



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών
Περιβάλλοντος

**« Διερεύνηση απόδοσης πιλοτικών μονάδων Τεχνητών Υγροβιότοπων για
την επεξεργασία υγρών αποβλήτων ελαιοτριβείου »**

« Performance investigation of pilot scale constructed wetlands treating olive
mill wastewater »

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΟΥΖΗ ANNA

Χανιά, Οκτώβριος 2025



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών
Περιβάλλοντος

**« Διερεύνηση απόδοσης πιλοτικών μονάδων Τεχνητών Υγροβιότοπων για
την επεξεργασία υγρών αποβλήτων ελαιοτριβείου »**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΟΥΖΗ ANNA

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:

Στεφανάκης Αλέξανδρος, Επίκουρος Καθηγητής (Επιβλέπων)

Βενιέρη Δανάη, Καθηγήτρια

Διαμαντόπουλος Ευάγγελος, Ομότιμος Καθηγητής

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.

**Η παρούσα διπλωματική εργασία
είναι αφιερωμένη στην οικογένεια μου.**

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω την ειλικρινή μου ευγνωμοσύνη στην οικογένεια μου και τους φίλους μου για την αμέριστη και συνεχή υποστήριξή τους, καθ' όλη τη διάρκεια της ακαδημαϊκής μου πορείας. Είμαι ιδιαίτερα ευγνώμων στον κο Αλέξανδρο Στεφανάκη, τον επιβλέποντα καθηγητή μου, που μου εμπιστεύτηκε ένα τόσο ενδιαφέρον και σημαντικό θέμα και για την εξαιρετική καθοδήγηση και συνεργασία που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας μου. Θα ήθελα επίσης να εκφράσω την ειλικρινή εκτίμηση μου στην κα Ελισσάβετ Κουκουράκη, μέλος ΕΔΙΠ και υπεύθυνη του Εργαστηρίου Τεχνολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης, για την πολύτιμη βοήθεια της, την ενθάρρυνση της και την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε κατά τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας. Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλονται στην υποψήφια διδάκτορα Ειρήνη Αθανασιάδου για την διαρκή υποστήριξη και καθοδήγησή της στο εργαστήριο καθ' όλη τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας και συγγραφής της παρούσας εργασίας. Ευχαριστώ θερμά, επίσης, τον Δρ. Παναγιώτη Ρεγκούζα και τους υποψήφιους διδάκτορες Ιωάννη Ασημακούλα και Εμμανουέλα Καρεφυλλάκη για τη βοήθειά τους στις πρακτικές πτυχές του πειράματος. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω ολόκληρη την εξεταστική επιτροπή για την αφιέρωση του πολύτιμου χρόνου της για την αξιολόγηση της εργασίας μου.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	5
Περιεχόμενα	6
Περίληψη	9
Abstract	11
Κατάλογος Εικόνων	13
Κατάλογος Πινάκων	14
Κατάλογος Διαγραμμάτων.....	15
Κεφάλαιο 1°. Εισαγωγή.....	17
Κεφάλαιο 2°. Θεωρητικό Υπόβαθρο	19
2.1 Εισαγωγή στα Υγρά Απόβλητα Ελαιοτριβείου.....	19
2.1.1 Νομοθετικό Πλαίσιο Διαχείρισης.....	19
2.2 Φυσικά Συστήματα Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων.....	20
2.3 Φυσικοί Υγροβιότοποι	21
2.4 Τεχνητοί Υγροβιότοποι	21
2.4.1 Τύποι Τεχνητών Υγροβιότοπων	22
2.4.2 Βλάστηση Τεχνητών Υγροβιότοπων.....	23
2.4.3 Πληρωτικά Υλικά Τεχνητών Υγροβιότοπων.....	24
2.4.4 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα Τεχνητών Υγροβιότοπων	25
2.5 Στόχος Διπλωματικής Εργασίας.....	26
Κεφάλαιο 3°. Πειραματικό Μέρος	27
3.1 Περιγραφή Πειραματικής Διάταξης	27
3.2 Χωροθέτηση Πειραματικής Διάταξης & Κλιματολογικά στοιχεία	33
3.3 Πειραματική Διαδικασία	34

3.4 Δείγματα & Υλικά	35
3.4.1 Δείγμα.....	35
3.4.2 Πληρωτικά υλικά.....	36
3.4.3 Βλάστηση.....	40
3.5 Αναλυτικές Μέθοδοι & Τεχνικές.....	43
3.5.1 pH	43
3.5.2 Ηλεκτρική Αγωγιμότητα (EC).....	44
3.5.3 Χρώμα	45
3.5.4 Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD).....	45
3.5.5 Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD)	46
3.5.6 Ολικό Άζωτο (TN).....	47
3.5.7 Αμμωνιακό Άζωτο ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)	47
3.5.8 Νιτρικό Άζωτο ($\text{NO}_3^- - \text{N}$)	48
3.5.9 Ολικός Φώσφορος (TP)	48
3.5.10 Φωσφορικά ($\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$).....	49
3.5.11 Ολικές Φαινόλες	49
3.5.12 Ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS).....	49
3.6 Μέθοδοι για τη φυτική βιομάζα	51
3.6.1 Προσδιορισμός ολικού φωσφόρου (TP)	51
3.6.2 Προσδιορισμός ολικού αζώτου (TN).....	51
3.6.3 Προσδιορισμός ολικών μετάλλων (TM)	51
Κεφάλαιο 4 ^ο . Ανάλυση και Σχολιασμός Αποτελεσμάτων	52
4.1 Υδατικό Ισοζύγιο.....	52
4.2 Φυσικοχημικές Αναλύσεις	54

4.2.1 Χαρακτηρισμός εισροής	54
4.2.2 Χαρακτηρισμός εκροών.....	55
4.3 Φυτική Βιομάζα	82
4.3.1 Μέταλλα & Μεταλλοειδή	84
4.3.2 Ολικός φώσφορος (TP).....	84
4.3.3 Ολικό άζωτο (TN).....	85
Κεφάλαιο 5°. Συμπεράσματα & Μελλοντικές Προτάσεις.....	86
5.1 Συμπεράσματα	86
5.2 Μελλοντικές Προτάσεις.....	87
Βιβλιογραφικές αναφορές	88
Ελληνική	88
Ξένα.....	88
Παράρτημα Α	95

Περίληψη

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, διερευνήθηκε και αξιολογήθηκε η απόδοση πιλοτικών μονάδων τεχνητών υδροβιότοπων, τόσο οριζόντιας όσο και κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής, με κεντρικό σκοπό την επεξεργασία υγρών αποβλήτων από τριφασικό ελαιοτριβείο, εστιάζοντας στη μείωση του οργανικού φορτίου και στην απομάκρυνση θρεπτικών και άλλων ρύπων, προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα για την εγκυρότητα του σχεδιασμού και τη συνολική αποτελεσματικότητα των συστημάτων. Η πειραματική διάταξη, εγκατεστημένη σε υπαίθριο χώρο της σχολής Χημικών Μηχανικών & Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης στα Χανιά, περιελάμβανε έξι μονάδες: τέσσερις οριζόντιας ροής και δύο κατακόρυφης ροής. Δοκιμάστηκαν διαφορετικές διαμορφώσεις πληρωτικών υλικών σε κάθε δεξαμενή, όπως ζεόλιθος, διογκωμένη άργιλος (LECA), βιοεξανθράκωμα (biochar) και ανακυκλωμένο πλαστικό (RHDPE), τόσο με βλάστηση όσο και χωρίς (*P. Australis* και *A. Donax*). Η πρώτη μονάδα (C) λειτούργησε ως control χωρίς βλάστηση, με υπόστρωμα από ζεόλιθο και LECA, ενώ οι τρεις επόμενες (ZL, PB, P) ήταν φυτεμένες με καλάμι *P. Australis* και *A. Donax* και διέθεταν διαφορετικά υλικά πλήρωσης: η ZL είχε την ίδια σύσταση με την C (ζεόλιθος και LECA), η PB περιείχε RHDPE και βιοεξανθράκωμα, και η P μόνο RHDPE. Οι δύο μονάδες κατακόρυφης ροής, L και LPB -επίσης φυτεμένες με *P. Australis* και *A. Donax*-, αποτελούνταν από σκέτη LECA η πρώτη, και από συνδυασμό LECA, βιοεξανθρακώματος και RHDPE η δεύτερη. Κατά τη διάρκεια μιας περιόδου επτά μηνών (Νοέμβριος 2023 - Μάιος 2024), οι δεξαμενές φορτιζόνταν ανά 2 μέρες με αραιωμένο μείγμα υγρών αποβλήτων ελαιοτριβείου, προερχόμενο από τριφασικό ελαιουργείο της περιοχής Περιβολίων Χανίων. Τα υγρά απόβλητα, αραιώνονταν με νερό σε αναλογία 1:8 πριν την τροφοδοσία στις μονάδες. Πραγματοποιήθηκαν τακτικές δειγματοληψίες και αναλύσεις των εκροών των δεξαμενών, της αραιωμένης εισροής, καθώς και του ανεπεξέργαστου υγρού αποβλήτου, για την αξιολόγηση φυσικών και χημικών παραμέτρων, όπως pH, ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC), ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS), του χρώματος, της βιοχημικής και χημικής ζήτησης οξυγόνου (BOD_5 , COD), του ολικού αζώτου (TN), του αμμωνιακού αζώτου ($NH_4^+ - N$), του νιτρικού αζώτου ($NO_3^- - N$), του ολικού φωσφόρου (TP), των φωσφορικών ιόντων ($PO_4^{3-} - P$) και των ολικών φαινολών. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν και αναλύσεις της φυτικής βιομάζας, ύστερα από συγκομιδή της, που αποσκοπούσαν στον προσδιορισμό ολικού αζώτου (TN), ολικού φωσφόρου (TP), μετάλλων και μεταλλοειδών.

Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η μέση απόδοση απομάκρυνσης ρύπων παρουσίασε σημαντικές διαφοροποιήσεις, οι οποίες συνδέονται άμεσα με τη σύσταση, τον τύπο ροής κάθε συστήματος και τις τοπικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Ειδικότερα, η μονάδα C παρουσίασε εξαιρετικά υψηλά ποσοστά απομάκρυνσης, επιτυγχάνοντας $91.4 \pm 3.9\%$ για το COD, $97 \pm 1.8\%$ για το BOD_5 , $90.8 \pm 5.6\%$ για τον TP, $95.4 \pm 6.0\%$ για τα $PO_4^{3-} - P$ και $83 \pm 8.2\%$ για τις ολικές φαινόλες, μαζί με σημαντική μείωση των TSS. Η μονάδα ZL, με το ίδιο

υπόστρωμα αλλά με βλάστηση, εμφάνισε παρομοίως υψηλή απόδοση, με απομάκρυνση $89.8 \pm 4.7\%$ για το COD, $97.7 \pm 2.0\%$ για το BOD₅, $87.6 \pm 11.9\%$ για τον TP, $83.2 \pm 14.8\%$ για τα PO₄³⁻-P και $83 \pm 8.2\%$ για τις ολικές φαινόλες. Αντίθετα, οι μονάδες PB και P, που βασίστηκαν στο ανακυκλωμένο πλαστικό, παρουσίασαν συγκριτικά χαμηλότερες επιδόσεις, με την PB να καταγράφει απομακρύνσεις $75.7 \pm 14.3\%$ (COD), $94.8 \pm 2.5\%$ (BOD₅), $71.2 \pm 28.9\%$ (TP), $48.5 \pm 22.2\%$ (PO₄³⁻-P) και $59.1 \pm 20.5\%$ (φαινόλες), και την P να εμφανίζει τιμές $76.1 \pm 11.4\%$ (COD), $93.3 \pm 4.2\%$ (BOD₅), $38 \pm 15.3\%$ (TP), $39.6 \pm 14.7\%$ (PO₄³⁻-P) και $60 \pm 18.9\%$ (φαινόλες). Οι μονάδες κατακόρυφης ροής έδειξαν επίσης ικανοποιητική απόδοση, με τη μονάδα L να επιτυγχάνει αποδοτικότερη απομάκρυνση $82.5 \pm 7.8\%$ (COD), $95.3 \pm 1.9\%$ (BOD₅), $61.9 \pm 21.1\%$ (TP), $63.9 \pm 21.7\%$ (PO₄³⁻-P) και $76.7 \pm 9.6\%$ (φαινόλες), ενώ η μονάδα LPB κατέγραψε απομακρύνσεις $81.8 \pm 9.8\%$ (COD), $97.6 \pm 1.3\%$ (BOD₅), $51.5 \pm 18.4\%$ (TP), $53.4 \pm 19.7\%$ (PO₄³⁻-P) και $69.1 \pm 16.1\%$ (φαινόλες). Συμπερασματικά, οι πιλοτικές μονάδες που περιείχαν ζεόλιθο και LECA ως υλικά πλήρωσης, είχαν την υψηλότερη αποδοτικότητα στην απομάκρυνση οργανικών και θρεπτικών ρύπων, χωρίς η παρουσία της φυτικής κάλυψης να αποτελεί παράγοντα καθοριστικής σημασίας, επιβεβαιώνοντας έτσι ότι οι τεχνητοί υγροβιότοποι αποτελούν μια αποδοτική και περιβαλλοντικά φιλική και βιώσιμη λύση για τη διαχείριση των υγρών αποβλήτων ελαιοτριβείου.

Abstract

In the context of this diploma thesis, the performance of pilot-scale constructed wetlands, of both horizontal and vertical subsurface flow, was investigated and evaluated. The main objective was the treatment of wastewater from a three-phase olive mill, focusing on the reduction of the organic load and the removal of nutrients and other pollutants, in order to draw conclusions regarding the design validity and the overall efficiency of the systems. The experimental setup, installed outdoors at the School of Chemical and Environmental Engineering of the Technical University of Crete in Chania, comprised six units: four with horizontal flow and two with vertical flow. Different configurations of filter media were tested in each tank, including zeolite, lightweight expanded clay aggregate (LECA), biochar, and recycled plastic (RHDPE), both with and without vegetation (*P. Australis* and *A. Donax*). The first unit (C) served as an unplanted control, with a substrate of zeolite and LECA. The next three horizontal flow units (ZL, PB, P) were planted with *P. Australis* and *A. Donax* and featured different filter media: ZL had the same composition as C (zeolite and LECA), PB contained RHDPE and biochar, and P contained only RHDPE. The two vertical flow units, L and LPB—also planted with *P. Australis* and *A. Donax*—consisted of LECA alone (L) and a combination of LECA, biochar, and RHDPE (LPB). Over a seven-month period (November 2023 - May 2024), the tanks were fed every two days with diluted olive mill wastewater, sourced from a three-phase olive mill in the Perivolia area of Chania. The wastewater was diluted with water at a 1:8 ratio before being fed to the units. Regular sampling and analysis of the tank effluents, the diluted influent, and the raw wastewater were conducted to evaluate physicochemical parameters such as pH, electrical conductivity (EC), total suspended solids (TSS), color, biochemical and chemical oxygen demand (BOD_5 , COD), total nitrogen (TN), ammoniacal nitrogen (NH_4^+-N), nitrate nitrogen (NO_3^--N), total phosphorus (TP), phosphates (PO_4^{3--P}), and total phenols. Additionally, after harvesting, the plant biomass was analyzed to determine its content of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), metals, and metalloids.

The experimental results indicated that the average pollutant removal efficiency varied significantly, depending on the composition, the flow type of each system, and the local environmental conditions. Specifically, unit C demonstrated exceptionally high removal rates, achieving $91.4 \pm 3.9\%$ for COD, $97 \pm 1.8\%$ for BOD_5 , $90.8 \pm 5.6\%$ for TP, $95.4 \pm 6.0\%$ for PO_4^{3--P} , and $83 \pm 8.2\%$ for total phenols, along with a significant reduction in TSS. Unit ZL, with the same substrate but vegetated, showed similarly high performance, with removal rates of $89.8 \pm 4.7\%$ for COD, $97.7 \pm 2.0\%$ for BOD_5 , $87.6 \pm 11.9\%$ for TP, $83.2 \pm 14.8\%$ for PO_4^{3--P} , and $83 \pm 8.2\%$ for total phenols. Conversely, units PB and P, which were based on recycled plastic, exhibited comparatively lower performance. PB recorded removal efficiencies of $75.7 \pm 14.3\%$ (COD), $94.8 \pm 2.5\%$ (BOD_5), $71.2 \pm 28.9\%$ (TP), $48.5 \pm 22.2\%$ (PO_4^{3--P}), and $59.1 \pm 20.5\%$ (phenols), while P showed values of $76.1 \pm 11.4\%$ (COD), 93.3

$\pm 4.2\%$ (BOD_5), $38 \pm 15.3\%$ (TP), $39.6 \pm 14.7\%$ ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$), and $60 \pm 18.9\%$ (phenols). The vertical flow units also demonstrated satisfactory performance, with unit L achieving $82.5 \pm 7.8\%$ (COD), $95.3 \pm 1.9\%$ (BOD_5), $61.9 \pm 21.1\%$ (TP), $63.9 \pm 21.7\%$ ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$), and $76.7 \pm 9.6\%$ (phenols), while unit LPB recorded removals of $81.8 \pm 9.8\%$ (COD), $97.6 \pm 1.3\%$ (BOD_5), $51.5 \pm 18.4\%$ (TP), $53.4 \pm 19.7\%$ ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$), and $69.1 \pm 16.1\%$ (phenols). In conclusion, the pilot units containing zeolite and LECA as filter media demonstrated the highest efficiency in removing organic and nutrient pollutants, with the presence of vegetation not being a decisive factor. This confirms that constructed wetlands represent an efficient, environmentally friendly, and sustainable solution for the management of olive mill wastewater.

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1. Σχηματική απεικόνιση παραγωγής ελαιολάδου και παραπροϊόντων	18
Εικόνα 2. Τεχνητός Υγροβιότοπος οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής (Α. Stefanakis, 2014) 27	27
Εικόνα 3. Σχηματική απεικόνιση ΤΥ οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής του πειράματος	28
Εικόνα 4. Τεχνητός Υγροβιότοπος κάθετης υποεπιφανειακής ροής (Α. Stefanakis, 2014)....	28
Εικόνα 5. Σχηματική απεικόνιση ΤΥ κάθετης υποεπιφανειακής ροής του πειράματος	29
Εικόνα 6. Δεξαμενές ορθογωνικής διατομής στο Πολυτεχνείο Κρήτης (Απρίλιος 2024)	30
Εικόνα 7. Δεξαμενές κυκλικής διατομής στο Πολυτεχνείο Κρήτης (Απρίλιος 2024)	30
Εικόνα 8. Βυτίο αποθήκευσης ΥΑΕ	35
Εικόνα 9. Ζεόλιθος (https://id.bossgoo.com/product-detail/natural-zeolite-for-fish-tank-pools-54349801.html)	36
Εικόνα 10. Διογκωμένη άργιλος LECA (https://www.hydro-culture.net/)	37
Εικόνα 11. Ανακυκλωμένο πλαστικό HX38 Biocarrier	38
Εικόνα 12. Βιοεξανθράκωμα (https://ecotreecompany.com/the-magical-biochar/).....	39
Εικόνα 13. <i>P. australis</i> (Wikipedia)	41
Εικόνα 14. <i>A. donax</i> (Wikipedia).....	42
Εικόνα 15. Πεχάμετρο CRISON microPH 2002.....	44
Εικόνα 16. Αγωγιμόμετρο CRISON microCM 2202	44
Εικόνα 17. Φασματοφωτόμετρο μονής δέσμης SHIMADZU UV-1202	45
Εικόνα 18. Πιεζομετρικές φιάλες BOD	46
Εικόνα 19. Συσκευή διήθησης	50

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1. Οριακές τιμές εκροών για διάφορους αποδέκτες (σύμφωνα με ΚΥΑ 179192/656, ΦΕΚ 582/2-7-1979)	20
Πίνακας 2. Διαστάσεις δεξαμενών πειραματικής διάταξης	29
Πίνακας 3. Μετεωρολογικά δεδομένα πεδίου (https://penteli.meteo.gr/stations/chania/)	33
Πίνακας 4. Μέσες τιμές συγκεντρώσεων και εύρος τιμών των παραμέτρων της εισροής... ..	54
Πίνακας 5. Αποτελέσματα μετρήσεων pH αραιωμένης εισροής και εκροών	55
Πίνακας 6. Αποτελέσματα μετρήσεων ηλεκτρικής αγωγιμότητας αραιωμένης εισροής και εκροών.....	57
Πίνακας 7. Αποτελέσματα μετρήσεων χρώματος αραιωμένης εισροής και εκροών.....	59
Πίνακας 8. Αποτελέσματα μετρήσεων BOD ₅ αραιωμένης εισροής και εκροών.....	61
Πίνακας 9. Αποτελέσματα μετρήσεων COD αραιωμένης εισροής και εκροών.....	64
Πίνακας 10. Αποτελέσματα μετρήσεων TN αραιωμένης εισροής και εκροών	67
Πίνακας 11. Αποτελέσματα μετρήσεων NH ₄ ⁺ - N αραιωμένης εισροής και εκροών	68
Πίνακας 12. Αποτελέσματα μετρήσεων NO ₃ ⁻ - N αραιωμένης εισροής και εκροών.....	69
Πίνακας 13. Αποτελέσματα μετρήσεων TP αραιωμένης εισροής και εκροών.....	71
Πίνακας 14. Αποτελέσματα μετρήσεων PO ₄ ³⁻ - P αραιωμένης εισροής και εκροών	74
Πίνακας 15. Αποτελέσματα μετρήσεων φαινολών αραιωμένης εισροής και εκροών	77
Πίνακας 16. Αποτελέσματα μετρήσεων TSS αραιωμένης εισροής και εκροών	80
Πίνακας 17. Αποτελέσματα ανίχνευσης μετάλλων και μεταλλοειδών στη φυτική βιομάζα ..	82
Πίνακας 18. Αποτελέσματα ανίχνευσης ολικού φωσφόρου στη φυτική βιομάζα.....	83
Πίνακας 19. Αποτελέσματα ανίχνευσης ολικού αζώτου στη φυτική βιομάζα	83

