



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

**ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

**<<ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΚΑΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΠΙΛΟΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΩΝ
ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΡΟΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΥΓΡΟΥ ΑΠΟΒΛΗΤΟΥ ΕΛΑΙΟΤΡΙΒΕΙΟΥ>>**

ΑΘΑΝΑΣΙΑΔΟΥ ΕΙΡΗΝΗ

Αριθμός Μητρώου: 2017050118

Επιβλέπων Καθηγητής:

Στεφανάκης Αλέξανδρος, Επίκουρος Καθηγητής

Εξεταστική επιτροπή:

Βενιέρη Δανάη, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια

Διαμαντόπουλος Ευάγγελος, Ομότιμος Καθηγητής

Χανιά, Οκτώβριος, 2023

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικό σκοπό, εκπαιδευτικού ή ερευνητικού χαρακτήρα, με την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για άλλη χρήση θα πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένεια μου που με στήριξε στο ταξίδι μου αυτό, τόσο οικονομικά όσο και ψυχολογικά.

Ιδιαίτερα, ευχαριστώ τον κύριο Αλέξανδρο Στεφανάκη που μου έδωσε την ευκαιρία μέσω της διπλωματικής μου εργασίας να εξερευνήσω τον τομέα των υγροβιότοπων· έναν αρκετά ενδιαφέρον κλάδο με πολλές εφαρμογές και προοπτικές εξέλιξης των συστημάτων αυτών. Ακόμη, τον ευχαριστώ για την στήριξη του και την εμπιστοσύνη του να φέρω εις πέρας το κομμάτι μου στο πείραμα αυτό και να διεκδικήσω με αυτόν τον τρόπο τα πρώτα μου βήματα στο χώρο της οικολογικής μηχανικής.

Δεν θα μπορούσα να ξεχάσω και την κυρία Ελισάβετ Κουκουράκη, η οποία μου προσέφερε ατελείωτες ώρες βοήθειας, επίβλεψη στο εργαστήριο και συμβουλές, οι οποίες ήταν κατατοπιστικότερες και άκρως καθοδηγητικές για την ακαδημαϊκή μου πορεία.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στην συνοδοιπόρο μου Δήμητρα Μοσχογιάννη για την άψογη συνεργασία μας στο εργαστήριο, στους υποψήφιους διδάκτορες Παναγιώτη Ρεγκούζα και Ιωάννη Ασημακούλα που βοήθησαν στο πρακτικό κομμάτι και στήσιμο του πειράματος.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω και όλη την εξεταστική επιτροπή που διέθεσε πολύτιμο χρόνο για την εξέταση της διπλωματικής μου.

Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	7
ABSTRACT.....	8
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ	9
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ	10
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ.....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο . ΕΙΣΑΓΩΓΗ	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο . ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	14
2.1. ΦΥΣΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ.....	14
2.1.1. ΦΥΣΙΚΟΙ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΙ.....	14
2.1.2. ΤΕΧΝΗΤΟΙ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΙ.....	15
2.1.2.1. ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΡΟΗΣ ΤΥ	16
2.1.2.2. ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΡΟΗΣ ΤΥ	16
2.1.3. ΤΥ ΜΕ ΠΛΗΡΩΤΙΚΟ ΥΛΙΚΟ LECA.....	17
2.2. ΦΥΣΙΚΟΙ VS ΤΕΧΝΗΤΟΙ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΙ.....	18
2.3. ΒΛΑΣΤΗΣΗ ΤΥ	18
2.4. ΥΓΡΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ ΕΛΑΙΟΤΡΙΒΕΙΟΥ.....	20
2.4.1. ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ	21
2.. ΣΤΟΧΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο . ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	23
3.1. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ	23
3.1.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ	23

3.1.2. ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	26
3.1.3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	28
 3.2. ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ	 32
3.2.1. ΔΕΙΓΜΑ	32
3.2.2. ΥΛΙΚΑ ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΑΙ ΚΑΛΑΜΙΕΣ	32
3.2.2.1. LESA.....	32
3.2.2.2. ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΟ ΠΛΑΣΤΙΚΟ (HDPE)	33
3.2.2.3. ΒΙΟΞΑΝΘΡΑΚΩΜΑ	33
3.2.2.4. ΒΛΑΣΤΗΣΗ	34
 3.3. ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ	 34
3.3.1. ΡΗ.....	34
3.3.2. ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ	35
3.3.3. ΧΗΜΙΚΑ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟ ΟΞΥΓΟΝΟ (COD)	35
3.3.4. ΒΙΟΧΗΜΙΚΑ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟ ΟΞΥΓΟΝΟ (BOD ₅).....	35
3.3.5. ΟΛΙΚΟ ΎΔΡΟ (TN)	36
3.3.6. ΑΜΜΩΝΙΑΚΟ ΎΔΡΟ (NH ₄ ⁺ -N)	36
3.3.7. ΝΙΤΡΙΚΟ ΎΔΡΟ (NO ₃ ⁻ -N)	36
3.3.8. ΟΛΙΚΟΣ ΦΩΣΦΟΡΟΣ (TP)	36
3.3.9. ΦΩΣΦΟΡΙΚΑ (PO ₄ ³⁻ -P)	37
3.3.10. ΟΛΙΚΑ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΤΕΡΕΑ (TSS)	37
3.3.11. ΧΡΩΜΑ.....	38
3.3.12. ΟΛΙΚΕΣ ΦΑΙΝΟΛΕΣ	38
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ^ο . ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ	 39
4.1. ΥΔΑΤΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ	39
4.2. ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ.....	40
4.2.1. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΕΙΣΡΟΗΣ	40
4.2.1.1. COD ΑΝΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΗΣ ΕΙΣΡΟΗΣ	41
4.2.1.2. TN ΑΝΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΗΣ ΕΙΣΡΟΗΣ	42
4.2.1.3. NH ₄ ⁺ -N ΑΝΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΗΣ ΕΙΣΡΟΗΣ.....	42
4.2.1.4. TSS ΑΝΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΗΣ ΕΙΣΡΟΗΣ	43
4.2.1.5. ΟΛΙΚΕΣ ΦΑΙΝΟΛΕΣ ΑΝΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΗΣ ΕΙΣΡΟΗΣ.....	44
4.2.2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΕΚΡΟΩΝ	45
4.2.2.1. ΡΗ	45
4.2.2.2. ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ (EC).....	46

4.2.2.3. ΧΗΜΙΚΑ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟ ΟΞΥΓΟΝΟ (COD)	47
4.2.2.4. ΒΙΟΧΗΜΙΚΑ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟ ΟΞΥΓΟΝΟ (BOD ₅)	49
4.2.2.5. ΟΛΙΚΟ ΑΖΩΤΟ (TN)	50
4.2.2.6. ΑΜΜΩΝΙΑΚΟ ΆΖΩΤΟ (NH ₄ ⁺ -N).....	52
4.2.2.7. ΝΙΤΡΙΚΟ ΆΖΩΤΟ (NO ₃ ⁻ -N)	53
4.2.2.8. ΟΛΙΚΟΣ ΦΩΣΦΟΡΟΣ (TP)	53
4.2.2.9. ΦΩΣΦΟΡΙΚΑ ΙΟΝΤΑ (PO ₄ ³⁻ -P)	55
4.2.2.10. ΟΛΙΚΕΣ ΦΑΙΝΟΛΕΣ	57
4.2.2.11. ΟΛΙΚΑ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΤΕΡΕΑ (TSS)	59
4.2.2.12. ΧΡΩΜΑ	61
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ^ο . ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	63
 5.1. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	63
5.2. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	63
 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	65
 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	70

Περίληψη

Η εργασία αυτή αφορά στην κατασκευή δύο πιλοτικών μονάδων τεχνητών υγροβιότοπων κατακόρυφης ροής καθώς επίσης και στην πειραματική ανάλυση των εισροών και εκροών που προκύπτουν από αυτές, με στόχο τη μείωση του οργανικού φορτίου, θρεπτικών και άλλων ρύπων από υγρό απόβλητο ελαιοτριβείου. Οι πιλοτικές δεξαμενές τοποθετήθηκαν στο Πολυτεχνείο Κρήτης και πιο συγκεκριμένα στον περιβάλλοντα χώρο του θερμοκηπίου της σχολής ΧΗΜΗΠΕΡ. Οι δεξαμενές είναι φυτεμένες με κοινό καλάμι *Phragmites australis* (*P. australis*). Η πρώτη δεξαμενή πληρώθηκε αποκλειστικά με διογκωμένη άργιλο (leca) και συμβολίζεται με L. Η δεύτερη είναι συνδυασμός leca, βιοεξανθρακώματος και ανακυκλωμένου πλαστικού (HDPE) και συμβολίζεται με LPB.

Το λύμα προήλθε από τριφασικό ελαιουργείου στην περιοχή των Περιβολιών (Χανιά), από τη φάση της απλής διοχέτευσης σε μία κλειστή δεξαμενή (χωρίς εξάτμιση) όλου του υγρού κλάσματος που παρήχθη.

Μετά τη φύτευση των καλαμιών, οι πιλοτικές μονάδες φορτίζονταν με την επεξεργασμένη εκροή άλλων συστημάτων τεχνητών υγροβιότοπων που επεξεργάζονταν λύμα από την Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων των Χανίων. Η διαδικασία αυτή ακολουθήθηκε για περίπου ένα μήνα για να βοηθηθεί η ανάπτυξη των καλαμιών. Ύστερα, ως εισροή στις μονάδες χρησιμοποιήθηκε αραιωμένο (1:4) υγρό απόβλητο για 1 μήνα και εφαρμόστηκε αραιώση (1:8) μέχρι το τέλος του πειράματος.

Δειγματοληψίες από την εισροή και τις εκροές των μονάδων και αντίστοιχες φυσικοχημικές αναλύσεις πραγματοποιούνταν σε εβδομαδιαία βάση. Ειδικότερα, οι μετρήσεις αφορούσαν στον προσδιορισμό του pH, της αγωγιμότητας (EC), του BOD₅, του COD, του χρώματος (TCU), των NO₃⁻-N, των NH₄⁺-N, του TN, των PO₄³⁻-P, του TP, των ολικών φαινόλων και τέλος των TSS.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την μέχρι σήμερα παρακολούθηση των μονάδων, χρησιμεύουν για την αξιολόγηση του σχεδιασμού και την αποτελεσματικότητα της επεξεργασίας. Για την μονάδα L επιτεύχθηκαν απομακρύνσεις 67.4±16.3%, 85.2±15.0%, 74.0±17.0%, 81.2±18.1, 83.9±19.4, 51.7±24.1, 83.4±8.6%, 71.3±10.6% για COD, BOD₅, TN, TP, PO₄³⁻-P, TCU, ολικές φαινόλες, TSS αντίστοιχα. Για την μονάδα LPB επιτεύχθηκαν 68.6±18.3%, 84.8±15.8%, 71.1±19.5%, 78.2±19.0, 87.5±14.9, 36.3±31.0, 84.1±7.6%, 71.3±17.1% για COD, BOD₅, TN, TP, PO₄³⁻-P, TCU, ολικές φαινόλες, TSS αντίστοιχα. Όσον αφορά στα NH₄⁺-N και NO₃⁻-N, ήταν σχεδόν μη ανιχνεύσιμα. Η υδραυλική αγωγιμότητα παρουσιάζει μία μικρή αύξηση και το pH από όξινο γίνεται αλκαλικό. Το βασικό συμπέρασμα που προέκυψε είναι ότι η leca, ως υλικό υποστρώματος, είναι μία αποτελεσματική εναλλακτική και πώς οι υγροβιότοποι είναι λύσεις για το πρόβλημα διάθεσης υγρών αποβλήτων ελαιουργείων.

ABSTRACT

In this thesis, the construction of two pilot units of artificial vertical flow wetlands as well as the experimental analysis of the inflows and outflows resulting from them, with the aim of reducing the organic load, nutrients and other pollutants from oil mill liquid waste. The pilot wetlands were placed at the Technical University of Crete and more specifically in the surrounding area of the greenhouse of the Chemical and Environmental Engineering school. The tanks are planted with common reed *Phragmites australis* (*P. australis*). The first tank was filled exclusively with expanded clay aggregate (leca), which will be depicted as L. The second is a combination of leca, biochar and recycled plastic (HDPE) and is depicted as LPB.

The wastewater came from a three-phase oil mill in the area of Perivolía (Chania), from the phase of simple channeling into a closed tank (without evaporation) of all the liquid fraction produced.

After the reeds were planted, the pilot plants were charged with the treated effluent of other artificial wetland systems that treated effluent from the Chania Wastewater Treatment. This process was followed for about a month to help the reeds grow. Then, diluted (1:4) olive mill wastewater was used as influent to the units for 1 month (March) and dilution (1:8) was applied until the end of the experiment.

Sampling of the inflow and outflows of the units and corresponding physicochemical analyzes were performed on a weekly basis. In particular, the measurements concerned the determination of pH, conductivity (EC), BOD₅, COD, colour (TCU), NO₃⁻-N, NH₄⁺-N, TN, PO₄³⁻-P, TP, total phenols and TSS.

The conclusions obtained from the monitoring of the units for this period serve to evaluate the design and the effectiveness of the treatment. For unit L, 67.4±16.3%, 85.2±15.0%, 74.0±17.0%, 81.2±18.1, 83.9±19.4, 51.7±24.1, 83.4±8.6%, 71.3±10.6% removals were achieved for COD, BOD₅, TN, TP, PO₄³⁻-P, TCU, total phenols, TSS respectively. For the LPB unit, 68.6±18.3%, 84.8±15.8%, 71.1±19.5%, 78.2±19.0, 87.5±14.9, 36.3±31.0, 84.1±7.6%, 71.3±17.1% were achieved for COD, BOD₅, TN, TP, PO₄³⁻-P, TCU, total phenols, TSS respectively. As for NH₄⁺-N and NO₃⁻-N, were almost undetectable. The hydraulic conductivity shows a slight increase and the pH changes from acidic to alkaline. The main conclusion reached is that leca, as a substrate material, is an effective alternative and constructed wetlands can be used to solve the disposal problem of oil mill wastewater.

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1. Ποσοστιαία παραγωγή ελαιολάδου ανά περιφέρεια

Εικόνα 2. Απεικόνιση ποσοστών μετατροπής ελαιόκαρπου σε κύριο προϊόν και παραπροϊόντα

Εικόνα 3. ΤΥ οριζόντιας ροής (Vymazal, 2009)

Εικόνα 4. ΤΥ κάθετης ροής (Kela P Weber, 2008)

Εικόνα 5. Σχηματική απεικόνιση πειραματικής διάταξης

Εικόνα 6. Μονάδα L (αριστερά) & LPB (δεξιά)

Εικόνα 7. Εισροή με αναλογία αραίωσης 1:8

Εικόνα 8. Μονάδες υδροβιότοπων στο Πολυτεχνείο Κρήτης (Σεπτέμβριος 2023)

Εικόνα 9. Μονάδα LPB στο στάδιο της ωρίμανσης

Εικόνα 10. Μονάδα L στο στάδιο της ωρίμανσης

Εικόνα 11. Χρονοδιάγραμμα πειράματος

Εικόνα 12. Διογκωμένη άργιλος (<https://www.leca.com/product>)

Εικόνα 13. Ανακυκλωμένο πλαστικό HX38 Biocarrier

Εικόνα 14. Βλάστηση *P. australis* (Wikispecies)

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 2.1. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα φυσικών υγροτόπων

Πίνακας 2.2. Φυσικά χαρακτηριστικά *P. australis*

Πίνακας 2.3. Οριακές τιμές εκροών για διάφορους αποδέκτες (σύμφωνα με ΚΥΑ 179182/656, ΦΕΚ 582/2-7-1979)

Πίνακας 3.1. Μετεωρολογικά στοιχεία πεδίου
(<https://penteli.meteo.gr/stations/chania/>)

Πίνακας 4.1. Μέσες τιμές και εύρος τιμών των παραμέτρων της εισροής

Πίνακας 4.2. Αποτελέσματα μετρήσεων pH

Πίνακας 4.3. Αποτελέσματα μετρήσεων EC

Πίνακας 4.4. Αποτελέσματα μετρήσεων COD

Πίνακας 4.5. Αποτελέσματα μετρήσεων BOD₅

Πίνακας 4.6. Αποτελέσματα μετρήσεων TN για τις μονάδες L & LPB

Πίνακας 4.7. Αποτελέσματα μετρήσεων TP

Πίνακας 4.8. Αποτελέσματα μετρήσεων PO₄³⁻-P

Πίνακας 4.9. Αποτελέσματα μετρήσεων φαινολών

Πίνακας 4.10. Αποτελέσματα μετρήσεων TSS

Πίνακας 4.11. Αποτελέσματα μετρήσεων χρώματος

Ευρετήριο Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 4.1. Διάγραμμα μέσης μηνιαίας εξατμισοδιαπνοής για τις μονάδες L & LPB και μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας

Διάγραμμα 4.2. Συγκεντρώσεις COD εισροής

Διάγραμμα 4.3. Συγκεντρώσεις TN εισροής

Διάγραμμα 4.4. Συγκεντρώσεις NH_4^+-N εισροής

Διάγραμμα 4.5. Συγκεντρώσεις TSS εισροής

Διάγραμμα 4.6. Συγκεντρώσεις φαινολών εισροής

Διάγραμμα 4.7. Τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας για τις μονάδες L & LPB

Διάγραμμα 4.8. Συγκεντρώσεις COD αραιωμένης εισροής και εκροών L & LPB

Διάγραμμα 4.9. Ποσοστά απομακρύνσεων COD για τις μονάδες L & LPB

Διάγραμμα 4.10. Ποσοστά απομακρύνσεων BOD_5 για τις μονάδες L & LPB

Διάγραμμα 4.11. Συγκεντρώσεις TN αραιωμένης εισροής και εκροών L & LPB

Διάγραμμα 4.12. Ποσοστά απομακρύνσεων TN για τις μονάδες L & LPB

Διάγραμμα 4.13. Συγκεντρώσεις TP αραιωμένης εισροής και εκροών L & LPB

Διάγραμμα 4.14. Ποσοστά απομακρύνσεων TP για τις μονάδες L & LPB

Διάγραμμα 4.15. Συγκεντρώσεις $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ αραιωμένης εισροής και εκροών L & LPB

Διάγραμμα 4.16. Ποσοστά απομακρύνσεων $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ για τις μονάδες L & LPB

Διάγραμμα 4.17. Συγκεντρώσεις φαινολών αραιωμένης εισροής και εκροών L & LPB

Διάγραμμα 4.18. Ποσοστά απομακρύνσεων φαινολών για τις μονάδες L & LPB

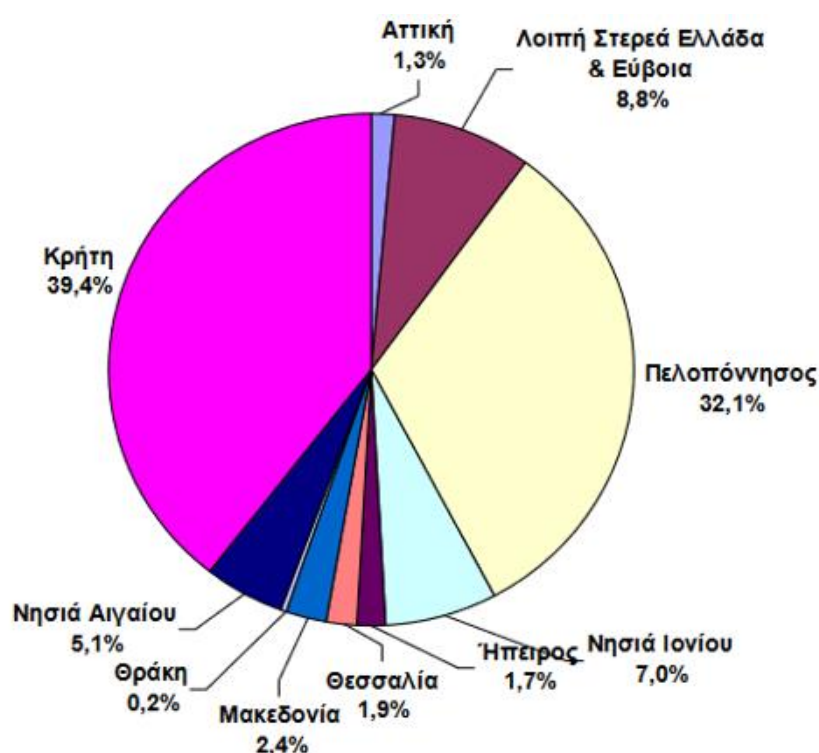
Διάγραμμα 4.19. Συγκεντρώσεις TSS αραιωμένης εισροής και εκροών L & LPB

Διάγραμμα 4.20. Ποσοστά απομακρύνσεων TSS για τις μονάδες L & LPB

Διάγραμμα 4.21. Χρώμα αραιωμένης εισροής και εκροών L & LPB

Κεφάλαιο 1^ο. Εισαγωγή

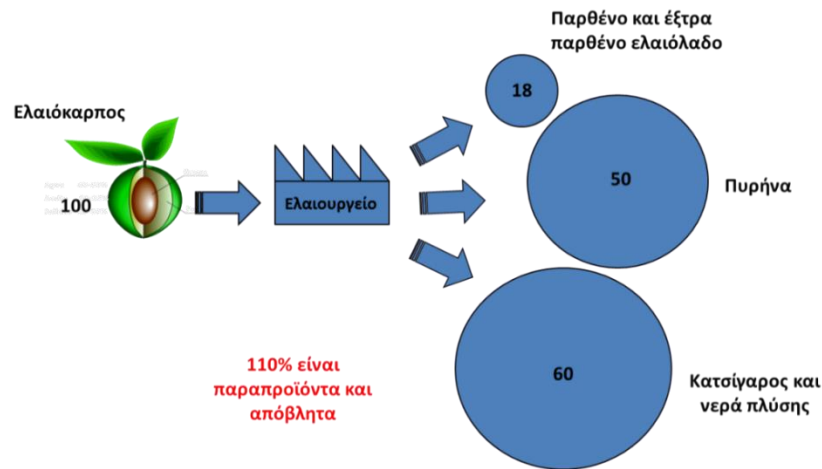
Η παραγωγή λαδιού είναι μία συχνή εξαγωγή για τις Μεσογειακές χώρες, που είναι πλούσιες σε ελαιόδεντρα, καθώς επίσης διαδραματίζει πρωταρχικό ρόλο στην οικονομία αυτών. Ειδικότερα, στην Ελλάδα, απαριθμούνται 2150 ελαιοτριβεία για το έτος 2009 (ΕΛΣΤΑΤ, 2009). Όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα, την μεγαλύτερη παραγωγή ελαιολάδου στην Ελλάδα, την κατέχει η Κρήτη με το ποσοστό να ανέρχεται στο 39.4 %. Για την περίοδο 2020-2021 η παραγωγή λαδιού στην Ελλάδα συνέβαλε στο 9.1% παγκοσμίως σύμφωνα με το Διεθνές Συμβούλιο Ελιάς.



Εικόνα 3. Ποσοστιαία παραγωγή ελαιολάδου ανά περιφέρεια

Κατά την παραγωγή του ελαιολάδου από τα ελαιοτριβεία (είτε αυτά χρησιμοποιούν τη φυγοκέντριση δύο φάσεων είτε την φυγοκέντριση τριών φάσεων είτε την μηχανική συμπίεση), παράγονται και παραπροϊόντα. Πρώτον, το στερεό μέρος- ελαιοπυρήνας- που είναι ο αλεσμένος καρπός της ελιάς και δεύτερον ο κασίγαρος (Olive Mill Wastewater - OMWW), που είναι το υγρό κλάσμα και αποτελείται από τους χυμούς του καρπού της ελιάς και από το νερό που χρησιμοποιείται στις διάφορες φάσεις παραγωγής του λαδιού. Ωστόσο, από τα ελαιουργεία που χρησιμοποιούν τη φυγοκέντριση παράγονται υπέρογκες ποσότητες κασίγαρου (AGROENERGY).

Εξαγωγή ελαίου... Είσοδος και Έξοδος



Εικόνα 4. Απεικόνιση ποσοστών μετατροπής ελαιόκαρπου σε κύριο προϊόν και παραπροϊόντα

Η διαχείριση των παραπροϊόντων αυτών και κυρίως του κατσίγαρου, είναι ένα από τα μείζονα προβλήματα που προκύπτουν και χρήζει ιδιαίτερης προσοχής, καθώς η ανεξέλεγκτη εναπόθεση του προκαλεί προβλήματα στο οικοσύστημα, λόγω της τοξικότητάς του, του όξινου χαρακτήρα, του υψηλού οργανικού φορτίου καθώς και των φαινολών, οι οποίες δεσμεύουν το οξυγόνο και προκαλούν φαινόμενα ευτροφισμού. Επίσης, οι κοινές μέθοδοι επεξεργασίας είναι υψηλού κόστους. Λόγω αυτών των προβλημάτων και για τη συμμόρφωση με τους περιβαλλοντικούς κανονισμούς, έχουν διερευνηθεί διάφορες μέθοδοι επεξεργασίας σε όλο τον κόσμο. Ορισμένες συνήθειες μέθοδοι επεξεργασίας είναι φυσικές, όπως διήθηση ή φυγοκέντρωση, χημικές, όπως, οξείδωση ή προσρόφηση και βιολογικές, όπως βιοφίλτρα ή κατασκευασμένοι υγρότοποι. Στην Ελλάδα, η πιο κοινή χρησιμοποιούμενη μέθοδος για τη διαχείριση OMWW είναι αυτή της λιμνοθάλασσας, κατά την οποία το απόβλητο ρίπτεται σε ανοικτές δεξαμενές εξατμισοδιαπνοής. Συνοδεύεται ωστόσο από ανεπιθύμητες παρενέργειες όπως δυσάρεστες οσμές, υπολειμματικά στερεά απόβλητα και περιβαλλοντική υποβάθμιση του εδάφους (Jaradat et al., 2018).

Για να λυθεί λοιπόν, το πρόβλημα ενός δύσκολα διαχειρίσιμου αποβλήτου όπως είναι ο κατσίγαρος, ένα επιθυμητό μέσο είναι οι μονάδες φυσικής επεξεργασίας και ειδικότερα οι τεχνητοί υγροβιότοποι (Constructed Wetlands - CWs). Αποτελούν μία λύση φιλική προς το περιβάλλον, βιώσιμη, με χαμηλό σχετικά με άλλες μεθόδους κόστος, καθώς μιμούνται τον τρόπο λειτουργίας φυσικών υγροβιότοπων. Ειδικότερα, συνδυάζουν φυσικές διεργασίες (καθίζηση, προσρόφηση, διήθηση, κ.ά.), χημικές (οξείδωση, κ.ά.) και βιολογικές (νιτροποίηση, απονιτροποίηση, βιοαποδόμηση, κ.ά.).

