



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος

Κατεύθυνση: Μηχανικών Περιβάλλοντος

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΜΕΛΕΤΗ ΠΛΟΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΤΕΧΝΗΤΩΝ
ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΩΝ ΜΕ ΒΙΟΞΑΝΘΟΡΑΚΩΜΑ ΩΣ ΠΛΗΡΩΤΙΚΟ
ΥΛΙΚΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ**

ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ ΤΣΕΛΕΝΤΗΣ

(ΑΜ: 2018050087)

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Επικ. Καθ. Αλέξανδρος Στεφανάκης (Επιβλέπων)

Καθ. Δανάη Βενιέρη

Αναπ. Καθ. Απόστολος Γιαννής

ΧΑΝΙΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2025

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	7
Abstract.....	7
1. Εισαγωγή.....	8
1.1 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας.....	9
1.2 Σημασία της διαχείρισης αστικών λυμάτων.....	10
1.3 Εφαρμογή τεχνητών υδροβιοτόπων.....	11
1.4 Αστικά λύματα: Σύνθεση και διαχείριση.....	12
1.4.1 Επιπτώσεις από την ακατάλληλη διαχείριση.....	13
1.5 Στάδια επεξεργασίας υγρών αποβλήτων.....	14
1.6 Τεχνητοί υδροβιότοποι.....	14
1.6.1 Τύποι Τεχνητών υδροβιοτόπων.....	15
1.6.2 Μηχανισμοί επεξεργασίας στους τεχνητούς υδροβιότοπους.....	15
1.6.3 Ρόλος των φυτών στους υδροβιότοπους.....	16
1.6.4 Εφαρμογές των τεχνητών υδροβιοτόπων.....	16
1.7. Κυκλική οικονομία και η εφαρμογή της στους τεχνητούς υδροβιοτόπους.....	17
1.7.1 Τεχνητοί υδροβιότοποι και η ενσωμάτωση της κυκλικής οικονομίας.....	17
1.7.2 Ο ρόλος του ανακυκλωμένου HDPE στην κυκλική οικονομία.....	17
1.7.3 Ο ρόλος του βιοεξανθρακώματος στην κυκλική οικονομία.....	18
1.7.4 Ο ρόλος του χαλικιού στην κυκλική οικονομία.....	18
1.7.5 Η ενσωμάτωση της κυκλικής οικονομίας μέσω των τεχνητών υδροβιοτόπων.....	19
2. Πειραματική διάταξη και μέθοδοι.....	19
2.1 Κατασκευή και Τεχνικά Χαρακτηριστικά Πειράματος.....	19
2.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά Υλικών.....	20
2.3 Χαρακτηριστικά πιλοτικών μονάδων.....	21
2.4 Κλιματικές συνθήκες περιοχής μελέτης.....	24
2.5. Λειτουργία.....	26
2.5.1 Συλλογή και ανάλυση δειγμάτων.....	27
2.5.2 Μέθοδοι Μετρήσεων.....	28
3. Ανάλυση και Αποτελέσματα.....	33
3.1. Χαρακτηρισμός Εισροής.....	33
3.2 Ισοζύγιο Νερού.....	34
3.3 pH.....	36
3.4 Ηλεκτρική Αγωγιμότητα (EC).....	38
3.5 TSS (Ολικά Αιωρούμενα Στερεά).....	39

3.6 COD (Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο).....	42
3.7 BOD5 (Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο Πέντε Ημερών).....	45
3.8 DOC (Διαλυμένος Οργανικός Άνθρακας).....	48
3.9 TN (Ολικό Άζωτο).....	51
3.10 NH ₄ ⁺ -N (Αμμωνιακό Άζωτο).....	54
3.11 NO ₃ ⁻ -N (Νιτρικό Άζωτο).....	57
3.12 TP (Ολικός Φώσφορος).....	58
3.13 PO ₄ -P (Ορθοφωσφορικά).....	61
4. Συμπεράσματα και Προτάσεις.....	62
4.1 Συμπεράσματα.....	62
4.2 Προτάσεις για μελλοντική Έρευνα.....	63
5. Βιβλιογραφία.....	64

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1: Δεξαμενή PG – τοποθέτηση χαλικιών (Αύγουστος 2023).....	20
Εικόνα 2: Δεξαμενή PGB – τοποθέτηση βιοεξανθρακώματος (Αύγουστος 2023).....	21
Εικόνα 3: Δεξαμενή PP – τοποθέτηση ανακυκλωμένου HDPE (Αύγουστος 2023).....	21
Εικόνα 4: Συστήματα σε πλήρη λειτουργία (Μάρτιος 2024).....	22
Εικόνα 5: Συστήματα σε πλήρη λειτουργία με αναβαθμισμένο, αυτόματο σύστημα υπολογισμού εκροών (Απρίλιος 2024).....	24
Εικόνα 6: Αντιδραστήρια για υπολογισμό Ολικού Αζώτου.....	26
Εικόνα 7: Συσκευή για υπολογισμό Ολικού Αζώτου.....	26
Εικόνα 8: Αντιδραστήρια για υπολογισμό Νιτρικού Αζώτου.....	26
Εικόνα 9: Μηχάνημα υπολογισμού Διαλυμένου Οργανικού Άνθρακα (DOC).....	27
Εικόνα 10: Μηχάνημα υπολογισμού pH.....	28
Εικόνα 11: Μηχάνημα υπολογισμού ηλεκτρικής αγωγιμότητας.....	28
Εικόνα 12: Αντλία κενού για υπολογισμό TSS.....	29
Εικόνα 13: Ζυγός ακριβείας.....	29
Εικόνα 14: Κεφαλές και φιάλη για υπολογισμό BOD.....	30
Εικόνα 15: Φασματοφωτόμετρο μονής δέσμης.....	30
Εικόνα 16: Φασματοφωτόμετρο διπλής δέσμης.....	30
Εικόνα 17: Διάγραμμα ροής Ε.Ε.Λ. – γραμμή επεξεργασίας λυμάτων με τη μέθοδο της ενεργού ιλύος (Προσαρμογή από: Νταρακάς, 2010).....	31

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1: Μέσες τιμές εισροής.....	19
Πίνακας 2: Κλιματολογικά χαρακτηριστικά περιοχής.....	32
Πίνακας 3: Μέσες τιμές pH και τυπικές αποκλίσεις.....	35
Πίνακας 4: Μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC).....	37
Πίνακας 5: Μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις ολικών αιωρούμενων στερεών (TSS)...	39
Πίνακας 6: Μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (COD)...	42
Πίνακας 7: Μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου (BOD).....	45
Πίνακας 8: Μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις διαλυμένου οργανικού άνθρακα (DOC)...	48
Πίνακας 9: Μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις ολικού αζώτου (TN).....	51
Πίνακας 10: Μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις αμμωνιακού αζώτου (NH ₄ ⁺ -N).....	54
Πίνακας 11: Μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις ολικού φωσφόρου (TP).....	58
Πίνακας 12: Μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις ορθοφωσφορικών (PO ₄ ³⁻ -P).....	60

Ευρετήριο Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Ραβδόγραμμα εξατμισοδιαπνοής για τα συστήματα PG & PGB.....	33
Διάγραμμα 2: Ραβδόγραμμα εξατμισοδιαπνοής για τα συστήματα PP & PPB.....	33
Διάγραμμα 3: Συγκεντρώσεις TSS στα συστήματα PG & PGB σε σχέση με την εισροή...	38
Διάγραμμα 4: Συγκεντρώσεις TSS στα συστήματα PP & PPB σε σχέση με την εισροή.....	39
Διάγραμμα 5: Συγκεντρώσεις COD στα συστήματα PG & PGB σε σχέση με την εισροή.....	41
Διάγραμμα 6: Συγκεντρώσεις COD στα συστήματα PP & PPB σε σχέση με την εισροή.....	42
Διάγραμμα 7: Συγκεντρώσεις BOD ₅ στα συστήματα PG & PGB σε σχέση με την εισροή.....	43
Διάγραμμα 8: Συγκεντρώσεις BOD ₅ στα συστήματα PP & PPB σε σχέση με την εισροή.....	44
Διάγραμμα 9: Συγκεντρώσεις DOC στα συστήματα PG & PGB σε σχέση με την εισροή.....	46
Διάγραμμα 10: Συγκεντρώσεις DOC στα συστήματα PP & PPB σε σχέση με την εισροή.....	47
Διάγραμμα 11: Συγκεντρώσεις TN στα συστήματα PG & PGB σε σχέση με την εισροή.....	50
Διάγραμμα 12: Συγκεντρώσεις TN στα συστήματα PP & PPB σε σχέση με την εισροή.....	50
Διάγραμμα 13: Συγκεντρώσεις NH ₄ ⁺ -N στα συστήματα PG & PGB σε σχέση με την εισροή.....	52
Διάγραμμα 14: Συγκεντρώσεις NH ₄ ⁺ -N στα συστήματα PP & PPB σε σχέση με την εισροή.....	53
Διάγραμμα 15: Συγκεντρώσεις TP στα συστήματα PG & PGB σε σχέση με την εισροή.....	56
Διάγραμμα 16: Συγκεντρώσεις TP στα συστήματα PP & PPB σε σχέση με την εισροή.....	57

Διάγραμμα 17: Συγκεντρώσεις $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ στα συστήματα PG & PGB σε σχέση με την εισροή.....59

Διάγραμμα 18: Συγκεντρώσεις $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ στα συστήματα PP & PPB σε σχέση με την εισροή.....59

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει την αποδοτικότητα πιλοτικών συστημάτων τεχνητών υγροβιοτόπων κατακόρυφης ροής για την επεξεργασία πρωτοβάθμια επεξεργασμένων αστικών λυμάτων, με έμφαση στον ρόλο του βιοεξανθράκωματος ως καινοτόμου πληρωτικού υλικού. Συγκρίθηκαν τέσσερις διαφορετικές διαμορφώσεις υποστρωμάτων: (i) χαλίκι (PG), (ii) χαλίκι με βιοεξανθράκωμα (PGB), (iii) ανακυκλωμένο πλαστικό HDPE (PP) και (iv) ανακυκλωμένο πλαστικό με βιοεξανθράκωμα (PPB). Η αποδοτικότητα των συστημάτων αξιολογήθηκε βάσει κρίσιμων παραμέτρων, όπως BOD, COD, DOC, TSS, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, TP και $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η προσθήκη βιοεξανθράκωματος ενίσχυσε την απομάκρυνση οργανικών και ανόργανων ρύπων, βελτιώνοντας την ποιότητα της εκροής. Παράλληλα, η χρήση ανακυκλωμένων υλικών, όπως το HDPE, ενσωματώνει τις αρχές της κυκλικής οικονομίας, μειώνοντας την κατανάλωση παρθένων πόρων. Η εργασία καταδεικνύει ότι οι τεχνητοί υγροβιότοποι με βιοεξανθράκωμα μπορούν να αποτελέσουν αποδοτική, χαμηλού κόστους και περιβαλλοντικά φιλική λύση για τη διαχείριση αστικών λυμάτων, ιδιαίτερα σε αγροτικές και ημιαστικές περιοχές.

Abstract:

This thesis investigates the performance of pilot-scale vertical flow constructed wetlands for the treatment of primary-treated municipal wastewater, with a particular focus on the role of biochar as an innovative filling material. Four substrate configurations were compared: (i) gravel (PG), (ii) gravel with biochar (PGB), (iii) recycled HDPE plastic (PP), and (iv) recycled plastic with biochar (PPB). System performance was evaluated based on key parameters, including BOD, COD, DOC, TSS, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, TP, and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$. The results demonstrated that the addition of biochar enhanced the removal of both organic and inorganic pollutants, improving effluent quality. Moreover, the use of recycled materials such as HDPE incorporates the principles of circular economy by reducing the need for virgin resources. Overall, the findings highlight that biochar-enhanced constructed wetlands can serve as an efficient, low-cost, and environmentally friendly solution for municipal wastewater management, particularly in rural and semi-urban areas.

1. Εισαγωγή

Η διαχείριση των αστικών λυμάτων αποτελεί κρίσιμη πρόκληση για τις σύγχρονες κοινωνίες, καθώς η ακατάλληλη διαχείρισή τους μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως η ρύπανση των υδάτινων πόρων και η υποβάθμιση των οικοσυστημάτων. Στο πλαίσιο αυτό, οι Τεχνητοί Υδροβιότοποι (ΤΥ) έχουν αναδειχθεί ως μια βιώσιμη και αποτελεσματική τεχνολογία για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων. Αποτελούν μία "πράσινη" τεχνολογία που βασίζεται στη μίμηση των φυσικών διεργασιών των φυσικών υδροβιοτόπων και αξιοποιεί φυσικοχημικές και βιολογικές διεργασίες, όπως η καθίζηση, η διήθηση, η προσρόφηση και η μικροβιακή αποδόμηση ρύπων, για την απομάκρυνση τόσο οργανικών όσο και ανόργανων συστατικών από τα λύματα (Kadlec & Wallace, 2009; Vymazal, 2011). Οι ΤΥ συνδυάζουν απλότητα σχεδιασμού με χαμηλό ενεργειακό κόστος και περιβαλλοντικό αποτύπωμα, αποτελώντας ιδανική λύση για αγροτικές ή ημιαστικές περιοχές, όπου οι υποδομές επεξεργασίας είναι περιορισμένες.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετώνται τέσσερις πιλοτικές μονάδες ΤΥ κατακόρυφης ροής, που είναι εγκατεστημένες στον χώρο της ΔΕΥΑΧ και προορίζονται για την επεξεργασία πρωτοβάθμια επεξεργασμένου αστικού λύματος. Ο κεντρικός στόχος της εργασίας είναι η αποτίμηση της συμβολής του **βιοεξανθρακώματος (biochar)** ως καινοτόμου πληρωτικού υλικού στη συνολική αποδοτικότητα των υδροβιοτόπων. Η προσέγγιση βασίζεται σε σύγκριση τεσσάρων διαφορετικών διαμορφώσεων υλικών πλήρωσης: (i) χαλίκι (PG), (ii) χαλίκι με βιοεξανθράκωμα (PGB), (iii) ανακυκλωμένο πλαστικό HDPE (PP), και (iv) ανακυκλωμένο πλαστικό με βιοεξανθράκωμα (PPB). Η κάθε μονάδα έχει όγκο ενός κυβικού μέτρου και λειτουργεί με παθητικό αερισμό, μέσω κατακόρυφων διατρημένων σωλήνων, για την ενίσχυση των αερόβιων διεργασιών εντός του υποστρώματος.

Η αποδοτικότητα των συστημάτων αξιολογείται μέσω της ποσοτικής παρακολούθησης βασικών παραμέτρων ποιότητας εκροής, όπως το βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο

(BOD), το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD), ο διαλυμένος οργανικός άνθρακας (DOC), τα αιωρούμενα στερεά (TSS), το αμμωνιακό άζωτο ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), τα νιτρικά ($\text{NO}_3^-\text{-N}$), ο ολικός φώσφορος (TP) και τα φωσφορικά ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$). Οι μικροοργανισμοί που αναπτύσσονται στις επιφάνειες των πληρωτικών υλικών διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην αποδόμηση της οργανικής ύλης και στη μετατροπή των ανόργανων ενώσεων, ενώ το βιοεξανθράκωμα, λόγω της υψηλής πορώδους δομής και προσροφητικής του ικανότητας, ενισχύει τη συγκράτηση θρεπτικών στοιχείων και τη μικροβιακή ανάπτυξη (Mohan et al., 2014; Wu et al., 2014).

Μέσα από αυτή τη συγκριτική πειραματική μελέτη, διερευνώνται οι δυνατότητες βελτιστοποίησης της τεχνολογίας των ΤΥ, εστιάζοντας στον ρόλο του βιοεξανθρακώματος, τόσο από περιβαλλοντική όσο και από λειτουργική σκοπιά. Τα αποτελέσματα της έρευνας επιδιώκουν να συμβάλουν στην ενίσχυση της αποτελεσματικότητας των φυσικών συστημάτων επεξεργασίας, στη μείωση των αναγκών σε ενέργεια και εξοπλισμό, και στην ενσωμάτωση της κυκλικής οικονομίας στη διαχείριση αστικών λυμάτων, μέσω της αξιοποίησης βιώσιμων και ανακυκλωμένων υλικών.

1.1 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της αποδοτικότητας τεσσάρων διαφορετικών συστημάτων Τεχνητών Υδροβιοτόπων (ΤΥ) κατακόρυφης ροής, τα οποία επεξεργάζονται πρωτοβάθμια επεξεργασμένο αστικό λύμα, με έμφαση στον ρόλο του βιοεξανθρακώματος (biochar) ως υλικού πλήρωσης. Τα εξεταζόμενα συστήματα διαφέρουν ως προς τη σύνθεση των υποστρωμάτων τους και περιλαμβάνουν τις εξής διαμορφώσεις: (i) χαλίκι με κοκκομετρία 8–20 mm (PG), (ii) συνδυασμό χαλικιού και βιοεξανθράκωμα (PGB), (iii) ανακυκλωμένο πλαστικό (HDPE) διαμέτρου 25–38 mm (PP), και (iv) ανακυκλωμένο πλαστικό σε συνδυασμό με βιοεξανθράκωμα (PPB). Η χρήση χαλικιού διαφορετικής κοκκομετρίας εξυπηρετεί την αύξηση της επιφάνειας επαφής και την αποτελεσματικότερη ροή του λύματος, ενώ το βιοεξανθράκωμα προσδίδει αυξημένη πορώδη επιφάνεια και προσροφητική ικανότητα (Mohan et al., 2014).

Η πειραματική διάταξη αποσκοπεί στην αποτίμηση του κατά πόσο η προσθήκη βιοεξανθρακώματος μπορεί να βελτιώσει την αποδοτικότητα των ΤΥ, συγκριτικά με

συστήματα χωρίς τη χρήση του, τόσο όταν αυτό συνδυάζεται με αδρανή υλικά (όπως το χαλίκι) όσο και με πολυμερή ανακυκλωμένα υλικά. Η αποδοτικότητα των συστημάτων αξιολογείται βάσει κρίσιμων παραμέτρων επεξεργασίας, όπως το βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο πέντε ημερών (BOD_5), το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD), ο διαλυμένος οργανικός άνθρακας (DOC), το αμμωνιακό άζωτο (NH_4^+-N), τα νιτρικά ($NO_3^- -N$), τα φωσφορικά ($PO_4^{3-} -P$) και ο ολικός φώσφορος (TP), βάσει των οποίων αναλύεται η απομάκρυνση οργανικών και ανόργανων ρύπων (Wu et al., 2014; Zhang et al., 2020).

Τα αποτελέσματα της έρευνας αναμένεται να προσφέρουν χρήσιμα δεδομένα για τη βελτίωση του σχεδιασμού και της λειτουργίας ΤΥ μικρής κλίμακας, με σκοπό τη μείωση της απαιτούμενης επιφάνειας εγκατάστασης και του συνολικού κόστους επεξεργασίας. Παράλληλα, διερευνάται ο ρόλος του ανακυκλωμένου πλαστικού ως οικονομικά βιώσιμου πληρωτικού υλικού, στο πλαίσιο της αρχής της κυκλικής οικονομίας. Ωστόσο, ο βασικός ερευνητικός άξονας παραμένει η αποτίμηση της προστιθέμενης αξίας που προσφέρει το βιοεξανθράκωμα στην επεξεργαστική ικανότητα των ΤΥ, μέσω της ενίσχυσης φυσικοχημικών και μικροβιακών διεργασιών, στοιχείο που ενισχύεται και από πρόσφατες μελέτες (Liu et al., 2019). Μέσω της ενσωμάτωσης βιώσιμων υλικών, η εργασία επιδιώκει να συμβάλει στην ανάπτυξη περιβαλλοντικά φιλικών τεχνολογιών για τη διαχείριση των αστικών λυμάτων, προωθώντας ταυτόχρονα τη μετάβαση προς ένα κυκλικό και βιώσιμο μοντέλο διαχείρισης.

1.2 Σημασία της διαχείρισης αστικών λυμάτων

Η διαχείριση των αστικών λυμάτων αποτελεί έναν από τους πιο κρίσιμους τομείς για τη δημόσια υγεία και την προστασία του περιβάλλοντος. Τα αστικά λύματα περιέχουν ένα ευρύ φάσμα ρύπων, όπως οργανικές ουσίες, θρεπτικά συστατικά (άζωτο και φώσφορο), παθογόνους μικροοργανισμούς, καθώς και χημικά που μπορεί να προέρχονται από οικιακές και βιομηχανικές δραστηριότητες (Metcalf & Eddy, 2003; Tchobanoglous & Burton, 1991). Η ακατάλληλη διαχείριση αυτών των ρύπων μπορεί να προκαλέσει σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως η ρύπανση των υδάτινων

πόρων, η καταστροφή των οικοσυστημάτων και η εξάπλωση ασθενειών (Water Environment Federation, 2017).

Η ανάπτυξη και εφαρμογή βιώσιμων μεθόδων επεξεργασίας των αστικών λυμάτων είναι απαραίτητη για την προστασία των υδάτινων πόρων και τη διατήρηση της ποιότητας του νερού, που αποτελεί βασικό συστατικό για τη ζωή και την κοινωνική ευημερία. Η επεξεργασία των λυμάτων συμβάλλει στον περιορισμό της ρύπανσης, την αποτροπή της εξάπλωσης των ασθενειών και τη διασφάλιση της επαναχρησιμοποίησης του νερού για σκοπούς όπως η άρδευση και η βιομηχανική χρήση (Metcalf & Eddy, 2014; Kadlec & Wallace, 2009).

Επιπλέον, η ορθολογική διαχείριση των αστικών λυμάτων συνδέεται άμεσα με τις αρχές της κυκλικής οικονομίας. Η επεξεργασία και επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων μειώνει τη σπατάλη φυσικών πόρων και δημιουργεί δυνατότητες ανάκτησης πολύτιμων συστατικών, όπως τα θρεπτικά συστατικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη γεωργία (UNEP, 2018; Ellen MacArthur Foundation, 2013). Η ενσωμάτωση υλικών, όπως το ανακυκλωμένο πλαστικό και το βιοεξανθράκωμα, στην επεξεργασία λυμάτων προσθέτει έναν ακόμα κρίκο στη βιώσιμη διαχείριση πόρων, υποστηρίζοντας την ανάπτυξη τεχνολογιών που συνδυάζουν την περιβαλλοντική προστασία με την οικονομική αποδοτικότητα (Ghosh & Sharma, 2019; Zhang et al., 2021; Morales-Narváez & Nagles-Martinez, 2020).

