεται αερόβια ή αναερόβια, ανάλογα με την ποσότητα οξυγόνου στο σημείο καθίζησης και το BOD₅, το οποίο είναι κολλοειδούς και διαλυμένης μορφής, συνεχίζει να απομακρύνεται, καθώς τα υγρά απόβλητα έρχονται σε επαφή με τους μικροοργανισμούς που είναι προσκολλημένοι στο υλικό πλήρωσης και στις ρίζες των φυτών (Reed et al. 1995, Kadlec and Knight 1996). Το οξυγόνο που απελευθερώνεται από τις ρίζες των φυτών, χρησιμοποιείται από μικροοργανισμούς που αποδομούν οργανική ύλη. Η υποστήριξη της μικροβιακής δραστηριότητας από τα φυτά, σε συνδυασμό με τη μεγάλη διαθέσιμη επιφάνεια για προσκόλληση, συμβάλει στη δημιουργία βιοφίλμ, το οποίο και αποδομεί το οργανικό υλικό (Greenway and Woolley 1999). Στους τεχνητούς υγροβιότοπους κατακόρυφης ροής, η μικροβιακή κατανάλωση και η αερόβια αποδόμηση των οργανικών υλικών και του BOD₅ είναι εντονότερη σε σχέση με τα συστήματα οριζόντιας ροής (Kadlec and Wallace 2009).

Η θερμοκρασία δε διαδραματίζει τόσο σημαντικό ρόλο στην απομάκρυνσή του οργανικού φορτίου-υλικού. Αυτό συμβαίνει γιατί οι αερόβιοι και αναερόβιοι μικροοργανισμοί, οι οποίοι ευθύνονται για την αποικοδόμησή του, λειτουργούν αποτελεσματικά ακόμα και σε

χαμηλές θερμοκρασίες. Πιο συγκεκριμένα, η απομάκρυνση του οργανικού υλικού, καθώς εξαρτάται πρωτίστως από την μικροβιακή δραστηριότητα αερόβιων και αναερόβιων βακτηρίων τα οποία επιβιώνουν σε θερμοκρασίες έως και 5°C (Akratos and Tsihrintzis 2007).

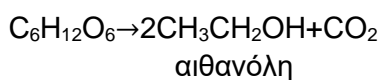
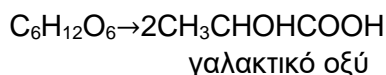
Τα οργανικά συστατικά, αποδομούνται αερόβια και αναερόβια από βακτήρια τα οποία είναι προσκολλημένα στις ρίζες των φυτών και στο υλικό πλήρωσης.

Στις αερόβιες περιοχές, η αποδόμηση γίνεται μέσω της αναπνοής:

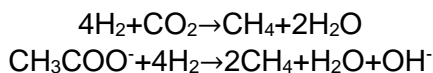


Στις αναερόβιες περιοχές μέσω:

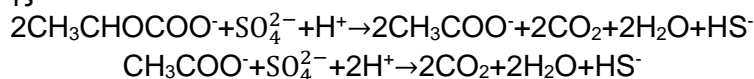
- Ζύμωσης:



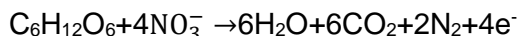
- Μεθανογένεσης:



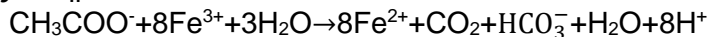
- Αναγωγής θειικών:



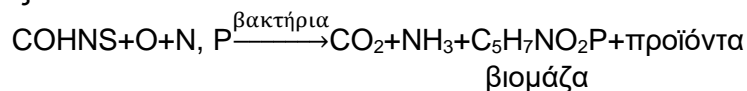
- Αναγωγής νιτρικών:



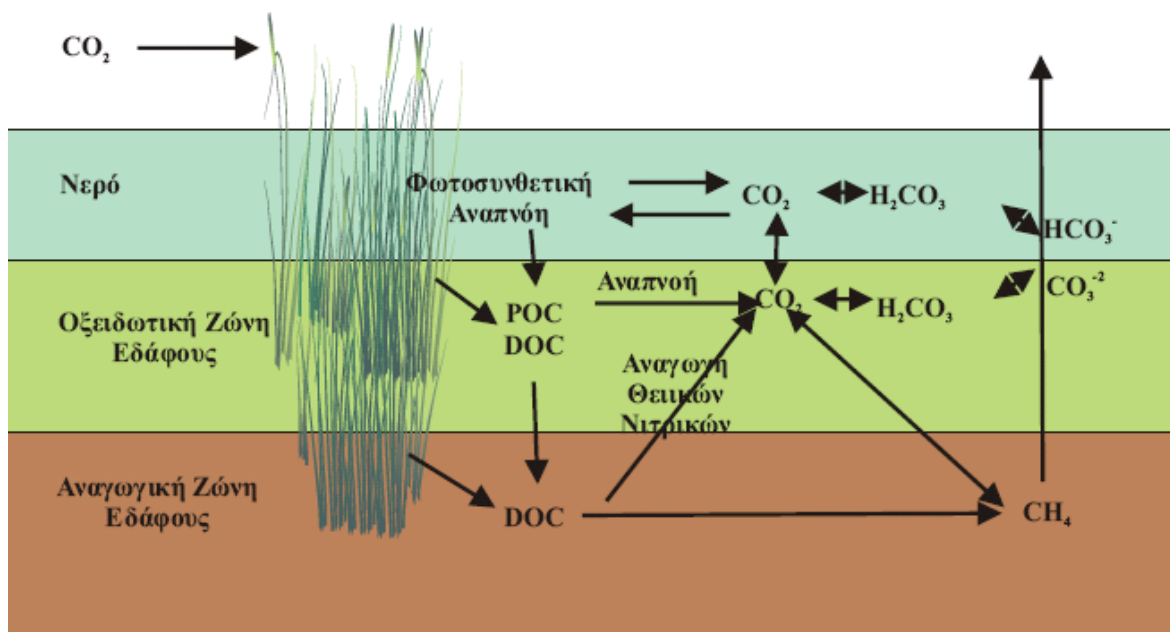
- Αναγωγής σιδήρου:



Σύνθεση βιομάζας:



Η θερμοκρασία, είναι ένας παράγοντας που επηρεάζει τις συγκεντρώσεις BOD₅ (Reed et al. 1995). Η απομάκρυνση BOD₅, είναι πιο γρήγορη στους τεχνητούς υγροβιότοπους υποεπιφανειακής ροής από ότι στους τεχνητούς υγροβιότοπους επιφανειακής ροής (Kadlec and Knight 1996).



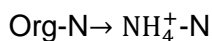
Εικόνα 2.6 Ο κύκλος του άνθρακα σε έναν τεχνητό υγροβιότοπο (Ακράτος 2006).

iii) Απομάκρυνση αζώτου

Το άζωτο, εισέρχεται σε έναν τεχνητό υγροβιότοπο με μορφή οργανικού αζώτου, αμμωνιακού αζώτου, νιτρικών και νιτρώδων. Οι μετασχηματισμοί του αζώτου σε έναν τεχνητό υγροβιότοπο, γίνονται με βιολογική αμμωνιοποίηση, βιολογική νιτροποίηση, βιολογική απονιτροποίηση, δέσμευση και αφομοίωση (Greenway and Wooley 1999, Vymazal 2007). Σε χαμηλές θερμοκρασίες τα βακτήρια αδυνατούν να απομακρύνουν, σε υψηλούς ρυθμούς, ρύπους όπως την αμμωνία και η ανάπτυξη της βλάστησης επιβραδύνεται.

Βιολογική αμμωνιοποίηση

Αμμωνιοποίηση, είναι η βιολογική διεργασία μετατροπής των οργανικών ενώσεων του αζώτου σε αμμωνιακό άζωτο. είναι σωματιδιακή μάζα, και η απομάκρυνσή του είναι γρήγορη.



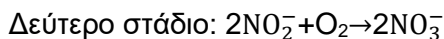
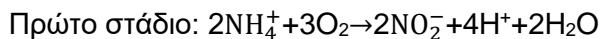
Το οργανικό άζωτο που εισέρχεται σε έναν υγροβιότοπο, έχει σωματιδιακή μορφή, όπως οργανικά στερεά και άλγη. Η μάζα αυτή, αφαιρείται ως ολικά αιωρούμενα στερεά. Το μεγαλύτερο μέρος αυτού του οργανικού αζώτου, υπόκειται σε αποσύνθεση και μέσω της βιολογικής αμμωνιοποίησης απελευθερώνεται αμμωνιακό άζωτο. Κάποια ποσότητα αζώτου,

Βιολογική νιτροποίηση

Νιτροποίηση, είναι η βιολογική διεργασία, δύο σταδίων, κατά την οποία, η αμμωνία ($\text{NH}_4\text{-N}$) οξειδώνεται σε νιτρώδη ($\text{NO}_2\text{-N}$) και τα νιτρώδη οξειδώνονται σε νιτρικά ιόντα ($\text{NO}_3\text{-N}$). Συμβαίνει σε θερμοκρασίες 5-45°C, με βέλτιστη θερμοκρασία 32°C και βέλτιστοι ρυθμοί νιτροποίησης, συμβαίνουν σε τιμές pH εντός του εύρους 7,5-8. Τα μικρόβια που είναι υπεύθυνα για τη νιτροποίηση και την απονιτροποίηση, λειτουργούν καλύτερα σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 15°C (Vymazal 1999, Kusch et al. 2003). Επάνω από αυτήν τη θερμοκρασία συμβαίνει και η ανάπτυξη των φυτών τα οποία παρέχουν το απαραίτητο διαλυμένο οξυγόνο για τη νιτροποίηση (Reed et al. 1995, Newman et al. 2000,

Yang et al. 2001, Vymazal 2002, Kuschik et al. 2003, Al-Omari and Fayyad 2003, Jing and Lin 2004). Ο παθητικός αερισμός που προσφέρουν τα φυτά, απελευθερώνοντας οξυγόνο από τις ρίζες τους, στηρίζει και ενισχύει τη νιτροποίηση.

Στοιχειομετρία βιολογικής νιτροποίησης

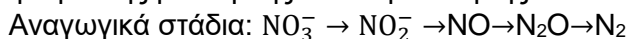


Στους τεχνητούς υγροβιότοπους κατακόρυφης ροής, έχουν παρατηρηθεί υψηλά επίπεδα νιτροποίησης, λόγω της μεγάλης ικανότητας μεταφοράς οξυγόνου (Cooper 1999). Είναι πολύ αποδοτικοί και στην οξείδωση οργανικού αζώτου.

Βιολογική απονιτροποίηση

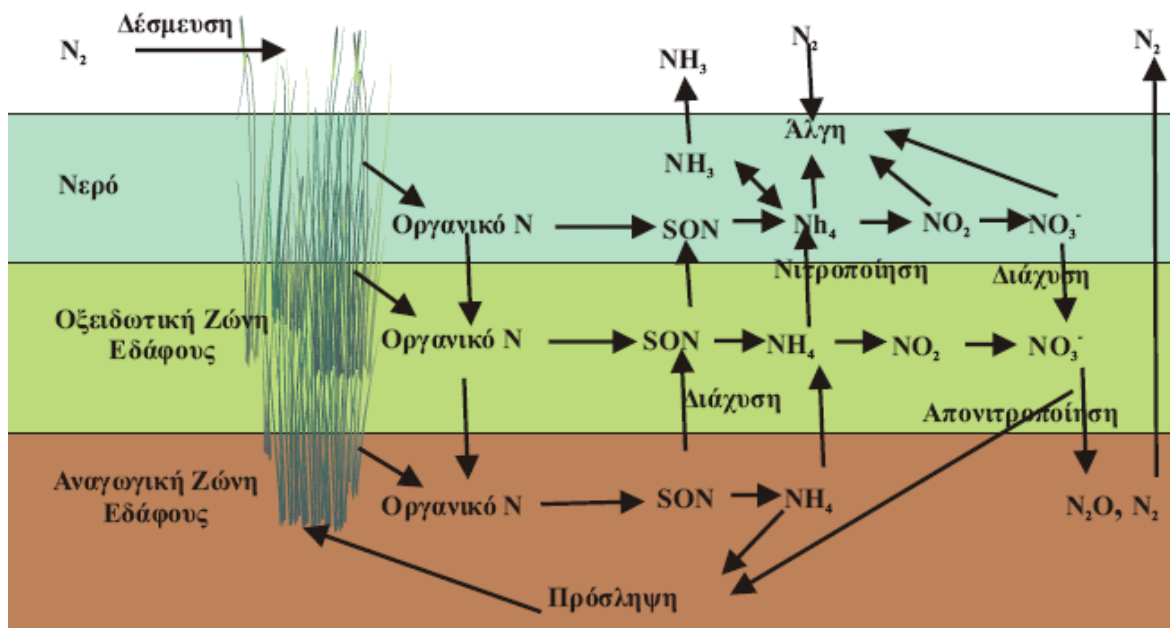
Απονιτροποίηση, είναι η βιολογική αναγωγή των νιτρικών, σε νιτρώδη, σε οξείδια του αζώτου, υποοξείδια του αζώτου και αέριο άζωτο. Η απονιτροποίηση, συμβαίνει συγχρόνως με τη νιτροποίηση, σε αναερόβιες περιοχές (Vymazal 1999).

Στοιχειομετρία της βιολογικής απονιτροποίησης



Για τη διεργασία της βιολογικής απομάκρυνσης αζώτου, είναι απαραίτητη μια πηγή οργανικού άνθρακα για την ανάπτυξη ετερότροφων βακτηρίων. Ένας δότης ηλεκτρονίων είναι μια Άλλες πηγές άνθρακα είναι το κιτρικό οξύ, το οξικό οξύ ή αιθανικό οξύ και η ακετόνη ή προπανόνη. Στους τεχνητούς υγροβιότοπους κατακόρυφης ροής, λόγω της έλλειψης αναερόβιων περιοχών, με επαρκή οργανικό άνθρακα για την δράση των ετερότροφων απονιτροποιητών, η βιολογική απονιτροποίηση δεν ευνοείται, με αποτέλεσμα το άζωτο να αποβάλλεται ως νιτρικό άζωτο και η απομάκρυνση του ολικού αζώτου να περιορίζεται (Arias et al. 2005).

Η λήψη αζώτου από τα φυτά, είναι μια διεργασία απομάκρυνσης θρεπτικών στους τεχνητούς υγροβιότοπους. Τα φυτά, χρειάζονται άζωτο για το μεταβολισμό τους, την ανάπτυξή τους και τον πολλαπλασιασμό τους. Προσλαμβάνουν το αμμωνιακό άζωτο μέσω των ριζών τους και το ενσωματώνουν στη βιομάζα τους. Έχει παρατηρηθεί ότι πολύ μικρή ποσότητα αζώτου απορροφάται από τα φυτά και ότι η νιτροποίηση είναι ο κύριος μηχανισμός απομάκρυνσης της αμμωνίας (Στεφανάκης 2011).

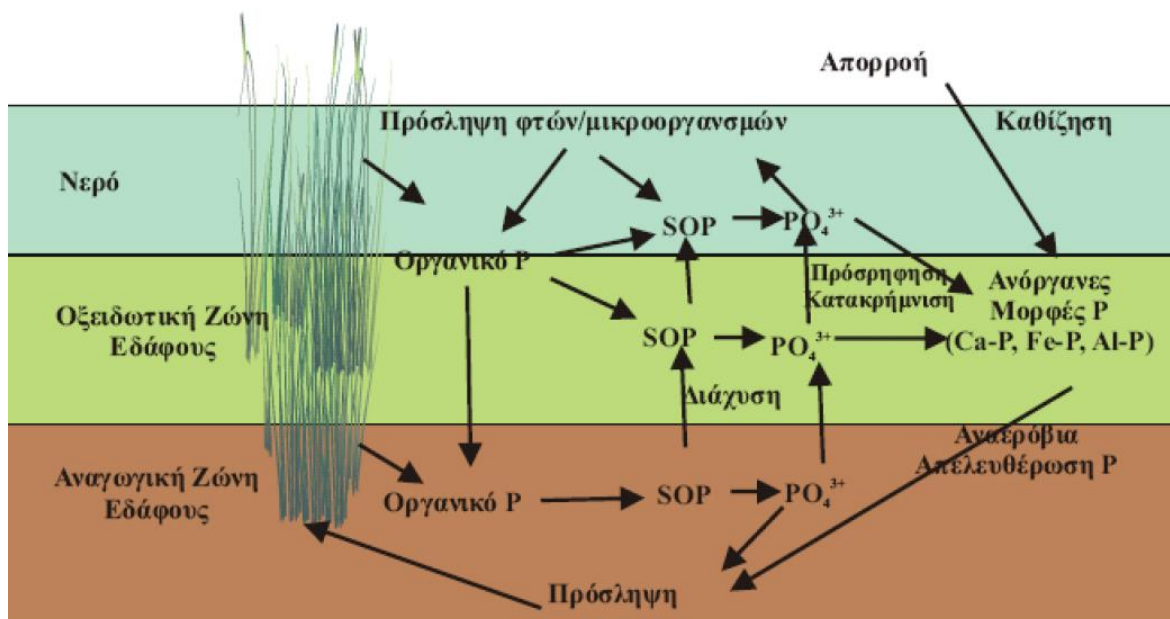


Εικόνα 2.7 Ο κύκλος του αζώτου σε έναν τεχνητό υγροβιότοπο (Ακράτος 2006).

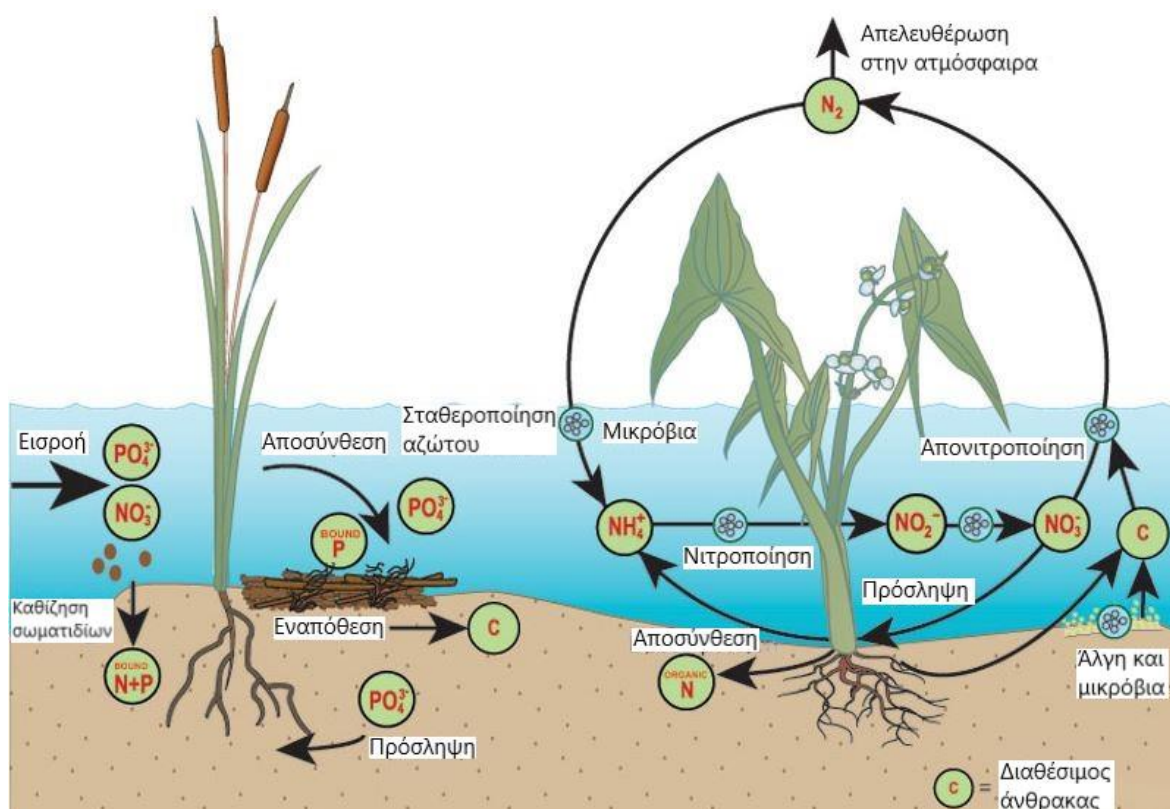
iv) Απομάκρυνση φωσφόρου

Στους τεχνητούς υγροβιότοπους, η απομάκρυνση φωσφόρου, συμβαίνει μέσω προσρόφησης, καθίζησης και δέσμευσης από τους μικροοργανισμούς και τα φυτά (Drizo et al. 1999, Greenway and Woolley 1999, Merlin et al. 2002, Kadlec and Wallace 2009, Kadlec and Knight 1996, Yang et al. 2001). Ο κύριος μηχανισμός αφαίρεσης φωσφόρου σε τεχνητούς υγροβιότοπους υπόγειας ροής είναι η προσρόφηση και η κατακρήμνιση (Brooks et al. 2000, Arias et al. 2001, Luederitz et al. 2001, Yang et al. 2001, Vymazal 2002, Vymazal 2004). Η δέσμευση από τους μικροοργανισμούς και τα φυτά, είναι υπεύθυνη για την απομάκρυνση των ορθοφωσφορικών και οι υπόλοιποι μηχανισμοί είναι υπεύθυνοι για την αφαίρεση όλων των μορφών φωσφόρου (Kadlec and Knight 1996).

Η αποτελεσματικότητα των τεχνητών υγροβιότοπων στην απομάκρυνση φωσφόρου, σχετίζεται με την προσρόφηση στο υπόστρωμα (Sakadevan and Bavor 1998, Drizo et al. 1999, Steer et al. 2002). Ένας μικρός χρόνος επαφής μεταξύ του υγρού αποβλήτου και των υλικών δεν ευνοεί την προσρόφηση του φωσφόρου (Kadlec and Wallace 2009, Στεφανάκης 2011). Σε τιμές pH μεγαλύτερες του 6, οι αντιδράσεις είναι συνδυασμός της προσρόφησης στα οξείδια Al και Fe και της καθίζησης ως φωσφορικά άλατα του ασβεστίου (Arias et al. 2001, Prochaska and Zouboulis 2006, Vymazal 2007). Υλικά πλήρωσης με αυξημένες συγκεντρώσεις σιδήρου (Fe) και αργιλίου (Al) οδηγούν στη δημιουργία συμπλόκων όπως είναι τα: $\text{Al}(\text{PO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{Fe}(\text{PO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, $\text{Al}_3(\text{OH})_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, ενώ υλικά με αυξημένες συγκεντρώσεις ασβεστίου (Ca) οδηγούν στη δημιουργία συμπλόκων όπως είναι τα: $\text{Ca}_3(\text{Cl}, \text{F})(\text{PO}_4)_3$, $\text{Ca}_5(\text{OH})(\text{PO}_4)_3$ (Kadlec and Knight 1996). Στους τεχνητούς υγροβιότοπους κατακόρυφης ροής, η απομάκρυνση φωσφόρου είναι περιορισμένη, μεταξύ 20-30% (Luderitz and Gerlach 2002, Arias et al. 2005, Prochaska and Zouboulis 2006) και η ικανότητα απομάκρυνσης φωσφόρου, ενός υλικού πλήρωσης, εξαρτάται από την περιεκτικότητά του σε αυτά τα στοιχεία και από τη στιγμή που καλυφθούν όλες οι θέσεις προσρόφησης του υλικού, δεν δύναται να υπάρξει περαιτέρω συγκράτηση (Meuleman et al. 2003). Η προσρόφηση του φωσφόρου, είναι μια ενδόθερμη αντίδραση (Jin et al. 2005), το οποίο σημαίνει ότι σε χαμηλές θερμοκρασίες μειώνεται η προσροφητική χωρητικότητα των υλικών, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται καλύτερα αποτελέσματα σε υψηλότερες θερμοκρασίες (Rustige et al. 2003).



Εικόνα 2.8 Ο κύκλος του φωσφόρου σε έναν τεχνητό υγροβιότοπο (Ακράτος 2006).



Εικόνα 2.9 Απομάκρυνση θρεπτικών συστατικών σε έναν τεχνητό υγροβιότοπο (Kadlec and Knight 1996).

2.3.6 Επίδραση της εξατμισοδιαπνοής στην απομάκρυνση των ρύπων

Εξατμισοδιαπνοή είναι οι απώλειες του νερού στην ατμόσφαιρα από το νερό, το έδαφος και τα φυτά. Όταν η εξατμισοδιαπνοή είναι υψηλή, οι εκροές είναι μειωμένες και επομένως αυξάνεται ο υδραυλικός χρόνος παραμονής με αποτέλεσμα την αύξηση των συγκεντρώσεων των δύσκολα αποικοδομήσιμων ρύπων. Σημαντικό ρόλο στην ποσότητα

του νερού που απομακρύνεται μέσω της εξατμισοδιαπνοής παίζει και η θερμοκρασία καθώς το χειμώνα όπου οι θερμοκρασίες είναι χαμηλότερες και οι ανάγκες των φυτών μικρότερες, μειώνεται και το ποσοστό της εξατμισοδιαπνοής. Το καλοκαίρι, όπου επικρατούν υψηλές θερμοκρασίες και ημέρες με έντονη ηλιακή ακτινοβολία και τα φυτά αναπτύσσονται με έντονους ρυθμούς, οι ρυθμοί της εξατμισοδιαπνοής αυξάνονται και παρατηρείται μείωση της στάθμης του νερού, συμπίκνωση του λύματος και αντίστοιχα αυξημένες συγκεντρώσεις των ρύπων στο λύμα.

2.3.7 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Τα πλεονεκτήματα χρησιμοποίησης τεχνητών υγροβιότοπων ως διεργασία διαχείρισης υγρών αποβλήτων, είναι τα ακόλουθα:

- Χαμηλό κόστος κατασκευής.
- Χαμηλό κόστος λειτουργίας.
- Χαμηλό κόστος συντήρησης.
- Χρειάζονται λίγη ή καθόλου ηλεκτρική ενέργεια, κατά τη λειτουργία τους. Μειώνεται η παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα και άλλων αερίων του θερμοκηπίου, είναι 'πράσινη' τεχνολογία.
- Δεν είναι απαραίτητη η χρήση χημικών.
- Χρειάζονται λίγα ή καθόλου μηχανήματα.
- Απλότητα.
- Αποδεκτοί εμφανισιακά, έχουν 'πράσινη' εμφάνιση.
- Δεν παράγεται ιλύς, αποθηκεύεται και επεξεργάζεται στο ίδιο σύστημα.
- Δεν χρειάζεται εξειδικευμένο προσωπικό.
- Λήψη 'Carbon credits'.
- Λειτουργούν ως για πολλά είδη ζώων, όπως τα πουλιά.
- Χρησιμοποιούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ηλιακή, αιολική).
- Παραγωγή νερού άρδευσης.
- Παραγωγή βιομάζας.
- Περιοδική εργασία για τη λειτουργία τους, η παρουσία μόνιμου προσωπικού δεν είναι απαραίτητη, ένας έλεγχος ανά 15-60 ημέρες.
- Περιοδική εργασία για τη συντήρησή τους, η παρουσία μόνιμου προσωπικού δεν είναι απαραίτητη.
- Δεν παρατηρούνται οσμές.
- Η διάρκεια λειτουργίας τους είναι μεγαλύτερη από 30 χρόνια.
- Μείωση αιωρούμενων σωματιδίων.
- Αύξηση βιοποικιλότητας.
- Βελτίωση του μικροκλίματος.

Τα μειονεκτήματα χρησιμοποίησης τεχνητών υγροβιότοπων ως διεργασία διαχείρισης υγρών αποβλήτων, είναι τα ακόλουθα:

- Είναι απαραίτητη μεγάλη έκταση γης.
- Η απόδοση επηρεάζεται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Η ετήσιες τιμές είναι αποδεκτές.
- Μεγάλες ποσότητες ρύπων ή νερού μπορεί να μειώσουν την αποτελεσματικότητά τους.
- Μπορούν να ανακάμψουν από μια πτώση της στάθμης, αλλά δεν αντέχουν ολική ξήρανση. Είναι απαραίτητη μια ποσότητα νερού για να επιβιώσουν.
- Πιθανή εμφάνιση εντόμων σε συστήματα επιφανειακής ροής.

- Πιθανές οσμές σε συστήματα επιφανειακής ροής.
- Κάποια συστήματα υποεπιφανειακής ροής μπορεί να εμφανίσουν προβλήματα εμφράξεων.

2.4 Σκοπός διπλωματικής εργασίας

- Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας, είναι η διερεύνηση της εφαρμογής τεχνητού αερισμού, σε τεχνητούς υγροβιότοπους κατακόρυφης ροής, ως τρόπο βελτίωσης αυτής της τεχνολογίας, για τη διαχείριση πρωτοβάθμιας εκροής αστικών λυμάτων. Ταυτόχρονα, διερευνάται και η βελτίωση παραμέτρων του σχεδιασμού τους και της λειτουργίας τους, όπως η ποσότητα των αστικών λυμάτων τα οποία εφαρμόζονται και ο υδραυλικός χρόνος παραμονής των αστικών λυμάτων εντός της κλίνης.

3. Πειραματικό μέρος

3.1 Πιλοτικοί τεχνητοί υγροβιότοποι

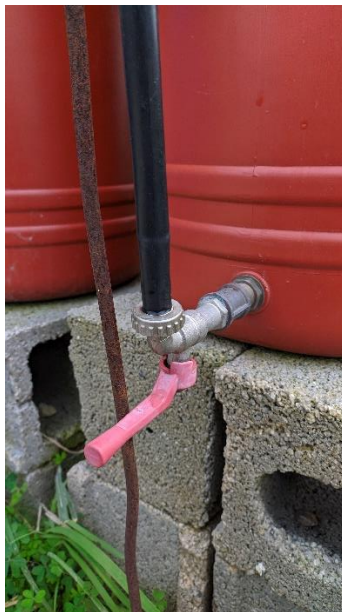
Οι τρεις πιλοτικοί τεχνητοί υγροβιότοποι που χρησιμοποιήθηκαν, ήταν κατακόρυφης ροής. Οι δύο φυτεύτηκαν και ο άλλος παρέμεινε αφύτευτος ως μονάδα μάρτυρας. Στον κάθε έναν, εφαρμόζονταν τεχνητός αερισμός. Ο κάθε ένας, αποτελούνταν από μια μονάδα με μια βρύση, το υλικό πλήρωσης, τα φυτά, αν ο συγκεκριμένος είχε φυτευτεί και έναν αεριστήρα.



Εικόνα 3.1 Οι πιλοτικοί τεχνητοί υγροβιότοποι.

3.1.1 Βάσεις

Ως βάση, του κάθε πιλοτικού τεχνητού υγροβιότοπου, χρησιμοποιήθηκε μια μονάδα, κατασκευασμένο από υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο – high density polyethylene/HDPE. Το κάθε μονάδα, είχε διάμετρο 37 εκατοστά. Το βάθος των υλικών σε δύο μονάδες, επιλέχθηκε ίσο με 50 εκατοστά, και σε αυτά φυτεύτηκαν καλάμια του είδους *Phragmites australis*,. Στις δύο ίδιες μονάδες, σε ύψος 5 εκατοστά επάνω από τον πυθμένα τους, έγινε από μια τρύπα, στην οποία τοποθετήθηκε από μια βρύση για τη συλλογή της εκροής. Με εφαρμογή ενός λάστιχου, το βάθος του νερού διαμορφώθηκε στα 40 εκατοστά.



Εικόνα 3.2 Η βρύση που τοποθετήθηκε στις δύο μονάδες με ύψος 50 εκατοστά.



Εικόνα 3.3 Η βρύση που τοποθετήθηκε στη μονάδα με ύψος 60 εκατοστά.

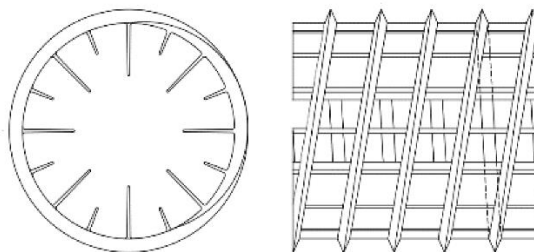
Στην άκρη του κάθε λάστιχου, προστέθηκε από μια πλαστική γωνία και σε αυτή συνδέθηκε από ένα άλλο λάστιχο, το οποίο κατέληγε σε μια πλαστική φιάλη, όγκου 10 λίτρων. Εντός του βαρελιού με ύψος 60 εκατοστά, προστέθηκε ένας πλαστικός σωλήνας, μήκους 55 εκατοστών, διαμέτρου 4 εκατοστών και κατακόρυφη διεύθυνση.

3.1.2 Υλικά πλήρωσης

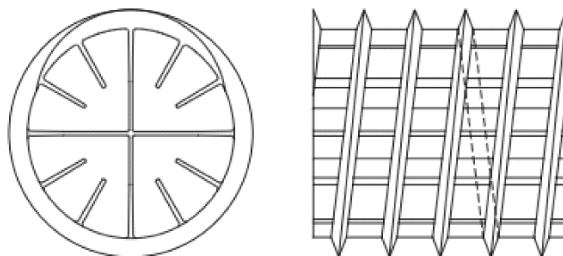
Τα υλικά πλήρωσης τα οποία χρησιμοποιήθηκαν, ήταν ανακυκλωμένο πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας – recycled high density polyethylene/rHDPE) και χαλίκι. Στις μονάδες P, G και C, το ανακυκλωμένο πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας και το χαλίκι, έφταναν μέχρι ύψος 50 εκατοστά.

i) Ανακυκλωμένο πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας - rHDPE

Χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι ανακυκλωμένου πολυαιθυλενίου υψηλής πυκνότητας, της εταιρίας 'Christian Stöhr GmbH & Co. KG'. Ο ένας τύπος, ονομάζεται 'HX38 Biocarrier', έχει ειδική επιφάνεια $188 \text{ m}^2/\text{m}^3$, διάμετρο 38 mm και μήκος 38 mm. Ο άλλος τύπος, ονομάζεται 'HX25KLL Biocarrier', έχει ειδική επιφάνεια $360 \text{ m}^2/\text{m}^3$, διάμετρο 25 mm και μήκος 25 mm, και πορώδες που ξεπερνά το 90%



Εικόνα 3.4 HX38 Biocarrier



Εικόνα 3.5 HX25KLL Biocarrier



Εικόνα 3.6 Κομμάτια ανακυκλωμένου πολυαιθυλενίου υψηλής πυκνότητας που χρησιμοποιήθηκαν.

ii) Χαλίκι

Τα χαλίκια που χρησιμοποιήθηκαν, είχαν μέση διάμετρο 15 mm και πορώδες 38%.



Εικόνα 3.7 Τα χαλίκια που χρησιμοποιήθηκαν.

3.1.3 Γένος και είδος φυτών

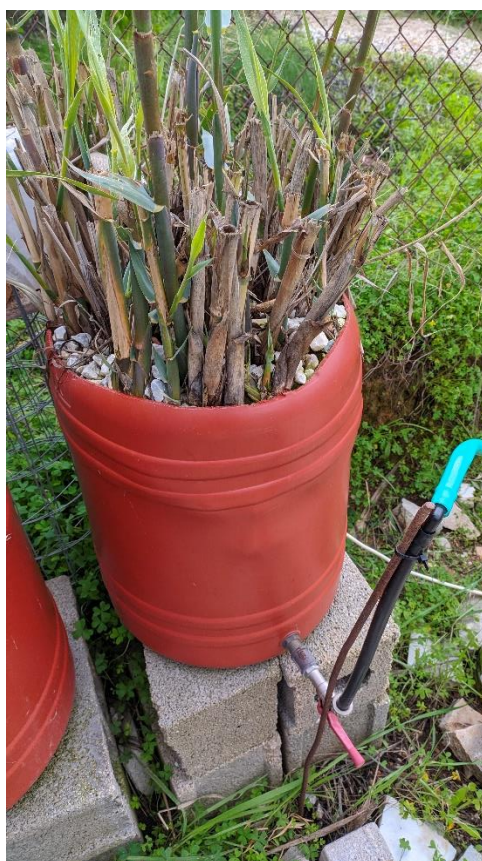
Το γένος φυτών που χρησιμοποιήθηκε, είναι το καλάμι. Το είδος καλαμιού που χρησιμοποιήθηκε, ονομάζεται 'κοινό καλάμι', το οποίο είναι γνωστό και ως *Phragmites australis*.



Εικόνα 3.8 Το *Phragmites australis*, γνωστό και ως κοινό καλάμι



Εικόνα 3.9 Ο πιλοτικός τεχνητός υδροβιότοπος που περιείχε ανακυκλωμένο πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας και είχε φυτευτεί.



Εικόνα 3.10 Ο πιλοτικός τεχνητός υδροβιότοπος που περιείχε χαλίκι και είχε φυτευτεί.



Εικόνα 3.11 Ο πιλοτικός τεχνητός υγροβιότοπος που περιείχε ανακυκλωμένο πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας και χρησιμοποιήθηκε για έλεγχο.



Εικόνα 3.12 Κάτοψη του πιλοτικού τεχνητού υγροβιότοπου που περιείχε ανακυκλωμένο πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας και χρησιμοποιήθηκε για έλεγχο.

3.1.4 Εφαρμογή τεχνητού αερισμού και κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας

Για την εφαρμογή αέρα, στους πιλοτικούς τεχνητούς υγροβιότοπους, χρησιμοποιήθηκε ένας αεριστήρας για τον κάθε έναν. Οι αεριστήρες, ήταν τοποθετημένοι επάνω σε μια βάση, δίπλα στους υγροβιότοπους και ήταν καλυμμένοι με ένα νάιλον, για προστασία από τα λύματα κατά τη διάρκεια της άρδευσης και από το νερό της βροχής. Ο αέρας, από τον κάθε αεριστήρα, μεταφερόταν εντός του κάθε βαρελιού, μέσω ενός πλαστικού σωλήνα. Η μια άκρη του κάθε σωλήνα, ήταν συνδεδεμένη με έναν διαφορετικό αεριστήρα και η άλλη άκρη, κατέληγε στον πυθμένα του κάθε βαρελιού, όπου ήταν ελεύθερη. Ο κάθε αεριστήρας παρείχε 5.040 L/d αέρα. Ο κάθε ένας είχε διαστάσεις ύψοςxπλάτοςxμήκος 9x7x20,5 εκατοστά και βάρος 375 γραμμάρια. Οι αεριστήρες, ήταν μοντέλου 'AMTRA MOUSE 4 – Aquarium Air Pump', της εταιρίας 'amtra'. Η ισχύς του κάθε αεριστήρα είναι 2,7 W. Σε αυτήν τη διερεύνηση, ο τεχνητός αερισμός, εφαρμόζονταν στους υγροβιότοπους για 153 ημέρες, από τις 7 Ιανουαρίου 2023 μέχρι και τις 8 Ιουνίου 2023. Η ηλεκτρική ενέργεια η οποία καταναλώθηκε από τους αεριστήρες για αυτήν τη διερεύνηση, είναι 9,91 kWh.



Εικόνα 3.13 Οι αεριστήρες που χρησιμοποιήθηκαν.

3.2 Συλλογή, μεταφορά και αποθήκευση των αστικών λυμάτων

Αστικό λύμα συλλέγονταν από την εκροή της πρωτοβάθμιας καθίζησης και μεταφέρονταν στις εγκαταστάσεις του Πολυτεχνείου.