Κεφάλαιο 2°. Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1. Φυσικά Συστήματα Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων

Όλη η διαχείριση υγρών λυμάτων βασίζεται σε φυσικές διαδικασίες κατά τους (Crites et al., 2014) όπως είναι η καθίζηση που οφείλεται στη βαρύτητα ή η βιολογική αποδόμηση λόγω μικροοργανισμών. Ένα φυσικό σύστημα ωστόσο μπορεί να είναι ενεργοβόρο καθώς συχνά αποτελείται από αντλίες και σωληνώσεις για μεταφορά και διανομή των λυμάτων. Οι χρήσεις γης ήταν η πρώτη φυσική τεχνολογία διαχείρισης που ανακαλύφθηκε, ακολουθήθηκαν και οι λίμνες εναποθέσης (lagooning).

2.1.1. Φυσικοί Υγροβιότοποι

Οι φυσικοί υγροβιότοποι είναι ημι- υδάτινα συστήματα με ελεύθερη ροή επιφανειακών υδάτων. Σε αυτά περιλαμβάνονται και οι περιθωριακές λίμνες, εκτεταμένα συστήματα φρεατίων και βάλτοι σε πλημμυρικές πεδιάδες. Κοινή βλάστηση που τα χαρακτηρίζει είναι και η φυσικά αναδυόμενη, όπως λόγου χάρη *Phragmites australis*, *Cyperus papyrus*, *Typha spp.*, *Scirpus spp.* Τα εδάφη πλούσια σε οργανικές ουσίες σε συνδυασμό με τις ανοξικές συνθήκες των στάσιμων νερών προωθούν τη φυσιολογική απομάκρυνση ρύπων από τα λύματα. Ειδικότερα, τα φυτά δεσμεύουν το N και τον P από το νερό και το έδαφος. Η πυκνότερη βλάστηση εξασφαλίζει την αργή κίνηση της εισροής των λυμάτων, επιτρέποντας τη διήθηση και την καθίζηση των σωματιδίων. Η πλειονότητα τέτοιου τύπου συστημάτων υπάρχει ως μέρος μεγαλύτερων συστημάτων ύδρευσης που καταλήγουν είτε σε λεκάνες απορροής είτε σε παράκτιες ζώνες λιμνών και ποταμών, οπότε το νερό έχει μια διαρκή εκροή έξω από τον υγροβιότοπο.

Παρακάτω παρατίθεται ένας πίνακας με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των φυσικών υγροβιότοπων (Kaggwa, 2006).

Πίνακας 2.1. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα φυσικών υγροτόπων

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας (τροφοδοσία από τη βαρύτητα)	Πιθανός βιότοπος κουνουπιών
Αποδοτικό σε διακυμάνσεις του φορτίου	Ασταθής ρυθμοί επιφανειακής ροής (πιθανότητα flush-through σε βροχερές περιόδους)
Δεν απαιτείται συλλογή βιομάζας	Μπορεί να επηρεαστεί η αποτελεσματικότητα του από τις γύρω περιοχές και δραστηριότητες (π.χ. ανεξέλεγκτες απορρίψεις, αποψίλωση βλάστησης, κλπ)
Βελτιωμένη απομάκρυνση P ($<1 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$ TP)	

2.1.2. Τεχνητοί Υδροβιότοποι

Οι τεχνητοί υδροβιότοποι (ΤΥ) είναι συστήματα επεξεργασίας που έχουν σχεδιαστεί και κατασκευαστεί για να αξιοποιούν φυσικές διεργασίες συνδυάζοντας την βλάστηση, τα διάφορα υλικά πλήρωσης και τα σχετικά μικροβιακά σύνολα. Στην πραγματικότητα, μιμούνται τις διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα στους φυσικούς υδροβιότοπους, απλά υπό το καθεστώς ενός πιο ελεγχόμενου περιβάλλοντος. Σκοπός των περισσότερων ΤΥ είναι η επεξεργασία λυμάτων, ενώ άλλα έχουν σχεδιαστεί για περισσότερες χρήσεις όπως για την επαναχρησιμοποίηση του νερού, την δημιουργία και την αποκατάσταση υδροτόπου άγριας ζωής. Πολλά από τα οφέλη τους είναι και η επιλογή τοποθεσίας, η ευελιξία ως προς το μέγεθος, οι ελεγχόμενες υδραυλικές διαδρομές και ο χρόνος συγκράτησης.

Οι ρύποι σε τέτοιου είδους συστήματα αφαιρούνται μέσα από φυσικές, χημικές και βιολογικές διαδικασίες. Ειδικότερα, γίνεται λόγος για καθίζηση, προσρόφηση, αφομοίωση από τον φυτικό ιστό και μικροβιακούς μετασχηματισμούς (Vymazal, 2008). Οι τεχνητοί υδροβιότοποι παρουσιάζουν τα ακόλουθα πλεονεκτήματα συγκριτικά με τις συμβατικές μεθόδους επεξεργασίας υγρών λυμάτων. Αρχικά, το κόστος κατασκευής, λειτουργίας και συντήρησης είναι ελάχιστο. Δεύτερον, η επεξεργασία των λυμάτων είναι αποτελεσματική και φιλική προς το περιβάλλον. Τέλος, έχουν τη δυνατότητα ευέλικτης φόρτισης (μικροί ή μεγάλοι όγκοι λυμάτων) από διαφορετικά επίπεδα ρύπων. (Milke et al., 2020).

Ιστορικά, η μελέτη για τους υδροβιότοπους ξεκίνησε την δεκαετία του '50 από Γερμανούς ερευνητές. Μετά από περίπου μια εικοσαετία και αφού έχει εφαρμοστεί ο νόμος για το καθαρό νερό -Clean Water Act, 1972- από τις ΗΠΑ, η Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος αρχίζει να αξιολογεί την ποιότητα του νερού σε μερικούς από τους 324 υδροτόπους που δέχονται λύματα. Ο πρώτος πλήρως κατασκευασμένος υδροτόπος κάνει την εμφάνισή του το 1973 στο Brookhaven της Νέας Υόρκης.

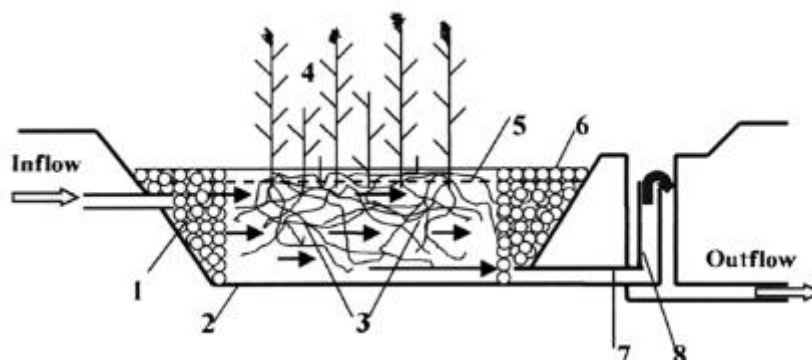
Οι ΤΥ χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: (α) Ελεύθερης Επιφανειακής Ροής (FWS) και (β) Υποεπιφανειακής Ροής (SSW). Στα FWS το νερό κινείται πάνω από τη ζώνη της ρίζας, μέσα από τους μίσχους των φυτών, ενώ στα SSW κινείται οριζόντια ή κάθετα μέσω της ριζικής ζώνης των φυτών. Οι υδροβιότοποι υποεπιφανειακής ροής χωρίζονται περαιτέρω σε δύο άλλες υποκατηγορίες. Η βασική διαφορά τους είναι η θέση του νερού κατά την επεξεργασία και έτσι διακρίνονται σε: (α) Οριζόντιας Ροής (HF), και (β) Κατακόρυφης Ροής (VF). Σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται υβριδικά συστήματα που συνδυάζουν τους δύο τύπους υπόγειας ροής (HF & VF), ώστε να μειωθεί το οργανικό φορτίο και να απομακρυνθούν τα θρεπτικά συστατικά και άλλοι ρύποι σε μεγαλύτερα ποσοστά. Αξίζει να σημειωθεί ότι και στα δύο συστήματα η οργανική ύλη και το άζωτο (N) απομακρύνονται βιολογικά, εν αντιθέσει με τον φώσφορο (P) που προσροφάται στο έδαφος.

Η απόδοση των ΤΥ εξαρτάται από τα πληρωτικά υλικά, τον επιλεγμένο τύπο βλάστησης και τις υδρολογικές συνθήκες. Άρα, σύμφωνα με τις απαιτήσεις αλλά και τα χαρακτηριστικά του αποβλήτου θα πρέπει να επιλέγονται οι κατάλληλοι παράμετροι σχεδιασμού. Οι παράμετροι υπολογισμού της υδραυλικής φόρτισης είναι ο τύπος των ρύπων που πρέπει να απομακρυνθούν, η συγκέντρωσή τους στο λύμα και οι απαιτήσεις απόρριψης στον εκάστοτε αποδέκτη (Phillips, 1997).

2.1.2.1. Οριζόντιας Ροής ΤΥ

Ο πρώτος οριζόντιας ροής ΤΥ ξεκίνησε να λειτουργεί στη Γερμανία τη δεκαετία του '60 από τον Käthe Seidel. Με την πάροδο του χρόνου και όσο προχωράνε οι μελέτες για τέτοιου είδους συστήματα, βρίσκουν ένα ευρύτερο φάσμα εφαρμογής. Σήμερα, χρησιμοποιούνται για να διαχειριστούν κατά κόρων αστικά λύματα αλλά και γεωργικά, βιομηχανικά, πετρελαιοειδή, ελαιουργικά, κ.ά.

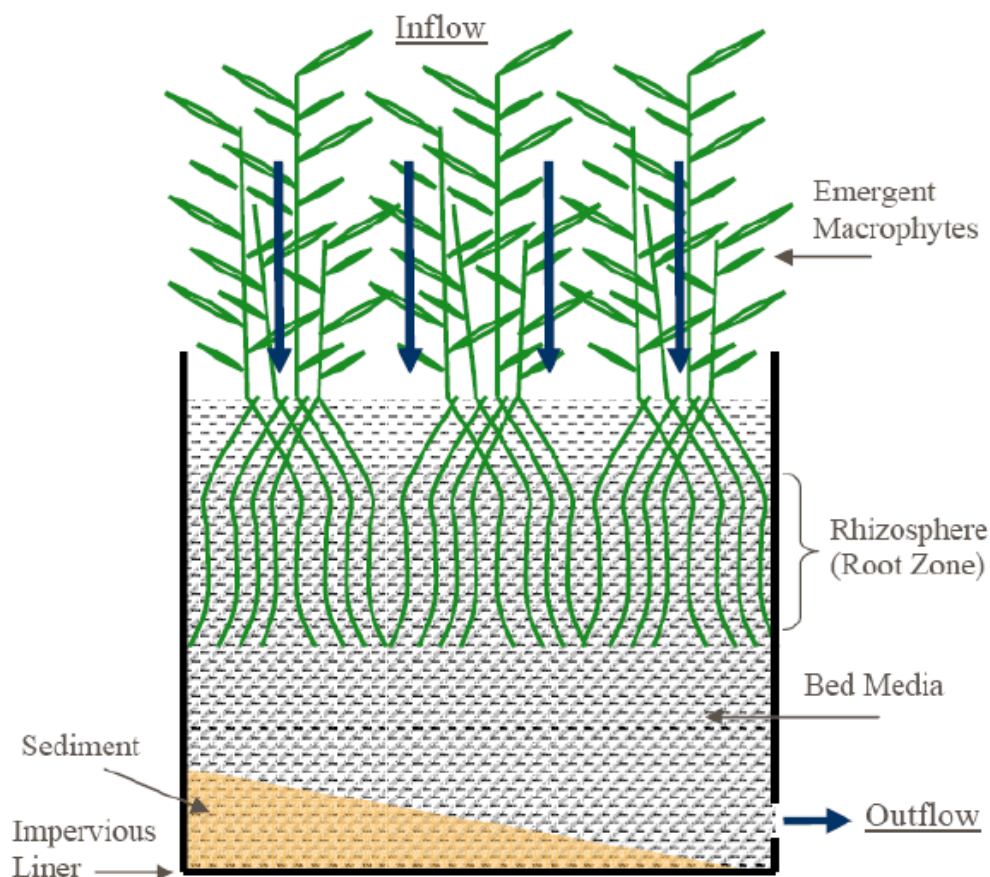
Η τροφοδοσία γίνεται από την είσοδο οριζοντίως της κλίνης και το λύμα ρέει με αργό ρυθμό μέσα από το πορώδες, αερόβιων, ανοξικών και αναερόβιων ζωνών (Vymazal, 2009).



Εικόνα 3. ΤΥ οριζόντιας ροής (Vymazal, 2009)

2.1.2.2. Κατακόρυφης Ροής ΤΥ

Οι υγροβιότοποι αυτής της κατηγορίας αποτελούνται από κλίνες των οποίων η ροή στο σύστημα είναι κατακόρυφης διεύθυνσης και ευθύνεται στη βαρύτητα, ενώ η εφαρμογή του λύματος γίνεται με κατάκλιση πιέζοντας προς τα κατώτερα στρώματα αέρα παγιδευμένου στους πόρους (Stefanakis et al., 2014). Το υγρό απόβλητο έρχεται σε επαφή με το πληρωτικό υλικό και το ριζικό σύστημα της βλάστησης και έπειτα στραγγίζεται και συλλέγεται απαλλαγμένο από υψηλά φορτία ρύπων (Stefanakis et al., 2014).



Εικόνα 4. ΤΥ κάθετης ροής (Kela P Weber, 2008)

2.1.3. ΤΥ με πληρωτικό υλικό leca

Η διογκωμένη άργιλος (leca) χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο ως υλικό πλήρωσης για τεχνητούς υδροβιότοπους. Υποστηρίζει τις φυσικές αλλά και βιολογικές διεργασίες καθαρισμού που λαμβάνουν χώρα στα ΤΥ.

Ο κύκλος ζωής της leca, μεταξύ άλλων κάνει λόγο για την ζήτηση ενέργειας παραγωγής της, την επαναχρησιμοποίηση αλλά και την ανάκτηση από τεχνητούς υδροβιότοπους που έχει χρησιμοποιηθεί.

Ένα κομμάτι που δεν έχει ερευνηθεί αρκετά ως τώρα είναι και η μοίρα των υποστρωμάτων μόλις φτάσουν στο επίπεδο του κορεσμού. Πολλοί υποστηρίζουν πώς η leca θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως λίπασμα P ή αβαστοποιητικό εδάφους για όξινα εδάφη. Άλλοι καταρρίπτουν αυτή τη θεωρία λόγω του ότι η κορεσμένη leca μπορεί να μην απελευθερώνει βραχυπρόθεσμα P στο έδαφος (Mlih et al., 2020b).

Η leca ως υλικό υποστρώματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε μόνη είτε σε συνδυασμό με άλλα υλικά. Συνήθως, χρησιμοποιείται ως το ανώτερο τμήμα τέτοιων συνδυασμών για την απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών και την

ενίσχυση ανάπτυξης νιτροποιητικών μικροοργανισμών (Almeida et al., 2017). Ωστόσο, χρησιμοποιώντας την ως κατώτερο υπόστρωμα, καθυστερείται η απόφραξη.

Μερικά από τα χαρακτηριστικά της είναι η ικανότητα αφαίρεσης φωσφορικών αλάτων, η υδραυλική αγωγιμότητα, η υποστήριξη ριζικού συστήματος και η ανάπτυξη βιοφίλμ (Mlih et al., 2020b).

Ακόμη, οι επιδόσεις της στους υγροβιότοπους εξαρτώνται σημαντικά από τη θερμοκρασία και για χώρες όπως είναι η Ελλάδα, με ζεστό κλίμα, είναι ευνοϊκές. Παρατηρήθηκε πώς μείωση θερμοκρασίας νερού από 20 °C σε 5 °C, είχε την ανάλογη μείωση στην ικανότητα προσρόφησης από 64% σε 24% (Zhu et al., 1997).

2.2. Φυσικοί VS Τεχνητοί Υγροβιότοποι

Η υδρολογία των τεχνητών υγροβιότοπων ρυθμίζει την δομή και τη λειτουργία τους και καθορίζεται από τη συχνότητα, το χρόνο, το βάθος και τη διάρκεια της πλημμύρας. Η φόρτιση αλλάζει κυρίως εποχιακά, διότι οι ανάγκες είναι περισσότερες το καλοκαίρι. Εν αντιθέσει οι φυσικοί υγροβιότοποι έχουν να διαχειριστούν υπέρογκες ποσότητες νερού όλο το χρόνο. Οπότε, η κύρια διαφορά τους είναι η υδραυλική φόρτιση. Εκτός από αυτήν βέβαια, διαφέρουν και ως προς την επιλογή του υποστρώματος στους τεχνητούς υγροβιότοπους ώστε να έχουμε την καλύτερη δυνατή υδραυλική κίνηση. Επιπρόσθετα, μία άλλη διαφορά είναι και η βιοποικιλότητα. Παρόλο που στα φυσικά συστήματα υπερέχουν κυρίως ένα ή δύο είδη μακρόφυτων, μπορεί να υποστηριχθεί πώς η ποικιλότητα σε πολλά άλλα είναι τεράστια. Κάτι τέτοιο δεν γίνεται στα τεχνητά συστήματα, καθώς επιλέγονται συστάδες μεμονωμένων ειδών (Gopal, 1999).

2.3. Βλάστηση ΤΥ

Γενικά τα συστήματα των υγροβιότοπων (φυσικών ή τεχνητών) φυτεύονται από βλάστηση που ευδοκimeί κατά τη διάρκεια της χρήσης τους και προσδίδει πλεονεκτήματα στον τρόπο με τον οποίο γίνεται η επεξεργασία και η απομάκρυνση της οργανικής ύλης καθώς και των θρεπτικών συστατικών. Τα φυτά των υγροβιότοπων ποικίλουν και αποτελούν συνάμα μία αρκετά σημαντική παράμετρο για τις διαδικασίες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων.

Τα υδρόβια φυτά που παρουσιάζουν μεγάλη ανάπτυξη σε περιοχές με μερική ή εξ ολοκλήρου κάλυψη από νερό ονομάζονται μακρόφυτα. Τα μακρόφυτα χωρίζονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες:

- (i) Αναδυόμενα υδρόβια μακρόφυτα
Αυτή είναι η επικρατέστερη κατηγορία μακρόφυτων που χρησιμοποιείται στα CWS. Η ανατομία των φυτών αυτών τα βοηθάει να

αναπτύσσονται σε υπόστρωμα νερού, λόγω των χώρων αέρα στο εσωτερικό τους, ώστε να γίνεται η μεταφορά του οξυγόνου στις ρίζες και τα ριζώματα. Σε αυτή την κατηγορία ανήκει το κοινό καλάμι *Phragmites australis*.



Εικόνα 14. Βλάστηση *P. australis* (Wikispecies)

- (ii) Υδρόβια μακρόφυτα με πλωτά φύλλα
Αυτή η μορφή ζωής περιλαμβάνει είδη που έχουν ρίζες στο υπόστρωμα και είδη που επιπλέουν ελεύθερα στην επιφάνεια.
- (iii) Βυθισμένα υδρόβια μακρόφυτα
Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν τα φυτά των οποίων ο φωτοσυνθετικός ιστός είναι πλήρως βυθισμένος, ενώ τα λουλούδια τους είναι εκτεθειμένα στην ατμόσφαιρα.

Η παρουσία μακρόφυτων σε τέτοιου τύπου οικοσυστήματα (CWs), λειτουργεί θετικά. Παρά το γεγονός πως η μεγαλύτερη απομάκρυνση επιτυγχάνεται από φυσικές και μικροβιακές διεργασίες, ο ρόλος που διαδραματίζουν είναι καταλυτικός (Brix, 2003).

Μερικά από τα οφέλη είναι κυρίως η άμεση πρόσληψη των θρεπτικών συστατικών (N, P, S) και των ρύπων, η παροχή οξυγόνου στις ρίζες των φυτών, η διατήρηση της θερμοκρασίας κυρίως την περίοδο του χειμώνα, η μείωση της ταχύτητας του ανέμου ώστε να μην υπάρξει επαναιώρηση στερεών. Ακόμη, αξίζει να σημειωθεί και η αισθητική παρέμβαση της φύτευσης. Τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα φυτά είναι οι *Typha angustifolia*,

P. australis καθώς επίσης διαφορετικοί τύποι γρασιδιού και βούρλου. (Jethwa et al., 2016).

Όσον αφορά στις ιδιότητες των φυτών ώστε να κριθούν κατάλληλα για φύτευση τέτοιων συστημάτων, αρκεί να πληρούνται οι κάτωθι προϋποθέσεις.

1. Αφομοίωση στον περιβάλλοντα οικολογικό χώρο. Να μην δημιουργηθούν δηλαδή οικολογικές αναταράξεις (ζιζάνια, ασθένειες φυτών, κλπ) στα γύρω φυσικά οικοσυστήματα.
2. Αντοχή στο τοπικό κλίμα. Θα πρέπει το φυτό να μπορεί να αναπτυχθεί σε περιοχές με δεδομένες κλιματικές συνθήκες και γοργά.
3. Αντοχή σε ρύπους και υπερτροφικές συνθήκες υδάτινων υποστρωμάτων.
4. Υψηλά ποσοστά απομάκρυνσης ρύπων, είτε αυτό επιτυγχάνεται με την αφομοίωση είτε με την αποθήκευση (άμεση επιρροή) είτε με το μετασχηματισμό σε άλλες μορφές λόγω μικροβιακών δραστηριοτήτων (έμμεση επιρροή) (Sundaravadivel and Vigneswaran, 2001).

Πίνακας 2.2. Φυσικά χαρακτηριστικά *P. australis* (Sundaravadivel and Vigneswaran, 2001)

Χαρακτηριστικά <i>P. australis</i>	
Υψηλή ανάπτυξη και μάζα	[max: 6 m]
Διακυμάνσεις διαμέτρου	[4- 10 mm]
Μεσογονάτια κοίλα	[10- 25 cm]
Εκτεταμένο σύστημα ριζώματος	
Αερεγχυματώδης ιστός ριζώματος	
Μέση διάρκεια ζωής ριζώματος	6 χρόνια
Ακτίνα ριζώματος	[max: 10 m]
Λείο φύλλωμα	
Μήκος φύλλων	[20- 70 cm]
Πλάτος φύλλων	[1- 5 cm]

2.4. Υγρά Απόβλητα Ελαιτριβείου

Τα υγρά απόβλητα ελαιουργείων (ΥΑΕ) αποτελούνται κυρίως από νερό βλάστησης ελαιοκάρπου (πάνω από το 50% του καρπού) και νερό που προστίθεται κατά τη διαδικασία εκχύλισης. Η σύνθεση των ΥΑΕ επηρεάζεται από την ποικιλία και την ωριμότητα των ελιών και από το σύστημα που χρησιμοποιείται για την επεξεργασία τους (μύλοι πίεσης ή φυγοκέντρησης). Στην τριφασική επεξεργασία παράγονται διπλάσιες ποσότητες ΥΑΕ από την ποσότητα ελαιολάδου (Bottino et al., 2020).

Η πιο κοινή μέθοδος διαχείρισης υγρών αποβλήτων ελαιουργείων για την Ελλάδα είναι η εναπόθεση σε λιμνοδεξαμενές με σκοπό την καλοκαιρινή εξάτμιση.

2.4.1. Νομοθετικό Πλαίσιο

Στην Ελλάδα μέχρι το 1987 τα υγρά απόβλητα ελαιουργείων διοχετεύονταν ανεξέλεγκτα σε φυσικούς αποδέκτες (κυρίως σε χείμαρρους ή στη θάλασσα). Έτσι, μετά από τα προβλήματα που δημιουργήθηκαν από αυτές τις ενέργειες αποφασίστηκε πώς πρέπει να υποβληθούν σε κατάλληλη επεξεργασία πρωτού απορριφθούν στο περιβάλλον, ειδικά για νησιά με τουριστική προοπτική.

Σύμφωνα με την (ΚΥΑ) με αριθ. 127402/ 1487/ Φ15/1 -12-2016 (ΦΕΚ Β/ 3924) οι ελαιοτριβείς μπορούν είτε να κατασκευάσουν εδαφοδεξαμενές για την αποθήκευση και εξάτμιση των υγρών αποβλήτων τους, είτε να τα συγκεντρώνουν σε κλειστές δεξαμενές και από εκεί να τα κατευθύνουν για υδρολίπανση καλλιεργειών, είτε να συνδυάσουν και τις δύο μεθόδους. Εξακολουθούν να είναι επιτρεπτές οι μέθοδοι όπως η διάθεση των υγρών αποβλήτων σε άλλες επιχειρήσεις που τα χρησιμοποιούν ως πρώτη ύλη για την παραγωγή πολυφαινολών, βιοαερίου, κόμποστ ή άλλη χρήση. Ακόμη, σύμφωνα με την αριθ. 145116/ 2011 ΚΥΑ (ΦΕΚ Β 354), κάθε επεξεργασία που καθιστά τα απόβλητα κατάλληλα για επαναχρησιμοποίηση για άρδευση ή εμπλουτισμό υπόγειων υδάτων είναι επιτρεπτή.

Η (ΚΥΑ) 179182/656 (ΦΕΚ 582/2-7-1979), ορίζει για τα ελαιοτριβεία ως ποιοτικές παραμέτρους τακτικής εξέτασης τα εξής: BOD₅, COD, αιωρούμενα στερεά, pH, χρώμα, έλαια. Παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας που συγκεντρώνει τις οριακές τιμές ΥΑΕ για διάφορους αποδέκτες από την ΕΛΙΝΥΑΕ.

Πίνακας 2.3. Οριακές τιμές εκροών για διάφορους αποδέκτες (σύμφωνα με ΚΥΑ 179182/656, ΦΕΚ 582/2-7-1979)

Παράμετροι	Διάθεση σε επιφανειακά νερά	Διάθεση στη θάλασσα	Διάθεση στο αποχετευτικό
pH	6-9	6-9	6-9
BOD ₅ (mg/ L)	40	40	500
COD (mg/ L)	120	120	1000
TSS (mg/ L)	40	50	500
Λίπη και έλαια (mg/ L)	5	5	40
Φαινόλες (mg/ L)	0.5	0.5	5

2.. Στόχος Διπλωματικής Εργασίας

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η μελέτη της αποτελεσματικότητας των κατακόρυφων πιλοτικών μονάδων ΤΥ στη διαδικασία απομάκρυνσης οργανικών ρύπων και θρεπτικών συστατικών από υγρό απόβλητο τριφασικού ελαιουργείου των Χανίων. Η σπουδαιότητα της μελέτης αυτής, βασίζεται στην ανάγκη ανάπτυξης μιας νέας πιο φιλικής προς το περιβάλλον τεχνολογίας για την διαχείριση ενός αρκετά ρυπογόνου λύματος τεράστιας παραγωγής για τη χώρα, που υποβαθμίζει την ποιότητα του περιβάλλοντος.

