



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE

ΜΕΛΕΤΗ ΠΙΛΟΤΙΚΩΝ ΑΕΡΙΖΟΜΕΝΩΝ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΣΤΙΚΩΝ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Μελέτη πιλοτικών αεριζόμενων τεχνητών υδροβιότοπων για την
επεξεργασία αστικών υγρών αποβλήτων

**Investigation of Pilot Aerated Constructed Wetlands for Municipal
Wastewater Treatment**

Υποψήφιος Διπλωματούχος Μηχανικός Περιβάλλοντος : Καραουλάνης Βασίλειος

Επιβλέπων : Στεφανάκης Αλέξανδρος (Επίκουρος Καθηγητής)

Εργαστήριο Τεχνολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος

Science Lab of Environmental Management and Technology

Κουνουπιδιανά Χανίων 2025

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

*Μελέτη πιλοτικών αεριζόμενων τεχνητών υδροβιότοπων για την
επεξεργασία αστικών υγρών αποβλήτων*

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Προπτυχιακός Φοιτητής Καραουλάνης Βασίλειος

Τριμελής Επιτροπή

Επίκουρος Καθηγητής Αλέξανδρος Στεφανάκης

Καθηγήτρια Δανάη Βενιέρη

Ομότιμος Καθηγητής Ευάγγελος Διαμαντόπουλος

Υπεύθυνη δήλωση

Με το παρόν κείμενο δηλώνω ότι είμαι ο συγγραφέας της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η οποία εκπονήθηκε στο πλαίσιο των απαιτήσεων του προγράμματος σπουδών του Τμήματος Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης και η οποία παραδόθηκε μετά από έγκριση του επιβλέποντας καθηγητή μου, σε έντυπη και ψηφιακή μορφή στη Γραμματεία του τμήματός μου. Επίσης δηλώνω ότι κάθε πηγή που χρησιμοποίησα (βιβλιογραφία , αρθρογραφία , διαδικτυακές πηγές) για την υποστήριξη των υποθέσεων της μελέτης και της έρευνάς μου, είναι πλήρως συμβατή με τα επιστημονικά πρότυπα και επιπλέον, αναφέρεται ρητά, υπό μορφή αναφοράς-παραπομπής σε όλο το φάσμα της παρούσας εργασίας.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικό σκοπό, εκπαιδευτικού ή ερευνητικού χαρακτήρα, με την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου Αλέξανδρο Στεφανάκη Επίκουρο Καθηγητή για την καθοδήγηση που μου προσέφερε και το χρόνο που διέθεσε δίνοντάς μου χρήσιμες συμβουλές και οδηγίες για την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας . Στο ίδιο πλαίσιο ευγνωμοσύνης θα ήθελα να ευχαριστήσω την τριμελής επιτροπή για τον χρόνο που διέθεσαν ώστε να αξιολογήσουν την εργασία μου , όπως και όλους τους διδάσκοντες και τα μέλη του εργαστηριακού προσωπικού του Τμήματος Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος για τη συμβολή τους στην επιστημονική και τεχνολογική μου συγκρότηση στα χρόνια της φοίτησής μου στο Τμήμα.

Οφείλω επίσης ένα μεγάλο ευχαριστώ στην Καθηγήτρια Ελισάβετ Κουκουράκη υπεύθυνη του εργαστηρίου 'Πληροφορίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος' για την καθοδήγηση και τις χρήσιμες συμβουλές καθώς επίσης και στα μέλη της ομάδας του εργαστηρίου, για την βοήθεια που μου προσέφεραν στο πειραματικό μέρος της εργασίας μου.

Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου για την οικονομική τους υποστήριξη , καθώς και τους συγγενείς και τους φίλους για την ηθική υποστήριξη σε όλο το διάστημα των σπουδών μου.

“Οι άνθρωποι (...) μεταχειρίζονται τη φύση σύμφωνα με τους στόχους τους . Στην πορεία απελευθερώνονται απρόσμενες δυνάμεις και νέες μορφές αλληλεπίδρασης του κοινωνικού με το φυσικό , οι οποίες επηρεάζουν την κοινωνική δράση. Οι άνθρωποι μορφοποιούν τον κόσμο σε μεγαλύτερο βαθμό από οποιοδήποτε άλλο είδος και μορφοποιούνται από τη φύση με πρωτόγνωρους τρόπους. Η ανθρώπινη επιλογή και η ανθρώπινη δραστηριότητα λαμβάνουν χώρα σ’ ένα δυναμικό οικοσύστημα όπου η ανθρώπινη δραστηριότητα δεν είναι μόνο παρά ένα στοιχείο. “

Raymond Murphy (1997),

Sociology as if Nature did not Matter: an Ecological Critique

The British Journal of Sociology

Περίληψη

Ο σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι να διερευνηθεί η ικανότητα των αεριζόμενων τεχνητών υγροβιότοπων κατακόρυφης ροής στην επεξεργασία αστικών υγρών αποβλήτων αλλά και η επιρροή που έχει η βλάστηση και το είδος του υλικού του υποστρώματος στην αποτελεσματικότητά τους. Για τις ανάγκες του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν τρεις πιλοτικές μονάδες στις οποίες εφαρμόζονταν τεχνητός αερισμός και ήταν τοποθετημένες στον εξωτερικό χώρο του θερμοκηπίου της Σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Η πρώτη μονάδα είχε ως βλάστηση το κοινό καλάμι με την επιστημονική ονομασία *Phragmites Australis* και ονομάστηκε *G(Gravel)* επειδή είχε ως υλικό υποστρώματος χαλίκι. Η δεύτερη μονάδα είχε επίσης βλάστηση το *Phragmites Australis* και ονομάστηκε *P (Plastic)* επειδή είχε ως υλικό υποστρώματος ανακυκλωμένο πλαστικό υψηλής πυκνότητας (ανακυκλωμένο HDPE). Στην τρίτη μονάδα δεν υπήρχε βλάστηση, το υλικό του υποστρώματος ήταν επίσης ανακυκλωμένο HDPE και ονομάστηκε *C(Control)*. Οι πιλοτικές μονάδες είχαν εγκατασταθεί και ήταν ήδη σε λειτουργία 1 χρόνο πριν την έναρξη του πειράματος της παρούσας πτυχιακής εργασίας, με αποτέλεσμα την πλήρη ανάπτυξη των φυτών και τον κορεσμό ως ένα βαθμό του υποστρώματος από την συνεχή επαφή με τα λύματα. Για εισροή στις μονάδες χρησιμοποιήθηκε υγρό απόβλητο από την ΕΕΛ Χανίων, το οποίο συλλεγόταν αμέσως μετά από την δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης. Γινόταν εμπλουτισμός των μονάδων με το λύμα ανά δύο μέρες με 12 λίτρα σε κάθε πιλοτική μονάδα. Κάθε βδομάδα περίπου γίνονταν δειγματοληψία από τις εισροές και τις εκροές των υγροβιότοπων *G*, *P*, *C*. Στα δείγματα, γινόντουσαν αναλύσεις BOD₅, COD, TN, NH₄⁺-N, NO₃⁻-N, TP, PO₄³⁻-P, TSS, EC, pH στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος, της σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης

Παρακάτω αναφέρονται τα αποτελέσματα της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης των απομακρύνσεων επί τοις εκατό από την εισροή για τους υγροβιότοπους *G*, *P*, *C*. Έτσι λοιπόν για BOD₅ η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση της απομάκρυνσης, είναι για τον υγροβιότοπο *G* 86,7±7,9%, για τον υγροβιότοπο *P* 94,2±6,0%, για τον υγροβιότοπο *C* 69,2±9,9%. Για COD είναι για τον υγροβιότοπο *G* 83,5±8,9%, για τον υγροβιότοπο *P* 91,2±6,0%, για τον υγροβιότοπο *C* 64,7±11,0%. Για TN είναι για τον υγροβιότοπο *G* 73,3±9,7%, για τον υγροβιότοπο *P* 85,4±11,5%, για τον υγροβιότοπο *C* 56,8±14,1%. Για NH₄⁺-N είναι για τον υγροβιότοπο *G* 91,1±11,1%, για τον υγροβιότοπο *P* 96,1±7,8%, για τον υγροβιότοπο *C* 66,7±16,4%. Για NO₃⁻-N δεν υπάρχει απομάκρυνση γιατί δημιουργείται ως προϊόν της διεργασίας της νιτροποίησης που συμβαίνει στους υγροβιότοπους. Για TP είναι για τον υγροβιότοπο *G* 55,7±13,9%, για τον υγροβιότοπο *P* 63,3±18,0%, για τον υγροβιότοπο *C* 34,6±18,5%. Για PO₄³⁻-P είναι για τον υγροβιότοπο *G* 56,2±14,3%, για τον υγροβιότοπο *P* 60,0±20,0%, για τον υγροβιότοπο *C* 26,4±9,6%. Για TSS είναι για τον

υγροβιότοπο G $70,7 \pm 43,7\%$, για τον υγροβιότοπο P $69,3 \pm 20,5\%$, για τον υγροβιότοπο C $61,5 \pm 22,4\%$. Η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) στον G είναι $1920 \pm 668 (\mu\text{S}/\text{cm})$, στον P είναι $2375 \pm 993 (\mu\text{S}/\text{cm})$, στον C είναι $1132 \pm 219 (\mu\text{S}/\text{cm})$. Η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση του pH στον G είναι $7,45 \pm 0,48$, στον P είναι $7,65 \pm 0,39$, στον C είναι $7,56 \pm 0,26$.

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα του πειράματος, βγαίνει το συμπέρασμα πως οι αεριζόμενοι τεχνητοί υγροβιότοποι κατακόρυφης ροής απομακρύνουν σε μεγάλο βαθμό οργανικό φορτίο και θρεπτικά συστατικά από τα λύματα. Επίσης όσον αφορά τα υλικά πλήρωσης, εκτιμάται πως αυτό με το μεγαλύτερο πορώδες είναι αποτελεσματικότερο και κλείνοντας ο πιο σημαντικός παράγοντας στην απόδοση του συστήματος, βάση των παραμέτρων που εξετάστηκαν στην παρούσα πτυχιακή εργασία αναδείχθηκε η βλάστηση.

Abstract

The goal of this thesis is to investigate the ability of aerated vertical flow constructed wetlands to treat municipal wastewater and the influence of vegetation and substrate materials. The location of the experiment was an outdoor space at Technical University of Crete, where three pilot units were used in which artificial ventilation was applied.

The first unit had *Phragmites Australis* as vegetation which is commonly known as reed and was named *G* from the contained substrate material which was gravel. The second unit had also *Phragmites Australis* as vegetation and was named *P* from the contained substrate material which was recycled plastic and more specific high density polyethylene (recycled HDPE). At the third unit vegetation wasn't exist, the contained substrate material was also recycled HDPE and was named *C* or Control. The operation of the units started one year before the start of the experiment of this thesis, resulting in full plant growth and perhaps partial saturation of substrate materials, due to continuous contact with wastewaters. Liquid municipal waste from the effluent treatment installation of Chania, which was collected after the primary processing, was used as inflow to the units. Every two days 12 liters of wastewater was used in every pilot unit. Samples from inflow and outflow of constructed wetlands were analyzed at the Laboratory of Environmental Engineering and Management of Technical University of Crete one time per week, to identify the efficiency of *G*, *P*, and *C* pilot units to remove BOD₅, COD, TN, NH₄⁺-N, NO₃⁻-N, TP, PO₄³⁻-P, TSS and also pH and electrical conductivity measurements at the samples.

Average removal value of BOD₅ is 86,7±7,9% for *G*, 94,2±6,0% for *P*, 69,2±9,9% for *C*. COD average removal value is 83,5±8,9% for *G*, 91,2±6,0% for *P*, 64,7±11,0% for *C*. TN is 73,3±9,7% for *G*, 85,4±11,5% for *P*, 56,8±14,1% for *C*. NH₄⁺-N is 91,1±11,1% for *G*, 96,1±7,8% for *P*, 66,7±16,4% for *C*. NO₃⁻-N concentrations was lower in the Input sample than the output because NO₃⁻-N was a product of nitrification which takes place during the wastewater treatment by constructed wetlands. TP average removal value is 55,7±13,9% for *G*, 63,3±18,0% for *P*, 34,6±18,5% for *C*. PO₄³⁻-P is 56,2±14,3% for *G*, 60,0±20,0% for *P*, 26,4±9,6% for *C*. TSS is 70,7±43,7% for *G*, 69,3±20,5% for *P*, 61,5±22,4% for *C*. The average value of Electrical Conductivity (EC) 1920±668(μS/cm) for *G*, 2375±993(μS/cm) for *P*, 1132±219(μS/cm) for *C*. The average pH for *G* is 7,45±0,48, for *P* is 7,65±0,39, for *C* is 7,56±0,26.

Observing the results of the experiment, it is concluded that Ventilated Vertical Flow Constructed Wetlands are very capable of removing organic matter and nutrients from wastewaters. Also, in terms of substrate materials it is estimated that the one with largest porosity has better impact in the system performance, while vegetation was highlighted as the most important factor in the performance of the system, based on the examined parameters in this thesis.

Περιεχόμενα

Περίληψη	4
Abstract.....	6
1 Εισαγωγή	14
1.1 Γενικά.....	14
1.2 Σκοπός	15
2 Θεωρητικό Υπόβαθρο.....	15
2.1 Απόβλητα.....	15
2.1.1 Ευρωπαϊκός Κατάλογος Αποβλήτων (ΕΚΑ, 2014/955/ΕΕ).....	16
2.1.2 Χαρακτηρισμός Αποβλήτων ως Επικίνδυνα.....	16
2.2 Αστικά Υγρά Απόβλητα	17
2.2.1 Γενικά	17
2.2.2 Συστατικά Αστικών Υγρών Αποβλήτων.....	18
2.2.3 Επεξεργασία Αστικών Υγρών Αποβλήτων	21
2.2.4 Εναλλακτικές Μέθοδοι Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων	24
2.2.5 Νομοθεσία περί Αστικών Υγρών Αποβλήτων.....	25
2.2.6 Ανάκτηση και Επαναχρησιμοποίηση Αστικών Υγρών Αποβλήτων	27
2.3 Φυσικά Συστήματα Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων.....	30
2.4 Υγροβιότοποι.....	31
<i>Φυσικοί Υγροβιότοποι</i>	<i>31</i>
2.5 Τεχνητοί Υγροβιότοποι για την Επεξεργασία Λυμάτων.....	32
2.5.1 Συστήματα Ελεύθερης Επιφάνειας ή Επιφανειακής ροής (Free Water Surface).....	33
2.5.2 Συστήματα Υποεπιφανειακής Οριζόντιας Ροής (Subsurface Horizontal Flow)	34
2.5.3 Συστήματα Υποεπιφανειακής Κατακόρυφης Ροής (Subsurface Vertical Flow)	35
2.5.4 Υβριδικά Συστήματα.....	38
2.5.5 Η Βλάστηση στους Τεχνητούς Υγροβιότοπους	38
2.5.6 Πληρωτικά Υλικά στους Τεχνητούς Υγροβιότοπους.....	40
2.5.7 Μηχανισμοί Απομάκρυνσης Ρύπων στους Τεχνητούς Υγροβιότοπους Κατακόρυφης Ροής.....	42
2.5.8 Τεχνητός Αερισμός στους Τεχνητούς Υγροβιότοπους Κατακόρυφης Ροής	48

2.5.9	Εξατμισοδιαπνοή στους Τεχνητούς Υγροβιότοπους Κατακόρυφης Ροής	49
3	Πειραματικό μέρος.....	50
3.1	Πειραματική Διάταξη.....	50
3.1.1	Περιγραφή πειραματικής διάταξης	50
3.1.2	Χωροθέτηση πειραματικής διάταξης και κλιματολογικά στοιχεία	51
3.1.3	Εκτέλεση πειράματος.....	52
3.2	Δείγματα και Υλικά	53
3.2.1	Υγρά Αστικά Απόβλητα από Εργοστάσιο Επεξεργασίας Λυμάτων Χανίων	53
3.2.2	Βλάστηση	55
3.2.3	Χαλίκι	56
3.2.4	Ανακυκλωμένο HDPE.....	57
3.2.5	Σύστημα Παροχής Αέρα	59
3.3	Αναλυτικές Μεθόδοι.....	60
3.3.1	Υπολογισμός Εξατμισοδιαπνοής	60
3.3.2	Υπολογισμός Βιοχημικά Απαιτούμενου Οξυγόνου BOD ₅	60
3.3.3	Υπολογισμός Χημικά Απαιτούμενου Οξυγόνου COD.....	61
3.3.4	Υπολογισμός Ολικού Αζώτου TN.....	62
3.3.5	Υπολογισμός Αμμωνιακού Αζώτου NH ₄ ⁺ -N	63
3.3.6	Υπολογισμός Νιτρικού Αζώτου NO ₃ ⁻ -N	64
3.3.7	Υπολογισμός Ολικού Φωσφόρου TP	64
3.3.8	Υπολογισμός Φωσφορικών PO ₄ ³⁻ -P.....	65
3.3.9	Υπολογισμός Ολικών Αιωρούμενων Στερεών TSS	66
3.3.10	Υπολογισμός Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας EC.....	67
3.3.11	Υπολογισμός του PH.....	67
4	Αποτελέσματα πειράματος και συζήτηση πάνω σε αυτά	68
4.1	Εξατμισοδιαπνοή.....	68
4.2	Ποιοτικά Χαρακτηριστικά Εισροών	69
4.3	Ποιοτικά Χαρακτηριστικά Εκροών	69
4.3.1	Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (BOD ₅).....	69
4.3.2	Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (COD)	71
4.3.3	Ολικό Άζωτο (TN)	72
4.3.4	Αμμωνιακό Άζωτο (NH ₄ ⁺ -N)	73

4.3.5	Νιτρικό Άζωτο (NO_3^- -N).....	74
4.3.6	Ολικός Φώσφορος (TP).....	75
4.3.7	Φωσφορικά (PO_4^{3-} -P).....	77
4.3.8	Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (TSS).....	78
4.3.9	Ηλεκτρική Αγωγιμότητα (EC).....	79
4.3.10	Ενεργός Οξύτητα (pH).....	80
5	Συμπεράσματα και Προτάσεις.....	81
5.1	Απόδοση Των Πιλοτικών Μονάδων G , P , C.....	81
5.2	Δυνατότητα Απόρριψης ή Επαναχρησιμοποίησης των Εκροών των Τεχνητών Υδροβιότοπων για Άρδευση.....	81
5.3	Επίδραση του υλικού πλήρωσης.....	82
5.4	Επίδραση της βλάστησης.....	83
5.5	Επίδραση του τεχνητού αερισμού.....	83
5.6	Επίδραση των κλιματολογικών συνθηκών.....	83
5.7	Προτάσεις.....	84
6	Βιβλιογραφία.....	85
7	Παραρτήματα.....	92

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 2.1: Τυπικό βιολογικό φίλτρο (Λυμπεράτος & Βαγενάς, 2011).	24
Εικόνα 2.2: Φυσικός Υγροβιότοπος (The Nature Conservancy, n.d.)	32
Εικόνα 2.3: Απεικόνιση Συστήματος Ελεύθερης Επιφάνειας (Global Wetland Technology, n.d.)	34
Εικόνα 2.4: Απεικόνιση Συστήματος Υποεπιφανειακής Οριζόντιας Ροής (Vandana, Dipika, & Kanchan, 2021).	35
Εικόνα 2.5: Απεικόνιση Συστήματος Υποεπιφανειακής Κατακόρυφης Ροής (Global Wetland Technology, χ.χ.)	37
Εικόνα 2.6: Διαγραμματική παρουσίαση μεικτών ή υβριδικών συστημάτων τεχνητών υδροτόπων που συνδυάζει στα ανάντη ένα σύστημα υπόγειας οριζόντιας ροής και στη συνέχεια ένα σύστημα κατακόρυφης υπόγειας ροής. (Αντωνόπουλος, 2019)	38
Εικόνα 2.7: Κύκλος άνθρακα σε συστήματα υγροβιότοπων (Άκρατος, 2006)	43
Εικόνα 2.8: Διαδικασίες μετασχηματισμού και μεταφοράς μάζας του αζώτου στις φάσεις του νερού και του εδάφους των υδροτόπων (Αντωνόπουλος, 2019)	46
Εικόνα 2.9: Κύκλος του φωσφόρου (Άκρατος, 2006)	48
Εικόνα 3.1: Οι πιλοτικοί αεριζόμενοι τεχνητοί υγροβιότοποι του πειράματος	51
Εικόνα 3.2: Δείγματα από την παροχή και τις εκροές των μονάδων που προορίζονται για εργαστηριακή ανάλυση	53
Εικόνα 3.3: Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων Χανίων	55
Εικόνα 3.4: Phragmites Australis σε φυσικό υγροβιότοπο	56
Εικόνα 3.5: Το χαλίκι που χρησιμοποιήθηκε ως υλικό πλήρωσης στην μονάδα G	57
Εικόνα 3.6: Το ανακυκλωμένο HDPE που χρησιμοποιήθηκε ως υλικό πλήρωσης στις πιλοτικές μονάδες P και C	59
Εικόνα 3.7: Οι αεραντλίες των πιλοτικών μονάδων	60
Εικόνα 3.8: Φασματοφωτόμετρο SHIMADZU UV-1202	61
Εικόνα 3.9: Kit COD Cell Test 1.14541.0001	62
Εικόνα 3.10: Merck NOVA 60	63
Εικόνα 3.11: Nitrogen Total cell test 1.14763.0001	63
Εικόνα 3.12: Δείγματα για φασματοφωτομέτρηση με πρώτο από αριστερά το τυφλό δείγμα	64
Εικόνα 3.13: Kit Nitrat 91865	64
Εικόνα 3.14: Δείγματα για φασματοφωτομέτρηση με πρώτο από αριστερά το τυφλό δείγμα	66
Εικόνα 3.15: Ζυγαριά SHIMADZU LIBROR AEG-220	67

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 2.1: Ευρωπαϊκός Κατάλογος Αποβλήτων, απόφαση 2014/955/ΕΕ.	16
Πίνακας 2.2: Χαρακτηρισμός Αποβλήτων ως Επικίνδυνα, Οδηγία 2008/98/ΕΚ	17
Πίνακας 2.3: Συνηθισμένες αναλύσεις που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των συστατικών που περιέχονται στα υγρά απόβλητα. (Crites & Tchobanoglous, 1998) (Metcalf & Eddy, 2018)	18
Πίνακας 2.4: Τυπικά ποιοτικά χαρακτηριστικά ανεπεξέργαστων αστικών αποβλήτων. (Metcalf & Eddy, 2003) (Χρυσικόπουλος, 2018)	21
Πίνακας 2.5: Φυσικές και χημικές-βιολογικές διεργασίες για την απομάκρυνση των συστατικών που περιέχονται στα απόβλητα. (Metcalf & Eddy, 2018).....	22
Πίνακας 2.6: Στάδια επεξεργασίας υγρών αποβλήτων (Crites & Tchobanoglous, 1998) (Metcalf & Eddy, 2018)	23
Πίνακας 2.7: Απαιτήσεις για απορρίψεις από αριθμούς επεξεργασίας αστικών λυμάτων που διέπονται από τα άρθρα 4 και 5(ΦΕΚ 192β/14-3-97, ΚΥΑ 5673/400/1997).	26
Πίνακας 2.8: Κατηγορίες ποιότητας του ανακτημένου νερού και επιτρεπόμενη γεωργική χρήση και μέθοδος άρδευσης. (Κανονισμός (ΕΕ) 2020/741, Παράρτημα Ι, Πίνακας 1).....	28
Πίνακας 2.9: Απαιτήσεις ποιότητας του ανακτημένου νερού για γεωργική άρδευση. (Κανονισμός (ΕΕ) 2020/741, Παράρτημα Ι, Πίνακας 2).....	29
Πίνακας 2.10: Τυπικές τιμές ποιοτικών παραμέτρων στις εισροές τεχνητών υδροβιότοπων (United States Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, 2000) (Αντωνόπουλος, 2019).....	32
Πίνακας 2.11: Απόδοση συστημάτων τεχνητών υδροβιότοπων υποεπιφανειακής κατακόρυφης καθοδικής ροής από παγκόσμια πειραματικά δεδομένα (Vymazal & Kröpfelová, 2008).	37
Πίνακας 2.12: Επιλεγμένες εφαρμογές διαφόρων ειδών αποβλήτων εκτός αστικών, σε τεχνητούς υδροβιότοπους κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής (Στεφανάκης, 2011).....	37
Πίνακας 2.13: Χαρακτηριστικά των υδρόβιων φυτών που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία των λυμάτων (Στεφανάκης, 2011) (EPA, 1988, September)	40
Πίνακας 2.14: : Ποσότητες θρεπτικών στοιχείων που αξιοποιούνται στους τεχνητούς υδροβιότοπους (Kadlec & Knight, 1996)	40
Πίνακας 2.15: Τυπικά υλικά πλήρωσης στους τεχνητούς υδροβιότοπους (Rahman, et al., 2020).	41
Πίνακας 2.16: Εξισώσεις και σημασία μηχανισμών απομάκρυνσης αζώτου στους τεχνητούς υδροβιότοπους (Lu, Guo, Kang, Fan, & Zhang, 2020).....	44
Πίνακας 2.17: Αποτελεσματικότητα των διεργασιών απομάκρυνσης αζώτου σε τεχνητούς υδροβιότοπους κατακόρυφης ροής (Στεφανάκης, 2011).....	46
Πίνακας 2.18: Αποτελεσματικότητα των διεργασιών απομάκρυνσης φωσφόρου σε τεχνητούς υδροβιότοπους κατακόρυφης ροής (Στεφανάκης, 2011).....	47

Πίνακας 3.1: Παράμετροι Τεχνητών Υγροβιότοπων	50
Πίνακας 3.2: Κλιματολογικά μηνιαία δεδομένα έτους 2022 (Meteo, n.d.).....	51
Πίνακας 4.1: Μηνιαία εξατμισοδιαπνοή (απώλειες νερού σε mm) στους υγροβιότοπους G, P, C.....	68
Πίνακας 4.2: Ποιοτικά χαρακτηριστικά των εισροών στους τεχνητούς υγροβιότοπους.	69
Πίνακας 4.3: Συγκέντρωση BOD ₅ στις εκροές των τεχνητών υγροβιότοπων G, P, C και ποσοστιαία απομάκρυνσή του.	69
Πίνακας 4.4: Συγκέντρωση COD στις εκροές των τεχνητών υγροβιότοπων G, P, C και ποσοστιαία απομάκρυνσή του.....	71
Πίνακας 4.5: Συγκέντρωση TN στις εκροές των τεχνητών υγροβιότοπων G, P, C και ποσοστιαία απομάκρυνσή του.....	72
Πίνακας 4.6: Συγκέντρωση NH ₄ ⁺ -N στις εκροές των τεχνητών υγροβιότοπων G, P, C και ποσοστιαία απομάκρυνσή του.	73
Πίνακας 4.7: Συγκέντρωση NO ₃ ⁻ -N στις εκροές των τεχνητών υγροβιότοπων G, P, C και ποσοστιαία απομάκρυνσή του.	74
Πίνακας 4.8: Συγκέντρωση TP στις εκροές των τεχνητών υγροβιότοπων G, P, C και ποσοστιαία απομάκρυνσή του.....	75
Πίνακας 4.9: Συγκέντρωση PO ₄ ³⁻ -P στις εκροές των τεχνητών υγροβιότοπων G, P, C και ποσοστιαία απομάκρυνσή του.	77
Πίνακας 4.10: Συγκέντρωση TSS στις εκροές των τεχνητών υγροβιότοπων G, P, C και ποσοστιαία απομάκρυνσή του.....	78
Πίνακας 4.11: Ηλεκτρική αγωγιμότητα στις εκροές των τεχνητών υγροβιότοπων G, P, C.	79
Πίνακας 4.12: PH στις εκροές των τεχνητών υγροβιότοπων G, P, C.....	80
Πίνακας 5.1: Μέσες απομακρύνσεις % από τις πιλοτικές μονάδες G , P , C και από παγκόσμια πειραματικά δεδομένα	81
Πίνακας 5.2: Μέσες Εργαστηριακές μετρήσεις των εκροών των <i>Υγροβιότοπων</i> G , P , C και έλεγχος Απόρριψης	82

Ευρετήριο Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 4.1: Μηνιαίες απώλειες (mm) λόγω εξατμισοδιαπνοής στους υγροβιότοπους G, P, C.....	68
Διάγραμμα 4.2: Χρονική μεταβολή συγκεντρώσεων BOD ₅ κατά την διάρκεια του πειράματος, στις εισροές (In) και εκροές των Υγροβιότοπων G, P, C.	70
Διάγραμμα 4.3: Χρονική μεταβολή συγκεντρώσεων COD κατά την διάρκεια του πειράματος, στις εισροές (In) και εκροές των Υγροβιότοπων G, P, C.	71
Διάγραμμα 4.4: Χρονική μεταβολή συγκεντρώσεων TN κατά την διάρκεια του πειράματος, στις εισροές (In) και εκροές των Υγροβιότοπων G, P, C.	72
Διάγραμμα 4.5: Χρονική μεταβολή συγκεντρώσεων NH ₄ ⁺ -N κατά την διάρκεια του πειράματος, στις εισροές (In) και εκροές των Υγροβιότοπων G, P, C.	73
Διάγραμμα 4.6: Χρονική μεταβολή συγκεντρώσεων NO ₃ ⁻ -N κατά την διάρκεια του πειράματος, στις εισροές (In) και εκροές των Υγροβιότοπων G, P, C.	75
Διάγραμμα 4.7: Χρονική μεταβολή συγκεντρώσεων TP κατά την διάρκεια του πειράματος, στις εισροές (In) και εκροές των Υγροβιότοπων G, P, C.	76
Διάγραμμα 4.8: Χρονική μεταβολή συγκεντρώσεων PO ₄ ³⁻ -P κατά την διάρκεια του πειράματος, στις εισροές (In) και εκροές των Υγροβιότοπων G, P, C.	77
Διάγραμμα 4.9: Χρονική μεταβολή συγκεντρώσεων TSS κατά την διάρκεια του πειράματος, στις εισροές (In) και εκροές των Υγροβιότοπων G, P, C.	78
Διάγραμμα 4.10: Χρονική μεταβολή ηλεκτρικής αγωγιμότητας κατά την διάρκεια του πειράματος, στις εισροές (In) και εκροές των Υγροβιότοπων G, P, C.	79
Διάγραμμα 4.11: Χρονική μεταβολή PH κατά την διάρκεια του πειράματος, στις εισροές (In) και εκροές των Υγροβιότοπων G, P, C.....	80

1 Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Η διαχείριση των αποβλήτων είναι πρωτίστης σημασίας για την βιωσιμότητα του πλανήτη και αυτό διότι η ανορθόδοξη διαχείρισή τους ενδέχεται να προκαλέσει αλυσιδωτές αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και στην δημόσια υγεία. Τα υγρά απόβλητα είναι στην ουσία νερό που έχει υποστεί ποιοτική υποβάθμιση διότι έχει γίνει αποδέκτης ρύπων. Επιβλαβείς ρύποι που προέρχονται από τα αστικά υγρά απόβλητα θεωρούνται τα αιωρούμενα στερεά, το άζωτο, ο φώσφορος και οργανικές ενώσεις όπου προέρχονται από αστικά λύματα σε σημαντικές συγκεντρώσεις καθώς και βαρέα μέταλλα αλλά και οργανικοί ρύποι σε μικρές συγκεντρώσεις που προέρχονται από παρασιτοκτόνα, αντιβιοτικά, φαρμακευτικά προϊόντα, καθαριστικά προϊόντα οικιακής χρήσης και άλλα πολλά ακόμα. Οι πιθανές επιπτώσεις των αστικών υγρών αποβλήτων, όταν απορρίπτονται στο περιβάλλον χωρίς να έχουν υποστεί την απαραίτητη επεξεργασία είναι η μετάδοση ασθενειών γιατί εμπεριέχουν σημαντικές συγκεντρώσεις παθογόνων μικροοργανισμών που προέρχονται από το ανθρώπινο εντερικό σύστημα. Επίσης επειδή εμπεριέχουν σημαντικές συγκεντρώσεις θρεπτικών στοιχείων, προκαλούν ευτροφισμό, που είναι η υπερανάπτυξη φυτών και άλγεων με αποτέλεσμα να διαταράσσεται η ισορροπία στα οικοσυστήματα. Τέλος τα υγρά απόβλητα μπορεί να περιέχουν τοξικά συστατικά ή ενώσεις που δυνητικά μπορεί να είναι μεταλλαξιογόνες ή καρκινογόνες.

Η πρώτη εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων δημιουργήθηκε στην Αγγλία το 1865 και πιο συγκεκριμένα στο Λονδίνο, για την αντιμετώπιση των σοβαρών προβλημάτων υγείας που προέκυπταν από την ανεξέλεγκτη απόρριψη ανεπεξέργαστων λυμάτων στον ποταμό Τάμεση. Η συγκεκριμένη πρωτοβουλία αποτέλεσε την αφετηρία για τη σύγχρονη διαχείριση των λυμάτων, θέτοντας τα θεμέλια για την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και υποδομών, για την προστασία του περιβάλλοντος και της δημόσιας υγείας (Cooper & Jones, 1990). Ο πρώτος τεχνητός υδροβιότοπος δημιουργήθηκε πειραματικά, στα πλαίσια της έρευνας για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων από την Γερμανίδα επιστήμονα Käthe Seidel την δεκαετία του 1950 (Stefanakis, Akrotas, & Tsihrintzis, 2014). Οι υδροβιότοποι έχουν την ικανότητα να απομακρύνουν ρύπους από το νερό σε ικανοποιητικό βαθμό μέσω ποικίλων φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών που λαμβάνουν μέρος στο έδαφος, στο απόβλητο και στα ριζώματά τους. Γι αυτό τον λόγο αξιοποιούνται όλο και περισσότερο για την επεξεργασία λυμάτων αφού οι οικονομικές και ενεργειακές απαιτήσεις για την κατασκευή και λειτουργία ενός τεχνητού υδροβιότοπου είναι σημαντικά μικρότερες από τις απαιτήσεις μιας συμβατικής μονάδας επεξεργασίας λυμάτων.

Σήμερα οι τεχνητοί υδροβιότοποι χρησιμοποιούνται ευρέως ως μια εναλλακτική και βιώσιμη λύση, για την απομάκρυνση ρύπων από μια μεγάλη ποικιλία προέλευσης αποβλήτων. Για αυτό τον λόγο όλο και περισσότεροι επιστήμονες και ερευνητές που

ασχολούνται με την διαχείριση αποβλήτων πειραματίστηκαν και πειραματίζονται σε αυτούς, με αποτέλεσμα να έχουν βελτιστοποιηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια όσον αφορά την ικανότητά τους να απομακρύνουν ρύπους. Σημαντικές παράμετροι που επηρεάζουν την απόδοση ενός τεχνητού υγροβιότοπου όσον αφορά την απομάκρυνση των ρύπων είναι τα υλικά που αποτελούν το υπόστρωμά τους, το είδος της υδραυλικής ροής των αποβλήτων κατά την είσοδό τους στους τεχνητούς υγροβιότοπους, τα είδη βλάστησης που χρησιμοποιούνται στους τεχνητούς υγροβιότοπους, οι περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν και τέλος το διαθέσιμο οξυγόνο στο υπέδαφος τους. Το διαθέσιμο οξυγόνο είναι απαραίτητο για τους μικροοργανισμούς που απομακρύνουν το οργανικό φορτίο και το ολικό άζωτο, για αυτό έχουν αναπτυχθεί τεχνικές που ενισχύουν την παρουσία του και μια από αυτές είναι ο τεχνητός αερισμός που χρησιμοποιήθηκε και στο συγκεκριμένο πείραμα.

1.2 Σκοπός

Η παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματοποιήθηκε για να διερευνηθεί η ικανότητα των αεριζόμενων τεχνητών υγροβιότοπων κατακόρυφης ροής να απομακρύνουν ρύπους από τα αστικά υγρά απόβλητα. Πιο συγκεκριμένα για την αποδοτικότητα τους να απομακρύνουν Φώσφορο($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, Ολικό Φώσφορο), Άζωτο (Ολικό Άζωτο, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$), οργανικό φορτίο(BOD_5 , COD) και ολικά αιρούμενα στερεά(TSS). Επίσης πραγματοποιήθηκε για να συγκριθεί η επίδραση που έχει το υλικό πλήρωσης (ή το υπόστρωμα) του υγροβιότοπου όταν πρόκειται για χαλίκι ή ανακυκλωμένο HDPE, καθώς και η ύπαρξη της βλάστησης, στην απόδοση των υγροβιότοπων όσον αφορά την απομάκρυνση των προαναφερθέντων ρύπων.

2 Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1 Απόβλητα

Ως απόβλητο ορίζεται κάθε ουσία ή αντικείμενο το οποίο ο κάτοχός του απορρίπτει ή προτίθεται ή υποχρεούται να απορρίψει(οδηγία 2008/98/EK, Κεφάλαιο 1, Άρθρο 3).
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/HTML/?uri=CELEX:32008L0098>

2.1.1 Ευρωπαϊκός Κατάλογος Αποβλήτων (ΕΚΑ, 2014/955/ΕΕ)

Σύμφωνα με την απόφαση 2014/955/ΕΕ της Ευρωπαϊκής Επιτροπής ο Ευρωπαϊκός Κατάλογος Αποβλήτων είναι:

Πίνακας 2.1: Ευρωπαϊκός Κατάλογος Αποβλήτων, απόφαση 2014/955/ΕΕ.

1. Απόβλητα από αναζήτηση, εξόρυξη, εργασίες λατομείου και φυσική και χημική επεξεργασία ορυκτών.
2. Απόβλητα από γεωργία, κηπευτική, υδατοκαλλιέργεια, δασοκομία, θήρα και αλιεία, προετοιμασία και επεξεργασία τροφίμων.
3. Απόβλητα από την κατεργασία ξύλου και την παραγωγή ταμπλάδων και επίπλων, καθώς και πολτοί, χαρτιού και χαρτονιού.
4. Απόβλητα από τις βιομηχανίες δέρματος, γούνας και υφαντουργίας.
5. Απόβλητα από τη διύλιση πετρελαίου, τον καθαρισμό φυσικού αερίου και την πυρολυτική επεξεργασία άνθρακα.
6. Απόβλητα από ανόργανες χημικές διεργασίες.
7. Απόβλητα από οργανικές χημικές διεργασίες.
8. Απόβλητα από την παραγωγή, διαμόρφωση, προμήθεια και χρήση (ΠΔΠΧ) επιστρώσεων (χρώματα, βερνίκια και σμάλτο υάλου), στεγανωτικών και μελανών εκτύπωσης.
9. Απόβλητα από τη φωτογραφική βιομηχανία.
10. Απόβλητα από θερμικές επεξεργασίες.
11. Απόβλητα από τη χημική επιφανειακή επεξεργασία και την επικάλυψη μετάλλων και άλλων υλικών· υδρομεταλλουργία μη σιδηρούχων μετάλλων.
12. Απόβλητα από τη μορφοποίηση και τη φυσική και μηχανική επιφανειακή επεξεργασία μετάλλων και πλαστικών.
13. Απόβλητα ελαίων και απόβλητα υγρών καυσίμων (εκτός βρωσίμων ελαίων 05 και 12).
14. Απόβλητα από οργανικούς διαλύτες, ψυκτικές ουσίες και προωθητικά (εκτός 07 και 08).
15. Απόβλητα από συσκευασίες· απορροφητικά υλικά, υφάσματα σκουπίσματος, υλικά φίλτρων και προστατευτικός ρουχισμός μη προδιαγραφόμενα αλλιώς.
16. Απόβλητα μη προδιαγραφόμενα άλλως στον κατάλογο
17. Απόβλητα από κατασκευές και κατεδαφίσεις (περιλαμβάνεται χώμα εκσκαφής από μολυσμένες τοποθεσίες).
18. Απόβλητα από την υγειονομική περίθαλψη ανθρώπων ή ζώων ή/και από σχετικές έρευνες (εξαιρούνται απόβλητα κουζίνας και εστιατορίων που δεν προκύπτουν άμεσα από το σύστημα υγείας).
19. Απόβλητα από τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας αποβλήτων, εγκαταστάσεις επεξεργασίας υγρών αποβλήτων εκτός σημείου παραγωγής και προετοιμασίας ύδατος προοριζόμενου για κατανάλωση από τον άνθρωπο και ύδατος για βιομηχανική χρήση.
20. Αστικά απόβλητα (οικιακά απόβλητα και παρόμοια απόβλητα από εμπορικές δραστηριότητες, βιομηχανίες και ιδρύματα), συμπεριλαμβανόμενων των χωριστά συλλεγμένων μερών.