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1. Μέση μηνιαία εξατμισοδιαπνοή για τις μονάδες C, ZL, PB και P και μέση μηνιαία θερμοκρασία	52
Διάγραμμα 2. Μέση μηνιαία εξατμισοδιαπνοή για τις μονάδες L, LPB και μέση μηνιαία θερμοκρασία.....	53
Διάγραμμα 3. Μετρήσεις pH αραιωμένης εισροής και εκροών C, ZL, PB, & P.....	55
Διάγραμμα 4. Μετρήσεις pH αραιωμένης εισροής και εκροών L & LPB.....	56
Διάγραμμα 5. Μετρήσεις EC αραιωμένης εισροής και εκροών C, ZL, PB, & P	57
Διάγραμμα 6. Μετρήσεις EC αραιωμένης εισροής και εκροών L & LPB.....	58
Διάγραμμα 7. Χρώμα αραιωμένης εισροής και εκροών C, ZL, PB & P	59
Διάγραμμα 8. Χρώμα αραιωμένης εισροής και εκροών L & LPB.....	60
Διάγραμμα 9. Συγκεντρώσεις BOD ₅ αραιωμένης εισροής και εκροών C, ZL, PB & P.....	61
Διάγραμμα 10. Συγκεντρώσεις BOD ₅ αραιωμένης εισροής και εκροών L & LPB	62
Διάγραμμα 11. Ποσοστά απομακρύνσεων BOD ₅ για τις μονάδες C, ZL, PB & P.....	62
Διάγραμμα 12. Ποσοστά απομακρύνσεων BOD ₅ για τις μονάδες L & LPB	63
Διάγραμμα 13. Συγκεντρώσεις COD αραιωμένης εισροής και εκροών C, ZL, PB & P.....	64
Διάγραμμα 14. Συγκεντρώσεις COD αραιωμένης εισροής και εκροών L & LPB	65
Διάγραμμα 15. Ποσοστά απομακρύνσεων COD για τις μονάδες C, ZL, PB & P.....	65
Διάγραμμα 16. Ποσοστά απομακρύνσεων COD για τις μονάδες L & LPB	66
Διάγραμμα 17. Συγκεντρώσεις TP αραιωμένης εισροής και εκροών C, ZL, PB & P.....	71
Διάγραμμα 18. Συγκεντρώσεις TP αραιωμένης εισροής και εκροών L & LPB	72
Διάγραμμα 19. Ποσοστά απομακρύνσεων TP για τις μονάδες C, ZL, PB & P	72
Διάγραμμα 20. Ποσοστά απομακρύνσεων TP για τις μονάδες L & LPB	73
Διάγραμμα 21. Συγκεντρώσεις PO ₄ ³⁻ - P αραιωμένης εισροής και εκροών C, ZL, PB & P ...	75
Διάγραμμα 22. Συγκεντρώσεις PO ₄ ³⁻ - P αραιωμένης εισροής και εκροών L & LPB.....	75

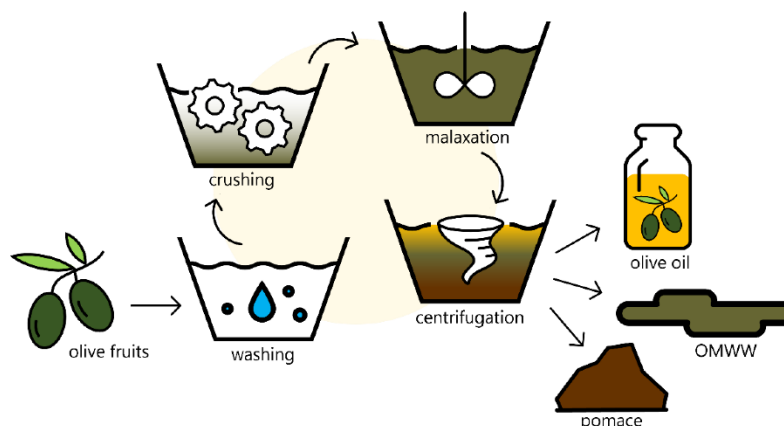
Διάγραμμα 23. Συγκεντρώσεις φαιολών αραιωμένης εισροής και εκροών C, ZL, PB & P.	77
Διάγραμμα 24. Συγκεντρώσεις φαιολών αραιωμένης εισροής και εκροών L & LPB	78
Διάγραμμα 25. Ποσοστά απομακρύνσεων φαιολών για τις μονάδες C, ZL, PB & P.....	78
Διάγραμμα 26. Ποσοστά απομακρύνσεων φαιολών για τις μονάδες L & LPB	79
Διάγραμμα 27. Συγκεντρώσεις TSS αραιωμένης εισροής και εκροών C, ZL, PB & P	80
Διάγραμμα 28. Συγκεντρώσεις TSS αραιωμένης εισροής και εκροών L & LPB.....	81

Κεφάλαιο 1°. Εισαγωγή

Η ελαιοκαλλιέργεια και η παραγωγή ελαιολάδου αποτελούν μια οικονομική δραστηριότητα θεμελιώδους σημασίας για πολλές χώρες της Μεσογείου. Η περιοχή της Μεσογείου, άλλωστε, ευθύνεται για το 97% της παγκόσμιας παραγωγής ελαιολάδου, με χώρες όπως η Ισπανία, η Ιταλία και η Ελλάδα να κατέχουν ηγετικές θέσεις σε αυτή τη βιομηχανία (Paraskeva & Diamadopoulos, 2006). Ωστόσο, η συγκεκριμένη αγροτοβιομηχανική δραστηριότητα ενέχει μια σημαντική πρόκληση, η οποία σχετίζεται με την παραγωγή και διαχείριση των υγρών αποβλήτων ελαιολαιού (ΥΑΕ), γνωστών και ως «κατσίγαρος». Υπολογίζεται ότι για κάθε τόνο ελαιόκαρπου που υφίσταται επεξεργασία, παράγονται περίπου 0,5 έως 1,5 κυβικά μέτρα υγρών αποβλήτων, ανάλογα με το μέγεθος της εξαγωγής που χρησιμοποιείται (Chiavola et al., 2010).

Η μεταποίηση του καρπού της ελιάς σε ελαιόλαδο λαμβάνει χώρα στα ελαιολαδοποιεία, μονάδες που λειτουργούν εντατικά κατά την ελαιοκομική περίοδο, συνήθως από τον Οκτώβριο έως τον Φεβρουάριο. Κατά τη διάρκεια αυτής της εποχικής λειτουργίας και ανεξάρτητα από την εφαρμοζόμενη τεχνολογία εκχύλισης (μέθοδος μηχανικής συμπίεσης, κλασική τριφασική ή σύγχρονη διφασική), παράγονται, εκτός από το κύριο προϊόν, σημαντικές ποσότητες παραπροϊόντων. Το πλέον προβληματικό από αυτά, λόγω του όγκου και των χαρακτηριστικών του, είναι τα υγρά απόβλητα ελαιολαιού, τα οποία χαρακτηρίζονται από υψηλό και ανθεκτικό οργανικό φορτίο (COD, BOD₅), με τις τιμές του COD να φτάνουν έως και τα 220 g/L και του BOD έως και τα 100 g/L. Το πιο κρίσιμο χαρακτηριστικό τους είναι η παρουσία φυτοτοξικών και ανθεκτικών φαινολικών και πολυφαινολικών ενώσεων, έντονο σκούρο χρώμα και καθιστώντας τα ένα από τα πιο ρυπογόνα απόβλητα της βιομηχανίας τροφίμων. (Paraskeva & Diamadopoulos, 2006; Dermeche et al., 2013). Επιπλέον, τα ΥΑΕ παρουσιάζουν συνήθως όξινο pH, που κυμαίνεται μεταξύ 4 και 5 και έντονη οσμή.

Η διαχείριση των ΥΑΕ αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα για διάφορους λόγους. Πρωτίστως, η παραγωγή τους είναι εποχιακή, καθώς περιορίζεται σε μια περίοδο δύο έως τεσσάρων μηνών, ετησίως. Παράλληλα ο κλάδος της ελαιουργίας χαρακτηρίζεται από ένα μεγάλο αριθμό μικρών, κυρίως οικογενειακών, επιχειρήσεων που είναι διάσπαρτες σε αγροτικές περιοχές. Αυτή η δομή, καθιστά την εγκατάσταση κεντρικών ή μεμονωμένων συστημάτων επεξεργασίας, οικονομικά ασύμφορη και τεχνικά περίπλοκη (Paraskeva & Diamadopoulos, 2006). Ως αποτέλεσμα, οι πρακτικές που εφαρμόζονται συχνά περιλαμβάνουν την ανεξέλεγκτη διάθεση των ΥΑΕ σε εδάφη, λίμνες, ποτάμια ή στη θάλασσα καθώς και την αποθήκευσή τους σε λίμνες εξάτμισης. Αυτές οι μέθοδοι, οδηγούν σε σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα, όπως η ρύπανση των υδάτινων σωμάτων και του εδάφους, η δυσοσμία και ο κίνδυνος μόλυνσης του υπόγειου υδροφόρου.