Κεφάλαιο 3°. Πειραματικό Μέρος

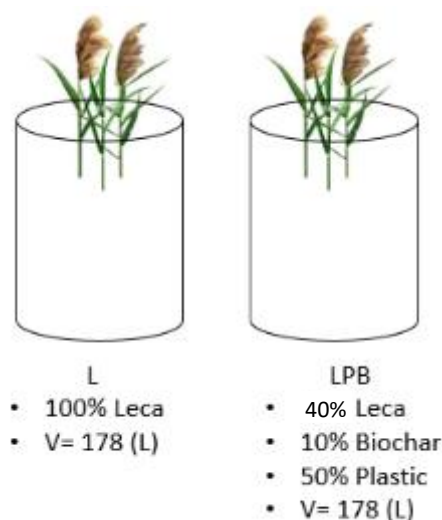
3.1. Πειραματική Διάταξη

3.1.1. Περιγραφή Πειραματικής Διάταξης

Στην εργασία εξετάζονται δύο πιλοτικές μονάδες ΤΥ κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής, που επεξεργάζονται υγρό απόβλητο τριφασικού ελαιουργείου των Χανίων. Χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικές κλίνες κυκλικής διατομής με τα εξής χαρακτηριστικά:

- Δεξαμενή Leca (L): μήκος 55 cm x πλάτος 89 cm x ύψος 82 cm
- Δεξαμενή Leca, Plastic, Biochar (LPB): μήκος 50 cm x πλάτος 95 cm x ύψος 82 cm

Τα μέσα πλήρωσης για την πρώτη κλίνη είναι 100% leca (διογκωμένη άργιλος), ενώ για τη δεύτερη 40% leca, 50% ανακυκλωμένο πλαστικό (HDPE) και 10% βιοεξανθράκωμα (biochar). Για την φύτευση και των δύο δεξαμενών επιλέχθηκε το κοινό καλάμι *Phragmites Australis* (*P. Australis*).



Εικόνα 5. Σχηματική απεικόνιση πειραματικής διάταξης

Οι όγκοι φόρτισης ημερησίως επιλέχθηκαν να είναι $V = 5 \text{ L}$ (τέλος Φεβρουαρίου – αρχές Ιουλίου) και $V = 10 \text{ L}$ (αρχές Ιουλίου – τέλος Σεπτεμβρίου).

Για τους όγκους ισχύει: $V_L = \text{όγκος δεξαμενής} \times \text{πορώδες υλικού} = 178 \text{ L} \times 53\% = 94.3 \text{ L}$ και $V_{LPB} = 178 (0.53 \times 0.40 + 0.94 \times 0.5 + 0.66 \times 0.1) = 133.1 \text{ L/d}$. Άρα,

προκύπτουν δύο υδραυλικοί χρόνοι παραμονής: $HRT_1 = \frac{V_L}{Q} = \begin{cases} 18 \text{ d} \left(\text{για } 5 \frac{L}{d} \right) \\ 9 \text{ d} \left(\text{για } 10 \frac{L}{d} \right) \end{cases}$ και

$$HRT_2 = \frac{V_{LPB}}{Q} = \begin{cases} 26 \text{ d} \left(\text{για } 5 \frac{L}{d} \right) \\ 13 \text{ d} \left(\text{για } 10 \frac{L}{d} \right) \end{cases}$$

Στο πείραμα αυτό, η φόρτιση COD ισούται με $0.05 \frac{\text{kg COD}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}}$ για την L και $0.06 \frac{\text{kg COD}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}}$ για την LPB (τέλος Φεβρουαρίου – αρχές Ιουλίου) και $0.09 \frac{\text{kg COD}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}}$ για την L και $0.12 \frac{\text{kg COD}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}}$ για την LPB (αρχές Ιουλίου – τέλος Σεπτεμβρίου).



Εικόνα 6. Μονάδα L (αριστερά) & LPB (δεξιά)

Η φόρτιση του λύματος στις κλίνες καθώς και η συλλογή των εκροών, γίνεται χειρωνακτικά. Για την επίτευξη φυσικής ροής και την ευκολία του λύματος προς την έξοδο υπάρχει μια κλίση πυθμένα 1%. Κάθε κλίνη επίσης, διαθέτει έναν εύκαμπτο εξωτερικό σωλήνα από το επίπεδο του πυθμένα μέχρι το σημείο εκροής της δεξαμενής για τη διατήρηση της στάθμης εντός της δεξαμενής, οδηγώντας το επεξεργασμένο λύμα εντός ενός δοχείου συλλογής.



Εικόνα 7. Εισροή με αναλογία αραιώσης 1:8

3.1.2. Χωροθέτηση Πειραματικής Διάταξης και Κλιματολογικά Στοιχεία

Οι πιλοτικές δεξαμενές εγκαταστάθηκαν στο Πολυτεχνείο Κρήτης και συγκεκριμένα στον υπαίθριο χώρο της σχολής ΧΗΜΗΠΕΡ (θερμοκήπιο). Οι εργαστηριακές αναλύσεις γίνονταν στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος της ίδιας σχολής.



Εικόνα 8. Μονάδες υδροβιότοπων στο Πολυτεχνείο Κρήτης (Σεπτέμβριος 2023)

Στοιχεία για τις κλιματικές συνθήκες που επικράτησαν καθόλη τη διάρκεια των αναλύσεων, ελήφθησαν από τον μετεωρολογικό σταθμό *Chania (LG25)* που βρίσκεται εντός της Πολυτεχνειούπολης, σε υψόμετρο 137 m, σε κοντινή απόσταση από τον χώρο όπου βρίσκονταν οι δεξαμενές. Το πείραμα ξεκίνησε τέλη Φλεβάρη του 2023 και διήρκεσε έως τέλη Σεπτέμβρη του 2023. Παρακάτω παρουσιάζεται συγκεντρωτικός πίνακας με τη μέση και μέγιστη θερμοκρασία, μέση και μέγιστη ταχύτητα του ανέμου, μέση βροχόπτωση και επικρατούσα διεύθυνση του ανέμου, για τους μήνες αυτούς.

Πίνακας 3.1. Μετεωρολογικά στοιχεία πεδίου
(<https://penteli.meteo.gr/stations/chania/>)

Μήνας	Μέση θερμοκρασία (°C)	Μέγιστη θερμοκρασία (°C)	Μέση βροχόπτωση (mm)	Μέση ταχύτητα ανέμου (km/ h)	Μέγιστη ταχύτητα ανέμου (km/ h)	Επικρατούσα διεύθυνση ανέμου
Φεβρουάριος	10.9	24.6	0.604	10.7	70.8	ΝΔ
Μάρτιος	13.8	23.4	0.330	10.4	70.8	ΝΔ
Απρίλιος	15.7	27.9	0.284	8.9	57.9	ΝΔ
Μάιος	18.1	27.3	1.000	8.0	51.5	Α
Ιούνιος	22.9	32.2	0.340	3.9	37.0	ΒΒΔ
Ιούλιος	28.7	42.9	0.000	4.6	33.8	ΒΔ
Αύγουστος	27.1	37.1	0.000	6.6	43.5	Δ
Σεπτέμβριος	23.2	34.1	0.964	4.7	41.8	ΒΔ

3.1.3. Πειραματική Διαδικασία

Η διάρκεια του πειράματος ήταν 7 μήνες (Φεβρουάριος – Σεπτέμβριος 2023). Οι πιλοτικές μονάδες δεν ήταν προηγουμένως σε λειτουργία, καθώς στήθηκαν από την αρχή. Παρακάτω, θα παρατεθούν όλες οι φάσεις διεξαγωγής του πειράματος, αφού αποτελούν σημαντική παράμετρο για τη σωστή λειτουργία των συστημάτων (διασφάλιση ιδανικών συνθηκών) και την προσαρμογή των φυτών στις μονάδες.

▪ Κατασκευή Πιλοτικών Μονάδων

Ως πρώτο βήμα, χωροθετείται η πειραματική διάταξη κι επιλέγονται τα σημεία όπου θα φιλοξενηθούν οι ΤΥ. Ύστερα, γίνεται η πλήρωση των δεξαμενών. Επιλέγεται και για τις δύο η leca (διογκωμένη άργιλος), για την πρώτη σε ποσοστό 100% και για τη δεύτερη 40%. Στη δεύτερη, προστίθενται ακόμα και ανακυκλωμένο πλαστικό υψηλής πυκνότητας (HDPE) σε ποσοστό 50% και ένα 10% βιοεξανθράκωμα που προήλθε από αποτεφρωμένα κλαδιά ελιάς. Οι στρώσεις της δεύτερης δεξαμενής ξεκινώντας από την ελεύθερη επιφάνεια είναι leca, HDPE, biochar. Για τη βλάστηση επιλέχθηκαν ρίζες κοινού καλαμιού *P. Australis*, με πυκνότητα 7 ρίζες/ m². Τέλος, δόθηκε μία κλίση 1% και στις δύο δεξαμενές.

▪ Ωρίμανση – Σταθεροποίηση

Στο στάδιο αυτό, η βλάστηση προσαρμόζεται στο νέο περιβάλλον και αναπτύσσεται το ριζικό της σύστημα ούτως ώστε να της παρέχει τα

απαραίτητα συστατικά για την επιβίωση. Στο συγκεκριμένο πείραμα, αυτό το στάδιο κράτησε για περίπου ένα μήνα (μέσα Φεβρουαρίου – αρχές Μαρτίου 2023), όπου ως εισροή χρησιμοποιήθηκε η εκροή κατακόρυφων ΤΥ που επεξεργάζονταν πρωτοβάθμια εκροή από την Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων των Χανίων.



Εικόνα 9. Μονάδα LPB στο στάδιο της ωρίμανσης



Εικόνα 10. Μονάδα L στο στάδιο της ωρίμανσης

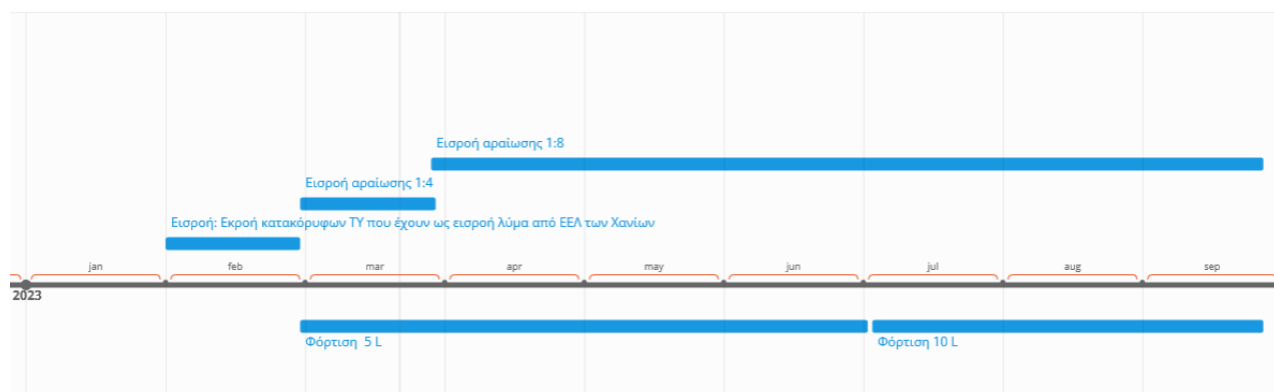
▪ *Έναρξη και Εκτέλεση του Πειράματος*

Σε αυτή τη φάση της πειραματικής διαδικασίας τα καλάμια έχουν προσαρμοστεί στους υδροβιότοπους και αρχίζει η φόρτιση τους με ΥΑΕ. Αρχικά, επιλέγεται η αραίωση 1:4 (1 μέρος ΥΑΕ και 3 μέρη νερού), η οποία εφαρμόστηκε από τα τέλη Φεβρουαρίου έως τα τέλη Μαρτίου, δηλαδή για τον πρώτο μήνα του πειράματος, ώστε να καλυφθεί σύντομα το πορώδες των δεξαμενών με το προς επεξεργασία απόβλητο. Στη συνέχεια, η αραίωση της εισροής ανήλθε στο 1:8 (1 μέρος ΥΑΕ και 7 μέρη νερού) ώστε να μην στρεσάρει τα φυτά. Η αραίωση αυτή παρέμεινε σταθερή μέχρι και το τέλος της εργασίας αυτής, δηλαδή για τους υπόλοιπους 6 μήνες.

Το καθεστώς φόρτισης έχει ως εξής: 1 μέρα φόρτιση & 2 μέρες ανάπαυση. Σε κάθε πότισμα μετρούνταν οι όγκοι των εκροών δημιουργώντας έτσι το ισοζύγιο νερού των συστημάτων. Οι δειγματοληψίες και οι εργαστηριακές αναλύσεις γίνονταν ανά 7 – 10 μέρες δημιουργώντας έτσι μια βάση δεδομένων.

Το αραιωμένο απόβλητο φυλάσσονταν σε δύο κυκλικές δεξαμενές. Η άντληση ανεπεξέργαστου ΥΑΕ, γίνονταν από τις δεξαμενές καθίζησης που βρίσκονταν στον υπαίθριο χώρο του θερμοκηπίου. Αναλύσεις για την αραιωμένη εισροή γίνονταν σε κάθε δειγματοληψία, ενώ για την ανεπεξέργαστη σε κάθε δεύτερη ή τρίτη μέτρηση. Ακόμη, επειδή η καθίζηση είναι μια φυσική διεργασία που συμβαίνει και στις δεξαμενές αραιωμένου αποβλήτου, οι φορτίσεις γίνονταν εναλλάξ μεταξύ των δύο δεξαμενών, ώστε να μην δημιουργούνταν μεγάλο στρώμα υποκείμενου υγρού και συνεπώς η φόρτιση σε στερεά να υπερέβαινε τα επιθυμητά όρια. Για αυτό το λόγο, μερικά εκατοστά από τον πυθμένα των δεξαμενών που ήταν πλούσια σε στερεά δεν εισάγονταν στους υδροβιότοπους αλλά απορρίπτονταν.

Τέλος, όσον αφορά στους όγκους των εισροών, επιλέχθηκαν να είναι 5 L ημερησίως από τον Φεβρουάριο έως και τον Ιούλιο (αρχές) και 10 L από τον Ιούλιο έως τον Σεπτέμβριο.



Εικόνα 11. Χρονοδιάγραμμα πειράματος

■ Ολοκλήρωση του Πειράματος

Μετά το πέρας 7 μηνών και εβδομαδιαίων δειγματοληψιών ολοκληρώθηκε η πειραματική διαδικασία, παρέχοντας ικανές μετρήσεις για την εξαγωγή ενός πρώτου συμπεράσματος όσον αφορά στη λειτουργία των τεχνητών αυτών υδροβιότοπων.

3.2. Δείγματα και Υλικά

3.2.1. Δείγμα

Το υγρό απόβλητο ελαιουργείου που χρησιμοποιήθηκε για το πείραμα προέρχεται από τριφασικό ελαιουργείο των Χανίων *KoukakisGroup*, στην περιοχή των Περιβολίων. Το απόβλητο συλλέχθηκε για την περίοδο παραγωγής ελαιολάδου από Οκτώβρη 2022 έως Γενάρη 2023. Δεν υπέστη καμία προεπεξεργασία και συλλέχθηκε όλο το υγρό κλάσμα που παρήχθη. Μεταφέρθηκε στον χώρο του Πολυτεχνείου και αποθηκεύτηκε σε δεξαμενές 1 m³.

3.2.2. Υλικά Πλήρωσης και Καλαμιές

3.2.2.1. Leca

Η leca, το οποίο είναι ακρωνύμιο για το lightweight expanded clay aggregate, είναι ψημένη άργιλος, της οποίας χαρακτηριστική είναι η απορροφητικότητα της, όπως δηλαδή και στον κλασικό πηλό. Παρασκευάζεται με θέρμανση του πηλού σε υψηλή θερμοκρασία (~1150 °C), με αποτέλεσμα να διαστέλλεται και να σχηματίζει μικρά, πορώδη σφαιρίδια ή μπάλες και μπορεί αυτό να την καθιστά μία ενεργοβόρα διαδικασία, όμως με μεγάλη αποδόση- 5 m³ διογκωμένης αργίλου παράγονται από 1 μόνο m³ συμβατικής αργίλου. Ένα από τα πλεονεκτήματα της ως υλικό πλήρωσης είναι το ουδέτερο της pH και η ανόργανη φύση της. Ακόμη, αξίζει να αναφερθεί πως δεν διασπάται και δεν συμπίεζεται με την πάροδο του χρόνου, καθιστώντας το κατάλληλο για μακροχρόνια χρήση. Ο τρόπος με τον οποίο παρέχει ενυδάτωση στα φυτά είναι ιδανικός, καθώς διαχέεται το νερό με αργό ρυθμό. Επιπροσθέτως, έχει χαμηλή πυκνότητα ($300 - 600 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$).



Εικόνα 12. Διογκωμένη άργιλος (<https://www.leca.com/product>)

Το πορώδες του διογκωμένου πηλού που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα, μετρήθηκε εργαστηριακά, με τιμή 53%.

3.2.2.2. Ανακυκλωμένο πλαστικό (HDPE)

Το HDPE είναι το ακρωνύμιο για το High Density Polyethylene, δηλαδή πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας. Είναι ένα είδος πλαστικού που κατασκευάζεται από πετρέλαιο και έχει ένα ευρύ φάσμα χρήσεων τόσο στη βιομηχανία (σωλήνες, υλικό πλήρωσης δεξαμενών, γεωμεμβράνες, κλπ) όσο και στην απλή καθημερινότητα (συσκευασία τροφίμων, μπουκάλια, παιχνίδια, κλπ). Εξαιτίας της μεγάλης αντοχής του στις ακτίνες UV, τον χαμηλό κίνδυνο έκπλυσης επιβλαβών χημικών ουσιών κι τις εξαιρετικές ιδιότητες φραγμού υγρασίας, κρίνεται ιδανικό για πειράματα εξωτερικού τύπου, όπως είναι και οι τεχνητοί υδροβιότοποι.

Ως θερμοπλαστικό υλικό, πάνω από μία συγκεκριμένη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (T_g) γίνεται εύπλαστο κι μπορεί να μετατραπεί σε άλλες μορφές πλαστικού αρκετές φορές, χωρίς να υποβαθμιστεί σημαντικά η ποιότητα του. Έτσι, είναι ανακυκλώσιμο που σημαίνει πως μειώνει τον όγκο των αποβλήτων στην πηγή.

Για το πείραμα, χρησιμοποιήθηκαν δύο μεγέθη ανακυκλωμένου HDPE, HX38 Biocarrier και HX25KLL Biocarrier που παρέχονται από την Εταιρία Christian Stöhr GmbH & Co. KG. Το πορώδες και των δύο πολυαιθυλενίων που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα, μετρήθηκε εργαστηριακά, με τιμή 94%.



Εικόνα 13. Ανακυκλωμένο πλαστικό HX38 Biocarrier

3.2.2.3. Βιοεξανθράκωμα

Το βιοεξανθράκωμα (biochar) του παρόντος πειράματος είναι προϊόν πυρόλυσης κλαδιών ελιάς του Πολυτεχνείου Κρήτης. Τα παράγωγα της πυρόλυσης ήταν: bio-oil (υγρό), biochar (στερεό) και μη-συμπυκνώσιμο αέριο. Για την παραγωγή του αρχικά ξεχωρίστηκαν φύλλα και παρακλάδια και ύστερα τα κλαδιά τεμαχίστηκαν σε διαμέτρους 2 – 3 cm. Ακολούθησε η απομάκρυνση της υγρασίας τους στο φούρνο ξήρανσης του εργαστηρίου (100 °C για 48 h). Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η πυρόλυση τους σε φούρνο σιγαστήρα στους 450 °C για 1 h, κάτω από σταθερή παροχή N_2 με ρυθμό 200 L/ h. Τέλος, αποθηκεύτηκαν στον ξηραντήρα μέχρι να τοποθετηθούν στους τεχνητούς υδροβιότοπους. Το πορώδες του βιοεξανθρακώματος μετρήθηκε εργαστηριακά και είναι 66%.

Το βιοεξανθράκωμα ως πληρωτικό μέσο αποτελεί μία ιδανική λύση, αφού βοηθά στην ανάπτυξη των φυτών, ενισχύει την απομάκρυνση του αζώτου κατά τουλάχιστον 20% και μειώνει τα αέρια του θερμοκηπίου των ΤΥ (Deng, Chen and Chang, 2021). Αυτά τα οφέλη μπορούν να αποδοθούν στις ικανότητες του biochar να προσροφά πολλούς ρύπους και να ευνοεί την ύπαρξη των λειτουργικών μικροβίων. Χαρακτηριστική είναι και η δέσμευση μετάλλων και η εξουδετέρωση της οξύτητας (Chen et al., 2021).

3.2.2.4. Βλάστηση

Για την φύτευση των δεξαμενών του δεδομένου πειράματος, επιλέχθηκε το κοινό καλάμι *P. australis*, του γένους *Phragmites*. Τα προσαρμοστικά χαρακτηριστικά αυτού του φυτού, το κάνουν να υπερέχει ως επιλογή. Οι πρόσθετοι λόγοι για τους οποίους επιλέχθηκε το συγκεκριμένο είδος είναι η μεγάλη αντοχή του σε ακραία καιρικά φαινόμενα (μεγάλο γεωγραφικό εύρος), η ταχεία ανάπτυξη του. Το *P. australis*, είναι ένα φυτό που συναντάται και σε τοπικούς υγροβιότοπους των Χανίων, δίνοντας του έτσι το προβάδισμα ότι έχει δοκιμαστεί σε ανάλογες συνθήκες και έτσι μπορεί να αποτελέσει μια σχετικά ασφαλή επιλογή βλάστησης, ώστε το πείραμα να είναι επιτυχές. Παρακάτω παρατίθεται πίνακας με χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης βλάστησης κατά τους (Milke et al., 2020).

3.3. Αναλυτικές Μέθοδοι

Για το περιγραφόμενο πείραμα πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για το pH, EC, COD, BOD₅, TN, NH₄⁺-N, NO₃⁻-N, TP, PO₄³⁻-P, TSS, το χρώμα και τις ολικές φαινόλες, στις εκροές, στην αραιωμένη εισροή αλλά και στην ανεπεξέργαστη. Αυτοί οι παράμετροι είναι απαραίτητοι για την αξιολόγηση της λειτουργίας των ΤΥ αλλά και το χαρακτηρισμό των εκροών για την καταλληλότητά τους για διάθεση στο περιβάλλον.

3.3.1. pH

Το pH ορίζεται ως ο αρνητικός δεκαδικός λογάριθμος της συγκέντρωσης οξωνίων. Η μέτρηση του pH γίνεται χρησιμοποιώντας πεχάμετρο της εταιρείας *CRISON microPH 2002* με ηλεκτρόδιο υάλου. Πριν την οποιαδήποτε μέτρηση pH, χρειάζεται πρώτα η βαθμονόμηση του πεχαμέτρου, η οποία γίνεται ακολουθώντας συγκεκριμένα βήματα και κάνοντας χρήση δύο ρυθμιστικών διαλυμάτων: ένα όξινο (pH= 4) και ένα ουδέτερο (pH= 7). Βυθίζοντας το ηλεκτρόδιο υάλου στα δείγματα, καταγράφονται οι τιμές pH.

3.3.2. Ηλεκτρική Αγωγιμότητα

Η αγωγιμότητα μετράει την ικανότητα του διαλύματος να άγει το ηλεκτρικό ρεύμα. Μονάδα μέτρησης της είναι το 1 mS/ cm. Στο πείραμα χρησιμοποιείται αγωγιμόμετρο *CRISON microCM 2202*. Για την μέτρηση της αγωγιμότητας των διαλυμάτων απλά τοποθετείται το ηλεκτρόδιο μέσα στο διάλυμα και η τιμή του αναγράφεται στην οθόνη.

3.3.3. Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (COD)

Στο συγκεκριμένο πείραμα μετράται το ολικό οξυγόνο που απαιτείται για την χημική οξείδωση των οργανικών συστατικών μιας ουσίας. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκαν δύο COD Vario Tube Tests για εύρος συγκεντρώσεων 0-15000 (mg/ L) και 0-1500 (mg/ L), ανάλογα με τις απομακρύνσεις. Όπως θα διαπιστωθεί παρακάτω τα diluted και raw OMWW έχουν αρκετά υψηλές συγκεντρώσεις COD σε σχέση με τις εκροές.

Για το πρώτο kit (εύρος: 0-15000 mg/ L) λαμβάνονται 0.2 mL από το κάθε δείγμα και προστίθενται σε έτοιμα φιαλίδια, ανακινούνται καλά και τοποθετούνται στο θερμοαντιδραστήρα για χώνευση, στους 148 °C για 2 h. Στο δεύτερο kit (εύρος 0 - 1500 mg/ L), προστίθενται 3 mL δείγματος και ακολουθείται η ίδια διαδικασία. Μετά το πέρας των 2 h, αφήνονται τα φιαλίδια να πάρουν θερμοκρασία περιβάλλοντος. Αφού γίνει και αυτό το βήμα, ξεκινάει η μέτρηση της απορρόφησης τους σε μήκος κύματος $\lambda = 610$ nm, στο φασματοφωτόμετρο *SHIMADZU UV-1202* μονής δέσμης που πρώτα έχει μηδενιστεί με τυφλό διάλυμα. Τέλος, υπολογίζονται οι συγκεντρώσεις των δειγμάτων με τη χρήση καμπύλης βαθμονόμησης, η οποία παρουσιάζεται στο Παράρτημα Α.

3.3.4. Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (BOD₅)

Για τον προσδιορισμό της βιοχημικής ζήτησης του οξυγόνου των δειγμάτων χρησιμοποιήθηκαν πιεζομετρικές φιάλες Aqualytic και Oxi-Tor της *WTW*, όγκου V= 500 mL. Το pH του δείγματος θα πρέπει να κυμαίνεται από 6.5 έως 7.5 μονάδες, ώστε το δείγμα να θεωρείται κατάλληλο για μετρήσεις BOD₅. Ο όγκος του δείγματος που τοποθετούνταν στην κάθε φιάλη, ήταν ανάλογος της αναμενόμενης τιμής του BOD₅, όπως αυτός αναγραφόταν στο φυλλάδιο οδηγιών. Ύστερα, στην ειδική θήκη σιλικόνης προστίθονταν σφαιρίδια υδροξειδίου του καλίου (KOH) ώστε να δεσμεύεται το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) που θα παραγόταν εντός της φιάλης. Τέλος, οι φιάλες κλείνονταν αεροστεγώς με αισθητήρα πίεσης και τοποθετούνταν πάνω σε ειδικές βάσεις που εξασφάλιζαν την συνεχή ανάδευση τους λόγω του μαγνήτη που βρίσκονταν στο εσωτερικό των φιαλών. Οι συνθήκες περιβάλλοντος ήταν T= 20 °C και το διάστημα μετρήσεων οι 5 μέρες.