(ΠΗΓΗ: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/HTML/?uri=CELEX:32014D0955>)

Για κάθε κατηγορία αποβλήτων υπάρχουν και οι αντίστοιχες υποκατηγορίες οι οποίες αναγράφονται αναλυτικά στην απόφαση 2014/955/ΕΕ της Ευρωπαϊκής Επιτροπής.

2.1.2 Χαρακτηρισμός Αποβλήτων ως Επικίνδυνα

Η ιδιότητα ή ιδιότητες των αποβλήτων, που τα καθιστούν επικίνδυνα σύμφωνα με την Οδηγία 2008/98/ΕΚ της Ευρωπαϊκής Επιτροπής στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ είναι:

Πίνακας 2.2: Χαρακτηρισμός Αποβλήτων ως Επικίνδυνα, Οδηγία 2008/98/EK

HP 1«Εκρηκτικό»: απόβλητα που είναι ικανά με χημική αντίδραση να παράγουν αέριο σε τέτοια θερμοκρασία και πίεση και σε τέτοια ταχύτητα ώστε να προκαλέσουν βλάβη στο περιβάλλον. Περιλαμβάνονται τα πυροτεχνικά απόβλητα, τα απόβλητα εκρηκτικών οργανικών υπεροξειδίων και τα εκρηκτικά αυτοαντιδρώντα απόβλητα.
HP 2«Οξειδωτικό»: απόβλητα που είναι ικανά, γενικά με την παροχή οξυγόνου, να προκαλέσουν ή να συμβάλουν στην καύση άλλων υλικών.
HP 3«Εφλεκτο»
HP 4«Ερεθιστικό – ερεθισμός του δέρματος και οφθαλμική βλάβη»: απόβλητα, η εφαρμογή των οποίων μπορεί να προκαλέσει ερεθισμό του δέρματος ή οφθαλμική βλάβη
HP 5«Ειδική τοξικότητα στα όργανα-στόχους (ΕΤΟΣ)/Τοξικότητα από αναρρόφηση»: απόβλητα που μπορεί να προκαλέσουν ειδική τοξικότητα στα όργανα-στόχους είτε από εφάπαξ έκθεση, είτε από επανειλημμένη έκθεση, ή που προκαλούν οξείες τοξικές επιδράσεις λόγω αναρρόφησης.
HP 6«Οξεία Τοξικότητα»: απόβλητα που μπορούν να προκαλέσουν οξείες τοξικές επιδράσεις μέσω πρόσληψης από το στόμα ή το δέρμα, ή διά της εισπνοής.
HP 7«Καρκινογόνο»: απόβλητα που προκαλούν καρκίνο ή αυξάνουν τη συχνότητα εμφάνισης καρκίνου.
HP 8«Διαβρωτικό»: απόβλητα, η εφαρμογή των οποίων μπορεί να προκαλέσει διάβρωση του δέρματος.
HP 9«Μολυσματικό»: απόβλητα που περιέχουν ανθεκτικούς μικροοργανισμούς ή τις τοξίνες τους, οι οποίες είναι γνωστό ή υπάρχουν σοβαροί λόγοι να πιστεύεται ότι προκαλούν ασθένειες στον άνθρωπο ή σε άλλους ζώντες οργανισμούς.
HP 10«Τοξικό για την αναπαραγωγή»: απόβλητα που έχουν δυσμενείς επιδράσεις για τη σεξουαλική λειτουργία και τη γονιμότητα σε ενήλικους άνδρες και γυναίκες, καθώς και τοξικότητα στην ανάπτυξη των απογόνων.
HP 11«Μεταλλαξιογόνο»: απόβλητα που μπορεί να προκαλέσουν μετάλλαξη, δηλαδή μόνιμη μεταβολή στην ποσότητα ή τη δομή του γενετικού υλικού ενός κυττάρου.
HP 12«Εκκλυση αερίου οξείας τοξικότητας»: απόβλητα που εκλύουν αέρια οξείας τοξικότητας (Οξεία Τοξ. 1, 2 ή 3) σε επαφή με το νερό ή με ένα οξύ.
HP 13«Ευαισθητοποιητικό»: απόβλητα που περιέχουν μία ή περισσότερες ουσίες οι οποίες είναι γνωστό ότι έχουν ευαισθητοποιητικές επιδράσεις στο δέρμα ή στα αναπνευστικά όργανα.
HP 14«Οικοτοξικό»: απόβλητα που παρουσιάζουν ή είναι δυνατόν να παρουσιάσουν άμεσο ή μελλοντικό κίνδυνο για έναν ή περισσότερους τομείς του περιβάλλοντος
HP 15«Απόβλητο ικανό να επιδείξει μια επικίνδυνη ιδιότητα που αναφέρεται ανωτέρω, που δεν είναι άμεσα εμφανής στο αρχικό απόβλητο»

(ΠΗΓΗ: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/HTML/?uri=CELEX:32008L0098>)

2.2 Αστικά Υγρά Απόβλητα

2.2.1 Γενικά

Αστικά υγρά απόβλητα ή λύματα ή ακάθαρτα είναι τα νερά, αναμειγμένα με στερεές ουσίες που αποβάλλονται με τη συνήθη χρήση υγιεινής από οικιστικές, εμπορικές ή βιομηχανικές περιοχές. Μαζί με αυτά μεταφέρονται συχνά και τα βιομηχανικά υγρά απόβλητα, δηλαδή τα υγρά απόβλητα που προέρχονται από βιομηχανικές διεργασίες. (Κουτσογιάννης, 2016)

Τα υγρά απόβλητα αποτελούν σήμερα μια από τις κυριότερες πηγές ρύπανσης του περιβάλλοντος. Τα υγρά απόβλητα αποτελούνται από νερό το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί από τον άνθρωπο είτε στις συνηθισμένες οικιακές χρήσεις, είτε στις βιομηχανικές παραγωγικές διαδικασίες, με αποτέλεσμα να έχει υποστεί σημαντική ποιοτική υποβάθμιση. Η υποβάθμιση αυτή οφείλεται στο γεγονός, ότι κατά τη χρήση

του, το νερό γίνεται αποδέκτης πολλών χημικών και βιολογικών παραπροϊόντων, η απόρριψη των οποίων στο περιβάλλον δημιουργεί πληθώρα περιβαλλοντικών προβλημάτων.

Η κατάλληλη επεξεργασία τους πριν την διάθεσή τους στο περιβάλλον, είναι επιτακτική, λόγω της υψηλής περιεκτικότητας των αποβλήτων σε ρυπογόνα συστατικά (ή μολυσματικά, όπως οι παθογόνοι μικροοργανισμοί), αλλά και του μεγάλου όγκου τους, που συσσωρεύεται κυρίως σε μεγάλα αστικά κέντρα. Πρωταρχική επιδίωξη της επεξεργασίας των αποβλήτων είναι η απαλλαγή της μάζας του αποβλήτου από ρύπους και μολυσματικούς παράγοντες και, δευτερευόντως, η εξουδετέρωση των ρύπων, δηλαδή η αδρανοποίησή τους.

Η επιτακτικότητα του προβλήματος της επεξεργασίας αποβλήτων έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη πολλών συστημάτων επεξεργασίας με διαφορετική ικανότητα «καθαρισμού» των αποβλήτων. Η επιλογή της κάθε μεθόδου εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως το φορτίο των αποβλήτων, ο όγκος τους, αλλά και η επιθυμητή ποιότητα τους μετά την επεξεργασία. Σε κάθε περίπτωση πάντως, η επεξεργασία των αποβλήτων ακολουθεί κάποιες βασικές αρχές, οι οποίες εξαρτώνται από τη σύστασή τους.

2.2.2 Συστατικά Αστικών Υγρών Αποβλήτων

Η κατανόηση της φύσης των υγρών αποβλήτων κρίνεται ως απαραίτητη γνώση για το σχεδιασμό και την κατανόηση της λειτουργίας των διαδικασιών συλλογής, επεξεργασίας και επαναχρησιμοποίησης αυτών, καθώς και γενικότερα για τη διαδικασία μηχανικής διαχείρισης της περιβαλλοντικής ποιότητας. Τα υγρά απόβλητα χαρακτηρίζονται, μεταξύ άλλων, με όρους της φυσικής, χημικής και βιολογικής σύνθεσής τους. (Metcalf & Eddy, 2018)

Πίνακας 2.3: Συνηθισμένες αναλύσεις που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των συστατικών που περιέχονται στα υγρά απόβλητα. (Crites & Tchobanoglous, 1998) (Metcalf & Eddy, 2018)

Ανάλυση		Χρήση ή σημασία των αποτελεσμάτων των αναλύσεων
Φυσικά Χαρακτηριστικά		Να εκτιμηθούν οι δυνατότητες επαναχρησιμοποίησης των υγρών αποβλήτων και να προσδιορισθούν οι πλέον κατάλληλες μέθοδοι και διαδικασίες για την επεξεργασία τους.
Ολικά στερεά	TS	
Ολικά πτητικά στερεά	TVS	
Ολικά σταθερά στερεά	TFS	
Ολικά αιωρούμενα στερεά	TSS	
Πτητικά αιωρούμενα στερεά	VSS	
Σταθερά αιωρούμενα στερεά	FSS	
Ολικά διαλυμένα στερεά	TDS (TS-TSS)	
Πτητικά διαλυμένα στερεά	VDS	
Ολικά σταθερά διαλυμένα	FDS	

στερεά		
Καθιζάνοντα στερεά		Να υπολογισθούν εκείνα τα στερεά που κατακαθίζουν λόγω βαρύτητας σε μια δεδομένη χρονική περίοδο.
Κατανομή μεγέθους σωματιδίων	PSD	Να εκτιμηθεί η απόδοση των διαδικασιών επεξεργασίας.
Θολότητα	NTU ^a	Να εκτιμηθεί η ποιότητα των επεξεργασμένων αποβλήτων.
Χρώμα	Ανοιχτό καφέ, γκρι, μαύρο	Να εκτιμηθεί η κατάσταση των υγρών αποβλήτων(αν έχουν υποστεί σήψη ή όχι) .
Εκπομπή	% T	Να εκτιμηθεί η καταλληλότητα των επεξεργασμένων εκροών για απολύμανση με υπεριώδη ακτινοβολία.
Οσμή	TON ^b	Να εκτιμηθεί εάν οι οσμές αποτελούν πρόβλημα ή όχι.
Θερμοκρασία	°C ή °F	Σημαντική στο σχεδιασμό και τη λειτουργία των βιολογικών διαδικασιών κατά την επεξεργασία.
Πυκνότητα	ρ	
Αγωγιμότητα	EC	Να εκτιμηθεί η καταλληλότητα των επεξεργασμένων εκροών για άρδευση.
Ανόργανα χημικά χαρακτηριστικά		
Ελεύθερη αμμωνία	NH ₄ ⁺	Χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση των θρεπτικών συστατικών και του βαθμού αποικοδόμησης των υγρών αποβλήτων. Οι ενώσεις που οξειδώνονται μπορούν να χρησιμεύσουν ως μέτρο του βαθμού οξείδωσης.
Οργανικό Άζωτο	Org N	
Ολικό Άζωτο Kjeldahl	TKN (Οργανικό N ⁺ NH ₄ ⁺)	
Νιτρώδη	NO ₂ ⁻	
Νιτρικά	NO ₃ ⁻	
Ολικό Άζωτο	TN	
Ανόργανος φώσφορος	Inorg P	
Ολικός Φώσφορος	TP	
Οργανικός φώσφορος	Org P	
pH	pH=-log[H ⁺]	Μέτρο της οξύτητας ή αλκαλικότητας ενός υδάτινου συστήματος.
Αλκαλικότητα	Σ HCO ₃ ⁻ +CO ₃ ⁻² +OH ⁻ H ⁺	Ένα μέτρο της ρυθμιστικής ικανότητας των αποβλήτων.
Χλωριούχα	Cl ⁻	Να εκτιμηθεί η καταλληλότητα των υγρών αποβλήτων για επαναχρησιμοποίηση και άρδευση.
Θειικά	SO ₄ ⁻²	Να εκτιμηθεί η πιθανότητα δημιουργίας οσμών, ενώ δύνανται να επηρεάζουν και την επεξεργασία της υλούς.
Μέταλλα	As,Cd,Ca,Cr,Co,Cu, Pb,Mg,Mo,Ni,Se,Na,Zn	Να εκτιμηθεί η καταλληλότητα των υγρών αποβλήτων για επαναχρησιμοποίηση, όπως και τυχόν τοξικές επιδράσεις στην επεξεργασία.
Ειδικά ανόργανα στοιχεία και συστατικά		Ελάχιστες ποσότητες μετάλλων είναι σημαντικές για τη βιολογική επεξεργασία.
Ποικίλα αέρια	O ₂ , CO ₂ , NH ₃ , H ₂ S, CH ₄	Να εκτιμηθεί η παρουσία ή απουσία συγκεκριμένων αερίων.
Οργανικά Χημικά Χαρακτηριστικά		
5 ημερών βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο του άνθρακα	CBOD ₅	Ένα μέτρο της ποσότητας οξυγόνου που απαιτείται για την αποικοδόμηση ενός αποβλήτου βιολογικά.
Τελικό βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο του άνθρακα	UBOD (BOD _U , BOD _L)	Ένα μέτρο της ποσότητας οξυγόνου που απαιτείται απαιτούμενο οξυγόνο του άνθρακα για την αποικοδόμηση ενός αποβλήτου βιολογικά.
Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο του αζώτου	NOD	Ένα μέτρο της ποσότητας οξυγόνου που απαιτείται για τη βιολογική οξείδωση του αζώτου των αποβλήτων σε νιτρικά.
Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο	COD	Χρησιμοποιείται συχνά ως υποκατάστατο της ανάλυσης του BOD.
Ολικός οργανικός άνθρακας	TOC	Χρησιμοποιείται συχνά ως υποκατάστατο της ανάλυσης του BOD.
Ειδικά οργανικά συστατικά και τάξεις συστατικών	MBAS ^γ , CTAS ^δ	Να προσδιορισθεί η παρουσία συγκεκριμένων οργανικών συστατικών και να εκτιμηθεί εάν ειδικά σχεδιαστικά μέτρα θα ήταν αναγκαία για την απομάκρυνσή τους.
Βιολογικά Χαρακτηριστικά		
Κολοβακτηρίδια	MPN (Most Probable Number)	Να εκτιμηθεί η παρουσία παθογόνων βακτηρίων και η αποτελεσματικότητα της διαδικασίας απολύμανσης.
Ειδικοί μικροοργανισμοί	Βακτήρια, πρωτόζωα, έλμινθες, ιοί	Να προσδιορισθεί η παρουσία ειδικών μικροοργανισμών που σχετίζονται με τη λειτουργία της εγκατάστασης, καθώς και η παρουσία αυτών που

σχετίζονται με την επαναχρησιμοποίηση.		
Τοξικότητα	Tu _a και TU _c	Μονάδα οξείας τοξικότητας, μονάδα χρόνιας τοξικότητας
^a Μονάδα νεφελομετρικής θολότητας, ^b Τιμή κατωφλίου για την οσμή, ^γ Ενεργές μπλε ουσίες μεθυλενίου, ^δ Ενεργές θειοκυανικές ενώσεις κοβαλτίου		

Τα σημαντικότερα συστατικά που εμφανίζουν ενδιαφέρον για την επεξεργασία τους σύμφωνα με (Metcalf & Eddy, 2018) είναι:

1. Αιωρούμενα στερεά: Τα αιωρούμενα στερεά μπορούν να οδηγήσουν στην ανάπτυξη συσσωμάτωσης ιλύος, καθώς και στη δημιουργία αναερόβιων συνθηκών, όταν τα ανεπεξέργαστα απόβλητα διατίθενται σε υδάτινο περιβάλλον.
2. Βιοαποικοδομήσιμα οργανικά. Αποτελούμενα κυρίως από πρωτεΐνες, υδρογονάνθρακες και λίπη, τα βιοαποικοδομήσιμα οργανικά συστατικά μετρώνται συνήθως με όρους BOD(βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο) και COD(χημικά απαιτούμενο οξυγόνο). Εάν διατεθούν στο περιβάλλον χωρίς προηγούμενη επεξεργασία, η βιολογική τους αποικοδόμηση μπορεί να οδηγήσει στην ελάττωση των φυσικών πηγών οξυγόνου και στην ανάπτυξη σηπτικών συνθηκών.
3. Παθογόνοι παράγοντες. Μεταδοτικές ασθένειες μπορούν να μεταδοθούν από παθογόνους οργανισμούς που μπορεί να υπάρχουν στα απόβλητα.
4. Θρεπτικά συστατικά. Τόσο το άζωτο όσο και ο φώσφορος, σε συνδυασμό με τον άνθρακα, είναι τα απαραίτητα θρεπτικά συστατικά για την ανάπτυξη. Όταν διατίθενται σε υδάτινο περιβάλλον, αυτά τα θρεπτικά μπορούν να οδηγήσουν στην ανάπτυξη ανεπιθύμητης υδροχαρούς βλάστησης. Όταν διατίθενται σε μεγάλες ποσότητες στο έδαφος, μπορούν επίσης να οδηγήσουν στην ρύπανση των υπόγειων υδάτων.
5. Ρύποι προτεραιότητας. Οργανικά και ανόργανα συστατικά, των οποίων είναι γνωστή ή πιθανολογούμενη η ικανότητα καρκινογένεσης, τερατογένεσης, η μεταλλαξιογόνος ικανότητα, καθώς και η υψηλή οξεία τοξικότητα. Πολλά από αυτά τα συστατικά βρίσκονται μέσα στα υγρά απόβλητα.
6. Δύσκολα αποικοδομήσιμα οργανικά. Αυτά τα οργανικά συστατικά τείνουν να αντιστέκονται στις τυπικές μεθόδους επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων. Τυπικά παραδείγματα αποτελούν τα απορρυπαντικά, οι φαινόλες και τα φυτοφάρμακα.
7. Βαρέα μέταλλα. Βαρέα μέταλλα προστίθενται συνήθως στα υγρά απόβλητα από εμπορικές ή βιομηχανικές δραστηριότητες και θα πρέπει να απομακρύνονται, εάν τα επεξεργασμένα απόβλητα θα επαναχρησιμοποιηθούν.
8. Διαλυμένα ανόργανα συστατικά. Ανόργανα συστατικά, όπως το ασβέστιο, το νάτριο και οι θεικές ρίζες προστίθενται στο πόσιμο νερό και μπορεί να

χρειάζεται να απομακρυνθούν, εάν τα επεξεργασμένα απόβλητα πρόκειται να επαναχρησιμοποιηθούν.

Τα αστικά υγρά απόβλητα κατατάσσονται σε ισχυρά, μέσα και ασθενή, βάση της ισχύος των ρυπαντικών ουσιών που περιέχουν (Χρυσικόπουλος, 2018) και τα τυπικά ποιοτικά χαρακτηριστικά τους δίνονται στον πίνακα 2.4

Πίνακας 2.4: Τυπικά ποιοτικά χαρακτηριστικά ανεπεξέργαστων αστικών αποβλήτων. (Metcalf & Eddy, 2003) (Χρυσικόπουλος, 2018)

Χαρακτηριστικό	Συγκέντρωση (mg/L)		
	Ισχυρά	Μέσα	Ασθενή
Ολικά στερεά	1200	720	350
Ολικά διαλυτά στερεά	850	500	250
Μη πτητικά διαλυτά στερεά	525	300	145
Πτητικά διαλυτά στερεά	325	200	105
Αιωρούμενα στερεά	350	220	100
Μη πτητικά αιωρούμενα στερεά	75	55	20
Πτητικά αιωρούμενα στερεά	275	165	80
Καθιζάνοντα στερεά	20	10	5
BOD ₅ στους 20°C	490	220	110
TOC	290	160	80
COD	1000	500	250
Ολικό Άζωτο	85	40	20
Οργανικό Άζωτο	35	15	8
Ελεύθερο αμμωνιακό άζωτο	50	25	12
Νιτρώδης(nitrites) άζωτο	0	0	0
Νιτρικό(nitrates) άζωτο	0	0	0
Ολικός Φόσφορος	15	8	4
Οργανικός φώσφορος	5	3	1
Ανόργανος φώσφορος	10	5	3
Χλωρίοντα	100	50	30
Θεϊκά	50	30	20
Αλκαλικότητα (σαν CaCO ₃)	200	100	50
Λίπη	150	100	50
Ολικά κολοβακτηρίδια ^α	10 ⁷ -10 ⁹	10 ⁷ -10 ⁸	10 ⁶ -10 ⁷
VOC ^β	>400	100-400	<100

^α No/100 mL, ^β μg/L

2.2.3 Επεξεργασία Αστικών Υγρών Αποβλήτων

Οι μέθοδοι επεξεργασίας των αποβλήτων διακρίνονται σε αυτές όπου κυριαρχούν οι φυσικές δυνάμεις και είναι γνωστές ως ‘φυσικές διεργασίες’ (unit operations) και στις μεθόδους επεξεργασίας κατά τις οποίες η απομάκρυνση των ρυπογόνων ουσιών επιτυγχάνεται με χημικές και βιολογικές αντιδράσεις οι οποίες είναι γνωστές ως ‘χημικές και βιολογικές διεργασίες’ (unit processes). (Metcalf & Eddy, 2018)

Πίνακας 2.5: Φυσικές και χημικές-βιολογικές διεργασίες για την απομάκρυνση των συστατικών που περιέχονται στα απόβλητα. (Metcalf & Eddy, 2018)

Συστατικό	Φυσική διεργασία ή βιολογική - χημική διεργασία
Αιωρούμενα στερεά	Εσχάρωση
	Απομάκρυνση άμμου
	Καθίζηση
	Υψηλού ρυθμού καθίζηση
	Επίπλευση
	Χημική κατακρήμνιση
	Διήθηση χώρου
	Διήθηση επιφάνειας
Βιοαποικοδομήσιμα οργανικά	Παραλλαγή αερόβιων συστημάτων αιωρούμενης βιομάζας
	Παραλλαγή αερόβιων συστημάτων προσκολλημένης βιομάζας
	Παραλλαγή αναερόβιων συστημάτων αιωρούμενης βιομάζας
	Παραλλαγή αναερόβιων συστημάτων προσκολλημένης βιομάζας
	Παραλλαγές επεξεργασίας σε λιμνοδεξαμενές
	Φυσικο-χημικά συστήματα
	Χημική οξείδωση
	Προχωρημένη οξείδωση
Θρεπτικά Στοιχεία	Μεμβράνη διήθησης
Αζωτο	Χημική οξείδωση (χλωρίωση έως το κρίσιμο σημείο)
	Παραλλαγή συστημάτων νιτροποίησης-απονιτροποίησης αιωρούμενης βιομάζας
	Παραλλαγή συστημάτων νιτροποίησης-απονιτροποίησης σταθερής κλίνης
	Απαέρωση
	Ιοντοεναλλαγή
Φόσφορος	Χημική επεξεργασία
	Βιολογική απομάκρυνση φωσφόρου
Αζωτο και φώσφορος	Παραλλαγές βιολογικής απομάκρυνσης θρεπτικών
Παθογόνοι μικροοργανισμοί	Ενώσεις χλωρίου
	Διοξειδίο του χλωρίου
	Όζον
	Υπεριώδης ακτινοβολία
Κολλοειδή και διαλυτά στερεά	Μεμβράνες
	Χημική επεξεργασία
	Προσρόφηση σε άνθρακα
	Ιοντοεναλλαγή
Πτητικές οργανικές ενώσεις	Απαέρωση
	Προσρόφηση σε άνθρακα
	Προχωρημένη οξείδωση
Οσμές	Χημικές πλυντρίδες
	Προσρόφηση σε άνθρακα
	Βιοφίλτρα
	Φίλτρα με υλικό βιοαποικοδομήσεως

Σήμερα, οι φυσικές διεργασίες και οι χημικές και βιολογικές διεργασίες ομαδοποιούνται σε στάδια ώστε να παρέχουν διάφορους βαθμούς επεξεργασίας. Τα στάδια αυτά είναι γνωστά ως (Metcalf & Eddy, 2018):

- a. προεπεξεργασία (προκαταρκτική επεξεργασία)
- b. πρωτοβάθμια επεξεργασία
- c. προχωρημένη πρωτοβάθμια επεξεργασία
- d. δευτεροβάθμια (με ή χωρίς απομάκρυνση θρεπτικών συστατικών)
- e. προχωρημένη (ή τριτοβάθμια επεξεργασία)

Πίνακας 2.6: Στάδια επεξεργασίας υγρών αποβλήτων (Crites & Tchobanoglous, 1998) (Metcalf & Eddy, 2018)

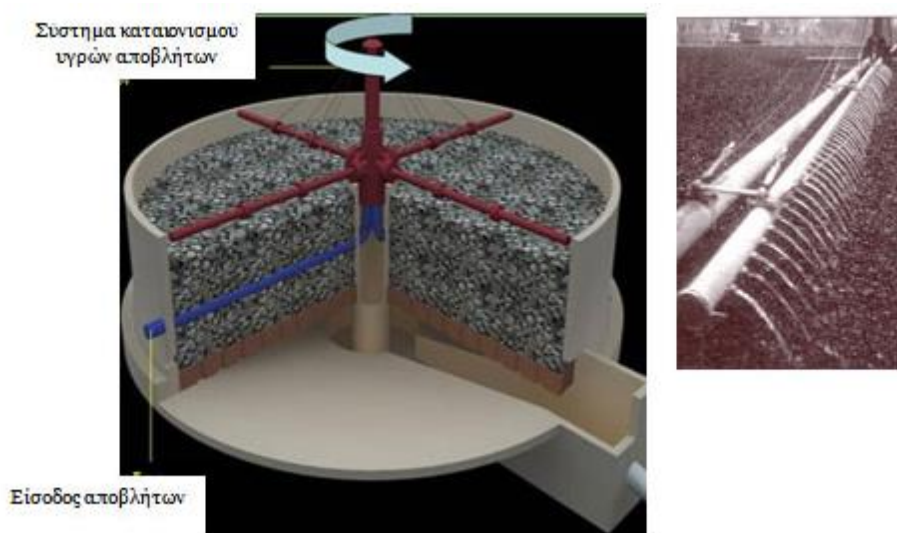
Στάδιο Επεξεργασίας	Περιγραφή
Προεπεξεργασία	Απομάκρυνση των υλικών που περιέχονται στα απόβλητα όπως κουρέλια, ξύλα, επιπλέοντα υλικά, χαλίκια-άμμος και γράσο τα οποία μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα συντήρησης ή λειτουργίας στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας, στις διεργασίες και στα βοηθητικά συστήματα.
Πρωτοβάθμια	Απομάκρυνση μέρους των αιωρούμενων στερεών και του οργανικού υλικού από τα υγρά απόβλητα.
Προχωρημένη πρωτοβάθμια	Ενισχυμένη απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών και του οργανικού υλικού από τα υγρά απόβλητα. Τυπικά χρησιμοποιείται με προσθήκη χημικών και διήθησης.
Δευτεροβάθμια	Απομάκρυνση των βιοαποικοδομήσιμων οργανικών υλικών (διαλυμένων ή αιωρούμενων) και των αιωρούμενων στερεών. Η απολύμανση περιλαμβάνεται επίσης στον τυπικό ορισμό της συμβατικής δευτεροβάθμιας επεξεργασίας.
Δευτεροβάθμια με απομάκρυνση θρεπτικών ουσιών	Απομάκρυνση των βιοαποικοδομήσιμων οργανικών υλικών, των αιωρούμενων στερεών και των θρεπτικών ουσιών(άζωτο, φώσφορος, ή και τα δύο μαζί).
Τριτοβάθμια	Απομάκρυνση των υπολειπόμενων αιωρούμενων στερεών (μετά τη δευτεροβάθμια επεξεργασία) συνήθως με χρήση μέσου διήθησης ή μικροσχάρας. Η απολύμανση είναι επίσης μέρος της τριτοβάθμιας επεξεργασίας. Σε αυτόν τον ορισμό συμπεριλαμβάνεται συνήθως η απομάκρυνση των θρεπτικών συστατικών.
Προχωρημένη	Απομάκρυνση των διαλυμένων και αιωρούμενων υλικών που παραμένουν μετά τη συνηθισμένη βιολογική επεξεργασία όταν απαιτείται σε διάφορες εφαρμογές επαναχρησιμοποίησης του νερού.

2.2.4 Εναλλακτικές Μέθοδοι Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων

Εκτός από τη μέθοδο της ενεργού ιλύος που είναι η πιο διαδεδομένη για την επεξεργασία αστικών υγρών αποβλήτων, έχουν αναπτυχθεί και πολλές άλλες μέθοδοι. Συνοπτικά, οι σημαντικότερες μέθοδοι είναι:

- Τα βιολογικά φίλτρα ή χαλικο-δυλιστήρια (Trickling filters)
- Οι βιολογικοί πύργοι
- Οι βιολογικοί δίσκοι
- Τα φυσικά συστήματα επεξεργασίας (Κεφάλαιο 2.3).

Από τις μεθόδους αυτές, τα βιολογικά φίλτρα και τα φυσικά συστήματα επεξεργασίας είναι που βρίσκουν τη μεγαλύτερη εφαρμογή. Το βιολογικό φίλτρο, όπως και το σύστημα ενεργού ιλύος, έχει ως στόχο την απομάκρυνση των οργανικών ουσιών από τα λύματα με τις διαδικασίες της βιολογικής οξείδωσης και σύνθεσης. Η βασική διαφορά των δύο συστημάτων έγκειται στο ότι, ενώ στο σύστημα ενεργού ιλύος η βιομάζα βρίσκεται σε αιώρηση, στα βιολογικά φίλτρα οι μικροοργανισμοί είναι προσκολλημένοι σε ένα σταθερό φορέα. Πρόκειται για μία κυλινδρική (συνήθως) δεξαμενή γεμάτη με ένα αδρανές υλικό (πλαστικό ή χαλίκι) όπου αναπτύσσονται μικροοργανισμοί. Τα απόβλητα διαβρέχουν το υλικό και αναπτύσσεται βιολογική δράση, παρουσία οξυγόνου από την ατμόσφαιρα. (Κέντρο Εκπαιδευτικής Έρευνας, χ.χ.)



Εικόνα 2.1: Τυπικό βιολογικό φίλτρο (Λυμπεράτος & Βαγενάς, 2011).

2.2.5 Νομοθεσία περί Αστικών Υγρών Αποβλήτων

- *Οδηγία 91/271/ΕΟΚ* του Συμβουλίου της 21ης Μαΐου 1991 για την επεξεργασία των αστικών λυμάτων.
- *ΚΥΑ 5673/400/1997* «Μέτρα και όροι για την επεξεργασία των αστικών λυμάτων».
- *ΚΥΑ 145116/2011* «Καθορισμός μέτρων, όρων και διαδικασιών για την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων και άλλες διατάξεις».
- *ΚΥΑ 191002/2013* «Τροποποίηση της υπ' αριθ. 145116/2011 κοινής υπουργικής απόφασης «Καθορισμός μέτρων, όρων και διαδικασιών για την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων (Β' 354) και συναφείς διατάξεις».
- *Οδηγία 86/278* του Συμβουλίου των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων της 12^{ης} Ιουνίου 1986 «Σχετικά με την προστασία του περιβάλλοντος και ιδίως του εδάφους κατά την χρησιμοποίηση της ιλύος καθαρισμού λυμάτων στη γεωργία».
- *ΚΥΑ 80568/4225/91* «Μέθοδοι, όροι και περιορισμοί για την χρησιμοποίηση στην γεωργία της ιλύος που προέρχεται από την επεξεργασία οικιακών και αστικών λυμάτων».
- *Εγκύκλιος ΥΥΠ & ΚΑ με αριθ. ΥΜ/2985/29.5-91* : Οδηγίες εφαρμογής Ειβ/221/65 σε συνδυασμό με 69269/5387/90 ΚΥΑ Επικαιροποιούνται και κωδικοποιούνται οι διαδικασίες για την έκδοση άδειας διάθεσης υγρών αποβλήτων με ταυτόχρονη έγκριση περιβαλλοντικών όρων, όπου απαιτείται σύμφωνα με την ΚΥΑ 69269/5387/90
- *Εγκύκλιος 145447*: Διευκρινίσεις με την ορθή εφαρμογή της ΚΥΑ 45116/02-02-2011 (ΦΕΚ Β' 354/2011) «Καθορισμός μέτρων, όρων και διαδικασιών για την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων και διατάξεις».
- *Εγκύκλιος 1589*: Διευκρινίσεις με την ορθή εφαρμογή της ΚΥΑ 45116/02-02-2011 (ΦΕΚ Β' 354/2011) «Καθορισμός μέτρων, όρων και διαδικασιών για την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων και διατάξεις» μετά την έκδοση του Ν.4014/2011 (ΦΕΚ 209/21-09-2011)

Πίνακας 2.7: Απαιτήσεις για απορρίψεις από αριθμούς επεξεργασίας αστικών λυμάτων που διέπονται από τα άρθρα 4 και 5(ΦΕΚ 192β/14-3-97, ΚΥΑ 5673/400/1997).

Παράμετρος	Συγκέντρωση	Ελάχιστη εκατοστιαία μείωση	Μέθοδοι μέτρησης αναφοράς
Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο – BOD₅ στους 20°C χωρίς νιτροποίηση	25 mg/L O ₂	70-90	Ομογενοποιημένο, αδιάθικτο ακατακάθιστο δείγμα προσδιορισμός του διαλυόμενου οξυγόνου πριν και μετά πενθήμερη επώαση στους 20°C, σε απόλυτο σκότος. Προσθήκη παρεμποδιστή της νιτροποίησης.
Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο - COD	125 mg/L O ₂	75	Ομογενοποιημένο αδιάθικτο ακατακάθιστο δείγμα. Διχρωμικό κάλιο.
Ολικά αιωρούμενα στερεά - TSS	35 mg/L (άνω των 1.000 ι.π.*) και 60 mg/L (2.000-1.000 ι.π.*)	90 (άνω των 10.000 ι.π.*) και 70 (2.000-1.000 ι.π.*)	Διήθηση αντιπροσωπευτικού δείγματος μέσω φίλτρου μεμβράνης των 0,45μm ξήρανση σε θερμοκρασία 105°C και ζύγιση.
Ολικός φώσφορος	2 mg/L P (10.000-100.000 ι.π.*) 1 mg/L P (άνω των 100.000 ι.π.*)	80	Φασματοφωτομετρία μοριακής απορρόφησης
Ολικό άζωτο	15 mg/L N (1.000-100.000 ι.π.*) 10 mg/L N (άνω των 100.000 ι.π.*)	70-80	Φασματοφωτομετρία μοριακής απορρόφησης

2.2.6 Ανάκτηση και Επαναχρησιμοποίηση Αστικών Υγρών Αποβλήτων

Η συνεχής αύξηση του πληθυσμού, η ρύπανση των επιφανειακών και υπόγειων νερών, η άνιση κατανομή των υδάτινων πόρων και οι περιοδικές ξηρασίες, έχουν οδηγήσει στους οργανισμούς ύδρευσης σε αναζήτηση νέων πηγών υδάτινων αποθεμάτων. Η χρήση των επαρκώς επεξεργασμένων εκροών υγρών αποβλήτων, οι οποίες εκβάλλουν στο περιβάλλον από τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας αστικών λυμάτων, συγκεντρώνει όλο και περισσότερο ενδιαφέρον ως μία βιώσιμη λύση υδάτινου πόρου. Σε πολλές περιοχές η επαναχρησιμοποίηση του νερού αποτελεί ήδη ένα σημαντικό στοιχείο στο σχεδιασμό και την διαχείριση των υδάτινων πόρων (Metcalf & Eddy, 2018).

Οι πρώτες εφαρμογές στον τομέα της επαναχρησιμοποίησης του νερού είναι συνώνυμες με την ιστορική πρακτική της χρήσης γης για τη διάθεση των υγρών αποβλήτων. Με την εμφάνιση των συστημάτων αποχέτευσης στο δέκατο ένατο αιώνα, τα οικιακά υγρά απόβλητα χρησιμοποιήθηκαν στις *φάρμες αποβλήτων* (sewage farms) και μετά το 1900 δημιουργήθηκαν πολυάριθμες φάρμες αποβλήτων στην Ευρώπη και στις Ηνωμένες Πολιτείες. Ενώ οι φάρμες αποβλήτων χρησιμοποιούνταν κυρίως για την απόθεση των αποβλήτων, γίνονταν περιστασιακά χρήση του νερού στις καλλιέργειες και σε άλλες ωφέλιμες εφαρμογές. (Veatch Jr, 1938)

Οι κυριότερες κατηγορίες επαναχρησιμοποίησης νερού ξεκινώντας από την κατηγορία με την πιο διαδεδομένη εφαρμογή και καταλήγοντας στην πιο περιορισμένη σύμφωνα με (Metcalf & Eddy, 2018) είναι:

1. Η άρδευση αγροτικών εκτάσεων
2. Η άρδευση πάρκων, γηπέδων γκολφ, κοινόχρηστων χώρων και ακάλυπτων χώρων γύρω από εμπορικά καταστήματα, γραφεία και βιομηχανίες.
3. Για βιομηχανικές δραστηριότητες, κυρίως για ψύξη και ανάγκες διάφορων διεργασιών. Το νερό ψύξης είναι η επικρατέστερη εφαρμογή βιομηχανικής επαναχρησιμοποίησης, το οποίο αποτελεί τη μεγαλύτερη απαίτηση πολλών βιομηχανιών σε νερό.
4. Ο εμπλουτισμός των υπόγειων νερών. Ο εμπλουτισμός των υπόγειων νερών σχετίζεται με την ενσωμάτωση του ανακτημένου νερού στο υπόγειο νερό, την αποθήκευση στον υπόγειο υδροφόρο ή τη δημιουργία υδραυλικού φράγματος

για την παρεμπόδιση της διείσδυσης και ανάμειξης του θαλασσινού νερού με το γλυκό νερό παράκτιων υδροφορέων.