Η στροφή προς πιο φυσικές και βιώσιμες λύσεις, όπως οι ΤΥ προσφέρει μια φιλική προς το περιβάλλον προσέγγιση στη διαχείριση των λυμάτων, μειώνοντας την ανάγκη για ενέργεια και χημικά, και δημιουργώντας προοπτικές για την επαναχρησιμοποίηση του νερού και των υλικών (Vymazal, 2011; Kadlec & Wallace, 2009).

1.3 Εφαρμογή τεχνητών υδροβιοτόπων

Οι Τεχνητοί Υδροβιότοποι (ΤΥ) είναι μια βιώσιμη και αποδοτική τεχνολογία για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων, που αναπτύχθηκε με βάση τις φυσικές διεργασίες των φυσικών υδροβιοτόπων (Vymazal, 2011; Kadlec & Wallace, 2009). Αυτά τα συστήματα αξιοποιούν τη συνέργεια φυσικών, χημικών και βιολογικών μηχανισμών

για την απομάκρυνση οργανικών και ανόργανων ρύπων από τα λύματα, προσφέροντας μια περιβαλλοντικά φιλική εναλλακτική λύση σε σύγκριση με τις παραδοσιακές τεχνολογίες επεξεργασίας (Brix, 1997; Wu et al., 2020).

Οι τεχνητοί υγροβιότοποι αποτελούνται από κλίνες που περιέχουν υλικά πλήρωσης, όπως χαλίκι, άμμο, βιοεξανθράκωμα, ή ανακυκλωμένο πλαστικό, και φυτά όπως το *Phragmites australis* (κοινό καλάμι), τα οποία ενισχύουν τη φυτοεξυγίανση (Vymazal, 2011; Ahmad et al., 2014; Ghosh & Sharma, 2019; Morales-Narváez & Nagles-Martinez, 2020). Η κατασκευή και η λειτουργία τους μπορούν να προσαρμοστούν στις συγκεκριμένες ανάγκες της περιοχής και του είδους των λυμάτων που διαχειρίζονται. Οι υγροβιότοποι διακρίνονται σε δύο βασικούς τύπους: επιφανειακής και υπόγειας ροής. Στην κατακόρυφη ροή, τα λύματα διοχετεύονται από την κορυφή προς τα κάτω μέσω της κλίνης, επιτρέποντας την καλύτερη αερόβια επεξεργασία, ενώ στην οριζόντια ροή, τα λύματα ρέουν οριζόντια μέσω του υλικού πλήρωσης, μιμούμενα τη φυσική ροή του νερού στους φυσικούς υγροβιότοπους (Kadlec & Wallace, 2009; Zhang & Huang, 2020).

Ένα βασικό πλεονέκτημα της τεχνολογίας αυτής είναι η χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση και η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης του επεξεργασμένου νερού (Vymazal, 2011; Metcalf & Eddy, 2014). Επιπλέον, οι τεχνητοί υγροβιότοποι μπορούν να προσαρμοστούν για να λειτουργούν σε συνθήκες με χαμηλό κόστος συντήρησης, καθιστώντας τους ιδιαίτερα χρήσιμους σε αγροτικές περιοχές ή σε περιοχές με περιορισμένη πρόσβαση σε κεντρικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων (Wu et al., 2020; Kadlec & Wallace, 2009).

Σε συνδυασμό με υλικά όπως το βιοεξανθράκωμα και το ανακυκλωμένο πλαστικό, οι υγροβιότοποι γίνονται πιο αποδοτικοί και συμβάλλουν στην κυκλική οικονομία, καθώς χρησιμοποιούν ανακυκλωμένα υλικά για τη βελτίωση της λειτουργίας τους (Ahmad et al., 2014; Ghosh & Sharma, 2019; Zhang et al., 2021; Morales-Narváez & Nagles-Martinez, 2020).

Η χρήση τεχνητών υδροβιοτόπων προσφέρει μια οικολογικά και οικονομικά αποδοτική λύση για τη διαχείριση των αστικών λυμάτων, μειώνοντας παράλληλα τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και προωθώντας τη βιωσιμότητα μέσω της επαναχρησιμοποίησης των πόρων (Vymazal, 2011; Kadlec & Wallace, 2009).

1.4 Αστικά λύματα: Σύνθεση και διαχείριση

Τα αστικά λύματα, που προέρχονται από κατοικίες, βιομηχανίες, και δημόσιες εγκαταστάσεις, περιέχουν ένα ευρύ φάσμα ρύπων (Metcalf & Eddy, 2003; Tchobanoglous & Burton, 1991). Η σύνθεση των αστικών λυμάτων ποικίλει ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες και τον βαθμό βιομηχανοποίησης της περιοχής, αλλά συνήθως περιλαμβάνει:

- Οργανικές ουσίες: Υπολείμματα τροφίμων, χαρτί, φυτικά υπολείμματα, καθώς και ανθρώπινα απόβλητα (Metcalf & Eddy, 2003).
- Θρεπτικά συστατικά: Κυρίως άζωτο και φώσφορος, που είναι υπεύθυνα για φαινόμενα όπως ο ευτροφισμός σε υδάτινα σώματα (Water Environment Federation, 2017).
- Παθογόνοι μικροοργανισμοί: Βακτήρια, ιοί και άλλοι μικροοργανισμοί που προέρχονται από τις αποχετεύσεις (Metcalf & Eddy, 2003).
- Χημικές ουσίες: Απορρυπαντικά, φαρμακευτικές ουσίες, βαρέα μέταλλα και άλλοι βιομηχανικοί ρύποι (Mohan et al., 2014; Ghosh & Sharma, 2019).

1.4.1 Επιπτώσεις από την ακατάλληλη διαχείριση

Η ανεπαρκής ή αναποτελεσματική διαχείριση των αστικών λυμάτων μπορεί να έχει σημαντικές περιβαλλοντικές και κοινωνικές επιπτώσεις. Η ρύπανση των υδάτινων πόρων οδηγεί σε υποβάθμιση των οικοσυστημάτων, μείωση της βιοποικιλότητας και επιδείνωση της ποιότητας του νερού (Water Environment Federation, 2017; Metcalf & Eddy, 2003). Επιπλέον, οι παθογόνοι μικροοργανισμοί που περιέχονται στα λύματα μπορούν να προκαλέσουν σοβαρές ασθένειες, ενώ η συσσώρευση θρεπτικών συστατικών σε λίμνες και ποτάμια οδηγεί σε ευτροφισμό, που καταστρέφει τα υδάτινα οικοσυστήματα (Tchobanoglous & Burton, 1991; Metcalf & Eddy, 2003).

Η επεξεργασία των αστικών λυμάτων έχει ως στόχο την απομάκρυνση αυτών των ρύπων, τη βελτίωση της ποιότητας του νερού και την προστασία του περιβάλλοντος και της δημόσιας υγείας (Metcalf & Eddy, 2014; Kadlec & Wallace, 2009). Οι παραδοσιακές μέθοδοι επεξεργασίας περιλαμβάνουν φυσικές, χημικές και βιολογικές

διεργασίες, οι οποίες συνδυάζονται σε διάφορα στάδια για την επίτευξη των επιθυμητών αποτελεσμάτων (Water Environment Federation, 2017).

1.5 Στάδια επεξεργασίας υγρών αποβλήτων

Η επεξεργασία των λυμάτων περιλαμβάνει τρία κύρια στάδια:

Πρωτοβάθμια επεξεργασία: Η φυσική απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών μέσω καθίζησης και διήθησης. Σε αυτό το στάδιο, απομακρύνεται περίπου το 50-70% των αιωρούμενων στερεών και ένα μέρος των οργανικών ρύπων (Metcalf & Eddy, 2003; Water Environment Federation, 2017).

Δευτεροβάθμια επεξεργασία: Περιλαμβάνει βιολογικές διεργασίες για την απομάκρυνση των διαλυμένων οργανικών ουσιών και θρεπτικών συστατικών. Συνηθέστερη μέθοδος είναι η χρήση αερόβιων και αναερόβιων βακτηρίων που διασπούν την οργανική ύλη (Tchobanoglous & Burton, 1991; Metcalf & Eddy, 2014).

Τριτοβάθμια επεξεργασία: Είναι πιο εξειδικευμένη και περιλαμβάνει την απομάκρυνση των υπολειμματικών ρύπων που δεν μπορούν να απομακρυνθούν στα προηγούμενα στάδια. Αυτό το στάδιο μπορεί να περιλαμβάνει τη χημική απομάκρυνση φωσφόρου, την απολύμανση, και τη διήθηση μέσω ενεργού άνθρακα για την απομάκρυνση μικρορύπων (Water Environment Federation, 2017; Mohan et al., 2014).

1.6 Τεχνητοί υδροβιότοποι

Οι τεχνητοί υδροβιότοποι είναι μια φυσική, βιώσιμη λύση για την επεξεργασία αστικών λυμάτων που μιμείται τις φυσικές διεργασίες των υδροβιοτόπων (Vymazal, 2011; Kadlec & Wallace, 2009). Τα συστήματα αυτά λειτουργούν ως βιολογικά φίλτρα που αξιοποιούν τις διεργασίες απορρόφησης και προσρόφησης από τα υλικά πλήρωσης, καθώς και τις μικροβιακές και φυτικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στον υδροβιότοπο (Brix, 1997; Zhang & Huang, 2020; Ahmad et al., 2014).

1.6.1 Τύποι Τεχνητών υδροβιοτόπων

Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι τεχνητών υδροβιοτόπων, οι οποίοι διαφέρουν ως προς τη διαδρομή του νερού μέσα από το σύστημα:

- Υδροβιότοποι κατακόρυφης ροής (VF wetlands): Τα λύματα διοχετεύονται από την κορυφή προς τα κάτω μέσα στην κλίνη, διασφαλίζοντας την καλύτερη αερόβια αποσύνθεση των οργανικών ουσιών λόγω της μεγαλύτερης επαφής με το οξυγόνο. Το νερό διεισδύει μέσα από το υπόστρωμα και φιλτράρεται καθώς κατεβαίνει, ενισχύοντας τη βιολογική επεξεργασία (Kadlec & Wallace, 2009; Vymazal, 2011; Zhang & Huang, 2020).
- Υδροβιότοποι οριζόντιας ροής (HF wetlands): Τα λύματα ρέουν οριζόντια μέσα στην κλίνη του υδροβιοτόπου. Αυτός ο τύπος υδροβιοτόπου μιμείται περισσότερο τη φυσική ροή των υδάτων και ενσωματώνει τόσο αερόβιες όσο και αναερόβιες διεργασίες, εξασφαλίζοντας την απομάκρυνση των ρύπων σε διαφορετικά στάδια (Kadlec & Wallace, 2009; Vymazal, 2010; Wu et al., 2020).

1.6.2 Μηχανισμοί επεξεργασίας στους τεχνητούς υδροβιότοπους

Οι τεχνητοί υδροβιότοποι λειτουργούν με βάση ένα συνδυασμό φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών. Τα λύματα φιλτράρονται μέσα από τα υλικά πλήρωσης, ενώ η παρουσία φυτών και μικροοργανισμών προάγει τη βιοαποδόμηση των ρύπων (Kadlec & Wallace, 2009; Vymazal, 2011; Brix, 1997).

Φυσικές διεργασίες: Οι φυσικές διεργασίες περιλαμβάνουν τη διήθηση, την καθίζηση, και τη διάχυση των ρύπων καθώς τα λύματα διαπερνούν το υπόστρωμα των υδροβιοτόπων (Vymazal, 2011; Kadlec & Wallace, 2009).

Χημικές διεργασίες: Η χημική καθίζηση και η προσρόφηση των θρεπτικών συστατικών και των βαρέων μετάλλων είναι σημαντικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στα υλικά πλήρωσης. Ο φώσφορος, για παράδειγμα, μπορεί να κατακρατηθεί μέσω καθίζησης σε μεταλλικά οξείδια ή να προσροφηθεί στα υλικά πλήρωσης (Ghosh & Sharma, 2019; Ahmad et al., 2014; Mohan et al., 2014).

Βιολογικές διεργασίες: Οι βιολογικές διεργασίες αποτελούν τον πυρήνα της λειτουργίας των υδροβιοτόπων. Οι μικροοργανισμοί που αναπτύσσονται στην επιφάνεια των υλικών πλήρωσης αποδομούν τους οργανικούς ρύπους, μετατρέποντας

τους σε ανόργανα στοιχεία όπως διοξείδιο του άνθρακα και νερό. Επιπλέον, οι φυτικές ρίζες των υδροβίων φυτών απορροφούν θρεπτικά συστατικά και προάγουν τη ροή οξυγόνου μέσα στο σύστημα (Brix, 1997; Vymazal, 2011; Zhang & Huang, 2020).

1.6.3 Ρόλος των φυτών στους υδροβιότοπους

Τα φυτά διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη λειτουργία των τεχνητών υδροβιοτόπων, ενισχύοντας σημαντικά τις βιολογικές διεργασίες. Μέσω του ριζικού τους συστήματος, συμβάλλουν στην προσρόφηση θρεπτικών συστατικών και στη μεταφορά οξυγόνου στο εσωτερικό του συστήματος, δημιουργώντας συνθήκες ευνοϊκές για την ανάπτυξη αερόβιων μικροοργανισμών (Brix, 1997; Vymazal, 2011). Είδη όπως το *Phragmites australis* (κοινό καλάμι) θεωρούνται ιδανικά για χρήση σε τεχνητούς υδροβιότοπους, λόγω της υψηλής προσαρμοστικότητας και της ικανότητάς τους να επιβιώνουν σε συνθήκες έντονου ρυπαντικού φορτίου.

1.6.4 Εφαρμογές των τεχνητών υδροβιοτόπων

Οι τεχνητοί υδροβιότοποι χρησιμοποιούνται ευρέως για την επεξεργασία διαφόρων τύπων υγρών αποβλήτων, όπως:

- Αστικά λύματα
- Βιομηχανικά απόβλητα
- Γεωργικά αποστραγγιστικά νερά
- Υγρά απόβλητα από μονάδες κτηνοτροφίας

Οι τεχνητοί υδροβιότοποι είναι ιδιαίτερα δημοφιλείς σε αγροτικές και απομακρυσμένες περιοχές όπου η πρόσβαση σε κεντρικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων είναι περιορισμένη.

1.7. Κυκλική οικονομία και η εφαρμογή της στους τεχνητούς υδροβιότοπους

Η κυκλική οικονομία αποτελεί μια νέα προσέγγιση στην παραγωγή και κατανάλωση προϊόντων και υπηρεσιών, η οποία στοχεύει στη μείωση των αποβλήτων και στη διατήρηση των πόρων μέσα στο οικονομικό σύστημα όσο το δυνατόν περισσότερο. Αντί για το γραμμικό μοντέλο «παραγωγή-κατανάλωση-απόρριψη», η κυκλική οικονομία βασίζεται στην ανακύκλωση, την επαναχρησιμοποίηση

1.7.1 Τεχνητοί υδροβιότοποι και η ενσωμάτωση της κυκλικής οικονομίας

Οι ΤΥ είναι φυσικά συστήματα επεξεργασίας λυμάτων που αξιοποιούν τις φυσικές διεργασίες απορρόφησης και βιολογικής αποσύνθεσης των ρύπων, μέσω της δράσης των φυτών, των μικροοργανισμών και των υλικών πλήρωσης. Τα υλικά πλήρωσης, όπως το χαλίκι, το βιοεξανθράκωμα και το ανακυκλωμένο HDPE (πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας), παίζουν κεντρικό ρόλο στην αποδοτικότητα των υδροβιότοπων. Αυτά τα υλικά επιλέγονται τόσο για την ικανότητά τους να προάγουν τις βιολογικές και φυσικές διεργασίες, όσο και για την αντοχή τους, ενώ η χρήση ανακυκλωμένων υλικών ενσωματώνει τα στοιχεία της κυκλικής οικονομίας στο σύστημα.

1.7.2 Ο ρόλος του ανακυκλωμένου HDPE στην κυκλική οικονομία

Το ανακυκλωμένο πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE), όπως το HX25KLL BIOCARRIER και το HX38 BIOCARRIER που χρησιμοποιούνται ως υλικό πλήρωσης στους τεχνητούς υδροβιότοπους, αποτελεί βασικό παράγοντα για την ενσωμάτωση της κυκλικής οικονομίας στην επεξεργασία αστικών λυμάτων. Το HDPE είναι ένα πλαστικό ευρέως χρησιμοποιούμενο στη βιομηχανία, αλλά τα απόβλητά του αποτελούν σημαντική πρόκληση για το περιβάλλον λόγω της ανθεκτικότητας και της αδυναμίας βιοδιάσπασής του.

Ωστόσο, η χρήση ανακυκλωμένου HDPE σε τεχνητούς υδροβιότοπους επαναφέρει το πλαστικό αυτό σε έναν παραγωγικό κύκλο, μειώνοντας την ανάγκη για παραγωγή νέων πλαστικών υλικών και ταυτόχρονα προωθώντας τη χρήση των ήδη υπαρχόντων αποβλήτων. Το ανακυκλωμένο πλαστικό προσφέρει επιφάνειες για την δημιουργία βιοφίλμ που είναι υπεύθυνοι για τη διάσπαση των οργανικών ρύπων στα λύματα, ενισχύοντας έτσι τις βιολογικές διεργασίες επεξεργασίας.

Με αυτόν τον τρόπο, το ανακυκλωμένο HDPE συμβάλλει στη μετάβαση από μια γραμμική σε μια κυκλική οικονομία, καθώς τα πλαστικά απόβλητα επαναχρησιμοποιούνται, μειώνοντας το περιβαλλοντικό αποτύπωμα και προσφέροντας οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη.

1.7.3 Ο ρόλος του βιοεξανθράκωματος στην κυκλική οικονομία

Το βιοεξανθράκωμα, το οποίο παράγεται από τη θερμική επεξεργασία οργανικών αποβλήτων όπως τα τροφικά υπολείμματα, αποτελεί επίσης ένα κεντρικό συστατικό για την κυκλική οικονομία. Το βιοεξανθράκωμα έχει υψηλή προσροφητική ικανότητα συμβάλλοντας στην απομάκρυνση οργανικών και ανόργανων ρύπων από τα λύματα, εντός των ΤΥ

Επιπλέον, η παραγωγή βιοεξανθράκωμα από οργανικά απόβλητα είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την ιδέα της κυκλικής οικονομίας, καθώς επιτρέπει την αξιοποίηση αποβλήτων που διαφορετικά θα κατέληγαν σε χώρους υγειονομικής ταφής. Μετατρέποντας τα τροφικά υπολείμματα σε βιοεξανθράκωμα, τα απόβλητα αυτά γίνονται πολύτιμος πόρος για την επεξεργασία των λυμάτων, ενώ ταυτόχρονα μειώνεται η παραγωγή απορριμμάτων.

Η χρήση του βιοεξανθρακώματος συμβάλλει επίσης στη δέσμευση του άνθρακα, υποστηρίζοντας τη μείωση των εκπομπών CO₂ και ενισχύοντας τη βιωσιμότητα των συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων. Έτσι, η ενσωμάτωση του βιοεξανθρακώματος στη διαδικασία επεξεργασίας των λυμάτων προσφέρει διπλά οφέλη: αφενός βελτιώνει την αποδοτικότητα της επεξεργασίας, αφετέρου υποστηρίζει την κυκλική οικονομία μέσω της ανακύκλωσης αποβλήτων.

1.7.4 Ο ρόλος του χαλίκιού στην κυκλική οικονομία

Το χαλίκι είναι συνηθισμένο υλικό στους τεχνητούς υγροβιότοπους, το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως λόγω της φυσικής του αντοχής και της ικανότητάς του να. Αν και δεν προέρχεται από ανακυκλώσιμα υλικά όπως το βιοεξανθράκωμα ή το ανακυκλωμένο HDPE, η χρήση του χαλίκιού σε τεχνητούς υγροβιότοπους μπορεί να θεωρηθεί βιώσιμη όταν προέρχεται από τοπικούς πόρους ή όταν επαναχρησιμοποιείται από άλλα έργα κατασκευής.

Η συμβολή του χαλίκιού στην κυκλική οικονομία συνδέεται κυρίως με τη μακροχρόνια ανθεκτικότητά του και τη δυνατότητά του να επαναχρησιμοποιηθεί σε διαφορετικά συστήματα επεξεργασίας. Η ανθεκτικότητα και η χαμηλή συντήρηση που απαιτεί καθιστούν το χαλίκι ένα σταθερό υλικό πλήρωσης για τους τεχνητούς υγροβιότοπους.

1.7.5 Η ενσωμάτωση της κυκλικής οικονομίας μέσω των τεχνητών υδροβιοτόπων

Οι τεχνητοί υδροβιότοποι, με τη χρήση των υλικών πλήρωσης όπως το ανακυκλωμένο HDPE, το βιοεξανθράκωμα και το χαλίκι, αποτελούν ένα ιδανικό παράδειγμα εφαρμογής της κυκλικής οικονομίας στον τομέα της επεξεργασίας λυμάτων. Αυτά τα συστήματα επεξεργασίας όχι μόνο αξιοποιούν φυσικές διεργασίες για τον καθαρισμό των λυμάτων, αλλά και κατά το στάδιο κατασκευής τους χρησιμοποιούν ανακυκλωμένα και βιώσιμα υλικά. Τα υλικά αυτά συμβάλλουν στην ελαχιστοποίηση της χρήσης παρθένων πόρων, μειώνοντας την ανάγκη για εξόρυξη πρώτων υλών και κατασκευή νέων υλικών. Με τη χρήση ανακυκλωμένων πλαστικών και βιοεξανθράκωμα, επιτυγχάνεται σημαντική μείωση της σπατάλης υλικών, ενώ ταυτόχρονα μειώνεται το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των υδροβιοτόπων.