Εικόνα 1. Σχηματική απεικόνιση παραγωγής ελαιολάδου και παραπροϊόντων

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος, έχουν ερευνηθεί και εφαρμοστεί πολυάριθμες τεχνολογίες επεξεργασίας, οι οποίες μπορούν να ταξινομηθούν σε φυσικές διεργασίες (καθίζηση, προσρόφηση, διήθηση κ.ά.), χημικές (οξείδωση, κ.ά.) βιολογικές (νιτροποίηση, απονιτροποίηση, βιοαποικοδόμηση, κ.ά.) και συνδυαστικές μεθόδους (Paraskeva & Diamadopoulos, 2006). Οι βιολογικές μέθοδοι, αερόβιες και αναερόβιες, θεωρούνται οι κυρίαρχες προσεγγίσεις για την επεξεργασία των ΥΑΕ. Όμως, όλες οι παραπάνω τεχνολογίες παρουσιάζουν περιορισμούς, όπως το υψηλό κόστος, η πολυπλοκότητα και η παραγωγή χημικής λυματολάσπης. Στη πράξη, έχει διαπιστωθεί ότι μια μεμονωμένη διεργασία σπάνια είναι επαρκής και συχνά απαιτείται ένας συνδυασμός διαφορετικών τεχνολογιών για την επίτευξη των επιθυμητών ορίων εκροής. Στο πλαίσιο αυτό, τα συστήματα τεχνητών υδροβιότοπων αποτελούν μια ελκυστική, βιώσιμη και φιλική προς το περιβάλλον εναλλακτική λύση, ειδικά για μικρές και αποκεντρωμένες μονάδες (Akratos & Tsihrintzis, 2007). Οι τεχνητοί υδροβιότοποι είναι σχεδιασμένα και κατασκευασμένα συστήματα που αξιοποιούν φυσικές διεργασίες, με τη συμμετοχή της υδροχαρούς βλάστησης, του υποστρώματος και των μικροβιακών πληθυσμών για την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων (Vymazal, 2007). Η μέθοδος των τεχνητών υδροβιότοπων είναι οικονομικά αποδοτική, δεδομένων των χαμηλών απαιτήσεων σε λειτουργικές δαπάνες και συντήρηση. Επιπλέον, υποστηρίζει τη βιώσιμη ανάπτυξη σε τοπικό επίπεδο, παράγοντας τη διαμόρφωση νέων, περιβαλλοντικά ωφέλιμων οικοσυστημάτων. Κατά συνέπεια, η πρακτική αυτή αποτελεί μια πλεονεκτική λύση για τον περιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που συνδέονται με τη διαχείριση του (Yang et al., 2001).

Κεφάλαιο 2°. Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1 Εισαγωγή στα Υγρά Απόβλητα Ελαιοτριβείου

Τα υγρά απόβλητα ελαιοτριβείων (ΥΑΕ), μια ευρεία κατηγορία βιομηχανικών υποπροϊόντων, συχνά παρουσιάζονται ως σύνθετα υδατικά απόβλητα που απαιτούν σημαντική επεξεργασία πριν από την απόρριψη τους στο περιβάλλον. Ένα κύριο χαρακτηριστικό των υγρών αποβλήτων ελαιοτριβείου, είναι ένα πολύ υψηλό οργανικό φορτίο, το οποίο συχνά μετράται με τη χημική απαίτηση οξυγόνου και τη βιοχημική απαίτηση οξυγόνου (Vymazal, 2014). Επίσης, τα συγκεκριμένα απόβλητα περιέχουν συχνά αυξημένα επίπεδα αιωρούμενων στερεών και παρουσιάζουν όξινες τιμές pH. Ακόμη, διακρίνονται για την υψηλή περιεκτικότητα τους σε φυτοτοξικές φαινολικές ενώσεις, ενώ άλλα απόβλητα βιομηχανικών ελαιοτριβείων μπορεί να περιέχουν χρωστικές ουσίες, βαρέα μέταλλα ή διάφορους υδρογονάνθρακες.

2.1.1 Νομοθετικό Πλαίσιο Διαχείρισης

Η περιβαλλοντική διαχείριση των ΥΑΕ στην Ελλάδα γνώρισε μια σημαντική μεταβολή μετά το 1987. Μέχρι τότε, η επικρατούσα πρακτική ήταν η απευθείας και ανεξέλεγκτη διοχέτευση τους σε φυσικούς υδάτινους αποδέκτες (χειμάρρους ή θάλασσες), γεγονός που προκάλεσε σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα. Ως εκ τούτου, θεσπίστηκε η υποχρέωση για την κατάλληλη επεξεργασία τους πριν την απόρριψη, μια απαίτηση με ιδιαίτερη βαρύτητα για τις τουριστικά αναπτυσσόμενες νησιωτικές περιοχές.

Το σύγχρονο θεσμικό πλαίσιο, που διαμορφώνεται κυρίως από την ΚΥΑ με αριθμό 127402/1487/Φ15/1-12-2016 (ΦΕΚ Β/3924), προσφέρει στους παραγωγούς τρεις βασικές εναλλακτικές μεθόδους: α) την κατασκευή εδαφοδεξαμενών εξάτμισης, β) τη συλλογή σε κλειστές δεξαμενές για ελεγχόμενη διάθεση σε καλλιέργειες (υδρολίπανση) ή γ) το συνδυασμό και των δύο μεθόδων.

Πέραν αυτών των μεθόδων, το πλαίσιο ενθαρρύνει την αξιοποίηση των ΥΑΕ στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας. Επιτρέπεται η παράδοση τους σε εξειδικευμένες μονάδες για την ανάκτηση προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας (π.χ. πολυφαινόλες), την παραγωγή ενέργειας (βιοαέριο) ή τη δημιουργία οργανικών λιπασμάτων (κομποστοποίηση). Συμπληρωματικά, η ΚΥΑ 145116/2011 (ΦΕΚ Β 354) εγκρίνει κάθε τεχνολογία επεξεργασίας που επιτυγχάνει ποιότητα εκροής κατάλληλη για επαναχρησιμοποίηση, όπως η άρδευση και ο τεχνητός εμπλουτισμός υδροφορέων.

Για τη διασφάλιση της συμμόρφωσης η ΚΥΑ 179182/656 (ΦΕΚ 582/2-7-1979) ορίζει τις παραμέτρους που πρέπει να παρακολουθούνται συστηματικά: BOD₅, COD, αιωρούμενα στερεά, pH, χρώμα και έλαια. Ο ακόλουθος πίνακας του ΕΛΙΝΥΑΕ συνοψίζει τις θεσπισμένες οριακές τιμές για τη διάθεση των ΥΑΕ, ανάλογα με τον τελικό αποδέκτη.

Πίνακας 1. Οριακές τιμές εκροών για διάφορους αποδέκτες (σύμφωνα με ΚΥΑ 179192/656, 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

2.2 Φυσικά Συστήματα Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων

Τα φυσικά συστήματα επεξεργασίας αποτελούν μια εναλλακτική προσέγγιση έναντι των συμβατικών, μηχανοποιημένων και ενεργοβόρων εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων. Τα συστήματα αυτά αξιοποιούν φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε φυσικά οικοσυστήματα, αλλά τις εφαρμόζουν σε ένα ελεγχόμενο περιβάλλον για την απομάκρυνση ρύπων από τα απόβλητα (Sundaravadivel & Vigneswaran, 2001). Βασίζονται στη συνδυαστική δράση του εδάφους, των υδρόβιων φυτών (μακρόφυτα) και των μικροοργανισμών για την αποικοδόμηση της οργανικής ύλης και την απομάκρυνση θρεπτικών και άλλων ρύπων.

Τα συστήματα αυτά, όπως οι λίμνες σταθεροποίησης και οι τεχνητοί υγροβιότοποι (ΤΥ), χαρακτηρίζονται από χαμηλός κόστος κατασκευής και λειτουργίας, ελάχιστες απαιτήσεις σε ενέργεια και απλή συντήρηση. Για τους λόγους αυτούς, θεωρούνται ιδανική λύση για αποκεντρωμένη επεξεργασία αποβλήτων σε μικρές κοινότητες, αγροτικές περιοχές ή βιομηχανικές μονάδες με εποχιακή λειτουργία, όπως τα ελαιотριβεία (Vymazal, 2014). Οι τεχνητοί υγροβιότοποι, ειδικότερα, αποτελούν μια προηγμένη μορφή φυσικού συστήματος, καθώς είναι μηχανικά σχεδιασμένοι για να μεγιστοποιούν την αποδοτικότητα των διεργασιών καθαρισμού σε ελεγχόμενες συνθήκες (Sundaravadivel & Vigneswaran, 2001).

2.3 Φυσικοί Υγροβιότοποι

Οι φυσικοί υγροβιότοποι είναι ημι-υδάτινα οικοσυστήματα, όπως έλη, βάλτοι και παραλίμνιες περιοχές, που χαρακτηρίζονται από ελεύθερη ροή επιφανειακού νερού και την παρουσία αναδυόμενης βλάστησης, όπως *Phragmites australis* και *Typha* spp. Αυτά τα οικοσυστήματα λειτουργούν ως φυσικοί αποδέκτες και «φίλτρα» για τα νερά μιας λεκάνης απορροής, απομακρύνοντας θρεπτικά, αιωρούμενα στερεά και παθογόνους μικροοργανισμούς με φυσικούς μηχανισμούς, όπως η καθίζηση και το φιλτράρισμα λόγω της αργής ροής του νερού μέσα στην πυκνή βλάστηση, και βιολογικούς μηχανισμούς, όπως η πρόσληψη θρεπτικών συστατικών από τα φυτά και η μικροβιακή αποικοδόμηση στο πλούσιο σε οργανική ύλη έδαφος.

Παρόλο που οι φυσικοί υγροβιότοποι έχουν χρησιμοποιηθεί ιστορικά για την απόρριψη λυμάτων, η χρήση τους για συστηματική επεξεργασία αποβλήτων παρουσιάζει σημαντικούς περιορισμούς. Επιπλέον, η συνεχής φόρτιση με υψηλά ρυπαντικά φορτία μπορεί να διαταράξει την ισορροπία του φυσικού οικοσυστήματος, ενώ άλλες ανθρώπινες δραστηριότητες στην περιοχή μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά την απόδοσή τους. Για τους λόγους αυτούς, αναπτύχθηκαν οι τεχνητοί υγροβιότοποι, οι οποίοι προσφέρουν ένα ελεγχόμενο περιβάλλον που μεγιστοποιεί τις επιθυμητές διεργασίες καθαρισμού.

2.4 Τεχνητοί Υγροβιότοποι

Οι ΤΥ είναι μηχανικά σχεδιασμένα και κατασκευασμένα συστήματα που προσομοιώνουν τις διεργασίες καθαρισμού των φυσικών υγροβιότοπων, αλλά σε ένα πιο ελεγχόμενο περιβάλλον (Vymazal, 2014). Αποτελούνται από μία ή περισσότερες στεγανές λεκάνες, οι οποίες πληρώνονται με ένα πορώδες υλικό (υπόστρωμα ή πληρωτικό υλικό), όπως χαλίκι, άμμος ή άλλα εξειδικευμένα υλικά και φυτεύονται με υδρόβια βλάστηση, κυρίως αναδυόμενα μακρόφυτα (Sundaravadivel & Vigneswaran, 2001).