5. Για περιβαλλοντικές χρήσεις και χρήσεις αναψυχής. Περιλαμβάνουν μη πόσιμες χρήσεις που σχετίζονται με δραστηριότητες που έχουν ως βάση το νερό, όπως υγρότοποι αναψυχής, εμπλουτισμός υδροβιότοπων και ενίσχυση χειμάρρων.
6. Μη πόσιμο νερό για αστικές χρήσεις. Περιλαμβάνει χρήσεις όπως πυρόσβεση, κλιματισμός, καθαρισμός τουαλετών και νερό για οικοδομική χρήση.
7. Χρήση για πόσιμο νερό. Εφαρμόζεται μέσω ανάμειξης του ανακτημένου νερού, με το ακατέργαστο πόσιμο ενός ταμιευτήρα πόσιμου νερού ή σπανιότερα, μέσω άμεσης διοχέτευσης του ανακτημένου νερού στο δίκτυο πόσιμου.

Ενώ είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν μεγάλες ποσότητες ανακτημένων αστικών υγρών αποβλήτων στις πρώτες πέντε κατηγορίες επαναχρησιμοποίησης, στην έκτη και έβδομη κατηγορία επαναχρησιμοποίησης οι ποσότητες είναι μικρές, κυρίως της επαναχρησιμοποίησης για πόσιμο νερό.

2.2.6.1 Επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων λυμάτων για άρδευση

Η επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων λυμάτων για άρδευση στην Ευρωπαϊκή Ένωση ρυθμίζεται από τον [Κανονισμό \(ΕΕ\) 2020/741](#) ο οποίος τέθηκε σε ισχύ στις 26 Ιουνίου 2023. Ο κανονισμός αυτός καθορίζει ελάχιστες απαιτήσεις ποιότητας για την ασφαλή χρήση ανακτημένου νερού στη γεωργία. Ο κανονισμός ορίζει τέσσερις κατηγορίες ποιότητας ανακτημένου νερού (Α, Β, Γ, Δ), ανάλογα με τη χρήση και τη μέθοδο άρδευσης. Οι ελάχιστες απαιτήσεις ποιότητας διαφέρουν ανά κατηγορία.

Πίνακας 2.8: Κατηγορίες ποιότητας του ανακτημένου νερού και επιτρεπόμενη γεωργική χρήση και μέθοδος άρδευσης. (Κανονισμός (ΕΕ) 2020/741, Παράρτημα Ι, Πίνακας 1)

Ελάχιστη κατηγορία ποιότητας του ανακτημένου νερού	Κατηγορία καλλιέργειας	Μέθοδος άρδευσης
A	Όλες οι καλλιέργειες εδώδιμων φυτών που καταναλώνονται ωμά των οποίων το βρώσιμο τμήμα έρχεται σε άμεση επαφή με ανακτημένο νερό και τα ριζώδη φυτά που καταναλώνονται ωμά	Όλες οι μέθοδοι άρδευσης
B	Καλλιέργειες εδώδιμων φυτών που καταναλώνονται ωμά όταν το βρώσιμο μέρος παράγεται πάνω από το έδαφος και δεν βρίσκεται σε άμεση επαφή με ανακτημένο νερό, καλλιέργειες εδώδιμων φυτών που μεταποιούνται και καλλιέργειες μη εδώδιμων φυτών, συμπεριλαμβανομένων των καλλιεργειών που χρησιμοποιούνται για τη διατροφή γαλακτοπαραγωγικών ζώων ή ζώων που παράγουν κρέας	Όλες οι μέθοδοι άρδευσης

Γ	Καλλιέργειες εδώδιμων φυτών που καταναλώνονται ωμά όταν το βρώσιμο μέρος παράγεται πάνω από το έδαφος και δεν βρίσκεται σε άμεση επαφή με ανακτημένο νερό, καλλιέργειες εδώδιμων φυτών που μεταποιούνται και καλλιέργειες μη εδώδιμων φυτών, συμπεριλαμβανομένων των καλλιεργειών που χρησιμοποιούνται για τη διατροφή γαλακτοπαραγωγικών ζώων ή ζώων που παράγουν κρέας	Στάγδην άρδευση *, ή άλλη μέθοδος άρδευσης που αποφεύγει την άμεση επαφή με το βρώσιμο μέρος της καλλιέργειας
Δ	Βιομηχανικές και ενεργειακές καλλιέργειες και καλλιέργειες σπόρων	Όλες οι μέθοδοι άρδευσης

*Στάγδην άρδευση είναι ένα σύστημα μικροάρδευσης φυτών με σταγόνες ή μικρά ρυάκια νερού και συνίσταται στην παροχή νερού σε σταγόνες πάνω στο έδαφος ή απευθείας κάτω από την επιφάνειά του σε πολύ χαμηλές ροές (2-20 λίτρα/ώρα) μέσω ενός συστήματος πλαστικών σωλήνων μικρής διαμέτρου στο οποίο προσαρμόζονται εκροές που ονομάζονται σταλάκτες.

Πίνακας 2.9: Απαιτήσεις ποιότητας του ανακτημένου νερού για γεωργική άρδευση. (Κανονισμός (ΕΕ) 2020/741, Παράρτημα Ι, Πίνακας 2)

Κατηγορία ποιότητας ανακτημένου νερού	Απαιτήσεις ποιότητας				
	<i>E. coli</i> (αριθμός/100ml)	BOD ₅ (mg/l)	TSS (mg/l)	Θολότητα (NTU)	Άλλα
A	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 5	<i>Legionella</i> spp.: < 1.000 cfu/l, όταν υπάρχει κίνδυνος αερόλυσης Εντερικά νηματώδη (αβγά ελμίνθων): ≤ 1 αβγό/l για άρδευση βοσκοτόπων ή χορτονομής
B	≤ 100	≤ 25 (Σύμφωνα με την οδηγία 91/271/ΕΟΚ (Παράρτημα Ι πίνακας 1))	≤ 35(πληθυσμό άνω των 10000) ≤ 60(για πληθυσμό 2000- 10000) (Σύμφωνα με την οδηγία 91/271/ΕΟΚ (Παράρτημα Ι πίνακας 1))	-	
Γ	≤ 1 000			-	
Δ	≤ 10 000			-	

Ο κανονισμός (ΕΕ) 2020/741 δεν καθορίζει συγκεκριμένα όρια για θρεπτικά στοιχεία όπως το άζωτο και ο φώσφορος. Ωστόσο, η παρουσία αυτών των στοιχείων στο ανακτημένο νερό μπορεί να επηρεάσει το περιβάλλον και τη γεωργική παραγωγή. Συνεπώς απαιτείται αξιολόγηση κινδύνου για την πρόκληση πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων όπως ο ευτροφισμός, αλλά και για την προστασία της ανθρώπινης και ζωικής υγείας.

2.3 Φυσικά Συστήματα Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων

Πολλές φορές οι διεργασίες που εμπλέκονται στα φυσικά συστήματα επεξεργασίας είναι οι ίδιες με αυτές που συμβαίνουν στα μηχανικά ή συμβατικά συστήματα επεξεργασίας, όπως είναι: η καθίζηση, το φιλτράρισμα, η μεταφορά αερίων, η προσρόφηση, η ιοντική ανταλλαγή, η χημική κατακρήμνιση, η χημική οξείδωση και αναγωγή και η βιολογική μετατροπή και αποδόμηση και άλλες, που είναι μοναδικές σε φυσικά συστήματα επεξεργασίας, όπως είναι η φωτοσύνθεση, η φωτοοξείδωση και η πρόσληψη από τα φυτά. Στα φυσικά συστήματα οι διεργασίες συντελούνται με ‘φυσικές ταχύτητες’ και τείνουν να διενεργούνται περισσότερες από μία συγχρόνως σε έναν ‘οικοσυστηματικό αντιδραστήρα’, σε αντίθεση με τα μηχανικά συστήματα, στα οποία συμβαίνουν διαδοχικά και σε διαφορετικούς σε σειρά αντιδραστήρες ή δεξαμενές, με επιταχυνόμενες ταχύτητες, ως αποτέλεσμα της εισρέουσας σε αυτές ενέργειας. (Metcalf & Eddy, 1991) (Αγγελάκης & Tchobanoglous, 1995)

Φυσικά συστήματα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων ορίζονται αυτά που η επεξεργασία του υγρού αποβλήτου γίνεται με φυσικά μέσα και διεργασίες, όπως είναι οι φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες ή συνδυασμός τους, που συμβαίνουν στο περιβάλλον. (Αγγελάκης, 1989) (Αγγελάκης & Tchobanoglous, 1995). Τα φυσικά συστήματα επεξεργασίας κατατάσσονται στις εξής βασικές κατηγορίες: (Metcalf & Eddy, 1991) (Αγγελάκης & Tchobanoglous, 1995)

1. Αυτά που βασίζονται στο έδαφος ή τα γήινα συστήματα επεξεργασίας. Μετά την εφαρμογή προεπεξεργασμένων υγρών αποβλήτων στην επιφάνεια του εδάφους, επιτυγχάνεται περαιτέρω επεξεργασία τους, δια μέσου των φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών που συμβαίνουν στο έδαφος και βαθύτερους γεωλογικούς σχηματισμούς. Τα υδραυλικά φορτία εφαρμογής των αποβλήτων πρέπει να είναι συμβατά με το δυναμικό του κάθε συστήματος. Οι κύριοι τύποι συστημάτων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων με εφαρμογή τους στο έδαφος και σε βαθύτερους γεωλογικούς σχηματισμούς είναι οι:
 - i) Βραδεία εφαρμογή
 - ii) Ταχεία διήθηση
 - iii) Επιφανειακή ροή
 - iv) Συνδυασμένοι τύποι
2. Διάφοροι τύποι τεχνητών λιμνών ή δεξαμενών σταθεροποίησης λυμάτων
3. Τα συστήματα που βασίζονται στα υδροχαρή φυτά, όπως είναι οι φυσικοί και τεχνητοί υγροβιότοποι και τα συστήματα των επιπλεόντων υδροχαρών φυτών.

2.4 Υγροβιότοποι

Οι Υγροβιότοποι ή Υγρότοποι είναι περιοχές που καταλαμβάνονται ή είναι κορεσμένες από επιφανειακά ή υπόγεια νερά σε συχνότητα και διάρκεια ικανές να υποστηρίξουν φυτική βλάστηση που είναι προσαρμοσμένη να ζει σε κορεσμένες συνθήκες. Σε κάθε περίπτωση ο υγροβιότοπος καθορίζεται από τρεις παραμέτρους που πρέπει να συνυπάρχουν (Αντωνόπουλος, 2019) :

- 1) νερό, υγρές συνθήκες
- 2) υδρομορφικά εδάφη
- 3) υδρόβια-υδροχαρής φυτά

Ως υδρομορφικά εδάφη (hydric soil) ορίζονται τα εδάφη που έχουν σχηματιστεί υπό συνθήκες κορεσμένες, κατακλυσμένες, ή πλημμυρισμένες για μεγάλο χρόνο, κατά τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου, ικανό ώστε να αναπτύξουν αναερόβιες συνθήκες στο πάνω τμήμα τους (Register, 1994).

Η επάρκεια νερού στους υγροβιότοπους συμβάλλει θετικά στην βιολογική ανάπτυξη των ειδών και για αυτό τον λόγο συναντώνται πολλά είδη χλωρίδας και πανίδας. Το υψηλό ποσοστό βιολογικών δραστηριοτήτων, που συνεπάγεται της υψηλής βιοποικιλότητας σε αυτά τα οικοσυστήματα, έχει ως αποτέλεσμα την βιοαποικοδόμηση πολλών από τους ρύπους που συναντώνται στα λύματα, μετατρέποντάς τους σε αβλαβή υποπροϊόντα ή ακόμα και σε αξιοποιήσιμα προϊόντα. (Robert H. Kadlec, 1996)

Φυσικοί Υγροβιότοποι

Οι φυσικοί υγροβιότοποι είναι οικοσυστήματα που περιλαμβάνουν περιοχές με μόνιμη ή εποχική παρουσία νερού, το οποίο μπορεί να είναι γλυκό, αλμυρό ή υφάλμυρο, δημιουργώντας συνθήκες κατάλληλες για την ανάπτυξη ειδικών μορφών ζωής (Mitsch & Gosselink, 2015). Φυσικοί υγροβιότοποι είναι οι λίμνες, τα ποτάμια, τα έλη, οι δέλτα ποταμών και οι λιμνοθάλασσες, τα οποία διαδραματίζουν βασικό ρόλο στη ρύθμιση των οικοσυστημάτων (Ramsar Convention Secretariat, 2016).

Οι υγροβιότοποι παρέχουν σημαντικές υπηρεσίες, όπως η αποθήκευση νερού, ο φυσικός καθαρισμός από ρυπογόνες ουσίες και η πρόληψη πλημμυρών μέσω της απορρόφησης του νερού. Επιπλέον, λειτουργούν ως καταφύγια για χιλιάδες είδη φυτών και ζώων, πολλά από τα οποία είναι απειλούμενα (Finlayson & Van Der Valk, 2016).

Παράλληλα οι υγροβιότοποι υποστηρίζουν οικονομικές δραστηριότητες, όπως η γεωργία και η αλιεία, ενώ έχουν μεγάλη αξία για την έρευνα και την περιβαλλοντική εκπαίδευση (Costanza, d'Arge, de Groot, Farber, & Grasso, 1997).



Εικόνα 2.2: Φυσικός Υγροβιότοπος (The Nature Conservancy, n.d.)

2.5 Τεχνητοί Υγροβιότοποι για την Επεξεργασία Λυμάτων

Οι τεχνητοί υγροβιότοποι είναι συστήματα επεξεργασίας αποβλήτων που προσομοιώνουν τις αρχές λειτουργίας των φυσικών υγροβιότοπων για την απομάκρυνση ρύπων. Έχουν αποδειχθεί ότι είναι καλές εναλλακτικές μέθοδοι επεξεργασίας λυμάτων με μικρό κόστος λειτουργίας και συντήρησης. Η απομάκρυνση των ρύπων πραγματοποιείται με μια σειρά φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών που συμβαίνουν λόγω της αλληλεπίδρασης μεταξύ του νερού, του εδάφους, του αέρα και των μικροοργανισμών. (Kadlec & Wallace, 2009). Έχουν όλες τις δυνατότητες των φυσικών υγροβιότοπων, αλλά χωρίς τους περιορισμούς, που αφορούν τη διάθεση εκροών σε φυσικά οικοσυστήματα. (Αγγελάκης & Tchobanoglous, 1995)

Πίνακας 2.10: Τυπικές τιμές ποιοτικών παραμέτρων στις εισροές τεχνητών υγροβιότοπων (United States Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, 2000) (Αντωνόπουλος, 2019)

Παράμετρος (mg L ⁻¹)	Εκροές σηπτικών δεξαμενών	Εκροές πρωτοβάθμιες	Εκροές δεξαμενών
BOD	129 - 147	40 - 200	11 - 35
Διαλυτό BOD	100 - 118	35 - 160	7 - 17
COD	310 - 344	90 - 400	60 - 100
TSS	44 - 54	55 - 230	20 - 80
VSS	32 - 39	45 - 180	25 - 65
TN	41 - 49	20 - 85	8 - 22
NH₃	28 - 34	15 - 40	0,6 - 1,6
NO₃	0 - 0,9	0	0,1 - 0,8
TP	12 - 14	4 - 15	3 - 4
OrthoP	10 - 12	3 - 10	2 - 3
Fecal coli (log/100mL)	5,4 - 6	5 - 7	0,8 - 5,6

Έχουν αναπτυχθεί δύο είδη τεχνητών υδροβιότοπων σύμφωνα με τα υδραυλικά χαρακτηριστικά ροής νερού στο σύστημα: (Αγγελάκης & Tchobanoglous, 1995) (Στεφανάκης, 2011) (Τερζάκης, 2009)

- 1) Συστήματα Ελεύθερης Επιφάνειας ή Επιφανειακής Ροής (Free Water Surface)
- 2) Συστήματα Υποεπιφανειακής Ροής (Subsurface Flow)
 - a) Συστήματα Υποεπιφανειακής Οριζόντιας Ροής
 - b) Συστήματα Υποεπιφανειακής Κατακόρυφης Ροής

Επίσης υπάρχουν και τα υβριδικά συστήματα όπου συνδυάζεται η οριζόντια και η κάθετη υποεπιφανειακή ροή. (Στεφανάκης, 2011)

Το εύρος της διαφορετικής προέλευσης των αποβλήτων, που επεξεργάζονται οι τεχνητοί υδροβιότοποι είναι ποικίλο και η επεξεργασία αστικών υγρών αποβλήτων είναι μόνο μία εφαρμογή από τις πολλές. (Vymazal J. , 2010)

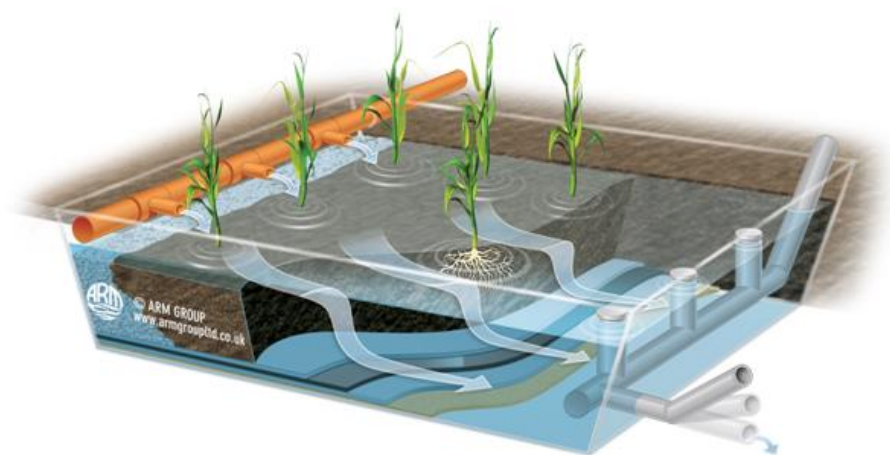
2.5.1 Συστήματα Ελεύθερης Επιφάνειας ή Επιφανειακής ροής (Free Water Surface)

Τα συστήματα ελεύθερης επιφάνειας αποτελούνται, συνήθως, από παράλληλες λεκάνες, κανάλια ή τάφρους με αδιαπέραστους πυθμένες. (Αγγελάκης & Tchobanoglous, 1995). Το βάθος του νερού είναι από 0,2 έως 0,4 μέτρα και έχουν πυκνή αναδυόμενη βλάστηση που καλύπτει σημαντική επιφάνεια του εδάφους, συνήθως περισσότερη από το 50%. Τα φυτά συνήθως δεν θερίζονται και τα νεκρά κλαδιά και φύλλα παρέχουν οργανικό άνθρακα, που είναι απαραίτητος για την απονιτροποίηση, η οποία πραγματοποιείται κάτω από αναερόβιες συνθήκες στο υπόστρωμα ή ίζημα που σχηματίζεται από τα νεκρά κλαδιά και φύλλα και τα καθιζάμενα σωματίδια. (Vymazal J. , 2010)

Οι τεχνητοί υδροβιότοποι ελεύθερης επιφάνειας είναι αποτελεσματικοί στην απομάκρυνση του οργανικού φορτίου και των κολλοειδή σωματιδίων. Τα αιωρούμενα στερεά απομακρύνονται με φίλτρωση εξαιτίας της πυκνής βλάστησης και με καθίζηση. Το άζωτο απομακρύνεται κατά κύριο λόγο με νιτροποίηση (στο νερό) και δευτερευόντως με απονιτροποίηση (στο ίζημα που δημιουργείται από νεκρά κλαδιά, φύλλα και καθιζάνοντα στερεά) και με την εξάτμιση της αμμωνίας με υψηλούς δείκτες pH που προκαλείτε από τα φωτοσυνθετικά άλγη. Ο φώσφορος δεν απομακρύνεται ικανοποιητικά, εξαιτίας της περιορισμένης επαφής του νερού με σημεία του εδάφους που προσροφούν ή/και κατακρημνίζουν φώσφορο. Η απομάκρυνση θρεπτικών μέσω πρόσληψης από τα φυτά είναι μόνο προσωρινή κατάσταση, αφού τα θρεπτικά συστατικά απελευθερώνονται στο νερό, μετά την αποσύνθεσή τους (Vymazal & Kröpfelová, 2008) (Kadlec & Wallace, 2009).

Οι τεχνητοί υδροβιότοποι ελεύθερης επιφάνειας χρησιμοποιούνται συχνά στην Βόρεια Αμερική (Kadlec & Wallace, 2009) και στην Αυστραλία (QDNR (Queensland

Department of Natural Resources), 2000). Στην Ευρώπη, υπάρχει πρόσφατο ενδιαφέρον για αυτά τα συστήματα ειδικά στην Σουηδία και την Δανία, που χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση αζώτου από διάχυτη ρύπανση (Vymazal, Greenway, Tonderski, Brix, & Mander, 2006). Διάχυτη ρύπανση είναι η απελευθέρωση πιθανών ρύπων από μια σειρά δραστηριοτήτων, που μεμονωμένα, μπορεί να μην έχουν καμία επίδραση στο υδάτινο περιβάλλον, αλλά συλλογικά μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντική περιβαλλοντική ζημιά (SEPA, n.d.).



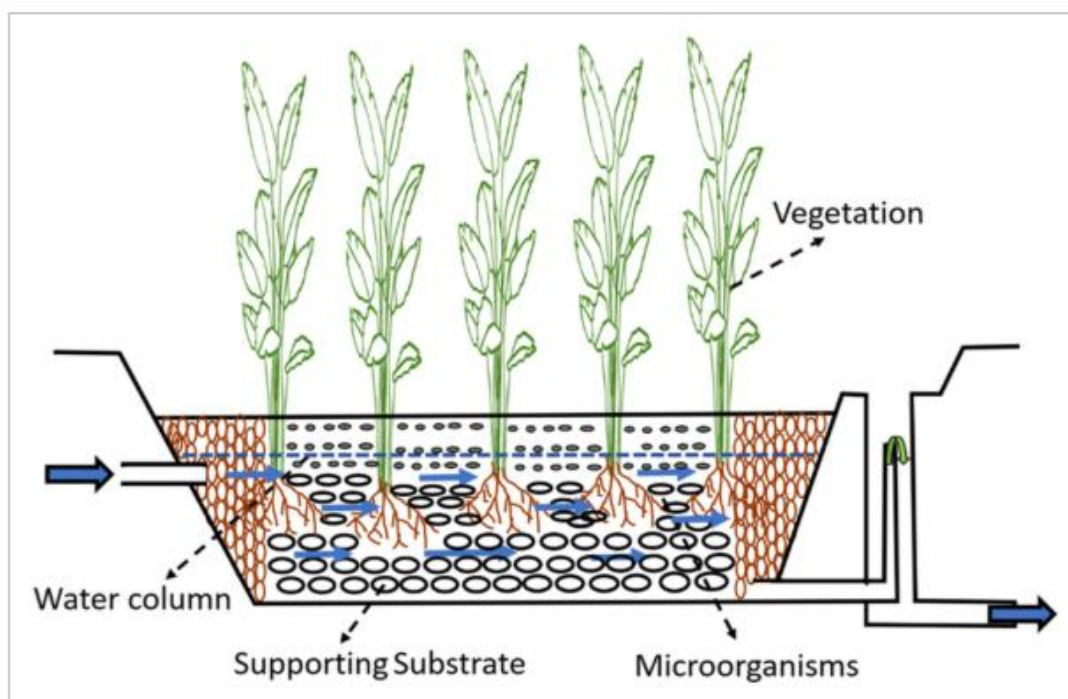
Εικόνα 2.3: Απεικόνιση Συστήματος Ελεύθερης Επιφάνειας (Global Wetland Technology, n.d.)

2.5.2 Συστήματα Υποεπιφανειακής Οριζόντιας Ροής (Subsurface Horizontal Flow)

Οι τεχνητοί υδροβιότοποι υποεπιφανειακής οριζόντιας ροής είναι κατασκευές που είναι γνωστές ως ‘κλίνες’ και έχουν στεγανό περίβλημα ώστε να μην διαφεύγει το νερό από το σύστημα, με υλικό πλήρωσης συνήθως χαλίκι ή πέτρα με διάμετρο 10 έως 20 mm και έχουν υδροχαρές βλάστηση. Σε αυτά τα συστήματα το υγρό απόβλητο τροφοδοτείται στην μία άκρη και ρέει κάτω από την επιφάνεια οριζοντίως, μέσω του πορώδους μέσου, καταλήγοντας στην άλλη άκρη του συστήματος όπου γίνεται και η εκροή του επεξεργασμένου αποβλήτου. Εμφανίστηκαν πρώτη φορά το 1950 στην Γερμανία από την Käthe Seidel και ξεκίνησαν να γίνονται πειραματισμοί κυρίως όσον αφορά το υλικό πλήρωσης, από διάφορους επιστήμονες έτσι ώστε να ξεπεραστούν κάποιοι περιορισμοί και προβλήματα. Στην δεκαετία του 1990 αυτό το σύστημα εξαπλώθηκε σχεδόν σε όλες τις χώρες της Ευρώπης, στη Βόρεια Αμερική, στην Αυστραλία, στην Ασία και στην Αφρική. (Vymazal J. , 2010)

Η οργανική ύλη βιοαποικοδομείται αποτελεσματικά κάτω από ανοξικές-αναερόβιες συνθήκες καθώς η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου είναι περιορισμένη. Η απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών είναι πολύ αποτελεσματική και πραγματοποιείται με διήθηση και καθίζηση (Vymazal & Kröpfelová, 2008). Το άζωτο απομακρύνεται κυρίως με απονιτροποίηση. Η απομάκρυνση της αμμωνίας είναι περιορισμένη εξαιτίας της έλλειψης οξυγόνου στην κλίνη ως αποτέλεσμα των

συνθηκών μόνιμης υγρασίας. Ο φώσφορος απομακρύνεται με προσρόφηση και κατακρήμνιση, αλλά εξαιτίας του υλικού πλήρωσης που έχει χαμηλή περιεκτικότητα σε σίδηρο(Fe), αργίλιο (Al) και μαγνήσιο(Ca) δεν απομακρύνεται ικανοποιητικά εκτός και αν χρησιμοποιηθούν ειδικά υλικά (Vymazal J. , 2007). Σε ψυχρά κλίματα η πρόσληψη θρεπτικών(φώσφορο και άζωτο) από τα φυτά συμβάλει σε αμελητέο ποσοστό στην απομάκρυνση τους, διότι τα φυτά δεν θερίζονται και απελευθερώνουν τα θρεπτικά συστατικά πίσω στο σύστημα κατά την αποσύνθεσή τους, ενώ αντίθετα σε θερμά κλίματα αυτός ο μηχανισμός έχει σπουδαιότερο ρόλο στην απομάκρυνση των θρεπτικών γιατί τα φυτά μπορούν να θεριστούν. (Vymazal & Kröpfelová, 2008)



Εικόνα 2.4: Απεικόνιση Συστήματος Υποεπιφανειακής Οριζόντιας Ροής (Vandana, Dipika, & Kanchan, 2021).

2.5.3 Συστήματα Υποεπιφανειακής Κατακόρυφης Ροής (Subsurface Vertical Flow)

Οι τεχνητοί υγροβιότοποι υποεπιφανειακής κατακόρυφης ροής παρουσιάστηκαν αρχικά από την Seidel για την οξυγόνωση αναερόβιων σηπτικών δεξαμενών λυμάτων (Seidel, 1965) (Vymazal J. , 2010). Παρόλα αυτά τα συστήματα κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής δεν διαδόθηκαν τόσο γρήγορα όσο τα συστήματα οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής πιθανώς επειδή είχαν υψηλότερες απαιτήσεις όσον αφορά την λειτουργία τους (Vymazal J. , 2010).

Σε αυτά τα συστήματα το υπόστρωμα αποτελείται κυρίως από χαλίκι ή/και άμμο και η διάμετρος των υλικών πλήρωσης συνήθως αυξάνεται όσο αυξάνεται και το βάθος τοποθετώντας υλικά με μικρότερη διάμετρο στα ανώτερα μέρη του υποστρώματος και υλικά με μεγαλύτερη διάμετρο στα κατώτερα μέρη του υποστρώματος. Τα συστήματα υποεπιφανειακής κατακόρυφης ροής διακρίνονται σε αυτά της καθοδικής και της ανοδικής ροής. Στα συστήματα υποεπιφανειακής κατακόρυφης ανοδικής ροής τα απόβλητα εφαρμόζονται στον πυθμένα και διαγράφουν ανοδική ροή. Πιο συνηθισμένα είναι τα συστήματα όπου η ροή γίνεται με τη βοήθεια της βαρύτητας και είναι καθοδική γι' αυτό αποκαλούνται συστήματα κατακόρυφης καθοδικής ή πτωτικής ροής. Το απόβλητο εισάγεται μέσω διάτρητων αγωγών, που κατανέμονται στην επιφάνεια της κλίνης. Το απόβλητο τροφοδοτείται αρχικά στην επιφάνεια, δημιουργώντας έτσι μία πλημμύρα, στη συνέχεια διέρχεται μέσω του υλικού πλήρωσης και κατόπιν αφήνεται να στραγγίσει (Στεφανάκης, 2011). Το βάθος του υποστρώματος κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 45 έως 120 cm από πάνω προς τα κάτω και συνήθως δίνεται μια κλίση στον υδροβιότοπο από 1 έως 2 % για υποβοήθηση της εκροής του επεξεργασμένου αποβλήτου (Almuktar, Abed, & Scholz, 2018).

Η διακεκομμένη παροχή των αποβλήτων, εξασφαλίζει περισσότερο οξυγόνο στο σύστημα, γιατί το απόβλητο αρχίζει να στραγγίζει και έτσι ατμοσφαιρικός αέρας εισέρχεται στο υπόστρωμα αυξάνοντας την συγκέντρωση του οξυγόνου, ενισχύοντας τη μικροβιακή δραστηριότητα και την νιτροποίηση. (Stefanakis, Akratos, & Tsihrintzis, 2014). Στους τεχνητούς υδροβιότοπους κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής οι αερόβιες διεργασίες είναι πιο ευνοημένες και αποτελεσματικές σε σχέση με αυτούς της οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής και έτσι επιτυγχάνεται καλύτερη νιτροποίηση αλλά από την άλλη καθόλου απονιτροποίηση η οποία απαιτεί αναερόβιες συνθήκες. Επίσης είναι πολύ αποτελεσματικοί στην απομάκρυνση οργανικού υλικού και αιωρούμενων στερεών. Η απομάκρυνση φωσφόρου δεν είναι ικανοποιητική γιατί τα υλικά που χρησιμοποιούνται συνήθως στους τεχνητούς υδροβιότοπους έχουν χαμηλή ικανότητα προσρόφησης, εκτός και αν χρησιμοποιηθούν ειδικά υλικά πλήρωσης που έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε σίδηρο(Fe), αργίλιο (Al) και μαγνήσιο(Ca) (Vymazal & Kröpfelová, 2008; Vymazal J., 2010). Οι τεχνητοί υδροβιότοποι κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής, απαιτούν συνήθως λιγότερη επιφάνεια γης (1-3 m²/ι.κ.) σε σχέση με τους αντίστοιχους επιφανειακής και οριζόντιας υπόγειας ροής (5-10 m²/ι.κ.) (Στεφανάκης, 2011). Ο αερισμός μπορεί να ενισχυθεί περαιτέρω, με την εισαγωγή τεχνητού αερισμού με αεραντλίες στο σύστημα, για την πιο αποτελεσματική απομάκρυνση οργανικών υλικών και αζώτου μέσω νιτροποίησης (Stefanakis, Akratos, & Tsihrintzis, 2014).

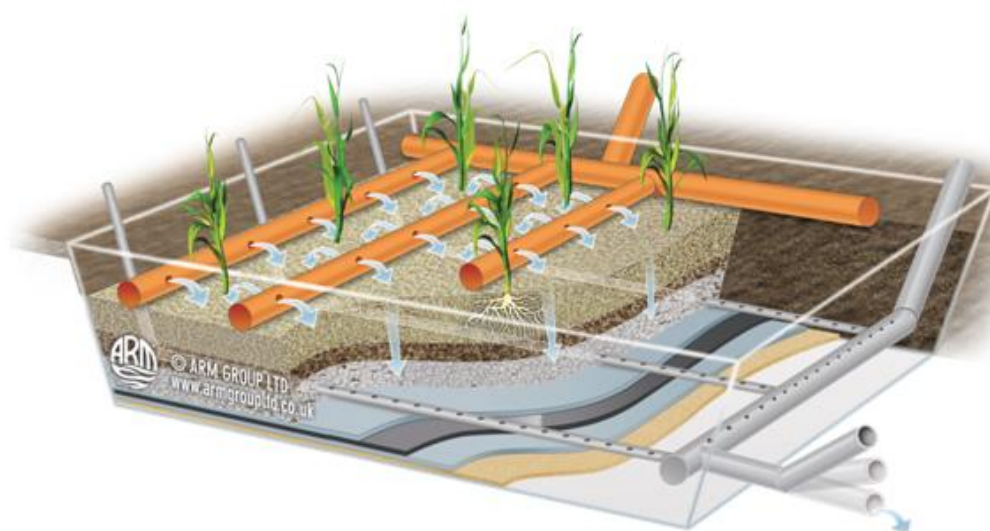
Πίνακας 2.11: Απόδοση συστημάτων τεχνητών υγροβιότοπων υποεπιφανειακής κατακόρυφης καθοδικής ροής από παγκόσμια πειραματικά δεδομένα (Vymazal & Krörfelová, 2008).

	Συγκέντρωση (mg/L)			n
	Εισροή	Εκροή	Απομάκρυνση(%)	
BOD₅	309	21	87,9	97
COD	547	70	78,6	115
TSS	188	18	77,1	74
TP	10,6	4,6	48,3	94
TN	70	37,6	44	64
NH₄-N	56,4	10,6	78,9	94
NO₃-N	0,62	25,3	-	70
FC*	5,95	3	97,6	20

n = αριθμός συστημάτων, *FC = Fecal Coliforms (log CFU 100mL⁻¹)

Πίνακας 2.12: Επιλεγμένες εφαρμογές διαφόρων ειδών αποβλήτων εκτός αστικών, σε τεχνητούς υγροβιότοπους κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής (Στεφανάκης, 2011)

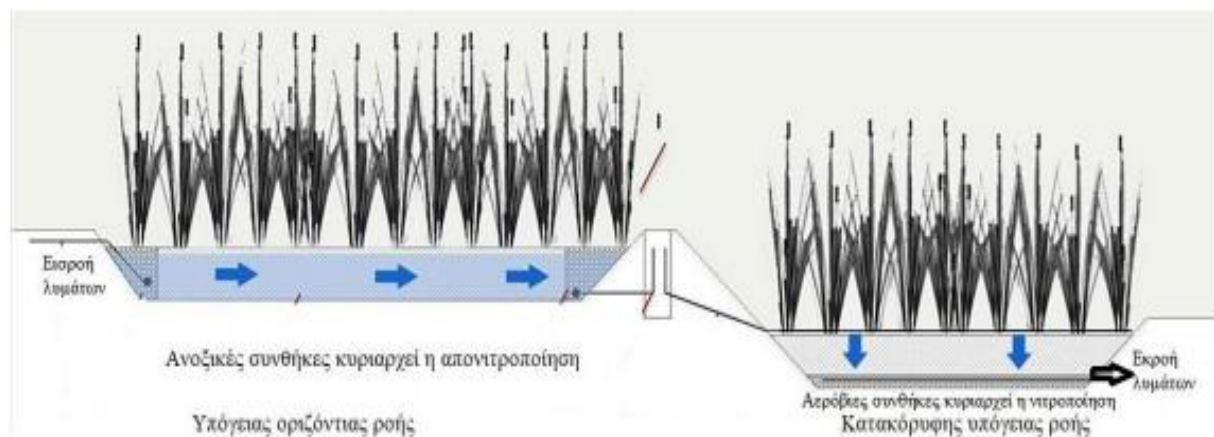
Είδος απόβλητου προς επεξεργασία
Υφάλμυρα νερά
Αγροτικά απόβλητα (χοιροστάσια)
Απόβλητα επεξεργασίας ζαχαρότευτλων
Διαστάλαγμα ΧΥΤΑ
Απόβλητα διυλιστηρίου πετρελαίου
Ευτροφικά νερά ποταμού
Απόβλητα κτηνοτροφείου
Απόβλητα κλωστοϋφαντουργίας
Απόβλητα γαλακτοκομείου
Αστική απορροή



Εικόνα 2.5: Απεικόνιση Συστήματος Υποεπιφανειακής Κατακόρυφης Ροής (Global Wetland Technology, λ.λ.)

2.5.4 Υβριδικά Συστήματα

Οι διάφοροι τύποι τεχνητών υγροβιότοπων μπορούν να συνδυαστούν έτσι ώστε να επιτευχθεί πιο αποτελεσματική επεξεργασία, αξιοποιώντας τα πλεονεκτήματα των διαφορετικών συστημάτων. Τα περισσότερα υβριδικά συστήματα συνδυάζουν κατακόρυφη υποεπιφανειακή και οριζόντια υποεπιφανειακή ροή (VF-HF system) (Vymazal J. , 2005). Τέτοιο υβριδικό σύστημα είχε κατασκευάσει η Seidel τέλη δεκαετίας του 1950 με αρχές δεκαετίας του 1960 (Revitt, Shutes, Jones, Forshaw, & Winter, 2004, 334-335) αλλά γενικότερα η χρήση τους ήταν πολύ περιορισμένη. Την δεκαετία του 1980 υβριδικά συστήματα κατακόρυφης-οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής (VF-HF) κατασκευάστηκαν στην Γαλλία (Boutin, 1987) και στον Ηνωμένο Βασίλειο (Burka & Lawrence, 1990). Σήμερα τα συστήματα VF-HF είναι σε λειτουργία σε πολλές χώρες του κόσμου και χρησιμοποιούνται ειδικά στις περιπτώσεις που η απομάκρυνση αμμωνίας και ολικού αζώτου απαιτείται (Vymazal & Kröpfelová, 2008). Ο Cooper (Cooper P. , 1999) συνιστά να τοποθετούνται τα συστήματα κατακόρυφης ροής στην αρχή της μονάδας τεχνητών υγροτόπων, επειδή όταν σχεδιαστούν σωστά μπορούν να απομακρύνουν το BOD, COD και τα βακτήρια και επίσης να οξειδωθεί όλο το αμμωνιακό άζωτο σε νιτρικά. Επίσης απομακρύνεται ορισμένη ποσότητα ολικού N με την απονιτροποίηση.