3.3 Εφαρμογή αστικών λυμάτων, μέτρηση εκροών και λήψη δειγμάτων

Η εφαρμογή των αστικών λυμάτων, στον κάθε πιλοτικό τεχνητό υγροβιότοπο στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, ξεκίνησε στις 7 Ιανουαρίου 2023, γινόταν κάθε δύο ημέρες και ολοκληρώθηκε στις 8 Ιουνίου 2023. Από τις 7 Ιανουαρίου, μέχρι και τις 5 Μαΐου, εφαρμόζονται 12 L/day και από τις 7 Μαΐου, μέχρι και τις 8 Ιουνίου, εφαρμόζονται 16 L/day αστικών λυμάτων, στον κάθε τεχνητό υγροβιότοπο. Τα αστικά λύματα, εφαρμόζονταν, στον κάθε πιλοτικό τεχνητό υγροβιότοπο, με τη δημιουργία επιφανειακής πλημμύρας, στην επιφάνεια του υλικού πλήρωσης. Η εκροή του κάθε τεχνητού υγροβιότοπου συλλέγονταν σε φιάλη με όγκο 10 L. Στον πιλοτικό τεχνητό υγροβιότοπο, ο οποίος χρησιμοποιούνταν για έλεγχο, η στάθμη, διατηρούνταν σταθερή, 4 εκατοστά κάτω από την επιφάνεια του υλικού

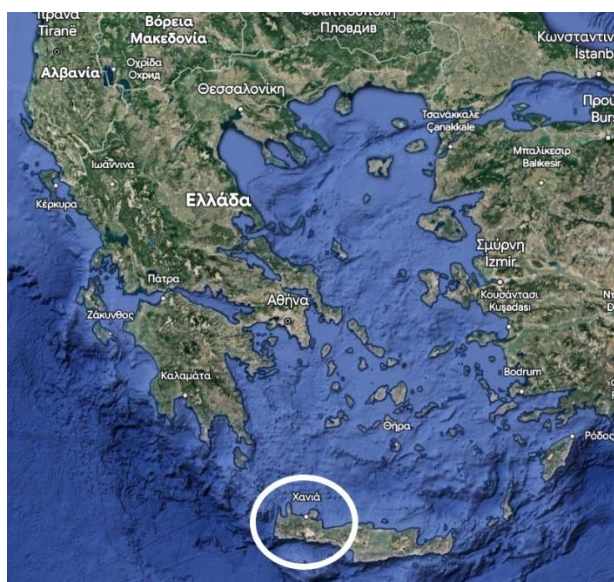
πλήρωσης. Την επόμενη ημέρα από την εφαρμογή των λυμάτων και την ίδια ώρα, μετριόνταν η ποσότητα εκροής του κάθε πιλοτικού τεχνητού υγροβιότοπου που είχε φυτευτεί.

3.4 Ονομασία δειγμάτων

Το δείγμα, από την πρωτοβάθμια εκροή η οποία εφαρμόζονταν στον κάθε υγροβιότοπο, ονομαζόταν 'Ιη', το δείγμα από την εκροή του υγροβιότοπου που περιείχε πλαστικό και είχε φυτευτεί, ονομαζόταν 'Ρ', το δείγμα από την εκροή του υγροβιότοπου που περιείχε χαλίκι και είχε φυτευτεί, ονομαζόταν 'Γ' και το δείγμα από την εκροή του υγροβιότοπου που περιείχε ανακυκλωμένο πλαστικό και χρησιμοποιήθηκε για έλεγχο, ονομαζόταν 'C'.

3.5 Τοποθεσία

Οι πιλοτικοί τεχνητοί υγροβιότοποι, ήταν τοποθετημένοι σε έκταση του Πολυτεχνείου Κρήτης, κοντά στα κτήρια της σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, και σε περιφραγμένο χώρο. Οι συντεταγμένες της τοποθεσίας είναι $35^{\circ}32'00.0''\text{N}$ $24^{\circ}04'12.4''\text{E}$ και το υψόμετρό της είναι 137 μέτρα.



Εικόνα 3.14 Η τοποθεσία των πιλοτικών τεχνητών υγροβιότοπων, κλίμακα 1:6.250.000.



Εικόνα 3.15 Η τοποθεσία των πιλοτικών τεχνητών υγροβιότοπων, κλίμακα 1:454.545.



Εικόνα 3.16 Η τοποθεσία των πιλοτικών τεχνητών υγροβιότοπων, κλίμακα 1:4.494.

3.6 Κλιματολογικές συνθήκες

Οι κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούσαν στην τοποθεσία που τοποθετήθηκαν οι τεχνητοί υγροβιότοποι, κατά τους μήνες της διερεύνησης, είναι γνωστές από τον τα δεδομένα του μετεωρολογικού σταθμού του Πολυτεχνείου Κρήτης. Ο μετεωρολογικός σταθμός είναι τοποθετημένος σε υψόμετρο 137 μέτρων, κοντά στους τεχνητούς υγροβιότοπους, στην Πολυτεχνειούπολη, και ονομάζεται Χανιά (LG25). Το ύψος των αισθητήρων θερμοκρασίας και υγρασίας είναι 1,8m και το ύψος ανεμομέτρου είναι 5m.

| Μήνας | Μέση Βροχόπτωση (mm) | Θερμοκρασία (°C) | | Ταχύτητα ανέμου (km/h) | | Επικρατούσα διεύθυνση ανέμου |
|-------------|----------------------|------------------|---------|------------------------|---------|------------------------------|
| | | Μέση | Μέγιστη | Μέση | Μέγιστη | |
| Ιανουάριος | 3,34 | 12,3 | 20,7 | 6 | 67,6 | ΝΔ |
| Φεβρουάριος | 2,16 | 10,9 | 24,6 | 10,7 | 70,8 | ΝΔ |
| Μάρτιος | 1,06 | 13,8 | 23,4 | 10,4 | 70,8 | ΝΔ |

| | | | | | | |
|----------|------|------|------|-----|------|----|
| Απρίλιος | 0,95 | 15,7 | 27,9 | 8,9 | 57,9 | ΝΔ |
| Μάιος | 3,23 | 18,1 | 27,3 | 8 | 51,5 | Α |
| Ιούνιος* | 1,13 | 18,8 | 32,2 | 3,9 | 37,0 | Α |

*: για της ημέρες της διερεύνησης

Πίνακας 3.1 Μετεωρολογικά στοιχεία τοποθεσίας

3.7 Υπολογισμός εξατμισοδιαπνοής

Για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής, του κάθε μήνα, χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές των μετρήσεων της εκροής του κάθε τεχνητού υδροβιότοπου. Προστέθηκαν οι τιμές των ποσοτήτων των λυμάτων τα οποία εφαρμόστηκαν στον κάθε πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο ξεχωριστά, κατά τη διάρκεια αυτού του μήνα και οι τιμές των ποσοτήτων των λυμάτων τα οποία αφαιρέθηκαν από τον κάθε τεχνητό υδροβιότοπο ξεχωριστά, κατά τη διάρκεια αυτού του μήνα. Από τη συνολική ποσότητα αστικών λυμάτων, τα οποία εφαρμόστηκαν στον κάθε πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο, κατά τη διάρκεια αυτού του μήνα, αφαιρέθηκε η συνολική ποσότητα, η οποία αφαιρέθηκε από τον κάθε έναν κατά τη διάρκεια αυτού του μήνα. Η κάθε μια από αυτές τις τιμές διαφοράς, διαιρέθηκε με τον αριθμό 1.000, έτσι ώστε, η μονάδα μέτρησής τους να είναι m^3 . Η κάθε μια από αυτές τις τιμές, διαιρέθηκε με την επιφάνεια του πιλοτικού τεχνητού υδροβιότοπου και το αποτέλεσμα πολλαπλασιάστηκε με τον αριθμό 1.000, έτσι ώστε, η μονάδα μέτρησής τους να είναι mm. Σε κάθε μια από αυτές τις τιμές, προστέθηκε η συνολική ποσότητα βροχόπτωσης αυτού του μήνα, της οποίας η μονάδα μέτρησης είναι mm και το αποτέλεσμα είναι ίσο με την τιμή της εξατμισοδιαπνοής στον πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο τον συγκεκριμένο μήνα.

3.8 Αναλύσεις εισροών και εκροών

Οι αναλύσεις, γινόντουσαν στο **Εργαστήριο Τεχνολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος, το οποίο βρίσκεται στο υπόγειο του κτηρίου Κ3, της σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης**. Οι αναλύσεις, ξεκίνησαν στις 9 Ιανουαρίου 2023 και ολοκληρώθηκαν στις 2 Ιουνίου 2023. Πραγματοποιήθηκαν δεκατρείς δειγματοληψίες στο διάστημα αυτό. Οι αναλύσεις που γινόντουσαν, ήταν βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο – Biochemical Oxygen Demand/BOD, χημικά απαιτούμενο οξυγόνο – Chemical Oxygen Demand/COD, ολικός οργανικός άνθρακας – Total Organic Carbon/TOC, ολικά αιωρούμενα στερεά – Total suspended solids/TSS, ολικό άζωτο – Total nitrogen/TN, αμμωνιακό άζωτο – Ammonium nitrogen (NH_4^+-N), νιτρικό άζωτο – Nitrate nitrogen (NO_3^--N), ολικός φώσφορος – Total phosphorus/TP, φωσφορικά – Phosphates ($PO_4^{3--}P$), συγκέντρωση ιόντων υδρογόνου – Potential of hydrogen/pH και ηλεκτρική αγωγιμότητα – Electrical Conductivity/EC.

3.8.1 Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο – Biochemical oxygen demand/BOD

Για τον υπολογισμό των τιμών των συγκεντρώσεων του βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου του κάθε δείγματος, χρησιμοποιείται ένα γυάλινο σκουρόχρωμο μπουκάλι, ωφέλιμου όγκου 500 ml, για το κάθε δείγμα. Το χρώμα του μπουκαλιού είναι σκούρο, για να μην επηρεάζονται τα δείγματα από την ηλιακή ακτινοβολία. Στο κάθε μπουκάλι, προστίθεται συγκεκριμένος όγκος δείγματος, ανάλογα με την αναμενόμενη τιμή συγκέντρωσης του δείγματος.

| Συγκέντρωση (mg/L) | Όγκος δείγματος (ml) | Συντελεστής |
|--------------------|----------------------|-------------|
| 0-40 | 428 | 1 |
| 0-80 | 360 | 2 |
| 0-200 | 244 | 5 |
| 0-400 | 157 | 10 |
| 0-800 | 94 | 20 |
| 0-2.000 | 56 | 40 |
| 0-4.000 | 21,7 | 100 |

Πίνακας 3.2 Αντιστοιχία μεταξύ των αναμενόμενων συγκεντρώσεων και των απαραίτητων όγκων

Το δείγμα από τα λύματα τα οποία εφαρμόζονται στους πιλοτικούς τεχνητούς υδροβιότοπους και το δείγμα από την εκροή του πιλοτικού τεχνητού υδροβιότοπου ο οποίος χρησιμοποιείται για έλεγχο, αναμένεται να έχουν τιμή συγκέντρωσης βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου μεταξύ του εύρους 0-400 mg/L. Για αυτό το λόγο, χρησιμοποιούνται 157 ml από το κάθε ένα από αυτά τα δείγματα. Τα δείγματα από τις εκροές των πιλοτικών τεχνητών υδροβιότοπων οι οποίοι έχουν φυτευτεί, αναμένεται να έχουν τιμή συγκέντρωσης βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου, μεταξύ του εύρους 0-200 mg/L. Για αυτό το λόγο, χρησιμοποιούνται 244 ml από το κάθε ένα από αυτά τα δείγματα. Εντός του κάθε μπουκαλιού, προστίθενται ένας μαγνήτης, ο οποίος χρησιμοποιείται για την ανάδευση των δειγμάτων, έτσι ώστε να εμπλουτίζονται με οξυγόνο. Στο χείλος του κάθε μπουκαλιού, τοποθετείται από μια βάση και μέσα στην βάση προστίθενται καυστικό νάτριο για τη δέσμευση του διοξειδίου του άνθρακα που παράγεται από τους μικροοργανισμούς, έτσι ώστε η διαφορά πίεσης που θα προκύψει και θα μετρηθεί από τον μετρητή, να οφείλεται στην κατανάλωση του οξυγόνου από τους μικροοργανισμούς. Το κάθε μπουκάλι, κλείνεται με έναν μανομετρικό μετρητή, τοποθετείται επάνω σε μια βάση ανάδευσης, η οποία βρίσκεται εντός ενός ψυγείου και γίνεται η απαραίτητη ρύθμιση του μετρητή. Οι μετρητές που χρησιμοποιήθηκαν, ονομάζονται 'BSB/BOD Sensor' και είναι της εταιρίας 'AQUALYTIC'.

Η βάση, δημιουργεί ηλεκτρομαγνητικά πεδία και με αυτόν τον τρόπο οι μαγνήτες περιστρέφονται και γίνεται ανάδευση των δειγμάτων. Το ψυγείο έχει ρυθμιστεί να έχει σταθερή θερμοκρασία 20°C. Επίσης, εντός του ψυγείου, έχει προστεθεί και ένας μετρητής θερμοκρασίας.



Εικόνα 3.17 Ο μετρητής θερμοκρασίας εντός του ψυγείου.

Μετά το πέρας πέντε ημερών, τα τέσσερα σκουρόχρωμα γυάλινα μπουκάλια, αφαιρούνται από το ψυγείο. Έπειτα, η κάθε τιμή που μέτρησε ο κάθε μετρητής την πέμπτη ημέρα, πολλαπλασιάζεται με έναν συντελεστή, ανάλογα με την ποσότητα του δείγματος που χρησιμοποιήθηκε. Το γινόμενο που προκύπτει, είναι η τιμή της συγκέντρωσης του βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου του δείγματος.

3.8.2 Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο – Chemical oxygen demand/COD

Για τον υπολογισμό των τιμών των συγκεντρώσεων του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου του κάθε δείγματος, χρησιμοποιήθηκε το kit 'Tintometer, COD Vario Tube Test, 2420721', το οποίο έχει εύρος ανίχνευσης τιμής συγκέντρωσης 0-1.500 mg/L.

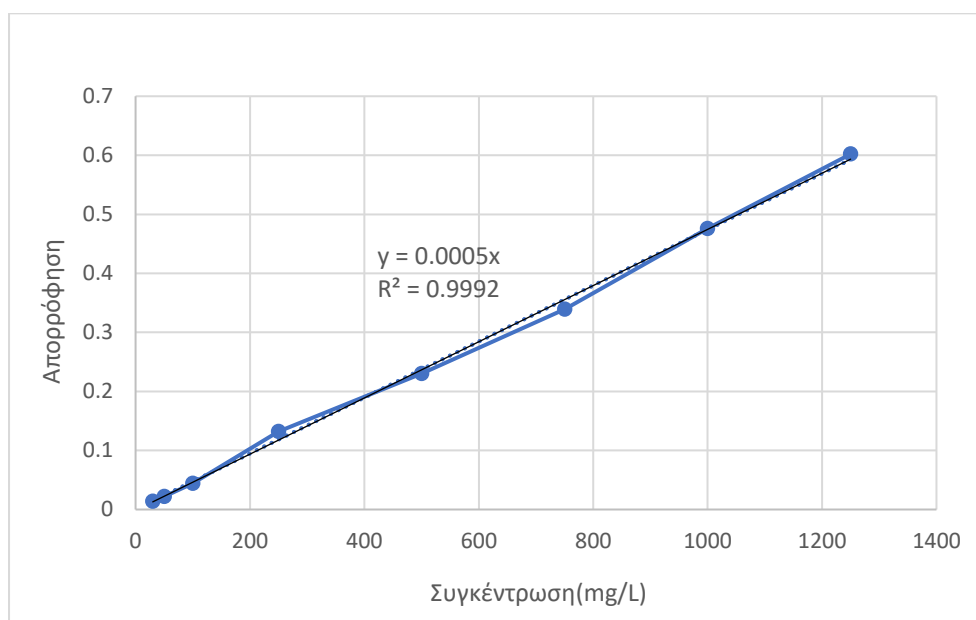
Προστίθενται 2 ml από το κάθε δείγμα, σε ένα διαφορετικό σωλήνα αντίδρασης, από το σετ. Οι σωλήνες αναδεύονται και τοποθετούνται στο μηχάνημα χώνευσης, το οποίο έχει ρυθμιστεί να έχει σταθερή θερμοκρασία 150°C.

Μετά το πέρας δύο ωρών, οι σωλήνες αντίδρασης, αφαιρούνται από το μηχάνημα. Γίνεται βαθμονόμηση του φασματοφωτομέτρου, χρησιμοποιώντας ένα έτοιμο τυφλό-blank διάλυμα και όταν οι σωλήνες αποκτήσουν θερμοκρασία δωματίου, μετρίεται η απορρόφηση του κάθε δείγματος. Το φασματοφωτόμετρο που χρησιμοποιήθηκε, ονομάζεται 'UV-VIS SPECTROPHOTOMETER, UV-1202' και είναι της εταιρίας 'SHIMADZU'.



Εικόνα 3.18 Το φασματοφωτόμετρο που χρησιμοποιήθηκε.

Γνωρίζοντας την τιμή απορρόφησης του κάθε δείγματος, υπολογίζεται η συγκέντρωση του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου, του κάθε δείγματος, με χρήση της ακόλουθης καμπύλης βαθμονόμησης.



Διάγραμμα 3.1 Καμπύλη βαθμονόμησης χημικά απαιτούμενου οξυγόνου.

3.8.3 Ολικός οργανικός άνθρακας – Total organic carbon/TOC

Η μέτρηση του ολικού οργανικού άνθρακα, που περιέχεται σε κάθε δείγμα, γίνεται με τον αναλυτή οργανικού άνθρακα που ονομάζεται 'TOC analyzer'. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε είναι το 'TOC-L', της εταιρείας 'SHIMADZU'.

Γίνεται διήθηση των δειγμάτων με φίλτρα μεμβράνης 'Whatman Uniflo Syringe Filter', με μέγεθος πόρων 0,45 μm και διάμετρο 25 mm. Στη συνέχεια, το δείγμα μεταφέρεται στο όργανο, το οποίο ονομάζεται 'TOTAL ORGANIC CARBON ANALYZER, TOC-L' και είναι της εταιρείας 'SHIMADZU'. Εκεί ακολουθεί όξυνση του δείγματος με 1,5% HCl ώστε ο ανόργανος άνθρακας να μετατραπεί σε CO_2 , το οποίο στη συνέχεια απομακρύνεται με διοχέτευση αέρα για 400 sec (sparging time). Μετά την απομάκρυνση του ανόργανου άνθρακα-Inorganic Carbon/IC, ο ολικός άνθρακας-Total Carbon/TC που μετρίεται από το όργανο αντιστοιχεί στον Οργανικό Άνθρακα - Organic Carbon/OC. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται από τον αναλυτή για τη μέτρηση του TC βασίζεται στην πρότυπο μέθοδο 5310 (Standard Methods for Water and Wastewater APHA 1992), κατά την οποία γίνεται οξείδωση του δείγματος στους 680°C με καταλύτη σφαιρίδια αλουμίνας επικαλυμμένα με πλατίνα. Κατά την καταλυτική οξείδωση του δείγματος ο ολικός άνθρακας μετατρέπεται σε CO_2 , το οποίο μετρίεται από ανιχνευτή υπέρυθρης ακτινοβολίας-IR.



Εικόνα 3.19 Ο αναλυτής οργανικού άνθρακα, 'TOC analyzer'.

3.8.4 Ολικά αιωρούμενα στερεά – Total suspended solids/TSS

Για την μέτρηση των τιμών των ολικών αιωρούμενων στερεών του κάθε δείγματος, χρησιμοποιείται ένα υαλόφιλτρο τύπου 'GF/C Glass Microfiber Filter', της εταιρείας 'Whatman', διαμέτρου 47 mm και με μέσο μέγεθος πόρων ίσο με 1,2 μm , για κάθε δείγμα. Το κάθε υαλόφιλτρο, τοποθετείται επάνω σε ένα κομμάτι αλουμινόχαρτο, ορίζεται για ποιο δείγμα θα χρησιμοποιηθεί και ζυγίζεται. Για τη ζύγιση, χρησιμοποιήθηκε η ζυγαριά 'LIBROR AEG-220', της εταιρείας 'SHIMADZU' με ακρίβεια τεσσάρων δεκαδικών ψηφίων και μέγιστη τιμή ζύγισης 220,0000 g. Μέσα στο της ζυγαριάς, έχει τοποθετηθεί ένα ποτήρι ζέσεως, το οποίο περιέχει 'silica gel', άμορφη και πορώδης μορφή διοξειδίου του πυριτίου, το οποίο χρησιμοποιείται για απορρόφηση ή προσρόφηση της υγρασίας.



Εικόνα 3.20 Η ζυγαριά που χρησιμοποιήθηκε.

Το κάθε υαλόφιλτρο, τοποθετείται στη βάση διήθησης του μηχανήματος ξεχωριστά, γίνεται ανάδευση του δείγματος για το οποίο έχει οριστεί ότι θα χρησιμοποιηθεί το συγκεκριμένο υαλόφιλτρο και γίνεται διήθηση κατάλληλου όγκου δείγματος από το υαλόφιλτρο. Για τη διήθηση των δειγμάτων μέσω των φίλτρων, χρησιμοποιήθηκε το μηχάνημα 'MEMBRAN – VAKUUMPUMPE, vacuubrand, max 3,6-4,0 m³/h'.



Εικόνα 3.21 Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση ολικών αιωρούμενων στερεών.

Το κάθε φίλτρο, τοποθετείται επάνω στο κομμάτι αλουμινόχαρτο και μέσα σε φούρνο, ο οποίος έχει ρυθμιστεί να έχει σταθερή θερμοκρασία 105°C. Μέσα στο φούρνο έχει τοποθετηθεί ένα ποτήρι ζέσεως, το οποίο περιέχει 'silica gel'. Μετά το πέρας δύο ωρών, τα φίλτρα αφαιρούνται από το φούρνο και ζυγίζονται. Η τιμή της συγκέντρωσης ολικών αιωρούμενων στερεών στο κάθε δείγμα, υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση.

$$TSS = \frac{\text{βάρος φίλτρου μετά τη διήθηση και την ξήρανση [g]} - \text{βάρος φίλτρου [g]}}{\text{όγκος δείγματος [L]}} \cdot \frac{1.000\text{mg}}{1\text{ g}}$$

Εξίσωση 3.1 Εξίσωση υπολογισμού ολικών αιωρούμενων στερεών.

3.8.5 Ολικό άζωτο – Total nitrogen/TN

Για τη μέτρηση των τιμών των συγκεντρώσεων του ολικού αζώτου του κάθε δείγματος, χρησιμοποιήθηκε το kit 'Total Nitrogen/TN Supelco, 1.14763.0001', της εταιρίας 'Merca' και το οποίο έχει εύρος ανίχνευσης τιμής συγκέντρωσης 10-150mg/L N.

Προστίθενται 1ml από το κάθε δείγμα, 9 ml απιονισμένο νερό σε έναν διαφορετικό δοκιμαστικό σωλήνα και γίνεται ανάδευση. Έπειτα, προστίθεται μια κουταλιά N-1K σε κάθε δοκιμαστικό σωλήνα και γίνεται ανάδευση. Μετά, προστίθενται 6 σταγόνες N-2K σε κάθε δοκιμαστικό σωλήνα και γίνεται ανάδευση. Οι δοκιμαστικοί σωλήνες, τοποθετούνται στο μηχάνημα χώνευσης, το οποίο έχει ρυθμιστεί να έχει σταθερή θερμοκρασία 120°C. Το μηχάνημα χώνευσης το οποίο χρησιμοποιήθηκε, είναι μάρκας 'Thermoreaktor TR200', της εταιρίας 'Merck'. Μετά το πέρας μίας ώρας, οι δοκιμαστικοί σωλήνες αφαιρούνται από το μηχάνημα. Όταν αποκτήσουν θερμοκρασία δωματίου, προστίθεται 1 ml από το κάθε χωνευμένο σε έναν διαφορετικό σωλήνα αντίδρασης από το σετ. Προστίθεται και 1 ml N-3K και γίνεται ανάδευση. Μετά το πέρας δέκα λεπτών, η τιμή της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου του κάθε δείγματος, μετριέται σε ένα μηχάνημα το οποίο ονομάζεται 'Spectroquant, NOVA 60', της εταιρίας 'MERCK'.

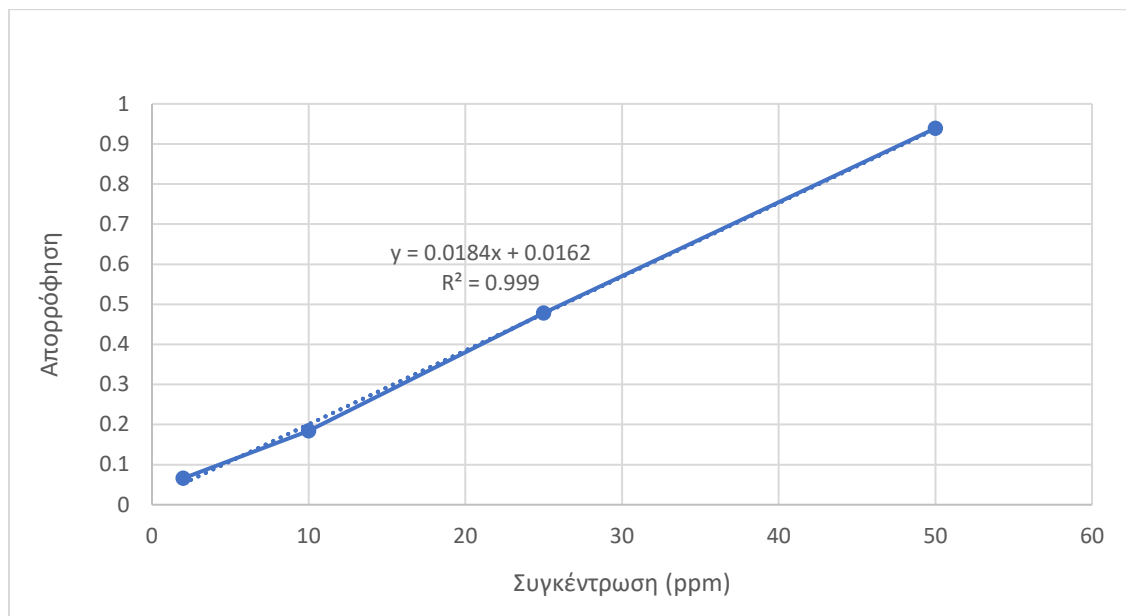


Εικόνα 3.22 Το όργανο μέτρησης της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου.

3.8.6 Αμμωνιακό άζωτο – Ammonium nitrogen ($\text{NH}_4\text{-N}$)

Για τη μέτρηση των τιμών των συγκεντρώσεων του αζώτου, το οποίο περιέχεται στο αμμώνιο του κάθε δείγματος, χρησιμοποιήθηκε το kit ' $\text{NH}_4^+\text{-N}$ Supelco, 1.00683.0001', της εταιρίας 'Merca' και το οποίο έχει εύρος ανίχνευσης τιμής συγκέντρωσης 2,0-150mg/L $\text{NH}_4^+\text{-N}$.

Σε ένα διαφορετικό ποτήρι ζέσεως για το κάθε δείγμα, προστίθενται 0,1 ml διηθημένου δείγματος, από φίλτρο με μέσο μέγεθος πόρων 0,45 μm , 5 ml $\text{NH}_4\text{-1}$, μια κουταλιά $\text{NH}_4\text{-2}$ και αναδεύονται. Για τη δημιουργία του τυφλού-blank διαλύματος, σε ένα ποτήρι ζέσεως, προστίθενται 0,1 ml απιονισμένο νερό, 5 ml $\text{NH}_4\text{-1}$, μια κουταλιά $\text{NH}_4\text{-2}$ και αναδεύονται. Μετά το πέρας 15 λεπτών, γίνεται βαθμονόμηση του φασματοφωτομέτρου με το τυφλό-blank διάλυμα, στα 690 nm και μετριέται η τιμή της απορρόφησης του κάθε δείγματος. Γνωρίζοντας την τιμή απορρόφησης του κάθε δείγματος, υπολογίζεται η τιμή της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου, του κάθε δείγματος, με χρήση της ακόλουθης καμπύλης βαθμονόμησης.

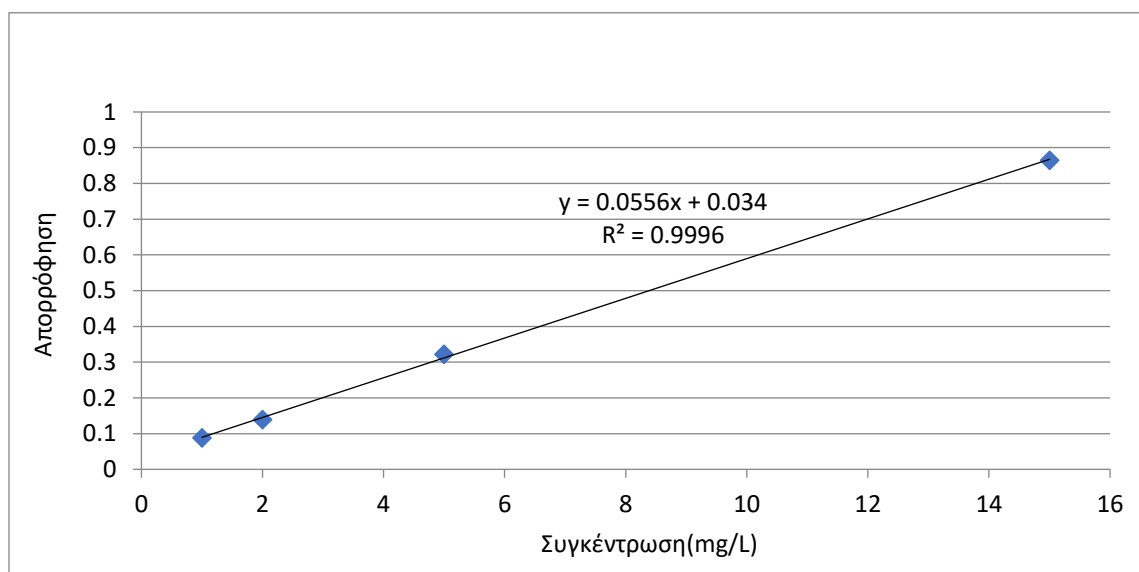


Διάγραμμα 3.2 Καμπύλη βαθμονόμησης αμμωνιακού αζώτου.

3.8.7 Νιτρικό άζωτο – Nitrate nitrogen ($\text{NO}_3\text{-N}$)

Για τη μέτρηση των τιμών των συγκεντρώσεων του αζώτου, το οποίο περιέχεται στα νιτρικά του κάθε δείγματος, χρησιμοποιήθηκε το kit 'Standard test NANOCOLOR Nitrate, item number: 91865', της εταιρίας 'MACHEREY-NAGEL' και το οποίο έχει εύρος ανίχνευσης τιμής συγκέντρωσης 0,10-30,0 mg/L $\text{NO}_3\text{-N}$.

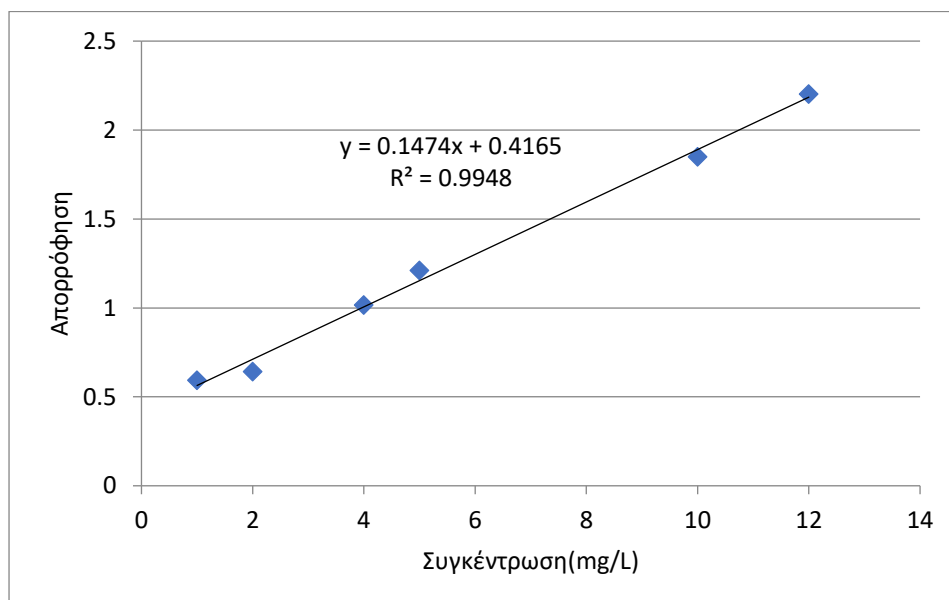
Σε ένα διαφορετικό ποτήρι ζέσεως για το κάθε δείγμα, προστίθενται 4 ml R1, 0,5 ml διηθημένου δείγματος, από φίλτρο με μέσο μέγεθος πόρων 0,45 μm , 0,5ml R2 και αναδεύονται. Για τη δημιουργία του τυφλού-blank διαλύματος, σε ένα ποτήρι ζέσεως, προστίθενται 4 ml R1, 0,5 ml απιονισμένο νερό, 0,5 ml R2, και αναδεύονται. Μετά το πέρας 10 λεπτών, γίνεται βαθμονόμηση του φασματοφωτομέτρου με το τυφλό-blank διάλυμα, στα 365 nm και μετρίεται η τιμή της απορρόφησης του κάθε δείγματος. Γνωρίζοντας την τιμή απορρόφησης του κάθε δείγματος, υπολογίζεται η τιμή της συγκέντρωσης του νιτρικού αζώτου, του κάθε δείγματος, με χρήση της ακόλουθης καμπύλης βαθμονόμησης.



Διάγραμμα 3.3 Καμπύλη βαθμονόμησης νιτρικού αζώτου.

3.8.8 Ολικός φώσφορος – Total phosphorus/TP

Για τη μέτρηση των τιμών των συγκεντρώσεων του ολικού φωσφόρου του κάθε δείγματος, προστίθενται 25 ml από το κάθε δείγμα, 5 ml νιτρικό οξύ, 1 mlθειικό οξύ σε ένα διαφορετικό ποτήρι ζέσεως και αναδεύονται. Τα δοχεία ζέσεως τοποθετούνται επάνω σε μια θερμαινόμενη πλάκα, η οποία έχει ρυθμιστεί να έχει σταθερή θερμοκρασία 400°C. Όταν έχουν μείνει 3 σταγόνες σε ένα ποτήρι ζέσεως, τότε αυτό αφαιρείται από την πλάκα. Το pH του περιεχομένου του κάθε ποτηριού ζέσεως, ρυθμίζεται να είναι εντός του εύρους 6-8, με τη χρήση υδροξειδίου του νατρίου και θειικού οξέος. Το περιεχόμενο του κάθε ποτηριού ζέσεως, διηθείται ξεχωριστά, από φίλτρο με μέσο μέγεθος πόρων 0,45 μm, σε έναν ογκομετρικό σωλήνα, προστίθεται απιονισμένο νερό μέχρι ο τελικός όγκος να είναι 25ml και τοποθετείται σε μια διαφορετική κωνική φιάλη. Για τη δημιουργία του απαραίτητου, για την ανάλυση, αντιδραστηρίου, προστίθενται 25 ml θειικό οξύ, 2,5 ml potassium antimonyl, 7,5ml ammonium molybdat, 15 ml ασκορβικό σε ένα ποτήρι ζέσεως και αναδεύονται. Σε κάθε μια κωνική φιάλη, προστίθενται 4 ml αντιδραστηρίου και αναδεύονται. Για τη δημιουργία του τυφλού-blank διαλύματος, προστίθενται 25 ml απιονισμένο νερό, 4 ml αντιδραστηρίου σε μια άδεια κωνική φιάλη και αναδεύονται. Μετά το πέρας 10 λεπτών, από όταν προστέθηκε το αντιδραστήριο, γίνεται βαθμονόμηση του φασματοφωτομέτρου με το τυφλό-blank διάλυμα, στα 880 nm και μετρίεται η απορρόφηση του κάθε δείγματος. Γνωρίζοντας την τιμή απορρόφησης του κάθε δείγματος, υπολογίζεται η τιμή της συγκέντρωσης του ολικού φωσφόρου, του κάθε δείγματος, με χρήση της ακόλουθης καμπύλης βαθμονόμησης.



Διάγραμμα 3.4 Καμπύλη βαθμονόμησης ολικού φωσφόρου και φωσφόρου ορθοφωσφορικών.

3.8.9 Φώσφορος ορθοφωσφορικών – Orthophosphate as phosphorus (PO₄-P)

Για τη μέτρηση των τιμών των συγκεντρώσεων του φωσφόρου, που περιέχεται στα ορθοφωσφορικά του κάθε δείγματος, χρησιμοποιείται το ίδιο αντιδραστήριο το οποίο χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του ολικού φωσφόρου. Διηθούνται 25 ml από το κάθε δείγμα ξεχωριστά, από φίλτρο με μέσο μέγεθος πόρων 0,45 μm, σε έναν ογκομετρικό σωλήνα, προστίθενται σε μια διαφορετική κωνική φιάλη, προστίθενται 4 ml αντιδραστηρίου στην κάθε φιάλη και αναδεύονται. Για τη δημιουργία του τυφλού-blank διαλύματος, προστίθενται 25 ml απιονισμένο νερό, 4 ml αντιδραστηρίου σε μια άδεια κωνική φιάλη και αναδεύονται. Μετά το πέρας 10 λεπτών, από όταν προστέθηκε το αντιδραστήριο, γίνεται βαθμονόμηση του φασματοφωτομέτρου με το τυφλό-blank διάλυμα, στα 880 nm και μετρίεται η απορρόφηση του κάθε δείγματος. Γνωρίζοντας την τιμή απορρόφησης του κάθε δείγματος, υπολογίζεται η τιμή της συγκέντρωσης του φωσφόρου των ορθοφωσφορικών, του κάθε δείγματος, με

χρήση της καμπύλης βαθμονόμησης που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της τιμής της συγκέντρωσης του ολικού φωσφόρου.

3.8.10 Συγκέντρωση ιόντων υδρογόνου – Potential of hydrogen/pH

Για τη μέτρηση της τιμής pH του κάθε δείγματος, χρησιμοποιείται το μηχανήμα 'micro pH 2002', της εταιρίας 'CRISON'. Για τη βαθμονόμηση του μηχανήματος, χρησιμοποιείται ένα διάλυμα το οποίο έχει τιμή pH ίση με 4 και ένα διάλυμα το οποίο έχει τιμή pH ίση με 7. Το ηλεκτρόδιο του μηχανήματος, τοποθετείται εντός του κάθε δείγματος και μετρείται η τιμή τους pH του κάθε δείγματος.



Εικόνα 3.23 Το όργανο μέτρησης ηλεκτρικής αγωγιμότητας που χρησιμοποιήθηκε

3.8.11 Ηλεκτρική αγωγιμότητα – Electrical conductivity/EC

Η τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του κάθε δείγματος, μετρείται με το όργανο 'micro CM 2202', της εταιρίας 'CRISON'. Το ηλεκτρόδιο του οργάνου, τοποθετείται εντός του κάθε δείγματος ξεχωριστά και μετρείται η τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του κάθε δείγματος.