3.3.5. Ολικό Άζωτο (TN)

Για τον προσδιορισμό του ολικού αζώτου των δειγμάτων, χρησιμοποιείται Nitrogen (total) Cell Test 1.14763.0001 εύρους 10-150 (mg/ L) N, της εταιρείας *Supelco*. Το kit περιέχει έτοιμα φιαλίδια, στα οποία τοποθετείται 10 mL αραιωμένου δείγματος. Ακολουθούνται οι οδηγίες του kit και τοποθετούνται τα φιαλίδια στο θερμοαντιδραστήρα για χώνευση για 1 h στους 120 °C. Έπειτα, τα φιαλίδια αφήνονται να φτάσουν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και λαμβάνονται 1 mL από κάθε χωνευμένο φιαλίδιο και 1 mL αντιδραστηρίου από το kit. Τα δείγματα φωτομετρούνται στο φασματοφωτόμετρο *Merck Nova 60* που περιέχει την βαθμονομημένη καμπύλη και παρέχει τις τιμές σε μορφή συγκεντρώσεων mg/ L στην οθόνη.

3.3.6. Αμμωνιακό Άζωτο (NH₄⁺-N)

Για τον καθορισμό του αζώτου με τη μορφή αμμωνιακών, χρησιμοποιείται το kit Ammonium Test 1.00683.0001 εύρους 2.0 -150 mg/ L της. Ακολουθείται η διαδικασία όπως περιγράφεται στις οδηγίες του kit για τα δείγματα, καθώς επίσης και η παρασκευή ενός τυφλού δείγματος για το μηδενισμό του φασματοφωτομέτρου. Προηγείται η ανακίνηση των δειγμάτων στο Vortex. Οι μετρήσεις απορρόφησης γίνονται στα 690 nm, σε φασματοφωτόμετρο μονής δέσμης *SHIMADZU UV-1202*. Τέλος, υπολογίζονται οι συγκεντρώσεις των δειγμάτων με τη χρήση καμπύλης βαθμονόμησης η οποία παρουσιάζεται στο Παράρτημα Α.

3.3.7. Νιτρικό Άζωτο (NO₃⁻-N)

Για τον προσδιορισμό του νιτρικού αζώτου NO₃⁻-N, έγινε χρήση του Standard test NANOCOLOR Nitrate φασματοφωτομετρικής μεθόδου της *NANOCOLOR* για εύρος συγκεντρώσεων 0.10 - 30.0 (mg/ L). Ακολουθήθηκαν, οι οδηγίες του kit και μετρήθηκαν οι απορροφήσεις για μήκος κύματος λ= 365 nm στο φασματοφωτόμετρο μονής δέσμης *SHIMADZU UV-1202*, αφού πρώτα έχει μηδενιστεί με τυφλό διάλυμα. Τέλος, υπολογίζονται οι συγκεντρώσεις των δειγμάτων με τη χρήση καμπύλης βαθμονόμησης η οποία παρουσιάζεται στο Παράρτημα Α.

3.3.8. Ολικός Φώσφορος (TP)

Για τον προσδιορισμό του ολικού φωσφόρου, χρειάζονται 25 mL αρχικού διαλύματος καλής ανάδευσης και 5 mL πυκνού νιτρικού οξέος HNO₃ και 1 mL θειικού οξέος H₂SO₄, τα οποία αναμιγνύονται σε απαγωγό. Τέλος, λαμβάνει χώρα μικρο-διήθηση από φίλτρο πόρων 0.45 μm. Αφού παρασκευαστούν τα διαλύματα, ρυθμίζεται το pH τους (6.5 - 7.5) και αραιώνονται μέχρι τα 25 mL. Στο πείραμα, λόγω των συγκεντρώσεων χρησιμοποιήθηκαν δύο μέθοδοι. Αρχικά, παρασκευάστηκε αντιδραστήριο για την μέθοδο με βανάδιο:

- 12.5 g ammonium molybdate σε 150 mL H₂O (A)
- 0.625 g ammonium monovanadate σε 150 mL H₂O (B)

Το διάλυμα (B) έρχεται σε βράση ώστε να διαλυτοποιηθεί. Μόλις, η θερμοκρασία του διαλύματος επέλθει σε θερμοκρασία δωματίου προστίθενται 165 mL HCl και ανακινείται το μίγμα. Τέλος, αναμιγνύονται τα δύο διαλύματα σε μία μεγάλη ογκομετρική φιάλη των 500 mL και αραιώνονται. Το αντιδραστήριο αυτό φυλάσσεται σε σκιερό μέρος. Για τη μέτρηση του ολικού φώσφορου προστίθενται 2.5 mL του αντιδραστηρίου σε 10 mL δείγματος (αφού έχει μικρο-διηθηθεί σε φίλτρο πόρων 0.45 μm) και μετρούνται οι απορροφήσεις σε μήκος κύματος $\lambda = 400$ nm στο φασματοφωτόμετρο διπλής δέσμης *SHIDMAZU UV-1601*, αφού πρώτα έχει μηδενιστεί με τυφλό δείγμα.

Κατά τη δεύτερη μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε, 4 mL combined reagent προστίθενται σε 25mL δείγματος αλλά και στο τυφλό που μηδενίζει το φασματοφωτόμετρο διπλής δέσμης *SHIMADZU UV-1601*, για μήκος κύματος $\lambda = 880$ nm.

Για το combined reagent χρειάζονται:

- 50 mL H₂SO₄ 5N (70 mL πυκνού H₂SO₄ στα 500 mL H₂O)
- 5 mL Potassium antimonyl tartrate (0.2743 g/ 100 mL H₂O)
- 15 mL Ammonium molybdate (10 g/ 250 mL H₂O)
- 30 mL Ascorbic acid (0.88 g/ 50 mL H₂O)

Τέλος, υπολογίζονται οι συγκεντρώσεις των δειγμάτων με τη χρήση καμπυλών βαθμονόμησης οι οποίες παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α.

3.3.9. Φωσφορικά (PO₄³⁻-P)

Για τον υπολογισμό του φωσφόρου που βρίσκεται με τη μορφή φωσφορικών ακολουθείται η ίδια ακριβώς διαδικασία όπως του TP (υποκεφάλαιο 3.3.8.) με τη μόνη διαφορά πως οι αναλύσεις γίνονται στο διαλυτό διηθημένο δείγμα και όχι στο αρχικό ολικό.

3.3.10. Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (TSS)

Για τον προσδιορισμό των ολικών αιωρούμενων στερεών σωματιδίων του διαλύματος, είναι αναγκαίο να χρησιμοποιηθούν φίλτρα GF/C, τα οποία συγκρατούν στερεά διαμέτρου πάνω από 1 μm. Προτού χρησιμοποιηθούν, θα ζυγιστούν σε ζυγό ακριβείας 10⁻⁴ g. Αμέσως μετά, ανακινείται το δείγμα πολύ καλά και λαμβάνονται τα απαραίτητα mL κάθε φορά για διήθηση στο άνωθι φίλτρο. Μετά το πέρας της διαδικασίας, το φίλτρο τοποθετείται στο φούρνο για 1 h περίπου στους 100 °C, ώστε να ξαναζυγιστεί αφού ξεραθεί και κρυώσει.

Ο μαθηματικός τύπος που περιγράφει τη συγκέντρωση των TSS σε mg/ L είναι:

$$[TSS] = \frac{W_{\text{φίλτρου,τελικό}} - W_{\text{φίλτρου,αρχικό}}}{V_{\text{δειγμάτος}}} * 100$$

Όσον αφορά στο διήθημα, συλλέγεται σε ποτήρι ζέσεως και ακολουθεί μικρο-διήθηση μεγέθους πόρων 0.45 μm.

3.3.11. Χρώμα

Το χρώμα προσδιορίστηκε στα διαλυτά δείγματα σε απορρόφηση $\lambda = 410$ nm με φασματοφωτόμετρο *SHIMADZU UV-1202* μονής δέσμης σε κυψελίδα μήκους διαδρομής 2.5 cm. Μονάδα μέτρησης είναι το 1 True Colour Unit (T.C.U.). Η απορρόφηση ενός διαλύματος αναφοράς με 100 mg/ L Pt (1.246 g πλατίνα & 1 g κοβάλτιο & 100 mL πυκνό HCl σε 1 L H₂O) χρησιμοποιήθηκε για τη μετατροπή των αποτελεσμάτων σε True Color Units. Τέλος, υπολογίζονται οι συγκεντρώσεις των δειγμάτων με τη χρήση καμπύλης βαθμονόμησης, η οποία παρουσιάζεται στο Παράρτημα Α.

3.3.12. Ολικές Φαινόλες

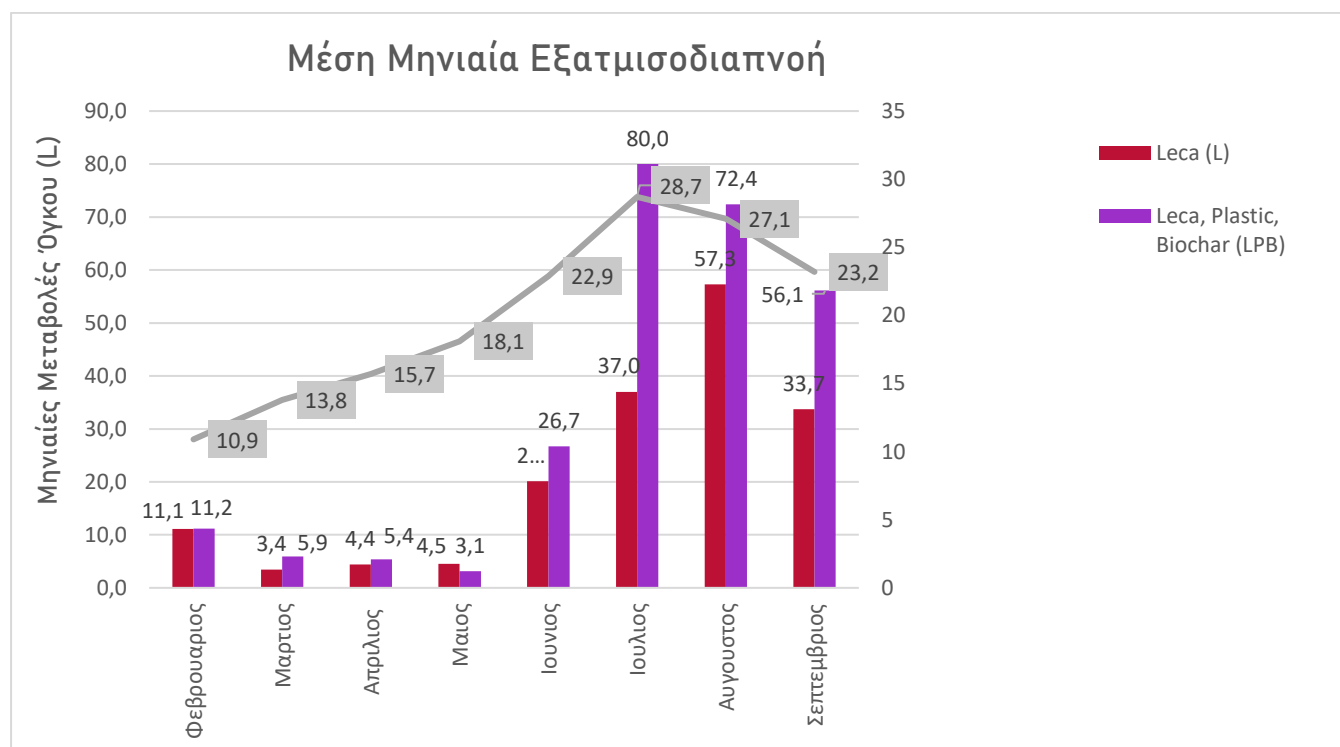
Το πρότυπο διάλυμα κατασκευής της καμπύλης βαθμονόμησης για τις φαινόλες, είναι 0.125 g γαλλικό οξύ σε 2.5 mL αιθανόλη και μέχρι τα 25 mL, H₂O.

Για τον υπολογισμό των φαινολών του δείγματος (μέθοδος Folin-Ciocalteu), λαμβάνονται 40 μL από το διηθημένο- με 0.45 μm φίλρο- διάλυμα και τοποθετούνται σε δοκιμαστικό σωλήνα μαζί με 200 μL αντιδραστηρίου Folin και 3.15 mL νερού. Έπειτα, γίνεται καλή ανακίνηση στο Vortex και αφήνεται ο σωλήνας για περίπου 2 λεπτά σε κατάσταση ηρεμίας. Συνεχίζοντας, προστίθενται 600 μL ανθρακικού νατρίου Na₂CO₃ και πάλι στο Vortex. Για το τέλος, αφήνεται ο δοκιμαστικός σωλήνας σε κατάσταση ηρεμίας για 1 h και μετράται η απορρόφηση του διαλύματος σε μήκος κύματος $\lambda = 765$ nm σε φασματοφωτόμετρο διπλής δέσμης *SHIMADZU UV-1601*, που έχει μηδενιστεί με τυφλό δείγμα σκέτο απιονισμένο νερό. Στο παράρτημα Α παρουσιάζονται οι καμπύλες βαθμονόμησης.

Κεφάλαιο 4°. Αποτελέσματα και Συζήτηση

4.1. Υδατικό Ισοζύγιο

Το υδατικό ισοζύγιο παριστάνει τη μέση μηνιαία εξατμισοδιαπνοή. Ειδικότερα, παρέχει πληροφορίες σχετικά με το πώς επηρεάζονται οι όγκοι των εκροών μηνιαία συναρτήσει των κλιματικών συνθηκών. Εξατμισοδιαπνοή ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο το νερό εξατμίζεται από το έδαφος και από τα φυτά μέσω της διαπνοής. Εξαρτάται από τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής, όπως τη θερμοκρασία, την ηλιακή ακτινοβολία, τις βροχοπτώσεις, την ταχύτητα του ανέμου, την υγρασία και τη βαρομετρική πίεση και αποτελεί σημαντική παράμετρο στην υδρολογική ισορροπία των υδροβιότοπων. Για την κατασκευή του διαγράμματος, λήφθηκαν υπόψιν οι μέσες μηνιαίες βροχοπτώσεις που παρουσιάζονται στον πίνακα 3.1. .



Διάγραμμα 4.1. Διάγραμμα μέσης μηνιαίας εξατμισοδιαπνοής για τις μονάδες L & LPB και μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από το παραπάνω διάγραμμα είναι:

- Για τους μήνες Μάρτιος, Απρίλιος, Μάιος η εξατμισοδιαπνοή είναι χαμηλή διότι, οι καλαμιές δεν παρουσίαζαν ιδιαίτερη ανάπτυξη, οπότε και η ζήτηση τους σε νερό ήταν χαμηλή.
- Τη θερινή περίοδο η εξατμισοδιαπνοή αυξάνεται όπως είναι λογικό διότι οι βροχοπτώσεις περιορίζονται και η βλάστηση απαιτεί περισσότερο νερό.
- Τους μήνες Ιούνιο, Ιούλιο, Αύγουστο και Σεπτέμβριο η εξατμισοδιαπνοή της μονάδας LPB είναι αυξημένη σε σχέση με τη μονάδα L, κάτι που επιβεβαιώνεται και από την ανάπτυξη των φυτών οπτικά.

- Το Σεπτέμβριο παρουσιάζεται μία μείωση όπως είναι φυσικό καθώς οι ηλιόλουστες θερμές ημέρες είναι λιγότερες.

4.2. Φυτικοχημικές Αναλύσεις

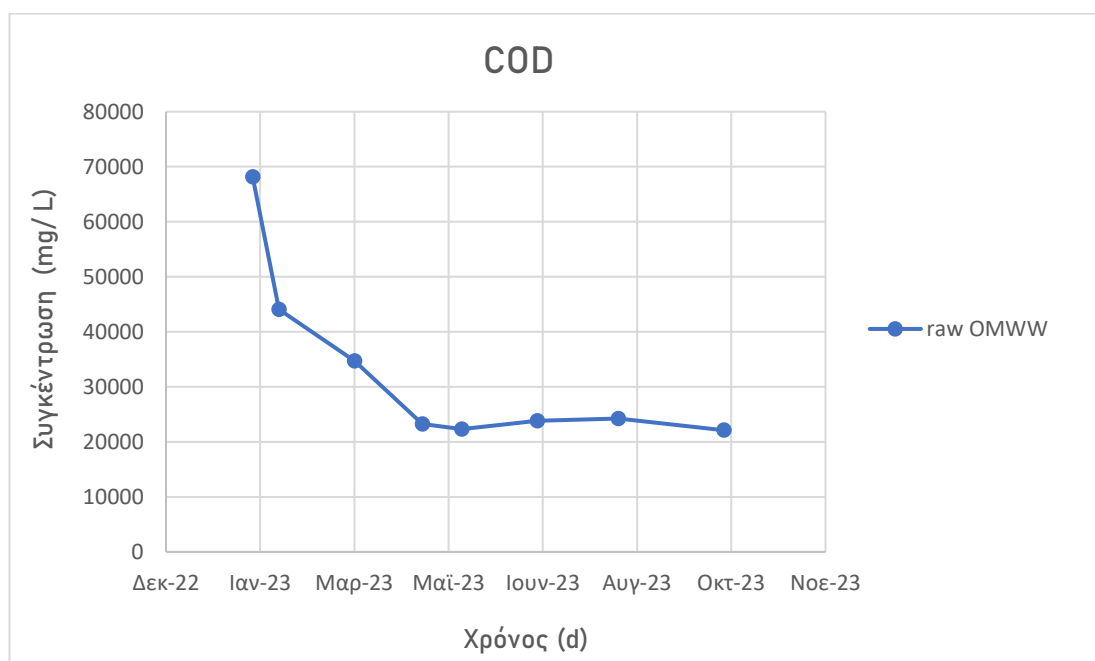
4.2.1. Χαρακτηρισμός Εισροής

Όπως προαναφέρθηκε, το υγρό απόβλητο ελαιουργείου που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα δεν υπέστη κάποια χημική επεξεργασία. Το δείγμα συλλέχθηκε για τους μήνες Οκτώβριο 2022 έως Ιανουάριο του 2023, μετά από την εξαγωγή λαδιού και αποτελείται από όλα τα υγρά έκπλυσης αλλά και τα υγρά της παραγωγής. Κάτω φαίνεται ο πίνακας με τα συγκεντρωτικά χαρακτηριστικά των διάφορων παραμέτρων της ανεπεξέργαστης εισροής πριν αραιωθεί και παροχετευτεί στους ΤΥ.

Πίνακας 4.1. Μέσες τιμές και εύρος τιμών των παραμέτρων της εισροής

Παράμετρος	Μέσες τιμές	[ελάχ. – μέγ.]
pH	4.62 ± 0.15	[4.38 – 4.80]
EC (mS/ cm)	7.04 ± 0.59	[6.30 – 7.79]
COD (mg/ L)	32841 ± 16262	[22116 – 68168]
BOD ₅ (mg/ L)	12500 ± 5456	[3800 – 19000]
TN (mg/ L)	209 ± 272	[56 – 840]
NH ₄ ⁺ -N (mg/ L)	10.0 ± 10.9	[<1.0 – 31.0]
NO ₃ ⁻ -N (mg/ L)	17.4 ± 6.1	[10.1 – 26.4]
TP (mg/ L)	124.6 ± 139.5	[52.2 – 462.0]
PO ₄ ³⁻ -P (mg/ L)	93.3 ± 120.4	[29.2 – 383.5]
TSS (mg/ L)	4885.8 ± 8338.5	[556.7 – 26080.0]
Χρώμα (T.C.U.)	10542 ± 2815	[7579 – 15390]
Ολικές φαινόλες (mg/ L)	1573.3 ± 124.4	[1418.0 – 1753.3]

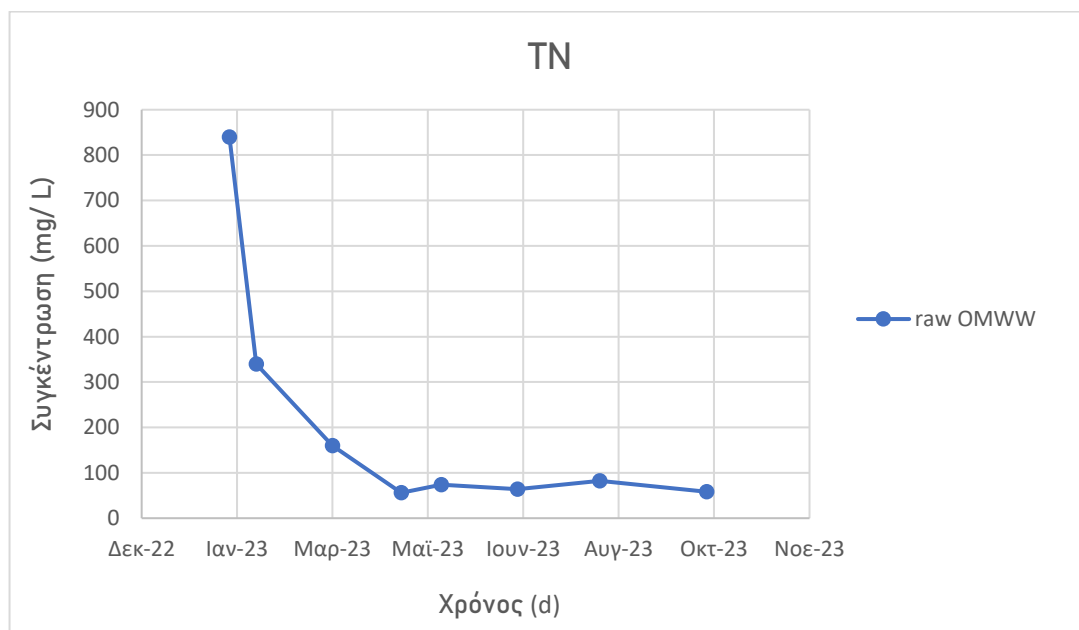
4.2.1.1. COD ανεπεξέργαστης εισροής



Διάγραμμα 4.2. Συγκεντρώσεις COD ανεπεξέργαστης εισροής

Όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα, η συγκέντρωση COD του ανεπεξέργαστου απόβλητου ελαιουργείου σταδιακά μειώνεται. Ξεκινώντας από τον Ιανουάριο του 2023, όπου και έγινε η πρώτη ανάλυση πριν την μεταφορά στο χώρο του Πολυτεχνείου, η τιμή COD είναι ίση με 68168 mg/ L. Αυτή η τιμή επιβεβαιώνει το πόσο δύσκολα διαχειρίσιμο είναι ένα τέτοιο απόβλητο λόγω του υψηλού οργανικού φορτίου. Παρατηρώντας το διάγραμμα, διαπιστώνεται πώς από τον Απρίλιο του 2023 (23256 mg/ L) μέχρι και τον Σεπτέμβριο (22116 mg/ L), η τιμή του COD παρουσιάζει μια σταθερή μείωση της από την αρχική. Σύμφωνα με τους (Gikas et al., 2017), που μελέτησαν ανεπεξέργαστο υγρό απόβλητο ελαιουργείου σε ανοιχτές δεξαμενές με αρχικές συγκεντρώσεις COD 58144 mg/ L και 45773 mg/ L, η μείωση του COD αποδίδεται κυρίως στην καθίζηση των αιωρούμενων στερεών.

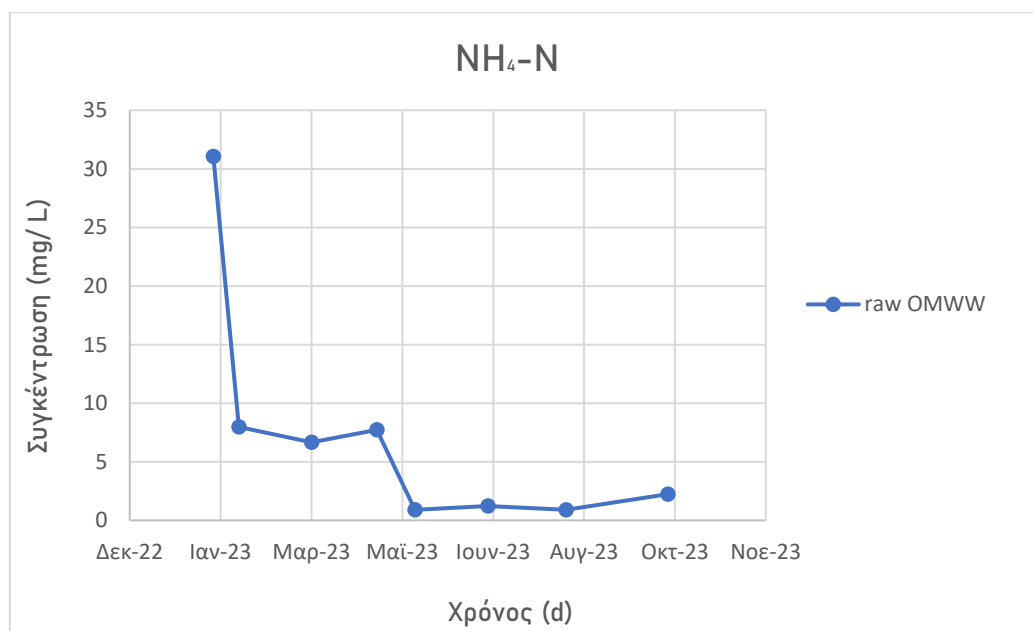
4.2.1.2. TN ανεπεξέργαστης εισροής



Διάγραμμα 4.3. Συγκεντρώσεις TN ανεπεξέργαστης εισροής

Παρατηρώντας το παραπάνω διάγραμμα, διαπιστώνεται πώς και η συγκέντρωση του ολικού αζώτου στην εισροή μειώνεται δραματικά με την πάροδο του χρόνου. Ξεκινώντας από 840 mg/L (Ιανουάριος 2023) φτάνει σε 58 mg/L (Σεπτέμβριος 2023), λόγω της βακτηριακής αποδόμησης.