Επιπλέον, οι τεχνητοί υδροβιότοποι προάγουν την επαναχρησιμοποίηση των υδάτων, μειώνοντας την ανάγκη για άντληση νέων υδάτινων πόρων. Η χρήση αυτών των φυσικών συστημάτων επεξεργασίας συμβάλλει στη μείωση της εξάρτησης από ενεργοβόρα μηχανήματα και συστήματα επεξεργασίας, προωθώντας παράλληλα την εξοικονόμηση ενέργειας και πόρων.

2. Πειραματική διάταξη και μέθοδοι

2.1. Κατασκευή και Τεχνικά Χαρακτηριστικά Πειράματος

Η φιλοσοφία της κατασκευής των τεχνητών υδροβιοτόπων βασίζεται στην αρχή της βιώσιμης διαχείρισης των αστικών λυμάτων, ενσωματώνοντας την έννοια της κυκλικής οικονομίας. Η χρήση φυσικών διεργασιών, όπως η συνδυάζεται με την ενσωμάτωση ανακυκλωμένων και καινοτόμων υλικών πλήρωσης, όπως το βιοεξανθράκωμα και το ανακυκλωμένο πλαστικό.

Λόγω της κίνησης του λύματος από πάνω προς τα κάτω, οι ΤΥ κατακόρυφης ροής εμφανίζουν καλύτερες αερόβιες συνθήκες, καθώς ο ατμοσφαιρικός αέρας εισέρχεται ευκολότερα στο σύστημα. Επιπρόσθετα, η χρήση του παθητικού αερισμού συμβάλλει εξίσου στην καλύτερη μεταφορά του οξυγόνου εντός των ΤΥ ευνοώντας περαιτέρω τις αερόβιες συνθήκες. Να σημειωθεί πως τα συστήματα έχουν σχεδιαστεί για να

μεγιστοποιούν την αποδοτικότητα της επεξεργασίας, ενώ ταυτόχρονα μειώνουν το ενεργειακό κόστος και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Η χρήση τεσσάρων διαφορετικών συνδυασμών υλικών (χαλίκια, βιοεξανθράκωμα, ανακυκλωμένο πλαστικό) εξυπηρετεί την ανάλυση της απόδοσης και της συμβολής κάθε υλικού στις διεργασίες επεξεργασίας. Οι δεξαμενές φέρουν τις ονομασίες PG (Planted, Gravel), PGB (Planted, Gravel, Biochar), PP (Planted, Plastic), και PPB (Planted, Plastic, Biochar), όπου το "Planted" αναφέρεται στη φύτευση.

2.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά Υλικών

	Χαρακτηριστικά / Περιγραφή
Ποταμίσιο χαλίκι	Διαστάσεις: 2–8 cm (μικρό), 8–20 cm (μεγάλο) Χρήση: Φυσικό φίλτρο, μηχανική σταθερότητα
Βιοεξανθράκωμα (από υπολείμματα τροφών)	Μορφή: Αλεσμένο Συσκευασία: 25 x 15 x 5 cm (διάτρητη) Ιδιότητες: Υψηλή προσροφητικότητα οργανικών και ανόργανων ρύπων
Ανακυκλωμένο Πλαστικό	Τύποι: HX25KLL BIOCARRIER 25mm loose, HX38 BIOCARRIER 38mm loose Αναλογία: 50%-50% Ιδιότητες: Υψηλή επιφάνεια για ανάπτυξη μικροοργανισμών, μηχανική διήθηση
Σωλήνες Παθητικού Αερισμού	Διάμετρος: Φ50 Χρήση: Παροχή οξυγόνου μέσω φυσικής ροής αέρα
Δεξαμενές	Διαστάσεις: 1 x 1 x 1 m (1 m ³) Υλικό: Πλαστικό (εύκολη συντήρηση και απομόνωση υλικών)

2.3 Χαρακτηριστικά πιλοτικών μονάδων

Οι δεξαμενές καθαρίστηκαν με στόχο την απομάκρυνση ακαθαρσιών και προετοιμάστηκαν για να φιλοξενήσουν τα υλικά πλήρωσης. Σύστημα διάτρητων σωληνώσεων τοποθετήθηκε στο πυθμένα των συστημάτων, με στόχο την περισυλλογή των διασταλαγμάτων. Για την επίτευξη του παθητικού αερισμού, σωλήνες Φ50 τοποθετήθηκαν κατακόρυφα στο πυθμένα των ΤΥ επιτρέποντας την φυσική ροή του αέρα σε όλο το μήκος τους.

Δεξαμενή PG (Planted, Gravel):

- Τοποθετήθηκε στρώμα μεγάλου ποταμίσιο χαλίκι (8-20 cm) στη βάση.
- Πάνω από αυτό προστέθηκε στρώμα μικρού ποταμίσιο χαλίκι (2-8 cm), εξασφαλίζοντας τη μηχανική διήθηση των λυμάτων.



Εικόνα 1: Δεξαμενής (PG) την ώρα της τοποθέτησης Χαλικιών, Αύγουστος 2023

Δεξαμενή PGB (Planted, Gravel, Biochar):

- Στη βάση τοποθετήθηκε μεγάλο ποταμίσιο χαλίκι (8-20 cm).
- Επάνω τοποθετήθηκαν διάτρητες συσκευασίες βιοεξανθρακώματος με ομοιόμορφη κατανομή.
- Τέλος, προστέθηκε στρώμα μικρού ποταμίσιο χαλίκι (2-8 cm), καλύπτοντας τις συσκευασίες.



Εικόνα 2: Δεξαμενής (PGB) την ώρα της τοποθέτησης του βιοεξανθρακώματος, Αύγουστος 2023

Δεξαμενή PP (Planted, Plastic):

Πληρώθηκε εξ ολοκλήρου με μείγμα ανακυκλωμένου πλαστικού HX25KLL και HX38 σε αναλογία 50%-50%.



Εικόνα 3: Δεξαμενής (PP) την ώρα της τοποθέτησης Ανακυκλωμένου HDPE, Αύγουστος 2023

Δεξαμενή PPB (Planted, Plastic, Biochar):

- Τοποθετήθηκε το μείγμα ανακυκλωμένου πλαστικού HX25KLL και HX38 (50%-50%).
- Διάτρητες συσκευασίες βιοεξανθρακώματος προστέθηκαν ενδιάμεσα, με ομοιόμορφη κατανομή



Εικόνα 4: Συστήματα σε πλήρη λειτουργία , Μάρτιος 2024

2.4 Κλιματικές συνθήκες περιοχής μελέτης

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στα Χανιά Κρήτης, τα οποία χαρακτηρίζονται από μεσογειακό κλίμα, με ήπιους υγρούς χειμώνες και θερμά ξηρά καλοκαίρια. Η κατανόηση των κλιματολογικών παραμέτρων είναι κρίσιμη για την αξιολόγηση της λειτουργίας των τεχνητών υγροβιότοπων, καθώς παράγοντες όπως η θερμοκρασία, η

βροχόπτωση, η σχετική υγρασία, η ηλιοφάνεια και ο άνεμος επηρεάζουν τη μικροβιακή δραστηριότητα, την εξατμισοδιαπνοή και, συνολικά, την απόδοση επεξεργασίας.

Η κατασκευή των συστημάτων πραγματοποιήθηκε κυρίως κατά την περίοδο Αυγούστου – Οκτωβρίου 2023, οπότε επικρατούσαν υψηλές θερμοκρασίες (25–31 °C), ξηρές συνθήκες με σχεδόν μηδενικές βροχοπτώσεις (<10 mm/μήνα), καθώς και μέτρια σχετική υγρασία της τάξης του 55–65%. Οι ευνοϊκές καιρικές συνθήκες διευκόλυναν την ομαλή εκτέλεση των εργασιών κατασκευής, χωρίς καθυστερήσεις από καιρικά φαινόμενα.

Κατά την περίοδο λειτουργίας των συστημάτων (Μάρτιος – Οκτώβριος 2024), οι μέσες ημερήσιες θερμοκρασίες κυμάνθηκαν από περίπου 17 °C τον Μάρτιο έως και 30 °C τους θερινούς μήνες, με μέγιστες τιμές που ξεπέρασαν τους 35 °C κατά τόπους. Οι υψηλές θερμοκρασίες συνέβαλαν στην ενίσχυση της βιολογικής δραστηριότητας στις μονάδες κατακόρυφης ροής, όπου η παρουσία οξυγόνου στο υπόστρωμα αποτελεί κρίσιμο παράγοντα. Οι βροχοπτώσεις κατά το διάστημα αυτό ήταν περιορισμένες, με τη μεγαλύτερη καταγραφή να παρατηρείται τον Μάρτιο (περίπου 40 mm), ενώ από τον Μάιο έως τον Σεπτέμβριο καταγράφηκαν σχεδόν μηδενικές τιμές. Αυτή η ξηρή περίοδος επέτρεψε τη σταθερή υδραυλική φόρτιση χωρίς εξωτερικές παρεμβολές από πλημμυρικά ή αποστραγγιστικά φαινόμενα. Η σχετική υγρασία κυμάνθηκε μεταξύ 50% και 75%, με τις υψηλότερες τιμές να καταγράφονται την άνοιξη και τις χαμηλότερες το καλοκαίρι. Παράλληλα, η ηλιοφάνεια ήταν αυξημένη, με μέσους όρους που υπερέβησαν τις 11 ώρες ημερησίως κατά την περίοδο Απριλίου – Αυγούστου, επηρεάζοντας τη θερμική συμπεριφορά των συστημάτων και ενισχύοντας την εξατμισοδιαπνοή. Οι επικρατούντες άνεμοι ήταν βόρειοι έως βορειοδυτικοί, με μέσες ταχύτητες 2–4 m/s και εντονότερες ριπές κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, λόγω της επίδρασης των μελτεμιών. Η ροή του αέρα ενδέχεται να συνέβαλε στη φυσική οξυγόνωση των ανώτερων στρωμάτων του υποστρώματος, υποστηρίζοντας έτσι τις αερόβιες διεργασίες.

Τα παραπάνω δεδομένα προέρχονται από τον τοπικό μετεωρολογικό σταθμό του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (ΕΑΑ) στα Χανιά και συνοψίζονται στον Πίνακα 2. Οι κλιματικές αυτές συνθήκες λειτούργησαν θετικά στην αποδοτικότητα των τεχνητών υγροβιότοπων και συνέβαλαν στη σταθερή και αξιόπιστη λειτουργία τους κατά τη διάρκεια της πειραματικής περιόδου.



Εικόνα 5: Συστήματα σε πλήρη λειτουργία και με αναβαθμισμένο , αυτόματο σύστημα υπολογισμού εκροών, Απρίλιος 2024

2.5. Λειτουργία

Η μεθοδολογία της παρούσας διπλωματικής εργασίας βασίζεται στη μελέτη τεσσάρων πιλοτικών τεχνητών υδροβιοτόπων κατακόρυφης ροής, με στόχο τη διαχείριση και επεξεργασία πρωτοβάθμια επεξεργασμένου αστικού λύματος. Οι μονάδες είναι εγκατεστημένες σε υπαίθριο χώρο του Πολυτεχνείου Κρήτης και διαφοροποιούνται ως προς τα υλικά πλήρωσης, ώστε να διερευνηθεί η επίδραση του βιοεξανθρακώματος στην απόδοση των συστημάτων.

Η τροφοδοσία των υδροβιοτόπων πραγματοποιείται σε διακριτές φάσεις (batch feeding), δύο φορές ημερησίως, για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, με ελεγχόμενο όγκο λύματος ανά σύστημα. Η υδραυλική φόρτιση έχει σχεδιαστεί ώστε να προσομοιώνει συνθήκες πραγματικής λειτουργίας μικρής κλίμακας. Πιο συγκεκριμένα στις δεξαμενές χωρηγούνταν αστικό λύμα με παροχή 0.1, για 10 δευτερόλεπτα δύο φορές την ημέρα, ανά μία μέρα.

Η παρακολούθηση των συστημάτων περιλαμβάνει βασικές παραμέτρους επεξεργασίας, όπως το BOD₅, το COD, ο DOC, καθώς και θρεπτικά όπως το NH₄⁺-N, NO₃⁻-N, PO₄³⁻-P και TP. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται εβδομαδιαία καθ' όλη τη διάρκεια της πειραματικής περιόδου, ώστε να αξιολογηθεί η απόδοση κάθε

συστήματος με επαναληψιμότητα και ακρίβεια. Επιπλέον, εφαρμόζεται παθητικός αερισμός αντί τεχνητού, ενισχύοντας τη λειτουργία των συστημάτων χωρίς την ανάγκη εξωτερικής ενέργειας.

2.5.1 Σύλλογή και ανάλυση δειγμάτων

Δειγματοληψίες πραγματοποιούνται τόσο από τα εισερχόμενα λύματα (εισροή) όσο και από τα επεξεργασμένα λύματα (εκροή) κάθε υδροβιότοπου κάθε 8-10 ημέρες. Στα δείγματα πραγματοποιούνται αναλύσεις για τις παρακάτω παραμέτρους:

- Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD)
- Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD)
- Ολικός οργανικός άνθρακας (TOC)
- Ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS)
- Ολικό άζωτο (TN)
- Αμμωνιακό άζωτο ($\text{NH}_4^+\text{-N}$)
- Νιτρικά ($\text{NO}_3^-\text{-N}$)
- Ολικός φώσφορος (TP)
- Φώσφορος ορθοφωσφορικών ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)
- pH
- Ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC)

Οι αναλύσεις πραγματοποιούνται στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος της Σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης.

2.5.2 Μέθοδοι Μετρήσεων

Για την ανάλυση των παραμέτρων των δειγμάτων εισροής και εκροής από τους τέσσερις πιλοτικούς τεχνητούς υδροβιότοπους, χρησιμοποιήθηκαν οι εξής μέθοδοι και εξοπλισμός για κάθε μία από τις μετρήσεις:

Ολικό Αζώτο (TN): Η μέτρηση του συνολικού αζώτου πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του *Spectroquant® Total Nitrogen Test Kit* της εταιρίας *Supelco*. Το δείγμα στη συνέχεια αναλύθηκε στο φασματοφωτόμετρο *Spectroquant NOVA60* της *Merck*.



Εικόνα 6: Αντιδραστήρια υπολογισμού Ολικού Αζώτου | Εικόνα 7: Συσκευή Υπολογισμού ολικού Αζώτου

Νιτρικά (NO_3^- -N): Για τη μέτρηση των νιτρικών, χρησιμοποιήθηκε διηθημένο δείγμα σε $0.45\mu\text{m}$ και το *Nitrat NANOCOLOR® Test Kit*. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε στο φασματοφωτόμετρο μονής δέσμης *UV-1202* της *Shimadzu*.



Εικόνα 8: Αντιδραστήρια Υπολογισμού Νιτρικού Αζώτου

Διαλυμένος Οργανικός Άνθρακας (DOC): Η μέτρηση του διαλυμένου οργανικού άνθρακα πραγματοποιήθηκε εισάγοντας διηθημένο δείγμα $0.45\mu\text{m}$ με το σύστημα *TOC-L* της *Shimadzu*.



Εικόνα 9: Μηχάνημα υπολογισμού διαλειμένου οργανικού άνθρακα (DOC)

Ολικός φώσφορος (TP) και ορθοφωσφορικών ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$): εφαρμόστηκε η πρότυπη μέθοδος **Ascorbic Acid Method 4500-P E** σύμφωνα με τις *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Η μέθοδος βασίζεται στη δημιουργία ενός μπλε σύμπλοκου φωσφορομολυβδαινικού ανιόντος, το οποίο ανακτάται φωτομετρικά παρουσία ασκορβικού οξέος. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε στο **φασματοφωτόμετρο UV-Vis διπλής δέσμης UV-1601 (Shimadzu)**.

Για τη μέτρηση του $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, τα δείγματα διηθήθηκαν με **μικρομεμβράνη πόρου 0,45 μm** προκειμένου να απομακρυνθούν τα αιωρούμενα στερεά. Αντίθετα, για τον προσδιορισμό του συνολικού φωσφόρου (TP), τα δείγματα υπέστησαν **προηγούμενη χώνευση** με τη χρήση **θεικού οξέος (H_2SO_4) και νιτρικού οξέος (HNO_3)**, ώστε να μετατραπούν όλες οι φωσφορούχες ενώσεις σε μορφές που ανιχνεύονται από τη μέθοδο.

Το **combined reagent** που χρησιμοποιήθηκε για την αντίδραση παρασκευάστηκε με την ακόλουθη αναλογία:

- 50 mL **θεικό οξύ (H_2SO_4), 5N**
- 5 mL **θεικό κάλιο αντιμονύλιου (Potassium Antimonyl Tartrate)**
- 15 mL **θεικό αμμώνιο μολυβδαινίου (Ammonium Molybdate)**
- 30 mL **ασκορβικό οξύ (Ascorbic Acid)**

Η ανάγνωση της απορρόφησης πραγματοποιήθηκε σε μήκος κύματος **880 nm**, με καμπύλες βαθμονόμησης που επιβεβαίωσαν την ακρίβεια και την ευαισθησία της μεθόδου.

Αμμωνιακό Άζωτο ($\text{NH}_4^+\text{-N}$): Χρησιμοποιήθηκε το *Spectroquant® Ammonium Test Kit* και οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο φασματοφωτόμετρο μονής δέσμης *UV-1202* της *Shimadzu*.

pH: Οι μετρήσεις του pH πραγματοποιήθηκαν με το *Crison MicropH 2002*.



Εικόνα 10: Μηχάνημα υπολογισμού pH

Αγωγιμότητα (EC): Η ηλεκτρική αγωγιμότητα μετρήθηκε με τη συσκευή *Crison microCM 2202*.



Εικόνα 11: Μηχάνημα υπολογισμού Αγωγιμότητας

Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (TSS): Εφαρμόστηκε η πρότυπη μέθοδος 2540 D (*Total Suspended Solids Dried at 103–105°C*) των *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Η διαδικασία περιλάμβανε τη διήθηση προκαθορισμένου όγκου δείγματος μέσω **υαλοϊνικών φίλτρων τύπου GF/C (Whatman)**, τα οποία είχαν προηγουμένως υποβληθεί σε **απιονισμό και ξήρανση**.

Η διήθηση πραγματοποιήθηκε με τη χρήση **αντλίας κενού τύπου Membran Vakuumpumpe (Vacuubrand)**, ενώ η ακριβής μάζα των φίλτρων πριν και μετά τη διήθηση μετρήθηκε με **αναλυτικό ζυγό LIBROR AEG-220**, ακρίβειας **0,0001 g (0,1 mg)**.

Μετά τη διήθηση, τα φίλτρα τοποθετήθηκαν σε **ξηραντικό φούρνο στους 105°C για διάρκεια 1 ώρας**, και στη συνέχεια μεταφέρθηκαν σε **αποξηραντήρα (desiccator)** για 30 λεπτά ώστε να σταθεροποιηθεί η υγρασία πριν την τελική ζύγιση. Η διαφορά μάζας χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των TSS σε mg/L.

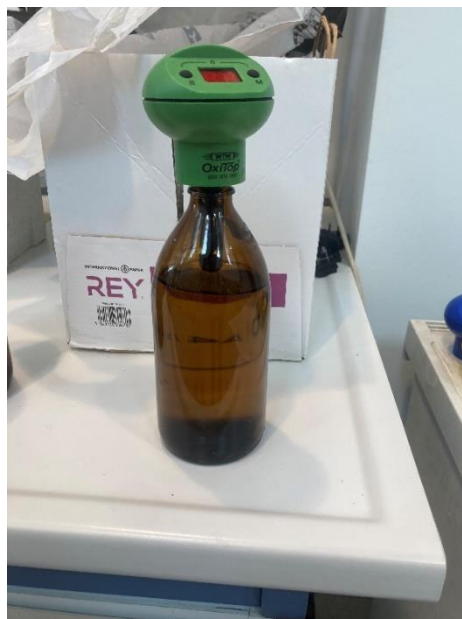


Εικόνα 12: Αντλία κενού (για των υπολογισμό TSS)



Εικόνα 13: Ζυγός

Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (BOD): Οι μετρήσεις του BOD πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση των συστημάτων *Oxitop*, *Aqualytic* και *VELP Scientifica*.



Εικόνα 14: Κεφαλές και φιάλη υπολογισμού BOD



Εικόνα 15 : Φασματοφωτόμετρο μονής δέσμης



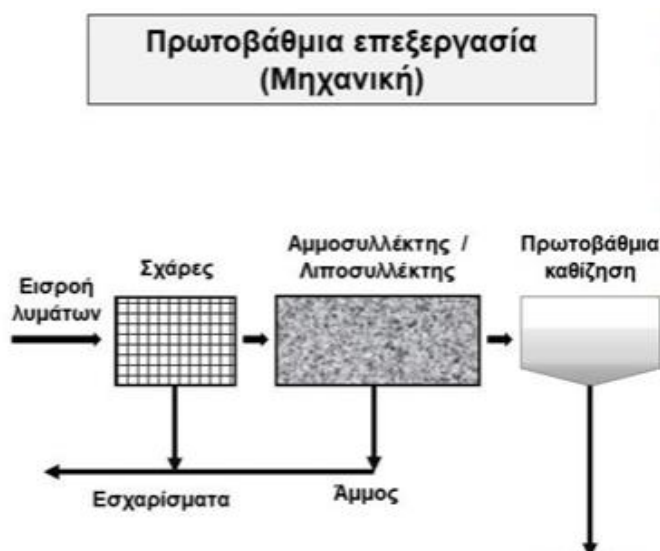
Εικόνα 16: Φασματοφωτόμετρο διπλής δέσμης

3. Ανάλυση και Αποτελέσματα

3.1. Χαρακτηρισμός Εισροής

Τα συστήματα επεξεργάζονται πρωτοβάθμια επεξεργασμένο αστικό λύμα. Η εισροή των συστημάτων προέρχεται από την υπερκείμενη εκροή της πρωτοβάθμιας καθίζησης, η οποία χαρακτηρίζεται ως πρωτοβάθμιο στάδιο επεξεργασίας στη ΔΕΥΑΧ. Στο πρωτοβάθμιο στάδιο επεξεργασίας στο αστικό λύμα έχει αφαιρεθεί ένα μεγάλο

κλάσμα στερεών, διατηρώντας το μεγαλύτερο ποσοστό των θρεπτικών συστατικών. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην εισροή δεν υπήρχε καθόλου Νιτρικό Άζωτο ($\text{NO}_3\text{-N}$). Επίσης επισημαίνεται ότι το pH είναι ουδέτερο και σταθερό όπως και η αγωγιμότητα.