Εικόνα 3.24 Το όργανο μέτρησης ηλεκτρικής αγωγιμότητας που χρησιμοποιήθηκε.

3.9 Μετρήσεις και αναλύσεις φυτικής βιομάζας

Τα καλάμια των πιλοτικών τεχνητών υδροβιότοπων, κόπηκαν, στις 12 Ιουνίου 2023, μεταξύ κορμών και ριζών.

Στις δύο μονάδες, των πιλοτικών τεχνητών υδροβιότοπων οι οποίοι είχαν **φυτευτεί**, έγιναν τομές, για **να είναι εφικτή η αφαίρεση των ριζών** και αφαιρέθηκαν **οι ρίζες**.



Εικόνα 3.25 Η τομή που έγινε στη μονάδες του πιλοτικού τεχνητού υδροβιότοπου ο οποίος περιείχε ανακυκλωμένο πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας.



Εικόνα 3.26 Η τομή που έγινε στη μονάδα του πιλοτικού τεχνητού υδροβιότοπου ο οποίος περιείχε χαλίκι.



Εικόνα 3.27 Οι ρίζες του πιλοτικού τεχνητού υγροβιότοπου ο οποίος περιείχε ανακυκλωμένο πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας.



Εικόνα 3.28 Οι ρίζες του πιλοτικού τεχνητού υγροβιότοπου ο οποίος περιείχε χαλίκι.

Τα καλάμια και οι ρίζες, μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο **τεχνολογίας και διαχείρισης περιβάλλοντος**.



Εικόνα 3.29 Τα καλάμια του πιλοτικού τεχνητού υγροβιότοπου ο οποίος περιείχε ανακυκλωμένο πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας.



Εικόνα 3.30 Τα καλάμια του πιλοτικού τεχνητού υγροβιότοπου ο οποίος περιείχε χαλίκι.

Στη φυτική βιομάζα του κάθε υγροβιότοπου, έγιναν μετρήσεις πλήθους, μήκους και βάρους. Από τη φυτική βιομάζα, του κάθε πιλοτικού τεχνητού υγροβιότοπου, λήφθηκαν τρία δείγματα. Ένα δείγμα από τα φύλλα, ένα από τους κορμούς και ένα από τις ρίζες. Σε κάθε ένα από αυτά τα δείγματα, υπολογίστηκε το ποσοστό υγρασίας και έγιναν αναλύσεις ολικού αζώτου, ολικού φωσφόρου και μετάλλων. Για να γίνουν οι αναλύσεις της φυτικής βιομάζας, τα δείγματα, ήταν απαραίτητο να τεμαχιστούν. Για τον τεμαχισμό των δειγμάτων, χρησιμοποιήθηκε ο μαχαιρόμυλος ο οποίος ονομάζεται 'Universal Cutting Mill – PULVERISETTE 19' και είναι της εταιρίας 'FRITSCH'. Μετά τον τεμαχισμό, τα δείγματα είχαν μέγιστη διάμετρο 0,5 mm. Για το κάθε δείγμα έγιναν δύο επαναλήψεις – duplicate.

3.9.1 Μέτρηση πλήθους, μήκους και βάρους

Μετρήθηκε το πλήθος των κορμών, του κάθε πιλοτικού τεχνητού υγροβιότοπου, το μήκος του μακρύτερου και ζυγίστηκαν ξεχωριστά. Από τις ρίζες, αφαιρέθηκαν το ανακυκλωμένο πλαστικό και τα χαλίκια και ζυγίστηκαν ξεχωριστά.

3.9.2 Υπολογισμός υγρασίας

Για τον υπολογισμό της υγρασίας του κάθε δείγματος, έγιναν τρεις επαναλήψεις-triplicate για το κάθε δείγμα. Ζυγίζονταν δώδεκα σκεύη αλουμινίου και έξι χάρτινες σακούλες. Το κάθε ένα δείγμα, που λήφθηκε από τα φύλλα και τους κορμούς, μοιράστηκε και τοποθετήθηκε σε τρία σκεύη αλουμινίου και το κάθε ένα δείγμα, που λήφθηκε από τις ρίζες, μοιράστηκε και τοποθετήθηκε σε τρεις χάρτινες σακούλες. Το κάθε σκεύος αλουμινίου και η κάθε χάρτινη σακούλα, μαζί με το δείγμα το οποίο περιείχαν, ζυγίστηκαν στη ζυγαριά που χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση των ολικών αιωρούμενων στερεών. Τα δείγματα, μαζί με τα σκεύη αλουμινίου και τις χάρτινες σακούλες στις οποίες είχαν τοποθετηθεί, τοποθετήθηκαν εντός του φούρνου ξήρανσης, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση των ολικών αιωρούμενων στερεών και ο οποίος είχε ρυθμιστεί να έχει σταθερή θερμοκρασία 40°C. Μετά το πέρας τριών ημερών, τα δείγματα αφαιρέθηκαν από το φούρνο και ζυγίστηκαν. Γνωρίζοντας το βάρος του κάθε δείγματος, πριν και μετά την, ξήρανση, υπολογίστηκε η υγρασία του κάθε δείγματος.

$$\% \text{ Υγρασία} = \frac{\text{Βάρος δείγματος πριν την ξήρανση (g)} - \text{Βάρος δείγματος μετά την ξήρανση (g)}}{\text{Βάρος δείγματος πριν την ξήρανση (g)}} \cdot 100$$

Εξίσωση 3.2 Εξίσωση υπολογισμού υγρασίας

3.9.3 Ολικό άζωτο

Από το κάθε ένα, τεμαχισμένο δείγμα, ζυγίζονται 0,5 γραμμάρια και τοποθετούνται σε ένα διαφορετικό δοχείο ζέσεως. Για το κάθε ένα δείγμα, έγιναν δύο επαναλήψεις. Στο κάθε ένα δοχείο ζέσεως, προστίθενται 10 ml θειικό οξύ/H₂SO₄ 95-97%, 10 σταγόνες υπεροξείδιο του υδρογόνου/H₂O₂ 30% και γίνεται ανάδευση. Τα δοχεία ζέσεως, τοποθετούνται επάνω σε πλάκα θέρμανσης, η οποία είχε ρυθμιστεί να έχει σταθερή θερμοκρασία 400°C. Ανά 20 λεπτά, Προστίθενται 10 σταγόνες H₂O₂. Προστίθενται έξι φορές H₂O₂ και μετά, τα δοχεία ζέσεως, αφαιρούνται από την πλάκα. Όταν το περιεχόμενο του κάθε δοχείου ζέσεως αποκτήσει θερμοκρασία δωματίου, τοποθετείται σε ένα διαφορετικό πλαστικό δοχείο. Στο κάθε πλαστικό δοχείο, προστίθεται απιονισμένο νερό μέχρι ο περιεχόμενος όγκος να είναι 14 ml. Τα πλαστικά δοχεία τοποθετούνται σε μηχανήμα φυγοκέντρισης και γίνεται φυγοκέντρωση για 4 λεπτά σε 4.000 rpm. Από το περιεχόμενο του κάθε πλαστικού δοχείου, λαμβάνεται 1 ml υπερκείμενου και γίνεται η ίδια μέθοδος με αυτήν που γίνεται για την ανάλυση του ολικού αζώτου των εισροών και των εκροών.

3.9.4 Ολικός φώσφορος

Από το κάθε ένα, τεμαχισμένο δείγμα, ζυγίζεται 1 γραμμάριο και τοποθετείται σε μια διαφορετική πορσελάνινη κάψα. Οι κάψες, τοποθετούνται σε φούρνο, ο οποίος ρυθμίζεται να έχει σταθερή θερμοκρασία 500°C. Ο φούρνος, που χρησιμοποιήθηκε ήταν μοντέλου 'High Therm' της εταιρίας 'Linn'. Μετά το πέρας τεσσάρων ωρών, ο φούρνος απενεργοποιείται και μετά το πέρας εικοσιτεσσάρων ωρών από την απενεργοποίησή του, οι κάψες αφαιρούνται από το φούρνο. Όταν τα δείγματα αποκτήσουν θερμοκρασία δωματίου, το κάθε ένα δείγμα τοποθετείται σε ένα διαφορετικό δοχείο ζέσεως. Στο κάθε δοχείο ζέσεως Προστίθενται 10 ml HCl 1M και αναδεύονται. Τα δοχεία ζέσεως, τοποθετούνται επάνω σε πλάκα θέρμανσης, η οποία έχει ρυθμιστεί να έχει σταθερή θερμοκρασία 150°C. Μετά το πέρας μιάμισης ώρας, τα δοχεία ζέσεως αφαιρούνται από την πλάκα. Όταν το περιεχόμενο του κάθε δοχείου ζέσεως αποκτήσει θερμοκρασία δωματίου,

τοποθετείται σε ένα διαφορετικό πλαστικό δοχείο. Τα δοχεία, τοποθετούνται σε μηχανήμα φυγοκέντρισης και γίνεται φυγοκέντρωση σε 4.000rpm για τέσσερα λεπτά. Το υπερκείμενο από το κάθε δοχείο, τοποθετείται σε ένα διαφορετικό δοχείο ζέσεως. Το pH, του περιεχομένου του κάθε δοχείου, ρυθμίζεται να έχει τιμή μεταξύ 6,0 και 8,0. Το περιεχόμενο του κάθε δοχείου, διηθείται ξεχωριστά, από φίλτρο 'NYLON', με μέγεθος πόρων 0,45 mm, σε ογκομετρικό σωλήνα και προστίθενται απιονισμένο νερό μέχρι ο όγκος να είναι 25 ml. Το περιεχόμενο του ογκομετρικού σωλήνα, τοποθετείται σε διαφορετική γυάλινη φιάλη. Σε κάθε μια φιάλη, προστίθενται 4 ml αντιδραστηρίου και αναδεύονται. Για τη δημιουργία του τυφλού-blank διαλύματος, προστίθενται 25 ml απιονισμένο νερό, 4ml αντιδραστηρίου σε μια άδεια κωνική φιάλη και αναδεύονται. Μετά το πέρας 10 λεπτών, από όταν προστέθηκε το αντιδραστήριο, γίνεται βαθμονόμηση του φασματοφωτομέτρου με το τυφλό-blank διάλυμα, στα 880 nm και μετριέται η απορρόφηση του κάθε δείγματος. Γνωρίζοντας την τιμή απορρόφησης του κάθε δείγματος, υπολογίζεται η τιμή της συγκέντρωσης του ολικού φωσφόρου, του κάθε δείγματος, με χρήση της καμπύλης βαθμονόμησης που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της τιμής της συγκέντρωσης του ολικού φωσφόρου.

3.9.5 Μέταλλα

Από το κάθε ένα, τεμαχισμένο δείγμα, ζυγίζονται 0,5 γραμμάρια και τοποθετούνται σε ένα διαφορετικό δοχείο ζέσεως. Για το κάθε ένα δείγμα, γίνονται δύο επαναλήψεις - duplicate. Στο κάθε ένα δοχείο ζέσεως, προστίθενται 10 ml πυκνό νιτρικό οξύ $\geq 65\%$ και γίνεται ανάδευση. Τα δοχεία ζέσεως, τοποθετούνται επάνω σε πλάκα θέρμανσης, η οποία έχει ρυθμιστεί να έχει σταθερή θερμοκρασία 140°C. Μετά το πέρας δύο ωρών, τα δοχεία ζέσεως, αφαιρούνται από τις πλάκες. Όταν το περιεχόμενο του κάθε δοχείου ζέσεως αποκτήσει θερμοκρασία δωματίου, τοποθετείται σε ένα διαφορετικό πλαστικό δοχείο. Στο κάθε ένα δείγμα, γίνεται φυγοκέντρωση σε 4.000 rpm για τέσσερα λεπτά. Το υπερκείμενο, από το περιεχόμενο του κάθε πλαστικού δοχείου, τοποθετείται σε ένα διαφορετικό γυάλινο, σκουρόχρωμο δοχείο και σφραγίζεται με το καπάκι του. Οι αναλύσεις των μετάλλων, έγιναν στο εργαστήριο υδρογεωχημικής μηχανικής και αποκατάστασης εδαφών της σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης. Για τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων των μετάλλων, χρησιμοποιήθηκε το σύστημα φασματομετρίας ατομικών μαζών σε επαγωγικά συζευγμένο πλάσμα ICP-MS, μοντέλου 'CX 7500 series', της εταιρίας 'Agilent'. Το κάθε δείγμα, αναλύθηκε τρεις φορές-triplicate.

3.10 Υπολογισμός απομακρύνσεων

Υπολογίστηκε η επί τοις εκατό απομάκρυνση, του κάθε συστατικού, στον κάθε πιλοτικό τεχνητό υγροβιότοπο.

$$\% \text{ Απομάκρυνση} = \frac{[\text{Initial}] - [i]}{[\text{Initial}]} \cdot 100$$

Εξίσωση 3.3 Εξίσωση υπολογισμού της επί τοις εκατό απομάκρυνσης

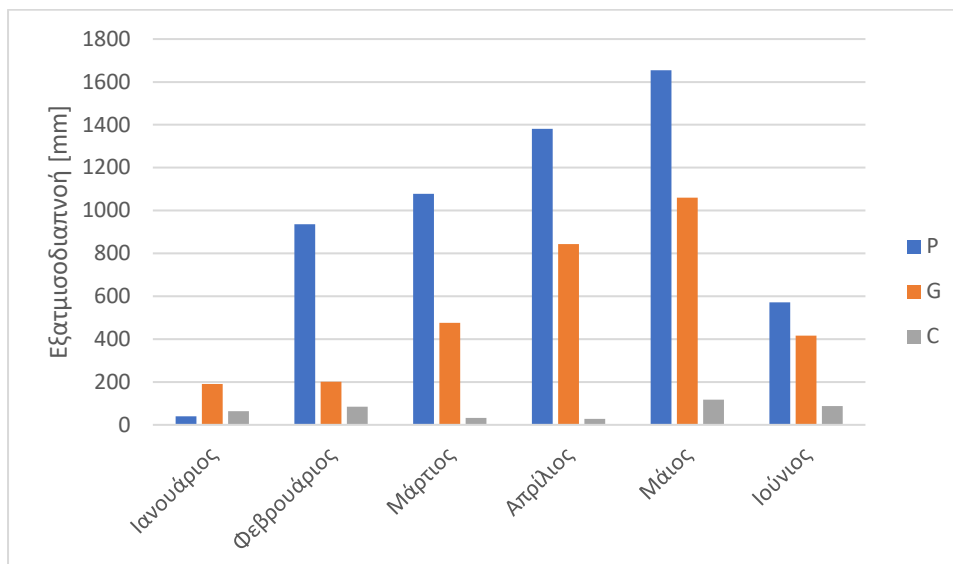
[Initial]: η συγκέντρωση του συστατικού στα λύματα που προστίθενται στον πιλοτικό τεχνητό υγροβιότοπο

[i]: η συγκέντρωση του συστατικού στην εκροή του πιλοτικού τεχνητού υγροβιότοπου

4. Αποτελέσματα

4.1 Εξατμισοδιαπνοή

Οι τιμές της εξατμισοδιαπνοής στον κάθε πιλοτικό τεχνητό υγροβιότοπο συναρτήσει του κάθε μήνα της διερεύνησης παρουσιάζονται στο ακόλουθο διάγραμμα.



Διάγραμμα 4.1 Η εξατμισοδιαπνοή στον κάθε πιλοτικό τεχνητό υγροβιότοπο τον κάθε μήνα της διερεύνησης.

4.2 Αναλύσεις εισροών

Πίνακας 4.1 Αποτελέσματα αναλύσεων εισροών.

| Παράμετρος | Μέση τιμή | Εύρος τιμών |
|---|-------------|-------------|
| BOD ₅ [mg/L] | 239,5±62,0 | 160-340 |
| COD [mg/L] | 347,2±83,6 | 206-440 |
| TOC [mg/L] | 40,5±9,0 | 19-51,9 |
| TSS [mg/L] | 113,8±52,0 | 53,9-244,3 |
| TN [mg/L] | 52,4±9,9 | 40-70 |
| NH ₄ ⁺ -N [mg/L] | 34,7±13,1 | 10,4-56,7 |
| NO ₃ ⁻ -N [mg/L] | 0,9±3,0 | 0-11,0 |
| TP [mg/L] | 4,8±1,3 | 3,5-8,1 |
| PO ₄ ³⁻ -P [mg/L] | 3,8±1,5 | 2,2-8,1 |
| pH | 7,2±0,2 | 6,9-7,7 |
| EC | 942,0±161,8 | 790-1.234 |
| BOD/COD | 0,83 | |

4.3 Αναλύσεις εκροών

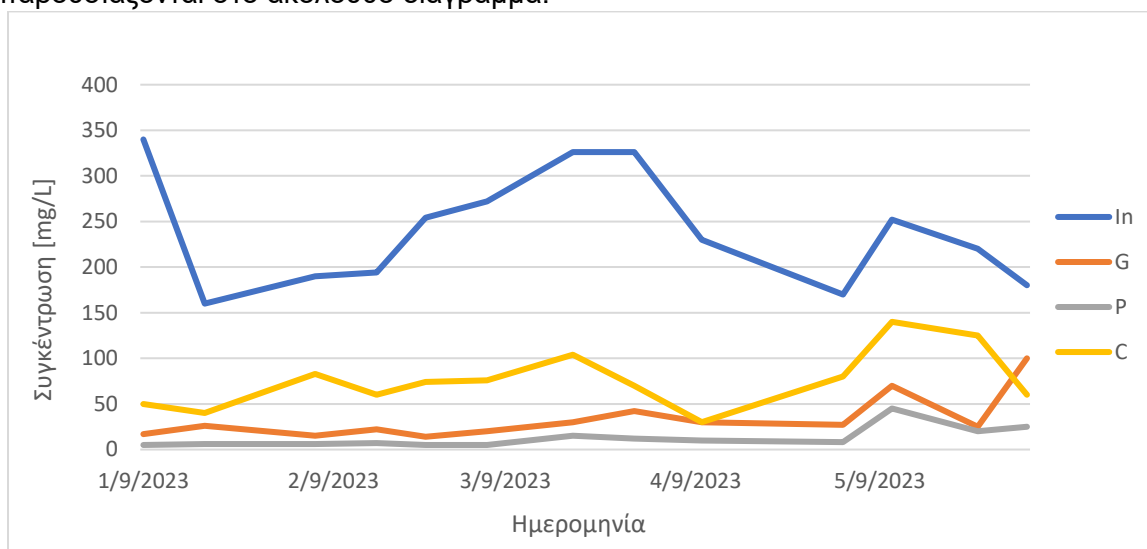
4.3.1 Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο – Biochemical oxygen demand/BOD

Πίνακας 4.2 Αποτελέσματα αναλύσεων βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου – BOD₅

| BOD ₅ | G | P | C |
|--------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Μέση τιμή συγκεντρώσεων [mg/L] | 33,7±24,7 | 13,0±11,5 | 76,3±31,6 |

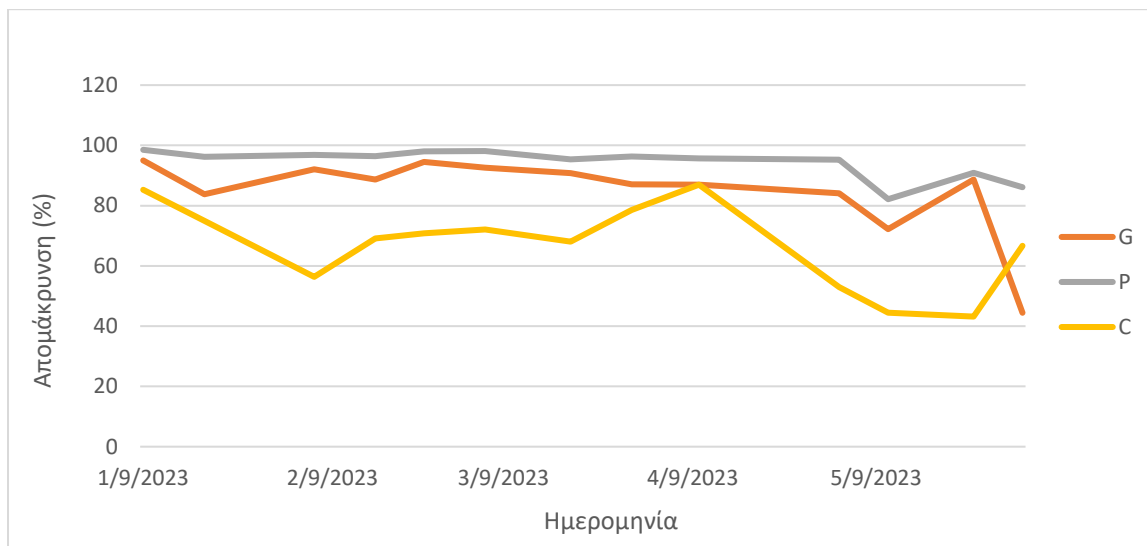
| | | | |
|----------------------------------|------------|-----------|------------|
| Εύρος τιμών συγκεντρώσεων [mg/L] | 14,0-100,0 | 5,0-45,0 | 30,0-140,0 |
| Μέση τιμή απομάκρυνσης, % | 84,7±13,5 | 94,3±5,0 | 66,9±14,0 |
| Εύρος τιμών απομάκρυνσης, % | 44,4-95,0 | 82,1-98,5 | 43,2-87,0 |

Οι τιμές συγκέντρωσης BOD, συναρτήσει των ημερομηνιών που έγιναν οι αναλύσεις παρουσιάζονται στο ακόλουθο διάγραμμα.



Διάγραμμα 4.2 Τιμές συγκέντρωσης βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου – BOD₅ συναρτήσει του χρόνου.

Οι τιμές απομάκρυνσης BOD, συναρτήσει των ημερομηνιών που έγιναν οι αναλύσεις παρουσιάζονται στο ακόλουθο διάγραμμα.



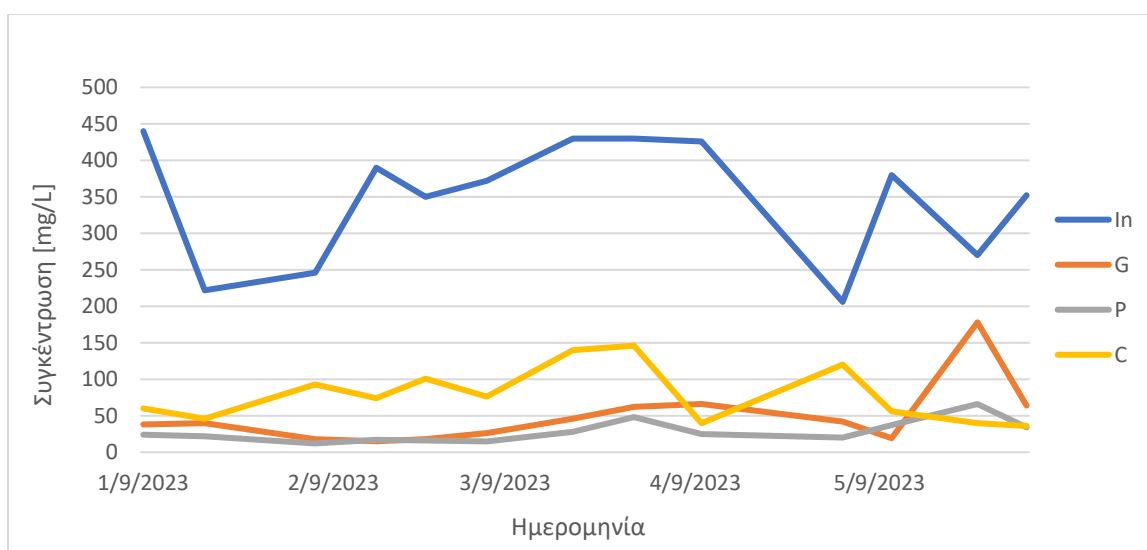
Διάγραμμα 4.3 Τιμές απομάκρυνσης βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου – BOD₅ συναρτήσει του χρόνου.

4.3.2 Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο – Chemical oxygen demand/COD

Πίνακας 4.3 Αποτελέσματα αναλύσεων χημικά απαιτούμενου οξυγόνου – COD

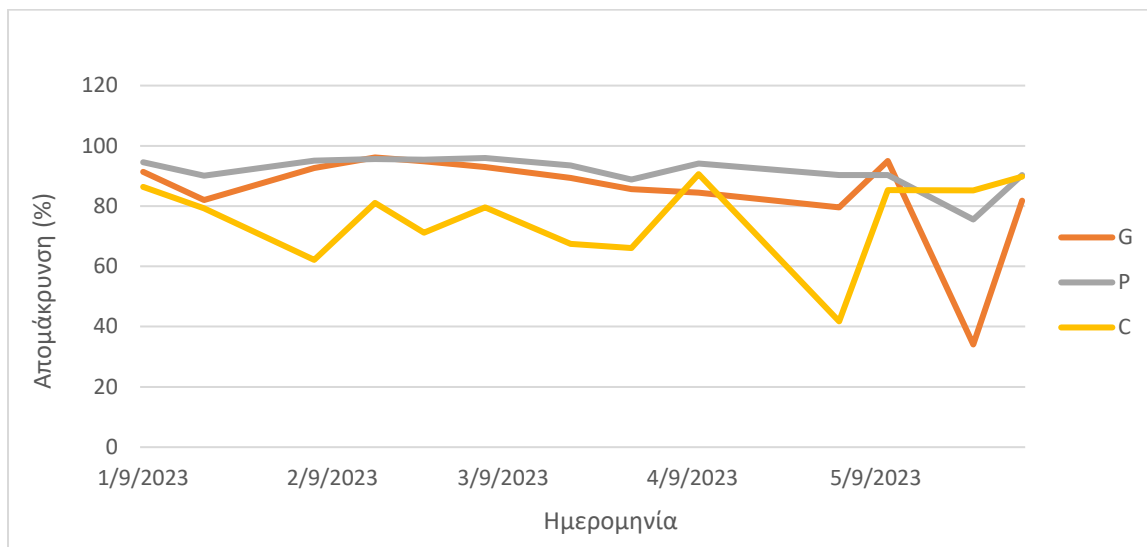
| COD | G | P | C |
|----------------------------------|------------|-----------|------------|
| Μέση τιμή συγκεντρώσεων [mg/L] | 48,6±42,9 | 28,0±15,2 | 79,1±38,2 |
| Εύρος τιμών συγκεντρώσεων [mg/L] | 15,0-178,0 | 12,0-66,0 | 36,0-146,0 |
| Μέση τιμή απομάκρυνσης, % | 84,6±16,2 | 91,5±5,4 | 75,8±13,8 |
| Εύρος τιμών απομάκρυνσης, % | 34,1-96,2 | 75,6-96,0 | 41,7-90,6 |

Οι τιμές συγκέντρωσης COD, συναρτήσει των ημερομηνιών που έγιναν οι αναλύσεις παρουσιάζονται στο ακόλουθο διάγραμμα.



Διάγραμμα 4.4 Τιμές συγκέντρωσης χημικά απαιτούμενου οξυγόνου – COD συναρτήσει του χρόνου.

Οι τιμές απομάκρυνσης COD, συναρτήσει των ημερομηνιών που έγιναν οι αναλύσεις παρουσιάζονται στο ακόλουθο διάγραμμα.



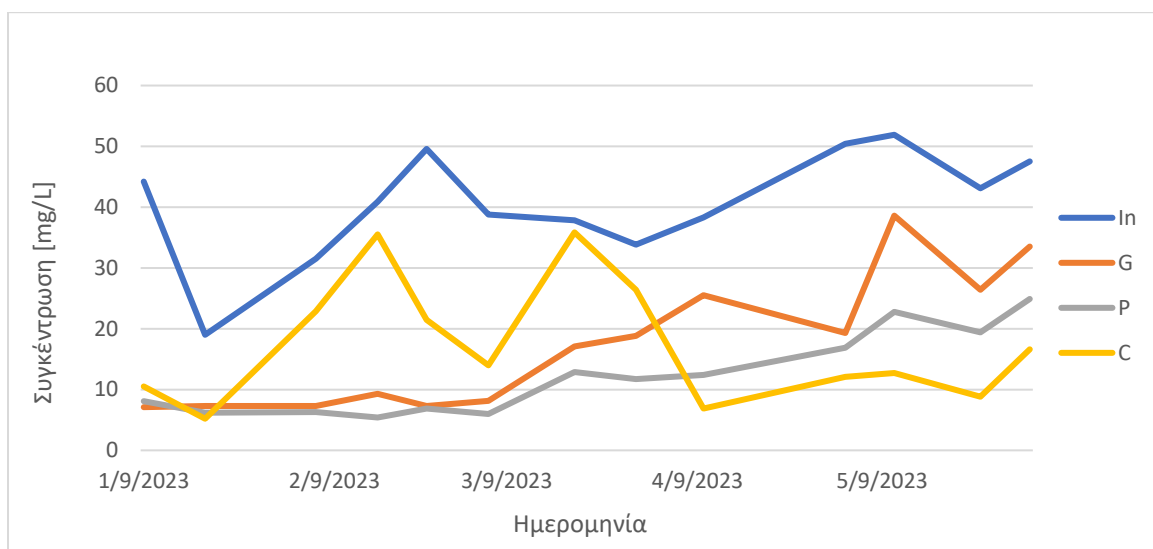
Διάγραμμα 4.5 Τιμές απομάκρυνσης χημικά απαιτούμενου οξυγόνου – COD συναρτήσει του χρόνου.

4.3.3 Ολικός οργανικός άνθρακας – Total organic carbon/TOC

Πίνακας 4.4 Αποτελέσματα αναλύσεων ολικού οργανικού άνθρακα – TOC.

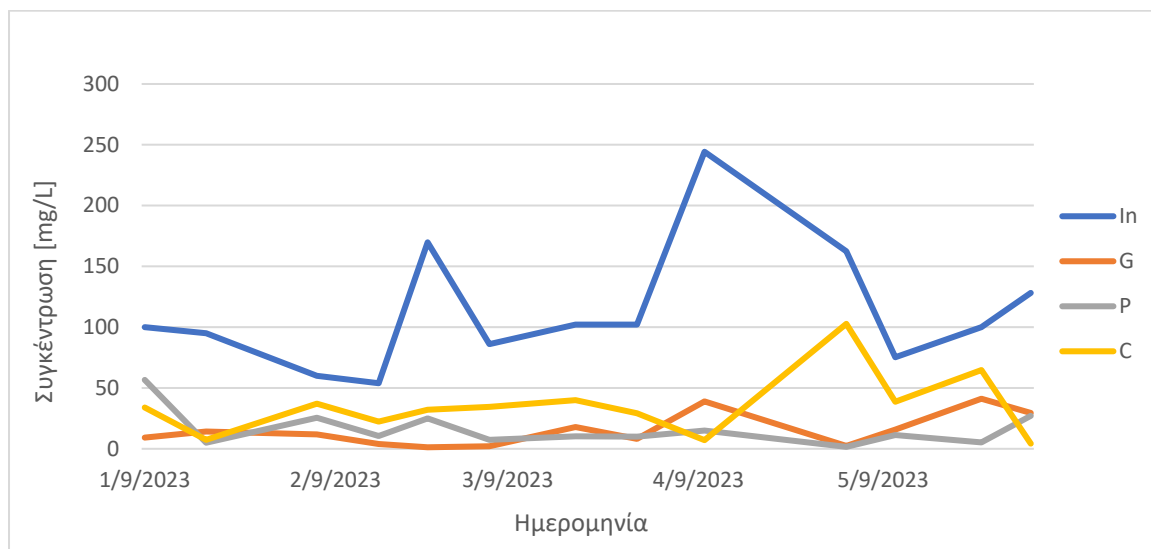
| TOC | G | P | C |
|----------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Μέση τιμή συγκεντρώσεων [mg/L] | 17,4±10,9 | 12,3±6,8 | 17,6±10,2 |
| Εύρος τιμών συγκεντρώσεων [mg/L] | 7,1-38,6 | 5,4-24,9 | 5,2-35,9 |
| Μέση τιμή απομάκρυνσης, % | 57,9±21,7 | 70,0±12,8 | 55,0±27,7 |
| Εύρος τιμών απομάκρυνσης, % | 25,6-85,3 | 47,6-86,8 | 5,3-82,0 |

Οι τιμές συγκέντρωσης TOC, συναρτήσει των ημερομηνιών που έγιναν οι αναλύσεις παρουσιάζονται στο ακόλουθο διάγραμμα.



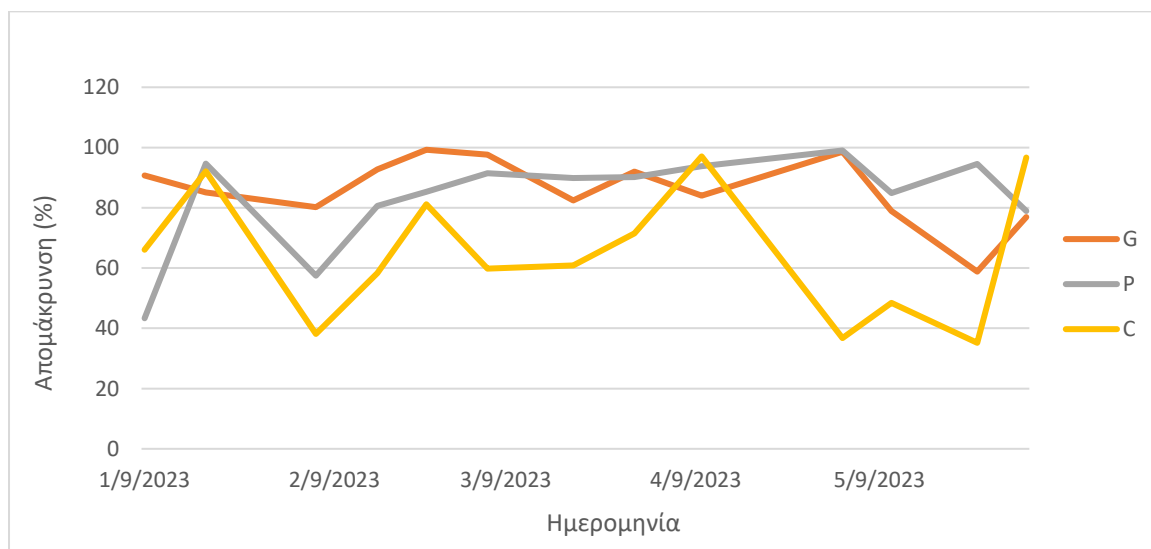
| | | | |
|--------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Εύρος τιμών απομάκρυνσης, % | 58,8-99,3 | 43,3-99,0 | 35,2-97,1 |
|--------------------------------|-----------|-----------|-----------|

Οι τιμές συγκέντρωσης TSS, συναρτήσει των ημερομηνιών που έγιναν οι αναλύσεις παρουσιάζονται στο ακόλουθο διάγραμμα.



Διάγραμμα 4.8 Τιμές συγκέντρωσης ολικών αιωρούμενων στερεών – TSS συναρτήσει του χρόνου.

Οι τιμές απομάκρυνσης TSS, συναρτήσει των ημερομηνιών που έγιναν οι αναλύσεις παρουσιάζονται στο ακόλουθο διάγραμμα.



Διάγραμμα 4.9 Τιμές απομάκρυνσης ολικών αιωρούμενων στερεών – TSS συναρτήσει του χρόνου.

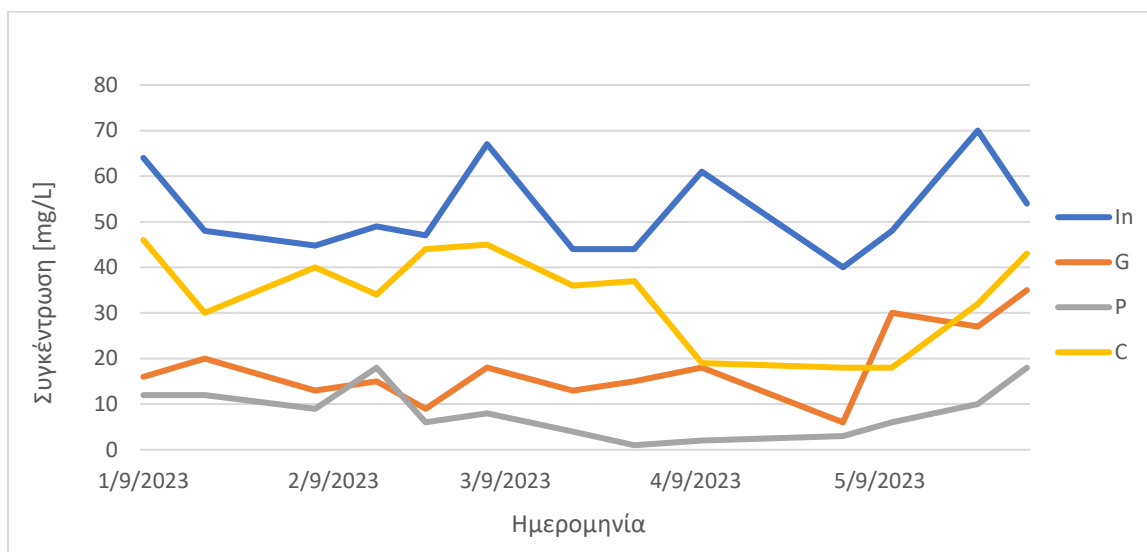
4.3.5 Ολικό άζωτο – Total nitrogen/TN

Πίνακας 4.6 Αποτελέσματα αναλύσεων ολικού αζώτου – TN.

| | | | |
|----|---|---|---|
| TN | G | P | C |
|----|---|---|---|

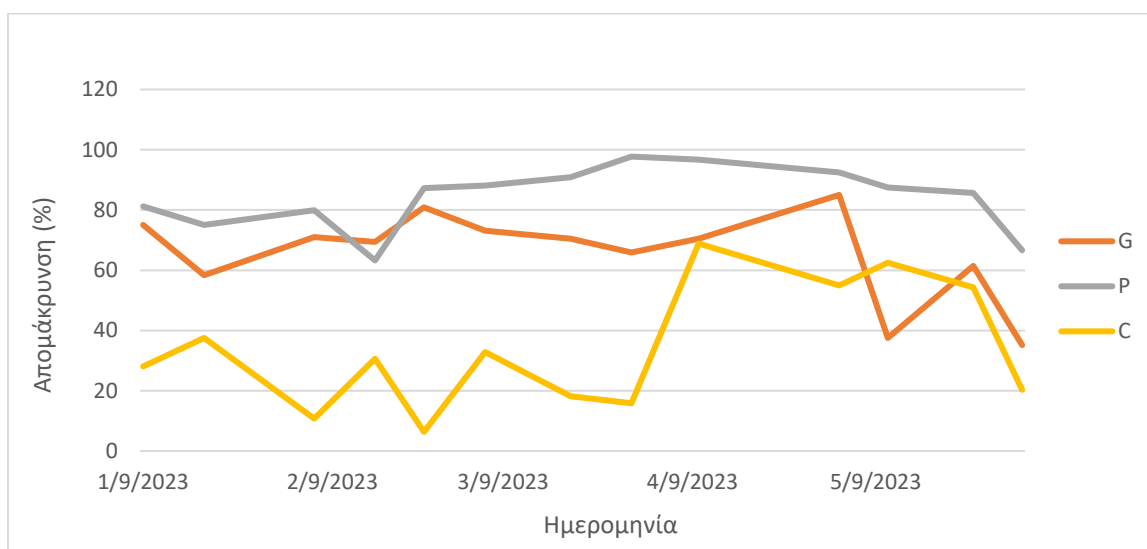
| | | | |
|----------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Μέση τιμή συγκεντρώσεων [mg/L] | 18,1±8,2 | 8,4±5,5 | 34,0±10,2 |
| Εύρος τιμών συγκεντρώσεων [mg/L] | 6-35 | 1-18 | 18-46 |
| Μέση τιμή απομάκρυνσης, % | 65,7±14,8 | 84,0±10,6 | 33,9±20,4 |
| Εύρος τιμών απομάκρυνσης, % | 35,2-85,0 | 63,3-97,7 | 6,4-68,9 |

Οι τιμές συγκέντρωσης TN, συναρτήσει των ημερομηνιών που έγιναν οι αναλύσεις παρουσιάζονται στο ακόλουθο διάγραμμα.