Εικόνα 2.6: Διαγραμματική παρουσίαση μεικτών ή υβριδικών συστημάτων τεχνητών υγροτόπων που συνδυάζει στα ανάντη ένα σύστημα υπόγειας οριζόντιας ροής και στη συνέχεια ένα σύστημα κατακόρυφης υπόγειας ροής. (Αντωνόπουλος, 2019)

2.5.5 Η Βλάστηση στους Τεχνητούς Υγροβιότοπους

Ο όρος ‘βλάστηση των υγροβιότοπων’ ή ‘υγροτοπική βλάστηση’ (wetland vegetation) γενικά αναφέρεται σε εκείνα τα φυτά που έχουν προσαρμοστεί να αναπτύσσονται σε περιοχές που συχνά καταλαμβάνονται ή είναι κορεσμένες με νερό για μεγάλη χρονική περίοδο. Λόγω των μορφολογικών, φυσιολογικών και αναπαραγωγικών ιδιοτήτων τους τα υγροτοπικά ή υδροχαρή φυτά έχουν την ικανότητα να αναπτύσσονται,

αναπαράγονται και ολοκληρώνουν τον κύκλο της ζωής τους σε αναερόβιες ή υγρές εδαφικές συνθήκες. (Αντωνόπουλος, 2019)

Τα φυτά αποτελούν σημαντική συνιστώσα των υγροτόπων. Η παρουσία τους συνεισφέρει στη σταθεροποίηση του υποστρώματος και τη μείωση της ταχύτητας ροής, δίνοντας τη δυνατότητα καθίζησης των αιωρούμενων στερεών. Επίσης συνεισφέρουν στην επεξεργασία των λυμάτων με την πρόσληψη των θρεπτικών στοιχείων και άλλων συστατικών των λυμάτων. Τα φύλλα και τα στελέχη πάνω από την επιφάνεια του νερού προκαλούν σκίαση που περιορίζει τη διείσδυση του ηλιακού φωτός και έτσι ελέγχεται η ανάπτυξη των ζιζανίων, άλγεων και άλλων φυτών. Μέσω της διαδικασίας της θρέψης τους, προσλαμβάνουν και ενσωματώνουν στους ιστούς τους τον άνθρακα, θρεπτικά στοιχεία (Φώσφορος και Άζωτο) και ιχνοστοιχεία. Μεταφέρουν τα αέρια, μεταξύ των οποίων και το οξυγόνο, από την ατμόσφαιρα στο έδαφος, δημιουργώντας αερόβιες περιοχές στο υπόστρωμα. Τα στελέχη και το ριζικό σύστημα αποτελούν υλικό για την προσκόλληση των μικροοργανισμών και τέλος, προμηθεύουν το εδαφικό σύστημα με οργανικά υλικά μετά το θάνατο και την αποικοδόμησή τους. (Αντωνόπουλος, 2019)

Η καταλληλότητα των φυτών που χρησιμοποιούνται στα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων των τεχνητών υγροτόπων εξαρτάται από (Στεφανάκης, 2011) (Αντωνόπουλος, 2019) (Tanner, 1996):

- i. οικολογική αποδοχή και προσαρμοστικότητα,
- ii. αντοχή στις κλιματικές συνθήκες, έντομα και ασθένειες,
- iii. αντοχή στους ρύπους και τις συνθήκες υπερτροφίας και κατάκλυσης,
- iv. εύκολη προσαρμογή, ταχύτητα εξάπλωσης και ανάπτυξης,
- v. υψηλή ικανότητα απομάκρυνσης ρύπων, είτε με την αφομοίωση και αποθήκευση ή έμμεσα, με τη διευκόλυνση των μικροβιολογικών μετασχηματισμών, όπως της νιτροποίησης και της απονιτροποίησης.

Τα πιο συνήθη υδρόβια φυτά που χρησιμοποιούνται στους τεχνητούς υγροβιότοπους και οι παράγοντες που επηρεάζουν την ανάπτυξή τους σύμφωνα με (Αντωνόπουλος, 2019) είναι:

1) είδη φυτών:

- cattails (typha spp) – ψαθί
- reeds (phragmites communis) - νεροκάλαμο, αγριοκάλαμο
- rushes (juncus spp) – βούρλα
- bulrushes (scirpus spp) – σύφες, σκίρπος
- sedges (carex spp) – ξιφάρα, σπαθόχορτο

2) παράγοντες που επηρεάζουν την ανάπτυξη τους:

- το βάθος της υπόγειας στάθμης, το βάθος του νερού και η διάρκεια διαβροχής,
- οι απώλειες με την εξατμισοδιαπνοή,
- η μεταφορά του οξυγόνου

Πίνακας 2.13: Χαρακτηριστικά των υδρόβιων φυτών που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία των λυμάτων (Στεφανάκης, 2011) (EPA, 1988, September)

Κοινή ονομασία	Επιστημονική ονομασία	Διάδοση	Θερμοκρασία (°C)		Μέγιστη αλατότητα (‰)	Δραστικό εύρος pH
			Επιθυμητή	Εκκόλαψη σπόρου		
Ψαθί	<i>Typha spp.</i>	Σε όλο τον κόσμο	10 - 30	12 - 24	30	4 - 10
Καλάμι	<i>Phragmites communis</i>		12 - 23	10 - 30	45	2 - 8
Βούρλο	<i>Juncus spp.</i>		16 - 26	-	20	5 - 7,5
Τύφη	<i>Scirpus spp.</i>		18 - 27	-	20	4 - 9
Σπαθόχορτο	<i>Carex spp.</i>		14 - 32	-	-	5 - 7,5

Πίνακας 2.14: Ποσότητες θρεπτικών στοιχείων που αξιοποιούνται στους τεχνητούς υγροβιότοπους (Kadlec & Knight, 1996)

Είδος φυτού	Βιομάζα (kg στρ ⁻¹ έτος ⁻¹)	Άζωτο (kg στρ ⁻¹ έτος ⁻¹)	Φώσφορος (kg στρ ⁻¹ έτος ⁻¹)
<i>Typha</i> (ψαθί)	800 – 6100	60 – 263	7,5 – 40
<i>Juncus</i> (βούρλα)	5330	80	11
<i>Scirpus</i> (σπαθόχορτο)	713	12,5	1,8
<i>Phragmites</i> (καλάμια)	1000 – 6000	22,5	3,5
<i>Eichhornia crassipes</i>	6000 – 11000	195 – 585	35 – 112
<i>Pistia stratiotes</i>	5000 – 8000	135 – 511	30 – 110
<i>Hydrocotyle</i>	3000 – 6000	54 – 320	13 – 77
<i>Alternanthera</i>	7800	140 – 450	17,5 – 57
<i>Lemna minor</i>	600 – 2600	35 – 120	12 – 40
<i>Salvinia</i>	900 – 4500	35 – 170	9,2 – 4,5
<i>Cypress swamp</i>	-	1,4 – 21,3	0,3 – 2,3
<i>Hardwood swamp</i>	-	-	0,1 – 1

2.5.6 Πληρωτικά Υλικά στους Τεχνητούς Υγροβιότοπους

Τα υλικά πλήρωσης αποτελούν το έδαφος που υποστηρίζει την βλάστηση εντός του τεχνητού υγροβιότοπου. Τα υλικά πλήρωσης εκτός του ότι υποστηρίζουν την βλάστηση, απαρτίζουν σπουδαίο ρόλο στους τεχνητούς υγροβιότοπους. Παίζουν ρόλο στην ανάπτυξη των μικροοργανισμών αφού παρέχουν επιφάνεια προσκόλλησης, πραγματοποιούν προσρόφηση και διήθηση και προάγουν την καθίζηση αιωρούμενων στερεών. Επίσης επηρεάζουν την ροή του νερού και την ανάπτυξη της βλάστησης στους τεχνητούς υγροβιότοπους. Η χημική σύνθεση των υλικών πλήρωσης και φυσικοί παράμετροι όπως το μέγεθος των σωματιδίων, το μέγεθος των πόρων και ο συντελεστής διαπερατότητας είναι κάποια από τα στοιχεία που επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος.

Η επιλογή του κατάλληλου υλικού βασίζεται στα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά του. Η χημική και μηχανική αντοχή του υλικού είναι επίσης σημαντική και πρέπει να διασφαλίζει ότι δεν απελευθερώνει τοξικές ουσίες και δεν επηρεάζει το βιοτικό περιβάλλον στους τεχνητούς υγροβιότοπους. Μια άλλη σημαντική παράμετρος είναι η υδραυλική αγωγιμότητα, η οποία επιτρέπει την ομοιόμορφη ροή εισόδου και

εξόδου. Τα πληρωτικά υλικά είναι πολύ σημαντικά και πρέπει να επιλέγονται προσεκτικά, έτσι ώστε να συνεργάζονται άψογα με το υπόλοιπο σύστημα του τεχνητού υγροβιότοπου και να είναι αποτελεσματική η επεξεργασία των αποβλήτων (Vandana, Dipika, & Kanchan, 2021). Ένας συνδυασμός διάφορων υλικών πλήρωσης σε έναν τεχνητό υγροβιότοπο, είναι τυπικά ανώτερος από ένα μεμονωμένο υλικό πλήρωσης, όσον αφορά τα ποσοστά απομάκρυνσης ρύπων από τα απόβλητα. (Wang, Xu, Sheng, & Liu, 2018)

Σημαντικά στοιχεία στην επιλογή του πληρωτικού υλικού σύμφωνα με (Vandana, Dipika, & Kanchan, 2021) είναι:

1. Προέλευση, διαθεσιμότητα, κόστος.
2. Τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του.
3. Η ικανότητα αφαίρεσης ρύπων.
4. Η επίδραση που έχει στους μικροοργανισμούς και στην βλάστηση.
5. Η δευτερογενής ρύπανση που ενδέχεται να προκαλέσει.
6. Το φράξιμο των πόρων που ενδέχεται να προκληθεί σε αυτό (clogging).
7. Η διάρκεια ζωής του.
8. Να μπορεί να ανακτηθεί ή/και να απορριφτεί, σε περίπτωση που δεν μπορεί να εξυπηρετήσει πλέον τον σκοπό του.
- 9.

Πίνακας 2.15: Τυπικά υλικά πλήρωσης στους τεχνητούς υγροβιότοπους (Rahman, et al., 2020).

Είδος Υλικού			
Φυσικά Υλικά	Βιομηχανικά παραπροϊόντα	Τεχνητά Υλικά	Άλλα υλικά
Άμμος	Σκωρία	Ενεργός άνθρακας	Λάσπη στυπτηρίας (alum sludge)
Χαλίκι	Τέφρα	Αδρανή μικρού βάρους	Υλικό από απατίτη
Πηλός	Κάρβουνο	Κομπόστ	Biochar
Ασβεστόλιθ	Λάσπη στυπτηρίας (alum sludge)	Calcium silicate hydrate	Βωξίτης
Μάρμαρο	Θραύσματα τούβλου	Κεραμσίτης	Οικοδομικά απόβλητα
Βερμικουλίτης	Ασβεστόλιθος μολεάνου		Tire chips
Μπετονίτης	Απορρίμματα βολλαστονίτη		Τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET)
Δολομίτης λίθος	Κέλυφος φοινικόδεντρου (OPS)		Filtralite
Ασβεστόλιθος			Κέλυφος οστρακοειδών
Κοχύλια, κέλυφος			Μίξη PHBV & PLA
Σχιστόλιθος			ροκανίδια
Τύρφη			άχυρα
Βολαστονίτης			
Ροδόλιθος			
Ζεόλιθος			

2.5.7 Μηχανισμοί Απομάκρυνσης Ρύπων στους Τεχνητούς Υγροβιότοπους Κατακόρυφης Ροής

2.5.7.1 Απομάκρυνση Οργανικής ύλης

Γενικά, η οργανική ύλη στα αστικά υγρά απόβλητα εμφανίζεται σε διαλυτές, κολλοειδείς και σωματιδιακές μορφές. Οι περισσότερες σωματιδιακές και κολλοειδείς μορφές οργανικής ύλης μπορούν να απομακρυνθούν με καθίζηση και διήθηση στους τεχνητούς υγροβιότοπους ενώ οι διαλυμένες μορφές αποσυντίθενται από αερόβια και αναερόβια βακτήρια (Du, Xu, Li, & Zheng, 2014) (Tsihrintzis, 2017).

Στους τεχνητούς υγροβιότοπους κατακόρυφης ροής, η τροφοδοσία του αποβλήτου με τη δημιουργία επιφανειακής πλημμύρας, ακολουθούμενης από μια περίοδο ανάπαυσης, έχει ως αποτέλεσμα τη λειτουργία του συστήματος σε συνθήκες ακόρεστης ροής, επιτρέποντας την εισαγωγή αέρα (και οξυγόνου) στο σώμα του υγροβιότοπου. Έτσι, επιτυγχάνεται εντονότερη μικροβιακή κατανάλωση και αερόβια αποδόμηση των οργανικών υλικών και του BOD₅. Αν και δεν υπάρχουν ακόμη πολλά διαθέσιμα αναλυτικά στοιχεία, έχειδειχθεί ότι η πλειοψηφία της μικροβιακής βιομάζας βρίσκεται στα πρώτα 20 cm του βάθους των. Κατά συνέπεια, είναι πιθανό ότι η απομάκρυνση οργανικών λαμβάνει χώρα κατά κύριο λόγο στα ανώτερα στρώματα της κλίνης, λόγω της διήθησης, της μεγαλύτερης διαθεσιμότητας οξυγόνου και του υψηλού πληθυσμού μικροβιακής βιομάζας. (Στεφανάκης, 2011)

Στην **Error! Reference source not found.** γίνεται παρουσίαση του κύκλου του άνθρακα σε συστήματα υγροβιότοπων. Οι μετατροπές που περιγράφονται στον κύκλο του άνθρακα πραγματοποιούνται μέσω των χημικών αντιδράσεων, όπως αυτές καταγράφονται ακολούθως από τους Kadlec & Knight (Kadlec & Knight, 1996).

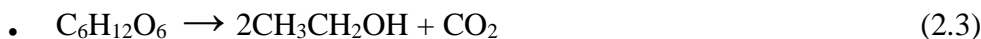
Στις αερόβιες ζώνες η αποδόμηση γίνεται μέσω αναπνοής:



Στις αναερόβιες ζώνες μέσω ζύμωσης:

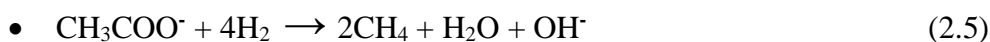
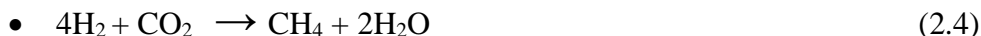


γαλακτικό οξύ

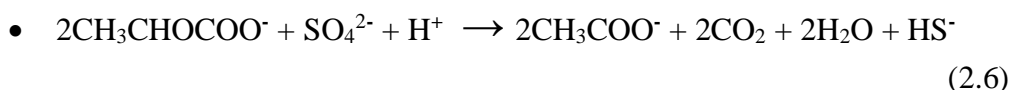


αιθανόλη

Στις αναερόβιες ζώνες μέσω μεθανογένεσης:



Στις αναερόβιες ζώνες μέσω αναγωγής θεικών:



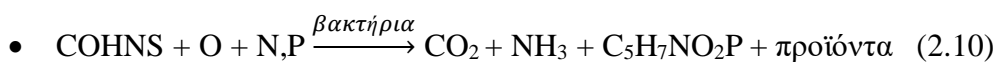
Στις αναερόβιες ζώνες μέσω αναγωγής νιτρικών:



Στις αναερόβιες ζώνες μέσω αναγωγής σιδήρου:

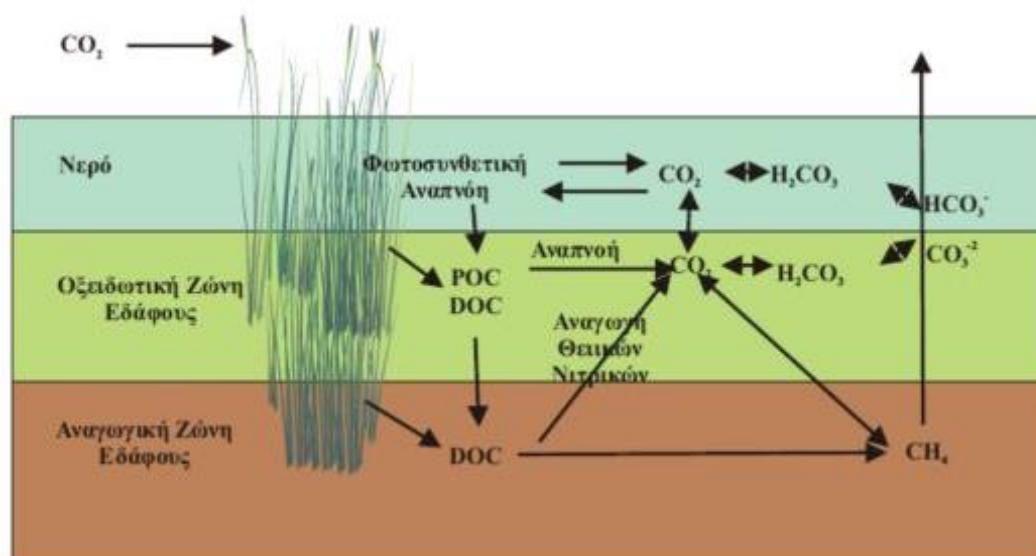


Σύνθεση βιομάζας:



Βιομάζα

(Άκρατος, 2006)



Εικόνα 2.7: Κύκλος άνθρακα σε συστήματα υγροβιότοπων (Άκρατος, 2006)

2.5.7.2 Απομάκρυνση Αζώτου

Στα νερά και τα υγρά απόβλητα, οι μορφές αζώτου που ενδιαφέρουν πιο πολύ είναι τα νιτρικά, νιτρώδη, η αμμωνία και το οργανικό άζωτο. Το οργανικό άζωτο και η αμμωνία προσδιορίζονται μαζί και καλούνται 'Ολικό Άζωτο Kjeldahl – TKN'. Το οργανικό άζωτο στα υγρά απόβλητα περιλαμβάνει πρωτεΐνες, πεπτιδικά οξέα και ουρία. Η συγκέντρωση αζώτου στα επιφανειακά και υπόγεια νερά παίζει σημαντικό ρόλο, γιατί υψηλές συγκεντρώσεις μπορεί να οδηγήσουν σε οικολογικές

διαταραχές, όπως υπερανάπτυξη φυτών και ζώων και υποβάθμιση της ποιότητας του νερού (ευτροφισμός). (Στεφανάκης, 2011)

Κύριοι μηχανισμοί απομάκρυνσης αζώτου στους τεχνητούς υγροβιότοπους είναι (Stefanakis, Akrotas, & Tsihrintzis, 2014):

- i. Αμμωνιοποίηση (μετατροπή οργανικού αζώτου σε αμμωνία από μικροοργανισμούς)
- ii. Νιτροποίηση (μετατροπή αμμωνίας σε νιτρωδών στην αρχή και μετά σε νιτρικών από μικροοργανισμούς)
- iii. Απονιτροποίηση (μετατροπή νιτρικών NO_3^- σε αέριο άζωτο N_2)
- iv. Πρόσληψη από τα φυτά (κατανάλωση του αζώτου από τα φυτά ως θρεπτικά στοιχεία για την βιολογική τους ανάπτυξη, κυρίως αμμωνίας και νιτρικών)
- v. Προσρόφηση

Πρόσφατα, έχουν βρεθεί νέοι μηχανισμοί απομάκρυνσης αζώτου στους τεχνητούς υγροβιότοπους, ειδικά σε αυτούς όπου χρησιμοποιούνται τεχνικές για την αύξηση του οξυγόνου (Lu, Guo, Kang, Fan, & Zhang, 2020):

- vi. Ταυτόχρονη νιτροποίηση και απονιτροποίηση (Simultaneous Nitrification and Denitrification – *SND*)
- vii. Μερική νιτροποίηση και απονιτροποίηση (Partial Nitrification and Denitrification – *PND*)
- viii. Αναερόβια οξείδωση αμμωνίου (ANaerobic AMMonium OXidation – *ANAMMOX*)
- ix. Εντελώς αυτοτροφική αφαίρεση νιτρωδών έναντι νιτρικών (Completely Autotrophic Nitrite removal Over Nitrate - *CANON*)

Οι αερόβιες συνθήκες οι οποίες επικρατούν στους τεχνητούς υγροβιότοπους κατακόρυφης ροής καθιστούν την νιτροποίηση ως την κυρίαρχη διεργασία απομάκρυνσης αζώτου σε αυτούς, ενώ την από την άλλη η απομάκρυνση αζώτου μέσω απονιτροποίησης είναι πολύ χαμηλή γιατί απαιτεί αναερόβιες συνθήκες. Εξίσου σπουδαίος μηχανισμός απομάκρυνσης του αζώτου σε τεχνητούς υγροβιότοπους κατακόρυφης ροής είναι η αμμωνιοποίηση δηλαδή η μετατροπή οργανικού αζώτου σε αμμωνία, η οποία είναι στη συνέχεια διαθέσιμη για άλλες διεργασίες (μικροβιακή κατανάλωση, λήψη από τα φυτά) (Στεφανάκης, 2011)

Πίνακας 2.16: Εξισώσεις και σημασία μηχανισμών απομάκρυνσης αζώτου στους τεχνητούς υγροβιότοπους (Lu, Guo, Kang, Fan, & Zhang, 2020)

Διεργασία	Λειτουργία	Εξίσωση	Σημασία
Αεριοποίηση (Volatilization)	Φυσικοχημική	$\text{NH}_4^+(aq) \rightarrow \text{NH}_3(g)$	Να μετατρέψει το αμμώνιο (NH_4^+) σε αμμωνία (NH_3) για να εξαλειφθεί το άζωτο στα λύματα.

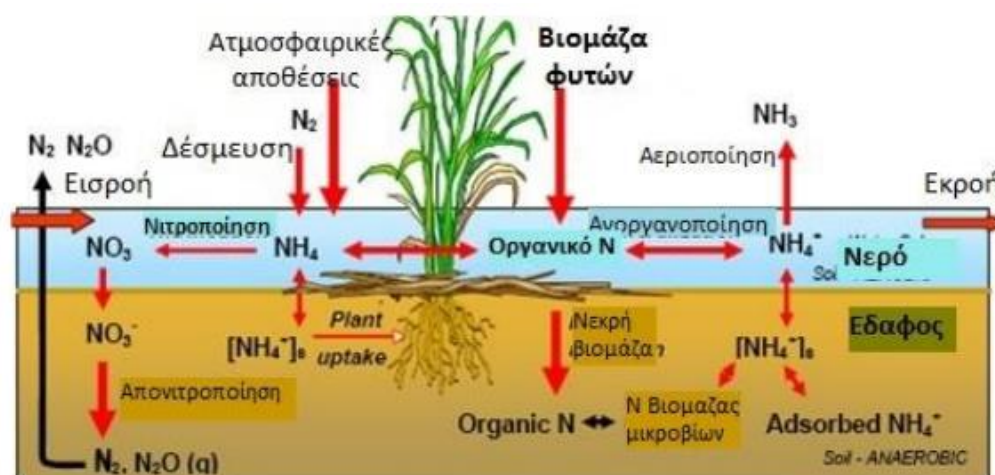
Προσρόφηση (Adsorption)	Φυτικοχημική	-	Προσροφάται αμμώνιο(NH_4^+) και νιτρικά ιόντα(NO_3^-) αλλά το άζωτο δεν απομακρύνεται μόνιμα από το σύστημα και μπορεί να προκληθεί εκρόφηση.
Πρόσληψη από φυτά (Plant uptake)	Βιολογική	$\text{NH}_4^+, \text{NO}_3^- \rightarrow \text{organic-N}$	Χρησιμοποιούνται τα φυτά για την προσωρινή απορρόφηση και αποθήκευση αζώτου.
Αφομοίωση βιομάζας (Biomass assimilation)	Βιολογική	$\text{NH}_4^+, \text{NO}_3^- \rightarrow \text{organic-N}$	Προσλαμβάνεται άζωτο από τα λύματα.
Αμμωνιοποίηση (Ammonification)	Μικροβιολογική	Amino acids \rightarrow Imino acids \rightarrow Keto acids $\rightarrow \text{NH}_3$ (1)	Οργανικό άζωτο μετατρέπεται σε αμμωνία για να προετοιμαστεί για νιτροποίηση, αλλά η ποσότητα του ολικού αζώτου στα λύματα δεν μειώνεται.
Νιτροποίηση (Nitrification)	Μικροβιολογική	I) $\text{NH}_4^+ + 1.5\text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_2^- + 2\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O}$ (2) II) $\text{NO}_2^- + 0.5\text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_3^-$ (3) Overall: $\text{NH}_4^+ + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_3^- + 2\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O}$ (4)	Μετατρέπεται το αμμώνιο σε διοξειδίο του αζώτου(NO_2^-) και νιτρικά(NO_3^-), αλλά ποσότητα του ολικού αζώτου στα λύματα δεν αλλάζει.
Απονιτροποίηση (Denitrification)	Μικροβιολογική	$\text{NO}_3^- + 0.833\text{CH}_3\text{OH} \rightarrow 0.5\text{N}_2 + 0.833\text{CO}_2 + 1.167\text{H}_2\text{O} + \text{OH}^-$ (5)	Μετατρέπονται τα νιτρικά(NO_3^-) σε άζωτο(N_2) για την μόνιμη απομάκρυνση του αζώτου από το σύστημα.
Ταυτόχρονη νιτροποίηση και απονιτροποίηση (Simultaneous Nitrification and Denitrification - SND)	Μικροβιολογική	$\text{NH}_4^+ + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_3^- + 2\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O}$ (4) $\text{NO}_3^- + 0.833\text{CH}_3\text{OH} \rightarrow 0.5\text{N}_2 + 0.833\text{CO}_2 + 1.167\text{H}_2\text{O} + \text{OH}^-$ (5)	Νιτροποίηση και απονιτροποίηση πραγματοποιούνται στο ίδιο μέρος ταυτόχρονα για την απομάκρυνση του ολικού αζώτου.
Μερική νιτροποίηση και απονιτροποίηση (Partial Nitrification and Denitrification - PND)	Μικροβιολογική	I) $\text{NH}_4^+ + 1.5\text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_2^- + 2\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O}$ (6) II) $\text{NO}_2^- + 0.5\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}^+ \rightarrow 0.5\text{N}_2 + 0.5\text{CO}_2 + 1.5\text{H}_2\text{O}$ (7)	Η απονιτροποίηση πληρείται χρησιμοποιώντας νιτρώδη(NO_2^-) για την απομάκρυνση του αζώτου από τα λύματα, απαιτώντας λιγότερο οξυγόνο και πηγές άνθρακα.
Αναερόβια οξείδωση αμμωνίου (ANaerobic)	Μικροβιολογική	$\text{NH}_4^+ + 1.32\text{NO}_2^- + 0.066\text{HCO}_3^- + 0.13\text{H}^+ \rightarrow 1.02\text{N}_2 + 0.26\text{NO}_3^- + 0.066\text{CH}_2\text{O}_{0.5}\text{N}_{0.15} +$	Η απομάκρυνση του αζώτου πραγματοποιείται από την αντίδραση

AMMonium OXidation - ANAMMOX)	2.03CH ₂ O (8)	του NH ₄ ⁺ και του NO ₂ ⁻ η οποία απαιτεί λιγότερο άνθρακα και πηγές ενέργειας.
Εντελώς αυτοτροφική αφαίρεση νιτρωδών έναντι νιτρικών (Completely Autotrophic Nitrite removal Over Nitrate - CANON)	Μικροβιολογική $\text{NH}_4^+ + 0.85\text{O}_2 \rightarrow 0.435\text{N}_2 + 0.13\text{NO}_3^- + 1.3\text{H}_2\text{O} + 1.4\text{H}^+ \text{ (9)}$	Συνδυασμός <i>PND</i> και <i>ANAMOX</i> για την απομάκρυνση του ολικού αζώτου.

Πίνακας 2.17: Αποτελεσματικότητα των διεργασιών απομάκρυνσης αζώτου σε τεχνητούς υγροβιότοπους κατακόρυφης ροής (Στεφανάκης, 2011).

Διεργασία	Μετασχηματισμός	Αποτελεσματικότητα Απομάκρυνσης
Αεριοποίηση	$\text{NH}_4^+ \text{-N (aq)} \rightarrow \text{NH}_4^+ \text{-N (g)}$	Μηδενική
Αμμωνιοποίηση	$\text{Org-N} \rightarrow \text{NH}_4^+ \text{-N}$	Υψηλή
Νιτροποίηση	$\text{NH}_4^+ \text{-N} \rightarrow \text{NO}_2^- \text{-N} \rightarrow \text{NO}_3^- \text{-N}$	Πολύ υψηλή
Αμμωνιοποίηση νιτρικών	$\text{NO}_3^- \text{-N} \rightarrow \text{NH}_4^+ \text{-N}$??*
Απονιτροποίηση	$\text{NO}_3^- \text{-N} \rightarrow \text{NO}_2^- \text{-N} \rightarrow \text{N}_2(\text{g}), \text{N}_2\text{O}$	Πολύ χαμηλή
Δέσμευση N ₂	$\text{N}_2(\text{g}) \rightarrow \text{NH}_4^+ \text{-N (org-N)}$??*
Λήψη από φυτά/μικρόβια	$\text{NH}_4^+ \text{-}, \text{NO}_2^- \text{-}, \text{NO}_3^- \text{-N} \rightarrow \text{org - N}$	Χαμηλή
Προσρόφηση αμμωνίας	-	Πολύ χαμηλή
Αφομοίωση N ₂ (g) στο έδαφος	-	Πολύ χαμηλή
ANAMMOX	$\text{NH}_4^+ \text{-N} \rightarrow \text{N}_2(\text{g})$??*

*δεν έχει ακόμα προσδιοριστεί με ακρίβεια



Εικόνα 2.8: Διαδικασίες μετασχηματισμού και μεταφοράς μάζας του αζώτου στις φάσεις του νερού και του εδάφους των υγροτόπων (Αντωνόπουλος, 2019)

2.5.7.3 Απομάκρυνση Φωσφόρου

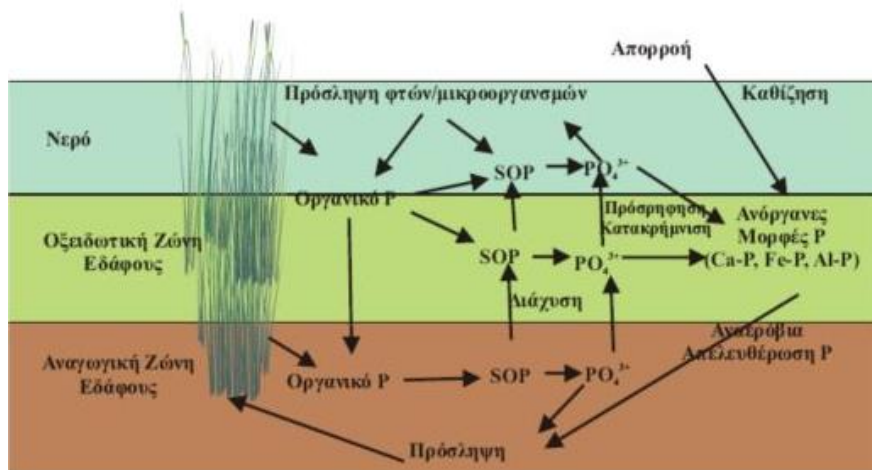
Ο φώσφορος εμφανίζεται στα νερά και τα υγρά απόβλητα κυρίως σαν ορθοφωσφορικά ($\text{PO}_4\text{-3}$) τα οποία και κατηγοριοποιούνται σαν ορθο-, πυρο-, μετα- και πολύφωσφορικά και οργανικά δεσμευμένα φωσφορικά. Τα οργανικά σχηματίζονται κυρίως με βιολογικές διεργασίες και βρίσκονται σε υγρά απόβλητα σαν υπολείμματα τροφών, άλγη ή βακτήρια. Ο φώσφορος είναι το πιο σημαντικό θρεπτικό για τα φυτά, το οποίο σε υψηλές συγκεντρώσεις εντείνει το φαινόμενο του ευτροφισμού σε λίμνες και παράκτια νερά, γι' αυτό και η αφαίρεσή του είναι πολύ σημαντική. (Στεφανάκης, 2011)

Οι βασικότεροι μηχανισμοί απομάκρυνσης του φωσφόρου σε τεχνητούς υγροβιότοπους κατακόρυφης ροής είναι η προσρόφηση του από το υπόστρωμα και η καθίζηση και εξαρτώνται άμεσα από το είδος του υλικού πλήρωσης. Υλικά που έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε κατιόντα Al, Fe, Ca, Mg ενισχύουν σημαντικά αυτές τις διεργασίες. Όμως η προσρόφηση και η καθίζηση είναι διεργασίες που γίνονται λιγότερο αποτελεσματικές με την πάροδο του χρόνου, λόγω κορεσμού του υλικού πλήρωσης (Tsihrintzis, 2017). Επίσης ο φώσφορος απομακρύνεται από τα υγρά απόβλητα όταν αιωρούμενα σωματίδια που περιέχουν φώσφορο και όταν οργανική ύλη από τα φυτά και τους μικροοργανισμούς δεν αποσυντίθεται τελείως και ιζηματοποιείται στην τύρφη που δημιουργείται στο υπέδαφος. Έτσι ο φώσφορος παγιδεύεται στην τύρφη και μπορεί να απομακρυνθεί επιτυχώς από τα απόβλητα. (Water Environment Federation, 2001). Παρόλα αυτά η ιζηματοποίηση δεν είναι βιώσιμη σε συστήματα οριζόντιας ή κατακόρυφης υπόγειας ροής λόγω της βαθμιαίας μείωσης του πορώδους και της υδραυλικής αγωγιμότητας από την απόθεση στερεών (Kadlec & Wallace, 2009). Η πρόσληψη του φωσφόρου από τα φυτά ως θρεπτικό συστατικό είναι περιορισμένη και λαμβάνεται υπόψη μόνο όταν θερίζονται τα φυτά γιατί αλλιώς επιστρέφει στο σύστημα όταν αυτά αποσυντίθενται. Η αφομοίωση του φωσφόρου από τους μικροοργανισμούς είναι επίσης περιορισμένη. (Tsihrintzis, 2017)

Πίνακας 2.18: Αποτελεσματικότητα των διεργασιών απομάκρυνσης φωσφόρου σε τεχνητούς υγροβιότοπους κατακόρυφης ροής (Στεφανάκης, 2011).

Διεργασία	Αποτελεσματικότητα Απομάκρυνσης
Επικάθιση στο έδαφος	Μηδενική
Προσρόφηση	Υψηλή ^α
Καθίζηση ^β	Πολύ χαμηλή
Λήψη από φυτά ^γ	Χαμηλή
Μικροβιακή κατανάλωση	Χαμηλή

^α: όταν χρησιμοποιούνται ειδικά πορώδη υλικά, ^β: Όταν χρησιμοποιούνται καθαρά χαλίκια, ^γ: με θερισμό



Εικόνα 2.9: Κύκλος του φωσφόρου (Άκρατος, 2006)

2.5.8 Τεχνητός Αερισμός στους Τεχνητούς Υγροβιότοπους Κατακόρυφης Ροής

Κατά την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων σε τεχνητούς υγροβιότοπους, βιολογικές διεργασίες (όπως βιοαποικοδόμηση από μικροοργανισμούς) έχουν σημαντικό ρόλο στην απομάκρυνση του οργανικού φορτίου και του αζώτου. Η διαθεσιμότητα που υπάρχει σε οξυγόνο έχει αναγνωριστεί ως καίριος παράγοντας στην απομάκρυνση του οργανικού φορτίου και του αζώτου (Wu, και συν., 2016). Οξυγόνο καταναλώνεται κυρίως από τους μικροοργανισμούς που απομακρύνουν τα οργανικά υλικά και δευτερευόντως για την νιτροποίηση όπου απομακρύνεται το άζωτο (Hu, Zhao, Zhao, & Kumar, 2012). Η παροχή οξυγόνου στο σύστημα, από τον ατμοσφαιρικό αέρα ($5.77\text{--}18.45\text{ g O}_2\text{ m}^{-2}\text{ d}^{-1}$) (Gasiunas, 2011) και από την απελευθέρωση οξυγόνου από τα φυτά ($0.005\text{--}12\text{ g O}_2\text{ m}^{-2}\text{ d}^{-1}$) (Nivala, et al., 2013) είναι αρκετά μικρότερη από αυτήν που καταναλώνεται ($450\text{ g O}_2\text{ m}^{-2}\text{ d}^{-1}$) (Wu, et al., 2016). Η μεγάλη διαφορά μεταξύ της παροχής οξυγόνου και της κατανάλωσής του, οδηγούν σε αναερόβιες ή ανοξικές συνθήκες στους τεχνητούς υγροβιότοπους γεγονός που επηρεάζει αρνητικά την απόδοσή τους στην απομάκρυνση των ρύπων (Fan, et al., 2013). Για να βελτιωθεί η ικανότητα απομάκρυνσης ρύπων στους τεχνητούς υγροβιότοπους, είναι πολύ σημαντική η αύξηση του διαλυμένου οξυγόνου (DO). (Decezar, et al., 2019)

Λαμβάνοντας υπόψη ότι τα ποσοστά οξυγόνου εντός του συστήματος του τεχνητού υγροβιότοπου, επηρεάζουν την αποτελεσματική αφαίρεση ρύπων που συμβαίνουν με αερόβιες διεργασίες, έχουν δοκιμαστεί και εφαρμοστεί διάφορες τεχνικές τα τελευταία χρόνια για την αύξηση της συγκέντρωσης του οξυγόνου. Μια τεχνική που έλκει όλο και περισσότερο το ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια, είναι η εφαρμογή τεχνητού αερισμού για την παροχή οξυγόνου σε τεχνητούς υγροβιότοπους υποεπιφανειακής ροής. Ο τεχνητός αερισμός εφαρμόζεται μέσω αεραντλίας (συνήθως χαμηλής ισχύς) και έχει δοκιμαστεί τόσο σε υγροβιότοπους οριζόντιας όσο και σε

κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής. Παρόλο που η εφαρμογή του τεχνητού αερισμού είναι συνήθης σε άλλα συστήματα επεξεργασίας αποβλήτων όπως το σύστημα επεξεργασίας ενεργού ιλύος, στα συστήματα τεχνητών υδροβιότοπων εισήχθη τα τελευταία χρόνια. Στους τεχνητούς υδροβιότοπους κατακόρυφης ροής, ο τεχνητός αερισμός είναι αποτελεσματικότερος όταν παρέχεται ομοιόμορφα στον πυθμένα της κλίνης. Και αυτό γιατί η ανοδική ροή του αέρα από τον πυθμένα προς την επιφάνεια και η καθοδική ροή του υγρού από την επιφάνεια προς τον πυθμένα, έχουν ως αποτέλεσμα μια πολύ καλή ανάμειξη του αέρα με το υγρό εντός της κλίνης του VFCW. (Stefanakis, 2018)

Γενικά ο τεχνητός αερισμός έλκει το ενδιαφέρον όταν είναι επιθυμητή επιπλέον ποσότητα οξυγόνου για την επεξεργασία των αποβλήτων. Το βασικό πλεονέκτημα είναι ότι επειδή ο τεχνητός αερισμός ενισχύει τις διεργασίες απομάκρυνσης ρύπων, η απαιτούμενη επιφάνεια για την επεξεργασία των αποβλήτων μειώνεται σημαντικά και έτσι ελαττώνεται και το συνολικό οικονομικό κόστος της εγκατάστασης (Stefanakis, 2018).