Εικόνα 17: Διάγραμμα ροής Ε.Ε.Λ., γραμμή επεξεργασίας λυμάτων με τη μέθοδο της ενεργού ιλύος (Προσαρμογή από: Νταρακάς, 2010)

Πίνακας 1: Μέσες Τιμές Εισροής

	COD(mg/L)	TSS(mg/L)	DOC(mg/L)	BOD5(mg/L)	TN(mg/L)	NH4-N(mg/L)	TP(mg/L)	PO4-P(mg/L)	pH	EC($\mu\text{S/cm}$)
AV	425,15	184,38	57,86	299,71	62,57	40,37	6,26	4,44	7,10	1291

3.2 Ισοζύγιο Νερού

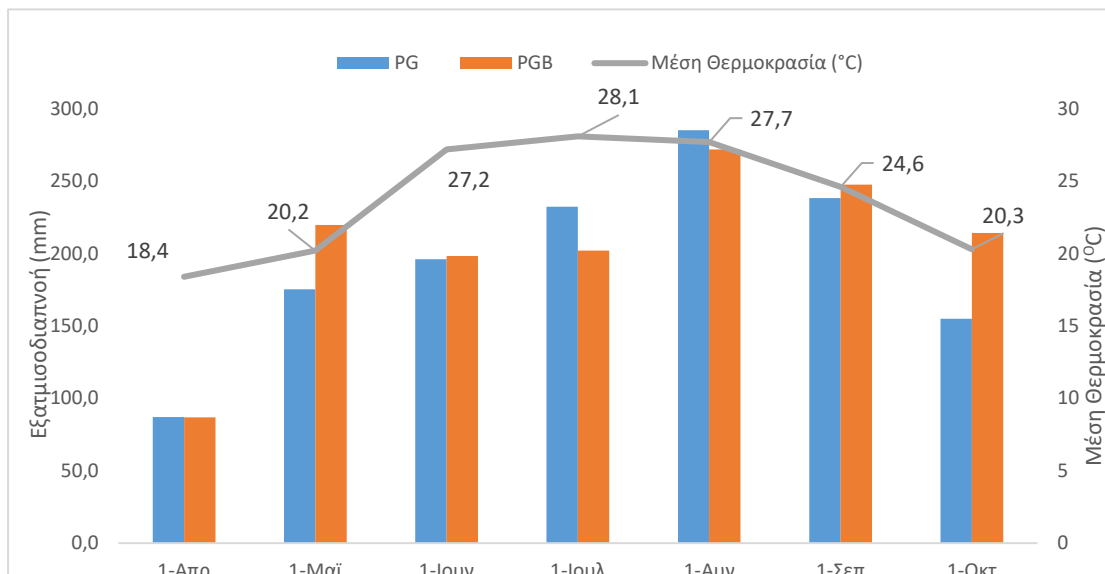
Το ισοζύγιο νερού των τεχνητών υγροβιότοπων επηρεάζεται άμεσα από τις εισροές νερού, την υδραυλική φόρτιση, και τις φυσικές διεργασίες εξάτμισης και διαπνοής. Στην παρούσα ανάλυση λαμβάνεται υπόψη ότι οι δεξαμενές ποτίζονται τρεις φορές την ημέρα με ημερήσια επιφανειακή φόρτιση **0,19 $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{d}$** , μέρα παρά μέρα. Παρατηρήθηκε ότι οι δεξαμενές με χαλίκι (PG & PGB) συγκρατούσαν περισσότερο λύμα, όπως είναι και λογικό λόγο του πορώδους τους. Επίσης σε βάθος χρόνου τα καλάμια είχαν μεγαλύτερη ανάπτυξη σε αυτά τα συστήματα και το ανεπτυγμένο ριζικό σύστημα των φυτών συνέβαλε στην μείωση του όγκου της εκροής. Τέλος, όπως φαίνεται και από τα παρακάτω ραβδογράμματα, ο κύριος παράγοντας που επηρέασε την εξατμισοδιαπνοή των συστημάτων, ήταν οι κλιματολογικές συνθήκες. Πιο

συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι η διακύμανση της εξατμισοδιαπνοής ακολουθεί τις μεταβολές θερμοκρασίας από μήνα σε μήνα. Ενδεικτικά οι υψηλότερες τιμές που καταγράφονται είναι τον Αύγουστο, όπου οι θερμοκρασίες είναι υψηλότερες, ενώ οι χαμηλότερες το Απρίλιο και τον Οκτώβριο. Η διαφορά που παρατηρείται μεταξύ του Απριλίου και του Οκτωβρίου είναι λόγω της ανάπτυξης των καλαμιών και των κλιματολογικών συνθηκών της περιοχής.

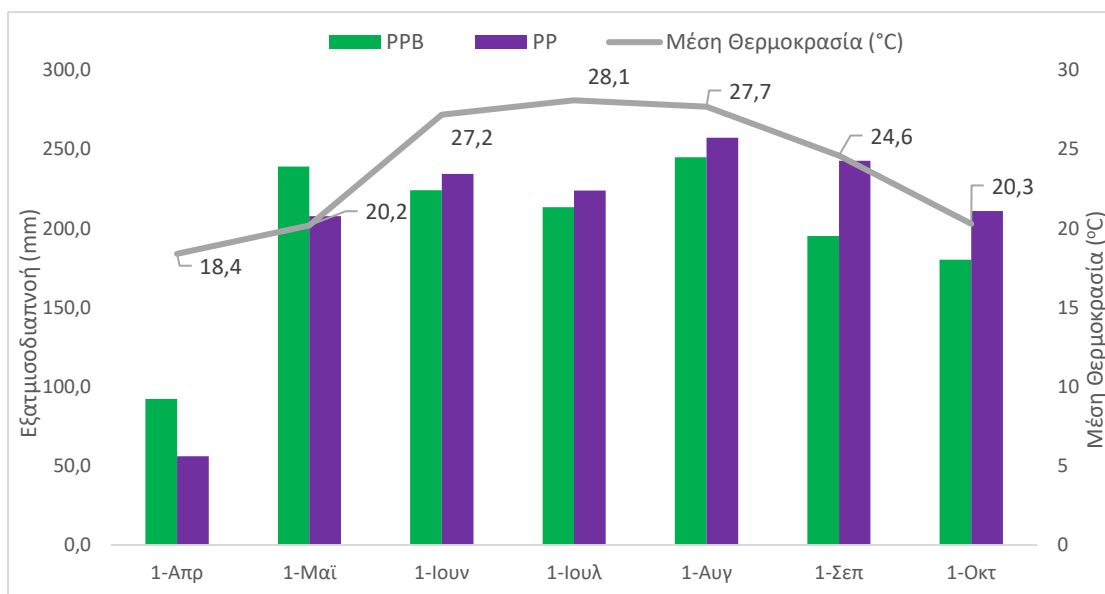
Πίνακας 2: Κλιματολογικά Χαρακτηριστικά Περιοχής

Μήνας	Μέση Θερμοκρασία (°C)	Συνολική Βροχόπτωση (mm)
Σεπτέμβριος	24.3	37.2
Οκτώβριος	20.9	0.8
Νοέμβριος	16.4	74.2
Δεκέμβριος	13.3	274.2
Ιανουάριος	13.3	165.6
Φεβρουάριος	13.1	61.2
Μάρτιος	15.3	22.8
Απρίλιος	18.4	11.4

Τα αποτελέσματα έδειξαν μια σαφή εποχιακή διακύμανση στην εξατμισοδιαπνοή (ET), με την υψηλότερη τιμή να καταγράφεται τον Αύγουστο και τη χαμηλότερη τον Απρίλιο και τον Οκτώβριο. Αυτή η διακύμανση είναι συνεπής με την αναμενόμενη επίδραση της θερμοκρασίας και της ηλιακής ακτινοβολίας στην ET (Allen et al., 1998). Η γενικότερη κατανόηση της εξατμισοδιαπνοής και των παραγόντων που την επηρεάζουν είναι καίριας σημασίας για την ορθή διαχείριση των υδατικών πόρων (Ward & Trimble, 2004).



Διάγραμμα 1: Ραβδόγραμμα εξατμισοδιαπνοής για τα 2 συστήματα (PG, PGB)



Διάγραμμα 2: Ραβδόγραμμα εξατμισοδιαπνοής για τα 2 συστήματα (PP, PPB)

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύγκριση της ET μεταξύ των διαφορετικών υποστρωμάτων. Ο υδροβιότοπος PGB, που περιείχε χαλίκια και βιοεξανθράκωμα, εμφάνισε την υψηλότερη ET. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στην υψηλή ικανότητα συγκράτησης νερού του βιοεξανθρακώματος, η οποία αυξάνει τη διαθεσιμότητα νερού για τα φυτά και, κατά συνέπεια, την ET (Lehmann & Joseph, 2015). Αντίθετα, ο υδροβιότοπος PG, που περιείχε μόνο χαλίκια, εμφάνισε τη χαμηλότερη ET, πιθανώς λόγω της χαμηλότερης ικανότητας συγκράτησης νερού των χαλικιών. Η παρουσία του

βιοεξανθρακώματος έχει αποδειχθεί ότι βελτιώνει την υδατοϊκανότητα των εδαφών, αυξάνοντας την διαθεσιμότητα νερού για τα φυτά και συνεπώς την εξατμισοδιαπνοή (Glaser et al., 2002).

Ο υδροβιότοπος PPB, που περιείχε ανακυκλωμένο HDPE και βιοεξανθράκωμα, εμφάνισε επίσης υψηλή ET. Η συνδυασμένη παρουσία του HDPE, που μειώνει την εξάτμιση από την επιφάνεια του υποστρώματος, και του βιοεξανθρακώματος, που αυξάνει τη συγκράτηση νερού, φαίνεται να έχει οδηγήσει σε υψηλή ET. Τέλος, ο υδροβιότοπος PP, που περιείχε μόνο ανακυκλωμένο HDPE, εμφάνισε μέτρια ET.

3.3 pH

Το pH είναι ένας κρίσιμος δείκτης για την αξιολόγηση της απόδοσης των τεχνητών υδροβιότοπων, καθώς επηρεάζει τη δραστηριότητα των μικροοργανισμών και τη Συστήματα με σταθερό pH τείνουν να προσφέρουν καλύτερη απόδοση στη διάσπαση οργανικών ουσιών και την απομάκρυνση θρεπτικών συστατικών (Vymazal, 2011).

PG: Παρατηρήθηκε αύξηση του pH κατά μέσο όρο, πιθανώς λόγω λιγότερο ενεργών αντιδράσεων στις επιφάνειες του ποταμίσιου χαλικιού, το οποίο έχει μικρή επίδραση στη χημική σύσταση του νερού.

PGB: Παρουσιάζει μικρότερες αλλαγές, με τάση ρύθμισης του pH. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στο βιοεξανθράκωμα, το οποίο λειτουργεί ως ρυθμιστής λόγω της πορώδους δομής του και της ικανότητάς του να απορροφά ιόντα (Lehmann & Joseph, 2015).

PPB: Οι αυξήσεις του pH είναι εντονότερες, υποδεικνύοντας συνδυαστική δράση HDPE και βιοεξανθράκωμα, που μπορεί να αυξάνει την αλκαλικότητα μέσω δευτερογενών αντιδράσεων.

PP: Η σταθερότητα του pH είναι χαρακτηριστική, πιθανώς λόγω της απουσίας βιοδραστικών υλικών όπως το βιοεξανθράκωμα.

Οι αλλαγές στο pH μπορούν να επηρεάσουν:

- Τη διαλυτοποίηση οργανικών και ανόργανων ενώσεων.

- Τη δραστηριότητα των μικροοργανισμών που είναι υπεύθυνοι για τη βιολογική διάσπαση.
- Την απομάκρυνση αζώτου και φωσφόρου, που είναι πιο αποδοτική σε ουδέτερα έως ελαφρώς αλκαλικά περιβάλλοντα.

Η σταθεροποίηση του pH στα τεχνητά συστήματα οφείλεται συχνά στις ιδιότητες των πληρωτικών υλικών:

- Οι δεξαμενές με βιοεξανθράκωμα (**PGB, PPB**) παρουσιάζουν πιο ρυθμιστικές ιδιότητες του pH.
- Η σταθερότητα του pH στις δεξαμενές **PP** και **PG** συνδέεται με τη χημική σταθερότητα των πληρωτικών υλικών.
- Η επιλογή υλικών με ικανότητα ρύθμισης του pH μπορεί να βελτιώσει την απόδοση του συστήματος.

Πίνακας 3 : Μέσες Τιμές pH και τυπικές αποκλίσεις

Μήνας	Πρωτοβάθμια επεξεργασμένο Λύμα	PG	PGB	PPB	PP
Απρ-24	7,14±0,06	7,56±0,13	7,40±0,24	7,55±0,19	7,37±0,15
Μαΐ-24	7,07±0,09	6,93±0,13	7,00±0,33	7,28±0,33	7,30±0,05
Ιουν-24	6,92±0,04	6,88±0,01	6,86±0,06	7,41±0,01	7,43±0,04
Ιουλ-24	7,01±0,06	6,30±0,14	6,94±0,05	7,39±0,05	7,37±0,17
Αυγ-24	7,25±0,05	6,85±0,07	6,75±0,07	7,47±0,00	7,57±0,01
Σεπ-24	7,16±0,00	6,35±0,00	6,78±0,00	7,53±0,00	7,64±0,00
Οκτ-24	7,18±0,11	6,87±0,09	6,84±0,01	7,56±0,05	7,57±0,06

3.4 Ηλεκτρική Αγωγιμότητα (EC)

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα (**EC**) είναι βασικός δείκτης που εκφράζει τη συγκέντρωση διαλυμένων αλάτων στο νερό. Συστήματα επεξεργασίας αστικών λυμάτων, όπως οι τεχνητοί υγροβιότοποι, επηρεάζουν την EC μέσω διεργασιών διάλυσης, κατακράτησης και εξάτμισης. Βάσει της ελληνικής νομοθεσίας (ΚΥΑ 5673/400/1997), η EC πρέπει να είναι χαμηλότερη από 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ για εκροές που χρησιμοποιούνται σε άρδευση.

Εισροή (INPUT): Η EC της εισροής κυμάνθηκε μεταξύ 1200-1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, με μέση τιμή $1350 \pm (\text{STDEV.S})$ (όταν εκφράζεις μέση τιμή θα βάζεις και την τυπική απόκλιση να το διορθώσεις όπου αλλού το έχεις κάνει) $\mu\text{S}/\text{cm}$.

PG (Ποταμίσιο χαλίκι):

Παρατηρήθηκε μικρή αύξηση της EC, με τιμές στην εκροή να κυμαίνονται μεταξύ 1300-1550 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Η αύξηση μπορεί να αποδοθεί στη διάλυση μικροποσοτήτων αλάτων από το χαλίκι.

PGB (Χαλίκι και βιοεξανθράκωμα):

Σημαντική μείωση της EC, με τιμές στην εκροή μεταξύ 1100-1250 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Η μείωση συνδέεται με τη ροφητική ικανότητα του βιοεξανθρακώματος, το οποίο κατακρατεί ιόντα.

PP (Ανακυκλωμένο HDPE):

Σταθερή EC στην εκροή, με τιμές μεταξύ 1250-1400 $\mu\text{S}/\text{cm}$, υποδεικνύοντας την αδράνεια του HDPE.

PPB (HDPE και βιοεξανθράκωμα):

Μείωση της EC, με τιμές 1150-1300 $\mu\text{S}/\text{cm}$, συγκρίσιμες με την PGB λόγω της παρουσίας του βιοεξανθρακώματος.

PGB και PPB: Παρουσίασαν τη μεγαλύτερη μείωση της EC, με μέση μείωση 15%-20% σε σχέση με την εισροή. Αυτό υποδεικνύει ότι το βιοεξανθράκωμα είναι αποτελεσματικό στη μείωση της αγωγιμότητας.

PG: Η μικρή αύξηση (5%-10%) οφείλεται πιθανώς στη διάλυση ιόντων από το χαλίκι.

PP: Παρουσιάζει σταθερή αγωγιμότητα, υποδεικνύοντας ότι το HDPE δεν επηρεάζει σημαντικά τη συγκέντρωση ιόντων.

Βιοεξανθράκωμα: Ενισχύει τη συγκράτηση ιόντων μέσω της πορώδους δομής του (Lehmann & Joseph, 2015).

Χαλίκι: Αδρανές υλικό με μικρή επίδραση στην αγωγιμότητα.

HDPE: Παρέχει σταθερότητα χωρίς να συμβάλλει στην απομάκρυνση ή τη διάλυση αλάτων.

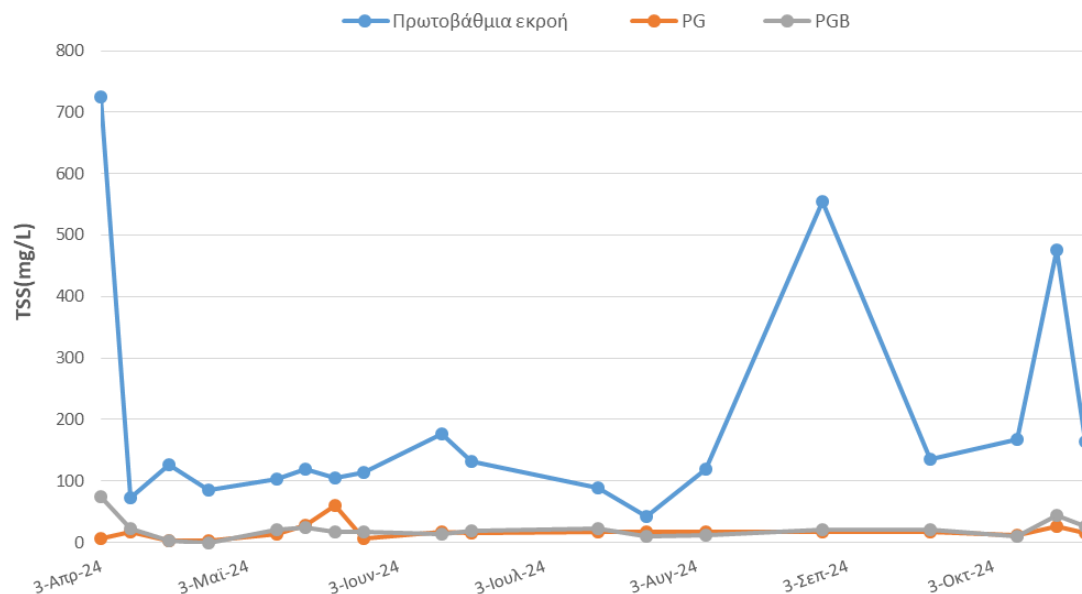
Όλες οι δεξαμενές πληρούν το όριο των 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ για χρήση της εκροής σε άρδευση. Οι δεξαμενές με βιοεξανθράκωμα (**PGB** και **PPB**) επιτυγχάνουν χαμηλότερες τιμές EC, βελτιώνοντας την ποιότητα της εκροής για ευαίσθητες χρήσεις.

Πίνακας 4: Μέσες Τιμές και τυπικές αποκλίσεις Αγωγιμότητας

Μήνας	Πρωτοβάθμια επεξεργασμένο Λύμα	PG	PGB	PPB	PP
Απρ-24	1344,00 \pm 448,59	1189,25 \pm 24,39	1177,75 \pm 55,21	1192,50 \pm 53,03	1154,25 \pm 43,51
Μαϊ-24	1048,75 \pm 21,33	1129,00 \pm 77,67	1100,50 \pm 81,59	1178,00 \pm 97,24	1183,00 \pm 52,00
Ιουν-24	1153,50 \pm 54,45	1502,00 \pm 50,91	1432,50 \pm 0,71	1337,50 \pm 13,44	1333,00 \pm 9,90
Ιουλ-24	1260,50 \pm 37,48	1905,00 \pm 28,28	1945,00 \pm 289,91	1681,50 \pm 113,84	1657,00 \pm 103,24
Αυγ-24	1265,00 \pm 49,50	1925,50 \pm 0,71	1747,50 \pm 3,54	1576,00 \pm 247,49	1403,00 \pm 14,14
Σεπ-24	1365,00 \pm 45,96	1928,00 \pm 1,41	1749,00 \pm 0,71	1865,00 \pm 80,61	1365,00 \pm 19,80
Οκτ-24	1601,00 \pm 108,89	4490,00 \pm 254,56	3590,00 \pm 254,56	1943,50 \pm 47,38	1957,00 \pm 52,33

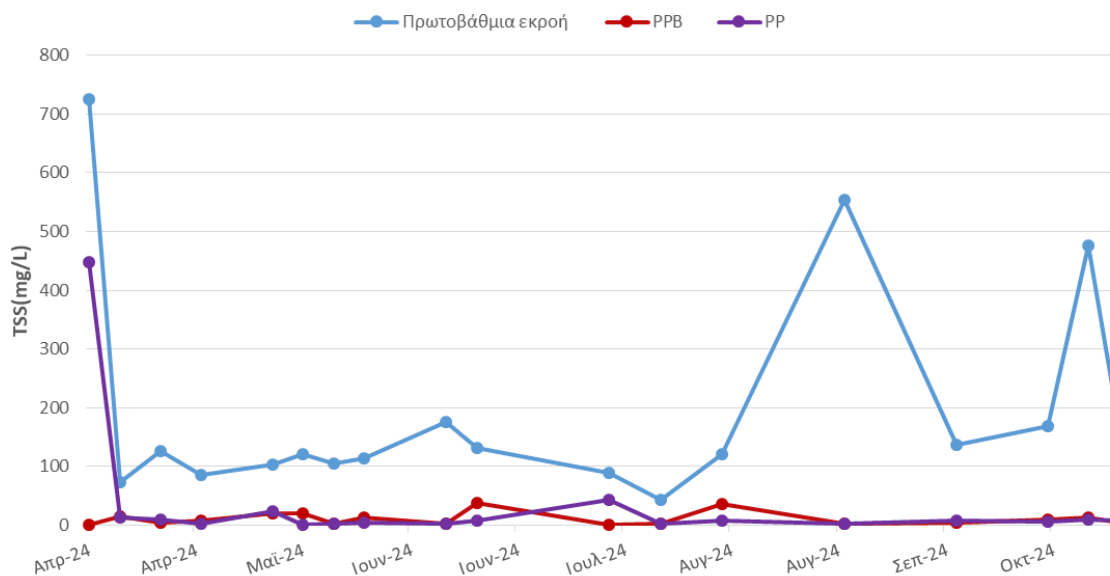
3.5 TSS (Ολικά Αιωρούμενα Στερεά)

Η ανάλυση του γραφήματος αποκαλύπτει σημαντικές διαφορές στην απομάκρυνση των TSS μεταξύ των δύο συστημάτων, PG και PGB, σε σύγκριση με την εισροή (primary). Το σύστημα PG, που αποτελείται από χαλίκια, επιδεικνύει μια μείωση των TSS σε σχέση με την εισροή. Η μείωση αυτή οφείλεται κυρίως στη διήθηση, όπου τα χαλίκια λειτουργούν ως φυσικό φίλτρο, κατακρατώντας τα μεγαλύτερα αιωρούμενα σωματίδια (Vymazal, 2011).