Διάγραμμα 4.10 Τιμές συγκέντρωσης ολικού αζώτου – TN συναρτήσει του χρόνου.

Οι τιμές απομάκρυνσης TN, συναρτήσει των ημερομηνιών που έγιναν οι αναλύσεις παρουσιάζονται στο ακόλουθο διάγραμμα.



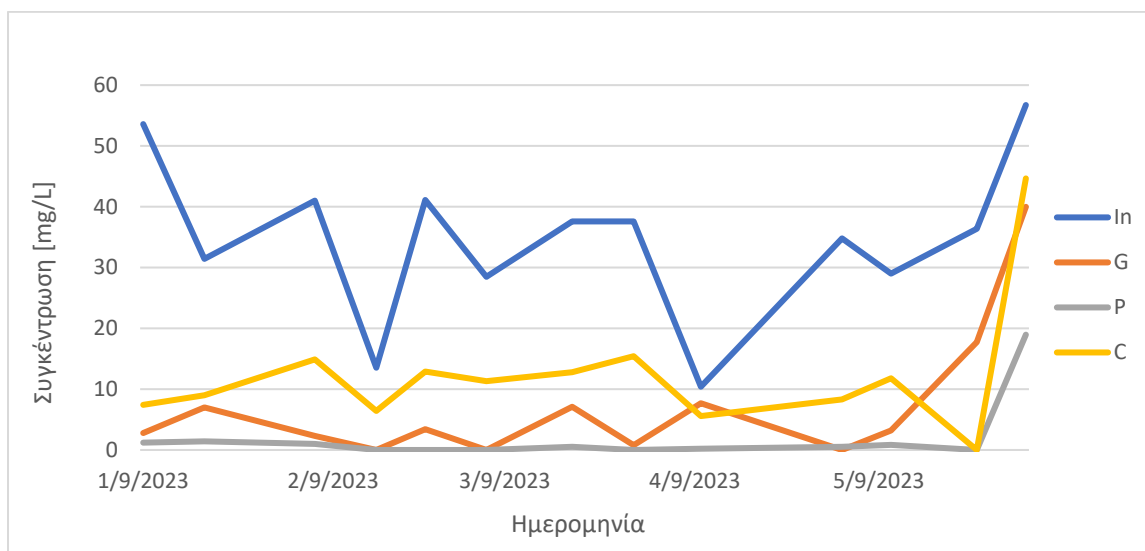
Διάγραμμα 4.11 Τιμές απομάκρυνσης ολικού αζώτου – TN συναρτήσει του χρόνου.

4.3.6 Αμμωνιακό άζωτο – Ammonium nitrogen ($\text{NH}_4\text{-N}$)

Πίνακας 4.7 Αποτελέσματα αναλύσεων αμμωνιακού αζώτου ($\text{NH}_4^+\text{-N}$).

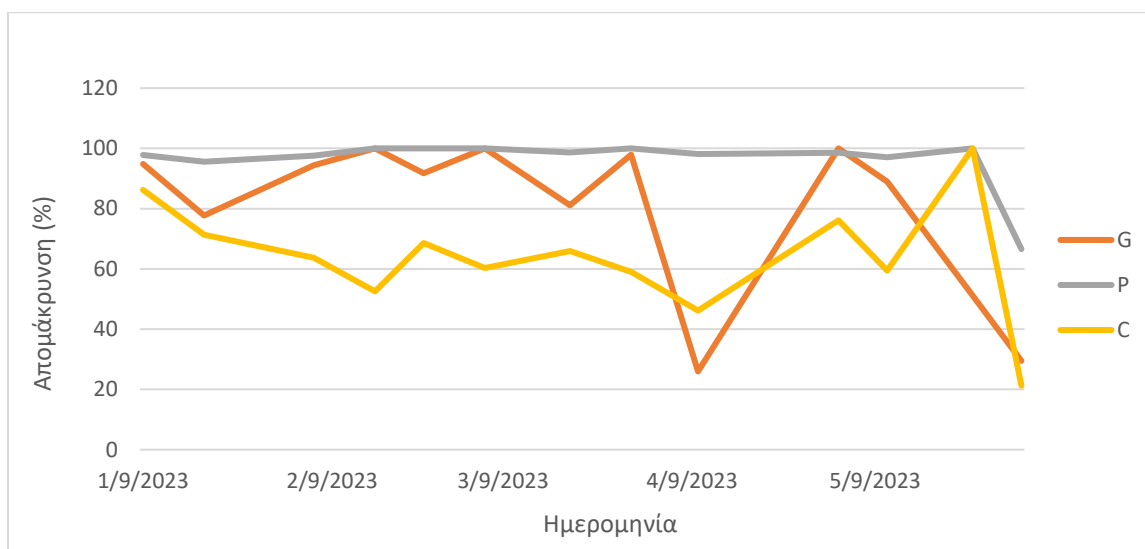
| $\text{NH}_4^+\text{-N}$ | G | P | C |
|----------------------------------|-----------------|----------------|-----------------|
| Μέση τιμή συγκεντρώσεων [mg/L] | $7,1 \pm 11,0$ | $1,9 \pm 5,2$ | $12,3 \pm 10,6$ |
| Εύρος τιμών συγκεντρώσεων [mg/L] | 0,0-40,0 | 0,0-19,0 | 0,0-44,7 |
| Μέση τιμή απομάκρυνσης, % | $79,5 \pm 26,6$ | $96,1 \pm 9,0$ | $63,9 \pm 19,0$ |
| Εύρος τιμών απομάκρυνσης, % | 26,0-100,0 | 66,6-100,0 | 21,3-100,0 |

Οι τιμές συγκέντρωσης $\text{NH}_4^+\text{-N}$, συναρτήσει των ημερομηνιών που έγιναν οι αναλύσεις παρουσιάζονται στο ακόλουθο διάγραμμα.



Διάγραμμα 4.12 Τιμές συγκέντρωσης αμμωνιακού αζώτου ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) συναρτήσει του χρόνου.

Οι τιμές απομάκρυνσης $\text{NH}_4^+\text{-N}$, συναρτήσει των ημερομηνιών που έγιναν οι αναλύσεις παρουσιάζονται στο ακόλουθο διάγραμμα.



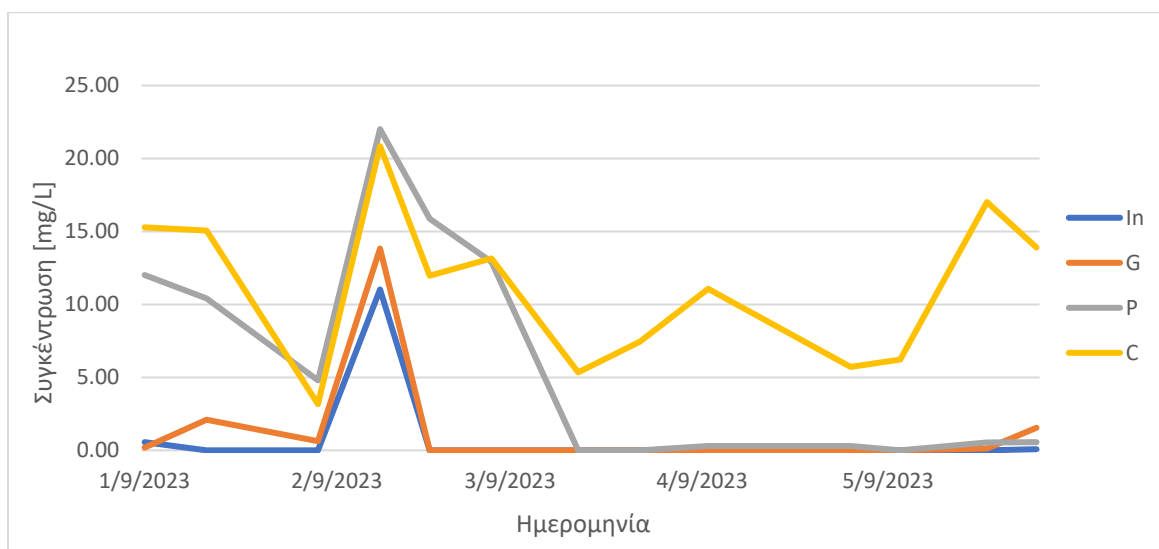
Διάγραμμα 4.13 Τιμές απομάκρυνσης αμμωνιακού αζώτου ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) συναρτήσει του χρόνου.

4.3.7 Νιτρικό άζωτο – Nitrate nitrogen ($\text{NO}_3\text{-N}$)

Πίνακας 4.8 Αποτελέσματα αναλύσεων νιτρικού αζώτου ($\text{NO}_3\text{-N}$).

| $\text{NO}_3\text{-N}$ | G | P | C |
|----------------------------------|---------------|---------------|----------------|
| Μέση τιμή συγκεντρώσεων [mg/L] | $1,4 \pm 3,8$ | $6,1 \pm 7,6$ | $11,2 \pm 5,3$ |
| Εύρος τιμών συγκεντρώσεων [mg/L] | 0,0-13,8 | 0,0-22,0 | 3,2-20,8 |
| Μέση τιμή απομάκρυνσης, % | - | - | - |
| Εύρος τιμών απομάκρυνσης, % | - | - | - |

Οι τιμές συγκέντρωσης $\text{NO}_3^- - \text{N}$, συναρτήσει των ημερομηνιών που έγιναν οι αναλύσεις παρουσιάζονται στο ακόλουθο διάγραμμα.



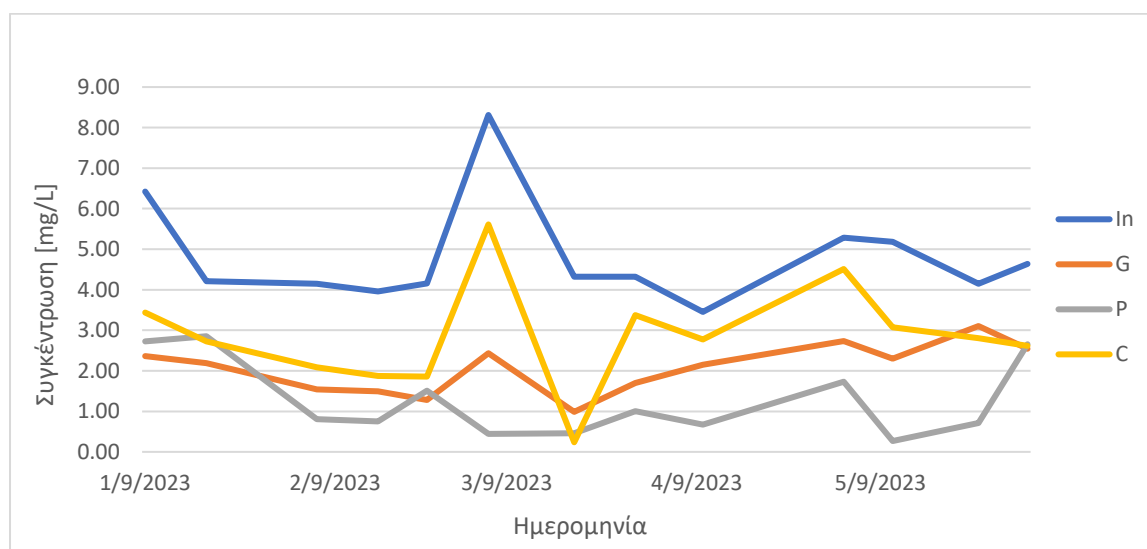
Διάγραμμα 4.14 Τιμές συγκέντρωσης νιτρικού αζώτου (NO_3^- -N) συναρτήσει του χρόνου.

4.3.8 Ολικός φώσφορος – Total phosphorus/TP

Πίνακας 4.9 Αποτελέσματα αναλύσεων ολικού φωσφόρου – TP.

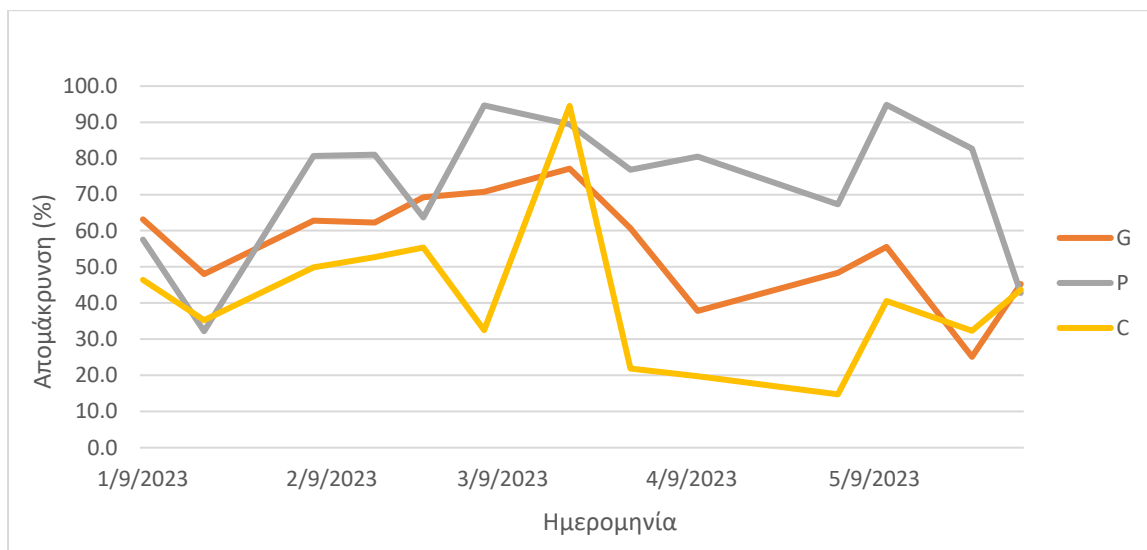
| TP | G | P | C |
|----------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Μέση τιμή συγκεντρώσεων [mg/L] | $2,1 \pm 0,6$ | $1,3 \pm 0,9$ | $2,8 \pm 1,3$ |
| Εύρος τιμών συγκεντρώσεων [mg/L] | 1,0-3,1 | 0,3-2,9 | 0,2-5,6 |
| Μέση τιμή απομάκρυνσης, % | $55,9 \pm 14,5$ | $72,6 \pm 19,2$ | $41,5 \pm 20,4$ |
| Εύρος τιμών απομάκρυνσης, % | 25,1-77,2 | 32,2-94,8 | 14,8-94,5 |

Οι τιμές συγκέντρωσης TP, συναρτήσει των ημερομηνιών που έγιναν οι αναλύσεις παρουσιάζονται στο ακόλουθο διάγραμμα.



Διάγραμμα 4.15 Τιμές συγκέντρωσης ολικού φωσφόρου – TP συναρτήσει του χρόνου.

Οι τιμές απομάκρυνσης TP, συναρτήσει των ημερομηνιών που έγιναν οι αναλύσεις παρουσιάζονται στο ακόλουθο διάγραμμα.



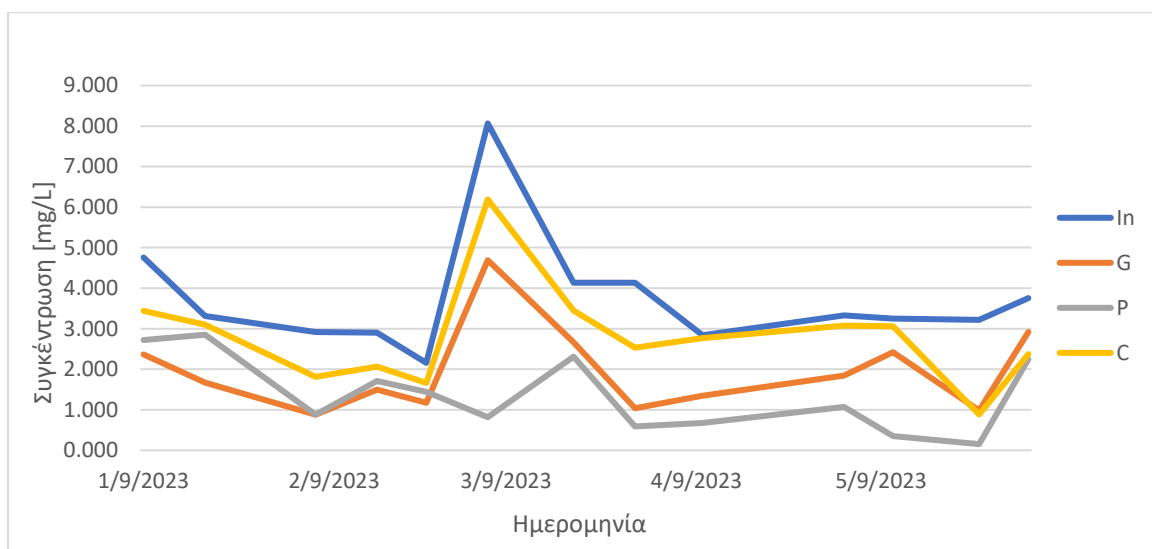
Διάγραμμα 4.16 Τιμές απομάκρυνσης ολικού φωσφόρου – TP συναρτήσει του χρόνου.

4.3.9 Φώσφορος ορθοφωσφορικών – Orthophosphate as phosphorus ($\text{PO}_4\text{-P}$)

Πίνακας 4.10 Αποτελέσματα αναλύσεων φωσφόρου ορθοφωσφορικών ($\text{PO}_4\text{-P}$).

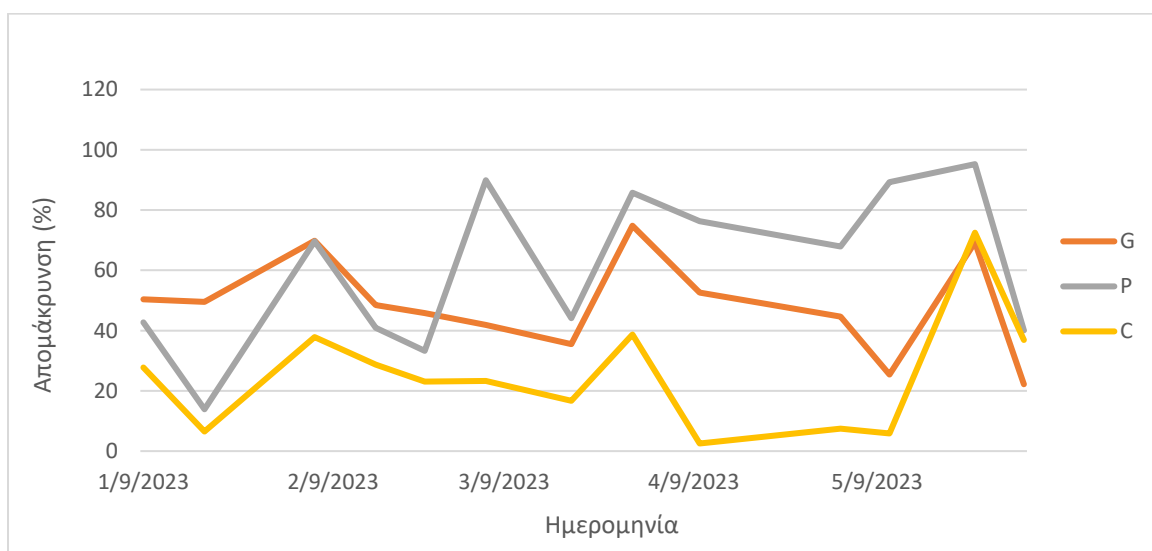
| $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ | G | P | C |
|----------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Μέση τιμή συγκεντρώσεων [mg/L] | $2,0 \pm 1,1$ | $1,4 \pm 0,9$ | $2,8 \pm 1,3$ |
| Εύρος τιμών συγκεντρώσεων [mg/L] | 0,9-4,7 | 0,2-2,9 | 0,9-6,2 |
| Μέση τιμή απομάκρυνσης, % | $48,5 \pm 16,0$ | $60,7 \pm 26,2$ | $25,2 \pm 19,1$ |
| Εύρος τιμών απομάκρυνσης, % | 22,2-74,8 | 13,9-95,2 | 2,5-72,5 |

Οι τιμές συγκεντρώσεως $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, συναρτήσει των ημερομηνιών που έγιναν οι αναλύσεις παρουσιάζονται στο ακόλουθο διάγραμμα.



Διάγραμμα 4.17 Τιμές συγκέντρωσης φωσφόρου ορθοφωσφορικών ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) συναρτήσει του χρόνου.

Οι τιμές απομάκρυνσης $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, συναρτήσει των ημερομηνιών που έγιναν οι αναλύσεις παρουσιάζονται στο ακόλουθο διάγραμμα.



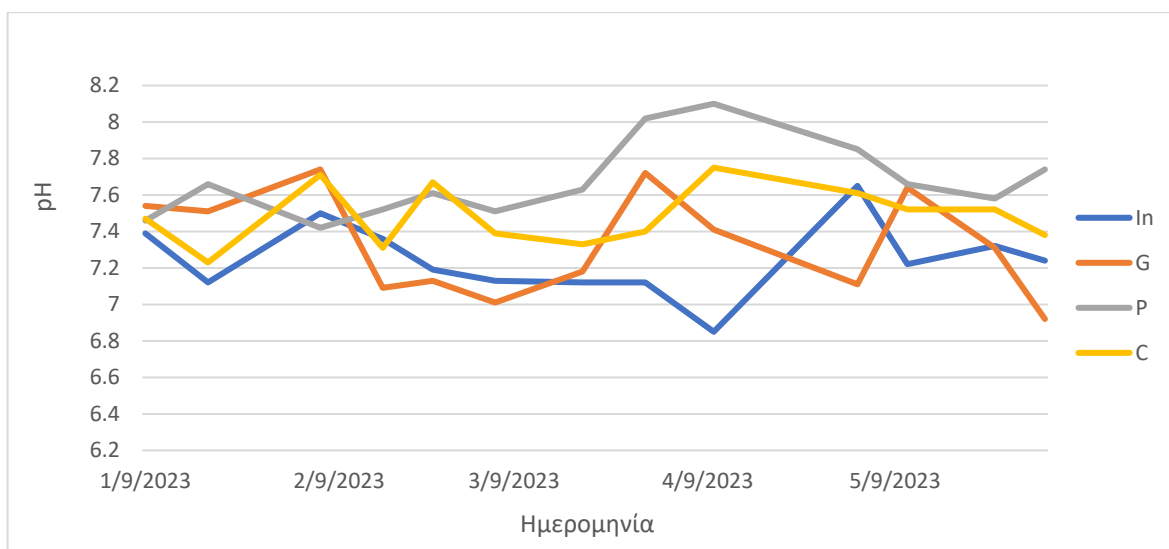
Διάγραμμα 4.18 Τιμές απομάκρυνσης φωσφόρου ορθοφωσφορικών ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) συναρτήσει του χρόνου.

4.3.10 pH

Πίνακας 4.11 Αποτελέσματα αναλύσεων pH.

| pH | G | P | C |
|-------------|---------------|---------------|---------------|
| Μέση τιμή | $7,3 \pm 0,3$ | $7,7 \pm 0,2$ | $7,5 \pm 0,2$ |
| Εύρος τιμών | 6,9-7,7 | 7,4-8,1 | 7,2-7,8 |

Οι τιμές pH, συναρτήσει των ημερομηνιών που έγιναν οι αναλύσεις παρουσιάζονται στο ακόλουθο διάγραμμα.



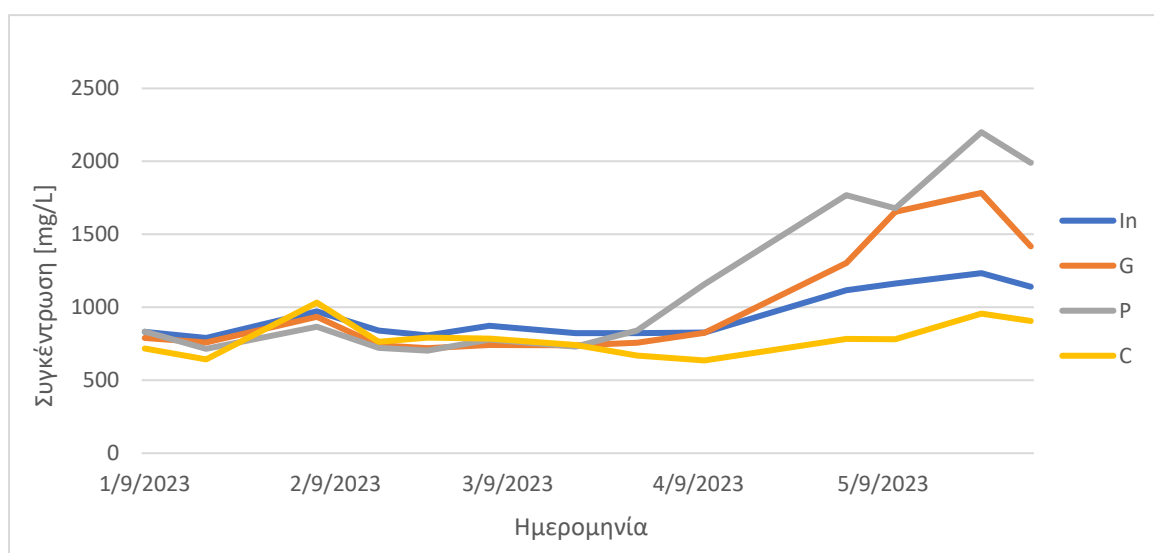
Διάγραμμα 4.19 Τιμές pH συναρτήσει του χρόνου.

4.3.11 Ηλεκτρική αγωγιμότητα – Electrical conductivity/EC

Πίνακας 4.12 Αποτελέσματα αναλύσεων ηλεκτρικής αγωγιμότητας – EC.

| EC | G | P | C |
|-------------------|---------------|---------------|-------------|
| Μέση τιμή (μS/cm) | 1.012,9±385,6 | 1.152,9±550,0 | 785,4±118,5 |
| Εύρος τιμών | 720-1.784 | 703-2.200 | 636-1.032 |

Οι τιμές EC, συναρτήσει των ημερομηνιών που έγιναν οι αναλύσεις παρουσιάζονται στο ακόλουθο διάγραμμα.



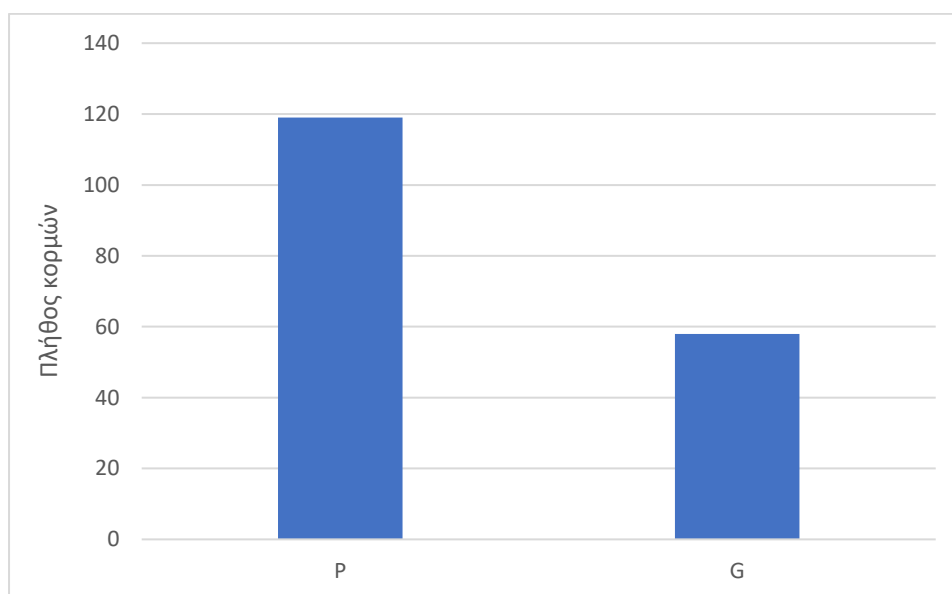
Διάγραμμα 4.20 Τιμές συγκέντρωσης ηλεκτρικής αγωγιμότητας – EC συναρτήσει του χρόνου.

4.4 Μετρήσεις και αναλύσεις φυτικής βιομάζας

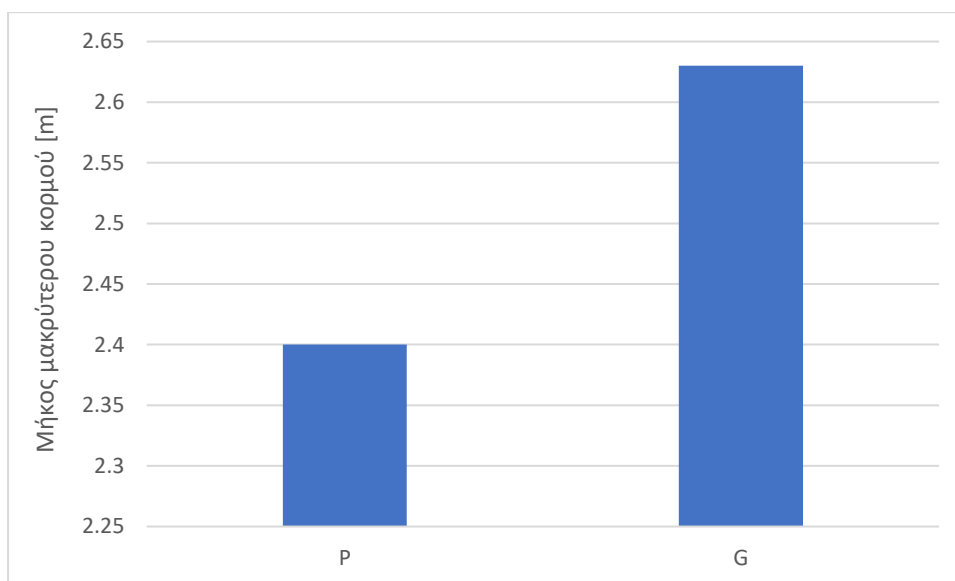
4.4.1 Πλήθος, μήκος και βάρος

Πίνακας 4.13 Αποτελέσματα μετρήσεων.

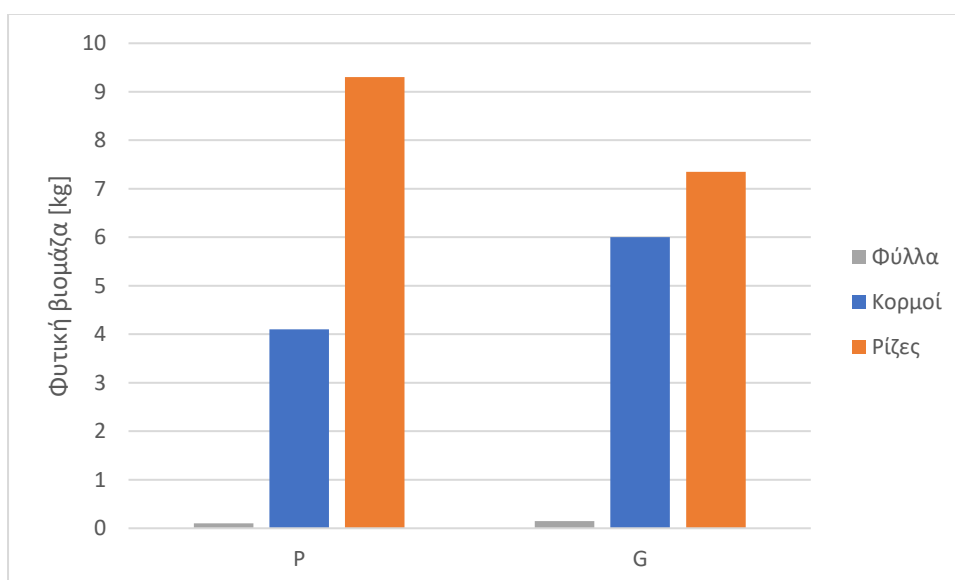
| Παράμετρος | G | P |
|---|-------|-------|
| Πλήθος κορμών | 58 | 119 |
| Μήκος μακρύτερου κορμού [m] | 2,63 | 2,4 |
| Βάρος φύλλων [kg] | 0,15 | 0,10 |
| Βάρος κορμών [kg] | 6,00 | 4,10 |
| Βάρος ριζών [kg] | 7,35 | 9,30 |
| Συνολικό βάρος φυτικής βιομάζας πάνω από την επιφάνεια [kg] | 6,15 | 4,20 |
| Επιφανειακή συγκέντρωση [kg/m ²] | 57,21 | 39,07 |



Διάγραμμα 4.21 Πλήθος κορμών στον κάθε πιλοτικό τεχνητό υγροβιότοπο.



Διάγραμμα 4.22 Μήκος μακρύτερου κορμού στον κάθε πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο.



Διάγραμμα 4.23 Βάρος κορμών, φύλλων και ριζών στον κάθε πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο.

4.4.2 Υγρασία

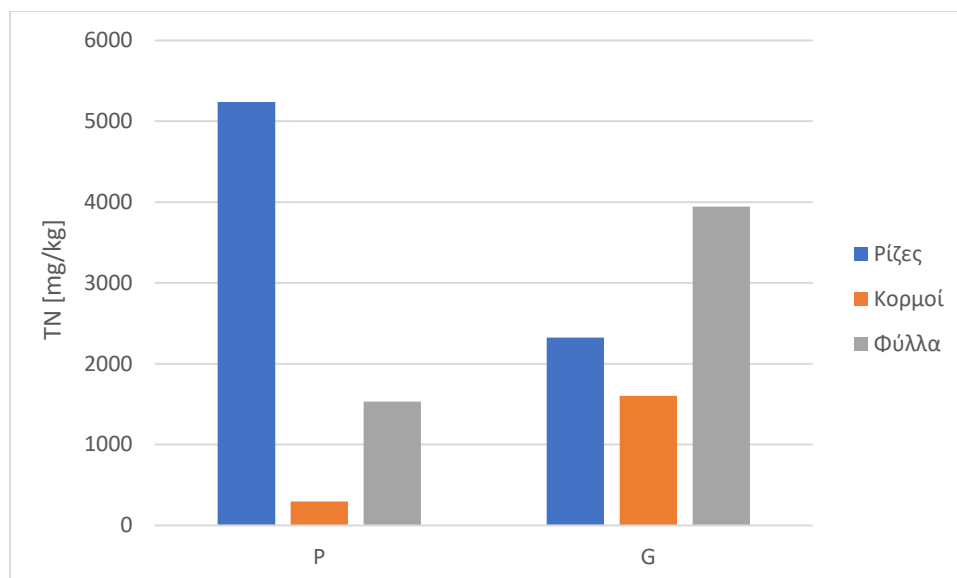
Πίνακας 4.14 Αποτελέσματα αναλύσεων υγρασίας.

| Υγρασία | Ρίζες | | Κορμοί | | Φύλλα | |
|---------------------|-------|------|--------|------|-------|-----|
| | G | P | G | P | G | P |
| Εκατοστιαία τιμή, % | 47,1 | 45,2 | 46,9 | 58,4 | 3,0 | 1,6 |

4.4.3 Ολικό άζωτο

Πίνακας 4.15 Αποτελέσματα αναλύσεων ολικού αζώτου.

| TN | Ρίζες | | Κορμοί | | Φύλλα | |
|---------------------------------|----------|----------|----------|--------|----------|----------|
| | G | P | G | P | G | P |
| Μέση τιμή συγκεντρώσεων [mg/kg] | 2.325,23 | 5.238,62 | 1.601,45 | 297,24 | 3.944,04 | 1.530,58 |

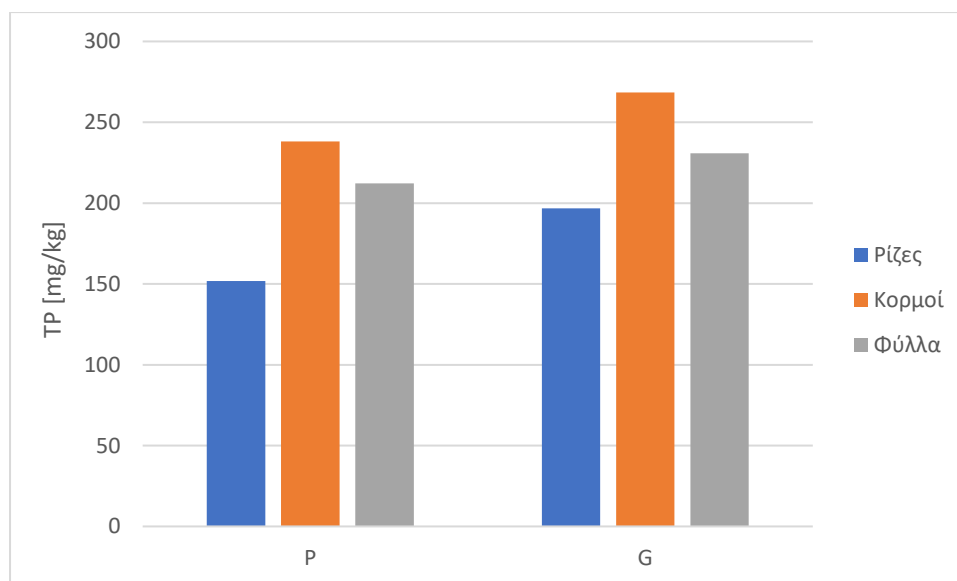


Διάγραμμα 4.24 Συγκέντρωση ολικού αζώτου στα φύλλα, στους κορμούς και στις ρίζες στον κάθε πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο.