2.5.9 Εξατμισοδιαπνοή στους Τεχνητούς Υδροβιότοπους Κατακόρυφης Ροής

Η εξατμισοδιαπνοή στους τεχνητούς υδροβιότοπους κατακόρυφης υπόγειας ροής αντιπροσωπεύει τις απώλειες νερού μέσα από την κλίνη του υδροβιότοπου και από τα μέρη των φυτών που βρίσκονται έξω από την κλίνη δηλαδή πάνω από το έδαφος. Παράγοντες που την επηρεάζουν είναι η ηλιακή ακτινοβολία, η ταχύτητα του ανέμου και η μεταφορά θερμότητας από τον περιβάλλοντα αέρα. Η εξατμισοδιαπνοή θεωρείται ως ο κύριος μηχανισμός απομάκρυνσης νερού και η πιο σημαντική παράμετρος στην υδρολογική ισορροπία των υδροβιότοπων. Ο βαθμός της εξατμισοδιαπνοής εξαρτάται από πολλούς παραμέτρους και κάποιες από αυτές είναι ο τύπος και το είδος της βλάστησης, η πυκνότητα της βλάστησης και οι κλιματικές συνθήκες. (Stefanakis, Akratos, & Tsihrintzis, 2014)

Οι απώλειες νερού μέσω εξατμισοδιαπνοής μπορεί να φτάσουν έως 50% του αρχικού όγκου των εισροών στην Κεντρική Ευρώπη ενώ στις μεσογειακές χώρες οι απώλειες είναι ακόμα μεγαλύτερες. Οι υψηλές τιμές εξατμισοδιαπνοής μπορεί να δημιουργήσουν πρόβλημα στους τεχνητούς υδροβιότοπους. Για παράδειγμα, κατά τους θερμούς μήνες και σε άνυδρες περιοχές, οι υψηλές απώλειες νερού μέσω εξατμισοδιαπνοής, σημαίνουν ότι ο διαθέσιμος όγκος του νερού που πρόκειται να επεξεργαστεί είναι μικρότερος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνονται οι συγκεντρώσεις των ρύπων και μπορεί τα απόβλητα να είναι πιο αλατούχα. Έτσι λοιπόν όταν υπάρχουν απώλειες μέσω εξατμισοδιαπνοής ενδέχεται το σύστημα να επηρεαστεί αρνητικά όσον αφορά την απομάκρυνση ρύπων. Τέλος οι απώλειες νερού μέσω εξατμισοδιαπνοής, δημιουργούν μεγάλο πρόβλημα στις περιπτώσεις που είναι επιθυμητή η ανάκτηση και η επαναχρησιμοποίηση του επεξεργασμένου αποβλήτου. (Stefanakis, Akratos, & Tsihrintzis, 2014)

3 Πειραματικό μέρος

3.1 Πειραματική Διάταξη

3.1.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Το πείραμα αποτελούσαν από τρεις πιλοτικούς αεριζόμενους τεχνητούς υδροβιότοπους κατακόρυφης ροής που είχαν εγκατασταθεί στο θερμοκήπιο της σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης .

Οι υδροβιότοποι ήταν ο **G(Gravel)**, ο **P(Plastic)** και ο **C(Control)**. Πρόκειται για πλαστικές δεξαμενές που τις παρέχονταν αστικά λύματα και ο αερισμός σε αυτές ενισχύονταν τεχνητά με την βοήθεια αεραντλίας . Στον G είχε φυτευτεί καλάμι και πιο συγκεκριμένα το *Phragmites Australis* με υλικό πλήρωσης το χαλίκι. Ο δεύτερος υδροβιότοπος ο P ήταν όμοιος με τον υδροβιότοπο G, με μοναδική διαφορά ότι σε αυτόν το υλικό πλήρωσης ήταν το ανακυκλωμένο πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας HDPE. Στον τρίτο υδροβιότοπο τον C δεν είχε φυτευτεί τίποτα και το υλικό πλήρωσής του ήταν επίσης ανακυκλωμένο HDPE .

Η στάθμη των υδροβιότοπων ήταν ελεγχόμενη και για αυτό τον λόγο είχαν τοποθετηθεί βάνες στα κατώτερα σημεία τους, που συγκοινωνούσαν με δοχεία μέτρησης, έτσι ώστε, να ρυθμίζεται καθώς επίσης και να καταγράφεται η εκροή τους. Η εκροή στον C ήταν χειροκίνητη και γινόταν με άνοιγμα της βάνας ενώ στον P και τον G επιτυγχάνονταν με φυσικό τρόπο. Αναλυτικότερα οι βάνες στον P και G ήταν ανοιχτές συνέχεια έτσι ώστε να μην εμποδίζουν την ροή των εκροών και συγκοινωνούσαν με δοχεία συλλογής, χωρητικότητας 10 λίτρων, μέσω πλαστικών σωλήνων . Τέλος δόθηκε κλίση περίπου 1% στις πιλοτικές μονάδες για υποβοήθηση της φυσικής ροής .

Το λύμα συλλέγονταν από την Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων Χανίων και παρέχονταν στους υδροβιότοπους 1L λύμα στον καθένα ανά δύο ημέρες.

Πίνακας 3.1: Παράμετροι Τεχνητών Υδροβιότοπων

Παράμετρος	G	P	C
Υλικό πλήρωσης	Gravel (χαλίκι)	Ανακυκλωμένο HDPE (πλαστικό)	Ανακυκλωμένο HDPE (πλαστικό)
Χλωρίδα	<i>Phragmites Australis</i>	<i>Phragmites Australis</i>	Χωρίς
Επιφάνεια (m ²)	0,1214	0,1214	0,098



Εικόνα 3.1: Οι πιλοτικοί αεριζόμενοι τεχνητοί υγροβιότοποι του πειράματος

3.1.2 Χωροθέτηση πειραματικής διάταξης και κλιματολογικά στοιχεία

Ο τόπος εκτέλεσης του πειράματος για τους σκοπούς της πτυχιακής εργασίας έγινε στο Πολυτεχνείο Κρήτης. Πιο συγκεκριμένα οι πιλοτικοί αεριζόμενοι τεχνητοί υγροβιότοποι βρίσκονταν σε υπαίθριο χώρο του Πολυτεχνείου Κρήτης πλησίον της σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος. Η εργαστηριακή ανάλυση των εκροών πραγματοποιούνταν στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος της σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος Πολυτεχνείου Κρήτης .

Ο κοντινότερος μετεωρολογικός σταθμός μέτρησης, ιδιοκτησίας του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, βρίσκεται εντός της Πολυτεχνειούπολης του Πολυτεχνείου Κρήτης και βρίσκεται στο υψόμετρο των 137 μέτρων. Στο σταθμό αυτό λαμβάνονται δεδομένα για τη θερμοκρασία, την υγρασία, τον άνεμο, την βαρομετρική πίεση, τον υετό, τη βροχή, την ηλιακή και υπεριώδη ακτινοβολία.

Πίνακας 3.2: Κλιματολογικά μηνιαία δεδομένα έτους 2022 (Meteo, n.d.).

ΜΗΝΑΣ	ΜΕΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (°C)	ΜΕΓΙΣΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (°C)	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (°C)	ΜΗΝΙΑΙΑ ΒΡΟΧΩΠΤΟΣ Η (mm)	ΜΕΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤ Α ΑΝΕΜΟΥ (km/h)	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΑΧΥΤΗΤ Α ΑΝΕΜΟΥ (km/h)
ΙΟΥΝΙΟΣ	25,6	35,5	18,2	0,0	7	45,1
ΙΟΥΛΙΟΣ	26,5	36,4	20,0	0,0	6,4	38,6

ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	26,6	35,8	20,3	11,2	7,5	43,5
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	24,0	33,8	14,4	3,8	7,8	43,5
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	19,3	34,4	11,2	60,4	7,1	51,5
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	16,5	25,7	10,6	67,2	6,3	49,9
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	14,6	24,2	7,9	16,4	5,4	56,3

3.1.3 Εκτέλεση πειράματος

Το πείραμα που αφορά την συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία ξεκίνησε στις 18 Ιουνίου του 2022 και έληξε στις 30 Δεκεμβρίου του 2022 .Οι πιλοτικοί αεριζόμενοι τεχνητοί υδροβιότοποι ωστόσο είχαν ήδη εγκατασταθεί από τον καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης Αλέξανδρο Στεφανάκη στις 18 Ιουνίου 2021 και παρέχονταν σε αυτούς αστικά υγρά απόβλητα από προπτυχιακούς φοιτητές για τις ανάγκες των πτυχιακών εργασιών τους. Έτσι οι υδροβιότοποι ήταν ήδη σε λειτουργία 1 χρόνο περίπου πριν την εκτέλεση αυτού του πειράματος, γεγονός που σημαίνει πως η βλάστηση ήταν αρκετά αναπτυγμένη και ενδεχομένως προκλήθηκε κορεσμός στα υλικά πλήρωσης.

Η παροχή λύματος γινόταν χειροκίνητα ανά δύο μέρες και πιο συγκεκριμένα ήταν 8 λίτρα ανά υδροβιότοπο από τις 18 Ιουνίου και άλλαξε σε 12 λίτρα ανά υδροβιότοπο από τις 6 Ιουλίου του 2022 έως το τέλος του πειράματος στις 30 Δεκεμβρίου του 2022 . Η συλλογή του λύματος γινόταν επίσης χειροκίνητα σε πλαστικά μπιτόνια χωρητικότητας 22 έως 30 λίτρων από την Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων Χανίων και πιο συγκεκριμένα τα λύματα συλλέγονταν αμέσως μετά την διεργασία της πρωτοβάθμιας καθίζησης στο κανάλι μεταφοράς τους προς την επόμενη διεργασία επεξεργασίας τους. Για την συλλογή των λυμάτων χρησιμοποιήθηκαν τα απαραίτητα μέτρα ασφαλείας και υγιεινής όπως στολή ,γάντια αδιάβροχα μιας χρήσης , μάσκα προστασίας του αναπνευστικού μιας χρήσης, απολύμανση των μπιτονιών και απολύμανση χεριών και στολής μετά την συλλογή τους, δεδομένου του αυξημένου κινδύνου που μπορούν να προκαλέσουν τα αστικά λύματα στην υγεία. Για την παροχή του λύματος στις πιλοτικές μονάδες και για την συλλογή των εκροών τους, επίσης χρησιμοποιήθηκαν τα απαραίτητα μέτρα προστασίας για να αποφευχθούν οι επιπλοκές που προαναφέρθηκαν .

Ο συνολικός όγκος των εισροών και των εκροών καταγράφονταν σε αρχείο. Μια φορά την εβδομάδα πραγματοποιούνταν δειγματοληψία από τις εκροές των πιλοτικών μονάδων και αμέσως μετά γινόταν η εργαστηριακή ανάλυσή τους. Επιπρόσθετα πραγματοποιούνταν και εργαστηριακή ανάλυση σε δείγματα του λύματος που παρέχονταν στις πιλοτικές μονάδες αμέσως μετά την συλλογή τους από την Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων Χανίων ούτως ώστε να μην αλλοιωθούν .



Εικόνα 3.2: Δείγματα από την παροχή και τις εκροές των μονάδων που προορίζονται για εργαστηριακή ανάλυση

3.2 Δείγματα και Υλικά

3.2.1 Υγρά Αστικά Απόβλητα από Εργοστάσιο Επεξεργασίας Λυμάτων Χανίων

Το Εργοστάσιο Επεξεργασίας Λυμάτων (ή ΕΕΛ) Χανίων ή ο Βιολογικός Χανίων υπάγεται διοικητικά στην Δημόσια Επιχείρηση Ύδρευσης και Αποχέτευσης Χανίων (ή Δ.Ε.Υ.Α. Χανίων). Το συνολικό κόστος κατασκευής των έργων της ΕΕΛ μέχρι σήμερα είναι 24.042.000€ και έχει χρηματοδοτηθεί κατά το μεγαλύτερο ποσοστό από ευρωπαϊκούς και εθνικούς πόρους και ίδιους πόρους της Δ.Ε.Υ.Α. Χανίων.

Ξεκίνησε την λειτουργία του το 1995 και είχε δυναμικότητα 80.000 ισοδύναμων κατοίκων. Το 2001 μετά την πρώτη επέκταση στον Βιολογικό η δυναμικότητά του ήταν 117.750 ισοδύναμοι κάτοικοι. Η τελευταία επέκταση της εγκατάστασης ολοκληρώθηκε τον Νοέμβριο του 2016 ενώ παράλληλα όσο βρισκόταν υπό μελέτη το έργο πραγματοποιήθηκαν εργασίες βελτιώσεων και επεμβάσεων για τον εκσυγχρονισμό της ΕΕΛ. Σήμερα η εγκατάσταση δέχεται κατά μέσο όρο 23.600 m³/ημέρα, ενώ ο εξυπηρετούμενος πληθυσμός κατά τις περιόδους αιχμής φτάνει σήμερα τους 142.000 ισοδύναμων κατοίκων. Επιπρόσθετα ,δεδομένου της αύξησης του μόνιμου πληθυσμού, της αύξησης του τουρισμού και την επέκταση του πολεοδομικού συγκροτήματος Χανίων, ο Βιολογικός έχει την δυνατότητα να ανταπεξέλθει για την επόμενη 20ετία σε οποιαδήποτε πιθανή αύξηση του όγκου του

λύματος που θα επεξεργαστεί. Ο βαθμός επεξεργασίας των λυμάτων ξεπερνάει το 97% για το οργανικό φορτίο και το 95% για την αμμωνία. Παράγονται περίπου 7.000.000 m³ επεξεργασμένων λυμάτων ανά έτος, 200 m³/ημέρα νερό επαναχρησιμοποίησης και ηλεκτρική ενέργεια 1.500 KWh/ημέρα, που αξιοποιούνται για τις ανάγκες της εγκατάστασης, καθώς και 4.500 τόνοι/έτος αφυδατωμένης ιλύος που διατίθενται στο ΧΥΤ Κορακιάς.

Η λειτουργία της ΕΕΛ διασφαλίζει τη συμμόρφωση της Δ.Ε.Υ.Α. Χανίων με την οδηγία 91/271 της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τη διαχείριση των αστικών λυμάτων και διέπεται από την απόφαση Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων 22234/26-4-2016. Το θαλάσσιο οικοσύστημα της περιοχής γύρω από την εκβολή του υποθαλάσσιου αγωγού επεξεργασμένων λυμάτων της ΕΕΛ παρακολουθείται τακτικά από το Ελληνικό Κέντρο Θαλάσσιων Ερευνών, ως προς την μικροβιολογική ποιότητα του νερού, τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά και θρεπτικά άλατα της στήλης του νερού, την βιοποικιλότητα του βυθού και την παρουσία ρυπαντών με εξαιρετικά αποτελέσματα επιβεβαιώνοντας τον θετικό ρόλο της εγκατάστασης στην προστασία του περιβάλλοντος. (deyach, n.d.)<https://deyach.gr/viologikos/pliories/>

Η επεξεργασία των λυμάτων γίνεται με την μέθοδο της ενεργοποιημένης λάσπης και η επεξεργασία της λάσπης με την μέθοδο της αναερόβιας χώνευσης με παράλληλη αξιοποίηση του παραγόμενου βιοαερίου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η εγκατάσταση έχει σχεδιαστεί για την απομάκρυνση του BOD₅ κατά 96% και των αιωρούμενων στερεών κατά 95%

Αναφορικά τα βασικά τμήματα της εγκατάστασης είναι:

- Αντλιοστάσιο Εισόδου Εγκατάστασης
- Εγκατάσταση Υποδοχής Βοθρολυμάτων
- Εσχάρωση
- Εξάμμιση – Αφαίρεση Λιπών
- Πρωτοβάθμια καθίζηση
- Δεξαμενή Επιλογής
- Δεξαμενές Αερισμού
- Δεξαμενές Δευτεροβάθμιας Καθίζησης
- Δεξαμενή Χλωρίωσης
- Μηχανική Πάχυνση της Λάσπης
- Προπάχυνση
- Αναερόβιοι Χωνευτές
- Μεταπάχυνση
- Αφυδάτωση
- Συγκρότημα Απόσμησης
- Επιπλέον Κτηριακές Εγκαταστάσεις
- Αυτοματισμός της Εγκατάστασης

(<https://deyach.gr/egkastaseis/egkastasi-epexergasias-lymaton/>)

Το λύμα που χρησιμοποιήθηκε για την παροχή των πιλοτικών μονάδων έχει υποστεί τις διεργασίες:

- ✓ της εσχάρωσης ,
- ✓ της εξάμμιωσης και αφαίρεσης λιπών
- ✓ και της πρωτοβάθμιας καθίζησης.



Εικόνα 3.3: Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων Χανίων

3.2.2 Βλάστηση

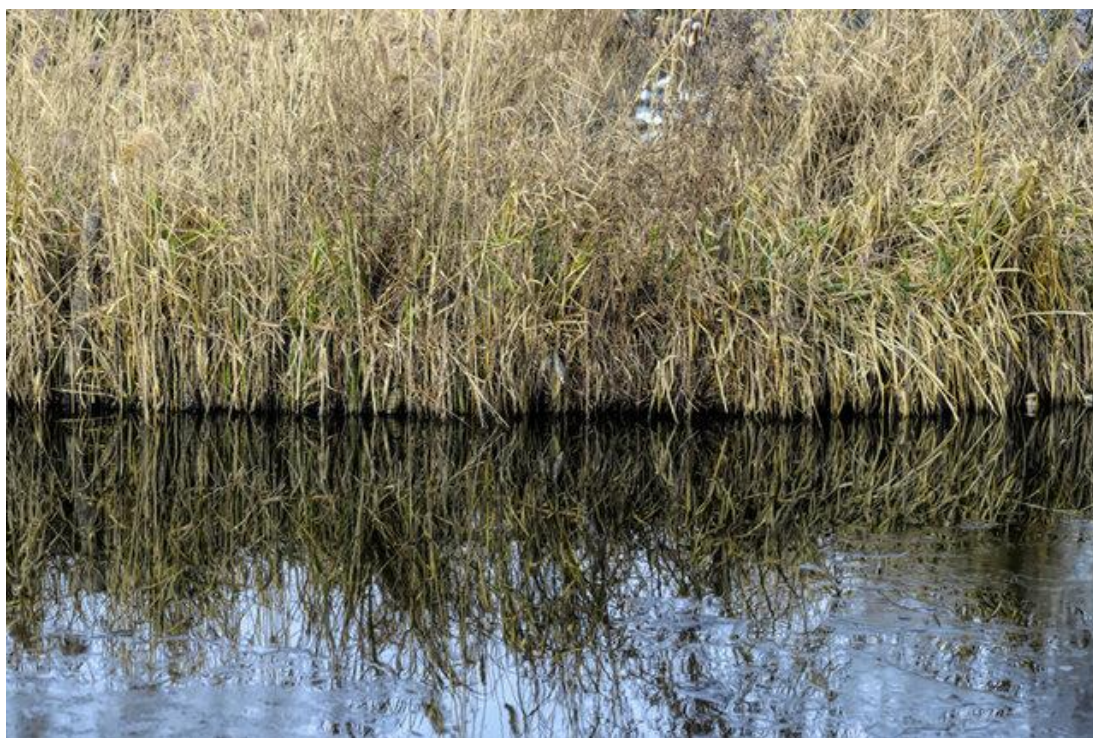
Η βλάστηση που επιλέχθηκε για τον τεχνητό υγροβιότοπο είναι το κοινό καλάμι ή αλλιώς το είδος *Phragmites Austalis*. Το συγκεκριμένο είδος συναντάται και είναι η κυρίαρχη επιλογή στους τεχνητούς υγροβιότοπους της Ευρώπης. Αναπτύσσεται ταχέως σε ύψος και επίσης εξαπλώνεται πλευρικά στον χώρο με ρυθμό περίπου 1m/yr δημιουργώντας πυκνή βλάστηση. Οι ρίζες του μπορούν να διεισδύσουν βαθειά φτάνοντας και τα 0,4m βάθος περίπου στο χαλίκι. Ο ιστός του αποτελείται από 40% στερεά. Σε ξηρή βάση ο ιστός του αποτελείται από 40% άνθρακα(C), 20% άζωτο(N) και 2% φώσφορο(P). Επίσης έχει μεγάλη ανοχή στην αλατότητα έως 45ppt (η μέση αλατότητα της θάλασσας είναι 35ppt (Συλαίος, 2024)). Ένας άλλος λόγος που το καλάμι επιλέγεται ως είδος βλάστησης που χρησιμοποιείται στους τεχνητούς υγροβιότοπους, είναι το γεγονός ότι έχει μικρή θρεπτική αξία για τα περισσότερα είδη πτηνών και ζώων και έτσι δεν καταστρέφεται η βλάστηση του υγροβιότοπου, σε αντίθεση με άλλα είδη βλάστησης που χρησιμοποιούνται σε τεχνητούς υγροβιότοπους. (Sherwood C. Reed, 1995)

Οι ρίζες του εξαπλώνονται οριζόντια και κάθετα δημιουργώντας έτσι υδραυλικό μονοπάτι για να διαφύγει το υγρό. Ατμοσφαιρικό οξυγόνο φτάνει στις ρίζες από τα φύλλα και τα κλαδιά αλλά και από τον κορμό του και διαχέεται στο έδαφος γύρω από τις ρίζες. Η παροχή οξυγόνου γύρω από τις ρίζες δημιουργεί αερόβιες συνθήκες κοντά στις ρίζες και ενισχύει την δραστηριότητα των μικροοργανισμών που είναι υπεύθυνοι για την επεξεργασία του απόβλητου. Τα αιρούμενα στερεά στα απόβλητα

κομποστοποιούνται πάνω σε ένα στρώμα που έχει δημιουργηθεί από νεκρά κλαδιά και φύλλα (Hammer, 1989)

Οι κυριότεροι λόγοι που επιλέχθηκε το *Phragmites Australis* για τον τεχνητό υγροβιότοπο είναι:

1. Ότι είναι ανθεκτικό σε ρυπογόνα και υγρά εδάφη και μάλιστα μπορεί να ευδοκιμήσει σε αυτές τις συνθήκες και να αναπτυχθεί ραγδαία.
2. Ότι είναι ανθεκτικό σε ένα μεγάλο φάσμα διαφορετικών συνθηκών λειτουργίας, προσαρμόζεται σε διαφορετικές καιρικές συνθήκες και δεν χρειάζεται συντήρηση το φυτό για να ευδοκιμήσει.
3. Είναι φυτό που συναντάται συχνά σε βαλτώδεις φυσικούς υγροβιότοπους στην Κρήτη.
4. Η ικανότητα του να απορροφά θρεπτικά συστατικά , βαρέα μέταλλα και άλλες ρυπογόνους ουσίες από τα λύματα μέσω των ριζωμάτων του.
5. Οι μικρές οικονομικές και ενεργειακές απαιτήσεις τόσο για την κατασκευή όσο και για την συντήρηση του υγροβιότοπου.
6. Δεν απειλείται από πτηνά και ζώα τα οποία ενδέχεται να προκαλούσαν βλάβες στην βλάστηση.



Εικόνα 3.4: *Phragmites Australis* σε φυσικό υγροβιότοπο

3.2.3 Χαλίκι

Η χρήση του χαλικιού ως υλικό πλήρωσης στους τεχνητούς υγροβιότοπους είναι πολύ συνηθισμένη. Τα χαλίκια που χρησιμοποιήθηκαν ως πληρωτικό υλικό στις πιλοτικές μονάδες έχουν μέση διάμετρο 15 mm και πορώδες 38%, προέρχονται από λατομείο

και χρησιμοποιούνται συνήθως ως δομικό υλικό. Το πέτρωμα τους είναι ασβεστολιθικό και κύριο συστατικό τους είναι ο ασβεστίτης (CaCO_3). Τα κυριότερα πλεονεκτήματά του είναι: (Stefanakis, Akrotos, & Tsihrintzis, 2014)

1. Φιλτράρουν φυσικά το λύμα
2. Αρχικά τον πρώτο καιρό της χρήσης τους, έχουν υψηλή απόδοση στην αφαίρεση φωσφόρου μέσω προσρόφησης, αλλά αυτή η ικανότητά τους μειώνεται με την πάροδο του χρόνου, λόγω του κορεσμού που προκαλείται στην επιφάνεια προσρόφησης από την χρόνια επεξεργασία των λυμάτων.
3. Υποστηρίζουν την ανάπτυξη μικροοργανισμών και την δημιουργία βιοφίλμ.
4. Έχουν υψηλή διαπερατότητα και έτσι εξασφαλίζουν μεγάλη υδραυλική αγωγιμότητα. Επίσης μειώνονται τα προβλήματα που μπορεί να δημιουργηθούν από την φραγή των πόρων (bed clogging).
5. Υποστηρίζουν την αναπτυσσόμενη βλάστηση.



Εικόνα 3.5: Το χαλίκι που χρησιμοποιήθηκε ως υλικό πλήρωσης στην μονάδα G

3.2.4 Ανακυκλωμένο HDPE

Πολυαιθυλένιο Υψηλής Πυκνότητας HDPE (High Density Poly Ethylene) είναι ένα πλαστικό πολυμερές που φτιάχνεται από το μονομερές αιθυλένιο. Από αυτό φτιάχνονται πληθώρα υλικών που χρησιμοποιούνται καθημερινά όπως σωλήνες αποχέτευσης και ύδρευσης, περιβλήματα συσκευών, παιχνίδια, φιάλες για οικιακά είδη καθαριότητας, τσάντες ακόμα και πλαστικά εμφυτεύματα που χρησιμοποιούνται στην ιατρική. Είναι 100% ανακυκλώσιμο. Έχει υψηλή θερμοκρασία τήξης και έτσι

μπορεί να εκτίθεται επανειλημμένα ακόμα και στους 120⁰C χωρίς να αλλοιώνεται η σύστασή του, πράγμα που σημαίνει ότι μπορεί να γίνει αποστείρωσή του. Επίσης έχει υψηλή αντοχή στην διάβρωση και έτσι μπορεί να εκτίθεται σε απόβλητα που είναι διαβρωτικά χωρίς να αλλοιώνεται.

(<mailto:https://www.britannica.com/science/high-density-polyethylene> ,
<https://www.acmeplastics.com/what-is-hdpe>)

Χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι HDPE που έχουν πορώδες μεταξύ 90% έως 95%. Ο ένας τύπος έχει ειδική επιφάνεια 188 m²/m³, διάμετρο 38 mm και μήκος 38 mm και ο άλλος τύπος έχει ειδική επιφάνεια 360 m²/m³, διάμετρο 25 mm και μήκος 25 mm.

Οι λόγοι που επιλέχτηκε το ανακυκλωμένο HDPE ως υλικό πλήρωσης στον τεχνητό υγροβιότοπο είναι:

1. Επειδή είναι φτηνό υλικό και η χρήση ανακυκλωμένου πλαστικού ως υλικό πλήρωσης ενισχύει την βιωσιμότητα της διαδικασίας.
2. Η μεταφορά, η ανάκτηση και γενικότερα η διαχείριση του είναι εύκολη γιατί πρόκειται για ένα ελαφρύ υλικό.
3. Το ανακυκλωμένο πλαστικό που χρησιμοποιήθηκε ως υλικό πλήρωσης έχει υψηλό πορώδες με μεγάλα διάκενα και έτσι ενισχύει την ανάπτυξη των ριζωμάτων και επίσης ενισχύει την υδραυλική αγωγιμότητα και την διαφυγή του αέρα.
4. Φιλτράρει φυσικά το λύμα
5. Ενισχύει την ανάπτυξη μικροοργανισμών και δημιουργίας βιοφίλμ.
6. Επειδή είναι αδρανές υλικό και δεν αλληλεπιδράει με τα λύματα και το βιοφίλμ.
7. Μπορεί να ανακτηθεί όταν δημιουργηθούν προβλήματα λόγω της φραγής των πόρων του (bed clogging) και εφόσον καθαριστεί να επαναχρησιμοποιηθεί.



Εικόνα 3.6: Το ανακυκλωμένο HDPE που χρησιμοποιήθηκε ως υλικό πλήρωσης στις πιλοτικές μονάδες P και C

3.2.5 Σύστημα Παροχής Αέρα

Για την παροχή αέρα χρησιμοποιήθηκαν 3 όμοιες αεραντλίες, μία για την κάθε μονάδα που λειτουργούν με ηλεκτρική ενέργεια ισχύς 2,7W έκαστη. Πρόκειται για τα μοντέλα ‘AMTRA MOUSE 4 – Aquarium Air Pump’ της εταιρίας AIR PUMP οι οποίες κατασκευάζονται και χρησιμοποιούνται κυρίως για παροχή οξυγόνου σε ενυδρεία και κρίθηκαν κατάλληλες για τις ανάγκες αερισμού των πιλοτικών μονάδων. Το οξυγόνο παρέχονταν εντός των πιλοτικών μονάδων στο πυθμένα των δεξαμενών περίπου, μέσω δύο πλαστικών σωλήνων που ήταν συνδεδεμένοι με την αεραντλία και η παροχή της κάθε αεραντλίας ήταν 5,04 L/day.

Ο αερισμός εξυπηρετεί τις αερόβιες διεργασίες που λαμβάνουν μέρος σε τεχνητούς υγροβιότοπους κατακόρυφης ροής για την βιοαποικοδόμηση των ρύπων στα αστικά υγρά λύματα, αφού η αυξημένη συγκέντρωση οξυγόνου τις κάνει πιο αποτελεσματικές. Η αυξημένη παρουσία οξυγόνου ενισχύει την απομάκρυνση του BOD, του COD και της αμμωνίας. (Wu S. K., 2015)



Εικόνα 3.7: Οι αεραντλίες των πιλοτικών μονάδων

3.3 Αναλυτικές Μεθόδους

Παρακάτω αναλύονται οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για την εργαστηριακή ανάλυση των δειγμάτων των εισροών και εκροών των τεχνητών.

3.3.1 Υπολογισμός Εξατμισοδιαπνοής

Η απώλειες νερού λόγω εξατμισοδιαπνοής, υπολογίστηκαν συνολικά για κάθε μήνα του πειράματος, για κάθε υδροβιότοπο ξεχωριστά. Αρχικά αθροίστηκαν οι εισροές λύματος όλου του μήνα στον υδροβιότοπο και μετά αφαιρέθηκε το μηνιαίο άθροισμα των εκροών του υδροβιότοπου. Η διαφορά της συνολικής μηνιαίας παροχής με την συνολική μηνιαία εκροή είναι οι μηνιαίες απώλειες ύδατος σε λίτρα. Οι μηνιαίες απώλειες διαιρέθηκαν με 1000 για να μετατραπεί η μονάδα μέτρησης από λίτρα (L) σε κυβικά μέτρα (m^3). Έπειτα διαιρέθηκαν οι μηνιαίες απώλειες με την επιφάνεια του υδροβιότοπου (m^3/m^2) ώστε να υπολογιστούν οι απώλειες σε ύψος (m) και μετά έγινε πολλαπλασιασμός με το 1000 έτσι ώστε η μονάδα μέτρησης από μέτρα (m) να μετατραπεί σε χιλιοστόμετρα (mm). Τέλος στις απώλειες προστέθηκε και η μηνιαία βροχόπτωση (mm) που δίνεται στον Πίνακα 3.2.

3.3.2 Υπολογισμός Βιοχημικά Απαιτούμενου Οξυγόνου BOD₅

Για τον υπολογισμό του BOD₅ χρησιμοποιήθηκε μια φιάλη όγκου 500ml με πιεζομετρικό αισθητήρα OxiTop της WTW. Κατά την πειραματική διαδικασία

ορίστηκε ο κατάλληλος όγκος δείγματος με βάση την αναμενόμενη τιμή του BOD₅ και τοποθετήθηκε στην φιάλη. Στη συνέχεια, προστέθηκαν 6 σταγόνες KOH ως οξειδωτικό σε ειδική θέση κάτω από τον ηλεκτρικό αισθητήρα, ο οποίος σφραγιζότανε στη φιάλη. Μετά, η φιάλη σφραγιζότανε και τοποθετούτανε σε περιβάλλον σταθερής θερμοκρασίας 20°C μέσα σε βάση που εξασφάλιζε ανάδευση με τη χρήση μαγνήτη. Με το πέρας 5 ημερών υπολογίζονταν το BOD₅ και ο αισθητήρας αποθήκευε και έδινε την ένδειξη όταν του ζητούνταν, μέχρι να μηδενιστεί χειροκίνητα για να κάνει νέο υπολογισμό.

3.3.3 Υπολογισμός Χημικά Απαιτούμενου Οξυγόνου COD

Ο υπολογισμός του COD στα δείγματα έγινε με φασματοφωτομετρική μέθοδο και χρησιμοποιήθηκε το Kit COD Cell Test 1.14541.0001 για εύρος συγκεντρώσεων από 52mg/l έως 1500mg/l. Αρχικά τοποθετούνταν 3 ml δείγματος στο φιαλίδιο του Kit και μετά ακολουθούσε η τοποθέτηση του φιαλιδίου σε εστία θέρμανσης για 2 ώρες στους 148 °C. Έπειτα ρυθμιζότανε το φασματοφωτόμετρο, το οποίο ήταν το SHIMADZU UV-1202, με τυφλό διάλυμα στα 610nm και όταν το φιαλίδιο είχε φτάσει σε θερμοκρασία περιβάλλοντος τοποθετούνταν στο φασματοφωτόμετρο. Τέλος το φασματοφωτόμετρο έδινε την ένδειξη και υπολογίζονταν η συγκέντρωση του δείγματος με την βοήθεια της καμπύλης βαθμονόμησης η οποία είναι στο [Παράρτημα VI](#).



Εικόνα 3.8: Φασματοφωτόμετρο SHIMADZU UV-1202



Εικόνα 3.9: Kit COD Cell Test 1.14541.0001

3.3.4 Υπολογισμός Ολικού Αζώτου TN

Για τον υπολογισμό του ολικού αζώτου TN χρησιμοποιήθηκε το kit Nitrogen Total cell test 1.14763.0001 της Merck με εύρος συγκεντρώσεων 10 mg/l έως 150 mg/l φασματοφωτομετρικής μεθόδου. Αρχικά τοποθετούνταν 1ml δείγματος και 9 ml απιονισμένου νερού σε κυψελίδα του εργαστηρίου και μετά γινόταν πρόσθεση μιας κουταλιάς από το αντιδρών N-1K του kit στην κυψελίδα. Γινότανε ανάδευση στην κυψελίδα και μετά πρόσθεση 6 σταγόνων από το αντιδρών N-2K. Έπειτα αφού είχε γίνει πάλι ανάδευση στην κυψελίδα, γινότανε τοποθέτησή της για χώνευση σε μάτι βρασμού για 1 ώρα στους 120°C. Στη συνέχεια αφαιρούνταν η κυψελίδα από το μάτι και αφού είχε επανέλθει η θερμοκρασία της στους 20°C γινότανε πρόσμειξη σε αντιδραστήριο του kit, 1ml χωνευμένου και 1ml N-3K αντιδρών. Τέλος τοποθετούνταν στο μηχάνημα Merck NOVA 60 το οποίο έδινε απευθείας την συγκέντρωση του δείγματος σε ολικό άζωτο TN χωρίς την βοήθεια καμπύλη βαθμονόμησης για τον υπολογισμό της.



Εικόνα 3.10: Merck NOVA 60



Εικόνα 3.11: Nitrogen Total cell test 1.14763.0001

3.3.5 Υπολογισμός Αμμωνιακού Αζώτου $\text{NH}_4^+\text{-N}$

Για τον υπολογισμό του αμμωνιακού αζώτου $\text{NH}_4\text{-N}$ χρησιμοποιήθηκε το kit Ammonium Test 1.006833.0001 με εύρος συγκεντρώσεων από 2mg/l έως 150mg/l φασματοφωτομετρικής μεθόδου. Αρχικά γινόταν διήθηση του δείγματος σε φίλτρο διαμέτρου πόρων 0,45μm και αναμιγνύονταν 0,1 ml του διηθημένου δείγματος με 5ml $\text{NH}_4\text{-1}$ αντιδρών. Αμέσως μετά γινόταν προσθήκη μιας κουταλιάς $\text{NH}_4\text{-2}$. Τέλος, αφού είχαν περάσει 10 λεπτά περίπου ώστε να έχει ολοκληρωθεί η αντίδραση και αφού είχε ρυθμιστεί το φασματοφωτόμετρο SHIMADZU UV-1202 με τυφλό δείγμα στα 690nm, καταγράφονταν η απορρόφηση από το φασματοφωτόμετρο και με την βοήθεια καμπύλης βαθμονόμησης η οποία είναι στο [Παράρτημα VII](#), γινόταν υπολογισμός της συγκέντρωσης του δείγματος.



Εικόνα 3.12: Δείγματα για φασματοφωτομέτρηση με πρώτο από αριστερά το τυφλό δείγμα

3.3.6 Υπολογισμός Νιτρικού Αζώτου NO_3^- -N

Για τον υπολογισμό του νιτρικού αζώτου NO_3^- -N χρησιμοποιήθηκε το kit Nitrat 91865 της εταιρείας MACHERY-NAGEL με εύρος συγκεντρώσεων 0,1 mg/l έως 30 mg/l, φασματοφωτομετρικής μεθόδου. Αρχικά γινόταν διήθηση του δείγματος σε φίλτρο με διάμετρο πόρων 0,45 μm και έπειτα ανάμειξη 0,5 ml του διηθημένου δείγματος με 4 ml R1 αντιδρώντος και 0,5 ml R2 αντιδρώντος. Τέλος, αφού είχαν περάσει 10 λεπτά περίπου ώστε να έχει ολοκληρωθεί η αντίδραση και αφού είχε ρυθμιστεί το φασματοφωτόμετρο SHIMADZU UV-1202 με τυφλό διάλυμα στα 365 nm, γινόταν καταγραφή της φασματοφωτομετρικής ένδειξης και με την καμπύλη βαθμονόμησης η οποία είναι στο [Παράρτημα VIII](#), γινόταν υπολογισμός της συγκέντρωσης του δείγματος.