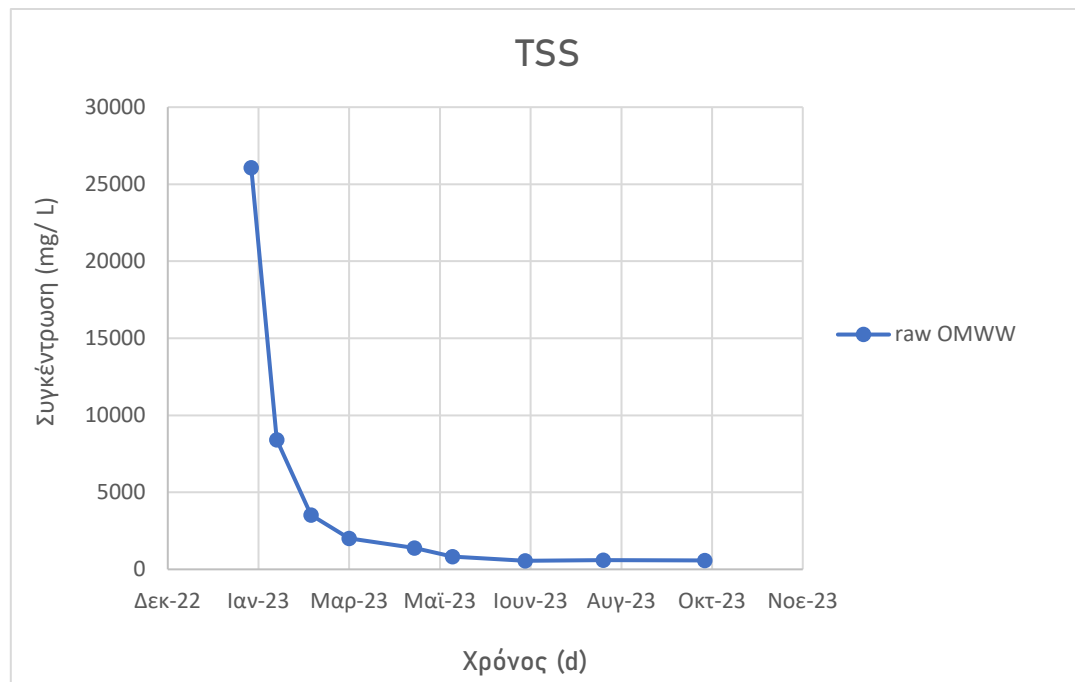
4.2.1.3. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ανεπεξέργαστης εισροής



Διάγραμμα 4.4. Συγκεντρώσεις $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ανεπεξέργαστης εισροής

Το αμμωνιακό άζωτο όπως παρουσιάζεται και στο παραπάνω διάγραμμα με την πάροδο του χρόνου παίρνει πολύ χαμηλές τιμές. Αυτό συμβαίνει καθώς μετατρέπεται σε αέριο άζωτο. Απεικονίζεται επίσης μία μεγάλη πτώση στην αρχή των μετρήσεων που συμβαίνει λόγω καθίζησης TSS και σταδιακής νιτροποίησης κατά την παραμονή στις λιμνοδεξαμενές.

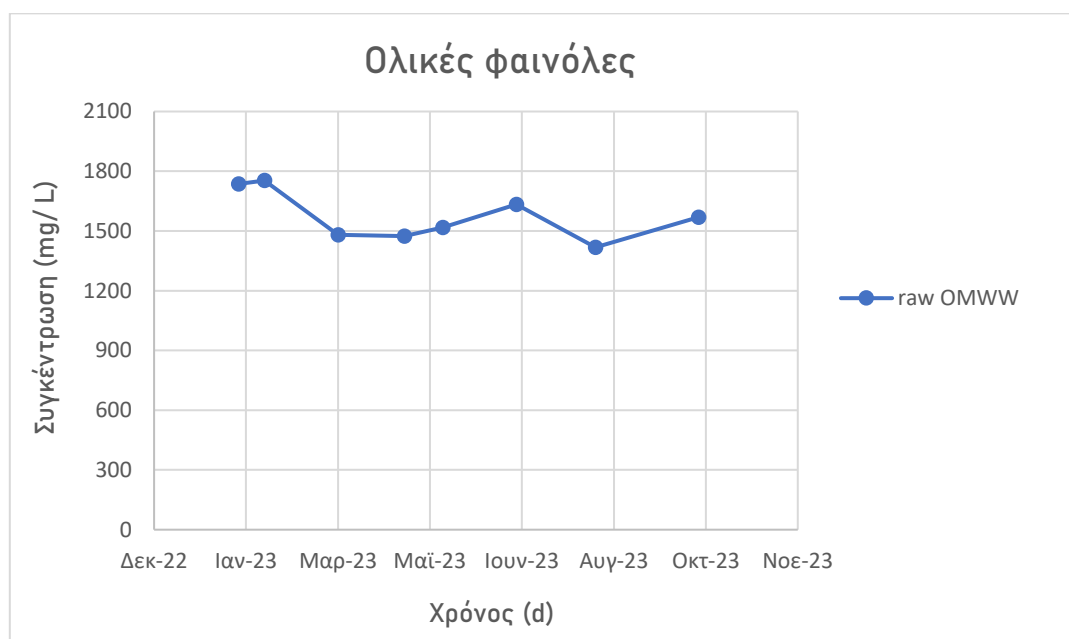
4.2.1.4. TSS ανεπεξέργαστης εισροής



Διάγραμμα 4.5. Συγκεντρώσεις TSS ανεπεξέργαστης εισροής

Μία ακόμη παράμετρος η οποία μειώνεται σε μεγάλο βαθμό με την πάροδο του χρόνου είναι και η συγκέντρωση των TSS. Για τον Ιανουάριο 2023, τα ολικά αιωρούμενα στερεά ήταν 26080 mg/ L, ενώ για τον Σεπτέμβρη 586.67 mg/ L. Η απομάκρυνση των στερεών από καθίζηση στις δεξαμενές της εισροής αγγίζει το 98%.

4.2.1.5. Ολικές Φαινόλες ανεπεξέργαστης εισροής



Διάγραμμα 4.6. Συγκεντρώσεις φαινολών ανεπεξέργαστης εισροής

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 4.6. οι ολικές φαινόλες παρέμειναν σχεδόν σταθερές, υποδεικνύοντας ότι είναι σε διαλυτή μορφή. Στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξαν και οι (Gikas et al., 2017) που αναφέρουν πως οι υψηλές συγκεντρώσεις ολικών φαινολών δρουν ανασταλτικά για μικροοργανισμούς βιοαποδόμησης και έτσι συνήθως για την ενεργοποίηση τους γίνεται αραίωση της εισροής.

4.2.2. Χαρακτηρισμός Εκροών

4.2.2.1. pH

Το pH αποτελεί σημαντική ένδειξη για την ποιότητα ενός επεξεργασμένου λύματος και δηλώνει την οξύτητα ή την αλκαλικότητα τού. Σύμφωνα με την ΚΥΑ 5673/ 400/ 1997 (Β 192), ως αποδεκτές ορίζονται οι τιμές pH ανάμεσα στο 6.5 με 8.5 για επεξεργασμένα υγρά απόβλητα.

Πίνακας 4.2. Αποτελέσματα μετρήσεων pH

pH	Μέση τιμή	[ελάχ. – μέγ.]
Αραιωμένη εισροή	(1:4) 4.66 ± 0.13	(1:4) [4.50 – 4.77]
	(1:8) 5.60 ± 0.81	(1:8) [4.88 – 7.49]
L	8.00 ± 0.52	[6.83 – 8.88]
LPB	8.01 ± 0.62	[6.86 – 9.08]

Σύμφωνα με τις μετρήσεις που προέκυψαν, διαπιστώνεται πώς το pH και στις δύο δεξαμενές (L, LPB) αυξήθηκε σημαντικά σε σχέση με την αραιωμένη εισροή. Συγκριτικά, οι δύο δεξαμενές δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές.

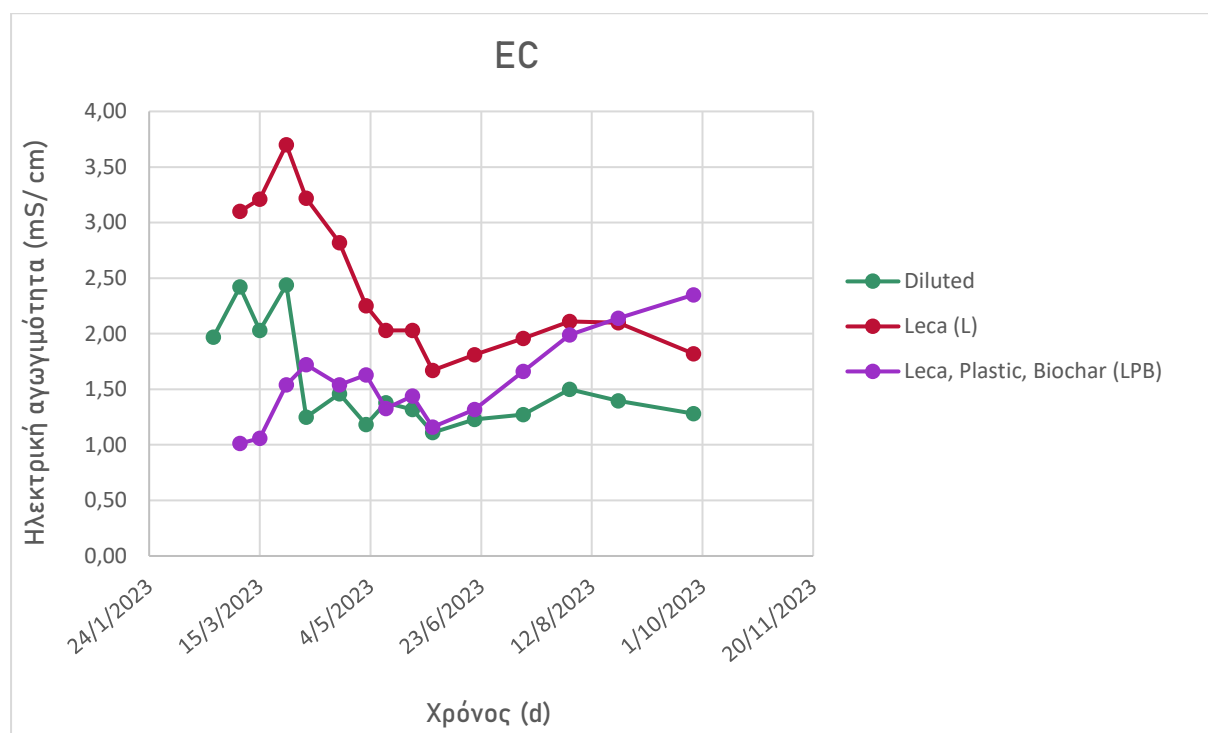
Η αύξηση του pH ήταν αναμενόμενη καθώς κατά τον (Berego et al., 2022) κατά τη διάσπαση της οργανικής ύλης από βακτήρια και οργανικά οξέα, απελευθερώνεται CO_2 . Ακόμη, στα κατακόρυφης ροής ΤΥ η απονιτροποίηση είναι μια διαδικασία που ευνοείται καθώς η μικροβιακή δραστηριότητα οξειδώνει την αμμωνία σε νιτρικό άλας που στη συνέχεια ανάγεται σε αέριο άζωτο, προκαλώντας έτσι την αύξηση του pH στις εκροές (Green et al., 1998). Η αλκαλικότητα ενός υγρού απόβλητου είναι συνέπεια της ύπαρξης υδροξειδίων $[\text{OH}^-]$, ανθρακικών ιόντων $[\text{CO}_3^{2-}]$ και όξινων ανθρακικών ιόντων $[\text{HCO}_3^-]$ (Metcalf & Eddy, 2006).

4.2.2.2. Ηλεκτρική Αγωγιμότητα (EC)

Πίνακας 4.3. Αποτελέσματα μετρήσεων EC

EC	Μέση τιμή (mS/ cm)	[ελάχ. – μέγ.] (mS/ cm)
Αραιωμένη εισροή	1.55 ± 0.44	[1.11 – 2.44]
L	2.42 ± 0.65	[1.67 – 3.70]
LPB	1.56 ± 0.39	[1.01 – 2.35]

Ως ηλεκτρική αγωγιμότητα ορίζεται η ικανότητα ενός διαλύματος να άγει το ηλεκτρικό ρεύμα. Μέσο επίτευξης για αυτό είναι τα ιόντα του διαλύματος και συνεπώς η τιμή της παριστάνει τη συγκέντρωση των ολικών διαλυμένων στερεών ενός δείγματος (Metcalf & Eddy, 2006). Επιπρόσθετα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως έμμεσος δείκτης για την οργανική ύλη και την περιεκτικότητα θρεπτικών συστατικών (Mazur et al., 2022).



Διάγραμμα 4.7. Τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας για τις μονάδες L & LPB

Όπως φαίνεται από τον πίνακα 4.3., η μέση τιμή EC για την μονάδα L είναι 2.42 mS/ cm, ενώ για την LPB 1.56 mS/ cm. Από το διάγραμμα 4.7. διαπιστώνεται ότι για τους μήνες Μάιο και Ιούνιο η ηλεκτρική αγωγιμότητα της αραιωμένης εισροής ταυτιζόταν με αυτή της δεξαμενής LPB. Γενικά, όπως φαίνεται και στον πίνακα 4.3, δεν παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές. Εν αντιθέσει, η δεξαμενή πληρωμένη με leca, από την αρχή έως και το τέλος του

πειράματος διατηρούσε σταθερά υψηλότερες τιμές αγωγιμότητας από την αραιωμένη εισροή, ακολουθώντας ωστόσο την ίδια συμπεριφορά καμπύλης. Συγκρίνοντας τις δύο μονάδες μεταξύ τους, προκύπτει το συμπέρασμα πώς επειδή η μονάδα L είναι αποκλειστικά πληρωμένη με σκέτη leca, ένα αρκετά απορροφητικό δηλαδή μέσο πλήρωσης, αγγίζει υψηλότερες τιμές αγωγιμότητας από την LPB, όπου το HDPE είναι ένα αδρανές υλικό. Αυτό πιθανώς να συμβαίνει λόγω του γεγονότος πώς η leca μπορεί να απορροφήσει το 30% του βάρους της σε νερό. Επίσης, λόγω των φυσικοχημικών ιδιοτήτων της μπορεί να αυξήσει τη διαδικασία ανταλλαγής ιόντων (Bahmanpour et al., 2017). Η μονάδα LPB έχει μεγαλύτερο χρόνο παραμονής λόγω μεγαλύτερου πορώδους, άρα μεγαλύτερη απορρόφηση από φυτά και εξάτμιση, άρα μεγαλύτερη συμπύκνωση, άρα υψηλότερη EC. Η αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας θα μπορούσε να αποδοθεί, λοιπόν, στην ταυτόχρονη αραίωση και συνεπώς απελευθέρωση ανθρακικών αλάτων από τα πορώδη μέσα (Hegounim et al., 2011). Ακόμη, πιθανό είναι πώς ευθύνεται και η εξατμισοδιαπνοή (Achak et al., 2019) καθώς οι τιμές της EC παρουσιάζουν αύξηση κατά τη θερινή περίοδο.

4.2.2.3. Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (COD)

Πίνακας 4.4. Αποτελέσματα μετρήσεων COD

COD	Μέση τιμή συγκέντρωσης (mg/ L)	Εύρος τιμών συγκεντρώσεων (mg/ L)	Μέση τιμή απομάκρυνσης (%)	Εύρος τιμών απομάκρυνσης (%)
Αραιωμένη Εισροή	(1:4) 6599.7 ± 672.5	(1:8) [5628.9 – 7120.0]		
	(1:8) 2477.0 ± 358.2	(1:4) [1784.4 – 3062.0]		
L	1020.7 ± 382.2	[516.0 – 1782.0]	67.4 ± 16.3	[41.8 – 92.6]
LPB	1014.8 ± 516.0	[318.00 – 1911.0]	68.6 ± 18.3	[37.6 – 92.0]

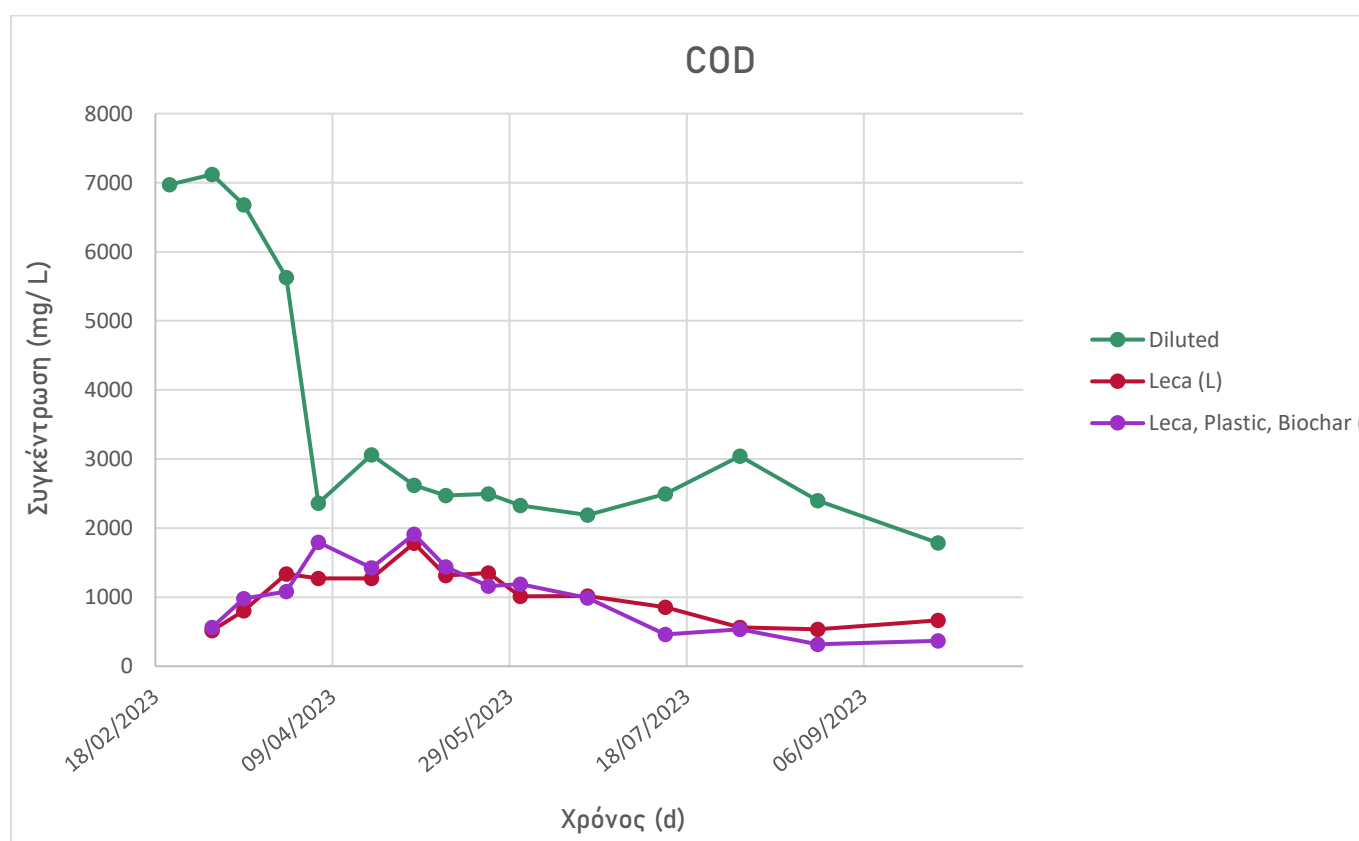
Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα 4.4., προκύπτει το συμπέρασμα πώς η μονάδα L ήταν το ίδιο αποδοτική όσον αφορά στην απομάκρυνση COD σε σχέση με την μονάδα LPB, καθώς τα ποσοστά απομάκρυνσης αντίστοιχα για τις δύο μονάδες ήταν 67.4% και 68.6%. Επίσης, φαίνεται πώς κατά το διάστημα από τέλος Απριλίου μέχρι τέλος Ιούνη, η απόδοση και των δύο ΤΥ μειώθηκε.

Για μία σχετική έρευνα, η απομάκρυνση COD από υγρό απόβλητο ελαιουργείου σε κατακόρυφης ροής ΤΥ ήταν της τάξης του 80% (73.5%, 74.0%, 71.4%) για τρεις διαφορετικές δεξαμενές (Yalcuk et al., 2010). Η λίγο μεγαλύτερη απομάκρυνση στις τρεις δεξαμενές του πειράματος αυτού θα μπορούσε να οφείλεται στο ότι χρησιμοποιείται ζεόλιθος (zeolite), ο οποίος

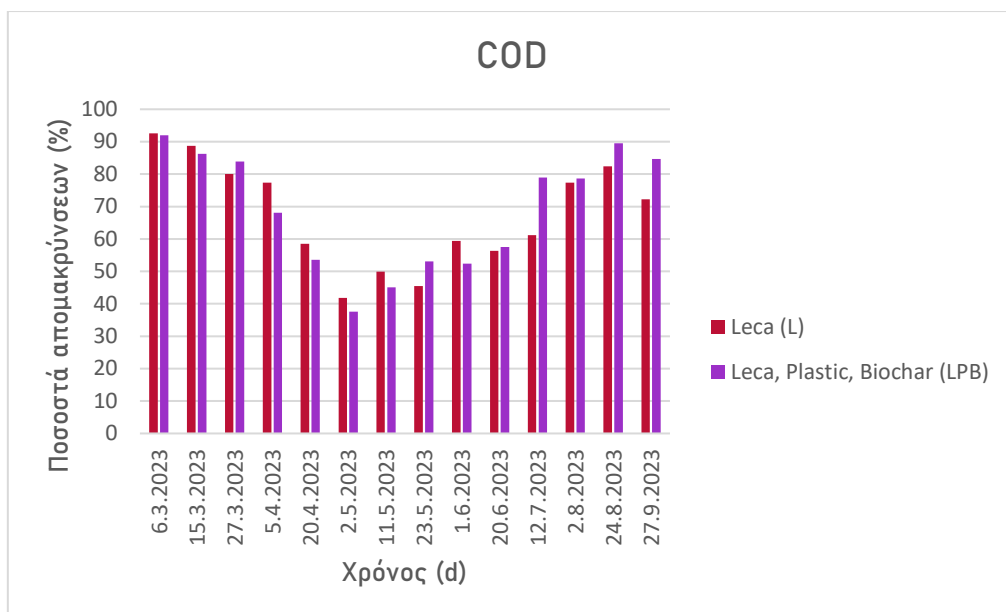
απομακρύνει μεγάλες ποσότητες οργανικού υλικού μέσω της προσρόφησης αλλά και της κατακράτησης. Βέβαια, ο (Achak et al., 2019) στην δική του έρευνα κατάφερε να απομακρύνει το COD κατά 60.6%.

Η τροφοδοσία των υγροβιότοπων με λύμα επιτρέπει στους πόρους του υποστρώματος να γεμίσουν με αέρα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ευκολότερη μεταφορά του O_2 από την ατμόσφαιρα στα συστήματα (κύτταρα του υγρότοπου). Η πορεία που ακολουθεί το υγρό (κατακόρυφη ροή) μεταφέρει το O_2 πιο αποτελεσματικά από ίδια συστήματα οριζόντιας ροής. Μία άλλη άποψη είναι πώς τέτοιου είδους συστήματα κρίνονται αποτελεσματικά στην απομάκρυνση COD από υγρά απόβλητα λόγω της ανάπτυξης βιοφίλμ στα υλικά πλήρωσης (Yalcuk et al., 2010).

Αναφορικά με τις τιμές των συγκεντρώσεων της αραιωμένης εισροής, παρατηρείται μια μειωτική τάση. Το λύμα βρίσκεται σε δεξαμενές όπου και καθιζάνει με την πάροδο του χρόνου και αραιώνεται σε νέα βυτία ώστε να παροχετευθεί στους ΤΥ. Με τη διαδικασία αυτή της αραιώσης διαλύεται οξυγόνο μέσα στο λύμα και έτσι μειώνεται και το COD πριν επεξεργαστεί περαιτέρω στους ΤΥ. Ακόμη, πιθανή αιτία είναι και η ανάπτυξη αερόβιων και αναερόβιων μικροοργανισμών στις δεξαμενές καθίζησης.



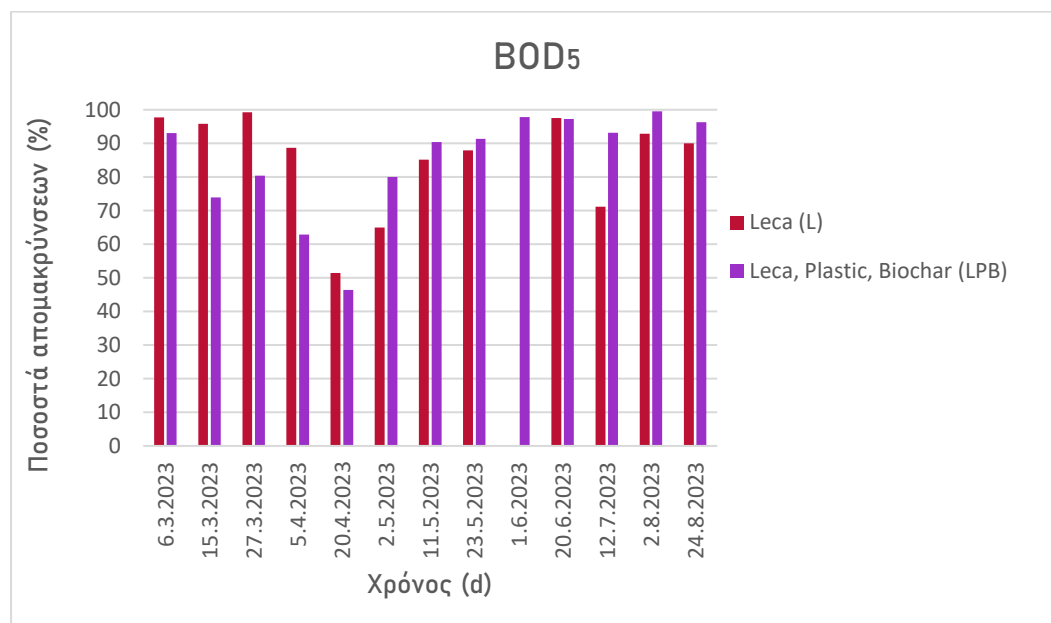
Διάγραμμα 4.8. Συγκεντρώσεις COD αραιωμένης εισροής και εκροών L & LPB



Διάγραμμα 4.9. Ποσοστά απομακρύνσεων COD για τις μονάδες L & LPB

4.2.2.4. Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (BOD₅)

Η παράμετρος BOD₅ εκφράζει την ποσότητα του οξυγόνου που απαιτείται από τους μικροοργανισμούς ώστε να διασπαστούν οι οργανικές ενώσεις σε αερόβιες συνθήκες. Τα απόβλητα ελαιουργείων χαρακτηρίζονται από υψηλές συγκεντρώσεις BOD₅.



Διάγραμμα 4.10. Ποσοστά απομακρύνσεων BOD₅ για τις μονάδες L & LPB

Παρατηρώντας το διάγραμμα 4.10., φαίνεται πώς οι μονάδες κατάφεραν να καταναλώσουν αρκετό οξυγόνο για τις εσωτερικές βιολογικές διαδικασίες τους (απονιτροποίηση) από τις αρκετά υψηλές ποσοστιαίες αποδόσεις.

Παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας με τα εύρη των συγκεντρώσεων και των τιμών απομάκρυνσης και τις μέσες τιμές της.