4.4.4 Ολικός φώσφορος

Πίνακας 4.16 Αποτελέσματα αναλύσεων ολικού φωσφόρου

| TP | Ρίζες | | Κορμοί | | Φύλλα | |
|---------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | G | P | G | P | G | P |
| Μέση τιμή συγκεντρώσεων [mg/kg] | 196,75 | 151,71 | 268,40 | 238,04 | 230,83 | 212,26 |

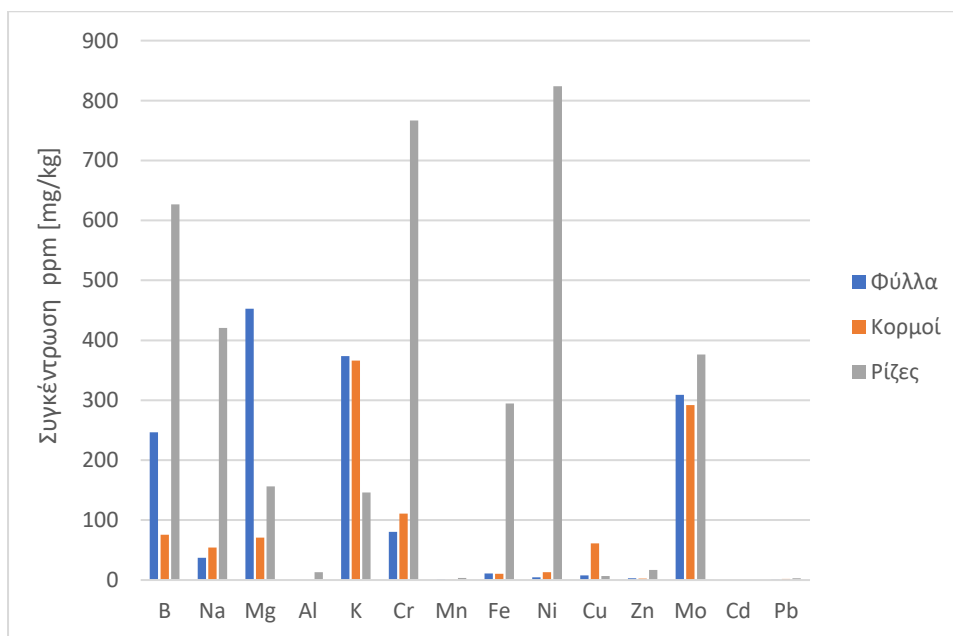


Διάγραμμα 4.25 Συγκέντρωση ολικού φωσφόρου στα φύλλα, στους κορμούς και στις ρίζες στον κάθε πιλοτικό τεχνητό υγροβιότοπο.

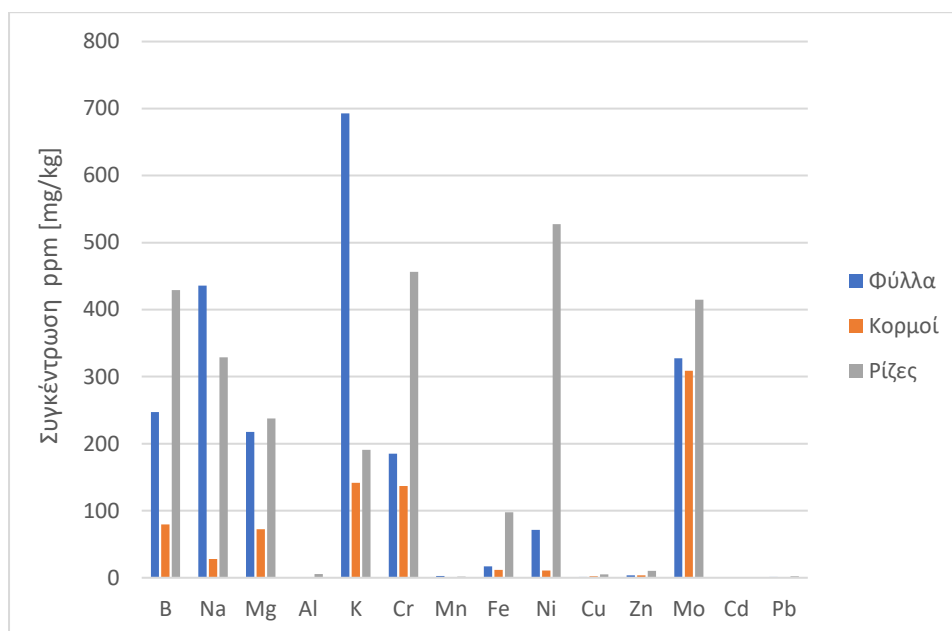
4.4.5 Μέταλλα

Πίνακας 4.17 Αποτελέσματα αναλύσεων μετάλλων.

| Παράμετρος | Μονάδα | Ρίζες | | Κορμοί | | Φύλλα | |
|------------|--------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|
| | | G | P | G | P | G | P |
| B | μg/kg | 429.2 | 626.6 | 79.8 | 75.5 | 247.2 | 246.7 |
| Na | mg/kg | 328.7 | 420.7 | 27.8 | 54.2 | 435.8 | 37.1 |
| Mg | mg/kg | 237.7 | 156.1 | 72.5 | 70.6 | 217.7 | 452.7 |
| Al | mg/kg | 5.6 | 13.2 | <DL | <DL | <DL | <DL |
| K | mg/kg | 190.9 | 146.2 | 141.9 | 365.9 | 693.1 | 373.7 |
| Cr | μg/kg | 456.5 | 766.9 | 136.8 | 110.8 | 185.2 | 80.3 |
| Mn | μg/kg | 1943.9 | 3277.2 | 560.8 | 323.4 | 2549.7 | 1250.9 |
| Fe | μg/kg | 97863.3 | 294707.0 | 11799.1 | 10209.9 | 17237.7 | 11103.7 |
| Ni | μg/kg | 527.5 | 824.0 | 10.8 | 13.3 | 71.6 | 4.3 |
| Cu | μg/kg | 5195.3 | 6872.4 | 2314.6 | 61199.0 | 1363.8 | 7700.6 |
| Zn | μg/kg | 10350.2 | 17030.0 | 3574.8 | 2269.4 | 3752.4 | 2889.4 |
| Mo | μg/kg | 414.9 | 376.4 | 308.9 | 291.7 | 327.6 | 308.8 |
| Cd | μg/kg | <DL | <DL | <DL | <DL | <DL | <DL |
| Pb | μg/kg | 2291.2 | 2913.6 | 606.7 | 1847.0 | 1021.2 | 734.4 |



Διάγραμμα 4.26 Συγκέντρωση μετάλλων στα φύλλα, στους κορμούς και στις ρίζες στον πιλοτικό τεχνητό υγροβιότοπο που περιείχε ανακυκλωμένο πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας.



Διάγραμμα 4.27 Συγκέντρωση μετάλλων στα φύλλα, στους κορμούς και στις ρίζες στον πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο που περιείχε χαλίκι.

5. Συζήτηση

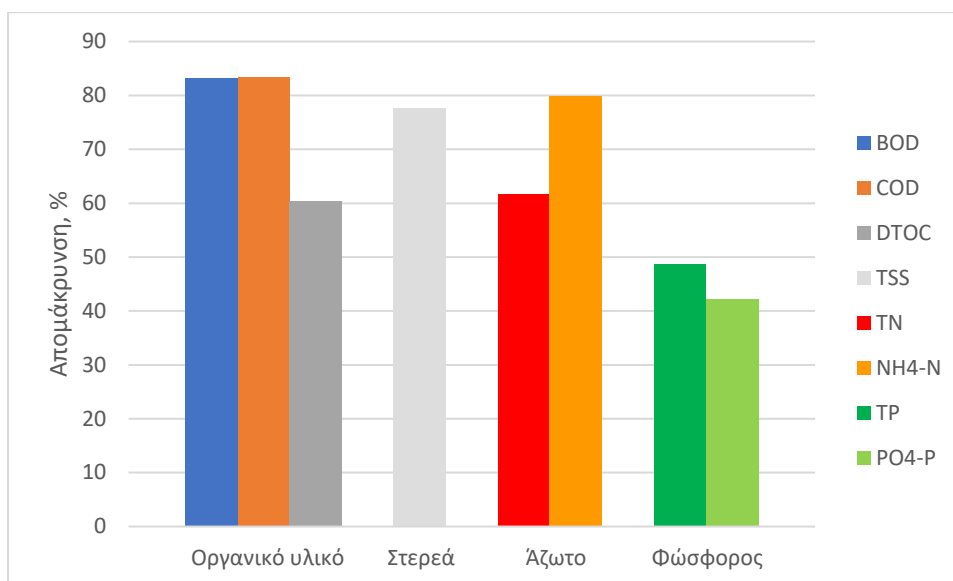
5.1 Συγκεντρώσεις εισροής και εκροής και εκατοστιαίες απομακρύνσεις

Η απομάκρυνση οργανικού υλικού ήταν η μεγαλύτερη σε σχέση με τις απομακρύνσεις των άλλων συστατικών. Αυτό, ήταν αναμενόμενο, με βάση τη βιβλιογραφία (Στεφανάκης 2011, Πιπερίδης 2024). Ο λόγος BOD/COD, της πρωτοβάθμιας εκροής η οποίας εφαρμόζονταν στους υδροβιότοπους, ήταν ίσος με 0,83, κάτι το οποίο υποδεικνύει ότι ήταν εύκολα βιοαποδομήσιμο. Οι μέσες τιμές συγκεντρώσεων, βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου, χημικά απαιτούμενου οξυγόνου και ολικού οργανικού άνθρακα, των αστικών λυμάτων τα οποία εφαρμόζονταν, ήταν ίσες με 239,5 mg/L, 347,2 mg/L και 40,5 mg/L αντίστοιχα. Οι αντίστοιχες τιμές των εκροών, σε όλους τους πιλοτικούς τεχνητούς υδροβιότοπους, ήταν ίσες με 41 mg/L, 52 mg/L και 16 mg/L και οι εκατοστιαίες τιμές απομακρύνσεων ήταν ίσες με 82%, 84% και 61%.

Η μέση τιμή συγκέντρωσης, ολικών αιωρούμενων στερεών, των αστικών λυμάτων τα οποία εφαρμόζονταν, ήταν ίση με 113,8 mg/L. Η αντίστοιχη τιμή των εκροών, σε όλους τους πιλοτικούς τεχνητούς υδροβιότοπους, ήταν ίση με 22,5 mg/L και η εκατοστιαία τιμή απομάκρυνσης ήταν ίση με 77,6%.

Οι μέσες τιμές συγκεντρώσεων, ολικού αζώτου και αμμωνιακού αζώτου, των αστικών λυμάτων τα οποία εφαρμόζονταν, ήταν ίσες με 52,4 mg/L και 34,7 mg/L αντίστοιχα. Οι αντίστοιχες τιμές των εκροών, σε όλους τους πιλοτικούς τεχνητούς υδροβιότοπους, ήταν ίσες με 20,2 mg/L και 7,1 mg/L και οι εκατοστιαίες τιμές απομακρύνσεων ήταν ίσες με 61,2% και 79,8% αντίστοιχα.

Οι μέσες τιμές συγκεντρώσεων, ολικού φωσφόρου και φωσφόρου ορθοφωσφορικών, των αστικών λυμάτων τα οποία εφαρμόζονταν, ήταν ίσες με 4,8 mg/L και 3,8 mg/L αντίστοιχα. Οι αντίστοιχες τιμές των εκροών, σε όλους τους πιλοτικούς τεχνητούς υδροβιότοπους, ήταν ίσες με 2,1 mg/L και 2,0 mg/L και οι εκατοστιαίες τιμές απομακρύνσεων ήταν ίσες με 56,7% και 44,8% αντίστοιχα.



Διάγραμμα 5.1 Εκατοστιαία απομάκρυνση του κάθε συστατικού, σε όλους τους πιλοτικούς τεχνητούς υδροβιότοπους.

5.2 Επίδραση του υλικού πλήρωσης

Η μεγαλύτερη απομάκρυνση οργανικής ύλης, συνέβη στον πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο που περιείχε πλαστικό, ως υλικό πλήρωσης και είχε φυτευτεί, με μέσες εκατοστιαίες τιμές απομακρύνσεων βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου, χημικά απαιτούμενου οξυγόνου και ολικού οργανικού άνθρακα, ίσες με 94,3%, 91,5% και 70,0% αντίστοιχα. Στον πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο που περιείχε χαλίκι, ως υλικό πλήρωσης, οι αντίστοιχες τιμές, ήταν ίσες με 84,7%, 84,6% και 57,9% αντίστοιχα και στον πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο που περιείχε πλαστικό και χρησιμοποιήθηκε για έλεγχο, οι αντίστοιχες τιμές, ήταν ίσες με 66,9%, 75,8% και 55,0% αντίστοιχα.

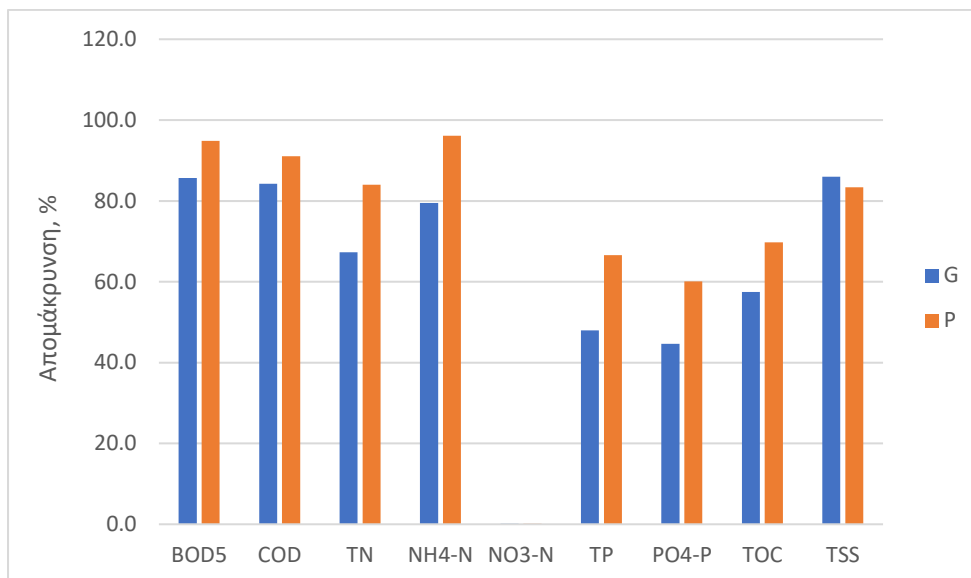
Η μεγαλύτερη απομάκρυνση ολικών αιωρούμενων στερεών, συνέβη στον πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο που περιείχε χαλίκι, ως υλικό πλήρωσης, με εκατοστιαία απομάκρυνση, ίση με 86,0%. Στον πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο που περιείχε πλαστικό, ως υλικό πλήρωσης και είχε φυτευτεί και στον πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο που περιείχε πλαστικό, ως υλικό πλήρωσης και χρησιμοποιήθηκε για έλεγχο, η αντίστοιχη τιμή, ήταν ίση με 83,4% και 63,6% αντίστοιχα.

Η μεγαλύτερη απομάκρυνση αζώτου, συνέβη στον πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο που περιέχει πλαστικό, ως υλικό πλήρωσης και είχε φυτευτεί, με μέσες εκατοστιαίες τιμές απομακρύνσεων, ολικού και αμμωνιακού αζώτου, ίσες με 84,0% και 96,1% αντίστοιχα. Στον πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο που περιείχε χαλίκι, ως υλικό πλήρωσης, οι αντίστοιχες τιμές, ήταν ίσες με 65,7% και 79,5% αντίστοιχα και στον πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο που περιείχε πλαστικό, ως υλικό πλήρωσης και χρησιμοποιήθηκε για έλεγχο, οι αντίστοιχες τιμές, ήταν ίσες με 33,9% και 63,9% αντίστοιχα.

Η μεγαλύτερη απομάκρυνση φωσφόρου, συνέβη στον πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο που περιείχε πλαστικό, ως υλικό πλήρωσης και είχε φυτευτεί, με μέσες εκατοστιαίες τιμές απομακρύνσεων, ολικού φωσφόρου και φωσφόρου ορθοφωσφορικών, ίσες με 72,6%, και 60,7% αντίστοιχα. Στον πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο που περιείχε χαλίκι, ως υλικό πλήρωσης, οι αντίστοιχες τιμές, ήταν ίσες με 55,9%, και 48,5% αντίστοιχα και στον πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο που περιείχε πλαστικό, ως υλικό πλήρωσης και χρησιμοποιήθηκε για έλεγχο, οι αντίστοιχες τιμές, ήταν ίσες με 41,5% και 25,2% αντίστοιχα.

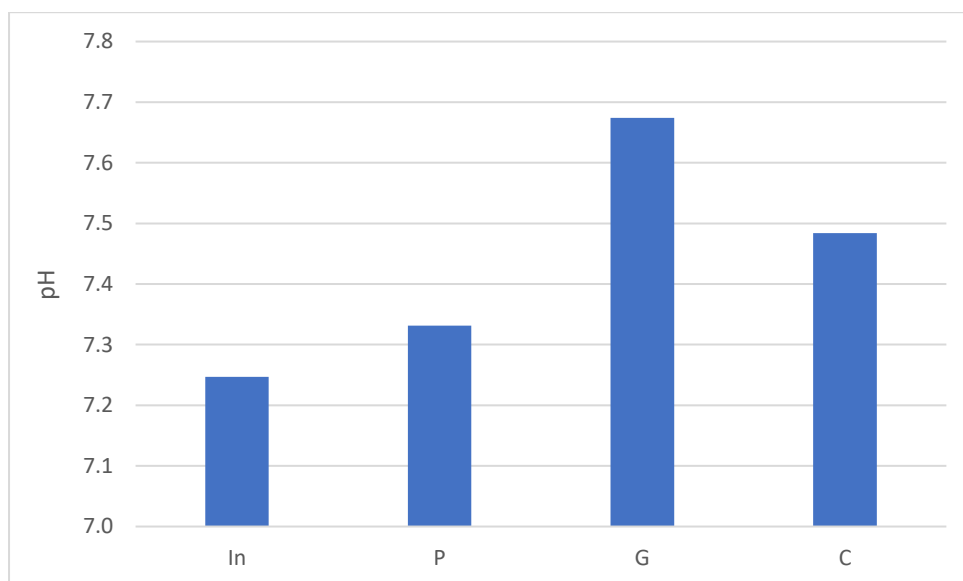
Η μεγαλύτερη εκατοστιαία απομάκρυνση βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου, χημικά απαιτούμενου οξυγόνου, ολικού οργανικού άνθρακα, ολικού αζώτου, αμμωνιακού αζώτου, ολικού φωσφόρου και φωσφόρου ορθοφωσφορικών, ήταν μεγαλύτερη στον υδροβιότοπο

ο οποίος περιείχε πλαστικό και είχε φυτευτεί. Στον υδροβιότοπο που περιείχε χαλίκι, ήταν μεγαλύτερη η εκατοστιαία απομάκρυνση ολικών αιωρούμενων στερεών, η οποία, ήταν μεγαλύτερη κατά 2,3%, σε σχέση με τον υδροβιότοπο ο οποίος περιείχε πλαστικό και είχε φυτευτεί.



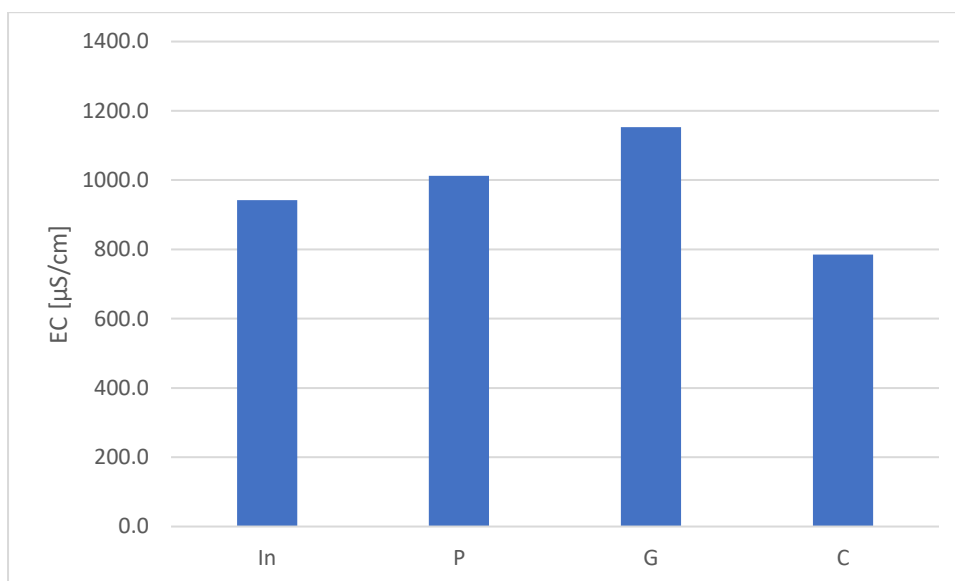
Διάγραμμα 5.2 Εκατοστιαία απομάκρυνση του κάθε συστατικού στον κάθε πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο που είχε φυτευτεί.

Για επεξεργασμένα υγρά απόβλητα, τα οποία διατίθενται στο περιβάλλον, το επιτρεπτό εύρος pH κυμαίνεται από 6,5 έως 8,5 (Metcalf & Eddy 2003). Η μέση τιμή των τιμών pH της εκροής του τεχνητού υδροβιότοπου που περιείχε πλαστικό και είχε φυτευτεί ήταν 7,7, του τεχνητού υδροβιότοπου που περιείχε χαλίκι και είχε φυτευτεί ήταν 7,3 και του τεχνητού υδροβιότοπου που περιείχε πλαστικό και χρησιμοποιήθηκε για έλεγχο ήταν 7,5. Στους πιλοτικούς τεχνητούς υδροβιότοπους που περιείχαν πλαστικό, η τιμή pH, είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή στον πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο που περιείχε χαλίκι. Όλες οι τιμές ήταν εντός του επιτρεπτού εύρους και με μικρές αποκλίσεις μεταξύ τους. Οι μέσες τιμές των τιμών pH των εκροών, αναμενόταν να έχουν τιμές με μικρή απόκλιση-απόλυτη διαφορά, από τη μέση τιμή των τιμών της πρωτοβάθμιας εκροής, καθώς το pH σε έναν τεχνητό υδροβιότοπο δεν μεταβάλλεται σε μεγάλο βαθμό από την εισροή στην εκροή. Η διαφορά που παρατηρείται μεταξύ εισροής και εκροής κυμαίνεται από 0,1 έως 1,0, ανάλογα με τον τύπο του τεχνητού υδροβιότοπου, τα υγρά απόβλητα και το υλικό πλήρωσης (Akinbile et al. 2012, Deng et al. 2019, Gupta et al. 2016, Papaevangelou et al. 2016, Tatoulis et al. 2017, Vidya et al. 2017, Wojciechowska et al. 2010). Πράγματι, η μέση τιμή των τιμών pH της πρωτοβάθμιας εκροής ήταν 7,2 και η μεγαλύτερη διαφορά από τις μέσες τιμές των τιμών των εκροών ήταν 0,5.



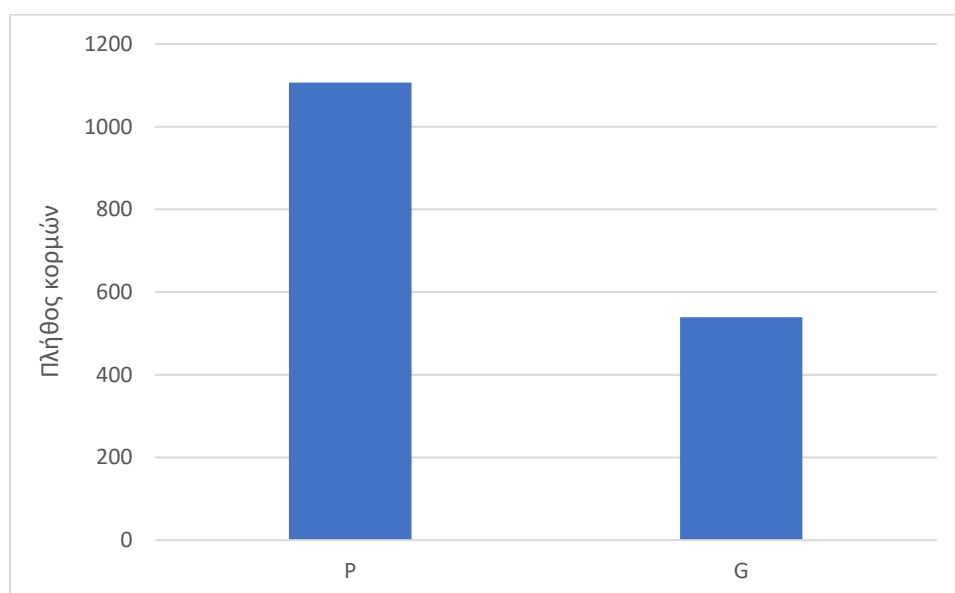
Διάγραμμα 5.3 Μέση τιμή pH της εισροής και της εκροής του κάθε πιλοτικού τεχνητού υδροβιότοπου.

Η τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε ένα διάλυμα, χρησιμοποιείται ως αντιπροσωπευτικό μέτρο της συγκέντρωσης των ολικών διαλυμένων στερεών στο δείγμα (Metcalf & Eddy 2003). Τα φυτά δεσμεύουν υγρά από τα υγρά απόβλητα και ταυτόχρονα απελευθερώνουν άλατα. Για αυτό, οι μέσες τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας στις εκροές των δύο τεχνητών υδροβιότοπων που είχαν φυτευτεί αναμενόταν να αυξηθούν. Πράγματι, οι δύο αυτές μέσες τιμές αυξήθηκαν. Η μέση τιμή ηλεκτρικής αγωγιμότητας της πρωτοβάθμιας εκροής ήταν 942,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ και οι μέσες τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας της εκροής του υδροβιότοπου που περιείχε πλαστικό και είχε φυτευτεί, ήταν 1.152,9 $\mu\text{S}/\text{cm}$, του υδροβιότοπου που περιείχε χαλίκι, ήταν 1.012,9 $\mu\text{S}/\text{cm}$ και του υδροβιότοπου που περιείχε πλαστικό και χρησιμοποιήθηκε για έλεγχο, ήταν 785,4 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Η μέση τιμή ηλεκτρικής αγωγιμότητας της εκροής του υδροβιότοπου που περιείχε πλαστικό και είχε φυτευτεί ήταν μεγαλύτερη από αυτήν του υδροβιότοπου που περιείχε χαλίκι. Αυτό είναι κάτι, το οποίο δεν αναμενόταν, καθώς το ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3), το οποίο είναι το κύριο συστατικό του χαλικιού, οδηγεί σε απελευθέρωση αλάτων εντός της κλίνης, τα οποία προκαλούν αύξηση των τιμών της ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Αυτό, μάλλον οφείλεται στο γεγονός ότι ο υδροβιότοπος χρησιμοποιούνταν για 1,5 χρόνο πριν από αυτήν τη διερεύνηση, με αποτέλεσμα τα χαλίκια να μην επηρεάσουν σε μεγάλο βαθμό, άρα να μην οδηγήσουν σε μεγάλη αύξηση της αγωγιμότητας.



Διάγραμμα 5.4 Μέση τιμή ηλεκτρικής αγωγιμότητας της εισροής και της εκροής του κάθε πιλοτικού τεχνητού υγροβιότοπου.

Το πλήθος των **κορμών** του πιλοτικού τεχνητού υγροβιότοπου ο οποίος περιείχε πλαστικό ήταν 119 και το πλήθος των **κορμών** του πιλοτικού τεχνητού υγροβιότοπου ο οποίος περιείχε χαλίκι ήταν 58.



Διάγραμμα 5.5 Πλήθος κορμών στον κάθε πιλοτικό τεχνητό υγροβιότοπο ανά μονάδα επιφάνειας.

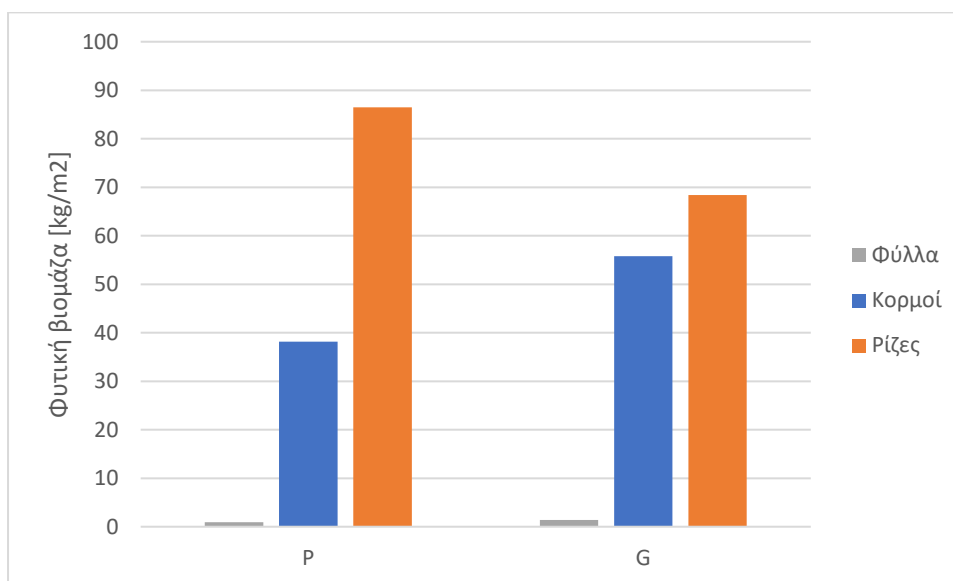
Το μήκος του μακρύτερου κορμού, που αναπτύχθηκε στον πιλοτικό τεχνητό υγροβιότοπο ο οποίος περιείχε πλαστικό και το οποίο ήταν ίσο με 2,63 m, ήταν μεγαλύτερο κατά 23 εκατοστά, σε σχέση με το μήκος του μακρύτερου κορμού, που αναπτύχθηκε στον πιλοτικό τεχνητό υγροβιότοπο ο οποίος περιείχε χαλίκι και το οποίο ήταν ίσο με 2,4 m.

Το βάρος των κορμών, που αναπτύχθηκαν στον πιλοτικό τεχνητό υγροβιότοπο ο οποίος περιείχε πλαστικό και το οποίο ήταν ίσο με 4,2 kg, ήταν μικρότερο κατά 2,95 kg, σε σχέση με το βάρος των κορμών, που αναπτύχθηκαν στον πιλοτικό τεχνητό υγροβιότοπο ο οποίος περιείχε χαλίκι και το οποίο ήταν ίσο με 6,15 kg.

Το βάρος των φύλλων, που αναπτύχθηκαν στον πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο ο οποίος περιείχε πλαστικό και το οποίο ήταν ίσο με 0,1 kg, ήταν μικρότερο κατά 0,05 kg, σε σχέση με το βάρος των φύλλων, που αναπτύχθηκαν στον πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο ο οποίος περιείχε χαλίκι και το οποίο ήταν ίσο με 0,15 kg.

Το βάρος των ριζών, που αναπτύχθηκαν στον πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο ο οποίος περιείχε πλαστικό και το οποίο ήταν ίσο με 9,3 kg, ήταν μεγαλύτερο κατά 1,95 kg, σε σχέση με το βάρος των ριζών, που αναπτύχθηκαν στον πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο ο οποίος περιείχε χαλίκι και το οποίο ήταν ίσο με 7,35 kg.

Το συνολικό βάρος της φυτικής βιομάζας που αναπτύχθηκε στον κάθε πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο, ήταν ίσο με 13,5 kg.



Διάγραμμα 5.6 Βάρος φύλλων, κορμών και ριζών στον κάθε πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο ανά μονάδα επιφάνειας.

5.3 Επίδραση της ύπαρξης φυτικής βιομάζας

Οι μέσες τιμές απομάκρυνσης, των συστατικών που αναλύθηκαν, ήταν μεγαλύτερες στους υδροβιότοπους οι οποίοι είχαν φυτευτεί. Αυτό, αποδεικνύει-επιβεβαιώνει ότι η φύτευση φυτών σε έναν υδροβιότοπο, ίδιων με τα φυτά τα οποία φυτεύτηκαν σε αυτή τη διερεύνηση, αυξάνει τις εκατοστιαίες απομακρύνσεις των συστατικών τα οποία αναλύθηκαν σε αυτήν την εργασία. Αυτό, είναι κάτι το οποίο αναμενόταν, καθώς σε έναν τεχνητό υδροβιότοπο, στον οποίο έχει φυτευτεί κάποιο είδος φυτού, το βιοφίλμ δημιουργείται στις επιφάνειες των ριζών και στις επιφάνειες του υλικού πλήρωσης, για αυτό, το βιοφίλμ το οποίο δημιουργείται, είναι περισσότερο από ότι σε έναν τεχνητό υδροβιότοπο στον οποίο δεν έχει φυτευτεί κάποιο είδος φυτού και στον οποίο το βιοφίλμ αναπτύσσεται μόνο επάνω στην επιφάνεια του υλικού πλήρωσης. Επίσης, το οξυγόνο το οποίο παρέχεται από τις ρίζες των φυτών, αποτρέπει τη δημιουργία αναερόβιων συνθηκών στο βάθος του βιοφίλμ, όταν πολλά διάκενα φράζουν και το οξυγόνο δεν αρκεί για να διεισδύσει στο εσωτερικό των προσκολλημένων βιοφίλμ. Οι μικροοργανισμοί το λαμβάνουν και συνεχίζουν να λειτουργούν κανονικά και κατά συνέπεια το βιοφίλμ δεν αποκολλάται και δεν συμπαρασύρεται προς την έξοδο. Σημαντικές διαφορές έχουν παρατηρηθεί στη σύγκριση των αποδόσεων φυτεμένων μονάδων με αφύτευτη, κάτι που υποδεικνύει τη μεγάλη σημασία της παρουσίας των φυτών (Keffala and Ghrabi 2005, Torrens et al. 2009, Στεφανάκης 2011).

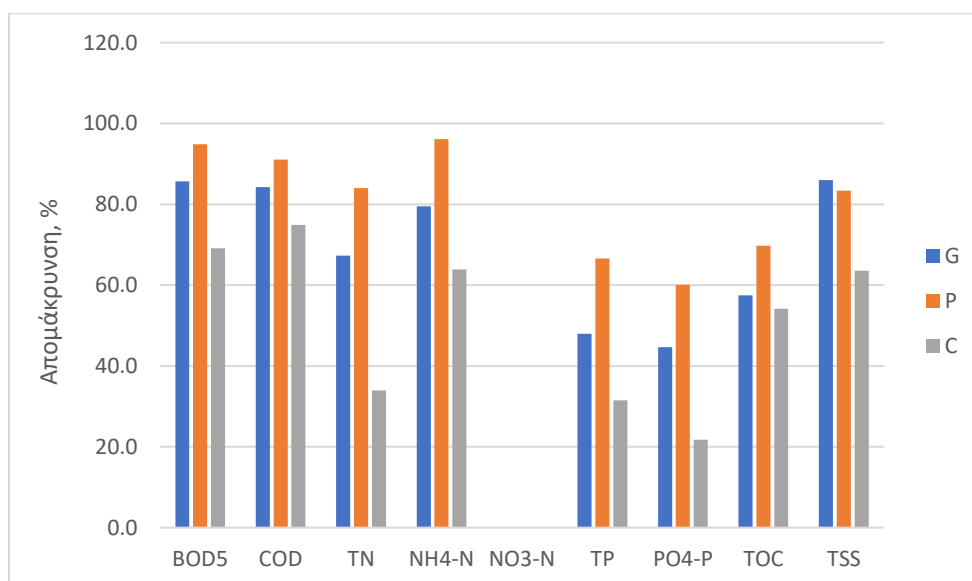
Στον υδροβιότοπο που περιείχε πλαστικό και είχε φυτευτεί, η εκατοστιαία απομάκρυνση βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου, χημικά απαιτούμενου οξυγόνου και

ολικού οργανικού άνθρακα, ήταν μεγαλύτερη κατά 27,4%, 15,7% και 15,0% αντίστοιχα, σε σχέση με τον υγροβιότοπο που περιείχε πλαστικό και χρησιμοποιήθηκε για έλεγχο. Στον υγροβιότοπο που περιείχε χαλίκι, η εκατοστιαία απομάκρυνση βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου, χημικά απαιτούμενου οξυγόνου και ολικού οργανικού άνθρακα, ήταν μεγαλύτερη κατά 17,8%, 8,8% και 2,8% αντίστοιχα, σε σχέση με τον υγροβιότοπο που περιείχε πλαστικό και χρησιμοποιήθηκε για έλεγχο.

Στον υγροβιότοπο που περιείχε πλαστικό και είχε φυτευτεί, η εκατοστιαία απομάκρυνση ολικών αιωρούμενων στερεών, ήταν μεγαλύτερη κατά 19,8% σε σχέση με τον υγροβιότοπο που περιείχε πλαστικό και χρησιμοποιήθηκε για έλεγχο. Στον υγροβιότοπο που περιείχε χαλίκι, η εκατοστιαία απομάκρυνση ολικών αιωρούμενων στερεών, ήταν μεγαλύτερη κατά 22,4% σε σχέση με τον υγροβιότοπο που περιείχε πλαστικό και χρησιμοποιήθηκε για έλεγχο.

Στον υγροβιότοπο που περιείχε πλαστικό και είχε φυτευτεί, η εκατοστιαία απομάκρυνση ολικού αζώτου και αμμωνιακού αζώτου, ήταν μεγαλύτερες κατά 50,1% και 32,2% αντίστοιχα, σε σχέση με τον υγροβιότοπο που περιείχε πλαστικό και χρησιμοποιήθηκε για έλεγχο. Στον υγροβιότοπο που περιείχε χαλίκι, η εκατοστιαία απομάκρυνση ολικού αζώτου και αμμωνιακού αζώτου, ήταν μεγαλύτερες κατά 31,7% και 15,6% αντίστοιχα, σε σχέση με τον υγροβιότοπο που περιείχε πλαστικό και χρησιμοποιήθηκε για έλεγχο.

Στον υγροβιότοπο που περιείχε πλαστικό και είχε φυτευτεί, η εκατοστιαία απομάκρυνση ολικού φωσφόρου και φωσφόρου ορθοφωσφορικών, ήταν μεγαλύτερες κατά 31,1% και 35,5% αντίστοιχα, σε σχέση με τον υγροβιότοπο που περιείχε πλαστικό και χρησιμοποιήθηκε για έλεγχο. Στον υγροβιότοπο που περιείχε χαλίκι, η εκατοστιαία απομάκρυνση ολικού φωσφόρου και φωσφόρου ορθοφωσφορικών, ήταν μεγαλύτερες κατά 14,4% και 23,3% αντίστοιχα, σε σχέση με τον υγροβιότοπο που περιείχε πλαστικό και χρησιμοποιήθηκε για έλεγχο.

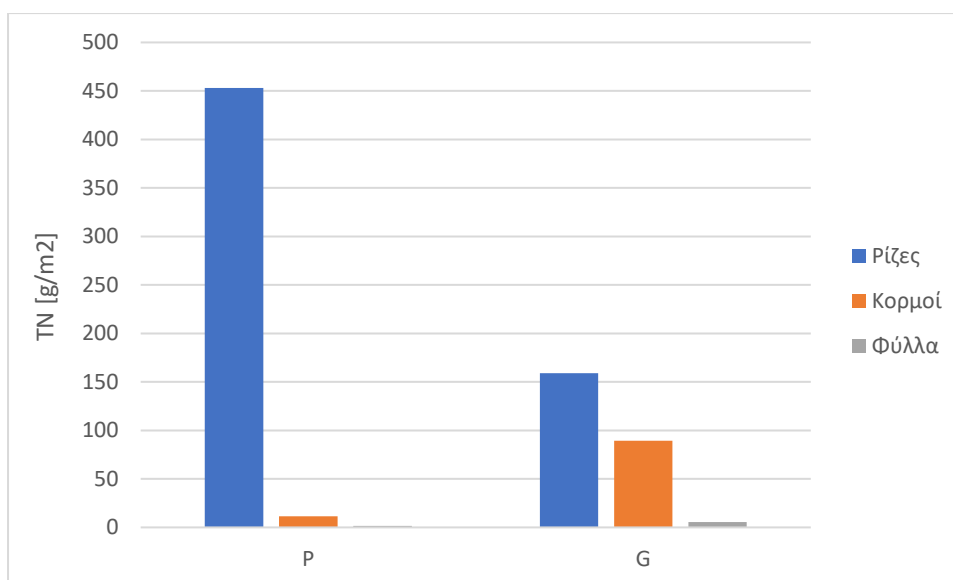


Διάγραμμα 5.7 Εκατοστιαία απομάκρυνση του κάθε συστατικού στον κάθε πιλοτικό τεχνητό υγροβιότοπο.