Εικόνα 3.13: Kit Nitrat 91865

3.3.7 Υπολογισμός Ολικού Φωσφόρου TP

Ο υπολογισμός του ολικού φωσφόρου TP γινόταν με φασματοφωμετρική μέθοδο. Αρχικά γινόταν πρόσθεση 5 ml νιτρικού οξέως, 1 ml θειικού οξέως και 50 ml δείγματος σε ποτήρι ζέσεως. Έπειτα το ποτήρι ζέσεως τοποθετούνταν σε ηλεκτρική

εστία θέρμανσης μέχρις ότου εξατμιστεί και μειωθεί ο όγκος του δείγματος στην υγρή μορφή σε 1ml περίπου. Αμέσως μετά ρυθμίζοταν το pH του σε ουδέτερο από 6,5 έως 7,5 με την προσθήκη των κατάλληλων οξέων ή βασικών διαλυμάτων και απιονισμένου νερού. Στη συνέχεια γινόταν διήθηση του διαλύματος με φίλτρο 0,45μm διάμετρο πορώδους και συμπληρώνονταν σε αυτό απιονισμένο νερό έως ότου φτάσει ο όγκος του 50ml. Το τελευταίο στάδιο πριν την φασματοφωτομέτρηση ήταν η προσθήκη 8ml διαλύματος combined reagent του οποίου η Παρασκευή γινόταν στο εργαστήριο. Η παρασκευή του combined reagent γινόταν με τα εξής συστατικά :

- a) Sulfuric Acid 5M : 70ml στα 500ml
- b) Ammonium Molybdate : 20g στα 500ml
- c) Potassium Antimony Tartrate : 1,3715g στα 500ml
- d) Ascorbic Acid : 1,76g στα 100 ml

Αφού είχαν ετοιμαστεί τα συστατικά στη συνέχεια γινόταν η παρασκευή του αναμιγνύοντας 50ml από το συστατικό (a), 15ml από το συστατικό (b), 5ml από το συστατικό (c) και 30ml από το συστατικό (d). Ο τελικός όγκος του combined reagent ήταν 100ml. Αφού τελικά είχαν προστεθεί 8ml του combined reagent στο διάλυμα, ρυθμιζότανε το φασματοφωτόμετρο SHIMADZU UV-1202 με το τυφλό διάλυμα στα 880nm. Τέλος γινόταν καταγραφή της ένδειξης από το φασματοφωτόμετρο και με την καμπύλη βαθμονόμησης η οποία είναι στο [Παράρτημα IX](#) , μπορούσε να προσδιοριστεί η συγκέντρωση του δείγματος σε mg/l.

3.3.8 Υπολογισμός Φωσφορικών $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$

Ο υπολογισμός των φωσφορικών $\text{PO}_4\text{-P}$ πραγματοποιούνταν με φασματοφωμετρική μέθοδο. Αρχικά γινόταν διήθηση 50ml δείγματος με φίλτρο 0,45μm. Στη συνέχεια στο διηθημένο δείγμα γινόταν πρόσθεση 8ml combined reagent ίδιο με αυτό που χρησιμοποιούνταν για τον υπολογισμό του ολικού φωσφόρου. Έπειτα ρυθμιζότανε το φασματοφωτόμετρο με το τυφλό διάλυμα στα 880nm και γινόταν καταγραφή της φασματοφωτομετρικής ένδειξης. Τελικά ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης του δείγματος σε mg/l γινότανε με καμπύλη βαθμονόμησης.



Εικόνα 3.14: Δείγματα για φασματοφωτομέτρηση με πρώτο από αριστερά το τυφλό δείγμα

3.3.9 Υπολογισμός Ολικών Αιωρούμενων Στερεών TSS

Ο υπολογισμός των ολικών αιωρούμενων στερεών TSS πραγματοποιούνταν με διήθηση του δείγματος σε φίλτρο με μέγεθος πόρων 1μm. Αρχικά γινότανε ογκομέτρηση του δείγματος που προορίζονταν να διηθηθεί και ζυγιζότανε το φίλτρο στη ζυγαριά SHIMADZU LIBROR AEG-220 ακρίβειας 0,0001g. Η διήθηση του δείγματος γινότανε με την βοήθεια αντλίας κενού της εταιρίας Vaccubrand και στην συνέχεια γινότανε τοποθέτηση του φίλτρου σε φούρνο ξήρανσης για 30 λεπτά περίπου στους 100°C έτσι ώστε να απομακρυνθεί η υγρασία από το φίλτρο. Τέλος, αφού είχε επανέλθει η θερμοκρασία στο φίλτρο στους 20°C περίπου, τότε αυτό ξαναζυγιζόταν. Τέλος γινότανε προσδιορισμός της συγκέντρωσης των ολικών αιωρούμενων στερεών από τον εξής τύπο:

$$TSS = \frac{\text{τελική ξηρή μάζα φίλτρου διηθήσεως} - \text{αρχική ξηρή μάζα φίλτρου διηθήσεως}}{\text{όγκος αποβλήτου που διηθήθηκε}}$$



Εικόνα 3.15: Ζυγαριά SHIMADZU LIBROR AEG-220

3.3.10 Υπολογισμός Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας EC

Ο προσδιορισμός της ηλεκτρικής αγωγιμότητας EC γινόταν με την συσκευή CRISON microCM 2202. Η συσκευή διαθέτε ηλεκτρόδιο το οποίο βυθιζότανε στο δείγμα και έπειτα από λίγα δευτερόλεπτα έδινε την ένδειξη.

3.3.11 Υπολογισμός του PH

Ο προσδιορισμός του PH γινότανε με τη συσκευή CRISON microPH 2002. Η συσκευή διαθέτε ηλεκτρόδιο το οποίο βυθιζότανε στο δείγμα και προσδιόριζε το pH του. Πριν την καταγραφή των μετρήσεων, η συσκευή έπρεπε να βαθμονομηθεί με διαλύματα 4 pH και 7 pH.



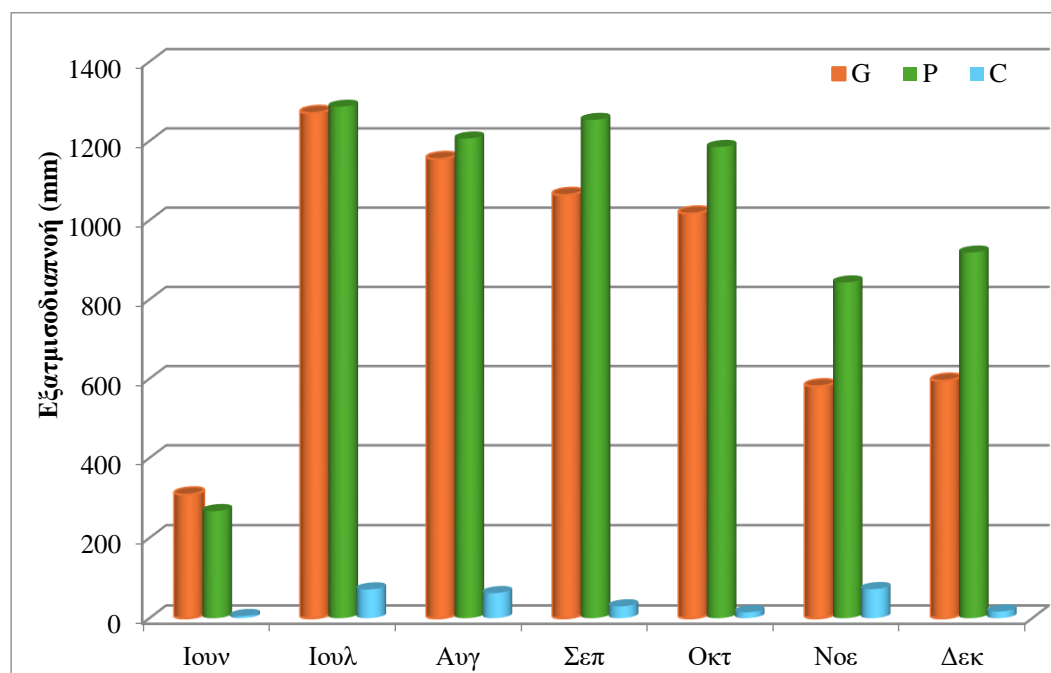
Εικόνα 3.16: CRISON microPH 2002

4 Αποτελέσματα πειράματος και συζήτηση πάνω σε αυτά

4.1 Εξατμισοδιαπνοή

Πίνακας 4.1: Μηνιαία εξατμισοδιαπνοή (απώλειες νερού σε mm) στους υδροβιότοπους G, P, C.

ΜΗΝΑΣ	ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΣ		
	G	P	C
ΙΟΥΝΙΟΣ	307,66	266,56	5,10
ΙΟΥΛΙΟΣ	1270,43	1286,24	71,43
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	1154,29	1206,10	62,22
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	1063,52	1253,06	29,31
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	1016,58	1184,78	14,48
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	580,63	842,82	72,30
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	594,65	918,21	16,4



Διάγραμμα 4.1: Μηνιαίες απώλειες (mm) λόγω εξατμισοδιαπνοής στους υδροβιότοπους G, P, C.

Μελετώντας το Διάγραμμα 4.1, παρατηρείται ότι οι μηνιαίες απώλειες νερού λόγω εξατμισοδιαπνοής είναι σταθερές στον C στον οποίο δεν υπάρχει βλάστηση και δεν μεταβάλλονται ιδιαίτερα. Στον C και στον P οι μηνιαίες απώλειες είναι μεγαλύτερες τους θερμούς μήνες και ελαττώνονται ελαφρώς τους ψυχρούς μήνες, με εξαίρεση τον Ιούνιο γιατί τότε η παροχή λύματος στους υδροβιότοπους ήταν μικρότερη κατά 1/3 (τον Ιούνιο ήταν 8L και μετά αυξήθηκε σε 12L) και δεν έγινε πλήρης μηνιαία διερεύνηση αλλά ξεκίνησε από τα μισά του μήνα. Οι ελάχιστες απώλειες στον C σε σχέση με τον P και G οφείλονται στην απουσία βλάστησης, η οποία πιθανώς είναι ο πιο κύριος παράγοντας.

4.2 Ποιοτικά Χαρακτηριστικά Εισροών

Πίνακας 4.2: Ποιοτικά χαρακτηριστικά των εισροών στους τεχνητούς υγροβιότοπους.

Παράμετρος	Μέση τιμή και τυπική απόκλιση	Εύρος τιμών
BOD₅ (mg/L)	328,3 ± 70,3	224 – 490
COD (mg/L)	402,1 ± 97,1	240 – 582
TN (mg/L)	68,3 ± 8,0	55 – 91
NH₄-N (mg/L)	42,8 ± 11,2	26,8 – 72,6
NO₃-N (mg/L)	2,0 ± 0,5	1,7 – 2,6
TP (mg/L)	9,1 ± 2,5	4,4 – 12,2
PO₄-P (mg/L)	5,9 ± 1,8	4,0 – 9,7
TSS (mg/L)	118,1 ± 34,9	64,0 – 178,0
EC (μS/cm)	1125 ± 109	948 – 1311
pH	7,04 ± 0,10	6,80 – 7,25
BOD₅/COD	0,82	

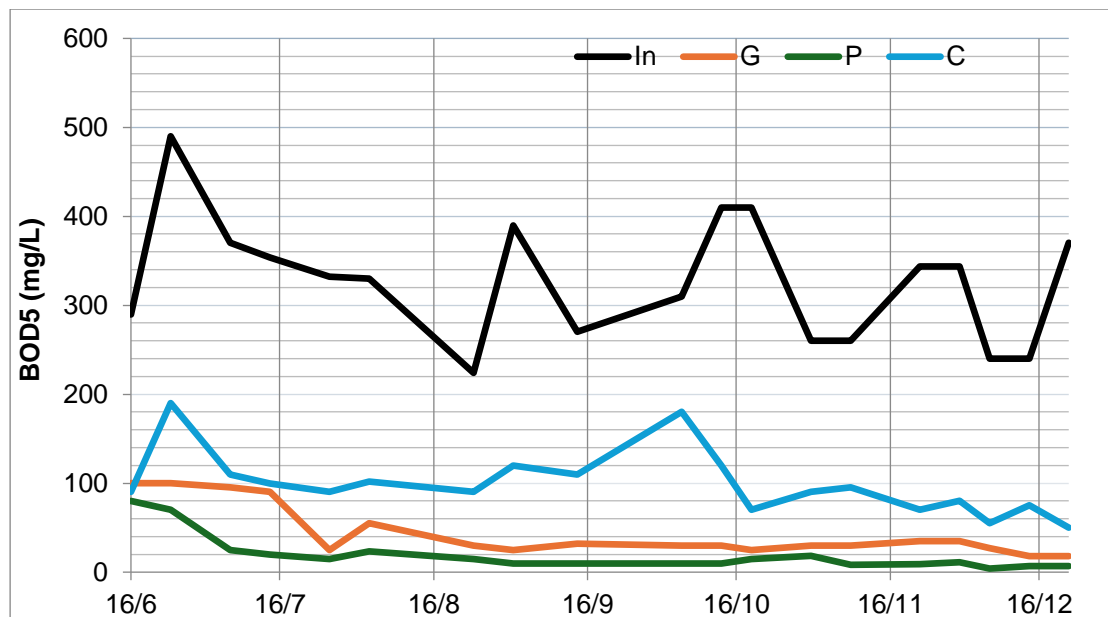
Οι εισροές στους τεχνητούς υγροβιότοπους ήταν αστικά υγρά απόβλητα που είχαν υποστεί πρωτοβάθμια επεξεργασία στην Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων Χανίων. Μελετώντας τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των εισροών στον και δεδομένου πως η ΕΕΛ των Χανίων απομακρύνει περίπου το 33% BOD₅ και το 60% των TSS στην πρωτοβάθμια επεξεργασία (deyach, χ.χ.), τότε μπορεί να γίνει μια γενική εκτίμηση στην συγκέντρωση του BOD₅ και των TSS πριν υποστούν πρωτοβάθμια επεξεργασία στην ΕΕΛ Χανίων. Έτσι λοιπόν η μέση τιμή του BOD₅ ήταν περίπου 490 mg/L και η μέση τιμή για τα TSS ήταν περίπου 295 mg/L. Αυτό σύμφωνα με (Χρυσικόπουλος, 2018) κατατάσσει τα απόβλητα ως ισχυρά, βάση της ισχύος των ρυπαντικών ουσιών που περιέχουν όπως φαίνεται και στον Πίνακα 2.4.

4.3 Ποιοτικά Χαρακτηριστικά Εκροών

4.3.1 Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (BOD₅)

Πίνακας 4.3: Συγκέντρωση BOD₅ στις εκροές των τεχνητών υγροβιότοπων G, P, C και ποσοστιαία απομάκρυνσή του.

Υγροβιότοπος	Μέση τιμή και τυπική απόκλιση (mg/L)	Εύρος τιμών (mg/L)	Μέση τιμή και τυπική απόκλιση απομάκρυνσης %	Εύρος τιμών απομάκρυνσης %
IN	328,3 ± 70,3	224 – 490	-	-
G	43,7 ± 29,0	18 – 100	86,7 ± 7,9	65,5 – 95,1
P	19,3 ± 20,5	4 – 80	94,2 ± 6,0	72,4 – 98,3
C	99,3 ± 36,0	50 – 190	69,2 ± 9,9	41,9 – 86,5



Διάγραμμα 4.2: Χρονική μεταβολή συγκεντρώσεων BOD₅ κατά την διάρκεια του πειράματος, στις εισροές (In) και εκροές των Υγροβιότοπων G, P, C.

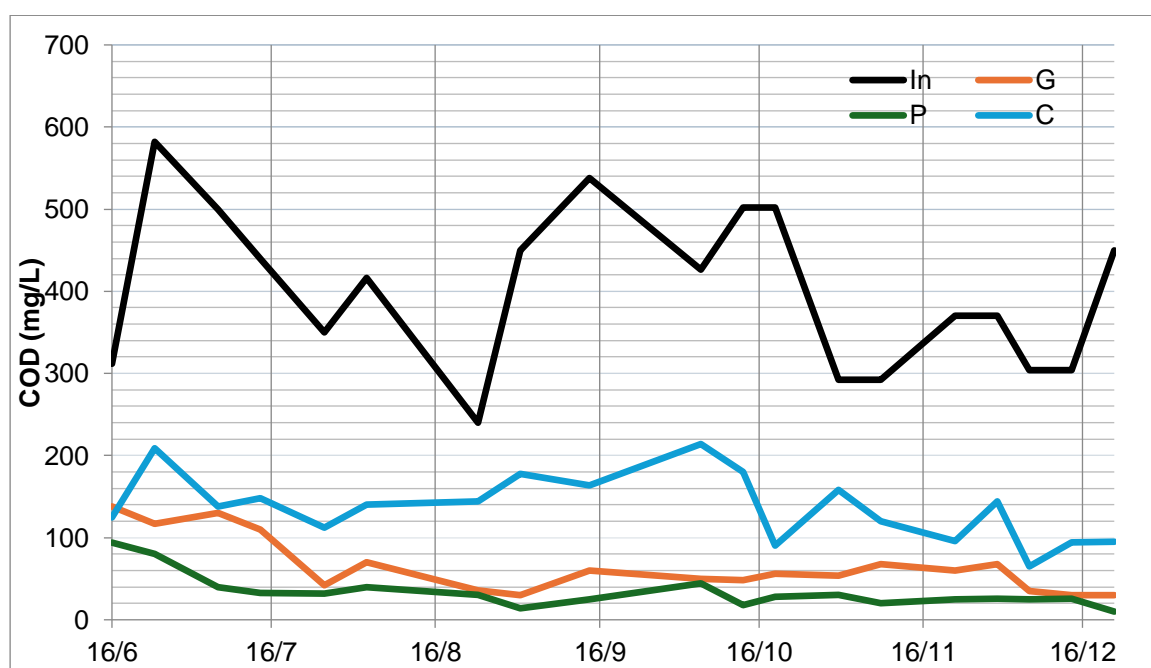
Μελετώντας τον Πίνακα 4.3 και το Διάγραμμα 4.2, παρατηρείται πως στον υγροβιότοπο P έχει επιτευχθεί η μεγαλύτερη ποσοστιαία απομάκρυνση BOD₅ με ποσοστό $94,2 \pm 6,0$ %, μετά στον G με $86,7 \pm 7,9$ % και τέλος στον C με $69,2 \pm 9,9$ %.

Το BOD₅ προσδιορίζει το βιοδιασπάσιμο οργανικό φορτίο το οποίο απομακρύνεται με καθίζηση και διήθηση και από τους μικροοργανισμούς οι οποίοι τρέφονται με οργανικό φορτίο και οξυγόνο. Οι απομακρύνσεις στους υγροβιότοπους G, P οι οποίοι έχουν βλάστηση είναι αρκετά μεγαλύτερες σε σχέση με τον C που δεν έχει βλάστηση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως τα ριζώματα και οι κορμοί της υδρόβιας βλάστησης που βρίσκονται εντός της κλίνης του υγροβιότοπου φιλτράρουν φυσικά το λύμα απομακρύνοντας στερεά, παρέχουν την απαραίτητη επιφάνεια για να προσκολληθούν και να αναπτυχθούν οι μικροοργανισμοί και παρέχουν οξυγόνο σε περιοχές γύρω από τα ριζώματά τους για την ενίσχυση των αερόβιων συνθηκών που είναι απαραίτητες για την βιοαποικοδόμηση του οργανικού φορτίου. Τέλος η διαφορά που παρατηρείται στον P και στον G πιθανώς οφείλεται στο διαφορετικό υλικό πλήρωσης που έχουν. Επειδή το πλαστικό έχει μεγαλύτερο πορώδες οι μικροοργανισμοί έχουν περισσότερη επιφάνεια να προσκολληθούν, υπάρχει καλύτερη κυκλοφορία και μείξη αποβλήτου και οξυγόνου στο υπέδαφος, άρα και καλύτερη κατανομή οξυγόνου και αποβλήτου στους μικροοργανισμούς που βρίσκονται στο υπέδαφος. Τέλος, λόγω υψηλού πορώδες στον P αυξάνεται και ο χρόνος παραμονής του λύματος στην δεξαμενή και έτσι αυξάνεται και η διάρκεια της επαφής του με τους μικροοργανισμούς, ευνοώντας την απομάκρυνση του BOD₅, αφού οι μικροοργανισμοί έχουν αρκετό χρόνο να βιοαποδομήσουν την οργανική ύλη.

4.3.2 Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (COD)

Πίνακας 4.4: Συγκέντρωση COD στις εκροές των τεχνητών υγροβιότοπων G, P, C και ποσοστιαία απομάκρυνσή του.

Υγροβιότοπος	Μέση τιμή και τυπική απόκλιση (mg/L)	Εύρος τιμών (mg/L)	Μέση τιμή και τυπική απόκλιση απομάκρυνσης %	Εύρος τιμών απομάκρυνσης %
IN	402,1 ± 97,1	240 – 582	-	-
G	64,8 ± 34,2	30 – 138	83,5 ± 8,9	55,8 – 93,3
P	33,7 ± 20,8	10 – 94	91,2 ± 6,0	69,9 – 97,8
C	137,6 ± 40,7	65 – 214	64,7 ± 11,0	40,0 – 82,1



Διάγραμμα 4.3: Χρονική μεταβολή συγκεντρώσεων COD κατά την διάρκεια του πειράματος, στις εισροές (In) και εκροές των Υγροβιότοπων G, P, C.

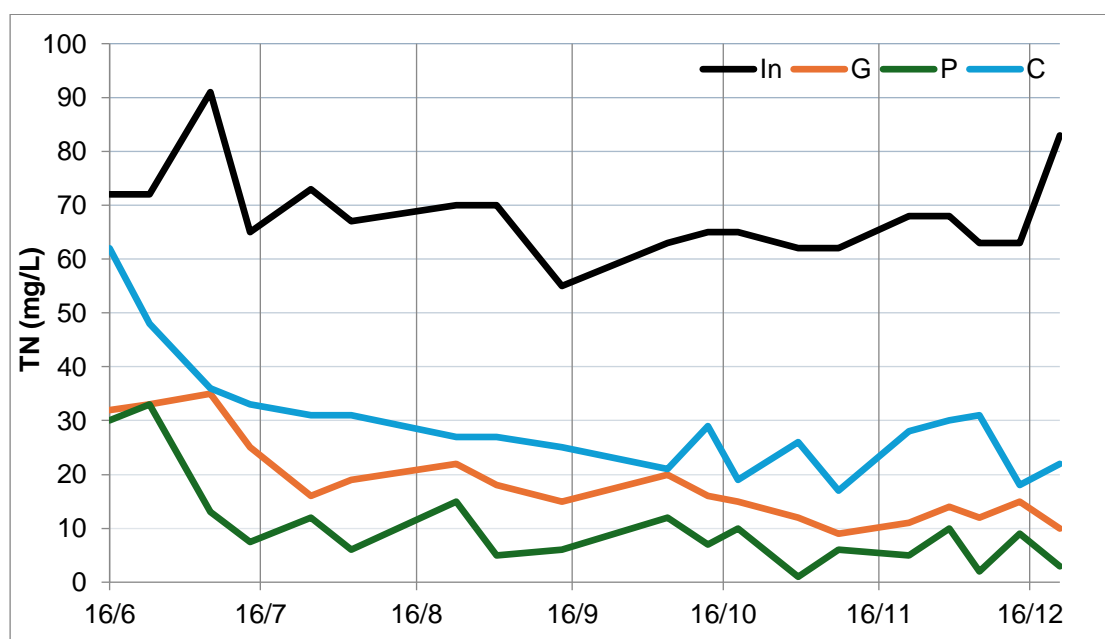
Μελετώντας τον Πίνακα 4.4 και το Διάγραμμα 4.3, παρατηρείται πως στον υγροβιότοπο P έχει επιτευχθεί η μεγαλύτερη ποσοστιαία απομάκρυνση COD με ποσοστό 91,2±6,0 %, μετά στον G με 83,5±8,9 % και τέλος στον C με 64,7±11,0 %.

Το COD προσδιορίζει τόσο το βιοδιασπάσιμο όσο και το μη βιοδιασπάσιμο κλάσμα του οργανικού φορτίου. Έτσι λοιπόν οι απομακρύνσεις στους υγροβιότοπους G, P, C και οι συγκεντρώσεις τους στις εισροές και στις εκροές όσον αφορά το COD πρέπει να είναι ανάλογες με αυτές του BOD₅ όπως και συμβαίνει. Οι παράμετροι που επηρεάζουν τα ποσοστά απομάκρυνσης COD στους υγροβιότοπους G, P, C είναι οι ίδιοι με τους παραμέτρους που προαναφέρθηκαν στο BOD₅.

4.3.3 Ολικό Άζωτο (TN)

Πίνακας 4.5: Συγκέντρωση TN στις εκροές των τεχνητών υγροβιότοπων G, P, C και ποσοστιαία απομάκρυνσή του.

Υγροβιότοπος	Μέση τιμή και τυπική απόκλιση (mg/L)	Εύρος τιμών (mg/L)	Μέση τιμή και τυπική απόκλιση απομάκρυνσης %	Εύρος τιμών απομάκρυνσης %
IN	68,3 ± 8,0	55,0 – 91,0	-	-
G	18,4 ± 7,8	9,0 – 35,0	73,3 ± 9,7	54,2 – 88,0
P	10,1 ± 8,4	1,0 – 33,0	85,4 ± 11,5	54,2 – 98,4
C	29,5 ± 10,6	17,0 – 62,0	56,8 ± 14,1	13,9 – 73,5



Διάγραμμα 4.4: Χρονική μεταβολή συγκεντρώσεων TN κατά την διάρκεια του πειράματος, στις εισροές (In) και εκροές των Υγροβιότοπων G, P, C.

Μελετώντας τον Πίνακα 4.5 και το Διάγραμμα 4.4, παρατηρείται πως στον υγροβιότοπο P έχει επιτευχθεί η μεγαλύτερη ποσοστιαία απομάκρυνση TN με ποσοστό $85,4 \pm 11,5$ %, μετά στον G με $73,3,7 \pm 9,7$ % και τέλος στον C με $56,8 \pm 14,1$ %.

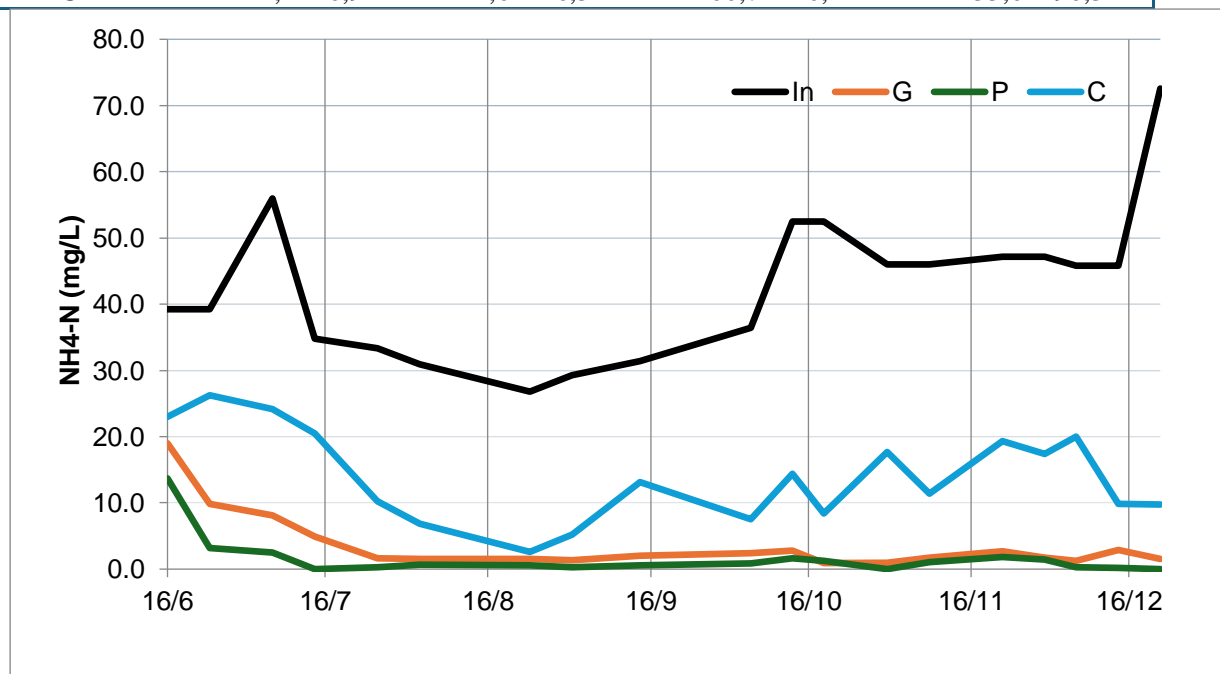
Όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα η ύπαρξη της βλάστησης ευνοεί σημαντικά την απομάκρυνση του ολικού αζώτου γιατί καταρχήν τα φυτά προσλαμβάνουν το άζωτο ως θρεπτικό συστατικό. Δεύτερον οι ρίζες και τα τμήματα του φυτού που είναι εντός της κλίνης, προσφέρουν την απαραίτητη επιφάνεια αλλά και πηγές άνθρακα όταν αποσυντίθενται που είναι προϋποθέσεις απαραίτητες για την ύπαρξη και ανάπτυξη των μικροοργανισμών, που είναι υπεύθυνοι για τις μικροβιολογικές διεργασίες μετατροπής και απομάκρυνσης των διάφορων μορφών αζώτου στα λύματα (Stefanakis, Akratos, & Tsihrintzis, 2014). Έτσι λοιπόν παρατηρείται καλύτερη απομάκρυνση του αζώτου στους υγροβιότοπους G και P που έχουν βλάστηση.

Η ελαφρώς καλύτερη απομάκρυνση που παρατηρείται στον υδροβιότοπο P σε σχέση με τον G πιθανώς να οφείλεται στο διαφορετικό υλικό πλήρωσης. Το υλικό πλήρωσης του P έχει μεγαλύτερο πορώδες άρα εξασφαλίζεται καλύτερη υδραυλική αγωγιμότητα και καλύτερη ανάμειξη οξυγόνου λύματος, άρα και καλύτερη κατανομή οξυγόνου και λύματος στους μικροοργανισμούς που μετατρέπουν και/ή απομακρύνουν το άζωτο. Τέλος, λόγω υψηλού πορώδες στον P αυξάνεται και ο χρόνος παραμονής του λύματος στην δεξαμενή και έτσι αυξάνεται και η διάρκεια της επαφής του με τους μικροοργανισμούς, ευνοώντας την απομάκρυνση του TN, αλλιώς στην αντίθετη περίπτωση που ο χρόνος παραμονής ήταν μικρός δεν θα προλάβαιναν οι μικροοργανισμοί να νιτροποιήσουν την αμμωνία.

4.3.4 Αμμωνιακό Άζωτο ($\text{NH}_4^+\text{-N}$)

Πίνακας 4.6: Συγκέντρωση $\text{NH}_4^+\text{-N}$ στις εκροές των τεχνητών υδροβιότοπων G, P, C και ποσοστιαία απομάκρυνσή του.

Υδροβιότοπος	Μέση τιμή και τυπική απόκλιση (mg/L)	Εύρος τιμών (mg/L)	Μέση τιμή και τυπική απόκλιση απομάκρυνσης %	Εύρος τιμών απομάκρυνσης %
IN	42,8 ± 11,2	26,8 – 72,6	-	-
G	3,6 ± 4,4	0,9 – 19	91,1 ± 11,1	51,5 – 98,3
P	1,6 ± 3,1	0,0 – 13,7	96,1 ± 7,8	65,1 – 100
C	14,1 ± 6,9	2,6 – 26,3	66,7 ± 16,4	33,0 – 90,3



Διάγραμμα 4.5: Χρονική μεταβολή συγκεντρώσεων $\text{NH}_4^+\text{-N}$ κατά την διάρκεια του πειράματος, στις εισροές (In) και εκροές των Υδροβιότοπων G, P, C.

Μελετώντας τον Πίνακα 4.6 και το Διάγραμμα 4.5, παρατηρείται πως στον υδροβιότοπο P έχει επιτευχθεί η μεγαλύτερη ποσοστιαία απομάκρυνση $\text{NH}_4^+\text{-N}$ με ποσοστό 96,1±7,8 %, μετά στον G με 91,1±11,1 % και τέλος στον C με 66,7±16,4 %.

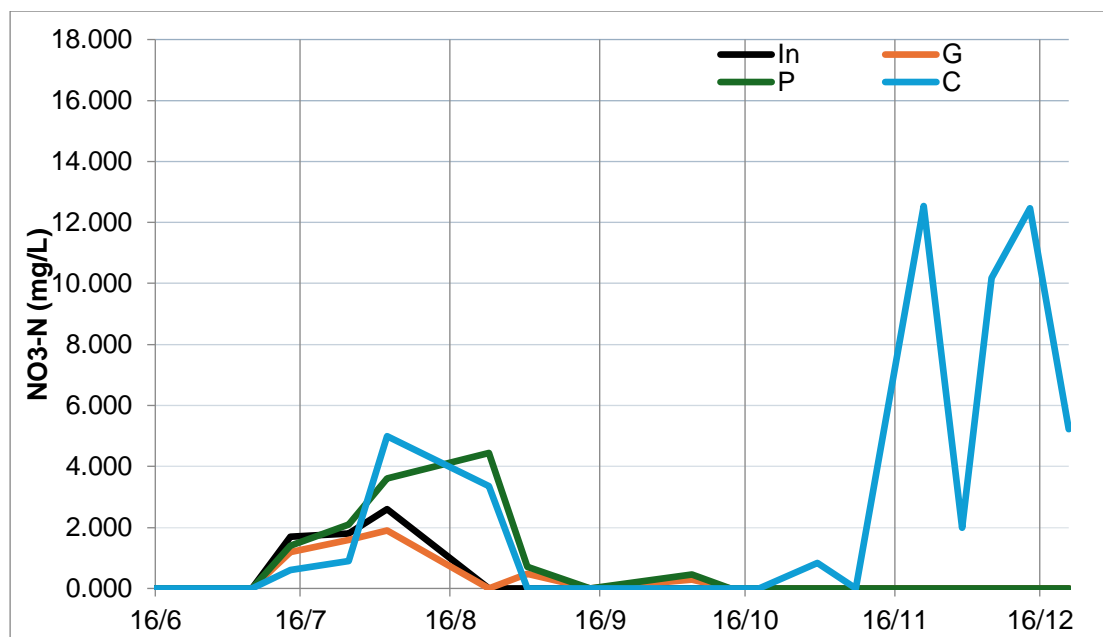
Το αμμωνιακό άζωτο ή αμμώνιο ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) προσλαμβάνεται από τα φυτά και τους μικροοργανισμούς ως θρεπτικό στοιχείο για αυτό παρατηρείται μεγαλύτερη απομάκρυνση στους υγροβιότοπους G και P που έχουν βλάστηση. Επίσης μετατρέπεται σε νιτρικά (NO_3^-) και διοξείδιο του αζώτου (NO_2^-) από μικροοργανισμούς με νιτροποίηση, η οποία είναι αερόβια διεργασία και απαιτεί οξυγόνο. Το NO_2^- με την σειρά του αντιδράει με το $\text{NH}_4^+\text{-N}$ με τον μηχανισμό που είναι γνωστός ως ANAMMOX (ANAerobic AMMonium OXidation) ή Αναερόβια Οξείδωση Αμμωνίας, η οποία είναι μια αναερόβια μικροβιολογική διεργασία που απαιτεί λιγότερο άνθρακα και πηγές ενέργειας και συμβαίνει σε περιοχές της κλίνης όπως ο πυθμένας που δεν υπάρχει διαθέσιμο οξυγόνο (Stefanakis, Akrotos, & Tsihrintzis, 2014).

Η ελαφρώς καλύτερη απομάκρυνση που γίνεται στον υγροβιότοπο P σε σχέση με τον G, πιθανώς να οφείλεται στο γεγονός πως το υλικό πλήρωσης του P έχει μεγαλύτερο πορώδες, εξασφαλίζοντας έτσι καλύτερη υδραυλική αγωγιμότητα εντός της κλίνης του, άρα και καλύτερη ανάμειξη οξυγόνου και λύματος και καλύτερη κατανομή τους στους μικροοργανισμούς που πραγματοποιούν την νιτροποίηση. Τέλος, λόγω υψηλού πορώδους στον P αυξάνεται και ο χρόνος παραμονής του λύματος στην δεξαμενή και έτσι αυξάνεται και η διάρκεια της επαφής του με τους μικροοργανισμούς, ευνοώντας την απομάκρυνση του TN, αλλιώς στην αντίθετη περίπτωση που ο χρόνος παραμονής ήταν μικρός δεν θα προλάβαιναν οι μικροοργανισμοί να νιτροποιήσουν την αμμωνία.

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

Πίνακας 4.7: Συγκέντρωση $\text{NO}_3^-\text{-N}$ στις εκροές των τεχνητών υγροβιότοπων G, P, C και ποσοστιαία απομάκρυνσή του.

Υγροβιότοπος	Μέση τιμή και τυπική απόκλιση (mg/L)	Εύρος τιμών (mg/L)	Μέση τιμή και τυπική απόκλιση απομάκρυνσης %	Εύρος τιμών απομάκρυνσης %
IN	$2,0 \pm 0,5$	1,7 – 2,6	-	-
G	$0,3 \pm 0,6$	0,0 – 1,9	-	-
P	$0,8 \pm 1,4$	0,0 – 4,4	-	-
C	$3,3 \pm 4,5$	0,0 – 12,5	-	-



Διάγραμμα 4.6: Χρονική μεταβολή συγκεντρώσεων NO₃⁻-N κατά την διάρκεια του πειράματος, στις εισροές (In) και εκροές των Υγροβιότοπων G, P, C.

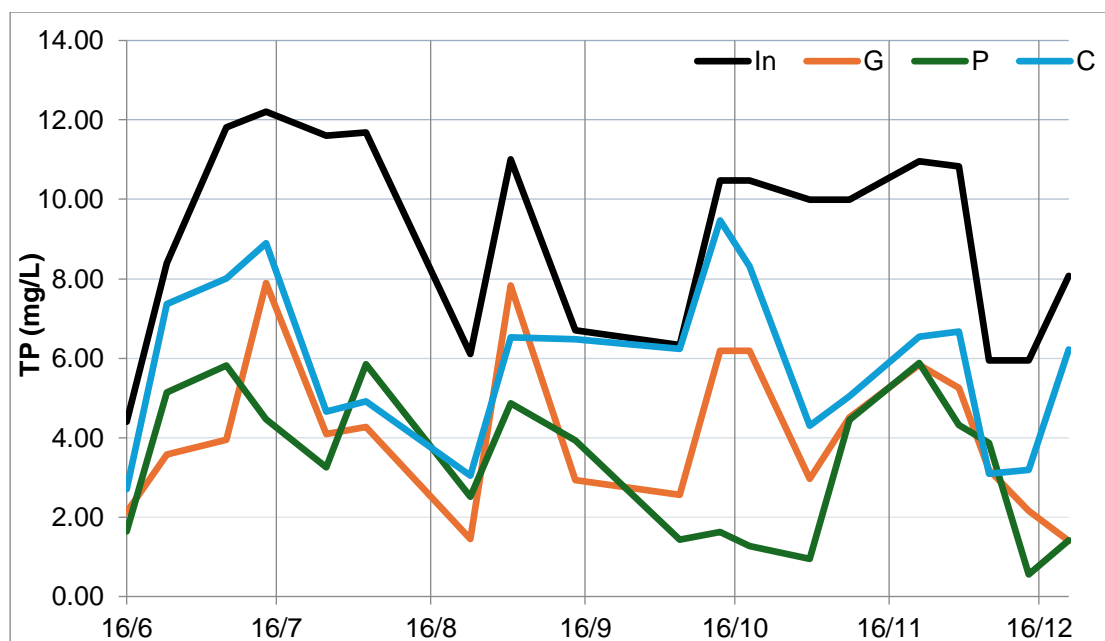
Μελετώντας το Διάγραμμα 4.6 και τον Πίνακα 4.7 παρατηρείται πως οι συγκεντρώσεις NO₃⁻-N είναι πολύ μικρές στην εισροή In και στους υγροβιότοπους G, P, C με εξαίρεση τον μήνα Νοέμβριο και Δεκέμβριο στον υγροβιότοπο C που η συγκέντρωσή του αυξάνεται σημαντικά.