Πίνακας 4.5. Αποτελέσματα μετρήσεων BOD₅

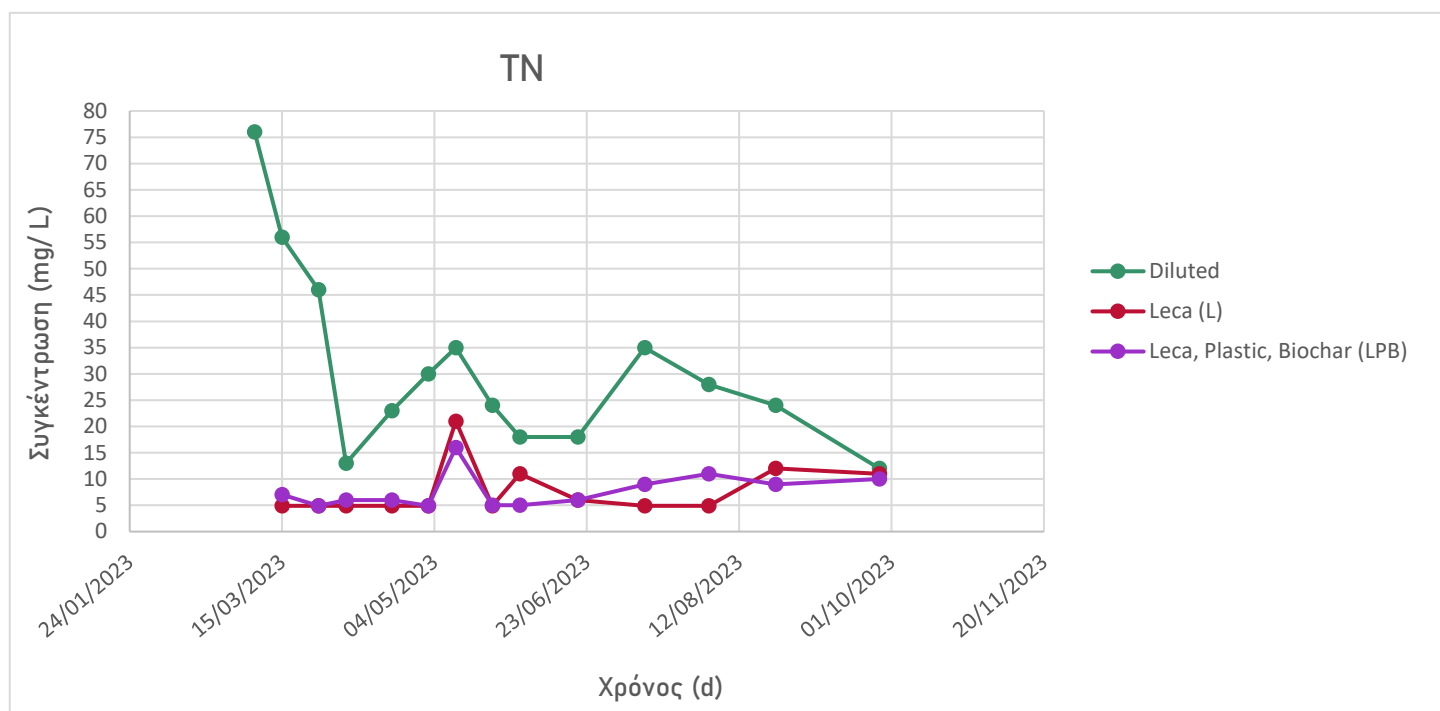
BOD ₅	Εύρος τιμών συγκεντρώσεων (mg/ L)	Μέση τιμή απομάκρυνσης (%)	Εύρος τιμών απομάκρυνσης (%)
Αραιωμένη εισροή	(1:4) [3100 – 4900] (1:8) [850 – 2000]		
L	[45 – 700]	85.2 ± 15.0	[51.4 – 99.2]
LPB	[8 – 1150]	84.8 ± 15.8	[46.4 – 99.6]

Όπως διαπιστώνεται, η μέση απομάκρυνση για την μονάδα L είναι 85.2% και για την μονάδα LPB 84.8%. Από την αρχή των πειραματικών μετρήσεων (Μάρτιος) έως και τον Μάιο, η δεξαμενή με τη σκέτη leca, φαίνεται να έδινε καλύτερα αποτελέσματα.

4.2.2.5. Ολικό άζωτο (TN)

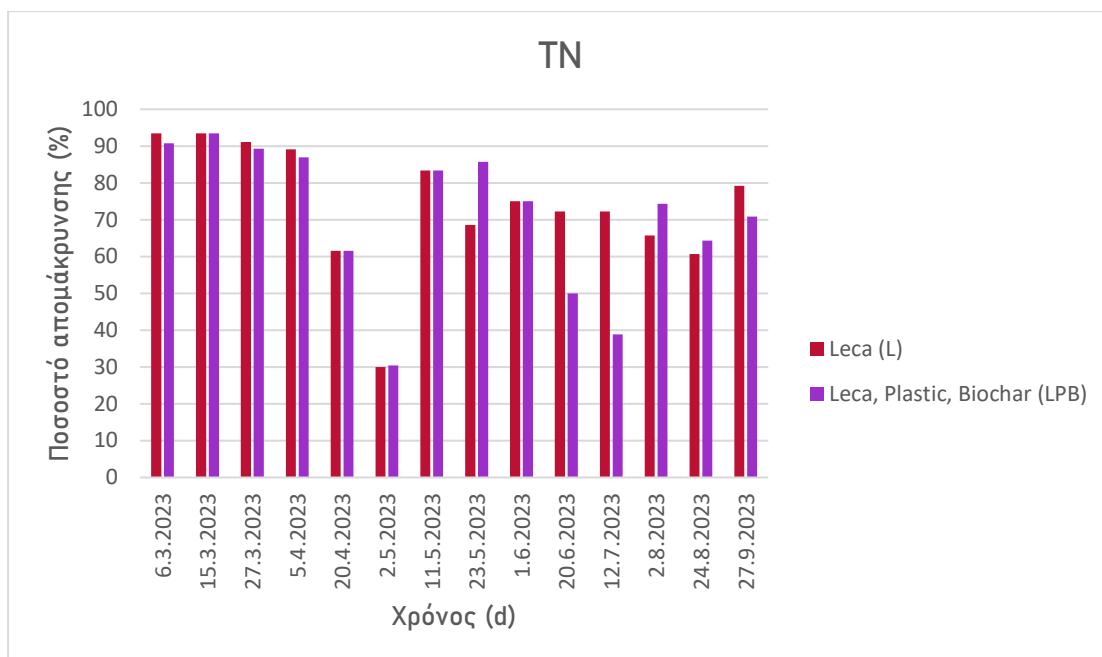
Πίνακας 4.6. Αποτελέσματα μετρήσεων TN για τις μονάδες L & LPB

TN	Μέση τιμή συγκέντρωσης (mg/ L)	Εύρος τιμών συγκεντρώσεων (mg/ L)	Μέση τιμή απομάκρυνσης (%)	Εύρος τιμών απομάκρυνσης (%)
Αραιωμένη εισροή	(1:4) 59 ± 15	(1:4) [46 – 76]		
	(1:8) 24 ± 8	(1:8) [12 – 35]		
L	7 ± 5	[<5 – 21]	74.0 ± 17.0	[30.0 – 93.4]
LPB	8 ± 3	[<5 – 16]	71.1 ± 19.9	[30.4 – 93.4]



Διάγραμμα 4.11. Συγκεντρώσεις TN αραιωμένης εισροής και εκροών L & LPB

Όπως είναι προφανές και στο διάγραμμα 4.11. οι τιμές των απομακρύνσεων για τις 20/4/2023 και 2/5/2023, είναι συγκριτικά μειωμένες σε σχέση με τις υπόλοιπες που είναι αρκετά ικανοποιητικές. Μάλιστα, η μονάδα L έφτασε στο 74.0 % και η LPB στο 71.1 %. Σύμφωνα με τον (Kapellakis et al., 2012), τέτοιες αποδόσεις αναμένονται για την απομάκρυνση του ολικού αζώτου, καθώς στις δεξαμενές κατακόρυφης ροής που χρησιμοποίησε η απομάκρυνση του ολικού αζώτου ήταν 87%.



Διάγραμμα 4.12. Ποσοστά απομακρύνσεων TN για τις μονάδες L & LPB

4.2.2.6. Αμμωνιακό Άζωτο (NH_4^+-N)

Κατά τις αρχικές αναλύσεις των εκροών των δειγμάτων, διαπιστώθηκε πώς οι τιμές των συγκεντρώσεων για το αμμωνιακό άζωτο και στις δύο δεξαμενές ήταν κάτω του ανιχνεύσιμου ορίου ($<1 \text{ mg/L}$). Για την παρακολούθηση των τιμών αυτών σε κάθε πειραματική μέτρηση γινόταν ανάλυση αμμωνίας όπου και επαληθεύονταν η συγκέντρωση.

Η κατανάλωση του NH_4^+-N είναι μπορεί να είναι αποτέλεσμα τεσσάρων παραγόντων:

(α) νιτροποίηση του NH_4^+-N σε NO_3^--N και NO_2^--N στο ριζικό σύστημα, που ακολουθεί η ταχεία απονιτροποίηση στα αναερόβια μέρη του συστήματος

(β) αυξανόμενη κατανάλωση NH_4^+-N από τα φυτά και άλλους μικροοργανισμούς

(γ) προχωρημένη καθίζηση οργανικού αζώτου που οφείλεται στην ανάπτυξη ριζικής και μικροβιακής βιομάζας

(δ) εξάτμιση αμμωνίας και κατιοανταλλαγή για αμμώνιο

(Achak et al., 2019)

Λόγω της απουσίας αμμωνιακού αζώτου στις εκροές, συμπεραίνεται ότι πιθανόν κύρια αιτία είναι η νιτροποίηση και απονιτροποίηση. Η βλάστηση μεταφέρει O_2 από τα άνω μέρη στα άκρα των ριζών και ευνοεί την νιτροποίηση που είναι μια αερόβια διεργασία.

4.2.2.7. Νιτρικό Άζωτο (NO₃⁻-N)

Όπως προαναφέρθηκε, μετά τη νιτροποίηση ακολουθεί η απονιτροποίηση κατά την οποία το νιτρικό άζωτο καταναλώνεται από αναερόβιους μικροοργανισμούς (απονοτριποιητές ή απονιτροποιητικά βακτήρια). Σύμφωνα με τον (Achak et al., 2019) για την διαδικασία αυτή απαιτείται ένας δότης ηλεκτρονίων. Τα υγρά απόβλητα ελαιουργείου είναι πλούσια σε οργανικό φορτίο και σύμφωνα με τον (Stefanakis et al., 2014) είναι πηγή άνθρακα που εξασφαλίζουν την ανταλλαγή ηλεκτρονίων. Είναι γνωστό πως το οξυγόνο δεν είναι ιδιαίτερα διαλυτό στο νερό. Έτσι, μια άφθονη ποσότητα άνθρακα μπορεί να το δεσμεύσει στο στάσιμο ή αργά κινούμενο νερό, δημιουργώντας έτσι αναερόβιες συνθήκες κάτω από την επιφάνεια (Constructed Wetlands for Nitrate Removal from Tile Drainage Water). Τα απονιτροποιητικά βακτήρια χρησιμοποιούν το οξυγόνο για την αναπνοή, μετατρέποντας τα νιτρικά σε αέριο άζωτο. Οι φυτεμένοι υδροβιότοποι γενικά, παρουσιάζουν μεγαλύτερες απομακρύνσεις νιτρικών από τους αφύτευτους κατά τον (Zhu et al., 2017).

Τα αποτελέσματα του δεδομένου πειράματος, παρουσίασαν τιμές συγκεντρώσεων κατώτερες των μετρήσιμων ορίων NO₃-N (<1 mg/ L), επαληθεύοντας έτσι όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως.

4.2.2.8. Ολικός Φώσφορος (TP)

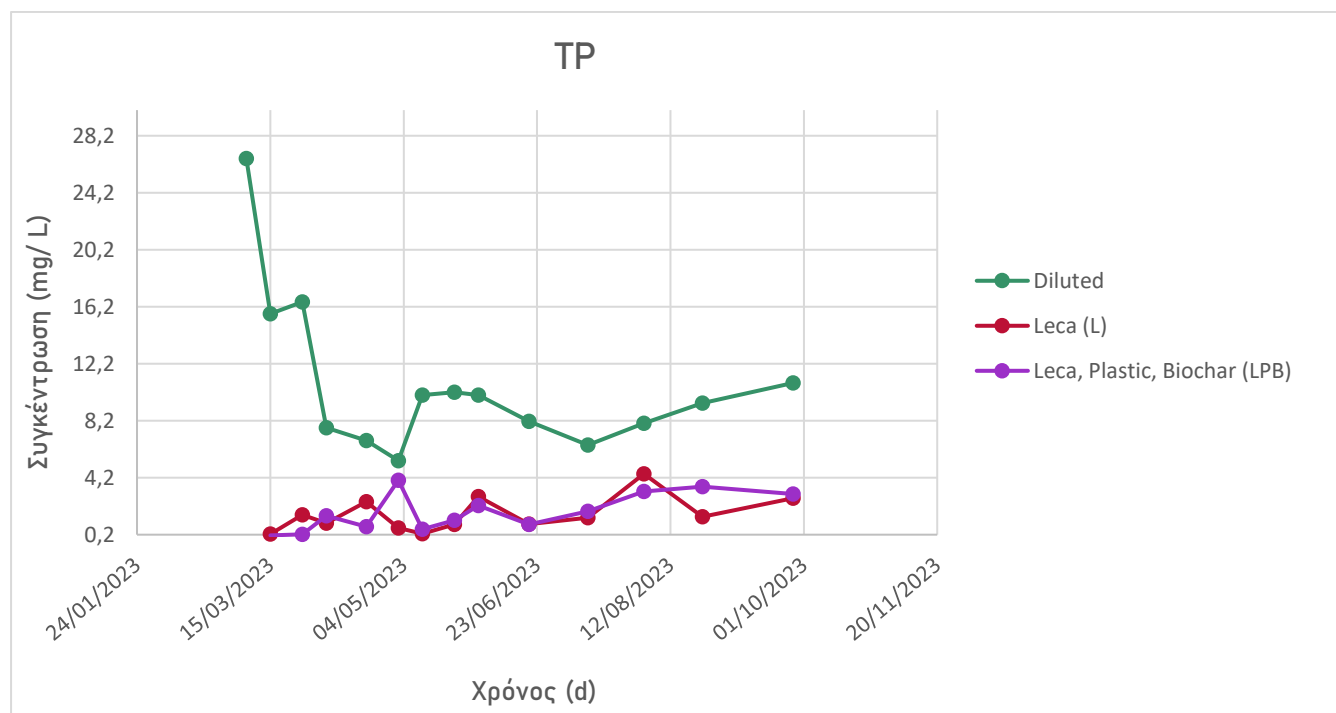
Πίνακας 4.7. Αποτελέσματα μετρήσεων TP

TP	Μέση τιμή συγκέντρωσης (mg/ L)	Εύρος τιμών συγκεντρώσεων (mg/ L)	Μέση τιμή απομάκρυνσης (%)	Εύρος τιμών απομάκρυνσης (%)
Αραιωμένη εισροή	(1:4) 19.6 ± 6.1	(1:4) [15.7 – 26.6]		
	(1:8) 8.5 ± 1.8	(1:8) [5.4 – 10.9]		
L	1.6 ± 1.2	[0.2–4.5]	81.1 ± 18.1	[31.0 – 99.1]
LPB	1.9 ± 1.3	[0.2– 4.0]	78.1 ± 19.0	[41.0 – 99.2]

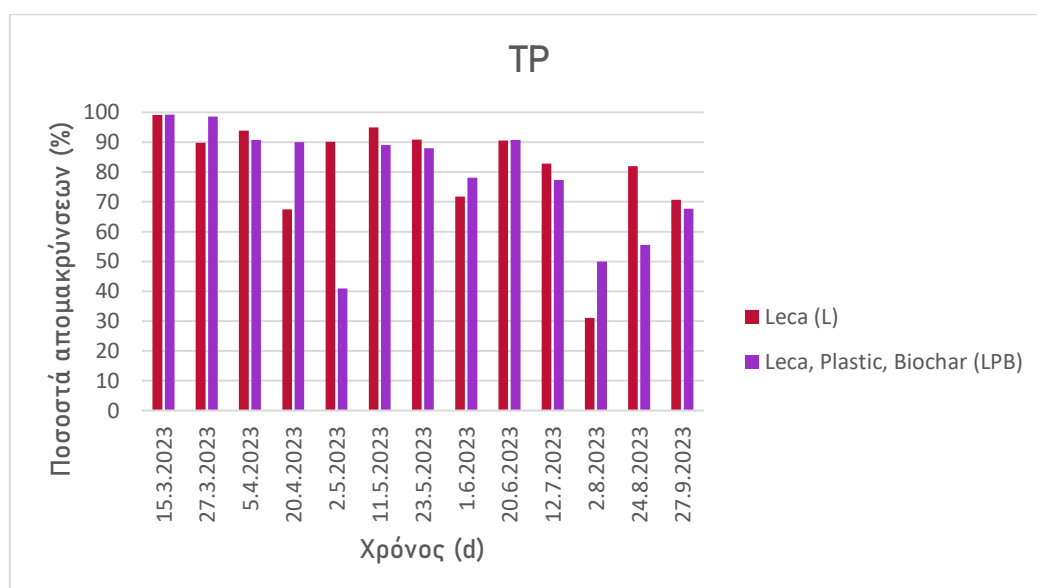
Από τον πάνω πίνακα, προκύπτει το συμπέρασμα πως και οι δύο μονάδες είχαν ικανοποιητική απομάκρυνση όσον αφορά στον ολικό φώσφορο, σύμφωνα με παρόμοια έρευνα για την οποία το ποσοστό απομάκρυνσης έφτασε στο 87% (Kapellakis et al., 2012). Ακόμη, παρόμοιο ποσοστό (80%) δίνει και ο (Yang et al., 2019). Συγκεκριμένα, η μονάδα L κατάφερε να απομακρύνει το 81.1% του TP και η LPB το 78.2%. Η μονάδα L φαίνεται να λειτουργήσει πιο αποτελεσματικά σε σχέση με την LPB και αυτό διαπιστώνεται και από τα παρακάτω διαγράμματα. Η απομάκρυνση του ολικού φωσφόρου, πιστεύεται

να είναι κυρίως λόγω προσρόφησης. Η leca έχει μεγάλη ικανότητα να προσροφά τον φώσφορο και λόγω της κεραμικής του φύσης είναι αρκετά ανθεκτικό. Οι υδροβιότοποι πληρωμένοι με leca δεσμεύουν τον φώσφορο μέσω αντιδράσεων καθίζησης πλούσιων σε ασβέστιο (Mlih et al., 2020). Οπότε, το βασικό pH που χαρακτηρίζει τις εκροές (~8) είναι επιθυμητό.

Όπως αναφέρει και ο (Vyamazai, 2007) η απομάκρυνση του ολικού φωσφόρου στους τεχνητούς υδροβιότοπους γίνεται και μέσω χημικών διεργασιών (προσρόφηση) και φυσικών (καθίζηση) αλλά και βιολογικών (πρόσληψη από βλάστηση και βιομάζα).



Διάγραμμα 4.13. Συγκεντρώσεις TP αραιωμένης εισροής και εκροών L & LPB



Διάγραμμα 4.14. Ποσοστά απομακρύνσεων TP για τις μονάδες L & LPB

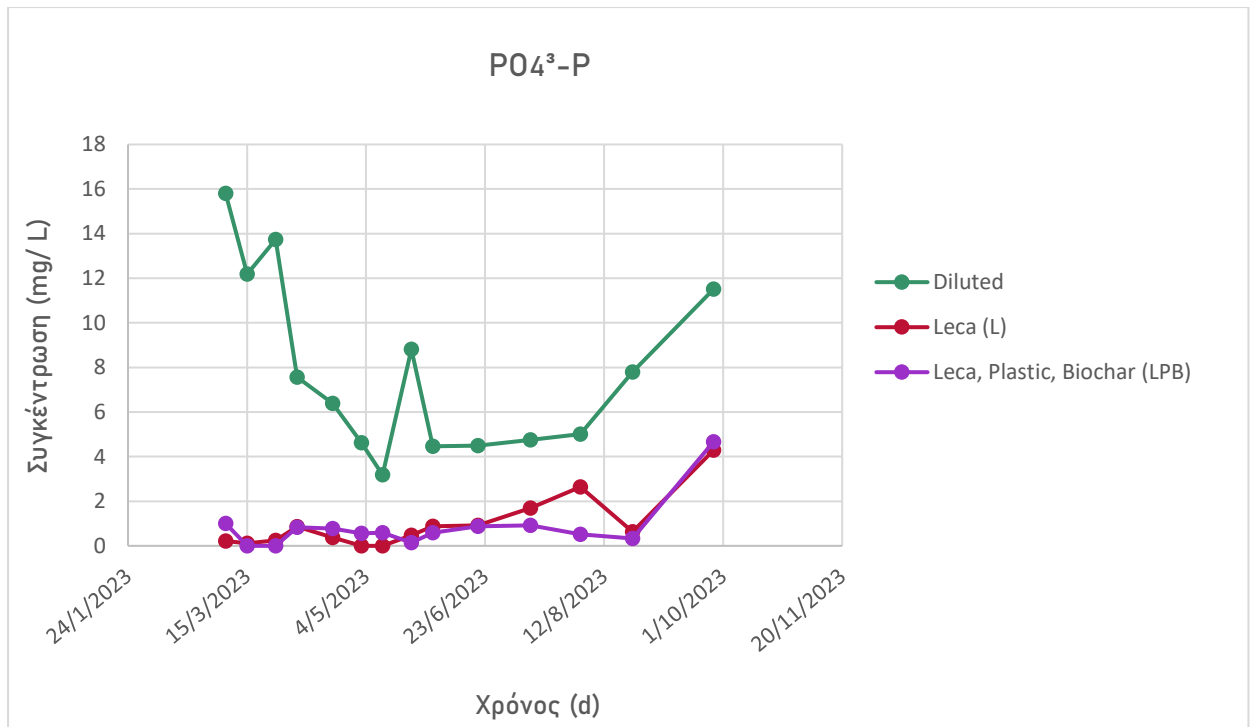
4.2.2.9. Φωσφορικά Ιόντα ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)

Πίνακας 4.8. Αποτελέσματα μετρήσεων $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$

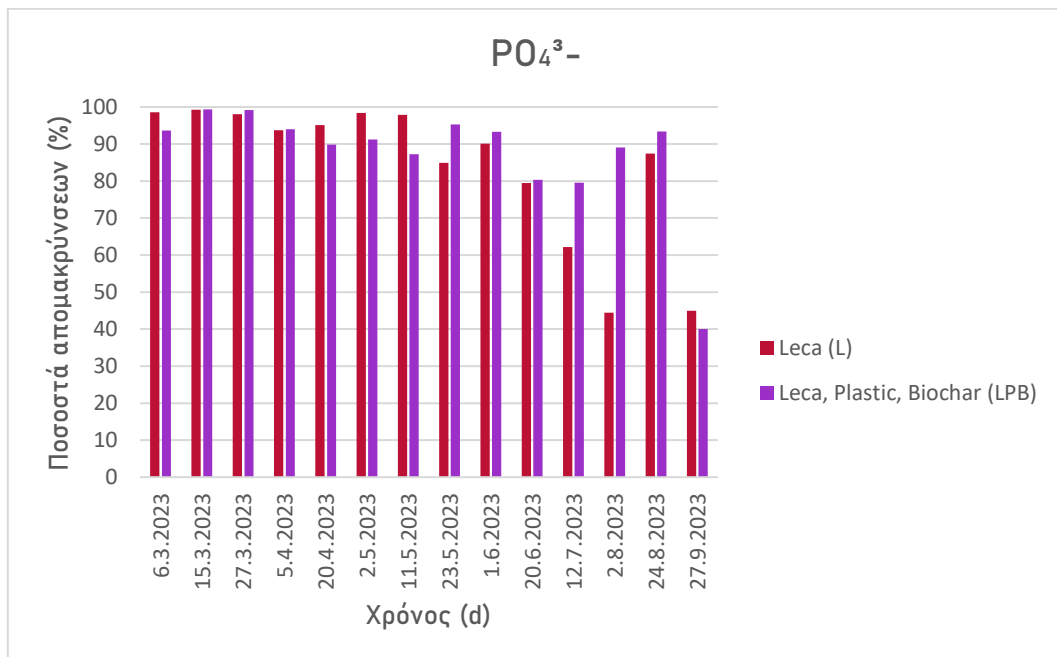
$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	Μέση τιμή συγκέντρωσης (mg/ L)	Εύρος τιμών συγκεντρώσεων (mg/ L)	Μέση τιμή απομάκρυνσης (%)	Εύρος τιμών απομάκρυνσης (%)
Αραιωμένη εισροή	(1:4) 13.9 ± 1.8	(1:4) [12.2 – 15.8]		
	(1:8) 6.2 ± 2.5	(1:8) [3.2 – 11.5]		
L	1.0 ± 1.2	[<0.1–4.3]	83.9 ± 19.4	[44.4 – 99.2]
LPB	0.9 ± 1.1	[<0.1– 4.7]	87.5 ± 14.9	[40.1 – 99.4]

Κάνοντας μία ανασκόπηση στον παραπάνω πίνακα, φαίνεται πώς η μονάδα LPB λειτούργησε καλύτερα από την L, καθώς η μέση απόδοση τους ήταν 87.5% και 83.9% αντίστοιχα. Γενικά και οι δύο δεξαμενές έδωσαν ικανοποιητικά αποτελέσματα. Σύμφωνα με την (Herounim et al., 2011) η απομάκρυνση των $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ στο πείραμα που περιγράφει επιτεύχθηκε κατά 87%, ποσοστό που ταυτίζεται με το πείραμα της παρούσας εργασίας. Επιπρόσθετα, η ίδια υποστηρίζει πώς τα φωσφορικά αφαιρούνται κυρίως στο πρώτο στάδιο επεξεργασίας γιατί οι υγροβιότοποι δεν έχουν φράξει ακόμα. Αυτό συνεπάγεται πώς με την πάροδο του χρόνου η απόφραξη θα ελαττώσει την αποδοτικότητα του συστήματος.

Οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε έναν τεχνητό υγροβιότοπο και ευθύνονται για την απομάκρυνση των ορθοφωσφορικών ιόντων στις εκροές είναι αποτέλεσμα των ίδιων φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών που αναφέρθηκαν στο υποκεφάλαιο 4.1.1.8. του ολικού φωσφόρου. Η Leca ως μέσο πλήρωσης προσροφά το διαλυτό φώσφορο στα σωματίδια της (Vohla et al., 2011) και έτσι ευνοεί την τελική του απομάκρυνση.