Η ακριβής ποσότητα ολικού αζώτου, ολικού φωσφόρου και μετάλλων, τις οποίες δέσμευσε η φυτική βιομάζα του κάθε υγροβιότοπου, κατά τη διάρκεια αυτής της διερεύνησης, δεν μπορούν να υπολογιστούν, καθώς οι ρίζες της φυτικής βιομάζας, είχαν αναπτυχθεί πλήρως-τελείως κατά την έναρξη αυτής της διερεύνησης. Από τις αναλύσεις της φυτικής βιομάζας, του κάθε υγροβιότοπου, αποδεικνύεται ότι οι ποσότητες ολικού αζώτου, ολικού φωσφόρου και μετάλλων, τις οποίες δέσμευσε η φυτική βιομάζα, ήταν μικρές. Αυτό,

ήταν αναμενόμενο, καθώς και σε άλλη διερεύνηση διαχείρισης αστικών λυμάτων με πιλοτικούς τεχνητούς υδροβιότοπους κατακόρυφης ροής (Στεφανάκης 2011), έχει υπολογιστεί μικρή εκατοστιαία απομάκρυνση ολικού αζώτου και ολικού φωσφόρου από τη φυτική βιομάζα του κάθε υδροβιότοπου.

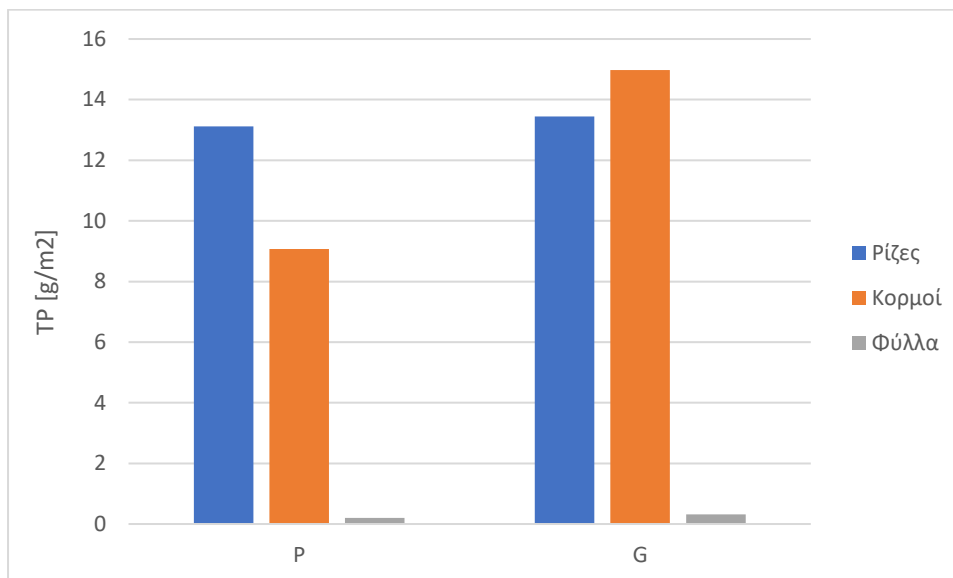
Η συγκέντρωση ολικού αζώτου, στα φύλλα, στους κορμούς και στις ρίζες, που αναπτύχθηκαν στον πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο που περιείχε πλαστικό, ήταν ίση με 1.530,58 mg/kg, 297,24 mg/kg και 5.238,62 mg/kg αντίστοιχα. Η συγκέντρωση ολικού αζώτου στα φύλλα, στους κορμούς και στις ρίζες, που αναπτύχθηκαν στον πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο που περιείχε χαλίκι, ήταν 3.944,04 mg/kg, 1.601,45 mg/kg και 2.325,23 mg/kg αντίστοιχα. Το βάρος των φύλλων, των κορμών και των ριζών, που αναπτύχθηκαν στον πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο που περιείχε πλαστικό, ήταν ίσο με 0,1 kg, 4,1 kg και 9,3 kg αντίστοιχα. Το βάρος των φύλλων, των κορμών και των ριζών, που αναπτύχθηκαν στον πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο που περιείχε χαλίκι, ήταν ίσο με 0,15 kg, 6,0 kg και 7,35 kg αντίστοιχα. Η ποσότητα ολικού αζώτου στα φύλλα, στους κορμούς και στις ρίζες, που αναπτύχθηκαν στον πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο που περιείχε πλαστικό, ήταν ίση με 153,06 mg, 1.218,67 mg και 48.719,18 mg αντίστοιχα. Η ποσότητα ολικού αζώτου στα φύλλα, στους κορμούς και στις ρίζες, που αναπτύχθηκαν στον πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο που περιείχε χαλίκι, ήταν ίση με 591,61 mg, 9.608,72 mg και 17.090,42 mg αντίστοιχα.



Διάγραμμα 5.8 Η ποσότητα ολικού αζώτου στα φύλλα, στους κορμούς και στις ρίζες στον κάθε πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο ανά μονάδα επιφάνειας.

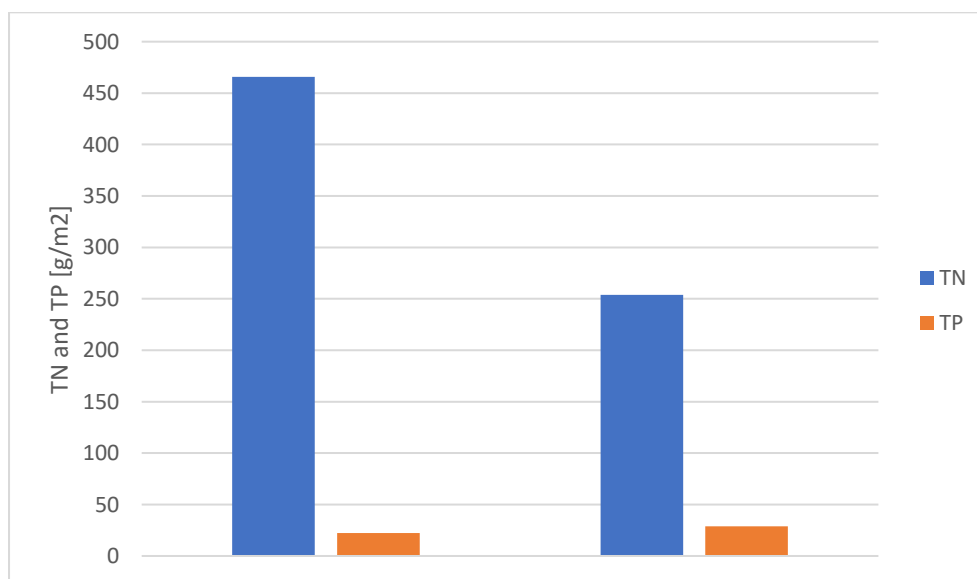
Η συγκέντρωση ολικού φωσφόρου, στα φύλλα, στους κορμούς και στις ρίζες, που αναπτύχθηκαν στον πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο που περιείχε πλαστικό, ήταν 212,26 mg/kg, 238,04 mg/kg και 151,71 mg/kg αντίστοιχα. Η συγκέντρωση ολικού αζώτου στα φύλλα, στους κορμούς και στις ρίζες, που αναπτύχθηκαν στον πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο που περιείχε χαλίκι, ήταν 230,83 mg/kg, 268,40 mg/kg και 196,75 mg/kg αντίστοιχα. Το βάρος των φύλλων, των κορμών και των ριζών, που αναπτύχθηκαν στον πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο που περιείχε πλαστικό, ήταν ίσο με 0,1 kg, 4,1 kg και 9,3 kg αντίστοιχα. Το βάρος των φύλλων, των κορμών και των ριζών, που αναπτύχθηκαν στον πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο που περιείχε χαλίκι, ήταν ίσο με 0,15 kg, 6,0 kg και 7,35 kg αντίστοιχα. Η ποσότητα ολικού αζώτου στα φύλλα, στους κορμούς και στις ρίζες, που αναπτύχθηκαν στον πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο που περιείχε πλαστικό, ήταν ίση με 21,23 mg, 975,98 mg και 1.410,93 mg αντίστοιχα. Η ποσότητα ολικού αζώτου στα φύλλα, στους κορμούς και στις ρίζες, που αναπτύχθηκαν στον πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο που

περιείχε χαλίκι, ήταν ίση με 34,63 mg, 1.610,41 mg και 1.446,11 mg αντίστοιχα. Η συγκέντρωση και η ποσότητα ολικού φωσφόρου, στα φύλλα, στους κορμούς και στις ρίζες, που αναπτύχθηκαν στον πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο που περιείχε χαλίκι, ήταν μεγαλύτερη, σε σχέση με την αντίστοιχη συγκέντρωση και ποσότητα στον πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο που περιείχε πλαστικό.

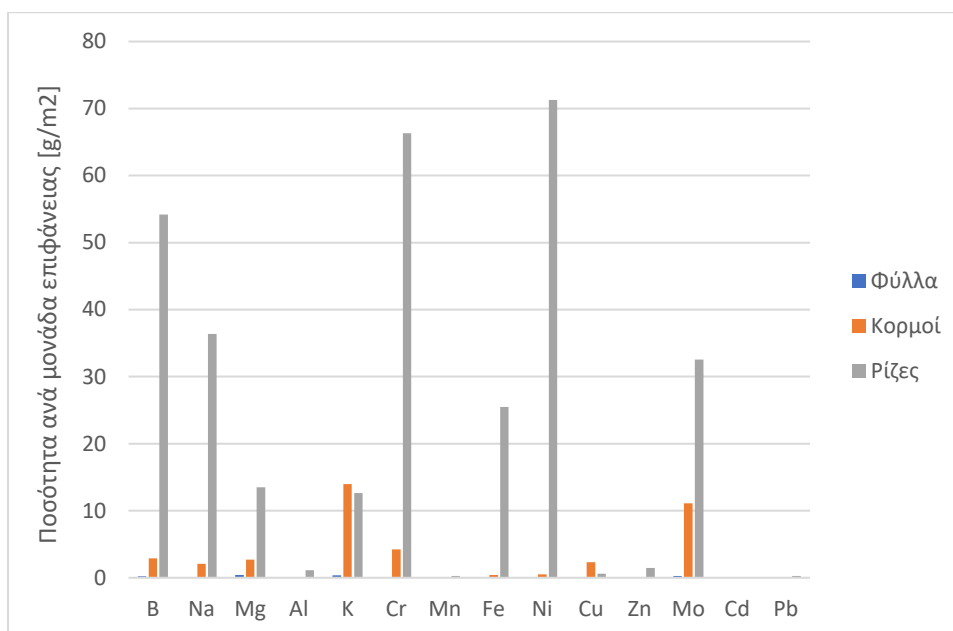


Διάγραμμα 5.9 Η ποσότητα ολικού φωσφόρου στα φύλλα, στους κορμούς και στις ρίζες στον κάθε πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο ανά μονάδα επιφάνειας.

Η συνολική ποσότητα ολικού αζώτου στα φύλλα, στους κορμούς και στις ρίζες, που αναπτύχθηκαν στον πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο που περιείχε πλαστικό και στον πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο που περιείχε χαλίκι, ήταν 50.090,91 mg και 27.290,74 mg αντίστοιχα. Η συνολική ποσότητα ολικού φωσφόρου στα φύλλα, στους κορμούς και στις ρίζες, που αναπτύχθηκαν στον πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο που περιείχε πλαστικό και στον πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο που περιείχε χαλίκι, ήταν 2.408,13 mg και 3.091,15 mg αντίστοιχα.

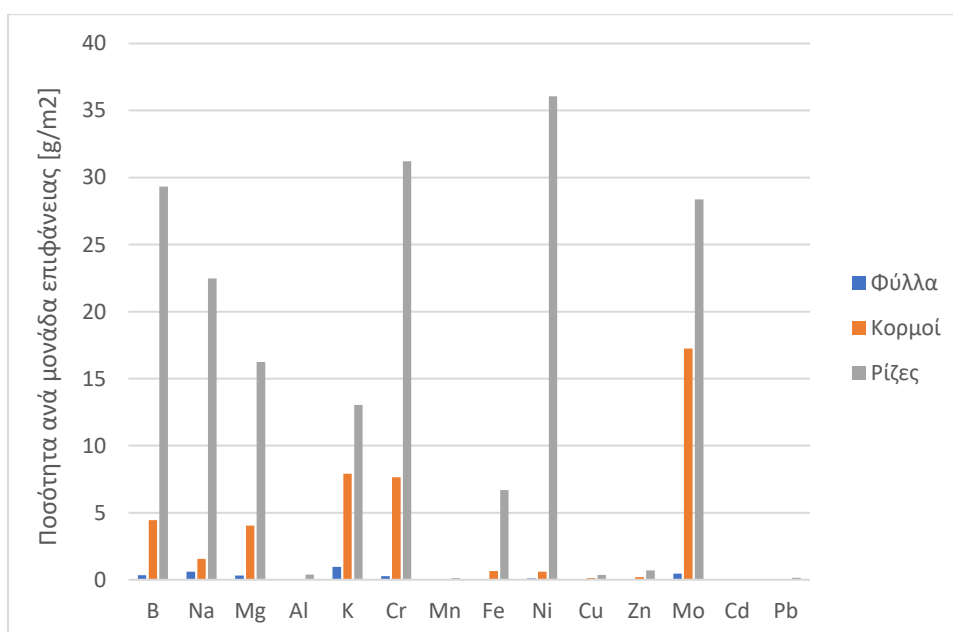


Διάγραμμα 5.10 Οι συνολικές ποσότητες ολικού αζώτου και ολικού φωσφόρου, της φυτικής βιομάζας, στον κάθε πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο ανά μονάδα επιφάνειας.



Οι μονάδες των στοιχείων B, Cr, Ni, Mo και Cd, είναι mg/m²

Διάγραμμα 5.11 Η ποσότητα μετάλλων στα φύλλα, στους κορμούς και στις ρίζες στον πιλοτικό τεχνητό υγροβιότοπο που περιείχε ανακυκλωμένο πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας και είχε φυτευτεί, ανά μονάδα επιφάνειας.



Οι μονάδες των στοιχείων B, Cr, Ni, Mo και Cd, είναι mg/m²

Διάγραμμα 5.12 Η ποσότητα μετάλλων στα φύλλα, στους κορμούς και στις ρίζες στον πιλοτικό τεχνητό υγροβιότοπο που περιείχε χαλίκι και είχε φυτευτεί, ανά μονάδα επιφάνειας.

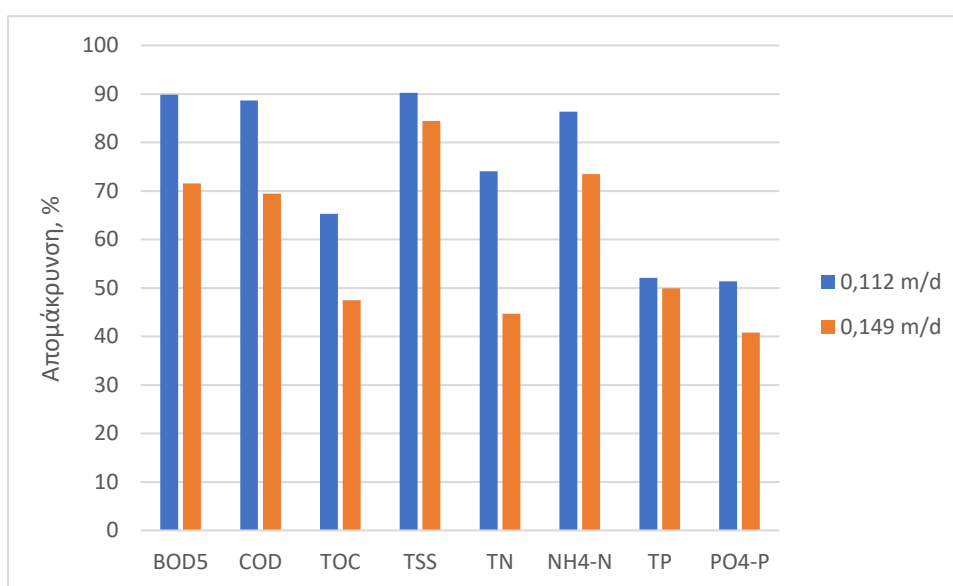
Οι ρίζες των καλαμιών του είδους *Phragmites australis*, αναπτύχθηκαν μέχρι τους πυθμένες των βαρελιών, κάτι το οποίο ήταν αναμενόμενο, καθώς, το μέγιστο μήκος ανάπτυξης των ριζών τους, έχει υπολογιστεί μεταξύ-εντός του εύρους 0,4-0,6 m (Moulisová L. et al. 2023) και με μεγαλύτερη ακρίβεια 51.54±7,29 cm (Liu X. et al 2012).

Η εξατμισοδιαπνοή στον πιλοτικό τεχνητό υγροβιότοπο που περιείχε πλαστικό και είχε φυτευτεί, ήταν μεγαλύτερη, όλους τους μήνες της διερεύνησης, με εξαίρεση τον Ιανουάριο, από την εξατμισοδιαπνοή στον πιλοτικό τεχνητό υγροβιότοπο που περιείχε χαλίκι και είχε φυτευτεί και από την εξατμισοδιαπνοή στον πιλοτικό τεχνητό υγροβιότοπο

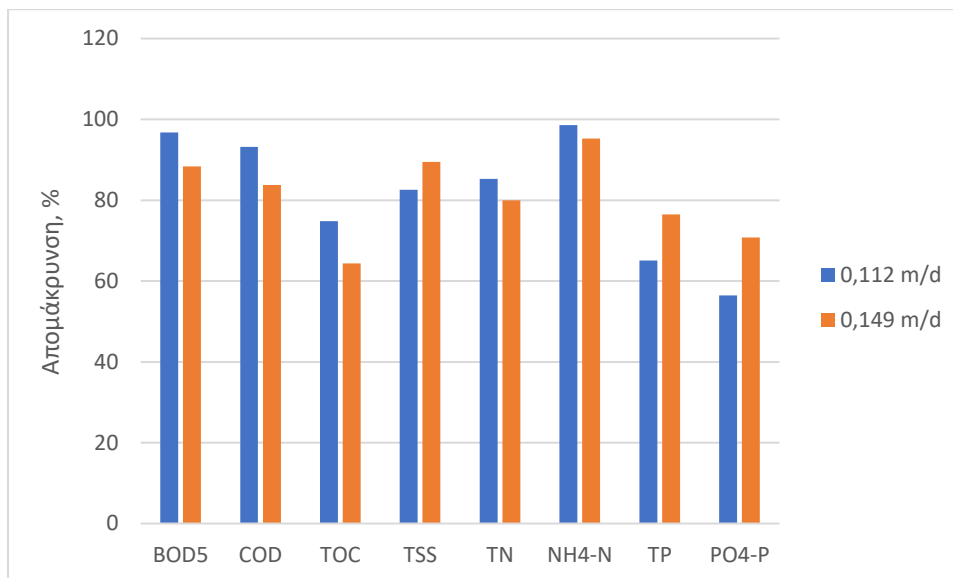
που περιείχε πλαστικό και χρησιμοποιήθηκε για έλεγχο. Η εξατμισοδιαπνοή στον πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο που περιείχε πλαστικό και χρησιμοποιήθηκε για έλεγχο, ήταν περισσότερο σταθερή και είχε μικρότερες τιμές από την εξατμισοδιαπνοή του κάθε πιλοτικού τεχνητού υδροβιότοπου που είχε φυτευτεί.

5.4 Επίδραση επιφανειακής φόρτισης και απαραίτητη επιφάνεια

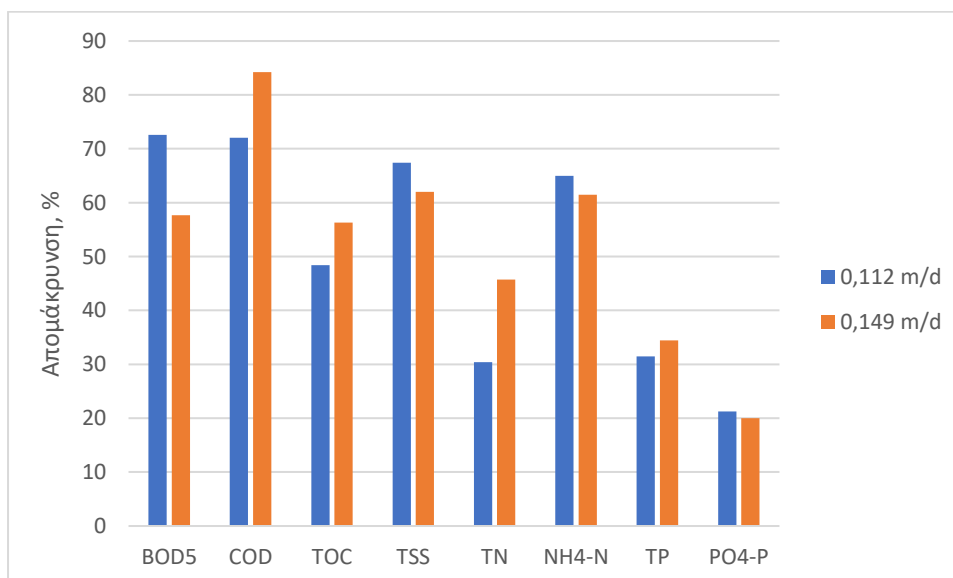
Κατά τη διάρκεια αυτής της διερεύνησης, εφαρμόστηκαν δύο επιφανειακές φορτίσεις στον κάθε πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο. Η μια, ήταν ίση με 0,112 m/d και εφαρμόζονταν από τις 7 Ιανουαρίου 2023, μέχρι και τις 5 Μαΐου, όπου εφαρμόζονταν 12 L αστικών λυμάτων στον κάθε πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο κάθε δύο ημέρες και η άλλη ήταν ίση με 0,149 m/d και εφαρμόζονταν από τις 7 Μαΐου 2023, μέχρι και τις 8 Ιουνίου, όπου εφαρμόζονταν 16 L αστικών λυμάτων στον κάθε πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο κάθε δύο ημέρες. Για επιφανειακή φόρτιση, ίση με 0,112 m/d, η απαραίτητη επιφάνεια για τη διαχείριση αστικών λυμάτων με χρήση τεχνητού υδροβιότοπου, είναι ίση με 2,69 m² ανά άτομο και για επιφανειακή φόρτιση, ίση με 0,149 m/d, η αντίστοιχη απαραίτητη επιφάνεια, είναι ίση με 2,02 m² ανά άτομο.



Διάγραμμα 5.13 Εκατοστιαία απομάκρυνση του κάθε συστατικού, για κάθε επιφανειακή φόρτιση, στον πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο που περιείχε ανακυκλωμένο πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας και είχε φυτευτεί.



Διάγραμμα 5.14 Εκατοστιαία απομάκρυνση του κάθε συστατικού, για κάθε επιφανειακή φόρτιση, στον πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο που περιείχε χαλίκι και είχε φυτευτεί.



Διάγραμμα 5.15 Εκατοστιαία απομάκρυνση του κάθε συστατικού, για κάθε επιφανειακή φόρτιση, στον πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο που περιείχε ανακυκλωμένο πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας και χρησιμοποιήθηκε για έλεγχο.

5.5 Επίδραση εφαρμογής τεχνητού αερισμού

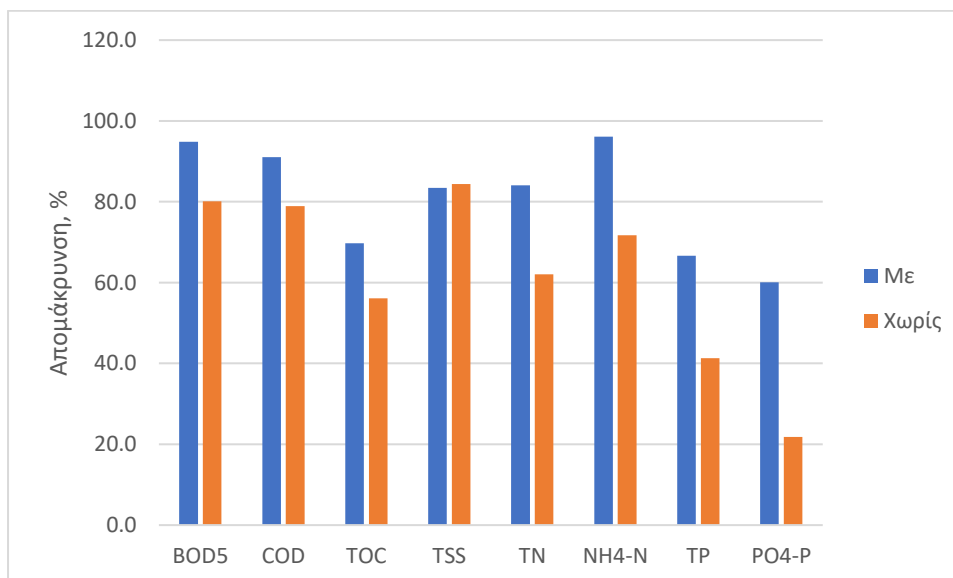
Με την εφαρμογή τεχνητού αερισμού, σε έναν τεχνητό υδροβιότοπο, ενισχύονται αερόβιες βιολογικές διεργασίες, λόγω αύξησης του διαθέσιμου οξυγόνου στα υγρά απόβλητα εντός της κλίνης, όπως η αερόβια οξείδωση, κατά την οποία απομακρύνεται οργανική ύλη, η νιτροποίηση, κατά την οποία απομακρύνεται άζωτο και οι διεργασίες προσκολλημένης βιομάζας.

Η αερόβια βιολογική οξείδωση πραγματοποιείται από αερόβια βακτήρια και για αυτό αναμένονταν η απομάκρυνση της οργανικής ύλης να είναι μεγάλη.

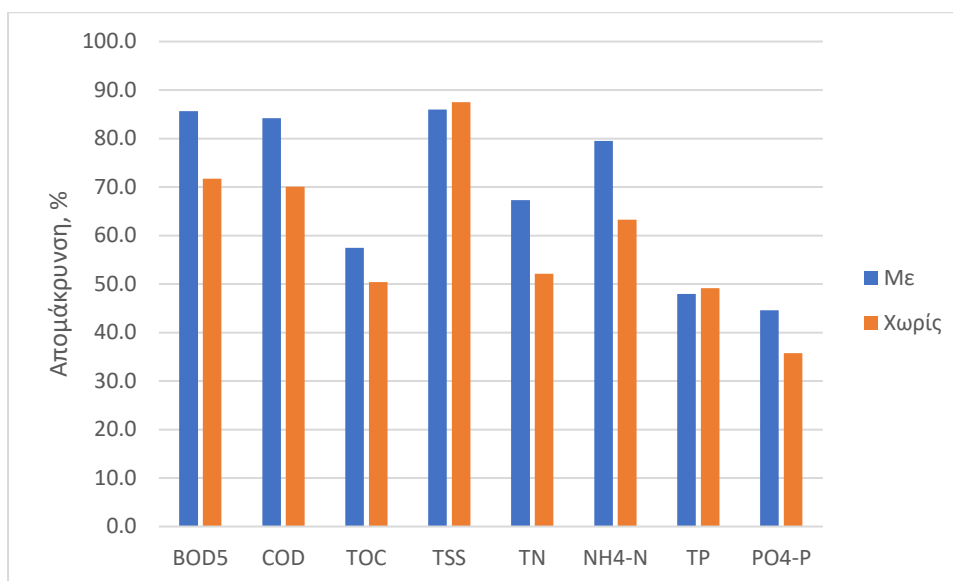
Πράγματι, η απομάκρυνση βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου, χημικά απαιτούμενου οξυγόνου και ολικού οργανικού άνθρακα, στον υδροβιότοπο που περιείχε πλαστικό και είχε

φυτευτεί ήταν 94,3%, 91,5% και 70,0% αντίστοιχα. Στον υδροβιότοπο που περιείχε χαλίκι, ήταν 84,7%, 84,6% και 57,9% αντίστοιχα και στον τεχνητό υδροβιότοπο που περιείχε πλαστικό και χρησιμοποιήθηκε για έλεγχο ήταν 66,9%, 75,8% και 55,0% αντίστοιχα. Σε πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο κατακόρυφης ροής, στον οποίο προστέθηκαν σωλήνες αερισμού, για τη διαχείριση αστικών λυμάτων, η απομάκρυνση βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου, ήταν ίση με 82,1% και η απομάκρυνση χημικά απαιτούμενου οξυγόνου, ήταν ίση με 78,4% (Στεφανάκης 2011). Στους πιλοτικούς τεχνητούς υδροβιότοπους αυτής της διερεύνησης, όταν δεν εφαρμόζονταν τεχνητός αερισμός, η απομάκρυνση βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου, χημικά απαιτούμενου οξυγόνου και ολικού οργανικού άνθρακα, στον υδροβιότοπο που περιείχε πλαστικό και είχε φυτευτεί, ήταν ίση με 80,1%, 78,9% και 56,1% αντίστοιχα (Πιπερίδης 2024). Στον υδροβιότοπο που περιείχε χαλίκι, ήταν ίση με 71,8%, 70,1% και 50,4% και στον τεχνητό υδροβιότοπο που περιείχε πλαστικό και χρησιμοποιήθηκε για έλεγχο, ήταν ίση με 55,8%, 56,7% και 56,3% (Πιπερίδης 2024).

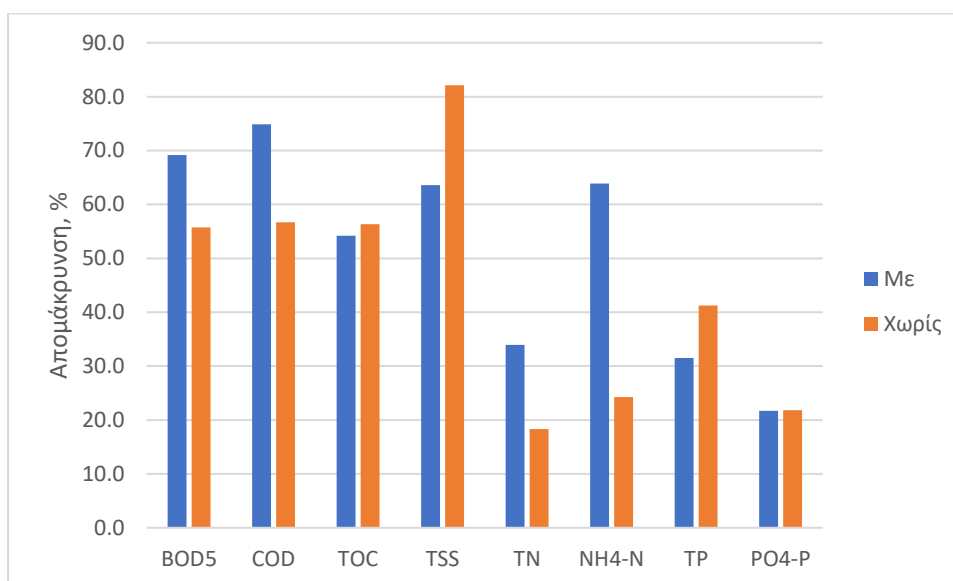
Η νιτροποίηση είναι μια διεργασία που συμβαίνει από αερόβια βακτήρια και για αυτό αναμενόταν η εκατοστιαία απομάκρυνση της αμμωνίας να είναι μεγάλη. Πράγματι, η εκατοστιαία απομάκρυνση ολικού και αμμωνιακού αζώτου στον τεχνητό υδροβιότοπο που περιείχε πλαστικό και είχε φυτευτεί ήταν 84,0% και 96,1% αντίστοιχα, στον υδροβιότοπο που περιείχε χαλίκι και είχε φυτευτεί ήταν 65,7% και 79,5% αντίστοιχα και στον υδροβιότοπο που περιείχε πλαστικό και χρησιμοποιήθηκε για έλεγχο ήταν 33,9% και 63,9% αντίστοιχα. Σε πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο κατακόρυφης ροής, στον οποίο προστέθηκαν σωλήνες αερισμού, για τη διαχείριση αστικών λυμάτων, η απομάκρυνση ολικού αζώτου, ήταν ίση με 59,1% και η απομάκρυνση αμμωνιακού αζώτου, ήταν ίση με 58,9% (Στεφανάκης 2011). Στους πιλοτικούς τεχνητούς υδροβιότοπους αυτής της διερεύνησης, όταν δεν εφαρμόζονταν τεχνητός αερισμός, η απομάκρυνση ολικού αζώτου και αμμωνιακού αζώτου, στον υδροβιότοπο που περιείχε πλαστικό και είχε φυτευτεί, ήταν ίση με 62,1% και 71,7% αντίστοιχα (Πιπερίδης 2024). Στον υδροβιότοπο που περιείχε χαλίκι, ήταν ίση με 52,1% και 63,3% αντίστοιχα και στον τεχνητό υδροβιότοπο που περιείχε πλαστικό και χρησιμοποιήθηκε για έλεγχο, ήταν ίση με 18,3% και 24,2% αντίστοιχα (Πιπερίδης 2024).



Διάγραμμα 5.16 Εκατοστιαία απομάκρυνση του κάθε συστατικού, στον πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο που περιείχε πλαστικό και είχε φυτευτεί, με και χωρίς εφαρμογή τεχνητού αερισμού.



Διάγραμμα 5.17 Εκατοστιαία απομάκρυνση του κάθε συστατικού, στον πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο που περιείχε χαλίκι και είχε φυτευτεί, με και χωρίς εφαρμογή τεχνητού αερισμού.



Διάγραμμα 5.18 Εκατοστιαία απομάκρυνση του κάθε συστατικού, στον πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο που περιείχε πλαστικό και χρησιμοποιήθηκε για έλεγχο, με και χωρίς εφαρμογή τεχνητού αερισμού.

Η απονιτροποίηση είναι μια αναερόβια διεργασία και για αυτό, με την εφαρμογή τεχνητού αερισμού, αναμενόταν να περιοριστεί. Η αμμωνία αναμενόταν να οξειδωθεί προς νιτρικά με νιτροποίηση και τα νιτρικά να μην οξειδωθούν προς αέριο άζωτο λόγω περιορισμού της απονιτροποίησης. Για αυτό οι μέσες τιμές των συγκεντρώσεων νιτρικού αζώτου στις εκροές, αναμενόταν να ήταν μεγαλύτερες από αυτήν της πρωτοβάθμιας εκροής. Πράγματι, η μέση τιμή των συγκεντρώσεων νιτρικού αζώτου στην εκροή του τεχνητού υδροβιότοπου που περιείχε πλαστικό και είχε φυτευτεί, του υδροβιότοπου που περιείχε χαλίκι και είχε φυτευτεί και του υδροβιότοπου που περιείχε πλαστικό και χρησιμοποιήθηκε για έλεγχο, ήταν ίσες με 6,1 mg/L, 1,4 mg/L και 11,2 mg/L αντίστοιχα, μεγαλύτερες από αυτήν της πρωτοβάθμιας εκροής, η οποία ήταν ίση με 0,9 mg/L.

5.6 Επίδραση θερμοκρασίας

Κατά τη διάρκεια της διερεύνησης, η χαμηλότερη μέση μηνιαία θερμοκρασία ήταν 10,9°C και η χαμηλότερη ημερήσια θερμοκρασία ήταν 4,6°C. Για αυτό, η θερμοκρασία δεν επηρέασε σημαντικά την απομάκρυνση του οργανικού υλικού, καθώς εξαρτάται πρωτίστως από την μικροβιακή δραστηριότητα αερόβιων και αναερόβιων βακτηρίων τα οποία επιβιώνουν σε θερμοκρασίες έως και 5°C (Akratos and Tsihrintzis 2007). Για την απομάκρυνση αζώτου, επιλέγεται σαν όριο, η θερμοκρασία 15°C, επιλέγεται σαν όριο γιατί σε τιμές μεγαλύτερες από αυτήν, τα βακτήρια που καταναλώνουν άζωτο, καθώς και τα φυτά, λειτουργούν πιο αποτελεσματικά (Vymazal 2007, Kadlec and Wallace 2009). Η υψηλότερη και η χαμηλότερη μέση μηνιαία θερμοκρασία, τους μήνες της διερεύνησης, ήταν 18,8°C και 10,9°C αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές, έχουν διαφορά, από την τιμή 15°C, μικρότερη από 4,1°C. Από το μήνα Μάιο, μέχρι και την ολοκλήρωση της διερεύνησης, η μέση μηνιαία θερμοκρασία ήταν μεγαλύτερη από 15°C, ξεκίνησαν να εφαρμόζονται 4 L περισσότερα στον κάθε υδροβιότοπο. Για αυτούς τους λόγους, δεν μπορεί να γίνει μια αξιόπιστη εκτίμηση της επίδρασης της θερμοκρασίας στην απόδοση των υδροβιότοπων.

Επιβεβαιώνεται το ότι η εξατμισοδιαπνοή σε έναν τεχνητό υδροβιότοπο, αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, καθώς, η εξατμισοδιαπνοή στον κάθε πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο που είχε φυτευτεί, αυξανόταν κάθε μήνα, καθώς αυξανόνταν και η μέση θερμοκρασία του κάθε μήνα. Εξαίρεση αποτελεί ο Ιούνιος, κατά τον οποίο έγιναν λιγότερες μετρήσεις των εκροών.

5.7 Έλεγχος απόρριψης

Ο ελάχιστος ετήσιος αριθμός δειγμάτων καθορίζεται ανάλογα με το μέγεθος του σταθμού επεξεργασίας (σημείο Γ, παράγραφος 3., Παράρτημα Ι, ΦΕΚ 192β/14-3-97, ΚΥΑ 5673/400/1997). Η εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων του νομού Χανίων, εξυπηρετεί 142.000 ισοδύναμο πληθυσμό, κατά τις περιόδους αιχμής. Με βάση την παράγραφο 3., ΚΕΦΑΛΑΙΟ Δ', Παράρτημα Ι, ΦΕΚ 192β/14-3-97, ΚΥΑ 5673/400/1997, ο ελάχιστος ετήσιος αριθμός δειγμάτων για σταθμό επεξεργασίας που εξυπηρετεί ισοδύναμο πληθυσμό άνω των 50.000, είναι 24. Ο αριθμός των δειγμάτων, τα οποία λήφθηκαν και αναλύθηκαν από τον κάθε υδροβιότοπο, είναι 13. Με βάση τον πίνακα 3, Παράρτημα Ι, ΦΕΚ 192β/14-3-97, ΚΥΑ 5673/400/1997, για αριθμό δειγμάτων εντός του εύρους 6-16, που λαμβάνονται κατά τη διάρκεια οποιουδήποτε έτους, ο ανώτατος επιτρεπτός αριθμός δειγμάτων που είναι αποδεκτό να αποκλείουν, προκειμένου αυτή η εκροή να είναι αποδεκτή για απόρριψη, είναι 2. Η απαιτούμενη τιμή συγκέντρωσης ολικού φωσφόρου και ολικού αζώτου επεξεργασμένων λυμάτων για απόρριψη σε ευαίσθητες περιοχές όπου παρουσιάζεται ευτροφισμός, όπως προσδιορίζονται στο Παράρτημα ΙΙ σημείο Α στοιχείο α) (ΦΕΚ 192β/14-3-97), από εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων που εξυπηρετεί ισοδύναμο πληθυσμό μεγαλύτερο από 100.000, είναι 1 mg/L P και 10 mg/L N αντίστοιχα.