Γενικά στο In δεν υπάρχουν μεγάλες συγκεντρώσεις νιτρικού αζώτου (NO₃⁻-N) και αυτό γιατί το νιτρικό άζωτο δεν υπήρχε στα λύματα της εισροής αλλά είναι προϊόν της νιτροποίησης, που συμβαίνει σε αερόβιες περιοχές εντός της κλίνης των υγροβιότοπων, όπου βακτήρια καταναλώνουν NH₄⁺-N και οξυγόνο και παράγουν NO₃⁻-N. Το NO₃⁻-N που είναι προϊόν της νιτροποίησης προσλαμβάνεται από την βλάστηση και από μικρόβια ως θρεπτικό στοιχείο, για αυτό στους υγροβιότοπους G και P που περιέχουν βλάστηση είναι πολύ χαμηλές οι συγκεντρώσεις του. Στον υγροβιότοπο C που δεν υπάρχει βλάστηση παρατηρούνται πιο υψηλές συγκεντρώσεις NO₃⁻-N.

4.3.6 Ολικός Φώσφορος (TP)

Πίνακας 4.8: Συγκέντρωση TP στις εκροές των τεχνητών υγροβιότοπων G, P, C και ποσοστιαία απομάκρυνσή του.

Υγροβιότοπος	Μέση τιμή και τυπική απόκλιση (mg/L)	Εύρος τιμών (mg/L)	Μέση τιμή και τυπική απόκλιση απομάκρυνσης %	Εύρος τιμών απομάκρυνσης %
IN	9,1 ± 2,5	4,4 – 12,2	-	-
G	4,1 ± 2,0	1,4 – 7,9	55,7 ± 13,9	28,9 – 82,7
P	3,3 ± 1,8	0,6 – 5,9	63,3 ± 18,0	34,9 – 90,6
C	5,9 ± 2,0	2,7 – 9,5	34,6 ± 18,5	1,6 – 59,9



Διάγραμμα 4.7: Χρονική μεταβολή συγκεντρώσεων TP κατά την διάρκεια του πειράματος, στις εισροές (In) και εκροές των Υγροβιότοπων G, P, C.

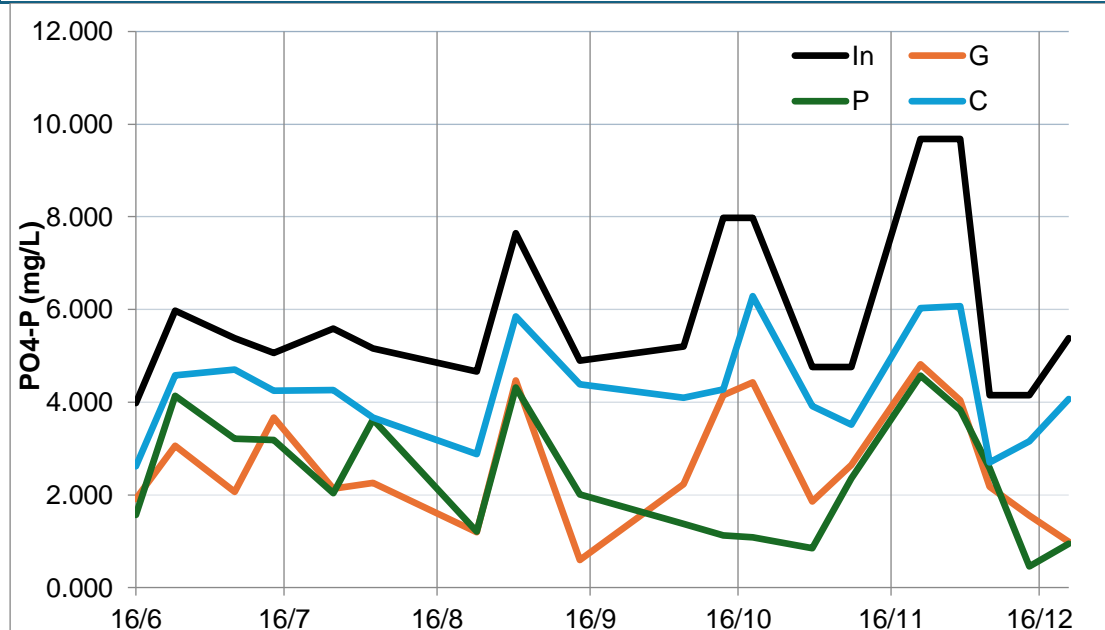
Μελετώντας το Διάγραμμα 4.7 και τον Πίνακα 4.8, παρατηρείται πως στον υγροβιότοπο P έχει επιτευχθεί η μεγαλύτερη ποσοστιαία απομάκρυνση TP με ποσοστό $66,3 \pm 18,0 \%$, μετά στον G με $55,7 \pm 13,9 \%$ και τέλος στον C που δεν υπάρχει βλάστηση $34,6 \pm 18,5 \%$.

Η βλάστηση έχει σπουδαίο ρόλο στην απομάκρυνση του ολικού φωσφόρου όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα, καθώς οι δύο υγροβιότοποι που έχουν βλάστηση έχουν σχεδόν διπλάσια ποσοστιαία απομάκρυνση από τον υγροβιότοπο που δεν έχει. Ένας άλλος κύριος μηχανισμός απομάκρυνσης φωσφόρου στους υγροβιότοπους είναι η προσρόφηση και επιτυγχάνεται καλύτερη απομάκρυνση όταν χρησιμοποιείται υλικό υποστρώματος πλούσιο σε Al, Fe, Ca, Mg όπως είναι και το χαλίκι που χρησιμοποιήθηκε στον υγροβιότοπο G που είναι πλούσιο σε ασβέστιο (Ca). Παρόλα αυτά ο υγροβιότοπος που περιέχει χαλίκι δεν είναι πιο αποτελεσματικός από τον υγροβιότοπο που έχει πλαστικό ως υλικό πλήρωσης, πιθανόν γιατί η επιφάνεια προσρόφησης του χαλικιού έχει κορεστεί από την χρόνια επαφή με τα λύματα. (Stefanakis, Akratos, & Tsihrintzis, 2014).

4.3.7 Φωσφορικά ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)

Πίνακας 4.9: Συγκέντρωση $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ στις εκροές των τεχνητών υγροβιότοπων G, P, C και ποσοστιαία απομάκρυνσή του.

Υγροβιότοπος	Μέση τιμή και τυπική απόκλιση (mg/L)	Εύρος τιμών (mg/L)	Μέση τιμή και τυπική απόκλιση απομάκρυνσης %	Εύρος τιμών απομάκρυνσης %
IN	$5,9 \pm 1,8$	4,0 – 9,7	-	-
G	$2,6 \pm 1,3$	0,6 – 4,8	$56,2 \pm 14,3$	27,4 – 87,9
P	$2,3 \pm 1,3$	0,5 – 4,6	$60,0 \pm 20,0$	29,7 – 89,0
C	$4,3 \pm 1,1$	2,6 – 6,3	$26,4 \pm 9,6$	10,4 – 46,5



Διάγραμμα 4.8: Χρονική μεταβολή συγκεντρώσεων $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ κατά την διάρκεια του πειράματος, στις εισροές (In) και εκροές των Υγροβιότοπων G, P, C.

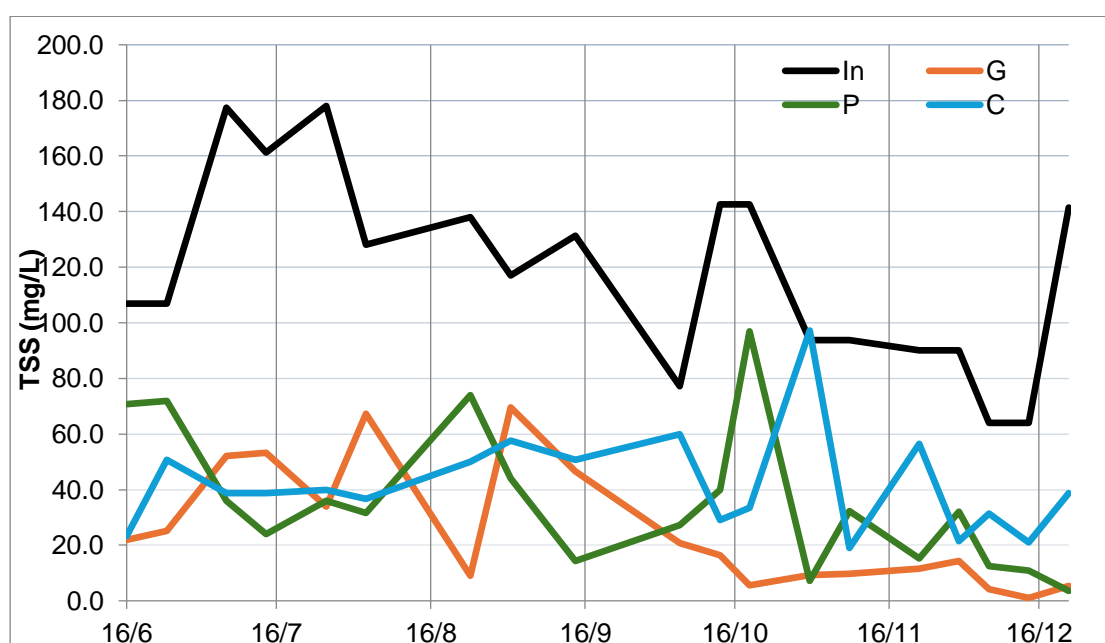
Μελετώντας τον Πίνακα 4.9 και το Διάγραμμα 4.8, παρατηρείται πως στον υγροβιότοπο P έχει επιτευχθεί η μεγαλύτερη ποσοστιαία απομάκρυνση $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ με ποσοστό $60,0 \pm 20,0$ %, μετά στον G με $56,2 \pm 14,3$ % και τέλος στον C που δεν έχει βλάστηση $26,4 \pm 9,6$ %.

Οι απομακρύνσεις $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ είναι ανάλογες των απομακρύνσεων του ολικού φωσφόρου (**Error! Reference source not found.**). Η ερμηνεία για τα αποτελέσματα των απομακρύνσεων του $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ από τους τεχνητούς υγροβιότοπους G, P, C είναι η ίδια με αυτή των απομακρύνσεων του ολικού φωσφόρου. (4.3.6)

4.3.8 Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (TSS)

Πίνακας 4.10: Συγκέντρωση TSS στις εκροές των τεχνητών υδροβιότοπων G, P, C και ποσοστιαία απομάκρυνσή του.

Υδροβιότοπος	Μέση τιμή και τυπική απόκλιση (mg/L)	Εύρος τιμών (mg/L)	Μέση τιμή και τυπική απόκλιση απομάκρυνσης %	Εύρος τιμών απομάκρυνσης %
IN	118,1 ± 34,9	64,0 – 178,0	-	-
G	34,9 ± 47,9	1,0 – 210,7	70,7 ± 43,7	0 – 98,4
P	35,9 ± 26,0	3,6 – 96,9	69,3 ± 20,5	30,2 – 97,5
C	41,8 ± 18,5	19,0 – 97,2	61,5 ± 22,4	0 – 79,8



Διάγραμμα 4.9: Χρονική μεταβολή συγκεντρώσεων TSS κατά την διάρκεια του πειράματος, στις εισροές (In) και εκροές των Υδροβιότοπων G, P, C.

Μελετώντας τον Πίνακα 4.10 και το Διάγραμμα 4.9, παρατηρείται πως στον υδροβιότοπο G έχει επιτευχθεί ποσοστιαία απομάκρυνση TSS με ποσοστό $70,7 \pm 43,7$ %, στον P $69,3 \pm 20,5$ % και τέλος στον C $61,5 \pm 22,4$ %.

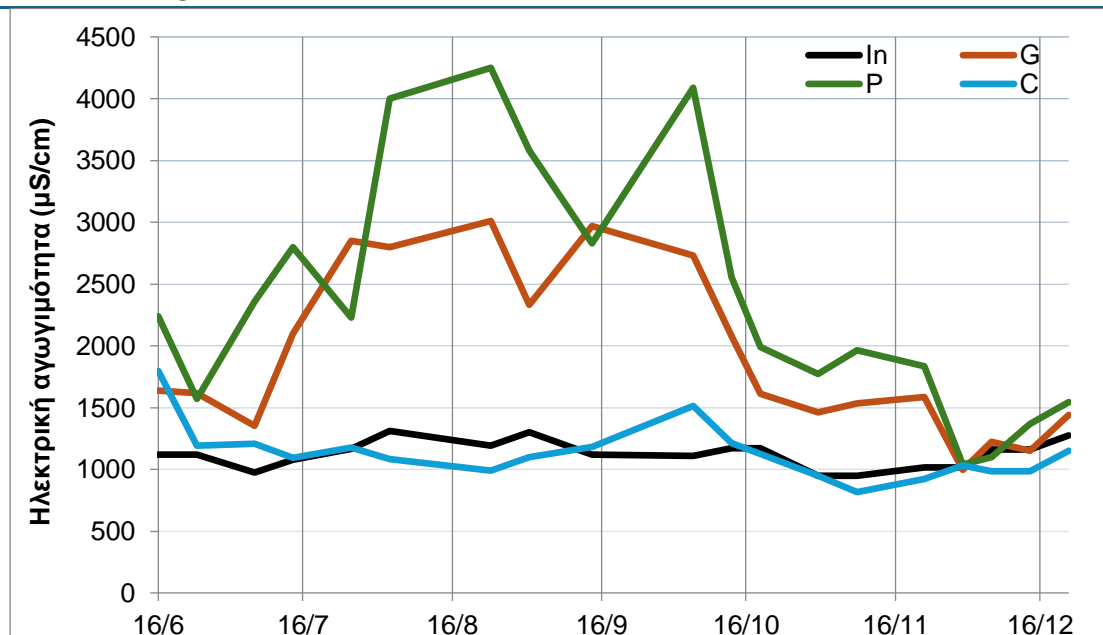
Στους τεχνητούς υδροβιότοπους κατακόρυφης ροής τα αιωρούμενα στερεά απομακρύνονται κυρίως με καθίζηση και φίλτρανση. Καθώς το απόβλητο ρέει κατακόρυφα μέσα από τους πόρους η ταχύτητα ροής του νερού μειώνεται και τα αιωρούμενα στερεά παγιδεύονται στους πόρους (Stefanakis, Akratos, & Tsihrintzis, 2014). Φαίνεται ότι όλοι οι υδροβιότοποι απομακρύνουν σε ικανοποιητικό βαθμό τα TSS. Στους υδροβιότοπους P και C που έχουν υλικό υποστρώματος με υψηλό πορώδες θα αναμενόταν καλύτερη απομάκρυνση TSS, αλλά λόγω κορεσμού του

υποστρώματος από την χρόνια κατακράτηση TSS αυτή η ικανότητά τους πιθανώς εξουδετερώθηκε. Επίσης στους υγροβιότοπους G και P που έχουν βλάστηση παρατηρείται ελαφρώς καλύτερη απομάκρυνση TSS σε σχέση με τον υγροβιότοπο που δεν έχει βλάστηση, γιατί οι ρίζες των φυτών φιλτράρουν το λύμα και δεσμεύουν τα αιωρούμενα στερεά.

4.3.9 Ηλεκτρική Αγωγιμότητα (EC)

Πίνακας 4.11: Ηλεκτρική αγωγιμότητα στις εκροές των τεχνητών υγροβιότοπων G, P, C.

Υγροβιότοπος	Μέση τιμή και τυπική απόκλιση ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Εύρος τιμών ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
IN	1125 ± 109	948 – 1311
G	1920 ± 668	996 – 3010
P	2375 ± 993	1039 – 4250
C	1132 ± 219	816 – 1796



Διάγραμμα 4.10: Χρονική μεταβολή ηλεκτρικής αγωγιμότητας κατά την διάρκεια του πειράματος, στις εισροές (In) και εκροές των Υγροβιότοπων G, P, C.

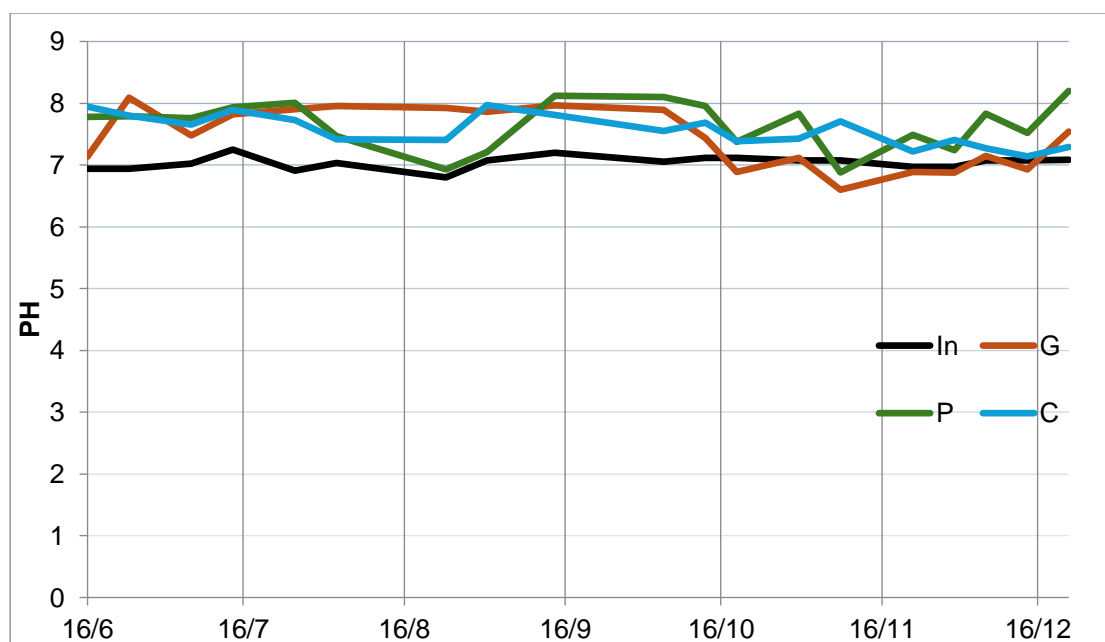
Μελετώντας τον Πίνακα 4.11 και το Διάγραμμα 4.10, παρατηρείται πως η ηλεκτρική αγωγιμότητα στις εισροές είναι 1125 ± 109 ($\mu\text{S}/\text{cm}$) και στον υγροβιότοπο C είναι 1132 ± 219 ($\mu\text{S}/\text{cm}$) οι οποίες είναι παρόμοιες και δεν έχουν υποστεί σημαντικές μεταβολές του In στον C. Αντιθέτως στον G είναι 1920 ± 668 ($\mu\text{S}/\text{cm}$) και στον P είναι 2375 ± 993 ($\mu\text{S}/\text{cm}$), δηλαδή έχει αυξηθεί σημαντικά η υδραυλική αγωγιμότητα.

Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως οι υγροβιότοποι G και P έχουν φυτά τα οποία απελευθερώνουν άλατα, αυξάνοντας έτσι τις συγκεντρώσεις των ολικών διαλυμένων στερεών άρα και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (Stefanakis, Akratos, & Tsihrintzis, 2014). Γενικά η ηλεκτρική αγωγιμότητα χρησιμοποιείται ως ένα αντιπροσωπευτικό μέτρο της συγκέντρωσης των ολικών διαλυμένων στερεών (TDS), γιατί το ηλεκτρικό ρεύμα μεταφέρεται με ιόντα και η αγωγιμότητα αυξάνεται όσο αυξάνεται και η συγκέντρωση των ιόντων. (Metcalf & Eddy, 2018)

4.3.10 Ενεργός Οξύτητα (pH)

Πίνακας 4.12: PH στις εκροές των τεχνητών υγροβιότοπων G, P, C.

Υγροβιότοπος	Μέση τιμή και τυπική απόκλιση	Εύρος τιμών
IN	7,04 ± 0,10	6,80 – 7,25
G	7,45 ± 0,48	6,60 – 8,09
P	7,65 ± 0,39	6,88 – 8,20
C	7,56 ± 0,26	7,14 – 7,97



Διάγραμμα 4.11: Χρονική μεταβολή PH κατά την διάρκεια του πειράματος, στις εισροές (In) και εκροές των Υγροβιότοπων G, P, C.

Μελετώντας τον Πίνακα 4.12 και το Διάγραμμα 4.11, παρατηρείται πως η ενεργός οξύτητα στις εισροές είναι $7,04 \pm 0,10$, στον υγροβιότοπο G είναι $7,45 \pm 0,48$, στον P είναι $7,65 \pm 0,39$ και τέλος στον C είναι $7,56 \pm 0,26$ και δεν έχουν γίνει σημαντικές μεταβολές σε αυτό σε κανέναν υγροβιότοπο.

Διαπιστώνεται ότι το pH είχε θετική επίδραση στην απομάκρυνση οργανικού φορτίου και αζώτου και δεν επηρέασε αρνητικά την απομάκρυνση φωσφόρου. Για την απομάκρυνση του άνθρακα οι τιμές pH που κυμαίνονται από 6,0 έως 9,0 είναι

ανεκτές, ενώ η βέλτιστη απόδοση συμβαίνει σε ένα ουδέτερο pH. Η νιτροποίηση είναι ευαίσθητη στο pH και οι ρυθμοί μειώνονται σημαντικά σε τιμές pH χαμηλότερες από 6,8. Βέλτιστοι ρυθμοί νιτροποίησης συμβαίνουν σε τιμές pH που κυμαίνονται από 7,5 έως 8,0. Τέλος όσον αφορά την απομάκρυνση φωσφόρου σε τιμές pH κάτω από 6,5, η απόδοση απομάκρυνσης φωσφόρου μειώνεται σημαντικά. (Metcalf & Eddy, 2018).

5 Συμπεράσματα και Προτάσεις

5.1 Απόδοση Των Πιλοτικών Μονάδων G , P , C

Πίνακας 5.1: Μέσες απομακρύνσεις % από τις πιλοτικές μονάδες G , P , C και από παγκόσμια πειραματικά δεδομένα

	Μέση Απομάκρυνση %			
	G	P	C	Παγκόσμια Πειραματικά Δεδομένα
BOD₅	86,7	94,2	69,2	87,9
COD	83,5	91,2	64,7	78,6
TSS	70,7	69,3	61,5	77,1
TP	55,7	63,3	34,6	48,3
TN	73,3	85,4	56,8	44
NH₄-N	91,1	96,1	66,7	78,9
NO₃-N	-	-	-	-

Αυτό που παρατηρείται μελετώντας τον Πίνακα 5.1 είναι πως όλες οι μέσες απομακρύνσεις στις πιλοτικές μονάδες G και P που έχουν βλάστηση εκτός TSS είναι πιο υψηλές από τα Παγκόσμια Πειραματικά Δεδομένα . Αυτό οφείλεται στον τεχνητό αερισμό που έχει ενισχύσει τις αερόβιες διεργασίες απομάκρυνσης ρύπων (BOD₅, COD, TN , NH₄ -N). Ακόμα, στον Υγροβιότοπο C που δεν υπάρχει βλάστηση η μέση απομάκρυνση % TN είναι υψηλότερη από τα παγκόσμια πειραματικά δεδομένα.

5.2 Δυνατότητα Απόρριψης ή Επαναχρησιμοποίησης των Εκροών των Τεχνητών Υγροβιότοπων για Άρδευση

Για να απορριφθούν τα επεξεργασμένα αστικά λύματα σύμφωνα με την οδηγία [91/271/ΕΟΚ\(ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1, Πίνακας 1 και Πίνακας 2\)](#) πρέπει οι συγκεντρώσεις του BOD₅ < 25 mg/l , COD < 125 mg/l , TP < 2 mg/l , TN <15 mg/l και τέλος για TSS η απαίτηση είναι προαιρετική και πρέπει η συγκέντρωση TSS< 35 mg/l.

Για να επαναχρησιμοποιηθούν τα επεξεργασμένα λύματα για άρδευση σύμφωνα με τον [Κανονισμό \(ΕΕ\) 2020/741, Παράρτημα Ι, Πίνακας 2](#) πρέπει οι συγκεντρώσεις του $BOD_5 < 10\text{mg/l}$ για την κατηγορία άρδευσης Α και $BOD_5 < 25\text{mg/L}$ για τις κατηγορίες άρδευσης Β, Γ, Δ. Το $TSS < 10\text{mg/L}$ για την κατηγορία Α και για τις κατηγορίες Β,Γ,Δ προαιρετικά πρέπει $TSS < 35\text{mg/L}$. Ο κανονισμός ορίζει επίσης και την *Θολότητα*, το *E. coli*, τη *Legionella* spp. και τα εντερικά νηματώδη αλλά κατά τις εργαστηριακές μετρήσεις που έγιναν στα επεξεργασμένα λύματα δεν υπολογίστηκαν αυτές οι παράμετροι γι αυτό και εξαιρέθηκαν. Όσον αφορά τις συγκεντρώσεις του Ολικού Φωσφόρου και του Ολικού Αζώτου στα επεξεργασμένα λύματα, ο κανονισμός δεν ορίζει τα όρια, αλλά αναφέρει ότι πρέπει να γίνει αξιολόγηση κινδύνου, για τις επιπτώσεις που ενδέχεται να προκληθούν στο περιβάλλον, στα οικοσυστήματα και στην δημόσια υγεία.

Πίνακας 5.2: Μέσες Εργαστηριακές μετρήσεις των εκροών των Υδροβιότοπων G, P, C και έλεγχος Απόρριψης .

Υδροβιότοπος	BOD_5 (mg/l)	COD (mg/l)	TSS (mg/l)	Ολικός Φώσφορος (mg/l)	Ολικό Αζώτο (mg/l)
G	43,7	64,8	34,9	4,1	18,4
P	19,3	33,7	35,9	3,3	10,1
C	99,3	137,6	41,8	5,9	29,5

Στην πιλοτική **μονάδα G** μόνο το COD και το TSS είναι εντός των ορίων που ορίζει η νομοθεσία για απόρριψη ή επαναχρησιμοποίηση για άρδευση για τις κατηγορίες Β, Γ, Δ. Στην πιλοτική **μονάδα P** όλα τα ποιοτικά χαρακτηριστικά είναι εντός ορίων εκτός από τον Ολικό Φώσφορο (TP) όσον αφορά την απόρριψη και όσον αφορά την επαναχρησιμοποίηση για άρδευση όλα τα ποιοτικά χαρακτηριστικά είναι εντός ορίων για τις κατηγορίες Β, Γ, Δ. Τέλος στην πιλοτική **μονάδα C** κανένα από τα ποιοτικά χαρακτηριστικά δεν είναι εντός των ορίων που ορίζει η νομοθεσία.

5.3 Επίδραση του υλικού πλήρωσης

Τα υλικά πλήρωσης και στις δύο περιπτώσεις που υπήρχε βλάστηση την υποστήριξαν θετικά και δεν δημιούργησαν προβλήματα στην ανάπτυξη της. Επίσης η επιφάνειά τους είχε θετική επίδραση στην ανάπτυξη βιοφίλμ. Συγκρίνοντας τους υδροβιότοπους G και P που είχαν ίδια βλάστηση αλλά διαφορετικό υλικό πλήρωσης, προκύπτει το συμπέρασμα πως τελικά τα χαρακτηριστικά του υλικού πλήρωσης, επηρεάζουν την απόδοση του τεχνητού υδροβιότοπου όσον αφορά την απομάκρυνση των ρύπων. Έτσι λοιπόν στον υδροβιότοπο P που περιείχε πλαστικό HDPE ως υλικό πλήρωσης

επιτεύχθηκε καλύτερη απομάκρυνση οργανικού φορτίου (BOD_5 , COD ,) και αζώτου (TN , NH_4^+-N). Αυτό οφείλεται στο μεγαλύτερο πορώδες του πλαστικού υλικού πλήρωσης σε σχέση με του χαλικιού, επιτρέποντας έτσι μεγαλύτερη επιφάνεια για να προσκολληθούν οι μικροοργανισμοί, καλύτερη υδραυλική αγωγιμότητα άρα και καλύτερη κατανομή αέρα και αποβλήτου στους μικροοργανισμούς που είναι υπεύθυνοι για την απομάκρυνση των ρύπων. Επίσης, λόγω υψηλού πορώδους του ανακυκλωμένου HDPE, αυξάνεται και ο χρόνος παραμονής του λύματος στην δεξαμενή και έτσι αυξάνεται και η διάρκεια της επαφής του με τους μικροοργανισμούς, ευνοώντας και την απόδοση του συστήματος. Το χαλίκι επειδή είναι πλούσιο σε Ca αναμενόταν να είναι πιο αποτελεσματικό όσον αφορά την απομάκρυνση φωσφόρου μέσω προσρόφησης, αλλά λόγω κορεσμού της επιφάνειας του χαλικιού από την χρόνια επαφή με λύματα, αυτό το πλεονέκτημά του εξουδετερώθηκε.

5.4 Επίδραση της βλάστησης

Η βλάστηση στους τεχνητούς υδροβιότοπους επηρέασε θετικά την απομάκρυνση οργανικού φορτίου (BOD_5 , COD), φωσφόρου (TP , $PO_4^{3-}-P$) και αζώτου (TN , NH_4^+-N , NO_3^--N) όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα του πειράματος, συγκρίνοντας τους υδροβιότοπους G και P που είχαν βλάστηση με τον C που δεν είχε. Καταρχήν δέσμευσαν άνθρακα, φώσφορο και άζωτο από τα λύματα, στοιχεία που είναι απαραίτητα για την βιολογική ανάπτυξή τους. Επίσης δημιούργησαν ιδανικές συνθήκες για την ανάπτυξη των μικροοργανισμών που απομακρύνουν οργανικό φορτίο και άζωτο, αφού μεταφέρουν οξυγόνο γύρω από τα ριζώματά τους και παρέχουν την απαραίτητη επιφάνεια για να προσκολληθούν.

5.5 Επίδραση του τεχνητού αερισμού

Ο τεχνητός αερισμός είχε ως αποτέλεσμα την ενίσχυση της παρουσίας οξυγόνου στους υδροβιότοπους G, P, C ενισχύοντας έτσι την απομάκρυνση ολικού αζώτου και αμμωνίας μέσω νιτροποίησης αλλά και την βιοδιάσπαση οργανικής ύλης (BOD_5 , COD) από τους αερόβιους μικροοργανισμούς. Έτσι λοιπόν η απόδοση των πιλοτικών μονάδων όσον αφορά στην % απομάκρυνση BOD_5 , COD , TN , NH_4-N βελτιώθηκε σημαντικά με τον τεχνητό αερισμό.

5.6 Επίδραση των κλιματολογικών συνθηκών

Μελετώντας τον Πίνακα 3.2 και τα αποτελέσματα των μετρήσεων βγήκαν τα εξής συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση των κλιματολογικών συνθηκών. Η βροχόπτωση δεν επηρέασε ιδιαίτερα το πείραμα και την απομάκρυνση ρύπων στους υδροβιότοπους γιατί δεν υπήρξαν ακραίες βροχοπτώσεις ώστε να αλλοιώσουν τις συγκεντρώσεις των ρύπων στους υδροβιότοπους και κατ' επέκταση τα ποιοτικά χαρακτηριστικά τους.

Η θερμοκρασία δεν είχε επίδραση στις διεργασίες απομάκρυνσης ρύπων που έλαβαν χώρα στο πείραμα, με εξαίρεση την απώλεια νερού μέσω εξατμισοδιαπνοής που ήταν μεγαλύτερη τους θερμούς μήνες και αυτό οφείλεται στο γεγονός πως σε χαμηλές θερμοκρασίες η διαπνοή των φυτών περιορίζεται. Ήταν αναμενόμενο με βάση τις μηνιαίες μέσες θερμοκρασίες που επικρατούσαν κατά την διάρκεια του πειράματος να μην επηρεάσει την απομάκρυνση θρεπτικών (φώσφορο και άζωτο) και οργανικού φορτίου (BOD₅, COD). Αυτό γιατί το εύρος των μέσων μηνιαίων θερμοκρασιών ήταν από 14,6°C έως 25,6°C δηλαδή στο όριο των 15°C όπου πάνω από αυτό τα βακτήρια που καταναλώνουν άζωτο καθώς και τα φυτά λειτουργούν πιο αποτελεσματικά (Στεφανάκης, 2011). Τέλος οι μικροοργανισμοί που απομακρύνουν οργανικό υλικό επιβιώνουν σε θερμοκρασίες έως και 5°C και ο υγροβιότοπος έχει την ικανότητα να μονώνει την θερμοκρασία εντός της κλίνης και να το διατηρεί 2-3 βαθμούς κελσίου θερμότερο από το περιβάλλον. (Άκρατος, 2006)

5.7 Προτάσεις

Παρακάτω παρατίθενται προτάσεις για την βελτίωση του συστήματος όσον αφορά την απομάκρυνση ρύπων:

- Κλάδεμα φυτών για την απομάκρυνση βιομάζας που έχει συσσωρεύσει ρύπους και για να βελτιωθεί η οξυγόνωση της ριζόσφαιρας.
- Να χρησιμοποιηθούν δύο ή και περισσότερα διαφορετικά υλικά υποστρώματος σε έναν υγροβιότοπο. Θεωρητικά μπορούν να αξιοποιηθούν τα πλεονεκτήματα των διαφορετικών υλικών πλήρωσης με τον κατάλληλο σχεδιασμό, ενισχύοντας έτσι την θετική επίδραση που έχει το υπόστρωμα στην απομάκρυνση ρύπων.
- Συνδυασμός του Υγροβιότοπου Κατακόρυφης Ροής με Υγροβιότοπο Οριζόντιας Ροής. Στον Υγροβιότοπο Οριζόντιας Ροής μπορεί να επιτευχθεί περαιτέρω απομάκρυνση αζώτου με απονιτροποίηση.

6 Βιβλιογραφία

- Ramsar Convention Secretariat. (2016). The Ramsar Convention Manual: A Guide to the Convention on Wetlands. Ramsar Secretariat.
- Almuktar, S. A., Abed, S. N., & Scholz, M. (2018, 29 June). Wetlands for wastewater treatment and subsequent recycling of treated effluent: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, σσ. Volume 25, pages 23595–23623.
- Asano, T., & Levine, A. D. (1996). Wastewater Reclamation, recycling and reuse: Past, present and future. Στο *Water Science and Technology* (σσ. 33(10-11), 1-14). IWA Publishing.
- Boutin, C. (1987). Domestic wastewater treatment in tanks planted with rooted macrophytes: case study, description of the system, design criteria, and efficiency. *Wat. Sci. Tech*, 19, 29-40.
- Burka, U., & Lawrence, P. (1990). A New Community Approach to Wastewater treatment with Higher Water Plants. Στο P. F. Cooper, & B. C. Findlater, *Constructed Wetlands in Water Pollution Control* (σσ. 359-371). Oxford, UK: Pergamon Press.
- Cooper, P. (1999). *A review of the design and performance of certical-flow and hybrid reed bed treatment systems*. *Water Science Technology*, 40: 1-9.
- Cooper, P. F., & Jones, A. W. (1990). *Design of Municipal Wastewater Treatment Plants (4th ed.)*. Alexandria, Virginia, USA : Water Enviroment Federation.
- Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., & Grasso, M. e. (1997, May 15). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387, σσ. 253-260.
- Crites, R., & Tchobanoglous, G. (1998). *Small and Decentralized Wastewater Management Systems*. McGraw-Hill.
- Decezaró, S. T., Wolff, D. B., Pelissari, C., Ramírez, R. J., Formentini, T. A., Goerck, J., . . . Sezerino, P. H. (2019, June 10). Influence of hydraulic loading rate and recirculation on oxygen transfer in a vertical flow constructed wetland. *Science of The Total Environment*, Volume 668, σσ. 988-995.

- deyach. (n.d.). Ανάκτηση από <https://deyach.gr/viologikos/plirofories/>
- Du, X., Xu, Z., Li, J., & Zheng, L. (2014, December). Characterization and removal of dissolved organic matter in a vertical flow constructed wetland. *Ecological Engineering* , Volume 73, σσ. 610-615.
- EPA. (1988, September). *Design Manual - Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Wastewater Treatment*. Cincinnati, Ohio: Office of Research and Development, Center of Environmental Research Information.
- EPA, U. (1981a). *Process Design Manual for Land Treatment of Municipal Wastewater*. Cincinnati.
- EPA., U. (1983). *Design Mannual on Municipal Wastewater Stabilization Ponds*. Cincinnati.
- Fan, J., Zhang, B., Zhang, J., Ngo, H. H., Guo, W., Liu, F., . . . Wu, H. (2013, August). Intermittent aeration strategy to enhance organics and nitrogen removal in subsurface flow constructed wetlands. *Bioresource Technology* , Volume 141, σσ. 117-122.
- Finlayson, C. M., & Van Der Valk, A. G. (2016). *The Wetland Book: I: Structure and Function, Management and Methods*. Springer.
- Gasiunas, V. (2011). OXYGEN TRANSFER RATE AND BOD REMOVAL EFFICIENCY OF CONSTRUCTED. *Environmental Engineering, The 8th International Conference , May 19–20 2011*. Vilnius, Lithuania: Vilnius Gediminas Technical University, 2011.
- Global Wetland Technology*. (n.d.). Ανάκτηση από <https://www.globalwettech.com/about-constructed-wetlands.html>
- Hammer, D. A. (1989). *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*. LEWIS PUBLISHER.
- Hu, Y., Zhao, Y., Zhao, X., & Kumar, J. L. (2012, March 16). High Rate Nitrogen Removal in an Alum Sludge-Based Intermittent Aeration Constructed Wetland. *Environmental Science & Technology*, Vol 46, Issue 8.
- Kadlec, R. H., & Knight, R. L. (1996). *Treatment Wetlands*. Lewis Publishers, CRC Press.
- Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). *Treatment Wetlands 2nd Edition*. USA: CRC Press.
- Lu, J., Guo, Z., Kang, Y., Fan, J., & Zhang, J. (2020, December 1). Recent advances in the enhanced nitrogen removal by oxygen-increasing technology in constructed wetlands. *Ecotoxicology and Environmental*

Safety , Volume 205, σ. Ecotoxicology and Environmental Safety 205 (2020) 111330.

- Luis, A., Lorena, E.-G. A., Amaya, L., & Iñaki, T. (2021, September 15). Unplanted wetland-type filter for co-treatment of landfill leachate and septic tank wastewater: Analysing gravel replacement by plastic and passive (filling-emptied) aeration effects at pilot scale. *Journal of Environmental Management*, Volume 294.
- Mara, D. (1998). Waste Stabilization ponds and wastewaters storage and treatments reservoirs . Στο T. Asano, *Wastewater Reclamation and Reuse* (σσ. 141-158). U.S.A: Technomic Pubs Comp.
- Metcalf, & Eddy. (1979). *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse 2nd Ed.* New York: McGraw-Hill.
- Metcalf, & Eddy. (1991). *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse. 3rd Edition.* New York: Mc-Graw-Hill.
- Metcalf, & Eddy. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse.* McGraw-Hill.
- Metcalf, & Eddy. (2018). *ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ : Επεξεργασία και Επαναχρησιμοποίηση , 4η έκδοση.* ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ.
- Meteo. (n.d.). Ανάκτηση από <https://www.meteo.gr/>
- Mitsch, W. J., & Gosselink, J. G. (2015). *Wetlands.* Wiley.
- Nivala, J., Wallace, S., Headley, T., Kassa, K., Brix, H., van Afferden, M., & Muller, R. (2013, December). Oxygen transfer and consumption in subsurface flow treatment wetlands. *Ecological Engineering*, σσ. 544-554 , Volume 61, part B.
- Papadopoulos, F., Papadopoulos, A., Parisopoulos, G., Zdragas, A., & Metaxa, I. (2007). *The treatment of septage using stabilization ponds.* *Fresenius Environmental Bulletin*, 16:385-392.
- QDNR (Queensland Department of Natural Resources). (2000). *Guidelines for Using Freewater Surface Constructed Wetlands to Treat Municipal Sewage.* Brisbane, Australia: QDNR.
- Rahman, M. E., Halmi, M. I., Samad, M. Y., Uddin, M. K., Mahmud, K., Shukor, M. Y., . . . Shamsuzzaman, S. M. (2020, November 11). Review: Design, Operation and Optimization of Constructed Wetland for Removal of Pollutant. *International Journal of Environmental Research and Public Health*.
- Reed, S. C., Middlebrooks, E. J., & Crites, R. W. (1988). *Natural Systems for Waste Management and Treatment.* New York: McGraw-Hill.