Διάγραμμα 4.15. Συγκεντρώσεις $PO_4^{3-}-P$ αραιωμένης εισροής και εκροών L & LPB



Διάγραμμα 4.16. Ποσοστά απομακρύνσεων $PO_4^{3-}-P$ για τις μονάδες L & LPB

4.2.2.10. Ολικές Φαινόλες

Πίνακας 4.9. Αποτελέσματα μετρήσεων φαινολών

Φαινόλες	Μέση τιμή συγκέντρωσης (mg/ L)	Εύρος τιμών συγκεντρώσεων (mg/ L)	Μέση τιμή απομάκρυνσης (%)	Εύρος τιμών απομάκρυνσης (%)
Αραιωμένη εισροή	(1:4) 415.0 ± 48.3	(1:4) [361.2 – 454.5]		
	(1:8) 222.1 ± 59.8	(1:8) [143.6 – 341.2]		
L	43.8 ± 22.4	[<20 – 93.6]	83.4 ± 8.6	[70.8 – 95.6]
LPB	39.6 ± 21.6	[<20 – 87.8]	84.1 ± 7.6	[69.0 – 95.6]

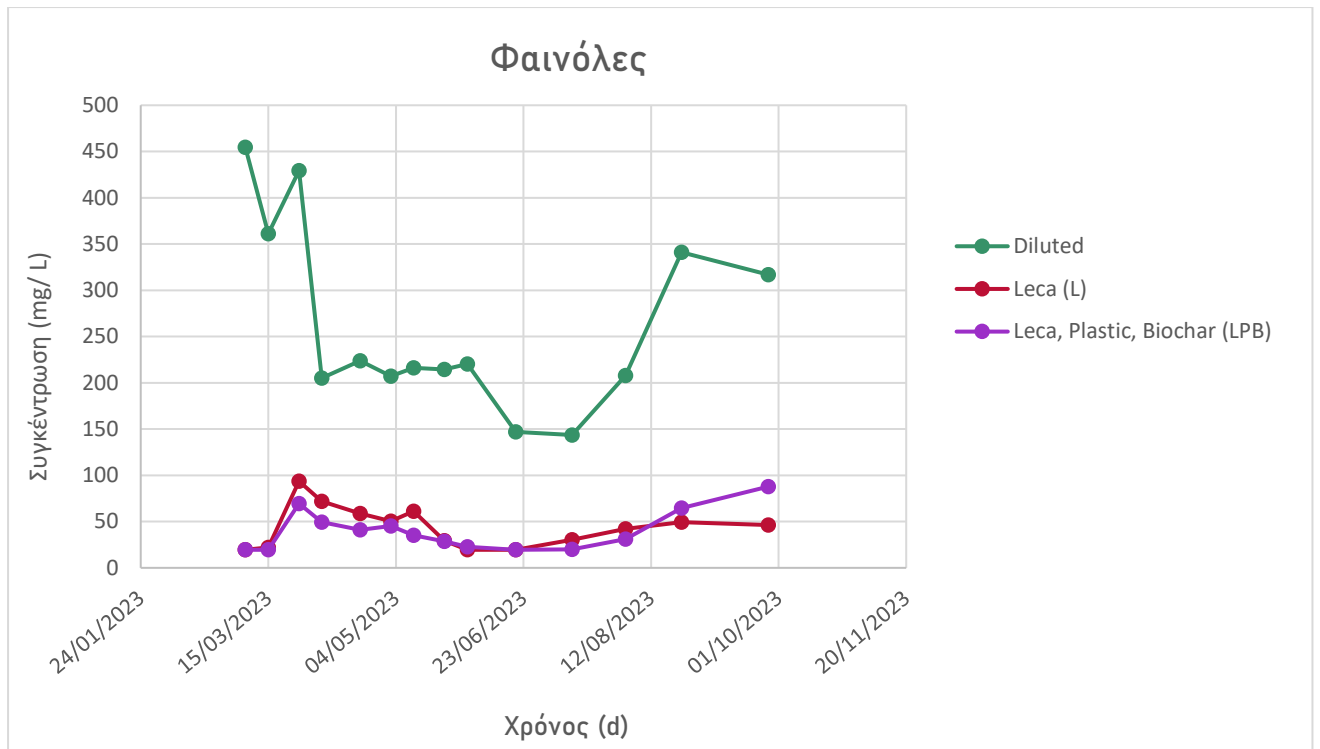
Όπως διαπιστώνεται, από τον παραπάνω πίνακα οι μονάδες L & LPB κατάφεραν να απομακρύνουν σε ικανοποιητικό βαθμό τις ολικές φαινόλες του αποβλήτου. Ειδικότερα, η μονάδα LPB απέδωσε 84.1% της απομάκρυνσης, καθιστώντας την έτσι ως αποτελεσματικότερη σε σχέση με την L που κατάφερε να απομακρύνει το 83.4%.

Παρατηρώντας το διάγραμμα των συγκεντρώσεων, προκύπτει πώς από την αρχή των μετρήσεων οι τιμές ήταν μικρές (<20 mg/L). Ύστερα, παρατηρήθηκε μια αρκετά σημαντική αύξηση, η οποία διήρκεσε για την άνοιξη. Τους καλοκαιρινούς μήνες, η συγκέντρωση των φαινολών διατηρήθηκε σε χαμηλά επίπεδα και πάλι με την αρχή του φθινοπώρου άρχισε να αυξάνεται.

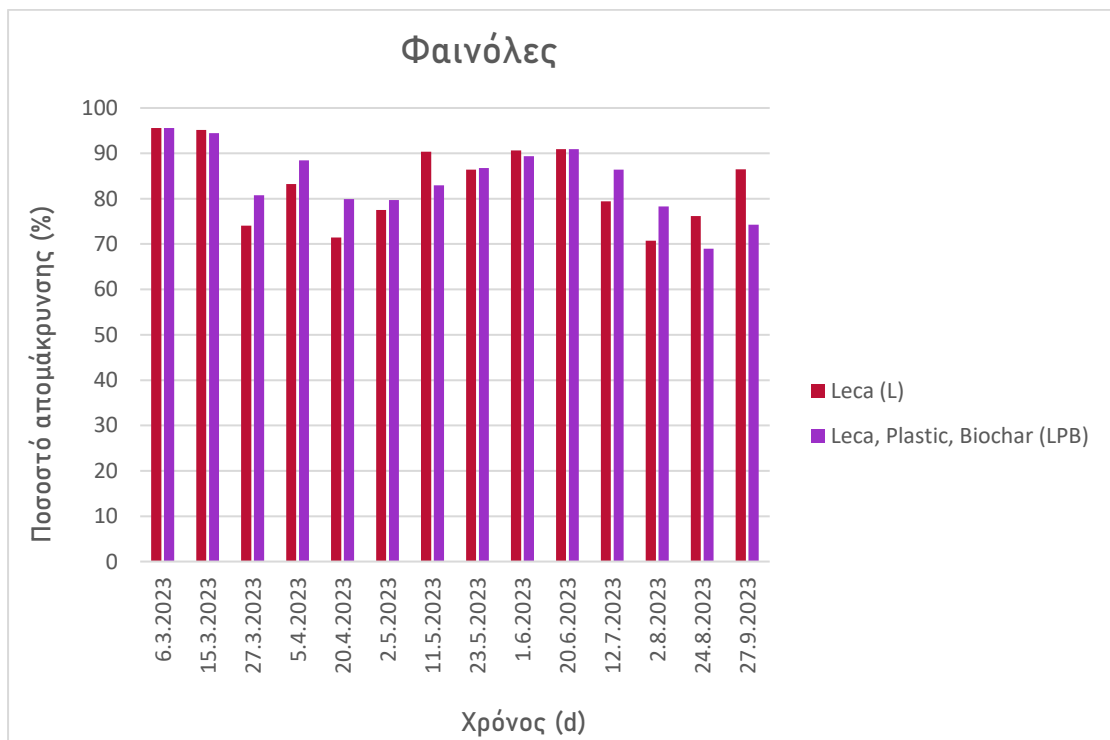
Σε γενικές γραμμές, παρά την εποχιακή αύξηση της συγκέντρωσης των φαινολών, η αποτελεσματικότητα του συστήματος των ΤΥ ως μέσο διαχείρισης και απομάκρυνσης, είναι αδιαμφισβήτητη, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 4.17., όπου τα ποσοστά των απομακρύνσεων ως επί το πλείστον κυμαίνονται από ~ 70-90%.

Η απομάκρυνση των φαινολών μπορεί να είναι αποτέλεσμα τόσο αναερόβιων όσο και αερόβιων διεργασιών, οι οποίες εξαρτώνται από τη διαθεσιμότητα του οξυγόνου. Στα κατακόρυφης ροής ΤΥ, οι συνθήκες που κυριαρχούν είναι αερόβιες, οπότε θεωρείται πώς ο κύριος μηχανισμός αφαίρεσης των φαινολών οφείλεται σε αυτές. Λόγω της βλάστησης, τα επίπεδα του οξυγόνου είναι αυξημένα σε αυτού του τύπου τα συστήματα, οπότε ευνοούνται οι αερόβιες συνθήκες (Stefanakis et al., 2014).

Μια σχετική έρευνα, έδειξε πώς οι απομακρύνσεις που δίνονται για τις φαινόλες σε κατακόρυφης υπόγειας ροής ΤΥ -με ΥΑΕ αναλογίας εισροής 1:10- κυμαίνεται στο 87% (Kapellakis et al., 2012).



Διάγραμμα 4.17. Συγκεντρώσεις φαινολών αραιωμένης εισροής και εκροών L & LPB



Διάγραμμα 4.18. Ποσοστά απομακρύνσεων φαινολών για τις μονάδες L & LPB

4.2.2.11. Ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS)

Πίνακας 4.10. Αποτελέσματα μετρήσεων TSS

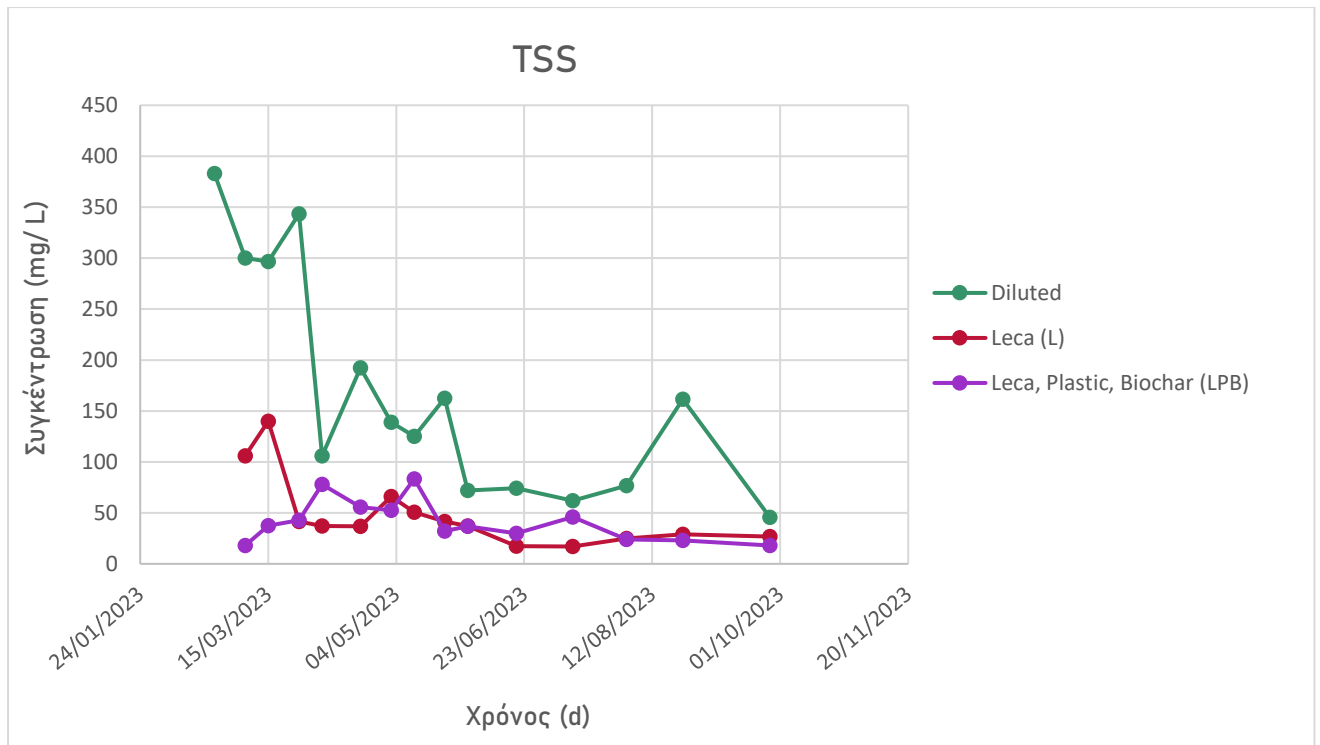
TSS	Μέση τιμή συγκέντρωσης (mg/ L)	Εύρος τιμών συγκεντρώσεων (mg/ L)	Μέση τιμή απομάκρυνσης (%)	Εύρος τιμών απομάκρυνσης (%)
Αραιωμένη εισροή	(1:4) 330.6 ± 40.8	(1:4) [296.7 – 383.0]		
	(1:8) 110.6 ± 48.5	(1:8) [45.6 – 192.2]		
L	48.0 ± 34.9	[17.0 – 140.0]	71.3 ± 10.6	[53.3 – 89.1]
LPB	41.3 ± 20.5	[18.0 – 83.3]	71.3 ± 17.1	[38.0 – 95.3]

Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων καθώς και τα διαγράμματα, διαπιστώνεται ότι οι δύο κλίνες έδωσαν ικανοποιητικά επίπεδα απομακρύνσεων. Ειδικότερα, το ποσοστό της κλίνης L ανήλθε στο 71.3% που ταυτίζεται με το ποσοστό της κλίνης LPB.

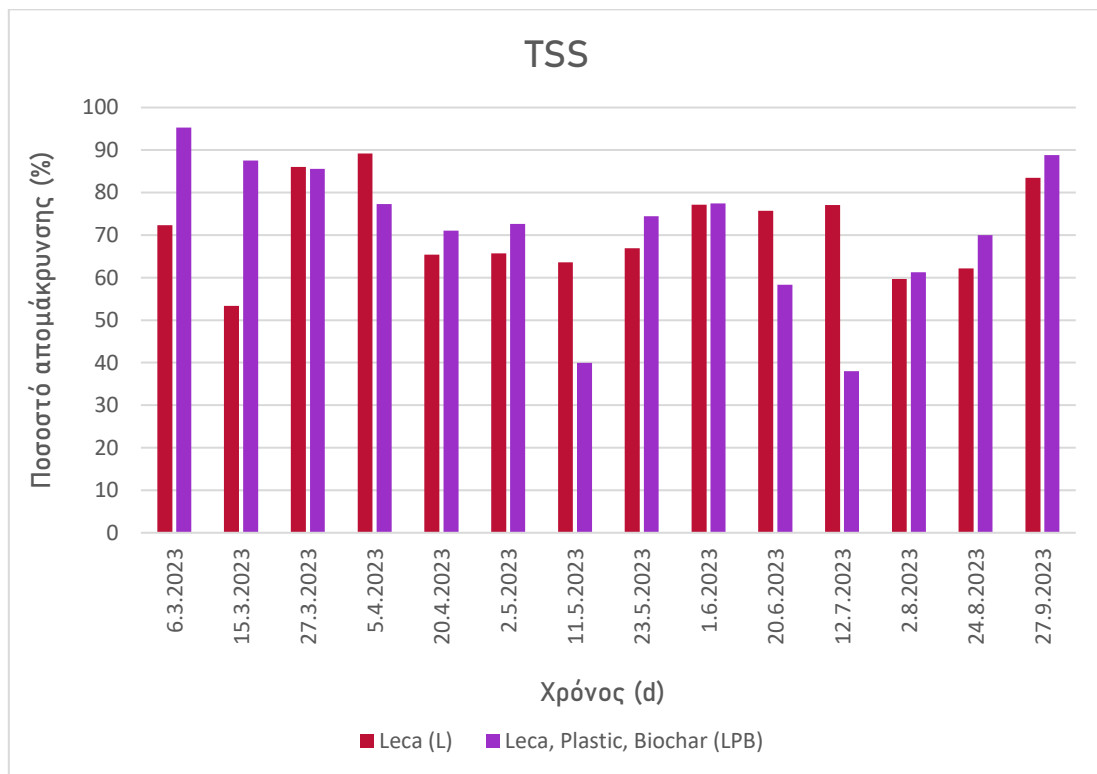
Ακόμη, αναφορικά με τα ποσοστά απομακρύνσεων για την μονάδα LPB τους μήνες Ιούνιο και Ιούλιο, παρατηρείται μια τάση μείωσης, με τα ποσοστά να ανέρχονται μόλις στο 58.3% και 38% αντίστοιχα.

Το ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS) είναι μία αρκετά σημαντική παράμετρος για τον χαρακτηρισμό της ποιότητας ενός λύματος. Η αυξημένη συγκέντρωση TSS δεσμεύει το διαλυμένο οξυγόνο (DO) στο νερό της εκροής (Verma et al., 2012).

Στους τεχνητούς υγροβιότοπους, η απομάκρυνση των ολικών αιρούμενων στερεών είναι αποτέλεσμα φυσικών διαδικασιών, όπως είναι η καθίζηση, το φιλτράρισμα (διήθηση) και η μικροβιακή αφομοίωση στο υπόστρωμα (Zhu et al., 2021). Λόγω του ότι η φόρτιση στο εν λόγω πείραμα είναι διαλείπωντος έργου (batch) και όχι συνεχούς (continuous), ευνοείται η υψηλότερη απομάκρυνση των TSS όπως αναφέρει και ο (Abdelhakeem et al., 2016) επειδή τα στερεά κατακρατούνται στα διάκενα των πόρων των εκάστοτε πληρωτικών υλικών. Το φιλτράρισμα των σωματιδίων γίνεται τόσο στο ριζικό σύστημα και τους μίσχους των επιλεγμένων μακρόφυτων -εν προκειμένω *P. Australis*- όσο και στα υλικά πλήρωσης. Σίγουρα το γεγονός πως υπήρχε βλάστηση και στις δύο δεξαμενές (L & LPB) λειτούργησε ευνοϊκά ώστε να επιτευχθούν μεγαλύτερα ποσοστά απομακρύνσεων, παρέχοντας μεγαλύτερη επιφάνεια, ελαττώνοντας την ταχύτητα του νερού (Abdelhakeem et al., 2016) καθώς επίσης και αποτρέποντας την επαναιώρηση στερεών (Jethwa et al., 2016).



Διάγραμμα 4.19. Συγκεντρώσεις TSS αραιωμένης εισροής και εκροών L & LPB



Διάγραμμα 4.20. Ποσοστά απομακρύνσεων TSS για τις μονάδες L & LPB

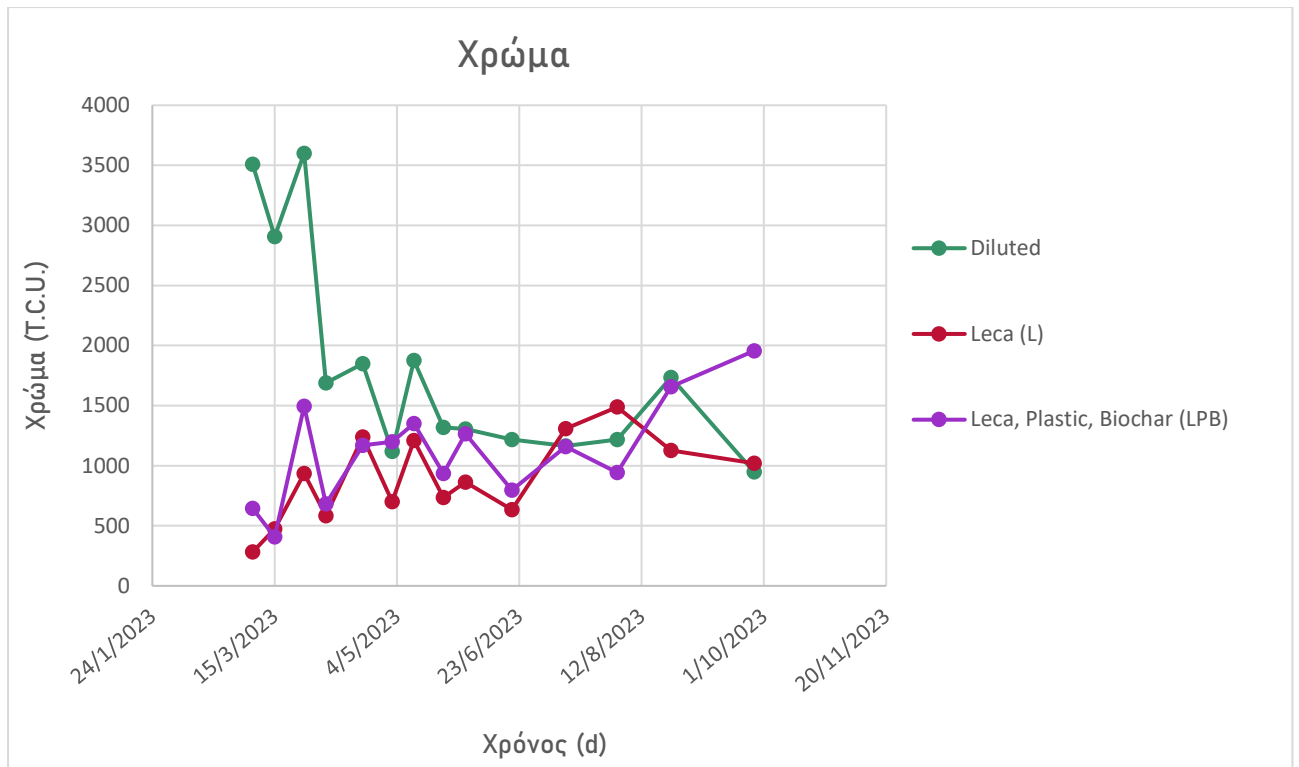
4.2.2.12. Χρώμα

Πίνακας 4.11. Αποτελέσματα μετρήσεων χρώματος

Χρώμα	Μέση τιμή συγκέντρωσης (T.C.U.)	Εύρος τιμών συγκεντρώσεων (T.C.U.)	Μέση τιμή απομάκρυνσης (%)	Εύρος τιμών απομάκρυνσης (%)
Αραιωμένη εισροή	(1:4) 3339.3 ± 376.2	(1:4) [2908.0 – 3600.0]		
	(1:8) 1403.8 ± 323.1	(1:8) [948.0 – 1875.0]		
L	900.1 ± 350.3	[281.0 – 1488.0]	51.7 ± 24.1	[18.2 – 92.0]
LPB	1118.4 ± 421.3	[406.8 – 1956.0]	36.3 ± 31.0	[0 – 88.4]

Παρατηρώντας την στήλη της μέσης τιμής της απομάκρυνσης για την μονάδα LPB, εξάγεται το συμπέρασμα πώς δεν υπήρχε ιδιαίτερη απομάκρυνση χρώματος. Αυτό μπορεί να συμβαίνει λόγω του ότι ένα από τα πληρωτικά υλικά της δεξαμενής είναι το HDPE (Hussein and Scholz, 2017). Γενικά, μελετώντας και το διάγραμμα 4.21., εξάγεται το συμπέρασμα πώς δεν υπήρχε ιδιαίτερη απομάκρυνση του χρώματος στις εκροές.

Μία σχετική έρευνα των (Giannis et al., 2007) έδειξε πώς οι τιμές χρώματος του ανεπεξέργαστου ΥΑΕ που προέκυψαν είναι 1740 ± 50 (TCU). Αναφορικά με το περιγραφόμενο πείραμα από το οποίο προκύπτει η τιμή 1403 ± 323.1 (TCU) μόλις η αραίωση αυξήθηκε σε αναλογία 1:8, δεν υπάρχουν ιδιαίτερες αποκλίσεις.



Διάγραμμα 4.21. Χρώμα αραιωμένης εισροής και εκροών L & LPB

Κεφάλαιο 5°. Συμπεράσματα και Προτάσεις

5.1. Συμπεράσματα

Μετά το πέρας της παρούσας εργασίας, εξάγονται τα κάτωθι συμπεράσματα τόσο για την λειτουργία των πιλοτικών τεχνητών υγροβιότοπων κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής, όσο και για την μέλλουσα βελτιστοποίηση αυτών.

- Η Ieca ως πληρωτικό υλικό καταφέρνει να απομακρύνει τους ρύπους και τα θρεπτικά συστατικά σε αρκετά ικανοποιητικά επίπεδα.
- Οι ΤΥ αυξάνουν το pH του υγρού κλάσματος ελαιοτριβείου, λύνοντας έτσι το πρόβλημα της οξύτητας.
- Οι αναερόβιες συνθήκες που επικρατούν στους κατακόρυφης ροής ΤΥ προσφέρουν τις ιδανικές συνθήκες για την επίτευξη υψηλών αποδόσεων στην διεργασία της απονιτροποίησης και άρα στην απομάκρυνση του νιτρικού αζώτου.
- Στο διάστημα μελέτης δεν υπήρξε ιδιαίτερη απομάκρυνση χρώματος.
- Η καθίζηση που συμβαίνει μέσα στις δεξαμενές του ανεπεξέργαστου ΥΑΕ, απομακρύνει ένα μεγάλο ποσοστό TSS από το υπερκείμενο, ευνοώντας και τις υπόλοιπες διεργασίες απομακρύνσεων.
- Οι δύο μονάδες L & LPB λειτούργησαν παρόμοια στο εξεταζόμενο διάστημα του πειράματος.

5.2. Προτάσεις

Σε αυτό το πεδίο θα προταθούν πιθανές μετατροπές του συστήματος ώστε η απόδοση των μονάδων να βελτιστοποιηθεί σε μελλοντικό χρόνο.

- *Χρήση εκροών κατακόρυφων ΤΥ ως εισροή σε οριζόντιες.*
Από τις πειραματικές μετρήσεις αποδείχθηκε πως οι κατακόρυφες δεξαμενές επιτυγχάνουν καλές αποδόσεις αλλά περαιτέρω επεξεργασία είναι απαραίτητη. Για την επίτευξη μεγαλύτερων τιμών απομάκρυνσης μελλοντικά, θα μπορούσαν οι εκροές των L & LPB να χρησιμοποιηθούν ως εισροή σε συστήματα ΤΥ οριζόντιας υπόγειας ροής, κάτι που θα βοηθούσε πιθανόν και στην αύξηση της φόρτισης.
- *Προσθήκη αερισμού στις δεξαμενές.*
Η προσθήκη τεχνητού αερισμού παρέχει φυσαλίδες αέρα που ανεβαίνουν μέσω της στήλης κορεσμένου νερού του υγροτόπου και έτσι το οξυγόνο μεταφέρεται από την αέρια σε διαλυμένη κατάσταση. Με την προσθήκη

μίας τέτοιας οικολογικής τεχνολογίας αναμένεται η αύξηση των απομακρύνσεων των αερόβιων αποικοδομήσιμων ρύπων, όπως π.χ. των φαινολών, λόγω της υψηλότερης διαθεσιμότητας του οξυγόνου.