Διάγραμμα 3: Συγκεντρώσεις TSS στα συστήματα PG & PGB σε σχέση με την εισροή (Primary)

Το σύστημα PGB, που περιλαμβάνει χαλίκια και βιοεξανθράκωμα, επιτυγχάνει μια σημαντικά υψηλότερη απομάκρυνση των TSS. Η προσθήκη βιοεξανθρακώματος ενισχύει την ικανότητα του συστήματος να κατακρατεί αιωρούμενα σωματίδια μέσω πολλαπλών μηχανισμών. Η υψηλή επιφάνεια και η πορώδης δομή του βιοεξανθρακώματος παρέχουν άφθονες θέσεις για την προσρόφηση μικρότερων σωματιδίων και κολλοειδών (Lehmann & Joseph, 2015). Επιπλέον, το βιοεξανθράκωμα μπορεί να προάγει τη συσσωμάτωση των σωματιδίων μέσω ηλεκτροστατικών αλληλεπιδράσεων και σχηματισμού γεφυρών, διευκολύνοντας την καθίζηση και την απομάκρυνσή τους (Glaser et al., 2002).



Διάγραμμα 4: Συγκεντρώσεις TSS στα συστήματα PPB & PP σε σχέση με την εισροή (PRIMARY)

Η ανάλυση του γραφήματος αποκαλύπτει μια σαφή διαφορά στην απομάκρυνση των TSS μεταξύ των δύο συστημάτων, PPB και PP, σε σύγκριση με την εισροή (Primary). Το σύστημα PP, που βασίζεται αποκλειστικά σε ανακυκλωμένο HDPE, παρουσιάζει μια περιορισμένη μείωση των TSS. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από την υδρόφοβη φύση του HDPE, η οποία περιορίζει την προσρόφηση των υδρόφιλων αιωρούμενων σωματιδίων, καθώς και από την έλλειψη πορώδους, που μειώνει την αποτελεσματικότητα της διήθησης (Morales-Narváez & Nagles-Martinez, 2020). Επιπλέον, η λεία επιφάνεια του HDPE δεν ευνοεί την κατακράτηση των σωματιδίων, τα οποία μπορούν εύκολα να παρασυρθούν από τη ροή του νερού (Kargarzadeh et al., 2012).

Πίνακας 5: Μέσες Τιμές και τυπικές αποκλίσεις Ολικών αιωρούμενων στερεών (TSS)

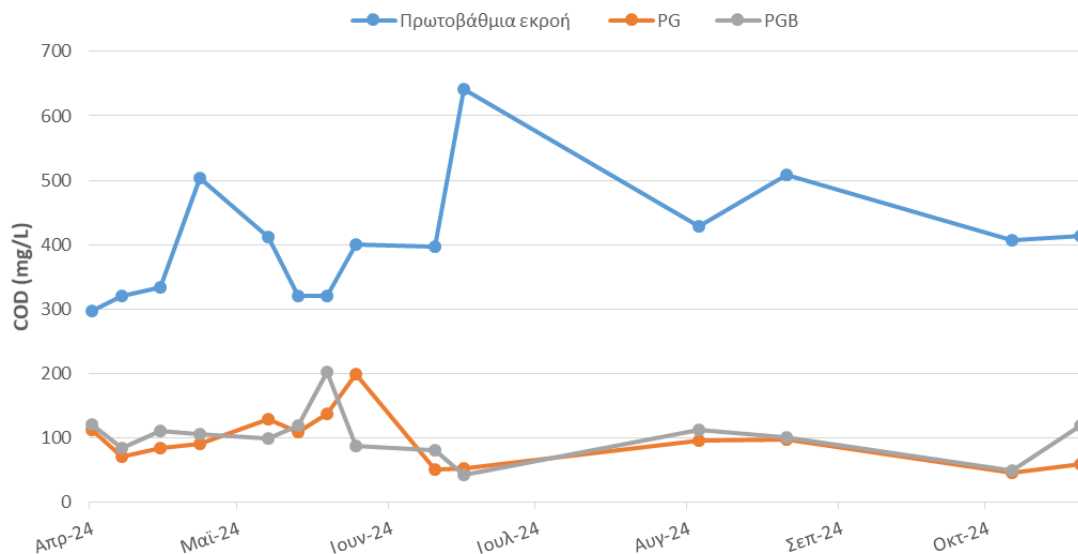
Μήνας	Πρωτοβάθμια επεξεργασμένο Λύμα (mg/L)	PG (mg/L)	PGB (mg/L)	PPB (mg/L)	PP (mg/L)
Απρ-24	252,25±28,02	7,00±7,57	32,67±14,14	8,67±5,03	118,00±5,29
Μαϊ-24	110,42±7,74	26,65±10,51	20,08±3,74	13,47±8,05	10,11±11,20
Ιουν-24	154,00±31,11	16,61±1,27	16,29±3,23	19,57±24,85	4,91±3,16
Ιουλ-24	65,00±32,53	17,70±0,57	16,60±9,33	1,50±0,71	22,50±27,58

Αυγ-24	337,00±120,00	17,55±0,07	16,80±6,36	18,63±24,5 7	5,13±4,07
Σεπ-24	136,00±0,00	18,00±0,00	18,00±0,00	4,67±0,00	7,00±0,00
Οκτ-24	269,33±178,99	17,89±7,12	26,40±17,1 5	9,00±4,17	7,50±2,29

Το σύστημα PPB, που συνδυάζει ανακυκλωμένο HDPE με βιοεξανθράκωμα, επιτυγχάνει μια σημαντικά μεγαλύτερη απομάκρυνση των TSS. Η προσθήκη βιοεξανθρακώματος αντισταθμίζει τις περιορισμένες ικανότητες του HDPE, παρέχοντας πορώδη δομή και υψηλή επιφάνεια για την προσρόφηση και κατακράτηση των αιωρούμενων σωματιδίων (Ahmad et al., 2014). Η υψηλή ικανότητα προσρόφησης του βιοεξανθρακώματος οφείλεται στην παρουσία λειτουργικών ομάδων στην επιφάνειά του, οι οποίες αλληλεπιδρούν με τα αιωρούμενα σωματίδια μέσω ηλεκτροστατικών και υδρόφοβων αλληλεπιδράσεων (Yao et al., 2012). Επιπλέον, το βιοεξανθράκωμα μπορεί να προάγει τη συσσωμάτωση των σωματιδίων μέσω σχηματισμού γεφυρών, διευκολύνοντας την καθίζηση και την απομάκρυνσή τους.

3.6 COD

Η απομάκρυνση του COD στους τεχνητούς υγροβιότοπους επιτυγχάνεται μέσω ενός συνδυασμού φυσικών και βιολογικών διεργασιών, οι οποίες διαφοροποιούνται ανάλογα με τη σύνθεση του υποστρώματος. Στο σύστημα **PG**, η διήθηση μέσω χαλικιών συμβάλλει στην κατακράτηση των μεγαλύτερων οργανικών σωματιδίων, ενώ τα καλάμια (*Phragmites australis*) ενισχύουν τη μικροβιακή δραστηριότητα και την αποικοδόμηση οργανικών ουσιών. Μέσω του ριζικού τους συστήματος, τα καλάμια παρέχουν παθητικό αερισμό που οξυγονώνει το υπόστρωμα, βελτιώνοντας έτσι τις αερόβιες συνθήκες και την αποτελεσματικότητα της αποδόμησης (Brix, 1997; Vymazal, 2010).

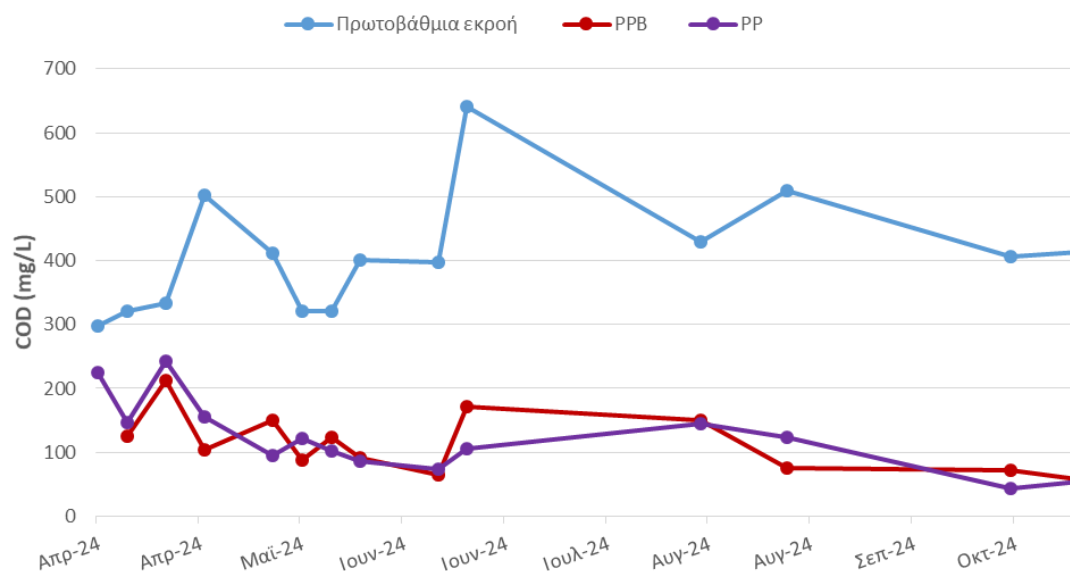


Διάγραμμα 5: Συγκεντρώσεις COD στα συστήματα PG & PGB σε σχέση με την εισροή (primary)

Στο **PGB** και **PPB**, η προσθήκη **βιοεξανθρακώματος (biochar)** ενισχύει περαιτέρω αυτές τις διεργασίες. Το βιοεξανθράκωμα, λόγω της υψηλής πορώδους δομής του και της αυξημένης ειδικής επιφάνειας, προσφέρει ενεργές θέσεις για προσρόφηση οργανικών ενώσεων και επιτρέπει την εγκατάσταση μεγαλύτερης μικροβιακής βιομάζας, ενισχύοντας τη βιοαποδόμηση (Mohan et al., 2014; Ahmad et al., 2014). Παράλληλα, βελτιώνει την υδατοϊκανότητα του υποστρώματος και δημιουργεί ένα σταθερό μικροπεριβάλλον για τη ριζική ανάπτυξη των καλαμιών, τα οποία συνεχίζουν να συνεισφέρουν στον παθητικό αερισμό και στην ανάπτυξη μικροοργανισμών (Liu et al., 2019; Zhang et al., 2020). Ο συνεργατικός ρόλος του βιοεξανθρακώματος και των καλαμιών αποδεικνύεται καθοριστικός για την απομάκρυνση οργανικών ρύπων όπως το COD, καθώς συνδυάζονται μηχανισμοί προσρόφησης, μικροβιακής αποδόμησης και οξυγόνωσης του υποστρώματος.

Αντίθετα, στο σύστημα **PP**, όπου χρησιμοποιείται μόνο ανακυκλωμένο πλαστικό (HDPE), η μείωση του COD οφείλεται κυρίως στη μικροβιακή δραστηριότητα που αναπτύσσεται στο ριζικό σύστημα των καλαμιών (Vymazal, 2011; Brix, 1994). Ωστόσο, η απουσία πορώδους στο υλικό πλήρωσης περιορίζει τη δυνατότητα διήθησης

και προσρόφησης οργανικών ουσιών, γεγονός που ενδέχεται να επηρεάζει την τελική αποδοτικότητα του συστήματος.

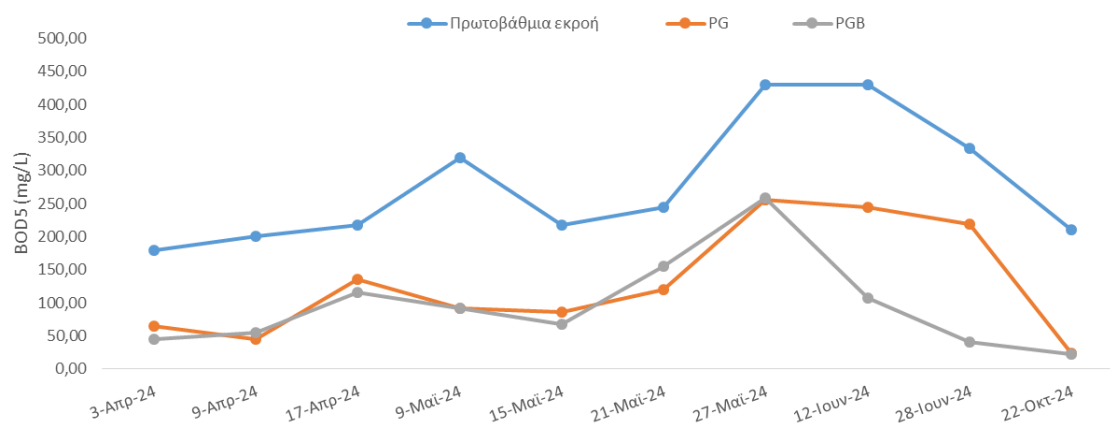


Διάγραμμα 6: Συγκεντρώσεις COD στα συστήματα PPB & PP σε σχέση με την εισροή (primary)

Πίνακας 6: Μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις Χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (COD)

Μήνας	Πρωτοβάθμια επεξεργασμένο Λύμα (mg/L)	PG (mg/L)	PGB (mg/L)	PPB (mg/L)	PP (mg/L)
Απρ-24	363,70±94,20	90,20±17,47	105,98±15,17	147,20±58,21	192,70±48,59
Μαΐ-24	363,70±49,24	143,70±38,83	127,20±52,36	112,70±29,18	100,98±15,67
Ιουν-24	519,20±172,53	52,20±1,41	62,20±26,87	118,20±74,95	89,20±22,63
Αυγ-24	469,20±56,57	96,55±1,48	106,90±7,64	112,20±52,33	134,20±15,56
Οκτ-24	409,93±4,63	52,89±8,93	84,72±48,76	64,74±10,67	48,25±7,00

3.7 BOD₅



Διάγραμμα 7: Συγκεντρώσεις BOD₅ στα συστήματα PG & PGB σε σχέση με την εισροή (primary)

Η αρχική συγκέντρωση του BOD₅ στο πρωτογενές εισερχόμενο νερό κυμαίνεται από 100 έως 450 mg/L, με σημαντική διακύμανση κατά τη διάρκεια της παρακολούθησης. Ο υδροβιότοπος PG παρουσίασε αύξηση του BOD₅ κατά τις πρώτες ημέρες λειτουργίας, φαινόμενο που μπορεί να αποδοθεί στη διαδικασία προσαρμογής του μικροβιακού φορτίου και στην ενδεχόμενη έκπλυση οργανικών ενώσεων από το υλικό υποστήριξης (Kadlec & Wallace, 2009). Ωστόσο, στη συνέχεια παρατηρήθηκε σταδιακή μείωση, φτάνοντας σε τιμές κοντά στα 50 mg/L στο τέλος της περιόδου μελέτης.

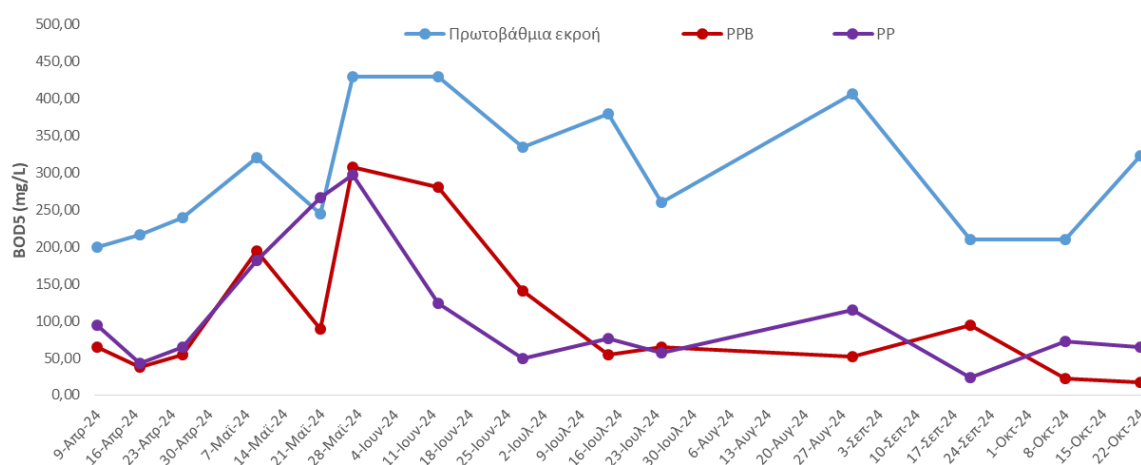
Αντίθετα, ο υδροβιότοπος PGB εμφάνισε ταχύτερη και πιο απότομη μείωση του BOD₅. Ειδικότερα, μετά από την αρχική περίοδο προσαρμογής, η συγκέντρωση του BOD₅ μειώθηκε κάτω από τα 50 mg/L πιο γρήγορα σε σχέση με το PG, γεγονός που υποδηλώνει την ενισχυμένη ικανότητα του βιοεξανθρακώματος στην απομάκρυνση οργανικών ρύπων. Το βιοεξανθράκωμα διαθέτει υψηλή ειδική επιφάνεια και πόρους που ευνοούν τη δέσμευση οργανικών ουσιών και την ανάπτυξη μικροοργανισμών με αποικοδομητική δράση (Mohanty et al., 2018).

Η αποτελεσματικότητα των δύο υδροβιότοπων στην απομάκρυνση του BOD₅ εξαρτάται από μια σειρά φυσικοχημικών και βιολογικών μηχανισμών:

Βιοαποικοδόμηση: Οι μικροοργανισμοί που αναπτύσσονται στα χαλίκια και στο βιοεξανθράκωμα καταναλώνουν οργανική ύλη ως πηγή άνθρακα και ενέργειας (Wu et al., 2020).

Προσρόφηση: Το βιοεξανθράκωμα προσφέρει επιπλέον ικανότητα δέσμευσης οργανικών ενώσεων λόγω της μεγάλης επιφάνειάς του και της παρουσίας λειτουργικών ομάδων που διευκολύνουν τη χημική αλληλεπίδραση (Zhang et al., 2021).

Ιζηματοποίηση: Ορισμένα οργανικά σωματίδια καθιζάνουν στο υπόστρωμα, μειώνοντας τη συγκέντρωση του BOD₅ στην εκροή.



Διάγραμμα 8: Συγκεντρώσεις BOD₅ στα συστήματα PPB & PP σε σχέση με την εισροή (primary)

Υπάρχει υψηλό οργανικό φορτίο των εισερχόμενων λυμάτων, το οποίο πρέπει να μειωθεί προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή ποιότητα εκροής. Μετά την επεξεργασία, οι συγκεντρώσεις του BOD₅ στους υδροβιότοπους PP και PPB μειώνονται σημαντικά, υποδεικνύοντας την αποτελεσματικότητα αυτών των συστημάτων στη βιολογική αποικοδόμηση του οργανικού φορτίου. Ο υδροβιότοπος PP, που περιέχει ανακυκλωμένο πλαστικό ως υπόστρωμα, παρουσιάζει αρχικά σημαντικές διακυμάνσεις στις τιμές του BOD₅, γεγονός που ενδέχεται να σχετίζεται με μεταβολές στη μικροβιακή δραστηριότητα και στην προσαρμογή των

μικροοργανισμών στις συνθήκες του υποστρώματος. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια της παρακολούθησης, οι τιμές του BOD₅ σταθεροποιούνται σε επίπεδα κάτω των 50 mg/L, γεγονός που υποδηλώνει ότι το ανακυκλωμένο πλαστικό λειτουργεί ως ένα κατάλληλο υπόστρωμα για την υποστήριξη της μικροβιακής αποδόμησης.

Ο υγροβιότοπος PPB, που συνδυάζει ανακυκλωμένο πλαστικό με την προσθήκη βιοεξανθρακώματος, εμφανίζει γενικά χαμηλότερες τελικές συγκεντρώσεις BOD₅ σε σύγκριση με τον PP, με τις περισσότερες τιμές να παραμένουν κάτω των 40 mg/L. Η προσθήκη βιοεξανθρακώματος ενισχύει τη διαδικασία απομάκρυνσης του οργανικού φορτίου, μέσω μηχανισμών προσρόφησης, αλλά και λόγω της βελτίωσης των συνθηκών για την ανάπτυξη μικροοργανισμών που αποδομούν τη βιοδιασπώμενη οργανική ύλη (Lu et al., 2019). Επιπλέον, έχει διαπιστωθεί ότι ο βιοάνθρακας μπορεί να ενισχύσει τις αναερόβιες διεργασίες που συνεισφέρουν στην αποικοδόμηση των οργανικών ρύπων, βελτιώνοντας τη συνολική απόδοση του συστήματος επεξεργασίας (Gupta et al., 2020).