Η επεξεργασία των αποβλήτων στους ΤΥ επιτυγχάνεται μέσω ενός συνδυασμού φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών. Οι κυριότεροι μηχανισμοί απομάκρυνσης ρύπων περιλαμβάνουν:

- **Φυσικές διεργασίες:** Καθίζηση και φιλτράρισμα των αιωρούμενων στερεών, καθώς το νερό ρέει αργά μέσα από το υπόστρωμα και το ριζικό σύστημα των φυτών.
- **Χημικές διεργασίες:** Προσρόφηση και καθίζηση ρύπων, όπως ο φώσφορος και τα βαρέα μέταλλα, πάνω στις επιφάνειες των σωματιδίων του υποστρώματος.
- **Βιολογικές διεργασίες:** Η μικροβιακή δραστηριότητα είναι ο πιο σημαντικός μηχανισμός. Πληθυσμοί μικροοργανισμών αναπτύσσονται ως βιοφίλμ πάνω στο υπόστρωμα και στις ρίζες των φυτών, αποικοδομώντας την οργανική ύλη (μείωση BOD και COD) και μετατρέποντας τις ενώσεις του αζώτου (νιτροποίηση,

απονιτροποίηση). Τα φυτά συμβάλλουν σε αυτές τις διεργασίες παρέχοντας επιφάνειες για την ανάπτυξη των μικροβίων και μεταφέροντας οξυγόνο στο ριζικό τους σύστημα (Vymazal, 2014).

2.4.1 Τύποι Τεχνητών Υγροβιότοπων

Οι ΤΥ ταξινομούνται κυρίως με βάση την υδρολογία τους, δηλαδή τον τρόπο με τον οποίο ρέει το νερό μέσα στο σύστημα. Οι τρεις βασικοί τύποι είναι οι υγροβιότοποι ελεύθερης επιφανειακής ροής, οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής και κάθετης υποεπιφανειακής ροής (Vymazal, 2014).

2.4.1.1 Τεχνητοί Υγροβιότοποι Ελεύθερης Επιφανειακής Ροής (FSF CW)

Σε αυτά τα συστήματα, το νερό ρέει πάνω από την επιφάνεια του υποστρώματος, σε μικρό βάθος, όπως σε ένα φυσικό έλος. Είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικοί στην απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών και παθογόνων μικροοργανισμών (λόγω της έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία), αλλά η μεταφορά οξυγόνου στο νερό είναι περιορισμένη, καθιστώντας τη νιτροποίηση λιγότερο αποτελεσματική (Sundaravadivel & Vigneswaran, 2001).

2.4.1.2 Τεχνητοί Υγροβιότοποι Οριζόντιας Υποεπιφανειακής Ροής (HSSF CW)

Σε αυτόν τον τύπο, το νερό εισέρχεται από τη μια πλευρά της δεξαμενής και ρέει οριζόντια κάτω από την επιφάνεια του υποστρώματος προς την έξοδο στην αντίθετη πλευρά. Το υπόστρωμα παραμένει συνεχώς κορεσμένο με νερό. Λόγω της περιορισμένης διάχυσης οξυγόνου από την ατμόσφαιρα, οι συνθήκες μέσα στο υπόστρωμα είναι κυρίως αερόβιες ή αναερόβιες. Αυτό καθιστά τα συστήματα HSSF πολύ αποτελεσματικά για την απονιτροποίηση, αλλά ανεπαρκή για τη νιτροποίηση της αμμωνίας και την αποικοδόμηση αερόβιων οργανικών. (Vymazal, 2014).

2.4.1.3 Τεχνητοί Υγροβιότοποι Κάθετης Υποεπιφανειακής Ροής (VSSF CW)

Σε αυτά τα συστήματα, τα απόβλητα τροφοδοτούνται διακοπτόμενα στην επιφάνεια του υγροβιότοπου και διηθούνται κάθετα προς τα κάτω, όπου συλλέγονται από ένα δίκτυο αποστράγγισης στον πυθμένα. Η διακοπτόμενη τροφοδοσία επιτρέπει στον αέρα να εισέλθει στους πόρους του υποστρώματος μεταξύ των φορτίσεων, δημιουργώντας αερόβιες συνθήκες. Αυτό καθιστά τα συστήματα VSSF εξαιρετικά αποτελεσματικά στην απομάκρυνση του BOD, την οξείδωση της αμμωνίας (νιτροποίηση) και την απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών. Ωστόσο, η απονιτροποίηση είναι περιορισμένη λόγω της έλλειψης αναερόβιων ζωνών (Green et al., 1998).

2.4.1.4 Υβριδικά Συστήματα

Για την επίτευξη υψηλής απομάκρυνσης τόσο της αμμωνίας όσο και του ολικού αζώτου, συχνά συνδυάζονται διαφορετικοί τύποι τεχνητών υγροβιότοπων σε σειρά. Ένα συνηθισμένο υβριδικό σύστημα περιλαμβάνει ένα στάδιο τεχνητών υγροβιότοπων κάθετης υποεπιφανειακής ροής για νιτροποίηση, ακολουθούμενο από ένα στάδιο τεχνητών υγροβιότοπων οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής για απονιτροποίηση (Vymazal, 2014).

2.4.2 Βλάστηση Τεχνητών Υγροβιότοπων

Αν και η κύρια βιολογική αποικοδόμηση των ρύπων στους τεχνητούς υγροβιότοπους πραγματοποιείται από τους μικροοργανισμούς, η βλάστηση (μακρόφυτα) διαδραματίζει πολλαπλούς και κρίσιμους ρόλους στην απόδοση του συστήματος (Brix, 1997). Τα φυτά δεν είναι απλώς παθητικά στοιχεία, αλλά ενεργοί μηχανισμοί του οικοσυστήματος. Οι κυριότερες λειτουργίες τους είναι:

- **Παροχή επιφάνειας για μικροβιακή ανάπτυξη:** Το εκτεταμένο ριζικό σύστημα των φυτών, καθώς και τα βυθισμένα τμήματα των βλαστών, παρέχουν μια τεράστια επιφάνεια για την προσκόλληση και ανάπτυξη μικροοργανισμών που σχηματίζουν βιοφίλμ. Αυτά τα βιοφίλμ είναι οι κύριοι «βιοαντιδραστήρες» του συστήματος (Brix, 1997).
- **Μεταφορά οξυγόνου στο ριζικό σύστημα (ριζικό σύστημα):** Πολλά υδρόβια φυτά, όπως το καλάμι (*Phragmites australis*, *Arundo donax*), έχουν αναπτύξει ειδικούς ιστούς που μεταφέρουν οξυγόνο από την ατμόσφαιρα στις ρίζες τους. Ένα μέρος αυτού του οξυγόνου διαρρέει στο περιβάλλον υπόστρωμα, δημιουργώντας αερόβιες μικροζώνες γύρω από τις ρίζες μέσα σε ένα κατά τα άλλα αναερόβιο περιβάλλον. Αυτή η διαδικασία είναι θεμελιώδης για τη νιτροποίηση σε συστήματα οριζόντιας ροής (Brix, 1997).
- **Φυσική διήθηση και επιβράδυνση της ροής:** Η πυκνή βλάστηση επιβραδύνει την ταχύτητα του νερού, διευκολύνοντας την καθίζηση των αιωρούμενων στερεών. Το ριζικό σύστημα σταθεροποιεί το υπόστρωμα και εμποδίζει τη δημιουργία διαδρομών ροής, εξασφαλίζοντας καλύτερη επαφή του νερού με το υπόστρωμα (Sundaravadivel & Vigneswaran, 2001).
- **Πρόσληψη θρεπτικών:** Τα φυτά προσλαμβάνουν άζωτο και φώσφορο για την ανάπτυξη τους, ενσωματώνοντας τα στη βιομάζα τους. Αν και η ποσότητα αυτή είναι συνήθως μικρή σε σχέση με το συνολικό φορτίο εισόδου σε συστήματα υψηλής φόρτισης, μπορεί να είναι σημαντική σε συστήματα χαμηλής φόρτισης. Η απομάκρυνση των θρεπτικών από το σύστημα μέσω της βλάστησης απαιτεί τη συγκομιδή και απομάκρυνση της φυτικής βιομάζας (Vymazal, 2007).
- **Αισθητική και οικολογική αξία:** Τα φυτά βελτιώνουν την αισθητική εμφάνιση του συστήματος και παρέχουν ενδιαίτημα για την άγρια πανίδα.

Τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα ήδη φυτών σε ΤΥ είναι ανθεκτικά, ταχέως αναπτυσσόμενα αναδυόμενα μακρόφυτα, όπως το κοινό καλάμι (*Phragmites australis*), η τύφη (*Typha* spp.), το *Arundo donax*, ο Σκίρπος (*Scirpus* spp.) κ.ά. (Jethwa & Bajrai, 2016).

2.4.3 Πληρωτικά Υλικά Τεχνητών Υγροβιότοπων

Το πληρωτικό υλικό (υπόστρωμα) αποτελεί τη θεμελιώδη δομή ενός υγροβιότοπου υποεπιφανειακής ροής. Ο ρόλος του είναι πολυδιάστατος καθώς παρέχει στήριξη για τις ρίζες των φυτών, λειτουργεί ως μέσο διήθησης για τα αιωρούμενα στερεά και κατά κύριο λόγο προσφέρει την επιφάνεια για την ανάπτυξη του μικροβιακού βιοφίλμ, όπου λαμβάνουν χώρα οι βασικές βιοχημικές διεργασίες (Sundaravadivel & Vigneswaran, 2001). Η επιλογή του κατάλληλου πληρωτικού υλικού είναι κρίσιμη για την μακροπρόθεσμη απόδοση και τη διάρκεια ζωής του συστήματος.