Η απαιτούμενη τιμή συγκέντρωσης βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου, επεξεργασμένων λυμάτων, για απόρριψη από εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων, που διέπονται από τα άρθρα 4 και 5, της ΚΥΑ 5673/400/1997, είναι 25 mg/L O₂ και η ελάχιστη εκατοστιαία μείωση, είναι 70,0-90,0%.

| Ημερομηνία | Συγκέντρωση [mg/L] | Ελάχιστη εκατοστιαία μείωση | Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο – BOD ₅ | | | | | |
|------------|-----------------------|-----------------------------------|--|----------------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------------|
| | | | G | | P | | C | |
| | | | Συγκέντρωση [mg/L] | Εκατοστιαία απομάκρυνση | Συγκέντρωση [mg/L] | Εκατοστιαία απομάκρυνση | Συγκέντρωση [mg/L] | Εκατοστιαία απομάκρυνση |
| 09/01/2023 | 25 | 70-90 | 17 | 95 | 5 | 99 | 50 | 85 |
| 19/01/2023 | | | 26 | 84 | 6 | 96 | 40 | 75 |
| 06/02/2023 | | | 15 | 92 | 6 | 97 | 83 | 56 |
| 16/02/2023 | | | 22 | 89 | 7 | 96 | 60 | 69 |
| 24/02/2023 | | | 14 | 94 | 5 | 98 | 74 | 71 |
| 06/03/2023 | | | 20 | 93 | 5 | 99 | 76 | 72 |
| 20/03/2023 | | | 30 | 91 | 15 | 95 | 104 | 68 |
| 30/03/2023 | | | 42 | 87 | 12 | 96 | 70 | 79 |
| 10/04/2023 | | | 30 | 87 | 10 | 96 | 30 | 87 |
| 03/05/2023 | | | 27 | 84 | 8 | 95 | 80 | 53 |
| 11/05/2023 | | | 70 | 72 | 45 | 82 | 140 | 44 |
| 25/05/2023 | | | 25 | 89 | 20 | 91 | 125 | 43 |
| 02/06/2023 | | | 100 | 44 | 25 | 86 | 60 | 67 |

Πίνακας 5.1 Οι απαιτήσεις βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου για απορρίψεις από αριθμούς επεξεργασίας αστικών λυμάτων που διέπονται από τα άρθρα 4 και 5 του ΦΕΚ 192β/14-3-97, οι μέσες τιμές συγκεντρώσεων των εκροών και οι μέσες τιμές απομάκρυνσης στον κάθε πιλοτικό τεχνητό υγροβιότοπο. Εφαρμόζεται η τιμή συγκέντρωσης ή το ποσοστό μείωσης (πίνακας 1, Παράρτημα Ι, ΦΕΚ 192β/14-3-97, ΚΥΑ 5673/400/1997).

Ο αριθμός των δειγμάτων των εκροών, τα οποία αποκλίνουν γιατί δεν έχουν αποδεκτή συγκέντρωση βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου για απόρριψη, είναι 1 του υγροβιότοπου που περιείχε πλαστικό και είχε φυτευτεί, 7 του υγροβιότοπου που περιείχε χαλίκι και 13 του υγροβιότοπου που περιείχε πλαστικό και χρησιμοποιήθηκε για έλεγχο. Αυτό, αποδεικνύει ότι η εκροή του υγροβιότοπου που περιείχε πλαστικό και είχε φυτευτεί, είναι αποδεκτή για απόρριψη. Από αυτά τα οποία αποκλίνουν, αποδεκτή ελάχιστη εκατοστιαία μείωση, είχε το 1 από τα δείγματα της εκροής του υγροβιότοπου που περιείχε χαλίκι και τα 7 από τα δείγματα της εκροής του υγροβιότοπου που περιείχε πλαστικό και χρησιμοποιήθηκε για έλεγχο. Σύμφωνα με τον πίνακα 1, Παράρτημα Ι, ΦΕΚ 192β/14-3-97, ΚΥΑ 5673/400/1997, εφαρμόζεται η τιμή συγκέντρωσης ή το ποσοστό μείωσης. Ο αριθμός των δειγμάτων των εκροών, που αποκλίνουν, του υγροβιότοπου που περιείχε χαλίκι και του υγροβιότοπου που περιείχε πλαστικό και χρησιμοποιήθηκε για έλεγχο, είναι 1 και 7 αντίστοιχα. Αυτό, αποδεικνύει ότι η εκροή του υγροβιότοπου που περιείχε χαλίκι, είναι αποδεκτή για απόρριψη.

Η απαιτούμενη τιμή συγκέντρωσης βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου, επεξεργασμένων λυμάτων, για απόρριψη από εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων, που διέπονται από τα άρθρα 4 και 5, της ΚΥΑ 5673/400/1997, είναι 125 mg/L O₂ και η ελάχιστη εκατοστιαία μείωση, είναι 75,0%.

0%

| Ημερομηνία | Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο – COD | | | | | | | |
|------------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------------|
| | Συγκέντρωση [mg/L] | Ελάχιστη εκατοστιαία μείωση | G | | P | | C | |
| | | | Συγκέντρωση [mg/L] | Εκατοστιαία απομάκρυνση | Συγκέντρωση [mg/L] | Εκατοστιαία απομάκρυνση | Συγκέντρωση [mg/L] | Εκατοστιαία απομάκρυνση |
| 09/01/2023 | 125 | 75 | 38 | 91 | 24 | 95 | 60 | 86 |
| 19/01/2023 | | | 40 | 82 | 22 | 90 | 46 | 79 |
| 06/02/2023 | | | 18 | 93 | 12 | 95 | 93 | 62 |
| 16/02/2023 | | | 15 | 96 | 17 | 96 | 74 | 81 |
| 24/02/2023 | | | 18 | 95 | 16 | 95 | 101 | 71 |
| 06/03/2023 | | | 26 | 93 | 15 | 96 | 76 | 80 |
| 20/03/2023 | | | 46 | 89 | 28 | 93 | 140 | 67 |
| 30/03/2023 | | | 62 | 86 | 48 | 89 | 146 | 66 |
| 10/04/2023 | | | 66 | 85 | 25 | 94 | 40 | 91 |
| 03/05/2023 | | | 42 | 80 | 20 | 90 | 120 | 42 |
| 11/05/2023 | | | 19 | 95 | 37 | 90 | 56 | 85 |
| 25/05/2023 | | | 178 | 34 | 66 | 76 | 40 | 85 |
| 02/06/2023 | | | 64 | 82 | 34 | 90 | 36 | 90 |

Πίνακας 5.2 Οι απαιτήσεις χημικά απαιτούμενου οξυγόνου για απορρίψεις από αριθμούς επεξεργασίας αστικών λυμάτων που διέπονται από τα άρθρα 4 και 5 του ΦΕΚ 192β/14-3-97, οι μέσες τιμές συγκεντρώσεων των εκροών και οι μέσες τιμές απομάκρυνσης στον κάθε πιλοτικό τεχνητό υγροβιότοπο. Εφαρμόζεται η τιμή συγκέντρωσης ή το ποσοστό μείωσης (πίνακας 1, Παράρτημα Ι, ΦΕΚ 192β/14-3-97, ΚΥΑ 5673/400/1997).

Ο αριθμός των δειγμάτων των εκροών, τα οποία αποκλίνουν γιατί δεν έχουν αποδεκτή συγκέντρωση χημικά απαιτούμενου οξυγόνου για απόρριψη, είναι 0 του υγροβιότοπου που περιείχε πλαστικό και είχε φυτευτεί, 1 του υγροβιότοπου που περιείχε χαλίκι και 2 του υγροβιότοπου που περιείχε πλαστικό και χρησιμοποιήθηκε για έλεγχο. Αυτό, αποδεικνύει ότι η εκροή από τον τεχνητό υγροβιότοπο που περιείχε πλαστικό και είχε φυτευτεί, από τον τεχνητό υγροβιότοπο που περιείχε χαλίκι και είχε φυτευτεί και από τον τεχνητό υγροβιότοπο που περιείχε πλαστικό και χρησιμοποιήθηκε για έλεγχο, είναι αποδεκτή για απόρριψη.

Η απαιτούμενη τιμή συγκέντρωσης βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου, επεξεργασμένων λυμάτων, για απόρριψη από εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων, που διέπονται από τα άρθρα 4 και 5, της ΚΥΑ 5673/400/1997, είναι 35 mg/L O₂ και η ελάχιστη εκατοστιαία μείωση, είναι 80,0%.

00,0 %:

| Ημερομηνία | Ολικά αιωρούμενα στερεά – TSS | | | | | | | |
|------------|-------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------------|
| | Συγκέντρωση [mg/L] | Ελάχιστη εκατοστιαία μείωση | G | | P | | C | |
| | | | Συγκέντρωση [mg/L] | Εκατοστιαία απομάκρυνση | Συγκέντρωση [mg/L] | Εκατοστιαία απομάκρυνση | Συγκέντρωση [mg/L] | Εκατοστιαία απομάκρυνση |
| 09/01/2023 | 35 | 80 | 9,3 | 90,7 | 56,7 | 43,3 | 33,9 | 66,1 |
| 19/01/2023 | | | 14,2 | 85,1 | 5,1 | 94,6 | 7,5 | 92,1 |
| 06/02/2023 | | | 11,9 | 80,2 | 25,5 | 57,5 | 37,1 | 38,1 |
| 16/02/2023 | | | 3,9 | 92,7 | 10,4 | 80,7 | 22,5 | 58,3 |
| 24/02/2023 | | | 1,3 | 99,3 | 25,0 | 85,3 | 32,0 | 81,2 |
| 06/03/2023 | | | 2,0 | 97,7 | 7,3 | 91,5 | 34,6 | 59,8 |
| 20/03/2023 | | | 18,0 | 82,4 | 10,4 | 89,8 | 40,0 | 60,9 |
| 30/03/2023 | | | 8,2 | 92,0 | 10,0 | 90,2 | 29,2 | 71,5 |
| 10/04/2023 | | | 39,0 | 84,0 | 15,1 | 93,8 | 7,2 | 97,1 |
| 03/05/2023 | | | 2,4 | 98,5 | 1,6 | 99,0 | 102,8 | 36,8 |
| 11/05/2023 | | | 15,8 | 78,9 | 11,4 | 84,9 | 38,8 | 48,5 |
| 25/05/2023 | | | 41,2 | 58,8 | 5,4 | 94,6 | 64,8 | 35,2 |
| 02/06/2023 | | | 29,6 | 76,9 | 27,0 | 78,9 | 4,3 | 96,7 |

Πίνακας 5.3 Οι απαιτήσεις ολικών αιωρούμενων στερεών για απορρίψεις από αριθμούς επεξεργασίας αστικών λυμάτων που διέπονται από τα άρθρα 4 και 5 του ΦΕΚ 192β/14-3-97, οι μέσες τιμές συγκεντρώσεων των εκροών και οι μέσες τιμές απομάκρυνσης στον κάθε πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο. Εφαρμόζεται η τιμή συγκέντρωσης ή το ποσοστό μείωσης (πίνακας 1, Παράρτημα Ι, ΦΕΚ 192β/14-3-97, ΚΥΑ 5673/400/1997).

Ο αριθμός των δειγμάτων των εκροών, τα οποία αποκλίνουν γιατί δεν έχουν αποδεκτή συγκέντρωση ολικών αιωρούμενων στερεών για απόρριψη, είναι 1 του υδροβιότοπου που περιείχε πλαστικό και είχε φυτευτεί, 2 του υδροβιότοπου που περιείχε χαλίκι και 6 του υδροβιότοπου που περιείχε πλαστικό και χρησιμοποιήθηκε για έλεγχο. Αυτό, αποδεικνύει ότι η εκροή του υδροβιότοπου που περιείχε πλαστικό και είχε φυτευτεί και του υδροβιότοπου που περιείχε χαλίκι, είναι αποδεκτή για απόρριψη. Από αυτά τα οποία αποκλίνουν, αποδεκτή ελάχιστη εκατοστιαία μείωση, δεν είχε κανένα από τα δείγματα της εκροής του υδροβιότοπου που περιείχε πλαστικό και χρησιμοποιήθηκε για έλεγχο. Ο αριθμός των δειγμάτων της εκροής, που αποκλίνουν, του υδροβιότοπου που περιείχε πλαστικό και χρησιμοποιήθηκε για έλεγχο, είναι 7. Αυτό, αποδεικνύει ότι η εκροή από τον τεχνητό υδροβιότοπο που περιείχε πλαστικό και χρησιμοποιήθηκε για έλεγχο, δεν είναι αποδεκτή για απόρριψη.

Η απαιτούμενη τιμή συγκέντρωσης βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου, επεξεργασμένων λυμάτων, για απόρριψη από εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων, που διέπονται από τα άρθρα 4 και 5, της ΚΥΑ 5673/400/1997, είναι 1 mg/L O₂ και η ελάχιστη εκατοστιαία μείωση, είναι 80,0%.

00,0 %:

| Ημερομηνία | Ολικός φώσφορος – TP | | | | | | | |
|------------|-----------------------|-----------------------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------------|
| | Συγκέντρωση [mg/L] | Ελάχιστη εκατοστιαία μείωση | G | | P | | C | |
| | | | Συγκέντρωση [mg/L] | Εκατοστιαία απομάκρυνση | Συγκέντρωση [mg/L] | Εκατοστιαία απομάκρυνση | Συγκέντρωση [mg/L] | Εκατοστιαία απομάκρυνση |
| 09/01/2023 | 1 | 80 | 2,4 | 63,2 | 2,7 | 57,6 | 3,4 | 46,4 |
| 19/01/2023 | | | 2,2 | 48,0 | 2,9 | 32,2 | 2,7 | 15,1 |
| 06/02/2023 | | | 1,5 | 62,8 | 0,8 | 80,6 | 2,1 | 3,2 |
| 16/02/2023 | | | 1,5 | 62,3 | 0,8 | 81,1 | 1,9 | 52,7 |
| 24/02/2023 | | | 1,3 | 69,3 | 1,5 | 63,7 | 1,9 | 14,0 |
| 06/03/2023 | | | 2,4 | 70,7 | 0,4 | 94,7 | 5,6 | 32,5 |
| 20/03/2023 | | | 1,0 | 77,2 | 0,5 | 89,4 | 0,2 | 94,5 |
| 30/03/2023 | | | 1,7 | 60,7 | 1,0 | 76,8 | 3,4 | 21,9 |
| 10/04/2023 | | | 2,2 | 37,8 | 0,7 | 80,5 | 2,8 | 19,8 |
| 03/05/2023 | | | 2,7 | 48,4 | 1,7 | 67,3 | 4,5 | 14,8 |
| 11/05/2023 | | | 2,3 | 55,5 | 0,3 | 94,8 | 3,1 | 40,6 |
| 25/05/2023 | | | 3,1 | 25,1 | 0,7 | 82,7 | 2,8 | 32,3 |
| 02/06/2023 | | | 2,5 | 45,2 | 2,66 | 42,8 | 2,6 | 43,7 |

Πίνακας 5.4 Οι απαιτήσεις ολικού φωσφόρου για απορρίψεις από αριθμούς επεξεργασίας αστικών λυμάτων που διέπονται από τα άρθρα 4 και 5 του ΦΕΚ 192β/14-3-97, οι μέσες τιμές συγκεντρώσεων των εκροών και οι μέσες τιμές απομάκρυνσης στον κάθε πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο. Εφαρμόζεται η τιμή συγκέντρωσης ή το ποσοστό μείωσης (πίνακας 1, Παράρτημα Ι, ΦΕΚ 192β/14-3-97, ΚΥΑ 5673/400/1997).

Ο αριθμός των δειγμάτων των εκροών, τα οποία αποκλίνουν γιατί δεν έχουν αποδεκτή συγκέντρωση ολικού φωσφόρου για απόρριψη, είναι 5 του υδροβιότοπου που περιείχε πλαστικό και είχε φυτευτεί, 13 του υδροβιότοπου που περιείχε χαλί και 12 του υδροβιότοπου που περιείχε πλαστικό και χρησιμοποιήθηκε για έλεγχο. Από αυτά τα οποία αποκλίνουν, αποδεκτή ελάχιστη εκατοστιαία μείωση, δεν είχε κανένα από τα δείγματα της εκροής του υδροβιότοπου που περιείχε πλαστικό και είχε φυτευτεί, κανένα από τα δείγματα της εκροής του υδροβιότοπου που περιείχε χαλί και κανένα από τα δείγματα της εκροής του υδροβιότοπου που περιείχε πλαστικό και χρησιμοποιήθηκε για έλεγχο. Ο αριθμός των δειγμάτων των εκροών, που αποκλίνουν, του υδροβιότοπου που περιείχε πλαστικό και είχε φυτευτεί, του υδροβιότοπου που περιείχε χαλί και του υδροβιότοπου που περιείχε πλαστικό και χρησιμοποιήθηκε για έλεγχο, είναι 5, 13 και 12 αντίστοιχα. Αυτό, αποδεικνύει ότι η εκροή από τον τεχνητό υδροβιότοπο που περιείχε πλαστικό και είχε φυτευτεί, από τον τεχνητό υδροβιότοπο που περιείχε χαλί και είχε φυτευτεί και από τον υδροβιότοπο που περιείχε πλαστικό και χρησιμοποιήθηκε για έλεγχο, δεν έχουν αποδεκτές τιμές συγκέντρωσης βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου για απόρριψη.

Η απαιτούμενη τιμή συγκέντρωσης βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου, επεξεργασμένων λυμάτων, για απόρριψη από εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων, που διέπονται από τα άρθρα 4 και 5, της ΚΥΑ 5673/400/1997, είναι 10 mg/L O₂ και η ελάχιστη εκατοστιαία μείωση, είναι 70,0-80,0%.

| Ημερομηνία | Ολικό άζωτο – TN | | | | | | | |
|------------|-----------------------|-----------------------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------------|
| | Συγκέντρωση [mg/L] | Ελάχιστη εκατοστιαία μείωση | G | | P | | C | |
| | | | Συγκέντρωση [mg/L] | Εκατοστιαία απομάκρυνση | Συγκέντρωση [mg/L] | Εκατοστιαία απομάκρυνση | Συγκέντρωση [mg/L] | Εκατοστιαία απομάκρυνση |
| 09/01/2023 | 10 | 70-80 | 16 | 75,0 | 12 | 81,3 | 46 | 28,1 |
| 19/01/2023 | | | 20 | 58,3 | 12 | 75,0 | 30 | 37,5 |
| 06/02/2023 | | | 13 | 71,0 | 9 | 79,9 | 40 | 10,7 |
| 16/02/2023 | | | 15 | 69,4 | 18 | 63,3 | 34 | 30,6 |
| 24/02/2023 | | | 9 | 80,9 | 6 | 87,2 | 44 | 6,4 |
| 06/03/2023 | | | 18 | 73,1 | 8 | 88,1 | 45 | 32,8 |
| 20/03/2023 | | | 13 | 70,5 | 4 | 90,9 | 36 | 18,2 |
| 30/03/2023 | | | 15 | 65,9 | 1 | 97,7 | 37 | 15,9 |
| 10/04/2023 | | | 18 | 70,5 | 2 | 96,7 | 19 | 68,9 |
| 03/05/2023 | | | 6 | 85,0 | 3 | 92,5 | 18 | 55,0 |
| 11/05/2023 | | | 30 | 37,5 | 6 | 87,5 | 18 | 62,5 |
| 25/05/2023 | | | 27 | 61,4 | 10 | 85,7 | 32 | 54,3 |
| 02/06/2023 | | | 35 | 35,2 | 18 | 66,7 | 43 | 20,4 |

Πίνακας 5.5 Οι απαιτήσεις ολικού αζώτου για απορρίψεις από αριθμούς επεξεργασίας αστικών λυμάτων που διέπονται από τα άρθρα 4 και 5 του ΦΕΚ 192β/14-3-97, οι μέσες τιμές συγκεντρώσεων των εκροών και οι μέσες τιμές απομάκρυνσης στον κάθε πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο. Εφαρμόζεται η τιμή συγκέντρωσης ή το ποσοστό μείωσης (πίνακας 1, Παράρτημα Ι, ΦΕΚ 192β/14-3-97, ΚΥΑ 5673/400/1997).

Ο αριθμός των δειγμάτων των εκροών, τα οποία αποκλίνουν γιατί δεν έχουν αποδεκτή συγκέντρωση ολικού αζώτου για απόρριψη, είναι 4 του υδροβιότοπου που περιείχε πλαστικό και είχε φυτευτεί, 11 του υδροβιότοπου που περιείχε χαλίκι και 13 του υδροβιότοπου που περιείχε πλαστικό και χρησιμοποιήθηκε για έλεγχο. Από αυτά τα οποία αποκλίνουν, αποδεκτή ελάχιστη εκατοστιαία μείωση, είχαν τα 2 από τα δείγματα της εκροής του υδροβιότοπου που περιείχε πλαστικό και είχε φυτευτεί, τα 9 από τα δείγματα της εκροής του υδροβιότοπου που περιείχε χαλίκι και κανένα από τα δείγματα της εκροής του υδροβιότοπου που περιείχε πλαστικό και χρησιμοποιήθηκε για έλεγχο. Σύμφωνα με τον πίνακα 1, Παράρτημα Ι, ΦΕΚ 192β/14-3-97, ΚΥΑ 5673/400/1997, εφαρμόζεται η τιμή συγκέντρωσης ή το ποσοστό μείωσης. Ο αριθμός των δειγμάτων των εκροών, που αποκλίνουν, του υδροβιότοπου που περιείχε πλαστικό και είχε φυτευτεί, του υδροβιότοπου που περιείχε χαλίκι και του υδροβιότοπου που περιείχε πλαστικό και χρησιμοποιήθηκε για έλεγχο, είναι 2, 5 και 13 αντίστοιχα. Αυτό, αποδεικνύει ότι η εκροή από τον υδροβιότοπο που περιείχε πλαστικό και είχε φυτευτεί, είναι αποδεκτή για απόρριψη.

Συμπερασματικά, οι εκροές από τον πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο ο οποίος περιείχε ανακυκλωμένο πλαστικό και είχε φυτευτεί και από τον πιλοτικό τεχνητό υδροβιότοπο ο οποίος περιείχε χαλίκι, είναι αποδεκτές για απόρριψη. Καμία από τις εκροές των πιλοτικών τεχνητών υδροβιότοπων, δεν είναι αποδεκτή για απόρριψη σε ευαίσθητο αποδέκτη.

6. Συμπεράσματα

Από αυτήν τη διερεύνηση, προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η απομάκρυνση βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου, χημικά απαιτούμενου οξυγόνου, ολικού οργανικού άνθρακα, ολικού αζώτου, αμμωνιακού αζώτου, ολικού φωσφόρου και φωσφόρου ορθοφωσφορικών, σε έναν τεχνητό υδροβιότοπο κατακόρυφης ροής, ο οποίος περιέχει ανακυκλωμένο πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας, ίδιο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε σε αυτήν τη διερεύνηση, ως υλικό πλήρωσης, είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την αντίστοιχη απομάκρυνση σε έναν τεχνητό υδροβιότοπο κατακόρυφης ροής, ο οποίος περιέχει χαλίκι, ίδιο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε σε αυτήν τη διερεύνηση, ως υλικό πλήρωσης.
- Η απομάκρυνση ολικών αιωρούμενων στερεών σε έναν τεχνητό υδροβιότοπο κατακόρυφης ροής, ο οποίος περιέχει χαλίκι, ίδιο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε σε αυτήν τη διερεύνηση, ως υλικό πλήρωσης, είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την αντίστοιχη απομάκρυνση σε έναν τεχνητό υδροβιότοπο κατακόρυφης ροής, ο οποίος περιέχει ανακυκλωμένο πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας, ίδιο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε σε αυτήν τη διερεύνηση, ως υλικό πλήρωσης.
- Η εκατοστιαία απομάκρυνση του κάθε συστατικού που αναλύθηκε, ήταν μεγαλύτερη στους πιλοτικούς τεχνητούς υδροβιότοπους που είχαν φυτευτεί.
- Οι εκατοστιαίες απομακρύνσεις, παρέμειναν σταθερές, κατά τη διάρκεια της διερεύνησης, κάτι που υποδεικνύει ότι το βιοφίλμ και οι ρίζες των καλαμιών του είδους *Phragmites australis*, είχαν αναπτυχθεί πλήρως-τελείως κατά την έναρξη της διερεύνησης.
- Με την εφαρμογή τεχνητού αερισμού, είναι μεγαλύτερη η απομάκρυνση του κάθε συστατικού που αναλύθηκε.
- Το μήκος του μακρύτερου κορμού του είδους *Phragmites australis*, ο οποίος αναπτύσσεται, σε έναν τεχνητό υδροβιότοπο κατακόρυφης ροής ο οποίος περιέχει χαλίκι, ίδιο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη διερεύνηση, ως υλικό πλήρωσης, είναι μεγαλύτερο σε σχέση με το αντίστοιχο μήκος σε έναν τεχνητό υδροβιότοπο κατακόρυφης ροής, ο οποίος περιέχει ανακυκλωμένο πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας, ίδιο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη διερεύνηση, ως υλικό πλήρωσης.
- Το πλήθος των κορμών του είδους *Phragmites australis* οι οποίες αναπτύσσονται, σε έναν τεχνητό υδροβιότοπο κατακόρυφης ροής, ο οποίος περιέχει ανακυκλωμένο πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας, ίδιο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη διερεύνηση, ως υλικό πλήρωσης, είναι μεγαλύτερο σε σχέση με το αντίστοιχο πλήθος σε έναν τεχνητό υδροβιότοπο κατακόρυφης ροής, ο οποίος περιέχει χαλίκι, ίδιο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη διερεύνηση, ως υλικό πλήρωσης. Το πλήθος των κορμών που αναπτύχθηκαν στον υδροβιότοπο ο οποίος περιείχε πλαστικό, ήταν περισσότερα από τα διπλάσια από το πλήθος των κορμών τα οποία αναπτύχθηκαν στον υδροβιότοπο ο οποίος περιείχε χαλίκι.
- Το βάρος των ριζών, του είδους *Phragmites australis*, οι οποίες αναπτύσσονται, σε έναν τεχνητό υδροβιότοπο κατακόρυφης ροής, ο οποίος περιέχει ανακυκλωμένο πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας, ίδιο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη διερεύνηση, ως υλικό πλήρωσης, είναι μεγαλύτερο σε σχέση με το αντίστοιχο βάρος

σε έναν τεχνητό υγροβιότοπο κατακόρυφης ροής, ο οποίος περιέχει χαλίκι, ίδιο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη διερεύνηση, ως υλικό πλήρωσης.

- Το βάρος των κορμών, του είδους *Phragmites australis* οι οποίοι αναπτύσσονται, σε έναν τεχνητό υγροβιότοπο κατακόρυφης ροής, ο οποίος περιέχει χαλίκι, ίδιο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη διερεύνηση, ως υλικό πλήρωσης, είναι μεγαλύτερο σε σχέση με το αντίστοιχο βάρος σε έναν τεχνητό υγροβιότοπο κατακόρυφης ροής, ο οποίος περιέχει ανακυκλωμένο πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας, ίδιο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη διερεύνηση, ως υλικό πλήρωσης.
- Το βάρος των φύλλων, του είδους *Phragmites australis* τα οποία αναπτύσσονται, σε έναν τεχνητό υγροβιότοπο κατακόρυφης ροής, ο οποίος περιέχει χαλίκι, ίδιο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη διερεύνηση, ως υλικό πλήρωσης, είναι μεγαλύτερο σε σχέση με το αντίστοιχο βάρος σε έναν τεχνητό υγροβιότοπο κατακόρυφης ροής, ο οποίος περιέχει ανακυκλωμένο πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας, ίδιο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη διερεύνηση, ως υλικό πλήρωσης.
- Προκειμένου η εκροή να έχει αποδεκτές τιμές συγκεντρώσεων για απόρριψη σε φυσικό αποδέκτη, είναι απαραίτητη Η φύτευση καλαμιών, ίδια με αυτά τα οποία φυτεύτηκαν στους πιλοτικούς τεχνητούς υγροβιότοπους αυτής της διερεύνησης, σε πιλοτικούς τεχνητούς υγροβιότοπους ίδιους με αυτούς οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν σε αυτήν τη διερεύνηση.
- Η συνολική ποσότητα ολικού αζώτου της φυτικής βιομάζας στον πιλοτικό τεχνητό υγροβιότοπο που περιείχε πλαστικό, ήταν μεγαλύτερη σε σύγκριση με την αντίστοιχη ποσότητα στον πιλοτικό τεχνητό υγροβιότοπο που περιείχε χαλίκι.
- Η συνολική ποσότητα ολικού φωσφόρου της φυτικής βιομάζας στον πιλοτικό τεχνητό υγροβιότοπο που περιείχε πλαστικό, ήταν μικρότερη σε σύγκριση με την αντίστοιχη ποσότητα στον πιλοτικό τεχνητό υγροβιότοπο που περιείχε χαλίκι.

6.1 Προτάσεις

Από αυτήν τη διερεύνηση, προκύπτουν οι ακόλουθες προτάσεις:

- Εφόσον οι εκροές από τους δύο πιλοτικούς τεχνητούς υγροβιότοπους, στους οποίους είχε φυτευτεί, είναι αποδεκτές για απόρριψη, ο χρόνος παραμονής των αστικών λυμάτων στον κάθε έναν μπορεί να είναι μικρότερος.
- Διερεύνηση του πως θα διαχωρίζεται η συμπαγής μάζα η οποία δημιουργείται και αποτελείται από ρίζες και υλικό πλήρωσης, δηλαδή του πως θα διαχωρίζονται-απομακρύνονται οι ρίζες από το υλικό πλήρωσης, προκειμένου να βρεθεί ένας πιο οικονομικός και πιο γρήγορος τρόπος.
- Διερεύνηση της διάσπασης και απελευθέρωσης μικροπλαστικών από το υλικό πλήρωσης στα υγρά απόβλητα, το οποίο είναι κάτι που, με βάση τη βιβλιογραφία, αναμένεται να συμβεί μετά από δύο με τρία χρόνια επαφής του ανακυκλωμένου πολυαιθυλενίου υψηλής πυκνότητας με οργανικές ενώσεις-ουσίες. Αυτό, είναι σημαντικό καθώς οι συγκεντρώσεις των μικροπλαστικών στις θάλασσες και στους ωκεανούς έχουν αυξηθεί και αναμένεται να διπλασιαστούν στα επόμενα δέκα χρόνια, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται σοβαρά προβλήματα. Επίσης, δεν υπάρχει κάποιο μηχάνημα το οποίο να έχει τη δυνατότητα να συλλέξει μικροπλαστικά από τις θάλασσες ή τους ωκεανούς.

7. Βιβλιογραφία

7.1 Ελληνική

- Αγγελάκης Α. Ν. και Τσομπάνογλου Γ., 1995. Υγρά Απόβλητα: Φυσικά Συστήματα Επεξεργασίας και Ανάκτηση, Επεξεργασία και Διάθεση Εκροών. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, Κρήτη.
- Αγιουτάντη Ρ., 2018. Μελέτη αποτελεσματικότητας τεχνητού υδροβιότοπου με αλόφυτα για την απομάκρυνση Cd, Ni και Zn από αστικά λύματα, Διπλωματική εργασία, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης, Χανιά.
- Ακράτος Χ., 2006. ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΩΝ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΙΛΟΤΙΚΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη.
- Πιπερίδης Λ., 2024. Βελτιστοποίηση σχεδιασμού τεχνητών υδροβιότοπων κατακόρυφης ροής για την επεξεργασία αστικών υγρών αποβλήτων με χρήση πιλοτικών μονάδων, Διπλωματική εργασία, Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, Χανιά.
- Στεφανάκης Α., 2011. ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΩΝ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΡΟΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΣΤΙΚΩΝ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΚΑΙ ΛΑΣΠΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΙΛΟΤΙΚΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη.
- Σωτηροπούλου Α., 2010. *Συστήματα τεχνητών υδροβιότοπων για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων*, Πτυχιακή εργασία, Α.Τ.Ε.Ι. Δυτικής Μακεδονίας, Κοζάνη.
- Τσιχριντζής Β., 2000. Οικολογική Μηχανική και Τεχνολογία, Τόμος II: Φυσικές Μέθοδοι Επεξεργασίας και Πρόληψη Ρύπανσης), Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης.
- Χρυσικόπουλος Κ.Β., 2018. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΛΥΜΑΤΩΝ, 2η Έκδοση. ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ.

7.2 Διεθνής

- Akinbile C.O., Yusoff M.S. and Ahmad Zuki A.Z., 2012. Landfill leachate treatment using sub-surface flow constructed wetland by *Cyperus haspan*. *Waste Management* 32 (7), 1387-1393.
- Akratos C.S. and Tsihrintzis V.A., 2007. Effect of temperature, HRT, vegetation and porous media on removal efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological Engineering* 29 (2), 173-191.
- Akratos C.S., Papaspyros J.N.E., Tsihrintzis V.A., 2009. Total nitrogen and ammonia removal prediction in horizontal subsurface flow constructed wetlands: Use of artificial neural networks and development of a design equation. *Bioresource Technology* 100, 586-596.
- Al-Omari A. and Fayyad M., 2003. Treatment of domestic wastewater by subsurface flow constructed wetlands in Jordan. *Desalination* 155, 27-39.
- Arias C.A., Del Bubba M. and Brix H., 2001. Phosphorus removal by sands for use as media in subsurface flow constructed reed beds. *Water Research* 35 (5), 1159-1168.
- Arias A.C., Brix H. and Marti E., 2005. Recycling of treated effluents enhances removal of total nitrogen in vertical flow constructed wetlands. *Journal of Environmental Science and Health* 40, 1431-1443.
- Bakhshoodeh R., Alavi N., Oldham C., Santos R. M., Babaei A. A., Vymazal J. and Paydary P., 2020. Constructed wetlands for landfill leachate treatment: A review. *Ecological Engineering* 146, 105725.
- Brooks A.S., Rozenwald M.N., Geohring L.D., Lion L.W. and Steenhuis T.S., 2000. Phosphorus removal by wollastonite: A constructed wetland substrate. *Ecological Engineering* 15, 121-132.

- Cooper P., 1999. A review of the design and performance of vertical-flow and hybrid reed bed treatment systems. *Water Science and Technology* 40 (3), 1-9.
- Cooper P., Griffin P., Humphries S., Pound A., 1999. Design of a hybrid reed bed system to achieve complete nitrification and denitrification of domestic sewage. *Water Science and Technology* 40 (3), 283-289.
- Cooper P., 2007. Reed Bed Treatment Systems: Lessons learnt over the last 20 years, applications, limitations and performance. Paper presented to the *Constructed Wetlands conference Reducing rural pollution risk*, Edinburgh, 5 December.
- Deng C., Huang L., Liang Y., Xiang H., Jiang J., Wang Q., Hou J. and Chen Y., 2019. Response of microbes to biochar strengthen nitrogen removal in subsurface flow constructed wetlands: Microbial community structure and metabolite characteristics. *Science of The Total Environment*, 694, 133687.
- Drizo A., Frost A.C., Grace J. and Smith A.K., 1999. Physico-chemical screening of phosphate-removing substrates for use in constructed wetland systems. *Water Research* 33 (17), 3595-3602.
- Ebbing D.D. and Gammon S.D., 2013. General Chemistry, 10th edition. Brooks/Cole, Cengage Learning.
- EPA, September 1988. Design Manual – Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Wastewater Treatment, EPA, Office of Research and Development, Center for Environmental Research Information, Cincinnati, Ohio.
- Gomes, A.C., Silva, L., Albuquerque, A., Simões, R., Stefanakis, A.I. 2018. Investigation of lab-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands treating industrial cork boiling wastewater. *Chemosphere* 207, 430-439.
- Greenway M. and Woolley A., 1999. Constructed wetlands in Queensland: performance efficiency and nutrient bioaccumulation. *Ecological Engineering* 12, 39-55.
- Gupta P., Ann T. and Lee S.-M., 2016. Use of biochar to enhance constructed wetland performance in wastewater reclamation, *Environmental Engineering Research* 21 (1), 36-44.
- Hammer, D.A., 1992. Designing constructed wetlands systems to treat agricultural nonpoint source pollution.
- Ji Z., Tang W., Pei Y., 2022. Constructed wetland substrates: A review on development, function mechanisms, and application in contaminants removal, *Chemosphere* 286, 131564.
- Jin X., Wang S., Pang Y., Zhao H., Zhou X., 2005. The adsorption of phosphate on different trophic lake sediments. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 254, 241–248.
- Jing S.R. and Lin Y.F., 2004. Seasonal effect on ammonia nitrogen removal by constructed wetlands treating river water in southern Taiwan. *Environmental Pollution* 127: 291-301.
- Kadlec R. and Knight R., 1996. Treatment Wetlands, *CRC Press*, New York.
- Kadlec R.K. and Wallace S.D., 2009. Treatment Wetlands, Second Edition, *CRC Press*, Taylor & Francis Group, New York.
- Keffala C. and Ghrabi A., 2005. Nitrogen and bacterial removal in constructed wetlands treating domestic waste water, *Desalination* 185, 383-389.
- Kotti I.P., Gikas G.D., Tsihrintzis V.A., 2010. Effect of operational and design parameters on removal efficiency of pilot-scale FWS constructed wetlands and comparison with HSF systems. *Ecological Engineering* 36 (7), 862-875.
- Kusch P., Wiebner A., Kappelmeyer U., Weibbrodt E., Kastner M., Stottmeister U., 2003. Annual cycle of nitrogen removal by a pilot-scale subsurface horizontal flow in a constructed wetland under moderate climate. *Water Research* 37, 4236-4242.
- Langergraber G., Haberl R., Laber J. and Pressl A., 2003. Evaluation of substrate clogging processes in vertical flow constructed wetlands. *Water Science and Technology* 48 (5), 25-34.