Βιβλιογραφία

Διαδίκτυο

1. <https://penteli.meteo.gr/stations/chania/>
2. AGROENERGY, διαθέσιμο στο:
<http://www.agroenergy.gr/en/content/%CE%B1%CE%BE%CE%B9%CE%B%CF%80%CE%BF%CE%AF%CE%B7%CF%83%CE%B7-%CF%84%CF%89%CE%BD-%CF%80%CE%B1%CF%81%CE%B1%CF%80%CF%81%CE%BF%CF%8A%CF%8C%CE%BD%CF%84%CF%89%CE%BD-%CF%85%CF%80%CE%BF%CE%BB%CE%B5%CE%B9%CE%BC%CE%BC%CE%AC%CF%84%CF%89%CE%BD-%CE%BA%CE%B1%CE%B9-%CE%B1%CF%80%CE%BF%CE%B2%CE%BB%CE%AE%CF%84%CF%89%CE%BD-%CF%84%CE%B7%CF%82-%CE%B5%CE%BB%CE%B1%CE%B9%CE%BF%CF%85%CF%81%CE%B3%CE%B9%CE%BA%CE%AE%CF%82-%CE%B4%CF%81%CE%AC%CF%83%CE%B7%CF%82>
3. <https://www.europages.co.uk/HX38-Biocarrier/CHRISTIAN-STOHR-GMBH-CO-KG/cpid-5400406.html>
4. <https://www.leca.com/product>
5. <https://www.elinyae.gr/arhiki>

Ξενόγλωσση

1. Abdelhakeem, S.G., Aboulroos, S.A. and Kamel, M.M. (2016). Performance of a vertical subsurface flow constructed wetland under different operational conditions. *Journal of Advanced Research*, 7(5), pp.803–814. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jare.2015.12.002>.
2. Achak, M., Boumya, W., Ouazzani, N. and Mandi, L. (2019). Preliminary evaluation of constructed wetlands for nutrients removal from olive mill wastewater (OMW) after passing through a sand filter. *Ecological Engineering*, 136, pp.141–151. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.06.007>.
3. Almeida, A., Carvalho, F., Imaginário, M.J., Castanheira, I., Prazeres, A.R., Ribeiro, C., 2017. Nitrate removal in vertical flow constructed wetland planted with *Vetiveria zizanioides*: effect of hydraulic load. *Ecol. Eng.* 99, 535–542. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.11.069>.

4. Bahmanpour, H., Habashi, R. and Hosseini, S.M. (2017). Investigating the Efficiency of Lightweight Expanded Clay Aggregate (LECA) in Wastewater Treatment of Dairy Industry. *Anthropogenic Pollution*, [online] 1(1), pp.9–17. doi:<https://doi.org/10.22034/apj.2017.1.1.917>.
5. Berego, Y.S., Sota, S.S., Ulsido, M.D. and Beyene, E.M. (2022). Treatment Performance Assessment of Natural and Constructed Wetlands on Wastewater From Kege Wet Coffee Processing Plant in Dale Woreda, Sidama Regional State, Ethiopia. *Environmental Health Insights*, 16, p.117863022211427. doi:<https://doi.org/10.1177/11786302221142749>.
6. Bottino, A., Capannelli, G., Comite, A., Costa, C., Firpo, R., Jezowska, A. and Pagliero, M. (2020). Treatment of Olive Mill Wastewater through Integrated Pressure-Driven Membrane Processes. *Membranes*, 10(11), p.334. doi:<https://doi.org/10.3390/membranes10110334>.
7. Brix Hans (2003). *Plants used in constructed wetlands and their functions*. Pgs 81-109) [online] ResearchGate. Available at: https://www.researchgate.net/publication/230563384_Plants_used_in_constructed_wetlands_and_their_functions
8. Chen, J., Deng, S., Jia, W., Li, X., & Chang, J. (2021). Removal of multiple heavy metals from mining-impacted water by biochar-filled constructed wetlands: Adsorption and biotic removal routes. *Bioresource Technology*, 331, 125061.
9. Constructed Wetlands for Nitrate Removal from Tile Drainage Water. (n.d.). Available at: http://biogeochemistry.nres.illinois.edu/Biogeochem_lab/pdfs/Wetland%20Fact%20sheet%20%20for%20web%208-26.pdf
10. Crites, R.W., Middlebrooks, E.J. and Bastian, R.K. (2014). *Natural Wastewater Treatment Systems, Second Edition*. [online] *Google Books*. CRC Press. Available at: https://books.google.gr/books?hl=el&lr=&id=DBPIAgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Natural+Waste+Treatment+Systems&ots=skiLGqyNCV&sig=CUuL33aIPps4D0UI95ejA0fFEck&redir_esc=y#v=onepage&q=Natural%20Waste%20Treatment%20Systems&f=false
11. Deng, S., Chen, J. and Chang, J. (2021). Application of biochar as an innovative substrate in constructed wetlands/biofilters for wastewater treatment: Performance and ecological benefits. *Journal of Cleaner Production*, 293, p.126156. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126156>.
12. Giannis, A., Kalaitzakis, M. and Diamadopoulos, E. (2007). Electrochemical treatment of olive mill wastewater. *Journal of*

- Chemical Technology & Biotechnology*, 82(7), pp.663–671.
doi:<https://doi.org/10.1002/jctb.1725>.
13. Gikas, G.D., Ioannis Tsakmakis and Tsihrintzis, V.A. (2017). Hybrid natural systems for treatment of olive mill wastewater. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 93(3), pp.800–809.
doi:<https://doi.org/10.1002/jctb.5430>.
 - Sundaravadivel, M. and Vigneswaran, S. (2001). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 31(4), pg 359. doi:<https://doi.org/10.1080/20016491089253>.
 14. Gopal, B. (1999). Natural and constructed wetlands for wastewater treatment: Potentials and problems. *Water Science and Technology*, 40(3), pp.39,40. doi:[https://doi.org/10.1016/s0273-1223\(99\)00468-0](https://doi.org/10.1016/s0273-1223(99)00468-0).
 15. Green, M., Friedler, E. and Safrai, I. (1998). Enhancing nitrification in vertical flow constructed wetland utilizing a passive air pump. *Water Research*, 32(12), pp.3513–3520. doi:[https://doi.org/10.1016/s0043-1354\(98\)00182-1](https://doi.org/10.1016/s0043-1354(98)00182-1).
 16. Haberl, R., Grego, S., Langergraber, G., Kadlec, R., Cicalini, A.-R., Dias, S., Novais, J., Aubert, S., Gerth, A., Thomas, H. and Hebner, A. (2003). Constructed Wetlands for the Treatment of Organic Pollutants. [online] doi:<https://doi.org/10.1065/jss2003.03.70>.
 17. Herouvim E., Akrotos C., Tekerlekopoulou A., Vayenas D. (2011). Treatment of olive mill wastewater in pilot-scale vertical flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*. 37. 931–939.
10.1016/j.ecoleng.2011.01.018.
 18. Hussein, A. and Scholz, M. (2017). Dye wastewater treatment by vertical-flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 101, pp.28–38. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.01.016>
 19. Jaradat, A. Q., Gharaibeh, S., & Abu Irjei, M. (2018). The application of solar distillation technique as a mean for olive mill wastewater management. *Water and Environment Journal*, 32(1), 134–140.
<https://doi.org/10.1111/wej.12308>
 20. Jethwa, K. and Bajpai, S. (2016). Role of plants in constructed wetlands (CWS): a review. [online] Available at:
<http://www.jchps.com/specialissues/2016%20Special%20Issue%202/jchps%20%20Kruti%204-10.pdf>
 21. Kaggwa, R. Nature based solutions for wastewater treatment. National water & sewerage corporation, Kampala, Uganda, pp.227–229. Available at:
https://snapp.icra.cat/factsheets/17_Natural%20wetland.pdf

22. Kapellakis, I.E., Paranychanakis, N.V., Tsagarakis, K.P. and Angelakis, A.N. (2012). Treatment of Olive Mill Wastewater with Constructed Wetlands. *Water*, 4(1), pp.260–271.
doi:<https://doi.org/10.3390/w4010260>. Milke, J., Gałczyńska, M. and Wróbel, J. (2020). The Importance of Biological and Ecological Properties of *Phragmites Australis* (Cav.) Trin. Ex Steud., in Phytoremediation of Aquatic Ecosystems—The Review. *Water*, 12(6), p.1770
23. Mazur, P., Gozdowski, D. and Wójcik-Gront, E. (2022). Soil Electrical Conductivity and Satellite-Derived Vegetation Indices for Evaluation of Phosphorus, Potassium and Magnesium Content, pH, and Delineation of Within-Field Management Zones. *Agriculture*, 12(6), p.883.
doi:<https://doi.org/10.3390/agriculture12060883>.
24. Metcalf & Eddy, Inc. 2006. Μηχανική υγρών αποβλήτων, Επεξεργασία και επαναχρησιμοποίηση, 4η έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, ISBN 960-418-108-4.
25. Mlih, R., Bydalek, F., Klumpp, E., Yaghi, N., Bol, R. and Wenk, J. (2020). Light-expanded clay aggregate (LECA) as a substrate in constructed wetlands – A review. *Ecological Engineering*, 148, p.105783.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105783>.
26. Phillips, V. (1997). *Anatomy of a Constructed Wastewater Wetland*. [online] Available at:
<https://conservancy.umn.edu/bitstream/handle/11299/58822/2.4.Phillips.pdf?sequence=1>
27. Stefanakis, A., Akrotos, C.S. and Tsihrintzis, V.A. (2014). *Vertical Flow Constructed Wetlands: Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment*.
28. Total Environ. 380, 48–65.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.09.014>.
29. Verma A., Wei X., Kusiak A. (2012) *Predicting the total suspended solids in wastewater: A data-mining approach. Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 26(4), 1366–1372 | [10.1016/j.engappai.2012.08.015](https://doi.org/10.1016/j.engappai.2012.08.015).
30. Vohla, C., Kõiv, M., Bavor, H.J., Chazarenc, F. and Mander, Ü. (2011). Filter materials for phosphorus removal from wastewater in treatment wetlands—A review. *Ecological Engineering*, 37(1), pp.70–89.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.08.003>.
31. Vymazal, J. (2008). *Constructed Wetlands, Surface Flow*. p.765 [online] ScienceDirect. Available at:

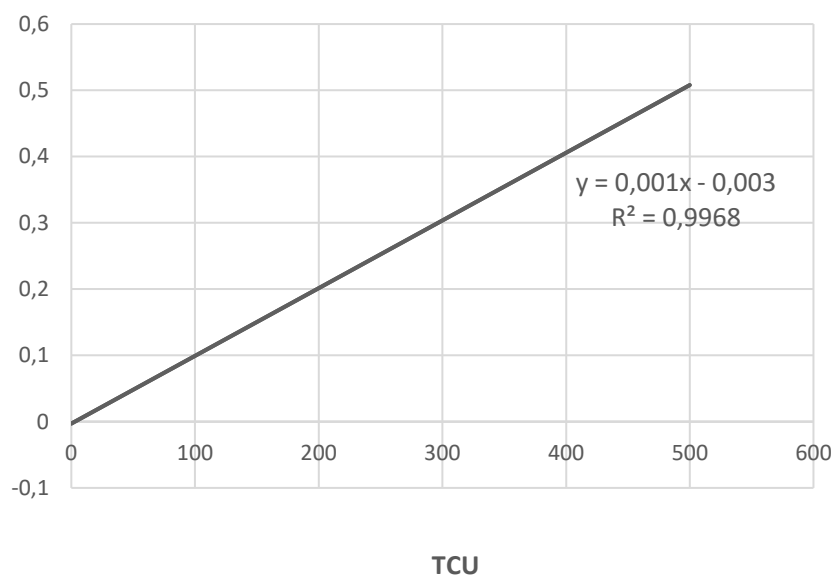
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780080454054000793>

32. Vymazal, J. (2009). The use constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater. *Ecological Engineering*, 35(1), pp.1–17. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.08.016>.
33. Vymazal, J. (2014). Constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters: A review. *Ecological Engineering*, 73, pp.724–751. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.09.034>.
34. Yalcuk, A., Pakdil, N.B. and Turan, S.Y. (2010). Performance evaluation on the treatment of olive mill waste water in vertical subsurface flow constructed wetlands. *Desalination*, 262(1-3), pp.209–214. doi:<https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.06.013>.
35. Yang, Y., Liu, J., Zhang, N., Xie, H., Zhang, J., Hu, Z. and Wang, Q. (2019). Influence of application of manganese ore in constructed wetlands on the mechanisms and improvement of nitrogen and phosphorus removal. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 170, pp.446–452. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.12.024>.
36. Zhu, T., Jenssen, P.D., Mæhlum, T., Krogstad, T., 1997. Phosphorus sorption and chemical characteristics of lightweight aggregates (LWA) – potential filter media in treatment wetlands. *Water Sci. Technol.* 35, 103–108. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(97\)00058-9](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00058-9).
37. Zhu, H., Zhou, Q., Yan, B., Liang, Y., Yu, X., Gerchman, Y. and Cheng, X. (2017). Influence of vegetation type and temperature on the performance of constructed wetlands for nutrient removal. *Water Science and Technology*, 77(3), pp.829–837. doi:<https://doi.org/10.2166/wst.2017.556>.
38. Zhu, T., Gao, J., Huang, Z., Shang, N., Zhang, J. and Cai, M. (2021). Comparison of performance of two large-scale vertical-flow constructed wetlands treating wastewater treatment plant tail-water: Contaminants removal and associated microbial community. 278, pp.111564–111564. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111564>.

Παράρτημα Α

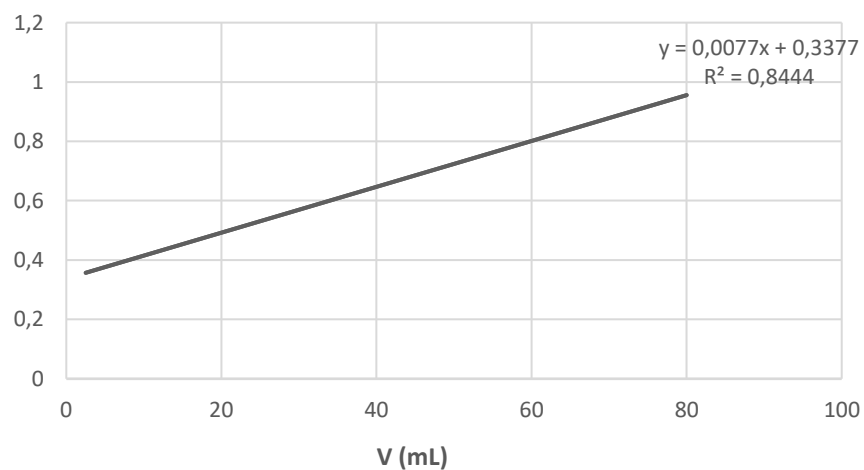
Πρότυπη Καμπύλη Χρώματος (T.C.U.)

Απορρόφηση

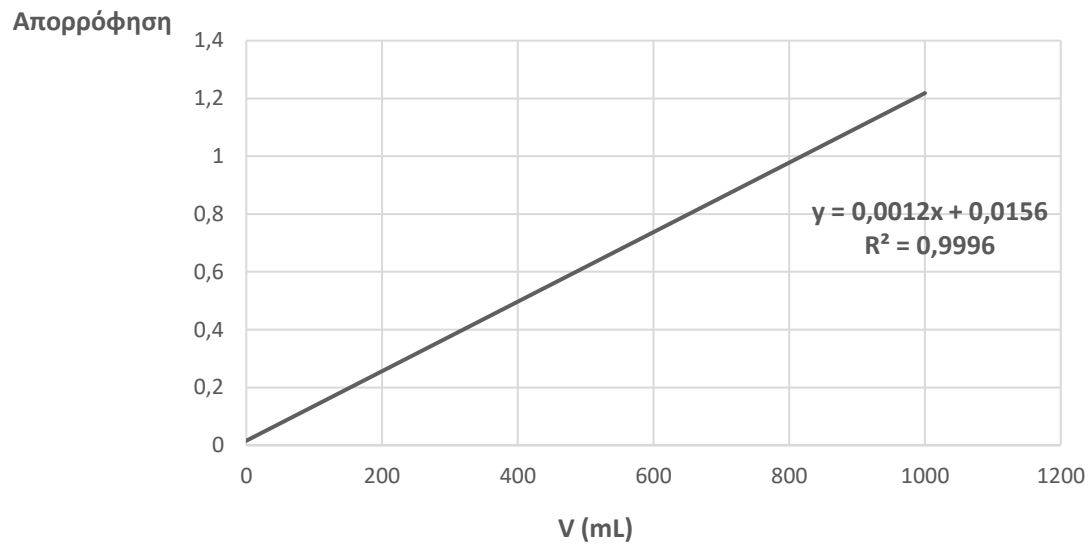


Πρότυπη Καμπύλη Ολικού Φωσφόρου (Βανάδιο)

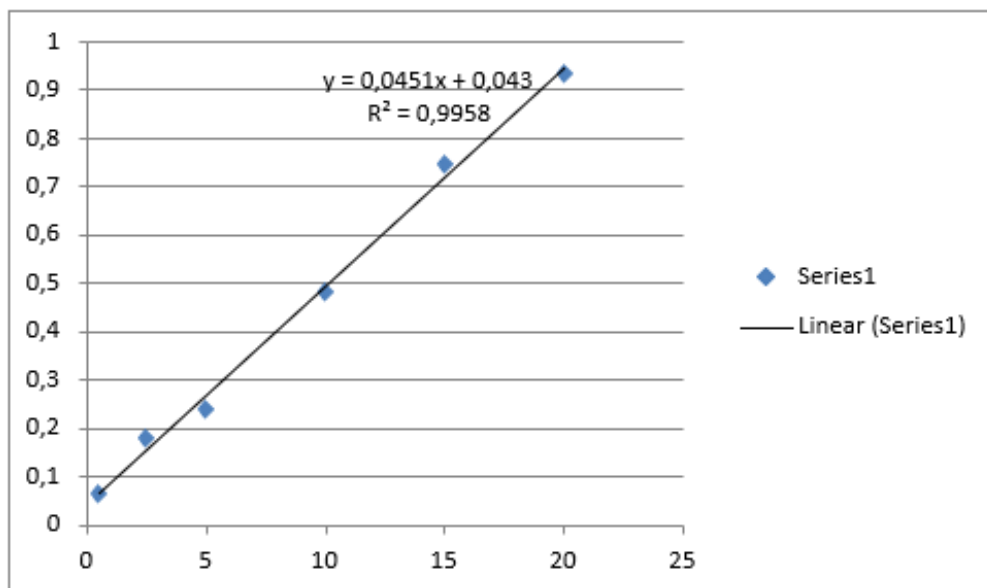
Απορρόφηση

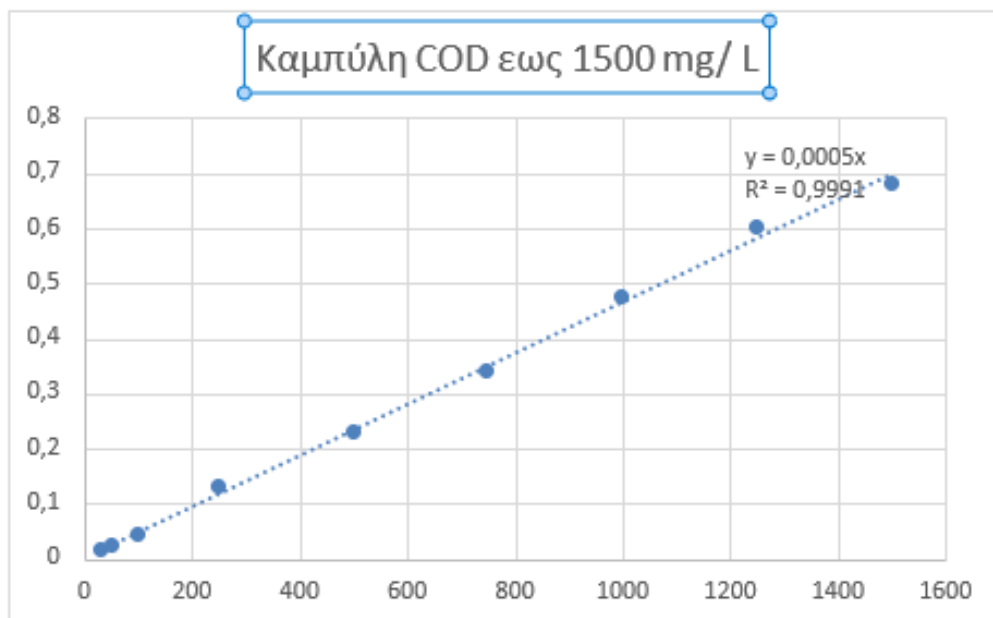
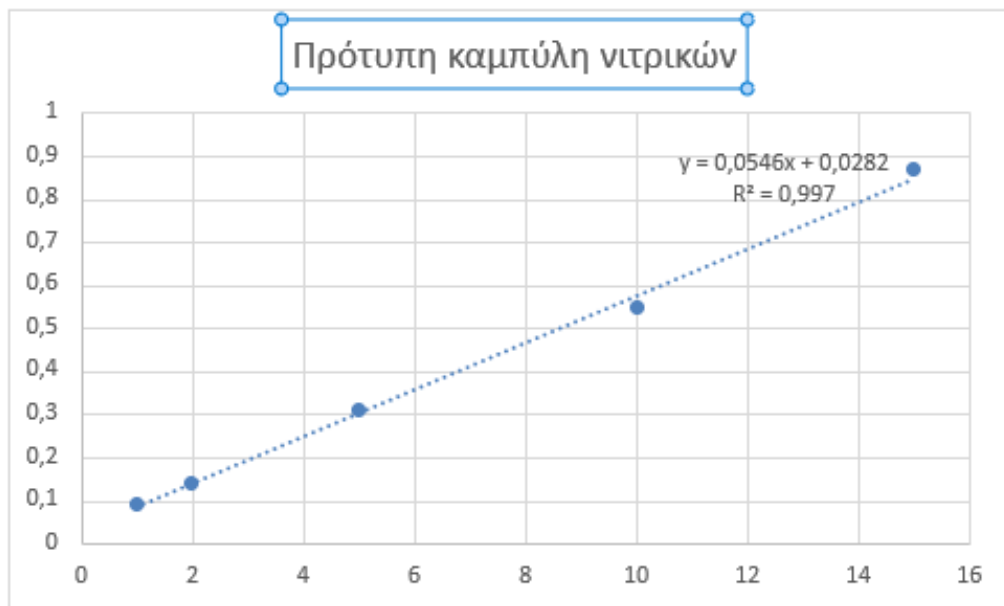


Πρότυπη καμπύλη φαινόλων

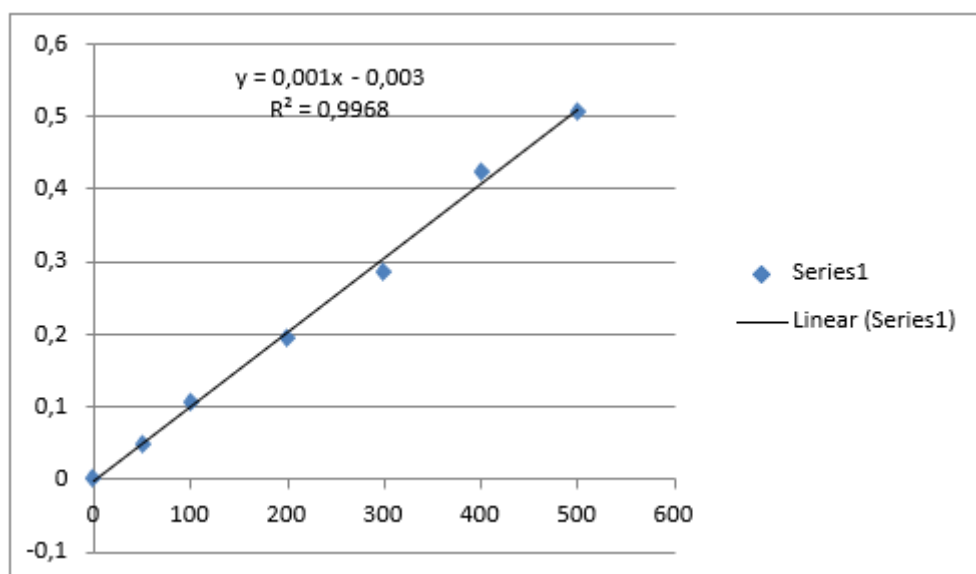


Πρότυπη καμπύλη αμμωνιακών

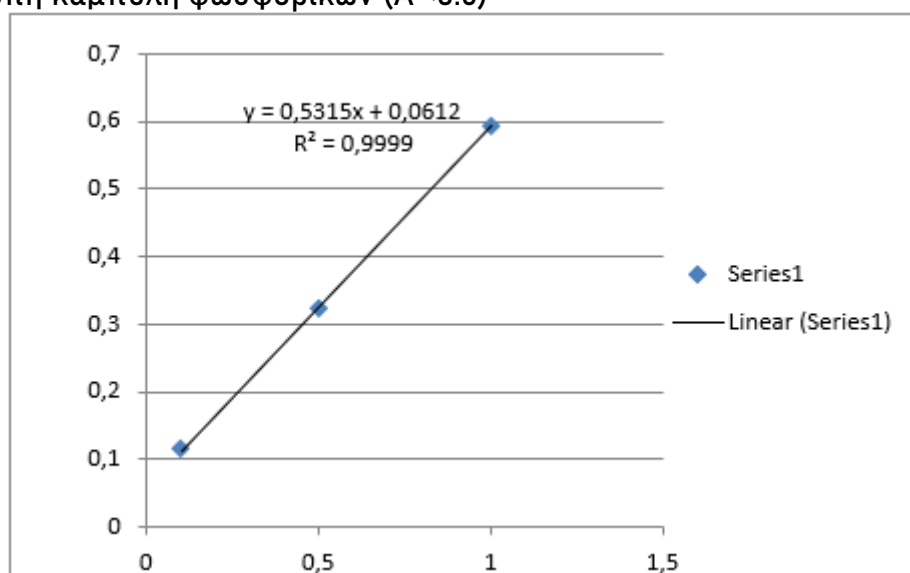




Πρότυπη καμπύλη COD έως 15000 mg/ L



Πρότυπη καμπύλη φωσφορικών ($A < 0.6$)



Πρότυπη καμπύλη φωσφορικών ($A > 0.6$)