Κάποια από τα κοινώς χρησιμοποιούμενα υλικά σε συστήματα Τεχνητών Υγροβιότοπων είναι τα ακόλουθα:

- **Συμβατικά Υλικά:** Τα πιο κοινά υλικά είναι η άμμος και το χαλίκι, λόγω του χαμηλού κόστους και της ευρείας διαθεσιμότητας τους. Παρέχουν καλή υδραυλική αγωγιμότητα και επαρκή επιφάνεια για την ανάπτυξη βιοφίλμ. Ωστόσο, η ικανότητα τους να απομακρύνουν ρύπους μέσω χημικών διεργασιών, όπως η προσρόφηση του φωσφόρου, είναι πολύ περιορισμένη (Vohla κ.ά., 2011).
- **Εναλλακτικά και Βελτιωμένα Υλικά:** Για τη βελτίωση της απόδοσης, ειδικά στην απομάκρυνση του φωσφόρου και της αμμωνίας, η έρευνα έχει στραφεί σε εναλλακτικά υλικά με βελτιωμένες ιδιότητες:
 - ✓ **Ελαφρά διογκωμένη άργιλος (Light Expanded Clay Aggregate – LECA):** Το LECA είναι ένα πορώδες, ελαφρύ κεραμικό υλικό που παράγεται από τη θερμική διόγκωση αργίλου. Διαθέτει μεγάλη ειδική επιφάνεια, υψηλό πορώδες και υψηλή υδραυλική αγωγιμότητα. Η χημική του σύσταση, πλούσια σε οξειδία του αργιλίου, σιδήρου και ασβεστίου, του προσδίδει υψηλή προσροφητική ικανότητα σε φώσφορο (Zhu et al., 1997).
 - ✓ **Ζεόλιθος:** Είναι ένα φυσικό ή συνθετικό ορυκτό με μικροπορώδη δομή και εξαιρετικά υψηλή ικανότητα ιοντοανταλλαγής. Αυτή η ιδιότητα τον καθιστά ιδιαίτερα αποτελεσματικό στην απομάκρυνση των αμμωνιακών ιόντων (NH_4^+) από το νερό μέσω ανταλλαγής ιόντων (Yalcuk, 2011).
 - ✓ **Βιοεξανθράκωμα (Biochar):** Είναι ένα πορώδες, πλούσιο σε άνθρακα υλικό που παράγεται από την πυρόλυση βιομάζας (π.χ. ξύλο, γεωργικά υπολείμματα) σε συνθήκες απουσίας οξυγόνου. Η μεγάλη ειδική επιφάνεια

και το πορώδες του το καθιστούν εξαιρετικό μέσο για την προσρόφηση οργανικών ρύπων και την παροχή ενδυνάμυνσης για μικροοργανισμούς. Επιπλέον, μπορεί να λειτουργήσει ως πηγή άνθρακα για την απονιτροποίηση (Deng et al., 2021).

Η χρήση αυτών των καινοτόμων υλικών, είτε μόνα τους είτε σε συνδυασμό με συμβατικά υλικά, μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την απόδοση των τεχνητών υδροβιότοπων και να μειώσει την απαιτούμενη επιφάνεια γης.

2.4.4 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα Τεχνητών Υδροβιότοπων

Οι τεχνητοί υδροβιότοποι προσφέρουν μια σειρά από σημαντικά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους επεξεργασίας λυμάτων, αλλά παρουσιάζουν και ορισμένα μειονεκτήματα.

Πλεονεκτήματα:

- **Χαμηλό κόστος:** Το κόστος κατασκευής, λειτουργίας και συντήρησης είναι σημαντικά χαμηλότερο σε σχέση με τις μηχανολογικές εγκαταστάσεις (Vymazal, 2014).
- **Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας:** Η λειτουργία τους βασίζεται κυρίως σε φυσικές διεργασίες και η ροή είναι βαρυτική, ελαχιστοποιώντας τις ενεργειακές απαιτήσεις.
- **Απλή λειτουργία και συντήρηση:** Δεν απαιτούν εξειδικευμένο προσωπικό για την καθημερινή τους λειτουργία.
- **Ανθεκτικότητα:** Είναι ανθεκτικά συστήματα που μπορούν να υποστούν διακυμάνσεις στην υδραυλική και ρυπαντική φόρτιση.
- **Περιβαλλοντικά και αισθητικά οφέλη:** Ενσωματώνονται αρμονικά στο φυσικό τοπίο, βελτιώνουν την αισθητική της περιοχής και δημιουργούν ενδυνάμυνση για την άγρια πανίδα, αυξάνοντας τη βιοποικιλότητα (Sundaravadivel & Vigneswaran, 2001).

Μειονεκτήματα:

- **Μεγάλες απαιτήσεις σε γη:** Απαιτούν σημαντικά μεγαλύτερη έκταση γης σε σύγκριση με τις συμβατικές εγκαταστάσεις, γεγονός που μπορεί να αποτελέσει περιορισμό σε πυκνοκατοικημένες περιοχές (Vymazal, 2014).
- **Ευαισθησία σε κλιματικές συνθήκες:** Η απόδοσή τους, όντας βιολογικά συστήματα, μπορεί να επηρεαστεί από τις κλιματικές συνθήκες, ιδιαίτερα από τις χαμηλές θερμοκρασίες του χειμώνα που επιβραδύνουν τη μικροβιακή δραστηριότητα.
- **Κίνδυνος απόφραξης:** Ειδικά τα συστήματα υποεπιφανειακής ροής, εάν δεν σχεδιαστούν ή συντηρηθούν σωστά, μπορεί να εμφανίσουν προβλήματα απόφραξης

των πόρων του υποστρώματος από αιωρούμενα στερεά και υπερβολική ανάπτυξη βιομάζας.

- **Περίοδος εγκατάστασης:** Απαιτείται μια περίοδος «ωρίμανσης» (συνήθως μία καλλιεργητική περίοδος) για την πλήρη ανάπτυξη της βλάστησης των μικροβιακών πληθυσμών, ώστε το σύστημα να φτάσει στη μέγιστη απόδοση του.

2.5 Στόχος Διπλωματικής Εργασίας

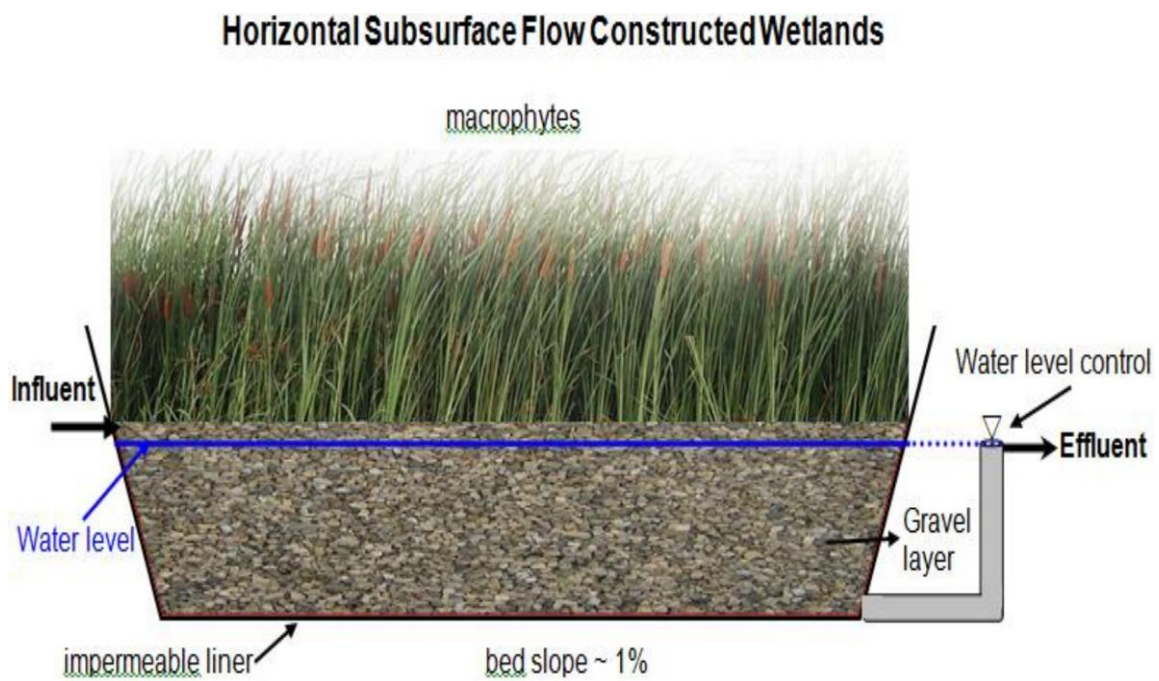
Στόχος της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι να διερευνήσει την αποτελεσματικότητα των οριζόντιων και κάθετων πιλοτικών συστημάτων στη διαδικασία επεξεργασίας για την εξάλειψη των οργανικών ρύπων και των θρεπτικών συστατικών από τα υγρά απόβλητα ενός τριφασικού ελαιοτριβείου που βρίσκεται στα Χανιά. Η σπουδαιότητα αυτής της έρευνας απορρέει από την επιτακτική ανάγκη δημιουργίας μιας καινοτόμου, πιο οικολογικής τεχνολογικής προσέγγισης για τη διαχείριση ενός ιδιαίτερα ρυπογόνου υγρού αποβλήτου που παράγεται σε σημαντικές ποσότητες σε εθνικό επίπεδο και επηρεάζει αρνητικά την ποιότητα του περιβάλλοντος.

Κεφάλαιο 3°. Πειραματικό Μέρος

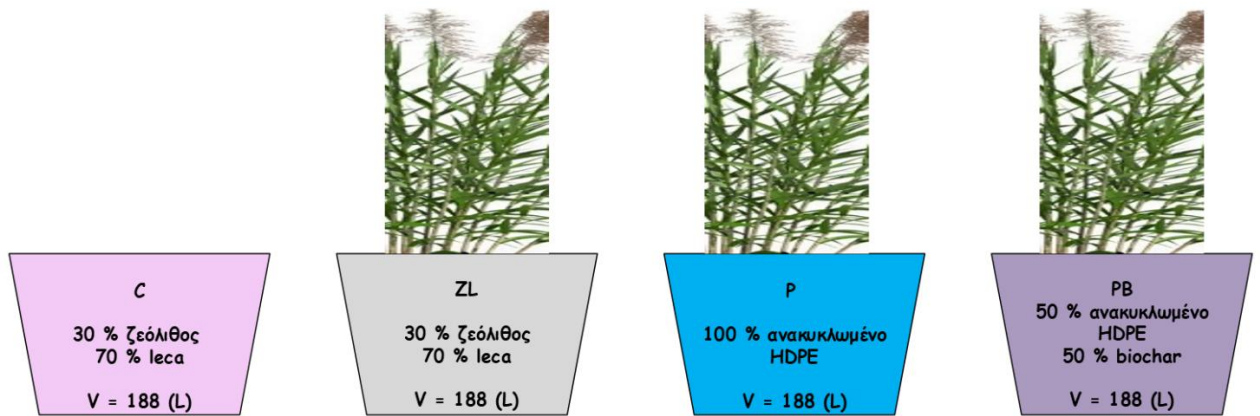
3.1 Περιγραφή Πειραματικής Διάταξης

Η πειραματική διάταξη της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελείται από τέσσερις πιλοτικές μονάδες τεχνητών υγροβιότοπων οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής και δύο πιλοτικές μονάδες τεχνητών υγροβιότοπων κάθετης υποεπιφανειακής ροής, στις οποίες εφαρμόζεται αραιωμένο ΥΑΕ του νομού Χανίων. Οι δεξαμενές αυτές επεξεργάζονται με φυσικό τρόπο το εφαρμοζόμενο απόβλητο. Χρησιμοποιούνται έξι διαφορετικές κλίνες ορθογωνικής και κυκλικής διατομής με τα παρακάτω χαρακτηριστικά.