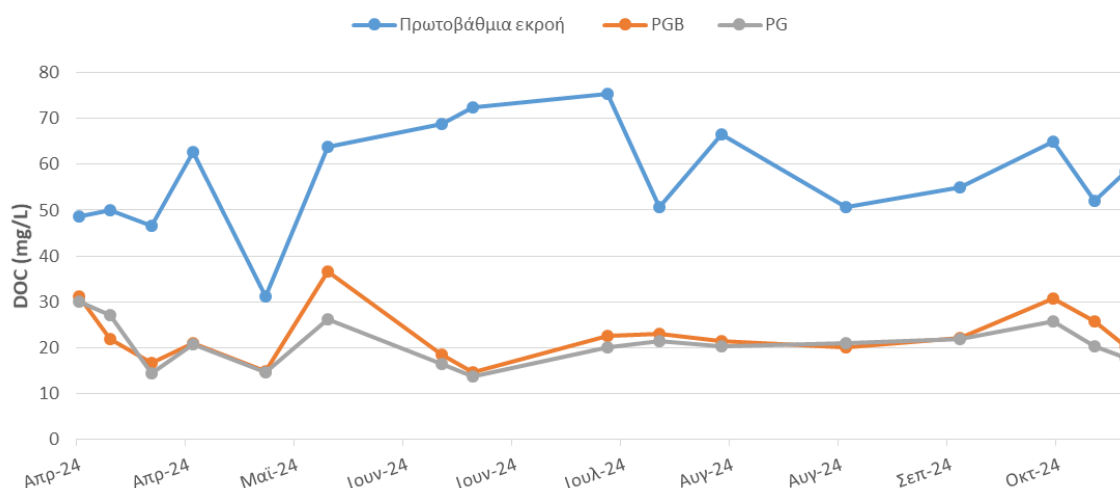
Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης επιβεβαιώνουν ότι οι τεχνητοί υγροβιότοποι με ανακυκλωμένο πλαστικό ως υπόστρωμα μπορούν να επιτύχουν ικανοποιητική απομάκρυνση του BOD₅, μειώνοντας το οργανικό φορτίο στα επεξεργασμένα λύματα. Η προσθήκη βιοεξανθρακώματος βελτιώνει περαιτέρω την αποδοτικότητα του συστήματος, πιθανότατα λόγω της υψηλής ειδικής επιφάνειάς του και της ικανότητάς του να λειτουργεί ως φορέας μικροβιακής δραστηριότητας.

Πίνακας 7: Μέσες Τιμές και τυπικές αποκλίσεις Βιοχημικά Απαιτούμενου Οξυγόνου (BOD)

Μήνας	Πρωτοβάθμια επεξεργασμένο Λύμα (mg/L)	PG (mg/L)	PGB (mg/L)	PPB (mg/L)	PP (mg/L)
Απρ-24	209,25±25,47	69,75±45,35	73,75±31,19	52,57±13,81	75,63±26,95
Μαϊ-24	303,25±94,88	138,50±79,72	143,50±85,64	161,50±113,45	155,25±88,24
Ιουν-24	382,00±67,88	183,00±17,68	294,00±47,38	281,50±98,99	41,86±122,33
Ιουλ-24	320,00±84,85	57,50±7,07	98,00±3,54	87,00±7,35	47,48±18,74
Αυγ-24	407,00±103,94	153,00±4,95	81,00±0,71	51,90±9,55	56,90±13,86
Σεπ-24	210,00±139,30	152,00±0,71	76,00±3,54	95,00±30,48	115,00±41,08
Οκτ-24	266,50±79,90	86,50±90,51	18,50±4,95	20,00±2,83	48,50±34,65

3.8 DOC (Διαλυμένος Οργανικός Άνθρακας)

Όπως φαίνεται και στα ακόλουθα διαγράμματα, οι συγκεντρώσεις DOC στις εκροές των συστημάτων μειώνονταν τους πρώτους μήνες. Στην συνέχεια παρέμειναν σταθερές σε χαμηλά επίπεδα. Μεγαλύτερη σταθερότητα παρατηρείται στα συστήματα PPB & PP. Ενώ στα PG & PGB υπάρχουν συγκριτικά μεγαλύτερες διακυμάνσεις.

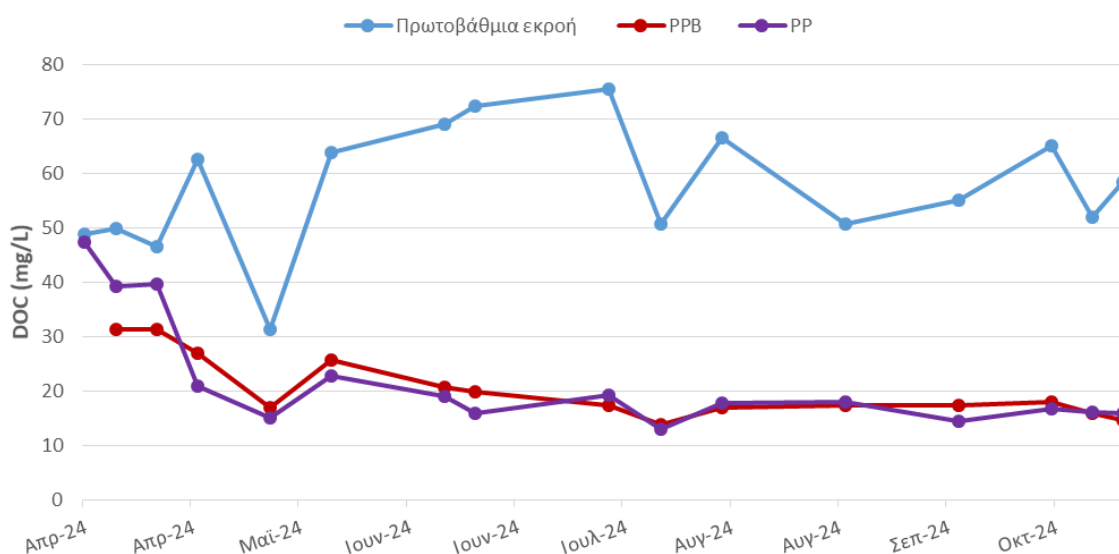


Διάγραμμα 9: Συγκεντρώσεις DOC στα συστήματα PG & PGB σε σχέση με την εισροή (input)

Η αρχική συγκέντρωση του DOC στα εισερχόμενα λύματα (Primary) είναι ιδιαίτερα υψηλή, κυμαινόμενη μεταξύ 30-80 mg/L, γεγονός που αντικατοπτρίζει το σημαντικό οργανικό φορτίο των λυμάτων που εισέρχονται στους υδροβιότοπους. Μετά την επεξεργασία, οι συγκεντρώσεις του DOC μειώνονται σημαντικά στους δύο τύπους υδροβιότοπων. Ο υδροβιότοπος PG παρουσιάζει αρχικά μια απότομη μείωση του DOC, με τις συγκεντρώσεις να σταθεροποιούνται σε τιμές μεταξύ 10-30 mg/L, πιθανώς λόγω της μικροβιακής αποικοδόμησης και της προσρόφησης του οργανικού φορτίου στις επιφάνειες των χαλικιών. Η προσρόφηση και η ανάπτυξη μικροβιακών κοινοτήτων στα στερεά υποστρώματα έχουν αποδειχθεί βασικοί μηχανισμοί στη μείωση του DOC σε τεχνητούς υδροβιότοπους (Vymazal, 2011). Ο υδροβιότοπος PGB, που περιέχει επιπλέον βιοάνθρακα, εμφανίζει παρόμοια τάση με τον PG, αλλά οι συγκεντρώσεις του DOC είναι ελαφρώς χαμηλότερες, ειδικά κατά τους τελευταίους μήνες της παρακολούθησης. Αυτό υποδηλώνει ότι η προσθήκη βιοεξανθρακώματος ενισχύει την απομάκρυνση του DOC, λόγω μηχανισμών όπως η προσρόφηση καθώς και μέσω

ενίσχυσης της μικροβιακής δραστηριότητας, όπως έχει αναφερθεί σε παλαιότερες μελέτες (Zhao et al., 2018).

Η συνολική σύγκριση μεταξύ των δύο συστημάτων δείχνει ότι και οι δύο υδροβιότοποι επιτυγχάνουν αποτελεσματική μείωση του DOC, με τον PGB να εμφανίζει ελαφρώς βελτιωμένη απόδοση. Τα αποτελέσματα αυτά ευθυγραμμίζονται με προηγούμενες έρευνες που έχουν αναδείξει τον ρόλο του βιοεξανθρακώματος στην αύξηση της βιοαποδόμησης και της κατακράτησης οργανικών ενώσεων σε συστήματα φυσικής επεξεργασίας λυμάτων (Xu et al., 2020). Ωστόσο, η μικρή διαφορά μεταξύ των δύο συστημάτων υποδηλώνει ότι ο κυρίαρχος μηχανισμός απομάκρυνσης του DOC είναι η μικροβιακή αποικοδόμηση, η οποία ενισχύεται από τη φυσικοχημική δομή του υποστρώματος. Η προσθήκη βιοεξανθρακώματος προσφέρει ένα επιπλέον όφελος, αλλά η συνολική απόδοσή του εξαρτάται από την αλληλεπίδραση με το μικροβιακό περιβάλλον και τις συνθήκες ροής των υδροβιότοπων. Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης αναδεικνύουν τη δυναμική των τεχνητών υδροβιότοπων ως μια βιώσιμη λύση για την επεξεργασία αστικών λυμάτων, ενώ παράλληλα επιβεβαιώνουν τη χρησιμότητα του βιοεξανθρακώματος ως ενισχυτικού παράγοντα στη συγκράτηση του οργανικού φορτίου.



Διάγραμμα 10: Συγκεντρώσεις DOC στα συστήματα PP & PPB σε σχέση με την εισροή (input)

Μετά την επεξεργασία, τόσο ο PP όσο και ο PPB εμφανίζουν σημαντική μείωση του DOC, με τις συγκεντρώσεις τους να σταθεροποιούνται σε χαμηλότερα επίπεδα σε σύγκριση με το εισερχόμενο φορτίο. Ο υγροβιότοπος PP εμφανίζει αρχικά μια ταχεία μείωση του DOC, φθάνοντας σε τιμές της τάξης των 15-30 mg/L, υποδεικνύοντας ότι το ανακυκλωμένο πλαστικό λειτουργεί αποτελεσματικά ως υπόστρωμα για την ανάπτυξη μικροβιακών κοινοτήτων που αποδομούν το οργανικό υλικό. Ωστόσο, σε κάποιες χρονικές στιγμές παρατηρούνται διακυμάνσεις στις τιμές του DOC, γεγονός που πιθανώς οφείλεται σε αλλαγές στη μικροβιακή δραστηριότητα και στις υδραυλικές συνθήκες του συστήματος.

Ο υγροβιότοπος PPB, που περιέχει βιοεξανθράκωμα εμφανίζει γενικά ελαφρώς χαμηλότερες συγκεντρώσεις DOC σε σύγκριση με τον PP. Η προσθήκη του βιοάνθρακα φαίνεται να ενισχύει τη συγκράτηση οργανικών ενώσεων, ενώ ταυτόχρονα παρέχει επιπλέον επιφάνειες για την ανάπτυξη μικροβιακών κοινοτήτων. Αυτό το εύρημα συμφωνεί με προηγούμενες μελέτες που έχουν αναδείξει τη συμβολή του βιοάνθρακα στη μείωση του οργανικού φορτίου μέσω προσρόφησης και μικροβιακής αποικοδόμησης (Jiang et al., 2019). Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι κατά τη διάρκεια της περιόδου παρακολούθησης, οι διαφορές μεταξύ των δύο συστημάτων τείνουν να μειώνονται, γεγονός που υποδηλώνει ότι ο κυρίαρχος μηχανισμός απομάκρυνσης του DOC είναι η μικροβιακή δραστηριότητα και ότι η προσθήκη βιοεξανθρακώματος λειτουργεί συμπληρωματικά, αλλά δεν αποτελεί τον καθοριστικό παράγοντα της απομάκρυνσης.

Πίνακας 8: Μέσες Τιμές και τυπικές αποκλίσεις Διαλυμένου Οργανικού άνθρακα (DOC)

Μήνα ς	Πρωτοβάθμια επεξεργασμένο Λύμα (mg/L)	PG (mg/L)	PGB (mg/L)	PPB (mg/L)	PP (mg/L)
Απρ-24	51,93±7,26	22,70±6,16	23,10±6,9 5	29,93±2,5 4	36,75±11,2 0
Μαϊ-24	47,47±23,00	25,73±15,4 6	20,36±8,1 5	21,26±6,1 7	18,92±5,40
Ιουν-24	70,60±2,40	16,60±2,69	15,10±1,8 4	20,20±0,5 7	17,45±2,33
Ιουλ- 24	63,03±17,49	22,80±0,28	20,73±0,8 8	15,61±2,5 3	16,14±4,33
Αυγ-24	58,62±11,26	20,80±0,99	20,65±0,4 9	17,06±0,3 0	17,97±0,16
Σεπ-24	54,95±3,03	55,95±1,41	56,95±0,7 1	17,30±0,0 2	14,39±2,61

Οκτ-24	58,41±7,02	25,62±6,48	21,29±5,2 4	16,24±3,9 7	16,19±1,66
--------	------------	------------	----------------	----------------	------------

3.9 TN (Ολικό Άζωτο)

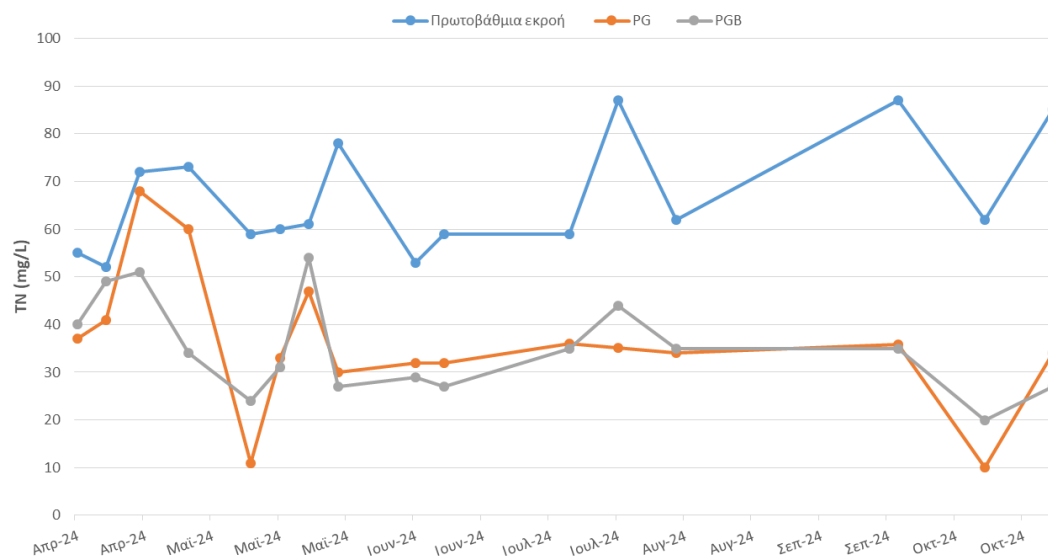
Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η συγκέντρωση του ολικού αζώτου (Total Nitrogen) στα εισερχόμενα λύματα ήταν υψηλή, με μέσες τιμές $68,1 \pm 10,9$ mg/L, και παρουσίασε μείωση μετά την επεξεργασία στους υγροβιότοπους, αν και με διακυμάνσεις μεταξύ των διαφορετικών υποστρωμάτων. Συγκεκριμένα, τα συστήματα με υπόστρωμα χαλικιών (PG και PGB) πέτυχαν μέση απομάκρυνση TN της τάξης του $38,2 \pm 5,7\%$, ενώ τα συστήματα με ανακυκλωμένο πλαστικό (PP και PPB) παρουσίασαν χαμηλότερες αποδόσεις, με μέγιστη απομάκρυνση που δεν ξεπέρασε το $26,4 \pm 4,8\%$.

Η συγκέντρωση του αμμωνιακού αζώτου ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) στα εισερχόμενα λύματα κυμάνθηκε από 30 έως 70 mg/L, με μέση τιμή $51,3 \pm 8,5$ mg/L. Οι υγροβιότοποι PG και PGB σημείωσαν σημαντική απομάκρυνση $\text{NH}_4^+\text{-N}$, φτάνοντας σε ορισμένες περιόδους έως και μείωση 10 mg/L, κυρίως λόγω αυξημένης μικροβιακής δραστηριότητας και παθητικού αερισμού μέσω των καλαμιών (Brix, 1997; Vymazal, 2011). Αντίθετα, οι PP και PPB εμφάνισαν περιορισμένη ικανότητα απομάκρυνσης, με συγκεντρώσεις $\text{NH}_4^+\text{-N}$ που παρέμειναν >40 mg/L.

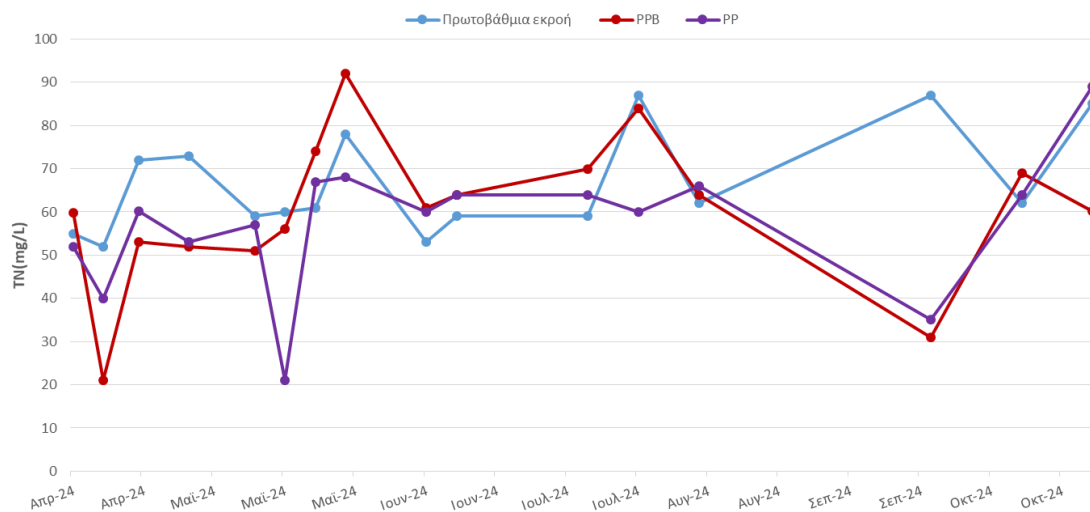
Σημαντικό εύρημα αποτελεί η συνεχής μη ανίχνευση νιτρικών ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) σε όλα τα συστήματα, γεγονός που υποδηλώνει την επικράτηση αναερόβιων συνθηκών εντός των υγροβιότοπων. Αυτό συμφωνεί με τη βιβλιογραφία, σύμφωνα με την οποία η απουσία οξυγόνου περιορίζει τη νιτροποίηση και συνεπώς την παραγωγή νιτρικών, καθιστώντας την απομάκρυνση του αζώτου εξαρτώμενη κυρίως από προσρόφηση, αμμωνιοποίηση και την αναερόβια οξείδωση της αμμωνίας (anammox) (Liu et al., 2012; Wang et al., 2020).

Οι συγκεντρώσεις του συνολικού αζώτου (TN) στα εισερχόμενα λύματα κυμάνθηκαν γύρω από τα 60–65 mg/L, με μέση τιμή $62,4 \pm 5,2$ mg/L. Στα συστήματα PG και PGB, καταγράφηκαν μέσες συγκεντρώσεις εκροής $25,2 \pm 3,1$ mg/L και $21,3 \pm 2,8$ mg/L αντίστοιχα, που αντιστοιχούν σε ποσοστά απομάκρυνσης περίπου 59% και 66%. Αντίθετα, στις μονάδες PP και PPB, οι συγκεντρώσεις TN στην εκροή ήταν σημαντικά

υψηλότερες, με μέσους όρους $39,8 \pm 4,6$ mg/L και $35,1 \pm 5,0$ mg/L, και αντίστοιχα χαμηλότερες αποδόσεις απομάκρυνσης της τάξης του 36% και 42%.



Διάγραμμα 11: Συγκεντρώσεις TN στα συστήματα PG & PGB σε σχέση με την εισροή (input)



Διάγραμμα 12: Συγκεντρώσεις TN στα συστήματα PP & PPB σε σχέση με την εισροή (input)

Οι διαφορές αυτές αποδίδονται κυρίως στον συνδυασμό φυσικών και βιολογικών παραγόντων που επηρεάζονται από τη σύσταση και τη γεωμετρία του υποστρώματος. Οι μονάδες με χαλίκι (PG, PGB) επιτρέπουν καλύτερη κυκλοφορία του λύματος, υποστηρίζοντας τη δημιουργία μικρο-ζωνών με ταυτόχρονη παρουσία αερόβιων και ανοξικών περιοχών, οι οποίες είναι κρίσιμες για τη νιτροποίηση-απονιτροποίηση (Tanner, 2001). Επιπλέον, το χαλίκι διαθέτει μεγαλύτερη σταθερότητα και προσφέρει περισσότερο χώρο προσκόλλησης για τα μικρόβια που εμπλέκονται στις διαδικασίες μετατροπής του αζώτου.

Η προσθήκη βιοεξανθρακώματος στις μονάδες PGB και PPB φαίνεται να ενισχύει περαιτέρω την απομάκρυνση του TN. Το βιοεξανθράκωμα δρα ως μικροδομή με υψηλή προσροφητική ικανότητα και προσφέρει πλούσιο υπόστρωμα για την εγκατάσταση μικροβιακών κοινοτήτων, ενισχύοντας τη βιοαποδόμηση των αζωτούχων ενώσεων (Liu et al., 2019). Ωστόσο, στις μονάδες με πλαστικό υπόστρωμα (PP, PPB), η απουσία πόρων και η ομαλή επιφάνεια του HDPE φαίνεται να περιορίζουν τη μικροβιακή εγκατάσταση και τη σταθεροποίηση της βιομάζας, μειώνοντας έτσι την αποτελεσματικότητα των διεργασιών απομάκρυνσης.