- Langergraber G., Prandtstetten C., Pressl A., Rohrhofer R. and Haberl R., 2007a. Removal efficiency of subsurface vertical flow constructed wetlands for different organic loads. *Water Science and Technology* 56 (3), 75-84.
- Langergraber G., Prandtstetten C., Pressl A., Rohrhofer R. and Haberl R., 2007b. Optimization of subsurface vertical flow constructed wetlands for wastewater treatment. *Water Science and Technology* 55 (7), 71-78.
- Liu H., Hu Z., Zhang J., Ngo H.H., Guo W., Liang S., Fan J., Lu S., Wu H., 2016. Optimizations on supply and distribution of dissolved oxygen in constructed wetlands: A review. *Bioresource Technology* 214, 797-805.
- Liu X., Huang S., Tang T., Liu X. and Scholz M., 2012. Growth characteristics and nutrient removal capability of plants in subsurface vertical flow constructed wetlands, *Ecological Engineering* 44, 189-198.
- Luederitz V., Eckert E., Lange-Weber M., Lange A., Gersberg R. M., 2001. Nutrient removal efficiency and resource economics of vertical flow and horizontal flow constructed wetlands. *Ecological Engineering* 18, 157-171.
- Luis A., Lorena E.G.A., Amaya L. and Iñaki T., 2021. Unplanted wetland-type filter for co-treatment of landfill leachate and septic tank wastewater: Analysing gravel replacement by plastic and passive (filling-emptied) aeration effects at pilot scale. *Journal of Environmental Management* 294, 112940.
- Masi F. and Martinuzzi N., 2007. Constructed wetlands for the Mediterranean countries: hybrid systems for water reuse and sustainable sanitation. *Desalination* 215, 44-55.
- Merlin G., Pajean J-L and Lissolo T., 2002. Performances of constructed wetlands for municipal wastewater treatment in rural mountainous area. *Hydrobiologia* 469, 87-98.
- Metcalf and Eddy, 1991. Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, and Reuse, 3rd edition, McGraw-Hill.
- Metcalf & Eddy 2003. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse, 4th Edition, revised by George Tchobanoglous, Franklin L. Burton, H. Daved Stensel, McGraw-Hill Education, New York.
- Meuleman F.M.A., Van Logtestijn R., Rijs B.J.G., Verhoeven T.A.J., 2003. Water and mass budgets of a vertical-flow constructed wetland used for wastewater treatment. *Ecological Engineering* 20, 31-44.
- Molle P., Liénard A., Grasmick A. Iwema A., 2006. Effect of reeds and feeding operations on hydraulic behaviour of vertical flow constructed wetlands under hydraulic overloads. *Water Research* 40, 606-612.
- Moulisová L., Čížková H., Dušek J. and Kazda M., 2023. Root and rhizome traits of the common reed (*Phragmites australis*) in a constructed wetland for wastewater treatment. *Ecological Engineering* 186, 106832.
- Mozaffari, M.H., Shafiepour, E., Mirbagheri, S.A., Rakhshandehroo, G., Wallace, S., Stefanakis, A.I., 2021. Hydraulic characterization and removal of metals and nutrients in an aerated horizontal subsurface flow “racetrack” wetland treating oil industry effluent. *Water Research* 200, 117220.
- Mulkeen C.J., Williams C.D., Gormally M.J. and Healy M. G., 2017. Seasonal patterns of metals and nutrients in *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steudel in a constructed wetland in the west of Ireland. *Ecological Engineering* 107, 192-197.
- Newman J.M., Clausen J.C. and Neafsey J.A., 2000. Seasonal performance of a wetland constructed to process dairy milkhouse wastewater in Connecticut. *Ecological Engineering* 14: 181-198.
- Öövel M., Tooming A., Muring T., Mander U., 2008. Schoolhouse wastewater purification in a LWA-filled hybrid constructed wetland in Estonia. *Ecological Engineering* 29, 17-26.
- Papaevangelou V., Gikas G.D., and Tsihrintzis V.A., 2016. Effect of operational and design parameters on performance of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands treating university campus wastewater. *Environmental Science and Pollution Research* 23, 19504-19519.

- Platzer C., and Mauch K., 1997. Soil clogging in vertical flow reed beds – mechanisms, parameters, consequences and solutions? *Water Science and Technology* 35 (5), 175-181.
- Prochaska C.A., Zouboulis A.I., 2006. Removal of phosphates by pilot-scale vertical-flow constructed wetlands using a mixture of sand and dolomite as substrate. *Ecological Engineering* 26, 293-303.
- Prochaska C.A., Zouboulis A.I., Eskridge K.M., 2007. Performance of pilot-scale vertical-flow constructed wetlands, as affected by season, substrate, hydraulic load and frequency of application of simulated urban sewage. *Ecological Engineering* 31 (1), 57-66.
- Reed S., Middlebrooks E. and Crites R., 1995. Natural Systems for Waste Management and Treatment. *McGraw Hill*, New York.
- Rousseau D.P.L., Vanrolleghem P.A., De Pauw N., 2004. Constructed wetlands in Flanders: a performance analysis. *Ecological Engineering* 23, 151-163.
- Rustige H., Tomac I., Höner G., 2003. Investigations on phosphorus retention in subsurface flow constructed wetlands. *Water Science and Technology* 48 (5), 67-74.
- Sakadevan K. and Bavor H.J., 1998. Phosphate adsorption characteristics of soils, slags and zeolite to be used as substrates in constructed wetland systems. *Water Research* 32, 393-399.
- Shutes R.B.E., 2001. Artificial wetlands and water quality improvement. *Environment International* 26, 441-447.
- Steer D., Fraser L., Boddy J. and Seibert B., 2002. Efficiency of small constructed wetlands for subsurface treatment of single-family domestic effluent. *Ecological Engineering* 18, 429-440.
- Stefanakis A.I., Akratos C.S. and Tsihrintzis V.A., 2014. Vertical Flow Constructed Wetlands: Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment, first edition. Elsevier Inc., Netherlands.
- Stefanakis A.I. 2019. The role of constructed wetlands as green infrastructure for sustainable urban water management. *Sustainability* 11 (24), 6981. <https://doi.org/10.3390/su11246981>.
- Stefanakis A.I., Bardiau M., Silva D., Taylor H., 2019. Presence of bacteria and bacteriophages in full-scale trickling filters and an aerated constructed wetland. *Science of the Total Environment* 659, 1135–1145.
- Stefanakis A.I. 2022. Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Hot and Arid Climates. Springer Cham.
- Sun G., Zhao Q.Y., Allen S.J., Coop D., 2006. Generating “Tide” in pilot-scale constructed wetlands to enhance agricultural wastewater treatment. *Engineering in Life Sciences* 6 (6), 560-565.
- Sun G., Zhao Q.Y., Allen S.J., 2007. An alternative arrangement of gravel media in tidal flow reed beds treating pig farm wastewater. *Water, Air, and Soil Pollution* 182, 13-19.
- Sun G. and Austin D., 2007. A mass balance study on nitrification and deammonification in vertical flow constructed wetlands treating landfill leachate. *Water Science and Technology* 56 (3), 117-123.
- Tatoulis T., Akratos C.S., Tekerekopoulou A. G., Vayenas D. V., Stefanakis A. I., 2017. A novel horizontal subsurface flow constructed wetland: Reducing area requirements and clogging risk. *Chemosphere* 186, 257-268.
- Torrens A., Molle P., Boutin C., Salgot M., 2009. Impact of design and operation variables on the performance of vertical-flow constructed wetlands and intermittent sand filters treating pond effluent. *Water Research* 43, 1851-1858.
- Tuszynska A. and Obarska-Pempkowiak H., 2008. Dependence between quality and removal effectiveness of organic matter in hybrid constructed wetlands. *Bioresource Technology* 99 (14), 6010-6016.
- Vymazal J., Brix H., Cooper P.F., Green M.B. and Haberl R., 1998. Constructed Wetlands for wastewater treatment in Europe. Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands.

- Vymazal J., Nitrogen removal in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow – can we determine the key process? In: Vymazal J. (Ed.), *Nutrient Cycling and Retention in Natural and Constructed Wetlands*, Backhuys Publishers, Leiden, 1999, pp. 1-17.
- Vymazal J., 2002. The use of sub-surface constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic: 10 years experience. *Ecological Engineering* 18, 633-646.
- Vymazal J., 2004. Removal of phosphorus in constructed wetlands with horizontal subsurface flow in the Czech Republic, *Water, Air and Soil Pollution: Focus*, 4: 657-670
- Vymazal J., 2005. Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands for wastewater treatment. *Ecological Engineering* 25, 478-490.
- Vymazal J., Greenway M., Tonderski K., Brix H and Mander U., 2006. Constructed wetlands for wastewater treatment, *Wetlands and Natural Resource Management*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Vymazal J., 2007. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of The Total Environment* 380, 48-65.
- Vymazal J., 2011. Constructed Wetlands for wastewater treatment: five decades of experience. *Environmental Science & Technology* 45, 61-69.
- WEF, 2000. Aerobic Fixed-Growth Reactors, A special publication prepared by The Aerobic Fixed-Growth Reactors Task Force, Water Environment Federation, Alexandria, VA.
- Yang L., Chang H.T. and Huang M.N.L., 2001. Nutrient removal in gravel and soil based wetland microcosms with and without vegetation. *Ecological Engineering* 18: 91-105.

7.3 Ιστοσελίδες

Global Wetland Technology. Constructed Wetlands. <https://www.globalwettech.com/about-constructed-wetlands.html>

8. Παραρτήματα

8.1 Αποτελέσματα μετρήσεων εισροών και εκροών

| Ημερομηνία | G | | P | | C | |
|------------|------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|
| | Εισροή [L] | Εκροή [L] | Εισροή [L] | Εκροή [L] | Εισροή [L] | Εκροή [L] |
| 7/1/2023 | 12 | 4,7 | 12 | 19,37 | 12 | 11,5 |
| 9/1/2023 | 12 | 8,25 | 12 | 13 | 12 | 11 |
| 11/1/2023 | 12 | 12,9 | 12 | 11,5 | 12 | 12 |
| 13/1/2023 | 12 | 11,65 | 12 | 10 | 12 | 12 |
| 15/1/2023 | 12 | 10,5 | 12 | 11 | 12 | 12 |
| 17/1/2023 | 12 | 14,5 | 12 | 11,25 | 12 | 15 |
| 19/1/2023 | 12 | 17,35 | 12 | 9,7 | 12 | 12 |
| 21/1/2023 | 12 | 4 | 12 | 18,3 | 12 | 12 |
| 23/1/2023 | 12 | 18 | 12 | 13,75 | 12 | 12 |
| 25/1/2023 | 12 | 8,9 | 12 | 10,1 | 12 | 12 |
| 27/1/2023 | 3 | 0 | 4 | 0 | 8 | 8 |
| 2/2/2023 | 12 | 4,4 | 12 | 3,5 | 12 | 12 |
| 4/2/2023 | 12 | 9,6 | 12 | 12,75 | 12 | 12 |
| 6/2/2023 | 12 | 15 | 12 | 7,9 | 12 | 12 |
| 8/2/2023 | 12 | 8,9 | 12 | 0,8 | 12 | 12 |
| 10/2/2023 | 12 | 13 | 12 | 0,25 | 12 | 12 |
| 12/2/2023 | 12 | 12,3 | 12 | 0,4 | 12 | 12 |
| 14/2/2023 | 12 | 12,7 | 12 | 1,85 | 12 | 12 |
| 16/2/2023 | 12 | 8,5 | 12 | 9,1 | 12 | 12 |
| 18/2/2023 | 12 | 12,7 | 12 | 11,6 | 12 | 12 |
| 20/2/2023 | 12 | 8 | 12 | 9,5 | 12 | 12 |
| 22/2/2023 | 12 | 11 | 12 | 7,75 | 12 | 12 |
| 24/2/2023 | 12 | 11 | 12 | 0 | 12 | 12 |
| 26/2/2023 | 12 | 10,25 | 12 | 1 | 12 | 12 |
| 28/2/2023 | 12 | 18,25 | 12 | 10,05 | 12 | 12 |
| 2/3/2023 | 12 | 3,25 | 12 | 2,5 | 12 | 12 |
| 4/3/2023 | 12 | 15,5 | 12 | 9,25 | 12 | 12 |
| 6/3/2023 | 12 | 10 | 12 | 0,15 | 12 | 12 |
| 10/3/2023 | 12 | 4,6 | 12 | 8,55 | 12 | 12 |

| | | | | | | |
|-----------|----|-------|----|------|----|------|
| 12/3/2023 | 12 | 4 | 12 | 0 | 12 | 12 |
| 14/3/2023 | 12 | 10,75 | 12 | 1,45 | 12 | 12 |
| 18/3/2023 | 12 | 14,25 | 12 | 4,7 | 12 | 12 |
| 20/3/2023 | 12 | 10 | 12 | 0,1 | 12 | 12 |
| 22/3/2023 | 12 | 6 | 12 | 8,4 | 12 | 12 |
| 24/3/2023 | 12 | 4,6 | 12 | 8,5 | 12 | 12 |
| 26/3/2023 | 12 | 8 | 12 | 0,01 | 12 | 12 |
| 29/3/2023 | 12 | 11,5 | 12 | 0 | 12 | 12 |
| 31/3/2023 | 12 | 6 | 12 | 0 | 12 | 12 |
| 2/4/2023 | 12 | 6 | 12 | 0 | 12 | 12 |
| 4/4/2023 | 12 | 0,15 | 12 | 0 | 12 | 12 |
| 6/4/2023 | 12 | 6,75 | 12 | 0,2 | 12 | 12 |
| 8/4/2023 | 12 | 15 | 12 | 1,6 | 12 | 12 |
| 10/4/2023 | 12 | 5,25 | 12 | 1,75 | 12 | 12 |
| 12/4/2023 | 12 | 1,3 | 12 | 6,8 | 12 | 12 |
| 14/4/2023 | 12 | 11,8 | 12 | 7,5 | 12 | 12 |
| 17/4/2023 | 12 | 10,5 | 12 | 0 | 12 | 12 |
| 19/4/2023 | 12 | 2,1 | 12 | 0 | 12 | 12 |
| 21/4/2023 | 12 | 6,5 | 12 | 0 | 12 | 12 |
| 23/4/2023 | 12 | 3,21 | 12 | 0 | 12 | 12 |
| 25/4/2023 | 12 | 3,5 | 12 | 1,25 | 12 | 12 |
| 27/4/2023 | 12 | 5,25 | 12 | 2,75 | 12 | 12 |
| 29/4/2023 | 12 | 3 | 12 | 0,75 | 12 | 12 |
| 1/5/2023 | 12 | 0,2 | 12 | 0,1 | 12 | 12 |
| 3/5/2023 | 12 | 10 | 12 | 5 | 12 | 12 |
| 5/5/2023 | 12 | 10,5 | 12 | 7 | 12 | 12 |
| 7/5/2023 | 16 | 5 | 16 | 4,5 | 16 | 15,9 |
| 9/5/2023 | 16 | 10,25 | 16 | 8,5 | 16 | 15,8 |
| 11/5/2023 | 16 | 11 | 16 | 5,5 | 16 | 16 |
| 13/5/2023 | 16 | 4,75 | 16 | 0,75 | 16 | 15,8 |
| 15/5/2023 | 16 | 8 | 16 | 0,75 | 16 | 16 |
| 17/5/2023 | 16 | 8 | 16 | 6 | 16 | 15,5 |
| 19/5/2023 | 16 | 10 | 16 | 4,2 | 16 | 16 |
| 21/5/2023 | 16 | 13,75 | 16 | 5,5 | 16 | 15,8 |

| | | | | | | |
|-----------|----|-------|----|------|----|-------|
| 23/5/2023 | 16 | 6,5 | 16 | 6,25 | 16 | 15,9 |
| 25/5/2023 | 16 | 6 | 16 | 4,75 | 16 | 15,8 |
| 27/5/2023 | 16 | 16,5 | 16 | 5,5 | 16 | 16 |
| 29/5/2023 | 16 | 7,5 | 16 | 1,5 | 16 | 15,75 |
| 31/5/2023 | 16 | 12,75 | 16 | 11 | 16 | 15,8 |
| 2/6/2023 | 16 | 13,4 | 16 | 6 | 16 | 16 |
| 5/6/2023 | 13 | 10 | 13 | 2 | 13 | 12 |
| 7/6/2023 | 18 | 0,65 | 18 | 0 | 18 | 15 |
| 9/6/2023 | 18 | 0,55 | 18 | 0 | 18 | 17 |

8.2 Αποτελέσματα αναλύσεων

| Ημερομηνία | Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο – BOD ₅ | | | | | | | Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο – COD | | | | | | | Ολικός οργανικός άνθρακας – TOC | | | | | | |
|------------|--|-----|----|-----|-------------------------|----|----|----------------------------------|-----|----|-----|-------------------------|----|----|---------------------------------|------|------|-------|-------------------------|----|----|
| | Συγκέντρωση [mg/L] | | | | Εκατοστιαία απομάκρυνση | | | Συγκέντρωση [mg/L] | | | | Εκατοστιαία απομάκρυνση | | | Συγκέντρωση [mg/L] | | | | Εκατοστιαία απομάκρυνση | | |
| | In | G | P | C | G | P | C | In | G | P | C | G | P | C | In | G | P | C | G | P | C |
| 9/1/2023 | 340 | 17 | 5 | 50 | 95 | 99 | 85 | 440 | 38 | 24 | 60 | 91 | 95 | 86 | 44,2 | 7,1 | 8,1 | 10,5 | 84 | 82 | 76 |
| 19/1/2023 | 160 | 26 | 6 | 40 | 84 | 96 | 75 | 222 | 40 | 22 | 46 | 82 | 90 | 79 | 19 | 7,3 | 6,2 | 5,2 | 62 | 67 | 73 |
| 6/2/2023 | 190 | 15 | 6 | 83 | 92 | 97 | 56 | 246 | 18 | 12 | 93 | 93 | 95 | 62 | 31,5 | 7,3 | 6,3 | 22,9 | 77 | 80 | 27 |
| 16/2/2023 | 194 | 22 | 7 | 60 | 89 | 96 | 69 | 390 | 15 | 17 | 74 | 96 | 96 | 81 | 40,9 | 9,3 | 5,4 | 35,5 | 77 | 87 | 13 |
| 24/2/2023 | 254 | 14 | 5 | 74 | 94 | 98 | 71 | 350 | 18 | 16 | 101 | 95 | 95 | 71 | 49,55 | 7,3 | 6,9 | 21,44 | 85 | 86 | 57 |
| 6/3/2023 | 272 | 20 | 5 | 76 | 93 | 98 | 72 | 372 | 26 | 15 | 76 | 93 | 96 | 80 | 38,8 | 8,15 | 6 | 14 | 79 | 85 | 64 |
| 20/3/2023 | 326 | 30 | 15 | 104 | 91 | 95 | 68 | 430 | 46 | 28 | 140 | 89 | 93 | 67 | 37,85 | 17,1 | 12,9 | 35,85 | 55 | 66 | 5 |
| 30/3/2023 | 326 | 42 | 12 | 70 | 87 | 96 | 79 | 430 | 62 | 48 | 146 | 86 | 89 | 66 | 33,85 | 18,8 | 11,7 | 26,4 | 44 | 65 | 22 |
| 10/4/2023 | 230 | 30 | 10 | 30 | 87 | 96 | 87 | 426 | 66 | 25 | 40 | 85 | 94 | 91 | 38,3 | 25,5 | 12,4 | 6,9 | 33 | 68 | 82 |
| 3/5/2023 | 170 | 27 | 8 | 80 | 84 | 95 | 53 | 206 | 42 | 20 | 120 | 80 | 90 | 42 | 50,4 | 19,3 | 16,9 | 12,1 | 62 | 66 | 76 |
| 11/5/2023 | 252 | 70 | 45 | 140 | 72 | 82 | 44 | 380 | 19 | 37 | 56 | 95 | 90 | 85 | 51,9 | 38,6 | 22,8 | 12,7 | 26 | 56 | 76 |
| 25/5/2023 | 220 | 25 | 20 | 125 | 89 | 91 | 43 | 270 | 178 | 66 | 40 | 34 | 76 | 85 | 43,1 | 26,4 | 19,4 | 8,8 | 39 | 55 | 80 |
| 2/6/2023 | 180 | 100 | 25 | 60 | 44 | 86 | 67 | 352 | 64 | 34 | 36 | 82 | 90 | 90 | 47,5 | 33,5 | 24,9 | 16,6 | 29 | 48 | 65 |

Πίνακας 8.1 Αποτελέσματα αναλύσεων βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου, χημικά απαιτούμενου οξυγόνου και ολικού οργανικού άνθρακα.

| Ημερομηνία | Ολικό άζωτο – TN | | | | | | | Αμμωνιακό άζωτο – NH ₄ ⁺ -N | | | | | | | Νιτρικό άζωτο – NO ₃ ⁻ -N | | | | | | |
|------------|--------------------|----|----|----|-------------------------|----|----|---|-------|-------|-------|-------------------------|-----|-----|---|-------|-------|-------|-------------------------|---|---|
| | Συγκέντρωση [mg/L] | | | | Εκατοστιαία απομάκρυνση | | | Συγκέντρωση [mg/L] | | | | Εκατοστιαία απομάκρυνση | | | Συγκέντρωση [mg/L] | | | | Εκατοστιαία απομάκρυνση | | |
| | In | G | P | C | G | P | C | In | G | P | C | G | P | C | In | G | P | C | G | P | C |
| 9/1/2023 | 64 | 16 | 12 | 46 | 75 | 81 | 28 | 53,6 | 2,8 | 1,2 | 7,4 | 95 | 98 | 86 | 0,56 | 0,18 | 12,01 | 15,29 | | | |
| 19/1/2023 | 48 | 20 | 12 | 30 | 58 | 75 | 38 | 31,4 | 7 | 1,4 | 9 | 78 | 96 | 71 | 0,00 | 2,09 | 10,41 | 15,07 | | | |
| 6/2/2023 | 44,8 | 13 | 9 | 40 | 71 | 80 | 11 | 41 | 2,3 | 1 | 14,9 | 94 | 98 | 64 | 0,00 | 0,63 | 4,78 | 3,17 | | | |
| 16/2/2023 | 49 | 15 | 18 | 34 | 69 | 63 | 31 | 13,5 | 0 | 0 | 6,4 | 100 | 100 | 53 | 11,03 | 13,83 | 22,01 | 20,85 | | | |
| 24/2/2023 | 47 | 9 | 6 | 44 | 81 | 87 | 6 | 41,1 | 3,4 | 0 | 12,9 | 92 | 100 | 69 | 0,00 | 0,00 | 15,88 | 11,98 | | | |
| 6/3/2023 | 67 | 18 | 8 | 45 | 73 | 88 | 33 | 28,5 | 0 | 0 | 11,3 | 100 | 100 | 60 | 0,00 | 0,00 | 12,91 | 13,15 | | | |
| 20/3/2023 | 44 | 13 | 4 | 36 | 70 | 91 | 18 | 37,6 | 7,1 | 0,5 | 12,8 | 81 | 99 | 66 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 5,34 | | | |
| 30/3/2023 | 44 | 15 | 1 | 37 | 66 | 98 | 16 | 37,6 | 0,8 | 0 | 15,4 | 98 | 100 | 59 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 7,45 | | | |
| 10/4/2023 | 61 | 18 | 2 | 19 | 70 | 97 | 69 | 10,4 | 7,7 | 0,2 | 5,6 | 26 | 98 | 46 | 0,00 | 0,00 | 0,29 | 11,06 | | | |
| 3/5/2023 | 40 | 6 | 3 | 18 | 85 | 93 | 55 | 34,8 | 0 | 0,5 | 8,3 | 100 | 99 | 76 | 0,11 | 0,00 | 0,29 | 5,72 | | | |
| 11/5/2023 | 48 | 30 | 6 | 18 | 38 | 88 | 63 | 29,02 | 3,19 | 0,85 | 11,78 | 89 | 97 | 59 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 6,22 | | | |
| 25/5/2023 | 70 | 27 | 10 | 32 | 61 | 86 | 54 | 36,4 | 17,76 | 0 | 0 | 51 | 100 | 100 | 0,00 | 0,13 | 0,54 | 17,01 | | | |
| 2/6/2023 | 54 | 35 | 18 | 43 | 35 | 67 | 20 | 56,73 | 39,99 | 18,96 | 44,66 | 30 | 67 | 21 | 0,07 | 1,55 | 0,56 | 13,90 | | | |

Πίνακας 8.2 Αποτελέσματα αναλύσεων ολικού αζώτου, αμμωνιακού αζώτου και νιτρικού αζώτου.

| Ημερομηνία | Ολικός φώσφορος – TP | | | | | | | Φώσφορος ορθοφωσφορικών – $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ | | | | | | | Ολικά αιωρούμενα στερεά – TSS | | | | | | |
|------------|----------------------|------|------|------|-------------------------|------|------|---|-------|-------|-------|-------------------------|----|----|-------------------------------|------|------|------|-------------------------|------|------|
| | Συγκέντρωση [mg/L] | | | | Εκατοστιαία απομάκρυνση | | | Συγκέντρωση [mg/L] | | | | Εκατοστιαία απομάκρυνση | | | Συγκέντρωση [mg/L] | | | | Εκατοστιαία απομάκρυνση | | |
| | In | G | P | C | G | P | C | In | G | P | C | G | P | C | In | G | P | C | G | P | C |
| 9/1/2023 | 6,42 | 2,36 | 2,72 | 3,44 | 63,2 | 57,6 | 46,4 | 4,760 | 2,364 | 2,724 | 3,440 | 50 | 43 | 28 | 100,0 | 9,3 | 56,7 | 33,9 | 90,7 | 43,3 | 66,1 |
| 19/1/2023 | 4,21 | 2,19 | 2,85 | 2,73 | 48,0 | 32,2 | 35,3 | 3,313 | 1,672 | 2,853 | 3,099 | 50 | 14 | 6 | 95,0 | 14,2 | 5,1 | 7,5 | 85,1 | 94,6 | 92,1 |
| 6/2/2023 | 4,15 | 1,54 | 0,80 | 2,08 | 62,8 | 80,6 | 49,8 | 2,916 | 0,879 | 0,885 | 1,811 | 70 | 70 | 38 | 60,0 | 11,9 | 25,5 | 37,1 | 80,2 | 57,5 | 38,1 |
| 16/2/2023 | 3,96 | 1,50 | 0,75 | 1,87 | 62,3 | 81,1 | 52,7 | 2,899 | 1,495 | 1,713 | 2,068 | 48 | 41 | 29 | 53,9 | 3,9 | 10,4 | 22,5 | 92,7 | 80,7 | 58,3 |
| 24/2/2023 | 4,16 | 1,28 | 1,51 | 1,86 | 69,3 | 63,7 | 55,4 | 2,158 | 1,170 | 1,440 | 1,661 | 46 | 33 | 23 | 169,8 | 1,3 | 25,0 | 32,0 | 99,3 | 85,3 | 81,2 |
| 6/3/2023 | 8,31 | 2,43 | 0,44 | 5,61 | 70,7 | 94,7 | 32,5 | 8,066 | 4,691 | 0,818 | 6,189 | 42 | 90 | 23 | 86,2 | 2,0 | 7,3 | 34,6 | 97,7 | 91,5 | 59,8 |
| 20/3/2023 | 4,32 | 0,99 | 0,46 | 0,24 | 77,2 | 89,4 | 94,5 | 4,132 | 2,663 | 2,310 | 3,444 | 36 | 44 | 17 | 102,3 | 18,0 | 10,4 | 40,0 | 82,4 | 89,8 | 60,9 |
| 30/3/2023 | 4,32 | 1,70 | 1,00 | 3,38 | 60,7 | 76,8 | 21,9 | 4,132 | 1,041 | 0,587 | 2,534 | 75 | 86 | 39 | 102,3 | 8,2 | 10,0 | 29,2 | 92,0 | 90,2 | 71,5 |
| 10/4/2023 | 3,45 | 2,15 | 0,68 | 2,77 | 37,8 | 80,5 | 19,8 | 2,843 | 1,347 | 0,675 | 2,771 | 53 | 76 | 3 | 244,3 | 39,0 | 15,1 | 7,2 | 84,0 | 93,8 | 97,1 |
| 3/5/2023 | 5,29 | 2,73 | 1,73 | 4,51 | 48,4 | 67,3 | 14,8 | 3,328 | 1,842 | 1,069 | 3,080 | 45 | 68 | 7 | 162,5 | 2,4 | 1,6 | 83,0 | 98,5 | 99,0 | 48,9 |
| 11/5/2023 | 5,18 | 2,30 | 0,27 | 3,08 | 55,5 | 94,8 | 40,6 | 3,253 | 2,425 | 0,349 | 3,063 | 25 | 89 | 6 | 75,2 | 15,8 | 11,4 | 38,8 | 78,9 | 84,9 | 48,5 |
| 25/5/2023 | 4,15 | 3,10 | 0,72 | 2,81 | 25,1 | 82,7 | 32,3 | 3,218 | 0,987 | 0,153 | 0,885 | 69 | 95 | 72 | 100,0 | 41,2 | 5,4 | 64,8 | 58,8 | 94,6 | 35,2 |
| 2/6/2023 | 4,64 | 2,54 | 2,66 | 2,62 | 45,2 | 42,8 | 43,7 | 3,754 | 2,921 | 2,249 | 2,371 | 22 | 40 | 37 | 128,3 | 29,6 | 27,0 | 40,0 | 76,9 | 78,9 | 68,8 |

Πίνακας 8.3 Αποτελέσματα αναλύσεων ολικού φωσφόρου, φωσφόρου ορθοφωσφορικών και ολικών αιωρούμενων στερεών.

| Ημερομηνία | pH | | | | EC [$\mu\text{S/cm}$] | | | |
|------------|------|------|------|------|-------------------------|------|------|------|
| | In | G | P | C | In | G | P | C |
| 9/1/2023 | 7,39 | 7,54 | 7,46 | 7,47 | 832 | 790 | 833 | 718 |
| 19/1/2023 | 7,12 | 7,51 | 7,66 | 7,23 | 790 | 759 | 716 | 642 |
| 6/2/2023 | 7,5 | 7,74 | 7,42 | 7,71 | 973 | 934 | 866 | 1032 |
| 16/2/2023 | 7,36 | 7,09 | 7,52 | 7,31 | 840 | 739 | 723 | 764 |
| 24/2/2023 | 7,19 | 7,13 | 7,61 | 7,67 | 807 | 720 | 703 | 792 |
| 6/3/2023 | 7,13 | 7,01 | 7,51 | 7,39 | 874 | 742 | 780 | 786 |
| 20/3/2023 | 7,12 | 7,18 | 7,63 | 7,33 | 824 | 739 | 730 | 742 |
| 30/3/2023 | 7,12 | 7,72 | 8,02 | 7,4 | 824 | 758 | 841 | 669 |
| 10/4/2023 | 6,85 | 7,41 | 8,1 | 7,75 | 828 | 826 | 1158 | 636 |
| 3/5/2023 | 7,65 | 7,11 | 7,85 | 7,61 | 1116 | 1304 | 1769 | 784 |
| 11/5/2023 | 7,22 | 7,64 | 7,66 | 7,52 | 1164 | 1654 | 1678 | 781 |
| 25/5/2023 | 7,32 | 7,31 | 7,58 | 7,52 | 1234 | 1784 | 2200 | 957 |
| 2/6/2023 | 7,24 | 6,92 | 7,74 | 7,38 | 1140 | 1418 | 1990 | 907 |

Πίνακας 8.4 Αποτελέσματα αναλύσεων συγκέντρωσης ιόντων υδρογόνου και ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

| Δείγμα | Συγκέντρωση [mg/g] |
|-----------|--------------------|
| Ρίζες, G | 2.312 |
| Ρίζες, G | 2.338 |
| Κορμοί, G | 1.181 |
| Κορμοί, G | 2.022 |
| Φύλλα, G | 4.963 |
| Φύλλα, G | 2.925 |
| Ρίζες, P | 5.637 |
| Ρίζες, P | 4.841 |
| Κορμοί, P | 0.297 |
| Κορμοί, P | 0.298 |
| Φύλλα, P | 1.538 |
| Φύλλα, P | 1.523 |

Πίνακας 8.5 Αποτελέσματα αναλύσεων ολικού αζώτου φυτικής βιομάζας.

| Δείγμα | Συγκέντρωση [mg/g] |
|-----------|--------------------|
| Ρίζες, G | 0.195 |
| Ρίζες, G | 0.196 |
| Κορμοί, G | 0.258 |
| Κορμοί, G | 0.276 |
| Φύλλα, G | 0.227 |
| Φύλλα, G | 0.232 |
| Ρίζες, P | 0.145 |
| Ρίζες, P | 0.159 |
| Κορμοί, P | 0.240 |
| Κορμοί, P | 0.233 |
| Φύλλα, P | 0.210 |
| Φύλλα, P | 0.211 |

Πίνακας 8.6 Αποτελέσματα αναλύσεων ολικού φωσφόρου φυτικής βιομάζας.

| Όνομα στοιχείου | Μονάδα συγκέντρωσης | Κορμοί, G | | Φύλλα, G | | Φύλλα, P | | Κορμοί, P | | Ρίζες, P | | Ρίζες, P | |
|-----------------|---------------------|------------------|-------------------------|------------------|-------------------------|------------------|-------------------------|------------------|-------------------------|------------------|-------------------------|------------------|-------------------------|
| | | Μέση συγκέντρωση | Σχετική τυπική απόκλιση | Μέση συγκέντρωση | Σχετική τυπική απόκλιση | Μέση συγκέντρωση | Σχετική τυπική απόκλιση | Μέση συγκέντρωση | Σχετική τυπική απόκλιση | Μέση συγκέντρωση | Σχετική τυπική απόκλιση | Μέση συγκέντρωση | Σχετική τυπική απόκλιση |
| B | ppb(μg/L) | 5.54 | 2.98 | 14.35 | 2.27 | 14.49 | 2.53 | 4.25 | 2.13 | 35.47 | 1.30 | 27.37 | 1.13 |
| Na | ppm(mg/L) | 1.86 | 1.70 | 1.49 | 2.23 | 1.11 | 2.07 | 2.28 | 1.74 | 21.71 | 1.01 | 20.47 | 1.24 |
| Mg | ppm(mg/L) | 3.77 | 2.01 | 12.98 | 2.00 | 25.23 | 2.17 | 4.26 | 1.89 | 8.62 | 1.29 | 7.03 | 0.73 |
| Al | ppm(mg/L) | 0.13 | 4.69 | <DL | | <DL | | <DL | | 0.81 | 1.50 | 0.51 | 1.48 |
| K | ppm(mg/L) | 7.67 | 1.72 | 41.18 | 1.98 | 20.52 | 1.72 | 22.59 | 1.59 | 7.55 | 1.37 | 7.11 | 1.16 |
| Cr | ppb(μg/L) | 10.10 | 1.88 | 10.63 | 1.50 | 3.85 | 1.51 | 6.91 | 1.88 | 44.29 | 1.08 | 32.62 | 0.96 |
| Mn | ppb(μg/L) | 31.97 | 2.12 | 110.94 | 1.02 | 65.57 | 1.73 | 15.32 | 1.64 | 185.30 | 1.38 | 143.35 | 0.73 |
| Fe | ppb(μg/L) | 894.40 | 4.08 | 870.29 | 3.30 | 638.05 | 2.36 | 505.71 | 3.62 | 16514.13 | 1.51 | 13039.34 | 1.39 |
| Ni | ppb(μg/L) | 1.95 | 3.50 | 5.96 | 2.64 | 0.58 | 10.54 | 0.97 | 4.11 | 46.64 | 1.00 | 35.99 | 0.74 |
| Cu | ppb(μg/L) | 198.64 | 1.79 | 78.55 | 1.51 | 40.34 | 1.92 | 100.15 | 1.36 | 371.92 | 1.24 | 317.20 | 1.25 |
| Zn | ppb(μg/L) | 242.64 | 0.79 | 172.44 | 1.96 | 154.99 | 1.90 | 133.27 | 1.51 | 935.87 | 0.87 | 771.86 | 0.99 |
| Mo | ppb(μg/L) | 17.58 | 0.96 | 18.97 | 1.36 | 15.57 | 2.43 | 17.71 | 0.98 | 20.05 | 0.60 | 17.70 | 0.24 |
| Cd | ppb(μg/L) | <DL | | <DL | | <DL | | <DL | | <DL | | <DL | |
| Pb | ppb(μg/L) | 32.64 | 1.37 | 57.09 | 0.86 | 27.60 | 2.31 | 63.98 | 1.95 | 159.12 | 2.11 | 133.04 | 0.67 |

Πίνακας 8.7 Αποτελέσματα αναλύσεων μετάλλων.

| Όνομα στοιχείου | Μονάδα συγκέντρωσης | Κορμοί, P | | Ρίζες, G | | Ρίζες, G | | Φύλλα, G | | Κορμοί, G | | Φύλλα, P | |
|-----------------|---------------------|------------------|-------------------------|------------------|-------------------------|------------------|-------------------------|------------------|-------------------------|------------------|-------------------------|------------------|-------------------------|
| | | Μέση συγκέντρωση | Σχετική τυπική απόκλιση | Μέση συγκέντρωση | Σχετική τυπική απόκλιση | Μέση συγκέντρωση | Σχετική τυπική απόκλιση | Μέση συγκέντρωση | Σχετική τυπική απόκλιση | Μέση συγκέντρωση | Σχετική τυπική απόκλιση | Μέση συγκέντρωση | Σχετική τυπική απόκλιση |
| B | ppb(μg/L) | 3.35 | 4.39 | 22.33 | 1.24 | 20.89 | 1.67 | 10.53 | 2.38 | 2.49 | 3.86 | 10.39 | 1.51 |
| Na | ppm(mg/L) | 3.18 | 1.57 | 17.53 | 0.44 | 15.57 | 1.81 | 42.69 | 1.65 | 0.94 | 0.90 | 2.62 | 1.74 |
| Mg | ppm(mg/L) | 2.83 | 2.52 | 12.53 | 1.10 | 11.41 | 1.88 | 8.93 | 1.98 | 3.54 | 1.89 | 20.41 | 2.02 |
| Al | ppm(mg/L) | <DL | | 0.29 | 1.57 | 0.27 | 3.10 | <DL | | <DL | | <DL | |
| K | ppm(mg/L) | 14.21 | 2.18 | 10.16 | 1.23 | 9.07 | 1.42 | 28.57 | 1.96 | 6.64 | 1.54 | 17.16 | 2.03 |
| Cr | ppb(μg/L) | 4.23 | 2.87 | 23.09 | 0.36 | 22.88 | 0.99 | 8.02 | 1.46 | 3.67 | 2.54 | 4.23 | 1.76 |
| Mn | ppb(μg/L) | 17.21 | 2.19 | 99.26 | 0.71 | 96.49 | 1.55 | 146.18 | 1.37 | 24.56 | 1.93 | 60.50 | 1.97 |
| Fe | ppb(μg/L) | 521.22 | 1.04 | 4857.62 | 0.59 | 4996.79 | 1.66 | 866.48 | 1.07 | 292.70 | 0.67 | 481.60 | 1.30 |
| Ni | ppb(μg/L) | 0.37 | 12.66 | 25.81 | 0.94 | 27.31 | 1.47 | 1.22 | 2.99 | -0.87 | 2.47 | -0.14 | 38.78 |
| Cu | ppb(μg/L) | 6058.80 | 2.09 | 300.45 | 0.93 | 222.91 | 1.85 | 58.73 | 1.34 | 33.99 | 1.42 | 731.72 | 1.83 |
| Zn | ppb(μg/L) | 94.96 | 1.60 | 483.00 | 0.77 | 559.06 | 1.00 | 205.85 | 0.89 | 117.31 | 1.50 | 136.24 | 1.68 |
| Mo | ppb(μg/L) | 11.63 | 2.18 | 20.06 | 0.85 | 21.72 | 0.78 | 14.01 | 1.25 | 13.56 | 1.22 | 15.54 | 0.82 |
| Cd | ppb(μg/L) | <DL | | <DL | | <DL | | <DL | | <DL | | <DL | |
| Pb | ppb(μg/L) | 121.82 | 0.80 | 118.65 | 0.38 | 112.09 | 0.92 | 45.73 | 1.42 | 28.53 | 0.87 | 46.29 | 0.39 |

Πίνακας 8.8 Αποτελέσματα αναλύσεων μετάλλων.