- Register, F. (1994). *Changes in hydric soils of the United States*. Vol. 59, no. 133, page 35,680. Washington, DC: U.S. Gov. Print. Office.
- Revitt, D. M., Shutes, R. E., Jones, R. H., Forshaw, M., & Winter, B. (2004, 334-335). The performance of vegetative treatment systems for highway runoff during dry and wet conditions. *Sci. Tot. Environ.*, 261-270.
- Robert H. Kadlec, R. L. (1996). *TREATMENT WETLANDS*. Gainesville, Florida: LEWIS PUBLISHERS.
- Seidel, K. (1965). Neue Wege zur Grundwasseranreicherung in Krefeld, Vol. II. Hydrobotanische Reinigungsmethode. *GWF Wasser/Abwasser*, 30 , 831-833.
- SEPA. (n.d.). *Scottish Environment Protection Agency*. Ανάκτηση από <https://www.sepa.org.uk/regulations/water/diffuse-pollution/>
- Sherwood C. Reed, R. W. (1995). *Natural Systems for Waste Management and Treatment*, Second Edition. Στο R. W. Sherwood C. Reed, *Natural Systems for Waste Management and Treatment, Second Edition*. McGRAW-HILL.
- Stefanakis, A. I. (2018). *Constructed Wetlands for Industrial Wastewater Treatment (Challenges in Water Management Series) 1st Edition*. Wiley-Blackwell.
- Stefanakis, A. I., Akratos, C. S., & Tsihrintzis, V. A. (2014). *Vertical Flow Constructed Wetlands: eco-engineering systems for wastewater and sludge treatment*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Publishing.
- Stowell, R., Rudwing, R., Colt, J., & Chadwick, G. (1981). *Concepts in Aquatic Treatment System Design*.
- Tanner, C. C. (1996). Plants for constructed wetlands treatment systems - A comparisson of the growth and nutrient uptake of eight emergent species. *Ecological Engineering*, 7: 59-83.
- The Nature Conservancy*. (n.d.). Ανάκτηση από nature.org
- Thomas, R. E. (1974). *Feasibility of Overland Flow for Treatment of Raw Domestic Wastewater*. Ada, Oklahoma .
- Tsihrintzis, V. A. (2017). The use of Vertical Flow Constructed Wetlands. *Water Resources Management* ,31, σσ. 3245–3270.
- United States Environmental Protection Agency, Office of Research and Development. (2000, September). Manual. Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters. *EPA/625/R-99/010*. Cincinatti, Ohio, USA.

- Vandana, P., Dipika, J., & Kanchan, K. (2021). Materials in constructed wetlands for wastewater remediation: A review. *Water*, Volume 93, Issue 12, σσ. 2853-2872.
- Veatch Jr, N. T. (1938). "Chapter XVI The Use of Sewage Effluents in Agriculture", in L. Pearse, ed., *Modern Sewage Disposal*, Federation of Sewage Works Associations . New York.
- Vymazal, J. (2005). Constructed wetlands with horizontal sub-surface flow and hybrid systems for. *Ecological Engineering*, 478-490.
- Vymazal, J. (2007). Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of the Total Environment* , Volume 380, σσ. 48-65.
- Vymazal, J. (2010, 8 27). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. *Water ISSN 2073-4441*, σσ. 530-549. Ανάκτηση από Water (ISSN 2073-4441): www.mdpi.com/journal/water
- Vymazal, J., & Kröpfelová, L. (2008). *Wastewater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow*. Dordrecht, The Netherlands: Springer.
- Vymazal, J., Greenway, M., Tonderski, K., Brix, H., & Mander, Ü. (2006). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. Στο J. A. Verhoeven, B. Beltman, R. Bobbink, & D. F. Whigham, *Wetlands and Natural Resource Management; Ecological Studies* (σσ. Volume 190, pp. 69-94). Berlin, Germany: Springer Verlag.
- Wang, H., Xu, J., Sheng, L., & Liu, X. (2018, 2 21). A review of research on substrate materials for constructed wetlands. *Material Science Forum* , Vol. 913, σσ. 917-929.
- Water Environment Federation. (2001). *Natural Systems for Wastewater Treatment , 2nd Edition*. USA: Water Environment Federation.
- Wu, H., Fan, J., Zhang, J., Huu, H. N., Guo, W., Hu, Z., & Lv, J. (2016, September). Optimization of organics and nitrogen removal in intermittently aerated vertical flow constructed wetlands: Effects of aeration time and aeration rate. *International Biodeterioration & Biodegradation* , Vol 113, σσ. 139-145.
- Wu, S. K. (2015). Development of constructed wetlands in performance intensifications for wastewater treatment: A nitrogen and organic matter targeted review. Στο *WATER RESEARCH* (σσ. Volume 57 , 40-55). ELSEVIER.
- Αγγελάκης, Α. Ν. (1989). *Φυσικά Συστήματα Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων*. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης.

- Αγγελάκης, Α. Ν., & Tchobanoglous, G. (1995). *ΥΓΡΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ. Φυσικά Συστήματα Επεξεργασίας και Ανάκτηση, Επαναχρησιμοποίηση και Διάθεση Εκροών*. ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ: ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΚΡΗΤΗΣ.
- Άκρατος, Χ. (2006). Διδακτορική Διατριβή: Βελτιστοποίηση παραμέτρων σχεδιασμού τεχνητών υδροβιότοπων υπόγειας ροής με χρήση πιλοτικών μονάδων. Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης (ΔΠΘ).
- Αντωνόπουλος, Β. Ζ. (2019). *Περιβαλλοντική Υδρολογία Λιμνών και Υγροτόπων*. Θεσσαλονίκη: Κάλλιπος .
- ΕΛΙΝΥΑΕ. (n.d.). Ανάκτηση από <https://www.elinyae.gr/>: https://www.elinyae.gr/sites/default/files/2019-07/b192_1997.1127370202432.pdf
- Κέντρο Εκπαιδευτικής Έρευνας. (n.d.). Ανάκτηση από http://www.kee.gr/perivallontiki/teacher8_3.html
- Κουτσογιάννης, Δ. (2016). *Σχεδιασμός Αστικών Δικτύων Αποχέτευσης , Έκδοση 5η*. Κάλλιπος Ηλεκτρονικές Εκδόσεις.
- Λυμπεράτος, Γ., & Βαγενάς, Δ. (2011). *Διαχείριση Υγρών Αποβλήτων*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα.
- Παρανυχιανάκης, Ν. (n.d.). *TUC ECLASS*. Ανάκτηση από TUC ECLASS : <https://www.eclass.tuc.gr/modules/document/index.php?course=MHPE R292>
- Σιάτου, Α. (2018). Ενεργειακή Αξιολόγηση Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Υγρών Αστικών Αποβλήτων στην Ελλάδα , Πτυχιακή Εργασία. Χανιά.
- Στεφανάκης, Α. (2011). *Βελτιστοποίηση Παραμέτρων Σχεδιασμού Τεχνητών Υδροβιότοπων Κατακόρυφης Ροής για την Επεξεργασία Αστικών Υγρών Αποβλήτων και Λάσπης με Χρήση Πιλοτικών Μονάδων*. Ξάνθη: Διδακτορική Διατριβή.
- Συλαίος, Γ. (2024). *Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης , Φυσική Ωκεανογραφία , Παρουσίαση διάλεξης*. Ανάκτηση από <https://eclass.duth.gr/modules/document/file.php/TMC147/%CE%A3%CE%B7%CE%BC%CE%B5%CE%B9%CF%8E%CF%83%CE%B5%CE%B9%CF%82%20%CE%98%CE%B5%CF%89%CF%81%CE%AF%CE%B1%CF%82/%CE%9A%CE%95%CE%A6%CE%91%CE%9B%CE%91%CE%99%CE%9F%203.pdf>
- Τερζάκης, Σ. Γ. (2009). *Σύγκριση της απόδοσης εναλλακτικών μεθόδων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων*. Χανιά: Διδακτορική Διατριβή.

ΧΑΛΑΤΣΗ, Μ. Ε. (n.d.). *Τμήμα Μηχανικών Τοπογραφίας και Γεωπληροφορικής, Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος*. Ανάκτηση από <http://topogeo.ihu.gr/>:
<http://topogeo.ihu.gr/userfiles/files/geo/ekdiloseis/%CE%95%CE%99%CE%A3%CE%97%CE%93%CE%97%CE%A3%CE%97%20%CE%A7%CE%91%CE%9B%CE%91%CE%A4%CE%A3%CE%97%20%CE%9C%CE%91%CE%A1%CE%99%CE%91%20-%20%CE%A6%CE%A5%CE%A3%CE%99%CE%9A%CE%91%20%CE%A3%CE%A5%CE%A3%CE%A4%CE%97>

Χρυσικόπουλος, Κ. Β. (2018). *ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΛΥΜΑΤΩΝ, 2Η ΕΚΔΟΣΗ*. ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ.

7 Παραρτήματα

Παράρτημα Ι : Ο όγκος των εισροών (IN) και εκροών (OUT) στους υδροβιότοπους G, P, C (από 18/6/2022 έως 30/12/2022).

DATE	G		P		C	
	IN (L)	OUT (L)	IN (L)	OUT (L)	IN (L)	OUT (L)
18-Ιουν	8	4,18	8	4,96	8	8
20-Ιουν	8	0,83	8	3,54	8	8
22-Ιουν	8	0	8	4,88	8	8
24-Ιουν	8	1,56	8	2,86	8	8
26-Ιουν	8	0,44	8	2,42	8	7,5
28-Ιουν	8	1,14	8	3,2	8	8
30-Ιουν	8	10,5	8	1,78	8	8
2-Ιουλ	8	8,52	8	0,71	8	8
4-Ιουλ	8	0,71	8	0,29	8	8
6-Ιουλ	12	1,6	12	1,25	12	12
8-Ιουλ	12	1,51	12	3,66	12	11
10-Ιουλ	12	0,31	12	0,48	12	11
12-Ιουλ	12	0,94	12	3,19	12	11,5
14-Ιουλ	12	0,21	12	2,16	12	11,5
16-Ιουλ	12	0,91	12	0,56	12	11,5
18-Ιουλ	12	0,48	12	0,92	12	11,5
20-Ιουλ	12	0,68	12	1,27	12	11,5
22-Ιουλ	12	0,72	12	0,91	12	11,5
24-Ιουλ	12	1,45	12	1,97	12	11,5
26-Ιουλ	12	1,98	12	0,27	12	11,5
28-Ιουλ	12	1,5	12	1,49	12	11,5
30-Ιουλ	12	0,25	12	0,72	12	11,5
1-Αυγ	12	0,55	12	0,1	12	11,5
3-Αυγ	12	0,89	12	1,06	12	11,5
6-Αυγ	12	0,52	12	0,46	12	11,5
9-Αυγ	12	4,62	12	1,8	12	11,5
12-Αυγ	12	5,41	12	1,89	12	11,5
15-Αυγ	12	2,05	12	2,2	12	11,5
18-Αυγ	12	0,96	12	0,6	12	11
20-Αυγ	12	1,14	12	1,12	12	11,5
22-Αυγ	12	3,49	12	2,51	12	12
24-Αυγ	12	2,33	12	4,68	12	12
26-Αυγ	12	3,55	12	1,26	12	12
28-Αυγ	12	2,36	12	0,81	12	11,5
30-Αυγ	12	0,36	12	0,45	12	12
1-Σεπ	12	5,11	12	0,68	12	12
3-Σεπ	12	0,73	12	2,05	12	11,5

5-Σεπ	12	5,14	12	0,52	12	12
7-Σεπ	12	4,21	12	3,5	12	12
11-Σεπ	12	2,78	12	0,38	12	12
14-Σεπ	12	2,24	12	1,1	12	11,5
16-Σεπ	12	2,02	12	1,46	12	11,5
18-Σεπ	12	0,87	12	0,17	12	11,5
20-Σεπ	12	3,61	12	0,85	12	11,5
22/9/2022	12	5,55	12	1,07	12	12
24/9/2022	12	3,85	12	1,67	12	12
27/9/2022	12	4,03	12	1,37	12	12
29-Σεπ	12	3,24	12	1,52	12	12
1-Οκτ	12	2,94	12	1,96	12	12
3-Οκτ	12	1,95	12	1,07	12	12
5-Οκτ	12	2,32	12	1,32	12	11,5
7-Οκτ	12	0,78	12	0,64	12	12
9-Οκτ	12	4,55	12	2,07	12	12
11-Οκτ	12	2,5	12	2,11	12	12
13/10/2022	12	7,75	12	3,66	12	12
15/10/2022	12	9,02	12	8,55	12	12
17/10/2022	12	5,2	12	7,55	12	12
19/10/2022	12	5,49	12	5,53	12	12
21/10/2022	12	10,27	12	11	12	12
23-Οκτ	12	6,9	12	2,21	12	12
25-Οκτ	12	1,73	12	2,62	12	12
27/10.	12	4,35	12	1,67	12	12
29-Οκτ	12	5,55	12	0,74	12	12
31-Οκτ	12	6,94	12	4,12	12	12
2-Νοε	12	6,71	12	3,38	12	12
4-Νοε	12	4	12	0,36	12	12
6-Νοε	12	5,98	12	1,61	12	12
8-Νοε	12	7,31	12	6,38	12	12
10-Νοε	12	10,75	12	4,42	12	12
12-Νοε	12	6,4	12	3,28	12	12
14-Νοε	12	7,15	12	6,78	12	12
16-Νοε	12	8,28	12	6,75	12	12
18-Νοε	12	6,86	12	4,44	12	12
20-Νοε	12	6,18	12	3,75	12	11,5
22-Νοε	12	3,97	12	0,79	12	12
24/11/2022	12	5,96	12	1,58	12	12
26/11/2022	12	10,69	12	6,19	12	12
28-Νοε	12	11	12	8,25	12	12
30-Νοε	12	16,43	14	29,88	12	12
2-Δεκ	12	4,86	12	0,12	12	12
4-Δεκ	12	8,42	12	0	12	12

6-Δεκ	12	7,75	12	0	12	12
8-Δεκ	12	7,57	12	7,06	12	12
10-Δεκ	12	6,05	12	0	12	12
12-Δεκ	12	9,72	12	0	12	12
14-Δεκ	12	6,18	12	3,24	12	12
16-Δεκ	12	11,74	12	11	12	12
18-Δεκ	12	7,25	12	0,72	12	12
20-Δεκ	12	3,21	12	0	12	12
22-Δεκ	12	7,8	12	8,33	12	12
24-Δεκ	12	9,25	12	9	12	12
26-Δεκ	12	6,1	12	11,5	12	12
28/12/2022	12	7,4	12	8,8	12	12
30-Δεκ	12	6,5	12	10,75	12	12

Παράρτημα II: Συγκέντρωση BOD και COD στις εισροές (IN) και εκροές των τεχνητών υγροβιότοπων G, P, C και απομάκρυνση (από 16/6/2022 έως 22/12/2022).

Date	BOD ₅						
	Συγκέντρωση (mg/L)				Απομάκρυνση (%)		
	IN	G	P	C	G	P	C
16/6	290	100	80	90	65,5	72,4	69,0
24/6	490	100	70	190	79,6	85,7	61,2
6/7	370	95	25	110	74,3	93,2	70,3
14/7	354	90	20	100	74,6	94,4	71,8
26/7	332	25	15	90	92,5	95,5	72,9
3/8	330	55	23	102	83,3	93,0	69,1
24/8	224	30	15	90	86,6	93,3	59,8
1/9	390	25	10	120	93,6	97,4	69,2
14/9	270	32	10	110	88,1	96,3	59,3
5/10	310	30	10	180	90,3	96,8	41,9
13/10	410	30	10	120	92,7	97,6	70,7
19/10	410	25	15	70	93,9	96,3	82,9
31/10	260	30	18	90	88,5	93,1	65,4
8/11	260	30	8	95	88,5	96,9	63,5
22/11	344	35	9	70	89,8	97,4	79,7
30/11	344	35	11	80	89,8	96,8	76,7
6/12	240	27	4	55	88,8	98,3	77,1
14/12	240	18	7	75	92,5	97,1	68,8
22/12	370	18	7	50	95,1	98,1	86,5

Date	COD						
	Συγκέντρωση (mg/L)				Απομάκρυνση (%)		
	IN	G	P	C	G	P	C
16/6	312	138	94	125	55,8	69,9	59,9
24/6	582	117	80	209	79,9	86,3	64,1
6/7	500	130	40	138	74,0	92,0	72,4
14/7	440	110	33	148	75,0	92,5	66,4
26/7	350	42	32	112	88,0	90,9	68,0
3/8	416	70	40	140	83,2	90,4	66,3
24/8	240	36	30	144	85,0	87,5	40,0
1/9	450	30	14	178	93,3	96,9	60,4
14/9	538	60	25	164	88,8	95,4	69,5
5/10	426	50	44	214	88,3	89,7	49,8
13/10	502	48	18	180	90,4	96,4	64,1
19/10	502	56	28	90	88,8	94,4	82,1
31/10	292	54	30	158	81,5	89,7	45,9
8/11	292	68	20	120	76,7	93,2	58,9
22/11	370	60	25	96	83,8	93,2	74,1
30/11	370	68	26	144	81,6	93,0	61,1
6/12	304	35	25	65	88,5	91,8	78,6
14/12	304	30	26	94	90,1	91,4	69,1
22/12	450	30	10	95	93,3	97,8	78,9

Παράρτημα III: Συγκέντρωση TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ και $\text{NO}_3^-\text{-N}$ στις εισροές (IN) και εκροές των τεχνητών υδροβιότοπων (G, P, C) και απομάκρυνση (από 16/6/2022 έως 22/12/2022).

Date	TN						
	Συγκέντρωση (mg/L)				Απομάκρυνση (%)		
	IN	G	P	C	G	P	C
16/6	72	32	30	62	56	58	14
24/6	72	33	33	48	54	54	33
6/7	91	35	13	36	62	86	60
14/7	65	25	8	33	62	88	49
26/7	73	16	12	31	78	84	58
3/8	67	19	6	31	72	91	54
24/8	70	22	15	27	69	79	61
1/9	70	18	5	27	74	93	61
14/9	55	15	6	25	73	89	55
5/10	63	20	12	21	68	81	67
13/10	65	16	7	29	75	89	55
19/10	65	15	10	19	77	85	71
31/10	62	12	1	26	81	98	58
8/11	62	9	6	17	85	90	73
22/11	68	11	5	28	84	93	59
30/11	68	14	10	30	79	85	56
6/12	63	12	2	31	81	97	51
14/12	63	15	9	18	76	86	71
22/12	83	10	3	22	88	96	73

Date	NH ₄ ⁺ -N						
	Συγκέντρωση (mg/L)				Απομάκρυνση (%)		
	IN	G	P	C	G	P	C
16/6	39,2	19,0	13,7	23,0	51,5	65,1	41,3
24/6	39,2	9,9	3,2	26,3	74,7	91,8	33,0
6/7	56,0	8,1	2,5	24,2	85,5	95,5	56,8
14/7	34,8	4,9	0,0	20,5	85,9	100	41,1
26/7	33,4	1,7	0,3	10,2	95,0	99,1	69,4
3/8	30,9	1,5	0,7	6,8	95,1	97,7	77,9
24/8	26,8	1,5	0,6	2,6	94,4	97,8	90,3
1/9	29,3	1,3	0,3	5,2	95,6	99,0	82,2
14/9	31,5	2,0	0,6	13,1	93,6	98,1	58,4
5/10	36,4	2,4	0,9	7,5	93,4	97,5	79,4
13/10	52,5	2,8	1,6	14,4	94,7	97,0	72,6
19/10	52,5	0,9	1,2	8,4	98,3	97,6	84,1
31/10	46,0	1,0	0,0	17,7	97,8	100	61,5
8/11	46,0	1,7	1,1	11,4	96,3	97,6	75,2
22/11	47,2	2,7	1,8	19,3	94,3	96,2	59,0
30/11	47,2	1,7	1,4	17,4	96,4	97,0	63,1
6/12	45,9	1,3	0,3	20,0	97,2	99,3	56,3
14/12	45,9	2,9	0,2	9,9	93,7	99,6	78,4
22/12	72,6	1,5	0,0	9,8	97,9	100	86,5

Date	NO ₃ ⁻ -N						
	Συγκέντρωση (mg/L)				Απομάκρυνση (%)		
	IN	G	P	C	G	P	C
16/6	<2	<2	<2	<2	-	-	-
24/6	<2	<2	<2	<2	-	-	-
6/7	<2	<2	<2	<2	-	-	-
14/7	1,7	1,2	1,4	0,6	29,4	17,6	64,7
26/7	1,8	1,6	2,1	0,9	11,1	-	50,0
3/8	2,6	1,9	3,6	5,0	26,9	-	-
24/8	-	-	4,4	3,3	-	-	-
1/9	-	0,5	0,7	-	-	-	-
14/9	-	-	-	-	-	-	-
5/10	-	0,3	0,5	-	-	-	-
13/10	-	-	-	-	-	-	-
19/10	-	-	-	-	-	-	-
31/10	-	-	-	0,8	-	-	-
8/11	-	-	-	-	-	-	-
22/11	-	-	-	12,5	-	-	-
30/11	-	-	-	2,0	-	-	-
6/12	-	-	-	10,2	-	-	-
14/12	-	-	-	12,5	-	-	-
22/12	-	-	-	5,2	-	-	-

Παράρτημα IV: Συγκέντρωση TP και PO₄³⁻-P στις εισροές(IN) και εκροές των τεχνητών υδροβιότοπων (G, P, C) και απομάκρυνση (από 16/6/2022 έως 22/12/2022).

Date	TP						
	Συγκέντρωση (mg/L)				Απομάκρυνση (%)		
	IN	G	P	C	G	P	C
16/6	4,402	2,118	1,642	2,703	51,9	62,7	38,6
24/6	8,402	3,579	7,147	7,368	57,4	14,9	12,3
6/7	11,82	0,94	6,815	10,01	92	42,3	15,3
14/7	12,208	7,893	4,461	10,9	35,3	63,5	10,7
26/7	11,608	5,094	3,246	4,657	56,1	72	59,9
3/8	11,689	5,271	6,855	4,915	54,9	41,4	58
24/8	3,1	1,448	2,515	3,04	53,3	18,9	1,9
1/9	11,011	7,826	4,87	6,53	28,9	55,8	40,7
14/9	6,71	2,924	4,938	6,479	56,4	26,4	3,4
5/10	6,336	2,56	1,43	6,236	59,6	77,4	1,6
13/10	10,48	6,193	1,632	9,47	40,9	84,4	9,6
19/10	10,48	6,189	1,267	8,32	40,9	87,9	20,6
31/10	9,991	2,965	0,951	1,301	70,3	90,5	87
8/11	9,991	4,51	4,45	5,05	54,9	55,5	49,5
22/11	10,96	5,83	5,879	6,537	46,8	46,4	40,4
30/11	10,834	5,25	4,318	6,672	51,5	60,1	38,4
6/12	5,942	3,185	3,87	3,09	46,4	34,9	48
14/12	5,942	2,154	0,556	3,186	63,7	90,6	46,4
22/12	8,07	1,4	1,42	6,22	82,7	82,4	22,9

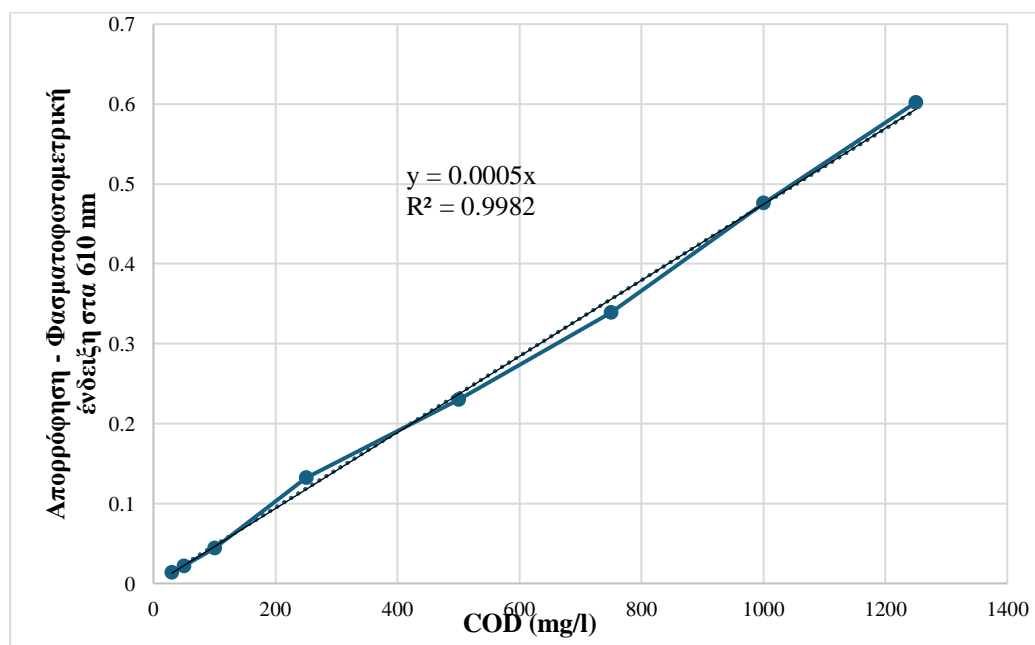
Date	PO ₄ ³⁻ -P						
	Συγκέντρωση (mg/L)				Απομάκρυνση (%)		
	IN	G	P	C	G	P	C
16/6	3,981	1,915	1,565	2,617	51,9	60,7	34,3
24/6	5,981	4,06	4,142	4,584	32,1	30,7	23,4
6/7	5,383	4,06	3,212	4,699	24,6	40,3	12,7
14/7	5,058	4,671	3,185	4,242	7,7	37	16,1
26/7	5,582	2,14	2,031	4,257	61,7	63,6	23,7
3/8	5,166	4,264	4,632	3,674	17,5	10,3	28,9
24/8	4,663	1,191	2,208	2,88	74,5	52,6	38,2
1/9	7,649	4,466	4,311	5,847	41,6	43,6	23,6
14/9	4,893	0,594	2,005	4,386	87,9	59	10,4
5/10	5,204	2,23	1,37	4,094	57,1	73,7	21,3
13/10	7,985	4,153	1,12	4,27	48	86	46,5
19/10	7,985	4,425	1,087	6,288	44,6	86,4	21,3
31/10	4,761	1,858	0,842	2,917	61	82,3	38,7
8/11	4,761	2,64	2,35	4,52	44,5	50,6	5,1
22/11	9,681	5,818	5,573	6,028	39,9	42,4	37,7
30/11	9,681	5,047	5,227	6,672	47,9	46	31,1
6/12	4,145	3,172	2,575	3,705	23,5	37,9	10,6
14/12	4,145	2,154	0,556	4,162	48	86,6	0
22/12	5,38	0,99	0,94	5,07	81,6	82,5	5,8

Παράρτημα V: Μετρήσεις στην ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) και PH καθώς και συγκέντρωση TSS στις εισροές (IN) και εκροές των τεχνητών υδροβιότοπων (G, P, C) και απομάκρυνση των TSS (από 16/6/2022 έως 22/12/2022).

Date	TSS						
	Συγκέντρωση (mg/L)				Απομάκρυνση (%)		
	IN	G	P	C	G	P	C
16/6	107,0	21,9	70,8	23,4	79,5	33,8	78,1
24/6	107,0	210,7	74,7	50,7	0	30,2	52,6
6/7	177,3	52,0	36,0	38,8	70,7	79,7	78,1
14/7	161,3	53,3	24,0	38,7	66,9	85,1	76,0
26/7	178,0	34,0	36,0	40,0	80,9	79,8	77,5
3/8	128,0	67,2	31,6	36,6	47,5	75,3	71,4
24/8	138,0	9,0	74,0	50,0	93,5	46,4	63,8
1/9	117,0	69,6	44,0	57,5	40,5	62,4	50,8
14/9	131,3	46,5	14,3	50,8	64,6	89,1	61,3
5/10	77,3	20,8	27,2	60,0	73,1	64,9	22,4
13/10	142,6	16,4	40,0	29,0	88,5	71,9	79,7
19/10	142,6	5,6	96,9	33,3	96,1	32,0	76,6
31/10	93,9	9,2	7,1	97,2	90,2	92,5	0
8/11	93,9	9,7	32,3	19,0	89,7	65,6	79,8
22/11	90,0	11,6	15,2	56,5	87,1	83,1	37,3
30/11	90,0	14,3	32,0	21,6	84,1	64,4	76,0
6/12	64,0	4,1	12,6	31,5	93,5	80,3	50,8
14/12	64,0	1,0	10,9	21,0	98,4	82,9	67,2
22/12	141,5	5,4	3,6	38,8	96,2	97,5	72,6

Date	EC ($\mu\text{S/cm}$)				pH			
	IN	G	P	C	IN	G	P	C
16/6	1120	1635	2240	1796	6,94	7,14	7,78	7,94
24/6	1120	1617	1570	1194	6,94	8,09	7,79	7,8
6/7	973	1351	2360	1206	7,02	7,48	7,76	7,65
14/7	1078	2100	2800	1093	7,25	7,82	7,93	7,89
26/7	1166	2850	2230	1175	6,91	7,9	8,01	7,73
3/8	1311	2800	4000	1084	7,03	7,96	7,47	7,42
24/8	1194	3010	4250	988	6,8	7,92	6,93	7,41
1/9	1300	2330	3580	1098	7,07	7,86	7,21	7,97
14/9	1120	2970	2830	1184	7,2	7,97	8,12	7,81
5/10	1108	2730	4090	1515	7,05	7,89	8,1	7,55
13/10	1173	2080	2555	1211	7,12	7,44	7,96	7,69
19/10	1173	1612	1992	1126	7,12	6,89	7,38	7,39
31/10	948	1461	1771	949	7,07	7,12	7,83	7,43
8/11	948	1535	1963	816	7,07	6,6	6,88	7,71
22/11	1016	1586	1835	922	6,97	6,89	7,49	7,22
30/11	1016	996	1039	1033	6,97	6,88	7,24	7,41
6/12	1163	1223	1100	983	7,07	7,15	7,83	7,27
14/12	1163	1150	1370	982	7,07	6,93	7,52	7,14
22/12	1276	1443	1543	1149	7,08	7,54	8,2	7,29

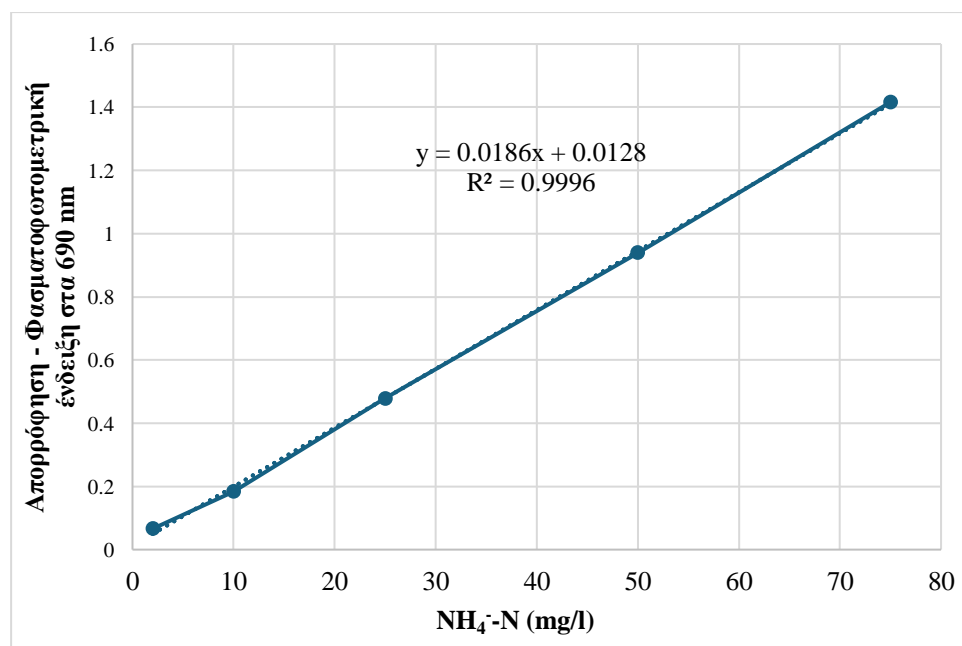
Παράρτημα VI: Καμπύλη βαθμονόμησης για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης του COD



Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία της καμπύλης βαθμονόμησης COD

Συγκέντρωση COD (mg/L)	30	50	100	250	500	750	1000	1250
Απορρόφηση (στα 610 nm)	0,014	0,022	0,044	0,132	0,230	0,339	0,476	0,602

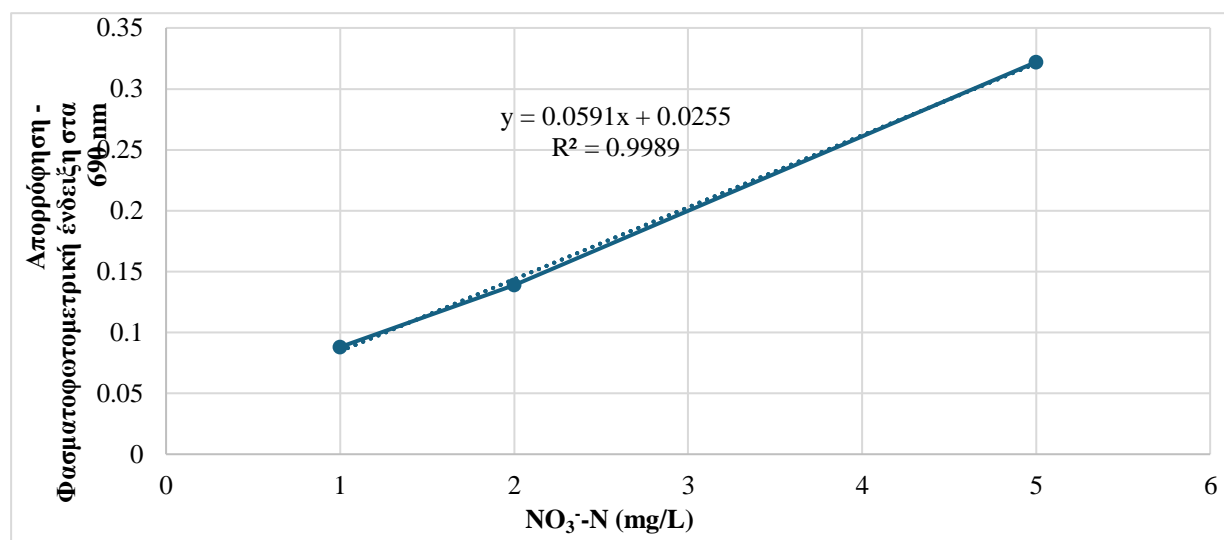
Παράρτημα VII: Καμπύλη βαθμονόμησης για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου ($\text{NH}_4^+\text{-N}$)



Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία της καμπύλης βαθμονόμησης $\text{NH}_4^+\text{-N}$

Συγκέντρωση $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (mg/L)	2	10	25	50	75
Απορρόφηση (στα 690 nm)	0,066	0,184	0,478	0,939	1,416

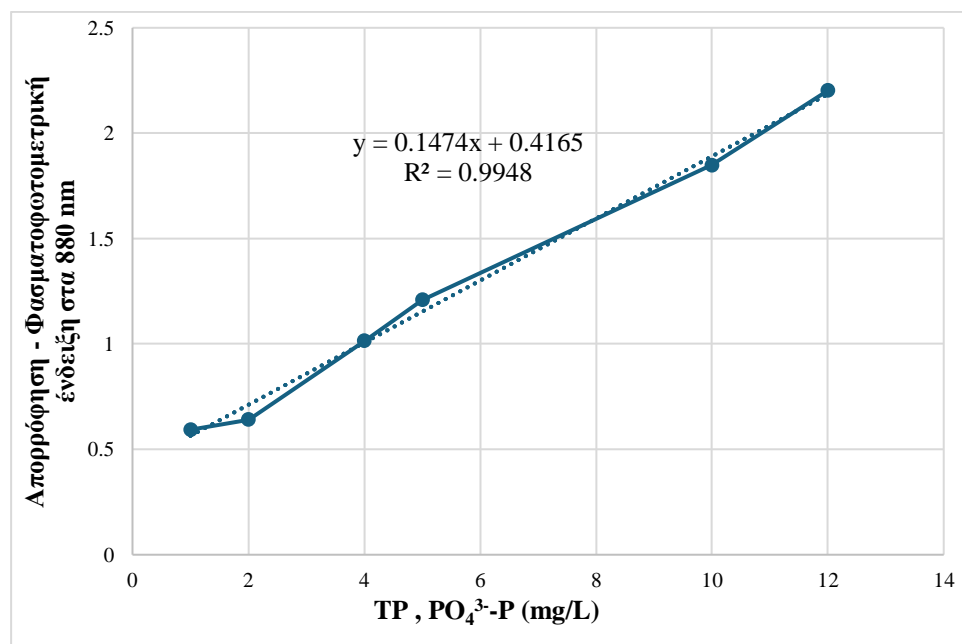
Παράρτημα VIII: Καμπύλη βαθμονόμησης για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης του νιτρικού αζώτου ($\text{NO}_3^-\text{-N}$)



Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία της καμπύλης βαθμονόμησης $\text{NO}_3^-\text{-N}$

Συγκέντρωση $\text{NO}_3^-\text{-N}$ (mg/L)	1	2	5
Απορρόφηση (στα 365 nm)	0,088	0,139	0,322

Παράρτημα IX: Καμπύλη βαθμονόμησης για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης του ολικού φωσφόρου (TP) και τον φωσφορικών ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)



Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία της καμπύλης βαθμονόμησης TP και $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$

Συγκέντρωση TP ή $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ (mg/L)	1	2	4	5	10	12
Απορρόφηση (στα 880 nm)	0,593	0,641	1,015	1,209	1,849	2,202

- για την σπάνια περίπτωση όπου η απορρόφηση $y < 0,593$, χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση $y=0,5315x+0,0612$ που είχε δημιουργηθεί με άλλα δεδομένα, για τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων TP ή $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ σε mg/L όταν η απορρόφηση στα 880nm είναι μικρότερη από 0,593.