Η αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης του TN στις μονάδες PG και PGB βρίσκεται εντός ή άνω των ορίων που αναφέρονται στη βιβλιογραφία για τεχνητούς υγροβιότοπους, όπου τα ποσοστά κυμαίνονται από 40% έως 70% ανάλογα με τη γεωμετρία, τη ροή και το είδος του υποστρώματος (Vymazal, 2007; Kadlec & Wallace, 2009). Η παρουσία του βιοεξανθρακώματος και του κατάλληλου υποστρώματος δημιουργεί συνθήκες που υποστηρίζουν πολύπλοκες μικροβιακές διεργασίες, όπως απονιτροποίηση σε ανοξικές ζώνες και πιθανή anammox σε αναερόβιες (Wang et al., 2020).

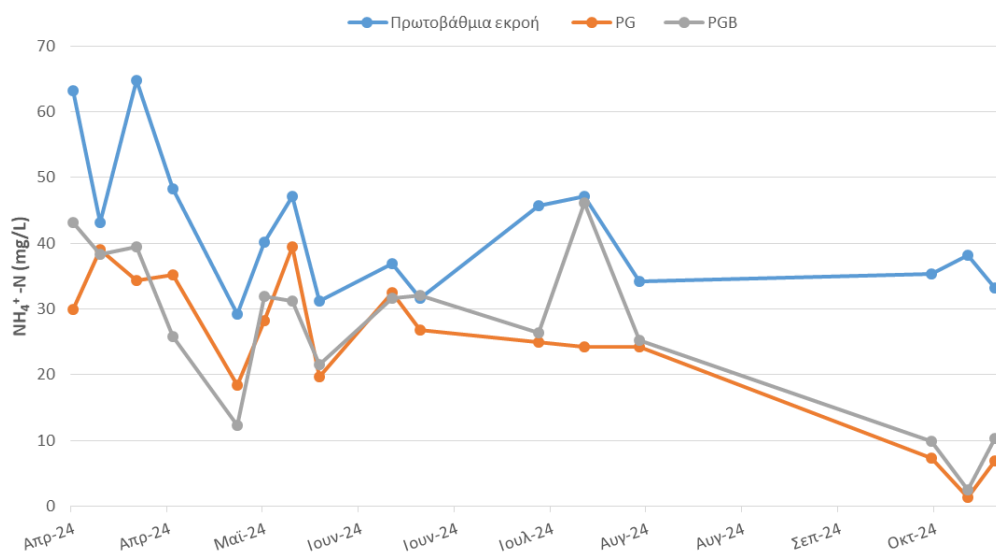
Πίνακας 9: Μέσες Τιμές και τυπικές αποκλίσεις Ολικού Αζώτου (TN)

Μήνας	Πρωτοβάθμια επεξεργασμένο Λύμα (mg/L)	PG (mg/L)	PGB (mg/L)	PPB (mg/L)	PP (mg/L)
Απρ-24	63,00±11,05	51,50±14,89	43,50±7,94	46,45±17,32	51,30±8,37

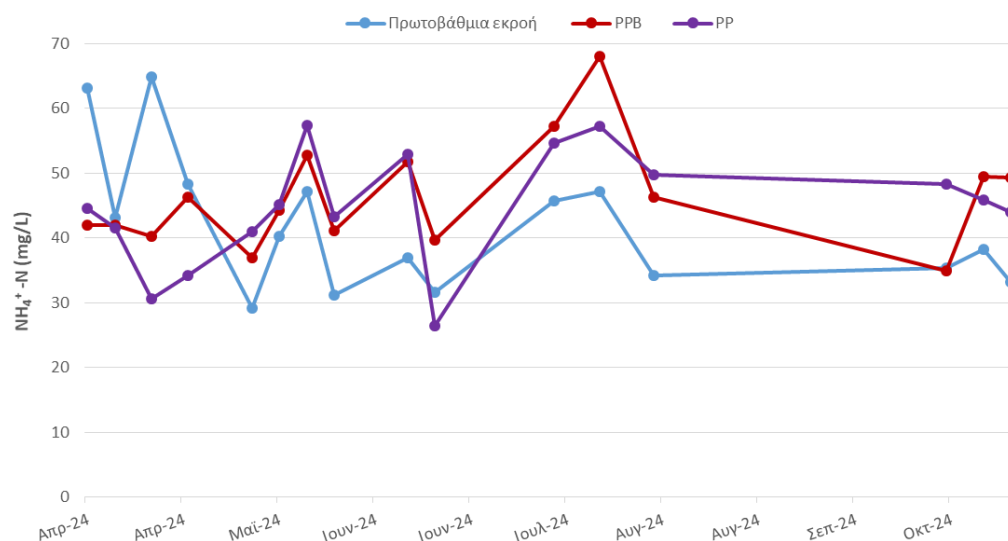
Μαϊ-24	64,50±9,04	30,25±14,8 2	34,00±13,6 4	68,25±18,6 6	53,25±22,0 7
Ιουν-24	56,00±4,24	28,00±0,00	76,50±1,41	64,00±2,12	50,58±2,83
Ιουλ-24	34,00±19,80	31,00±0,57	67,00±6,36	64,00±9,90	42,37±2,83
Αυγ-24	62,00±17,68	34,00±0,85	34,90±6,43	64,00±14,1 4	66,00±4,24
Σεπ-24	87,00±17,68	35,80±1,27	35,00±0,07	31,00±23,3 3	35,00±21,9 2
Οκτ-24	73,50±16,26	22,00±16,9 7	23,50±4,95	64,55±6,29	76,50±17,6 8

3.10 NH₄⁺-N (Αμμωνιακό Άζωτο)

Η απομάκρυνση του αμμωνιακού αζώτου (NH₄⁺-N) στους τεχνητούς υγροβιότοπους κατακόρυφης ροής (Vertical Flow – VF) πραγματοποιείται κυρίως μέσω της νιτροποίησης, μιας αερόβιας μικροβιακής διεργασίας κατά την οποία το αμμώνιο μετατρέπεται σε νιτρικά. Η διαδικασία εξαρτάται έντονα από την παρουσία οξυγόνου στο υπόστρωμα, καθώς και από τη θερμοκρασία, την υδραυλική φόρτιση και τη μικροβιακή δραστηριότητα (Knowles et al., 2011; Wu et al., 2014).



Διάγραμμα 13: Συγκεντρώσεις NH₄-N στα συστήματα PG & PGB σε σχέση με την εισροή (input)



Διάγραμμα 14: Συγκεντρώσεις $\text{NH}_4\text{-N}$ στα συστήματα PG & PGB σε σχέση με την εισροή (input)

Στην παρούσα μελέτη, η συγκέντρωση $\text{NH}_4\text{-N}$ στα εισερχόμενα λύματα κυμάνθηκε μεταξύ 40–60 mg/L, με μέση τιμή $51,3 \pm 6,9$ mg/L. Οι μονάδες PG και PGB εμφάνισαν σημαντική μείωση στην εκροή, με τις τελικές συγκεντρώσεις να φτάνουν κάτω από 10 mg/L και ποσοστά απομάκρυνσης έως και 85%, ιδιαίτερα κατά τους θερμότερους μήνες. Αυτό υποδεικνύει επαρκή οξυγόνωση του υποστρώματος, που πιθανώς ενισχύεται από τη μεταφορά οξυγόνου μέσω του ριζικού συστήματος των καλαμιών (*Phragmites australis*), αλλά και από τη δομή του υποστρώματος με χαλίκι, το οποίο προσφέρει σταθερότητα και επιφάνεια προσκόλλησης για τους νιτροποιητικούς μικροοργανισμούς (Brix & Arias, 2005).

Η προσθήκη βιοεξανθρακώματος στην περίπτωση της PGB φαίνεται να ενίσχυσε περαιτέρω την απόδοση, πιθανώς λόγω της υψηλής πορώδους δομής του βιοεξανθρακώματος, η οποία βελτιώνει την υδατοϊκανότητα και δημιουργεί σταθερά μικροπεριβάλλοντα για την ανάπτυξη εξειδικευμένων βακτηρίων (Zhang et al., 2020; Chen et al., 2021).

Αντίθετα, οι μονάδες PP και PPB, με υπόστρωμα ανακυκλωμένου πλαστικού (HDPE), παρουσίασαν χαμηλότερες αποδόσεις, με τις συγκεντρώσεις $\text{NH}_4\text{-N}$ να παραμένουν σταθερά πάνω από 35 mg/L και ποσοστά απομάκρυνσης 20–40%. Αυτό αποδίδεται κυρίως στο ότι το πλαστικό, λόγω της λείας και μη πορώδους επιφάνειάς του, δεν

υποστηρίζει ικανοποιητικά την ανάπτυξη και σταθεροποίηση της μικροβιακής βιομάζας, περιορίζοντας έτσι τη δραστηριότητα των νιτροποιητικών βακτηρίων (Wu et al., 2016). Επιπλέον, στις μονάδες αυτές δεν επιτεύχθηκε επαρκής κατανομή του αέρα στο σύνολο του υποστρώματος, με αποτέλεσμα χαμηλότερη μεταφορά οξυγόνου και μειωμένη απόδοση νιτροποίησης.

Πίνακας 10: Μέσες Τιμές και τυπικές αποκλίσεις Αμμωνιακού Αζώτου

Μήνας	Πρωτοβάθμια επεξεργασμένο Λύμα (mg/L)	PG (mg/L)	PGB (mg/L)	PPB (mg/L)	PP (mg/L)
Απρ-24	54,86±10,78	34,60±3,73	36,69±7,56	42,58±2,54	37,74±6,48
Μαϊ-24	36,90±8,32	26,45±9,70	24,21±9,30	43,79±6,69	46,66±7,34
Ιουν-24	34,24±3,76	29,67±4,08	31,80±0,31	45,72±8,59	39,60±18,75
Ιουλ-24	46,43±0,94	24,65±0,49	36,21±14,01	62,60±7,63	55,92±1,82
Αυγ-24	34,24±9,09	24,20±0,07	25,20±14,79	46,30±15,35	49,67±5,33
Οκτ-24	35,57±2,54	5,12±3,35	7,58±4,41	44,55±8,32	46,00±2,18

Συνεπώς, τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας επιβεβαιώνουν ότι η αποδοτική απομάκρυνση $\text{NH}_4^+\text{-N}$ σε ΤΥ κατακόρυφης ροής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον τύπο και τη δομή του υποστρώματος, καθώς και από την ικανότητα διατήρησης κατάλληλων συνθηκών οξυγόνωσης και μικροβιακής σταθερότητας.

3.11 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ (Νιτρικό Άζωτο)

Η απουσία νιτρικών ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) στην εκροή των τεχνητών υδροβιότοπων που μελετήθηκαν δεν υποδηλώνει έλλειψη νιτροποίησης, αλλά αντιθέτως καταδεικνύει τη λειτουργία ενός πλήρους μικροβιακού κύκλου του αζώτου στο εσωτερικό των

συστημάτων. Τα παραγόμενα νιτρικά μέσω της νιτροποίησης καταναλώνονται άμεσα μέσω απονιτροποίησης, με αποτέλεσμα να μην ανιχνεύονται στα τελικά δείγματα.

Σύμφωνα με τους Kadlec & Wallace (2009), τα λύματα που προέρχονται από πρωτοβάθμια επεξεργασία περιέχουν κυρίως αμμωνιακό άζωτο ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) και σχεδόν καθόλου νιτρικά, καθώς η νιτροποίηση δεν πραγματοποιείται σε αναερόβιες συνθήκες. Ωστόσο, στους τεχνητούς υγροβιότοπους και ιδιαίτερα στους κατακόρυφης ροής (Vertical Flow), η παρουσία οξυγόνου στο ανώτερο στρώμα του υποστρώματος επιτρέπει την τοπική νιτροποίηση, δηλαδή τη μετατροπή του $\text{NH}_4^+\text{-N}$ σε $\text{NO}_3^-\text{-N}$ μέσω της δράσης νιτροποιητικών βακτηρίων (Vymazal, 2007; Wu et al., 2014).

Το παραγόμενο νιτρικό άζωτο, ωστόσο, καταναλώνεται άμεσα μέσω της απονιτροποίησης σε αναερόβιες ζώνες του υγροβιότοπου, κυρίως κοντά στο ριζικό σύστημα των φυτών και στα βαθύτερα στρώματα του υποστρώματος, όπου επικρατούν ανοξικές ή αναερόβιες συνθήκες. Εκεί, τα απονιτροποιητικά βακτήρια μετατρέπουν τα νιτρικά σε αέριο άζωτο (N_2), το οποίο αποβάλλεται στην ατμόσφαιρα (Wu et al., 2016; Zhang et al., 2020).

Αυτός ο συνδυασμός νιτροποίησης σε μικροοξειδωτικές περιοχές και άμεσης απονιτροποίησης σε αναερόβιες ζώνες οδηγεί στο φαινόμενο της απουσίας ανιχνεύσιμων επιπέδων νιτρικών στην εκροή, παρά την ενεργή μετατροπή του αμμωνιακού αζώτου εντός του συστήματος.

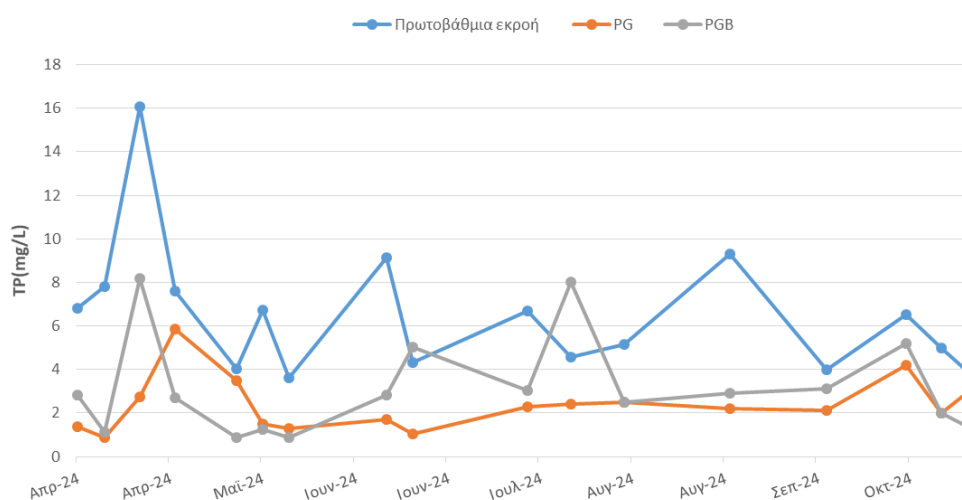
Η παραπάνω συμπεριφορά έχει αναφερθεί εκτενώς στη βιβλιογραφία, ειδικά σε συστήματα που βασίζονται σε πρωτοβάθμια επεξεργασία και εμφανίζουν χαμηλή συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου ή τοπικά αερόβια-αναερόβια μικροπεριβάλλοντα (Vymazal, 2007; Kadlec & Wallace, 2009; Chen et al., 2021).

3.12 TP (Ολικός Φώσφορος)

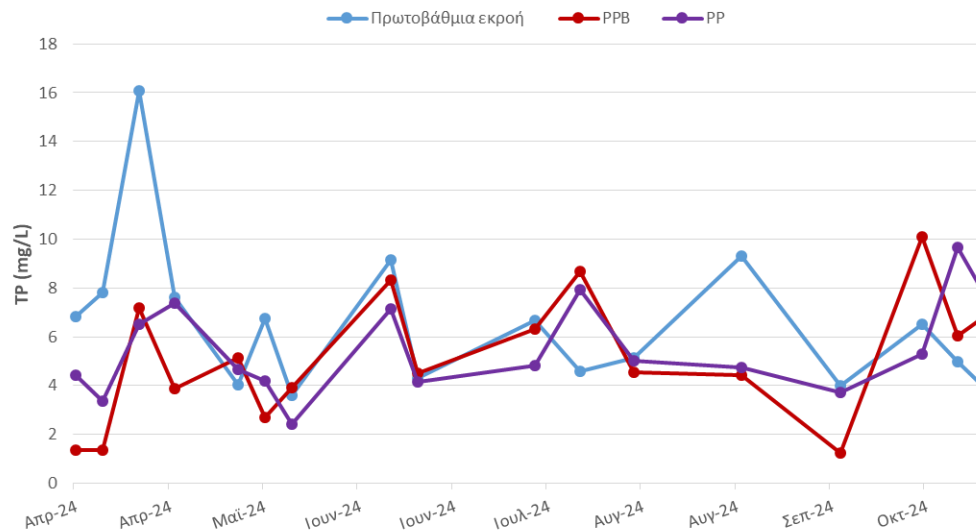
Η απομάκρυνση του ολικού φωσφόρου (TP) στους τεχνητούς υγροβιότοπους εξαρτάται κυρίως από διεργασίες όπως η καθίζηση, η προσρόφηση στα στερεά σωματίδια του υποστρώματος και η βιολογική πρόσληψη από μικροοργανισμούς και φυτά. Οι συγκεντρώσεις TP στην είσοδο κυμαίνονται γύρω στα 42 mg/L, ενώ στην εκροή παρατηρούνται σημαντικές διακυμάνσεις ανάλογα με τον τύπο του

υποστρώματος. Οι μονάδες PG και PGB εμφανίζουν τις καλύτερες αποδόσεις απομάκρυνσης, με τις συγκεντρώσεις στην εκροή να μειώνονται στα 25 mg/L και 27 mg/L αντίστοιχα, που αντιστοιχεί σε ποσοστά απομάκρυνσης 41% και 40%. Αντίθετα, οι μονάδες PP και PPB εμφανίζουν χαμηλότερη απομάκρυνση, με τις συγκεντρώσεις να διατηρούνται σε 45 mg/L, που αντιστοιχεί σε ποσοστά 11% και 26% αντίστοιχα. Οι σημαντικά υψηλότερες συγκεντρώσεις φωσφόρου στις μονάδες με πλαστικό υπόστρωμα (PP, PPB) υποδηλώνουν ότι το συγκεκριμένο υλικό δεν συμβάλλει ιδιαίτερα στη δέσμευση του φωσφόρου, σε αντίθεση με το χαλίκι, το οποίο διαθέτει μεγαλύτερη ικανότητα συγκράτησης μέσω φυσικοχημικών μηχανισμών.

Σύμφωνα με τη μελέτη των Vymazal (2007), τα ποσοστά απομάκρυνσης του φωσφόρου στους τεχνητούς υδροβιότοπους είναι συχνά χαμηλότερα από εκείνα του αζώτου, καθώς οι μηχανισμοί δέσμευσης του φωσφόρου εξαρτώνται κυρίως από την παρουσία αργίλου, σιδήρου, ασβεστίου ή αλουμινίου στο υπόστρωμα, που διευκολύνουν την ακινητοποίησή του μέσω καθίζησης ή συμπλόκωσης. Επιπλέον, η απομάκρυνση του φωσφόρου μέσω της βιολογικής πρόσληψης είναι περιορισμένη, καθώς η ανάπτυξη των φυτών δεσμεύει μόνο ένα μικρό ποσοστό του συνολικού φωσφόρου που εισέρχεται στο σύστημα (Kadlec & Wallace, 2009).



Διάγραμμα 15: Συγκεντρώσεις TP στα συστήματα PG & PGB σε σχέση με την εισροή (input)



Διάγραμμα 16: Συγκεντρώσεις TP στα συστήματα PP & PPB σε σχέση με την εισροή (input)

Στην παρούσα έρευνα, οι συγκεντρώσεις TP στην είσοδο είναι κατά μέσο όρο 42 mg/L. Οι μονάδες PG και PGB εμφανίζουν τη μεγαλύτερη αποδοτικότητα, με συγκεντρώσεις TP στην εκροή 25 mg/L και 27 mg/L, που αντιστοιχούν σε ποσοστά απομάκρυνσης 41% και 40% αντίστοιχα. Αυτό ευθυγραμμίζεται με τη βιβλιογραφία, καθώς οι Kadlec & Wallace (2009) αναφέρουν ότι σε τεχνητούς υδροβιότοπους με χαλίκι ως υπόστρωμα, η απομάκρυνση φωσφόρου μπορεί να φτάσει το 40-50%, ιδιαίτερα όταν το υπόστρωμα περιέχει μεταλλικά στοιχεία που διευκολύνουν την καθίζηση και την προσρόφηση. Αντίθετα, στις μονάδες PP και PPB, οι συγκεντρώσεις TP παραμένουν σε 45 mg/L, με ποσοστά απομάκρυνσης μόλις 11% και 26%, αντίστοιχα. Η μειωμένη απομάκρυνση στις μονάδες με πλαστικό υπόστρωμα μπορεί να εξηγηθεί από τη χαμηλή ικανότητα του πλαστικού να δεσμεύει τον φώσφορο, καθώς στερείται των επιφανειακών χαρακτηριστικών και των μεταλλικών ενώσεων που θα μπορούσαν να ευνοήσουν την προσρόφηση του (Wu et al., 2014).