Κλίνες ορθογωνικής διατομής



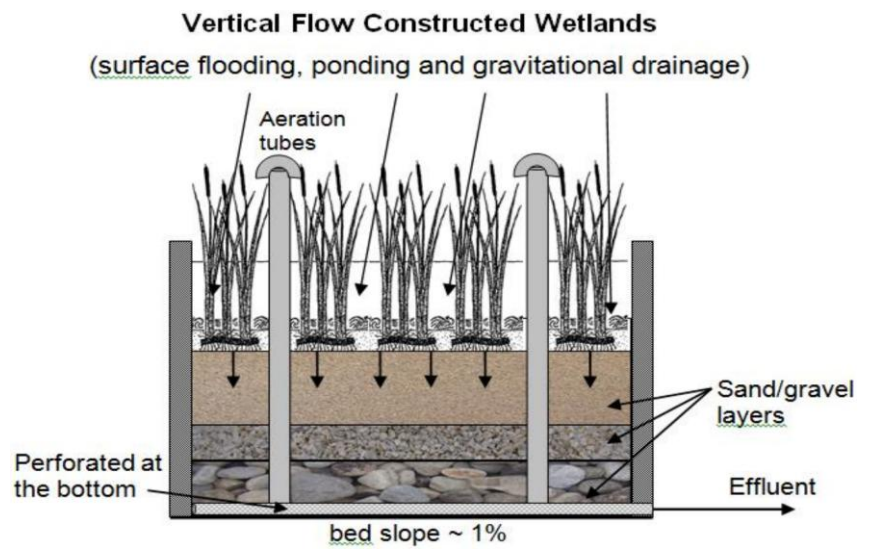
Εικόνα 2. Τεχνητός Υγροβιότοπος οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής (Α. Stefanakis, 2014)



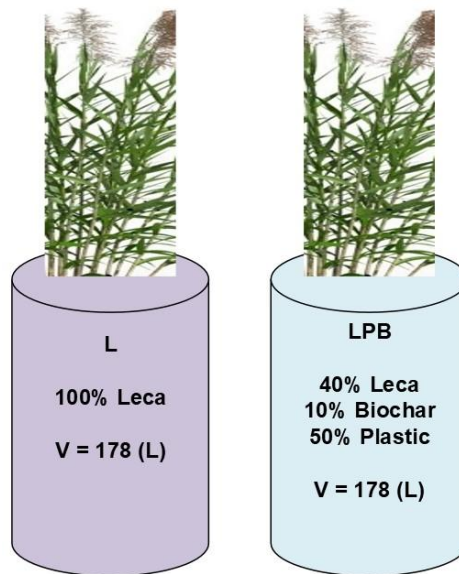
Εικόνα 3. Σχηματική απεικόνιση ΤΥ οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής του πειράματος

- Δεξαμενή **C** (control): 30% ζεόλιθος και 70% LECA, χωρίς βλάστηση
- Δεξαμενή **ZL**: 30% ζεόλιθος και 70% LECA, με βλάστηση
- Δεξαμενή **P**: 100% RHDPE, με βλάστηση
- Δεξαμενή **PB**: 50% RHDPE και 50% βιοεξανθράκωμα, με βλάστηση

Κλίνες κυκλικής διατομής



Εικόνα 4. Τεχνητός Υγροβιότοπος κάθετης υποεπιφανειακής ροής (A. Stefanakis, 2014)



Εικόνα 5. Σχηματική απεικόνιση ΤΥ κάθετης υποεπιφανειακής ροής του πειράματος

- Δεξαμενή **L**: 100% LECA, με βλάστηση
- Δεξαμενή **LPB**: 40% διογκωμένη άργιλο LECA, 50% RHDPE και 10% βιοεξανθράκωμα, με βλάστηση

Ως βλάστηση σε όλες τις δεξαμενές εκτός της C, επιλέχθηκε συνδυασμός από *P. australis* (κοινό καλάμι) και *A. donax* (γιγαντοκάλαμο).

Οι διαστάσεις όλων των δεξαμενών της πειραματικής διάταξης φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 2. Διαστάσεις δεξαμενών πειραματικής διάταξης

	Δεξαμενές					
	C	ZL	P	PB	L	LPB
Μήκος (cm)	93	93	93	93	55	50
Πλάτος (cm)	45	45	45	45	89	95
Ύψος (cm)	45	45	45	45	82	82



Εικόνα 6. Δεξαμενές ορθογωνικής διατομής στο Πολυτεχνείο Κρήτης (Απρίλιος 2024)



Εικόνα 7. Δεξαμενές κυκλικής διατομής στο Πολυτεχνείο Κρήτης (Απρίλιος 2024)

Οι κλίνες ορθογωνικής διατομής διαθέτουν έναν εύκαμπτο σωλήνα, η αρχή του οποίου είναι στον πυθμένα του εσωτερικού τοιχώματος της κλίνης και το τέλος του είναι σε σημείο ώστε να διατηρείται η στάθμη. Με αυτό τον τρόπο, καθώς και με τη κλίση πυθμένα 1%, πραγματοποιείται φυσική ροή και η εκροή οδηγείται στο εσωτερικό ενός δοχείου συλλογής.

Οι κλίνες κυκλικής διατομής διαθέτουν, επίσης, έναν εύκαμπτο εξωτερικό σωλήνα, από τον πυθμένα της μέχρι το άνω μέρος της, που είναι και το σημείο εκροής, για τη διατήρηση της στάθμης εντός της δεξαμενής και για την κατεύθυνση του επεξεργασμένου αποβλήτου στο εσωτερικό του δοχείου συλλογής.

Οι δεξαμενές του πειράματος, ύστερα από τη φόρτιση τους με το απόβλητο και την φυσική επεξεργασία αυτού, εκκρέουν και η εκροή αυτή συλλέγεται σε δοχεία συλλογής. Η φόρτιση των δεξαμενών με το εφαρμοζόμενο απόβλητο και η μέτρηση του όγκου των εκροών των δεξαμενών πραγματοποιείται δίχως κάποιο αυτόματο σύστημα. Το απόβλητο του ελαιουργείου υπόκειται σε αραίωση 1:8, δηλαδή αποτελείται από 1 μέρος αποβλήτου και 7 μέρη νερού. Αυτό γίνεται για την αποδοτικότερη λειτουργία των πιλοτικών δεξαμενών των ΤΥ.

Για να υπολογιστούν οι υδραυλικοί χρόνοι παραμονής για κάθε δεξαμενή, αρχικά θα υπολογιστούν οι ωφέλιμοι όγκοι των δεξαμενών, λαμβάνοντας υπόψη το πληρωτικό υλικό κάθε δεξαμενής. Ο όγκος φόρτισης κάθε δεξαμενής ισούται με $Q = 10 \frac{L}{d}$. Οι υδραυλικοί χρόνοι παραμονής, υπολογίζονται με βάση τον παρακάτω τύπο:

$$HRT = \frac{V_{\text{δεξαμενής}}}{Q}$$

- **Δεξαμενή Control (C) :**

$$V_C = \text{όγκος δεξαμενής} * \text{πορώδες υλικού} = 188 \text{ L} * (0,53 * 0,70 + 0,48 * 0,30) = 96,8 \text{ L}$$

$$HRT_C = \frac{V_C}{Q} = \frac{96,8 \text{ L}}{10 \frac{L}{d}} \approx 10 \text{ d}$$

- **Δεξαμενή (ZL) :**

$$V_{ZL} = \text{όγκος δεξαμενής} * \text{πορώδες υλικού} = 188 \text{ L} * (0,53 * 0,70 + 0,48 * 0,30) = 96,8 \text{ L}$$

$$HRT_{ZL} = \frac{V_{ZL}}{Q} = \frac{96,8 \text{ L}}{10 \frac{L}{d}} \approx 10 \text{ d}$$

- **Δεξαμενή (PB) :**

$$V_{PB} = \text{όγκος δεξαμενής} * \text{πορώδες υλικού} = 188 \text{ L} * (0,94 * 0,50 + 0,66 * 0,50) \\ = 150,4 \text{ L}$$

$$HRT_{PB} = \frac{V_{PB}}{Q} = \frac{150,4 \text{ L}}{10 \frac{\text{L}}{\text{d}}} \approx \mathbf{15 \text{ d}}$$

- **Δεξαμενή (P) :**

$$V_P = \text{όγκος δεξαμενής} * \text{πορώδες υλικού} = 188 \text{ L} * (0,94 * 1) = 176,72 \text{ L}$$

$$HRT_P = \frac{V_P}{Q} = \frac{176,72 \text{ L}}{10 \frac{\text{L}}{\text{d}}} \approx \mathbf{18 \text{ d}}$$

- **Δεξαμενή (L) :**

$$V_L = \text{όγκος δεξαμενής} * \text{πορώδες υλικού} = 178 \text{ L} * (0,53 * 1) = 94,3 \text{ L}$$

$$HRT_L = \frac{V_L}{Q} = \frac{94,3 \text{ L}}{10 \frac{\text{L}}{\text{d}}} \approx \mathbf{9 \text{ d}}$$

- **Δεξαμενή (LPB) :**

$$V_{LPB} = \text{όγκος δεξαμενής} * \text{πορώδες υλικού} \\ = 178 \text{ L} * (0,53 * 0,40 + 0,94 * 0,5 + 0,66 * 0,1) = 133,1 \text{ L}$$

$$HRT_{LPB} = \frac{V_{LPB}}{Q} = \frac{133,1 \text{ L}}{10 \frac{\text{L}}{\text{d}}} \approx \mathbf{13 \text{ d}}$$

3.2 Χωροθέτηση Πειραματικής Διάταξης & Κλιματολογικά στοιχεία

Το πιλοτικό σύστημα δεξαμενών των ΤΥ ήταν εγκατεστημένο και σε λειτουργία από τον Φεβρουάριο 2023 στο Πολυτεχνείο Κρήτης και πιο συγκεκριμένα στο θερμοκήπιο της σχολής Χημικών Μηχανικών & Μηχανικών Περιβάλλοντος. Οι αναλύσεις των εκροών πραγματοποιούνταν στο χώρο του εργαστηρίου Τεχνολογίας & Διαχείρισης Περιβάλλοντος της σχολής.