Ένα ενδιαφέρον εύρημα είναι η σταδιακή μείωση του TP στις μονάδες PG και PGB προς το τέλος της περιόδου λειτουργίας, γεγονός που μπορεί να υποδηλώνει ότι το υπόστρωμα χαλικιού ανέπτυξε μεγαλύτερη ικανότητα συγκράτησης του φωσφόρου με την πάροδο του χρόνου, πιθανώς λόγω της συσσώρευσης μικροοργανισμών ή της σταδιακής δημιουργίας ενώσεων φωσφόρου με ανόργανα συστατικά του υποστρώματος (Arias et al., 2001). Αντίθετα, στις μονάδες PP και PPB, οι

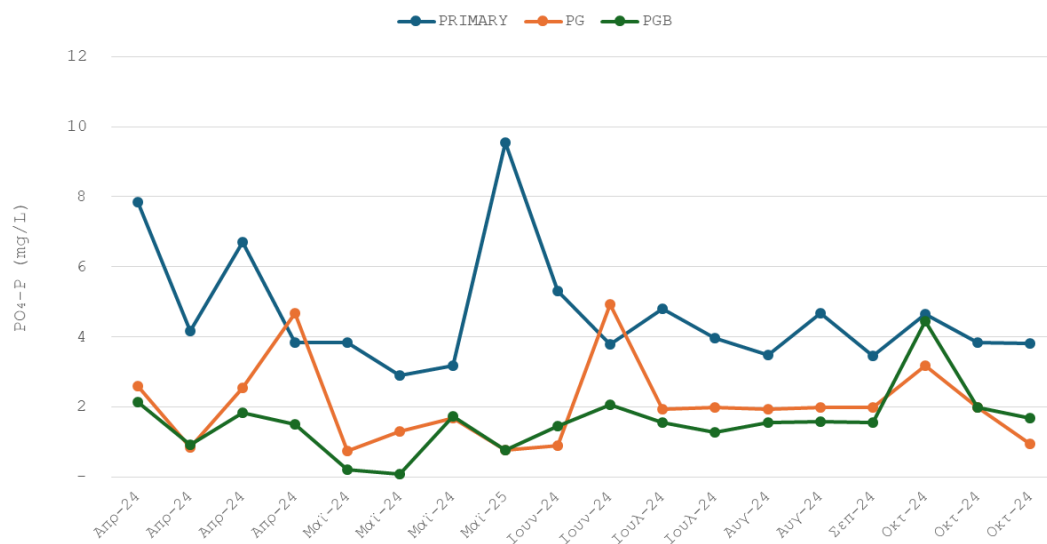
συγκεντρώσεις TP διατηρούνται υψηλές, γεγονός που δείχνει ότι η απομάκρυνση δεν βελτιώθηκε με την πάροδο του χρόνου.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας με τη βιβλιογραφία, παρατηρούμε ότι οι μονάδες PG και PGB έχουν αποδόσεις που βρίσκονται εντός του εύρους που αναφέρουν οι Vymazal (2007) και Kadlec & Wallace (2009), ενώ οι μονάδες PP και PPB εμφανίζουν χαμηλότερη απομάκρυνση φωσφόρου από τον μέσο όρο που καταγράφεται σε συστήματα με ανόργανα υποστρώματα (Wu et al., 2014). Αυτό επιβεβαιώνει τη σημασία της επιλογής κατάλληλου υποστρώματος για την αποδοτική απομάκρυνση του φωσφόρου και δείχνει ότι η χρήση χαλικιού είναι πιο αποτελεσματική σε σχέση με το πλαστικό όσον αφορά την κατακράτηση και τη μείωση των συγκεντρώσεων TP στην εκροή.

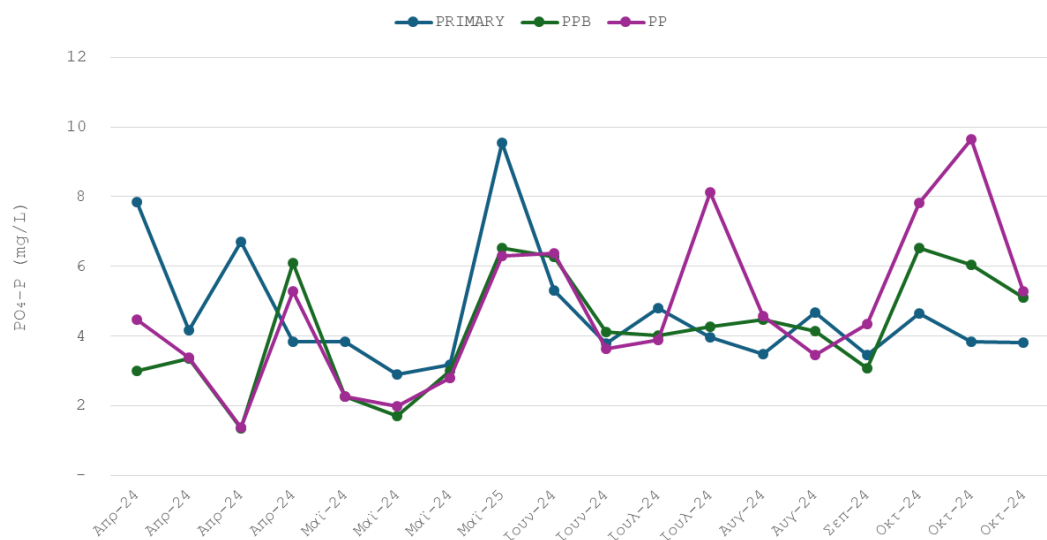
Πίνακας 11: Μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις Ολικού Φωσφόρου (TP)

Μήνας	Πρωτοβάθμια επεξεργασμένο Λύμα (mg/L)	PG (mg/L)	PGB (mg/L)	PPB (mg/L)	PP (mg/L)
Απρ-24	9,58±4,35	2,71±2,25	3,71±3,09	3,45±2,76	5,42±1,86
Μαϊ-24	5,95±2,72	1,88±1,09	0,96±0,20	4,97±2,32	4,48±1,74
Ιουν-24	6,73±3,42	1,38±0,49	3,92±1,54	6,42±2,72	5,65±2,09
Ιουλ-24	5,19±1,48	1,91±0,07	5,35±3,53	6,50±1,68	5,63±2,20
Αυγ-24	7,23±2,95	2,35±0,21	2,70±0,28	4,48±0,08	4,88±0,21
Σεπ-24	3,98±3,77	2,10±0,07	3,10±0,14	1,22±2,26	3,71±0,72
Οκτ-24	5,14±1,30	3,04±1,11	2,85±2,06	7,66±2,15	7,57±2,18

3.13 PO₄-P (Ορθοφωσφορικά)



Διάγραμμα 17: Συγκεντρώσεις PO₄-P στα συστήματα PG & PGB σε σχέση με την εισροή (input)



Διάγραμμα 18: Συγκεντρώσεις PO₄-P στα συστήματα PPB & PP σε σχέση με την εισροή (input)

Η συγκέντρωση PO₄³⁻-P στην είσοδο των υδροβιότοπων ήταν περίπου 42 mg/L. Οι μονάδες PG και PGB, που χρησιμοποιούν χαλίκι ως υπόστρωμα, παρουσίασαν συγκεντρώσεις στην εκροή 25 mg/L και 27 mg/L, με αποδόσεις απομάκρυνσης 41% και 40% αντίστοιχα. Αυτό ευθυγραμμίζεται με τη βιβλιογραφία, καθώς οι Agias et al. (2001) και Kadlec & Wallace (2009) αναφέρουν ότι τα υποστρώματα που περιέχουν ανόργανα στοιχεία μπορούν να επιτύχουν απομάκρυνση φωσφορικών της τάξης του 40-50%, εφόσον υπάρχει επαρκής δέσμευση σε μεταλλικά οξείδια. Αντίθετα, στις

μονάδες PP και PPB, που διαθέτουν πλαστικό υπόστρωμα, οι συγκεντρώσεις $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ στην εκροή διατηρούνται υψηλές, στα 45 mg/L, με ποσοστά απομάκρυνσης μόλις 11% και 26% αντίστοιχα. Η μειωμένη απομάκρυνση μπορεί να αποδοθεί στην αδυναμία του πλαστικού να προσροφήσει φωσφορικά, γεγονός που επιβεβαιώνεται από τη μελέτη των Wu et al. (2014), όπου αναφέρεται ότι τα συνθετικά υποστρώματα δεν διαθέτουν τις απαιτούμενες χημικές ιδιότητες για τη συγκράτηση φωσφορικών ιόντων.

Ένα ακόμα σημαντικό στοιχείο είναι ότι στις μονάδες PG και PGB παρατηρείται σταδιακή βελτίωση της απομάκρυνσης των φωσφορικών με την πάροδο του χρόνου, γεγονός που μπορεί να αποδοθεί στη συσσώρευση βακτηρίων και την ανάπτυξη βιοφίλμ στο χαλίκι, παράγοντες που συμβάλλουν στη δέσμευση φωσφόρου (Wu et al., 2014). Αντίθετα, οι μονάδες PP και PPB δεν παρουσιάζουν σημαντική μεταβολή, επιβεβαιώνοντας τη χαμηλή ικανότητα του πλαστικού στη δέσμευση φωσφορικών. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας με τα δεδομένα της βιβλιογραφίας, προκύπτει ότι η χρήση χαλικιού ως υποστρώματος προσφέρει συγκρίσιμες ή και ελαφρώς υψηλότερες αποδόσεις απομάκρυνσης φωσφορικών σε σχέση με άλλες μελέτες, ενώ η χρήση πλαστικού υποστρώματος οδηγεί σε σημαντικά χαμηλότερες επιδόσεις, υποδεικνύοντας την ανάγκη προσθήκης άλλων υλικών με ικανότητα κατακράτησης φωσφόρου

Πίνακας 12: Μέσες Τιμές και τυπικές αποκλίσεις Ορθοφωσφορικών ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)

Μήνας	Πρωτοβάθμια επεξεργασμένο Λύμα (mg/L)	PG (mg/L)	PGB (mg/L)	PPB (mg/L)	PP (mg/L)
Απρ-24	5,64±1,95	2,67±1,57	1,61±0,52	3,45±1,97	3,63±1,69
Μαϊ-24	4,87±3,14	1,13±0,45	0,71±0,75	3,38±2,17	3,35±2,00
Ιουν-24	4,56±1,07	2,92±2,86	1,77±0,45	5,19±1,53	5,02±1,93
Ιουλ-24	4,40±0,59	1,97±0,04	1,42±0,18	4,16±0,18	6,01±2,99
Αυγ-24	4,09±0,83	1,97±0,02	1,58±0,01	4,31±0,23	4,01±0,79
Σεπ-24	3,45±0,86	2,00±0,01	1,56±0,02	3,09±0,74	4,35±0,64
Οκτ-24	4,11±0,48	2,04±1,13	2,71±1,51	5,90±0,71	7,58±2,19

4. Συμπεράσματα και Προτάσεις

4.1 Συμπεράσματα

Στόχος της έρευνας είναι η αξιολόγηση της απόδοσης αυτών των συστημάτων ως προς την απομάκρυνση κρίσιμων ρύπων, όπως τα αιωρούμενα στερεά (TSS), η χημική (COD) και η βιολογική (BOD_5) απαίτηση οξυγόνου, το ολικό άζωτο (TN), το αμμωνιακό άζωτο (NH_4^+-N), ο ολικός φώσφορος (TP) και φωσφορικά ($PO_4^{3-}-P$), καθώς και η συμβολή του βιοεξανθρακώματος αναφορικά με την αποδοτικότητα των προς εξέταση συστημάτων. Η σύγκριση των εκροών πραγματοποιείται σε σχέση με τα όρια που θέτει η ευρωπαϊκή νομοθεσία για τις εκροές επεξεργασμένων λυμάτων σε διάφορους αποδέκτες, ώστε να εκτιμηθεί η καταλληλότητα αυτών των μονάδων.

Η Ευρωπαϊκή Οδηγία 91/271/ΕΟΚ για την επεξεργασία των αστικών λυμάτων καθορίζει συγκεκριμένες οριακές τιμές εκροών, ανάλογα με το μέγεθος του οικισμού και τον αποδέκτη των επεξεργασμένων λυμάτων. Για οικισμούς με ισοδύναμο πληθυσμό (ΙΠ) άνω των 10.000 κατοίκων, οι βασικές απαιτήσεις περιλαμβάνουν μέγιστες συγκεντρώσεις $BOD_5 \leq 25 \text{ mg/L}$, $COD \leq 125 \text{ mg/L}$ και αιωρούμενα στερεά (TSS) $\leq 35 \text{ mg/L}$. Επιπλέον, για ευαίσθητες περιοχές όπου απαιτείται τριτοβάθμια επεξεργασία, οι απαιτήσεις για το ολικό άζωτο και τον ολικό φώσφορο είναι αυστηρότερες, με τα όρια να κυμαίνονται από 10 έως 15 mg/L για το TN και από 1 έως 2 mg/L για το TP.

Αναλύοντας τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης, παρατηρείται ότι οι τιμές των αιωρούμενων στερεών (TSS) σε όλες τις μονάδες κυμαίνονται μεταξύ 10 και 23 mg/L , πληρώνοντας έτσι τις απαιτήσεις της ευρωπαϊκής νομοθεσίας. Παρόμοια, η χημική απαίτηση οξυγόνου (COD) παρουσιάζει τιμές από 95 έως 123 mg/L , παραμένοντας κάτω από το όριο των 125 mg/L . Ωστόσο, η βιολογική απαίτηση οξυγόνου (BOD_5) εμφανίζει υπερβάσεις σε όλες τις μονάδες, με τιμές που κυμαίνονται από 88 έως 120 mg/L , υπερβαίνοντας κατά πολύ το επιτρεπτό όριο των 25 mg/L . Αυτό υποδηλώνει ότι η οργανική φόρτιση των εκροών παραμένει υψηλή και πιθανώς απαιτεί πρόσθετα στάδια επεξεργασίας για την αποτελεσματικότερη απομάκρυνση του οργανικού φορτίου.

Όσον αφορά τα θρεπτικά συστατικά, το ολικό άζωτο (TN) εμφανίζει ιδιαίτερα υψηλές συγκεντρώσεις, με τις τιμές να κυμαίνονται από 35 έως 62 mg/L, σημαντικά υψηλότερες από το επιτρεπτό εύρος των 10-15 mg/L που προτείνεται για ευαίσθητες περιοχές. Ομοίως, ο ολικός φώσφορος (TP) παρουσιάζει συγκεντρώσεις της τάξης των 25-45 mg/L, πολύ πάνω από τα ανώτατα επιτρεπτά όρια των 1-2 mg/L για τις εκροές σε ευαίσθητους αποδέκτες. Οι τιμές του αμμωνιακού αζώτου ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) και των φωσφορικών ($\text{PO}_4\text{-P}$) δεν προσδιορίζονται άμεσα στην οδηγία 91/271/ΕΟΚ, αλλά τα αποτελέσματα δείχνουν επίσης αυξημένες συγκεντρώσεις που απαιτούν πρόσθετη επεξεργασία.

Συνολικά, τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι οι μονάδες τεχνητών υγροτόπων που μελετήθηκαν μπορούν να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις της ευρωπαϊκής νομοθεσίας ως προς τα αιωρούμενα στερεά και τη χημική απαίτηση οξυγόνου, αλλά δεν επαρκούν για την απομάκρυνση του βιολογικά απαιτούμενου οξυγόνου, του ολικού αζώτου και του ολικού φωσφόρου. Αυτό αναδεικνύει την ανάγκη περαιτέρω βελτιστοποίησης της λειτουργίας τους ή συνδυασμού τους με συμπληρωματικές μεθόδους επεξεργασίας, όπως η βιολογική απονιτροποίηση και η χημική κατακρήμνιση φωσφόρου.

Η προσθήκη βιοεξανθρακώματος στις μονάδες PGB και PPB φαίνεται να βελτιώνει την απομάκρυνση ορισμένων ρύπων, αν και τα επίπεδα του αζώτου και του φωσφόρου παραμένουν αυξημένα. Επιπλέον, η χρήση ανακυκλωμένου πλαστικού στις μονάδες PP και PPB θα μπορούσε να προσφέρει οφέλη από την άποψη της κυκλικής οικονομίας, συμβάλλοντας στη βιώσιμη διαχείριση των αποβλήτων μέσω της αξιοποίησης δευτερογενών υλικών

4.2 Προτάσεις για μελλοντική Έρευνα

Η παρούσα εργασία έδειξε ότι το βιοεξανθράκωμα βελτιώνει σε σημαντικό βαθμό την αποδοτικότητα των τεχνητών υγροβιοτόπων. Ωστόσο, χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση για να αποσαφηνιστεί ο ακριβής του ρόλος. Μελλοντικές έρευνες θα μπορούσαν να εξετάσουν διαφορετικές ποσότητες και τύπους βιοεξανθρακώματος, ώστε να εντοπιστεί ο βέλτιστος συνδυασμός για τη μέγιστη απομάκρυνση οργανικών και ανόργανων ρύπων. Προτείνεται επίσης η μελέτη της μακροχρόνιας αντοχής του υλικού, καθώς η πιθανή μείωση της αποδοτικότητάς του με την πάροδο του χρόνου μπορεί να επηρεάσει τη λειτουργία του συστήματος.

Παράλληλα, σημαντικός είναι ο ρόλος του αερισμού στη λειτουργία των υγροβιοτόπων. Στην παρούσα εργασία εφαρμόστηκε παθητικός αερισμός, ωστόσο μελλοντικά θα μπορούσε να εξεταστεί η χρήση διαφορετικών μεθόδων αερισμού, όπως μηχανικός ή υβριδικός αερισμός. Μια τέτοια έρευνα θα προσέφερε χρήσιμα στοιχεία σχετικά με το πώς η βελτίωση των αερόβιων συνθηκών μπορεί να ενισχύσει την αποδόμηση οργανικών ρύπων και την απομάκρυνση θρεπτικών στοιχείων.

Τέλος, ιδιαίτερη σημασία έχει η μικροβιολογική ποιότητα της εκροής, ειδικά όταν υπάρχει προοπτική επαναχρησιμοποίησης για άρδευση. Προτείνεται η διεξαγωγή μελετών που θα ελέγξουν την παρουσία παθογόνων μικροοργανισμών και θα εκτιμήσουν την υγειονομική καταλληλότητα του νερού. Μια τέτοια ανάλυση θα ενισχύσει την αξιοπιστία της τεχνολογίας και θα αναδείξει τις δυνατότητές της να συμβάλει τόσο στην προστασία του περιβάλλοντος όσο και στην ασφαλή επαναχρησιμοποίηση των υδάτινων πόρων στη γεωργία.

5. Βιβλιογραφία

1. Ahmad, M., Lee, S. S., Dou, X., Mohan, D., & Sung, J. K. (2014). *Synergistic removal of emerging contaminants by biochar composites: From mechanism to application*. **Chemical Engineering Journal**, 243, 358–371.
2. Brix, H. (1997). *Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands?* **Water Science and Technology**, 35(5), 11–17.
3. Ellen MacArthur Foundation. (2013). *Towards the Circular Economy*.
4. Ghosh, U., & Sharma, A. (2019). *Application of biochar in water and wastewater treatment: A review*. **Journal of Environmental Management**, 246, 214–229.
5. Glaser, B., Lehmann, J., & Zech, W. (2002). *Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal – a review*. **Biology and Fertility of Soils**, 35(4), 219–230.
6. Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). *Treatment Wetlands* (2nd ed.). CRC Press.
7. Kargarzadeh, H., Ahmad, I., Abdullah, I., Dufresne, A., & Zainuddin, S. Y. (2012). *Effects of filler content on the properties of biodegradable composites based on poly(butylene succinate) reinforced with cellulose nanowhiskers*. **Polymer Composites**, 33(6), 902–910.

8. Leenheer, J. A., & Croué, J. P. (2003). *Characterizing dissolved organic matter*. **Environmental Science & Technology**, 37(1), 18A–26A.
9. Lehmann, J., & Joseph, S. (2015). *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation* (2nd ed.). Routledge.
10. Metcalf & Eddy, Inc. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
11. Metcalf & Eddy. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery* (5th ed.). McGraw-Hill Education.
12. Mohanty, S. K., Boehm, A. B., & Torkelson, J. D. (2018). *Designing biochar as an engineered barrier to limit the spread of organic groundwater contaminants*. **Environmental Science & Technology**, 52(6), 3326–3334.
13. Mohan, D., Sarswat, A., Ok, Y. S., & Pittman Jr, C. U. (2014). *Organic and inorganic contaminants removal from water with biochar, a renewable material: A critical review*. **Bioresource Technology**, 160, 191–202.
14. Morales-Narváez, E., & Nagles-Martinez, G. A. (2020). *Use of recycled high-density polyethylene (HDPE) in the manufacture of eco-blocks for sustainable construction*. **Construction and Building Materials**, 262, 120063.
15. Tchobanoglous, G., & Burton, F. L. (1991). *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, and Reuse* (3rd ed.). Metcalf & Eddy.
16. UNEP. (2018). *The Role of Recycled Plastics in the Circular Economy*. United Nations Environment Programme.
17. Vymazal, J. (2010). *Constructed wetlands for wastewater treatment: A review*. In B. A. Reddy (Ed.), *Ecology and Biotechnology of Wetlands* (pp. 17–66). Springer, Dordrecht.
18. Vymazal, J. (2011). *Constructed wetlands for wastewater treatment: Five decades of experience*. **Environmental Science & Technology**, 45(1), 61–69.
19. Water Environment Federation (WEF). (2017). *Wastewater Treatment Plant Design* (5th ed.). WEF Press.
20. Wu, S., Wallace, S., Brix, H., Kuschik, P., Kirui, W. K., Masi, F., & Dong, R. (2020). *Treatment of industrial effluents in constructed wetlands: Challenges, operational strategies, and overall performance*. **Environmental Pollution**, 265, 114559.

21. Xu, D., Liu, Y., & Wang, Z. (2019). *Enhancement of wastewater treatment performance by integrating biochar into constructed wetlands: Mechanisms and application*. **Science of the Total Environment**, 692, 1078–1089.
22. Xu, Y., Xiao, W., Jiang, L., Li, Z., & Wei, W. (2020). *The role of biochar in constructed wetlands for wastewater treatment: A review*. **Science of the Total Environment**, 709, 135095.
23. Yao, Y., Gao, B., Chen, J., Zhang, M., Inyang, M., & Li, Y. (2012). *Adsorption of sulfamethoxazole on biochar and its nanocomposites from aqueous solutions*. **Chemical Engineering Journal**, 210, 620–627.
24. Zhang, L., & Huang, X. (2020). *Enhancing wastewater treatment using constructed wetlands: The role of aeration*. **Water Research**, 172, 115486.
25. Zhang, Y., Zhao, L., & Gao, B. (2021). *Biochar for environmental management: Science, technology, and applications*. Elsevier.
26. Zhao, X., Wang, J., Wu, F., Wang, S., & Cai, Z. (2018). *Removal of organic pollutants from wastewater by biochar-based materials: A review*. **Journal of Environmental Management**, 216, 405–420.