Τα κλιματικά δεδομένα για τη χρονική διάρκεια των αναλύσεων συλλέχθηκαν από τον μετεωρολογικό σταθμό Chania (LG25), που είναι τοποθετημένος στην Πολυτεχνειούπολη σε υψόμετρο 137 μέτρων, κοντά στη θέση των δεξαμενών αποθήκευσης. Το πείραμα έλαβε χώρα από αρχές Νοεμβρίου 2023 και συνεχίστηκε μέχρι το τέλος Μαΐου 2024. Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει τις βασικές κλιματικές παραμέτρους, συμπεριλαμβανομένων των μέσων και μέγιστων θερμοκρασιών, των μέσων και μέγιστων ταχυτήτων ανέμου, της μέσης βροχόπτωσης και της κυρίαρχης διεύθυνσης του ανέμου για την περίοδο αυτή.

Πίνακας 3. Μετεωρολογικά δεδομένα 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
Νοέμβριος	18.6	32.2	0.340	7.1	61.2	NΔ
Δεκέμβριος	14.4	24.1	0.670	4.7	45.1	NΔ
Ιανουάριος	12.4	23.8	1.068	7.5	51.5	Δ
Φεβρουάριος	12.9	21.5	0.446	3.2	56.3	B
Μάρτιος	14.9	30.1	0.258	7.1	62.8	NΔ
Απρίλιος	18.4	30.1	0.136	7.0	62.8	B
Μάιος	20.2	31.3	0.106	7.1	53.1	B

3.3 Πειραματική Διαδικασία

Το πείραμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είχε διάρκεια στο σύνολο 7 μήνες (Νοέμβριος 2023 – Μάιος 2024). Κατά την έναρξη του πειράματος αυτού, οι πιλοτικές μονάδες ήταν ήδη σε λειτουργία για διάστημα 8 μηνών. Οι φάσεις της πειραματικής διαδικασίας παρατίθενται παρακάτω:

- **Έναρξη και Εκτέλεση του πειράματος**

Σε κάθε φόρτιση των δεξαμενών με αραιωμένο ΥΑΕ, λαμβάνονταν πρώτα οι όγκοι των εκροών όλων των δεξαμενών και ύστερα γινόταν η φόρτιση των μονάδων. Η αραιώση του αποβλήτου είχε επιλεχθεί να είναι 1:8 (1 μέρος αποβλήτου & 7 μέρη νερού), μιας και με αυτή τα καλάμια εμφάνιζαν καλύτερη συμπεριφορά, χωρίς να επιβαρύνονται σε μεγάλο βαθμό. Η φόρτιση με τη συγκεκριμένη αραιώση, δε μεταβλήθηκε μέχρι το τέλος της παρούσας εργασίας. Το αραιωμένο απόβλητο αποθηκευόταν σε δύο κυκλικές δεξαμενές. Η συλλογή ανεπεξέργαστου υγρού αποβλήτου ελαιοτριβείου, γίνονταν από τις δεξαμενές καθίζησης που βρίσκονταν στον υπαίθριο χώρο του θερμοκηπίου του Πολυτεχνείου Κρήτης. Ο όγκος φόρτισης παρέμεινε σταθερός και ίσος με $V=10\text{ L}$ για όλες τις δεξαμενές καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος (Νοέμβριος 2023 – Μάιος 2024). Το καθεστώς φόρτισης, 1 μέρα φόρτιση και 2 μέρες ανάπαυση, παρέμεινε ίδιο καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος.

Επιπρόσθετα, η πειραματική διαδικασία περιελάμβανε, τη συλλογή δειγμάτων από α) τις εκροές των πιλοτικών δεξαμενών, β) της αραιωμένης εισροής υγρού αποβλήτου ελαιοτριβείου και γ) του ανεπεξέργαστου υγρού αποβλήτου ελαιοτριβείου και την ανάλυση τους στο εργαστήριο. Οι δειγματοληψίες και οι αναλύσεις γίνονταν ανά 7-10 μέρες. Αναλύσεις για την αραιωμένη εισροή γίνονταν σε κάθε δειγματοληψία, ενώ για την ανεπεξέργαστη σε κάθε δεύτερη ή τρίτη μέτρηση. Οι αναλύσεις περιλάμβαναν τη μέτρηση παραμέτρων όπως τα ολικά αιωρούμενα στερεά, το pH, την αγωγιμότητα, το χρώμα, το βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο, το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο, το ολικό άζωτο, το αμμωνιακό άζωτο, το νιτρικό άζωτο, τις ολικές φαινόλες, τον ολικό φώσφορο και τα φωσφορικά.

- **Ολοκλήρωση πειράματος**

Τέλος, μετά το πέρας του χρονικού διαστήματος της πειραματικής διαδικασίας και τη συλλογή των ικανών σε αριθμό μετρήσεων αλλά και αντιπροσωπευτικών δειγμάτων βιομάζας, εξάχθηκαν συμπεράσματα σχετικά με την απόδοση των πιλοτικών συστημάτων των τεχνητών αυτών υδροβιότοπων.

3.4 Δείγματα & Υλικά

3.4.1 Δείγμα

Το ΥΑΕ που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα προήλθε από ένα τριφασικό ελαιοτριβείο του ομίλου KoukakisGroup, που βρίσκεται στα Περιβόλια Χανίων. Το απόβλητο αυτό συλλέχθηκε κατά τη διάρκεια της περιόδου παραγωγής ελαιολάδου μεταξύ Οκτωβρίου 2022 και Ιανουαρίου 2023. Στο απόβλητο δεν εφαρμόστηκε καμία χημική προεπεξεργασία. Το σύνολο του παραγόμενου υγρού κλάσματος συλλέχθηκε, μεταφέρθηκε και αποθηκεύτηκε σε δεξαμενές καθίζησης 1m³.



Εικόνα 8. Βυτίο αποθήκευσης ΥΑΕ

3.4.2 Πληρωτικά υλικά

Τα πληρωτικά υλικά που επιλέχθηκαν και εγκαταστάθηκαν στην αρχή του πειράματος, ήταν η διογκωμένη άργιλος (LECA), ο ζεόλιθος, το ανακυκλωμένο πλαστικό (RHDPE) και το βιοεξανθράκωμα (biochar).

3.4.2.1 Ζεόλιθος

Ο ζεόλιθος έχει μια μικροσκοπική, γεμάτη οπές, κρυσταλλική δομή, πολύ χώρο στην επιφάνεια και οπές ομοιόμορφου μεγέθους. Λόγω των ειδικών φυσικοχημικών χαρακτηριστικών του και του χαμηλού του κόστους, είτε βρίσκεται στη φύση είτε κατασκευάζεται στο εργαστήριο, ο ζεόλιθος χρησιμοποιείται συχνά για να απορροφά τόσο οργανικές όσο και μη οργανικές ουσίες από το λύμα (Kumari et al., 2024). Σε μία έρευνα του (Yalcuk, 2011), ο ζεόλιθος ενσωματώθηκε ως υλικό πλήρωσης στον ΤΥ με σκοπό την ενίσχυση των μηχανισμών καθαρισμού των αποβλήτων. Χάρη στην ιδιότητά του για ιοντοανταλλαγή, καθώς και για προσρόφηση, αξιοποιήθηκε για την αποτελεσματική απομάκρυνση του αζώτου, το οποίο βρισκόταν υπό τη μορφή αμμωνιακού αζώτου ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$). Η παρουσία του ζεόλιθου στο σύστημα αποδείχθηκε ευεργετική, καθώς συνέβαλε σημαντικά στη συνολική διαδικασία απομάκρυνσης του αζώτου από τα υγρά απόβλητα. Επίσης, μελέτες έχουν δείξει ότι η χρήση ζεόλιθου ως πληρωτικό υλικό, αυξάνει την απομάκρυνση φαινολών σε ΤΥ που επεξεργάζονται ΥΑΕ. Συνεπώς, η ενσωμάτωση ενός στρώματος ζεόλιθου στο υλικό πλήρωσης μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τη συνολική απόδοση του συστήματος στην επεξεργασία των ΥΑΕ (Yalcuk, 2011). Το πορώδες του ζεόλιθου υπολογίστηκε εργαστηριακά και βρέθηκε ίσο με, 48%.



Εικόνα 9. Ζεόλιθος (<https://id.bossgoo.com/product-detail/natural-zeolite-for-fish-tank-pools-54349801.html>)

3.4.2.2 Διογκωμένη άργιλος (LECA)

Η LECA είναι υλικό που χρησιμοποιείται ως υπόστρωμα σε όλο και περισσότερους ΤΥ, χάρη σε επιθυμητές ιδιότητες, όπως η ικανότητα αφαίρεσης φωσφορικών, η μηχανική αντοχή και η καλή υδραυλική αγωγιμότητα. Παράγεται από κοκκοποιημένη άργιλο που θερμαίνεται σε περιστρεφόμενο κλίβανο σε θερμοκρασίες 1100-1200 °C, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός ισχυρού αλλά ελαφρού αδρανούς υλικού με πορώδη εσωτερική δομή και πυροσυσσωματωμένο εξωτερικό κέλυφος (Vohla et al., 2011). Η χημική του σύσταση αποτελείται γενικά από οξειδία του πυριτίου, του αργιλίου και του σιδήρου, ωστόσο η περιεκτικότητά τους σε ασβέστιο σχετίζεται με την ικανότητα προσρόφησης του φωσφόρου (Mlih et al., 2020). Παράλληλα, το υψηλό πορώδες του επιτρέπει την καλύτερη απορρόφηση οξυγόνου, διευκολύνοντας έτσι τις βιολογικές διεργασίες απομάκρυνσης του αζώτου. Η δομή του είναι κατάλληλη για την υποστήριξη της ανάπτυξης των ριζών των φυτών και του μικροβιακού βιοφίλμ, το οποίο είναι καθοριστικό για την αποικοδόμηση των ρύπων. Το υλικό αυτό έχει εφαρμοστεί με επιτυχία για την επεξεργασία διαφόρων τύπων αποβλήτων, συμπεριλαμβανομένων και των ΥΑΕ. Ένα σημαντικό μειονέκτημα της LECA είναι η υψηλή ενεργειακή απαίτηση της διαδικασίας παραγωγής της. Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν δυνατότητες για βιώσιμη διαχείριση, καθώς το κορεσμένο σε θρεπτικό υλικό θα μπορούσε να επαναχρησιμοποιηθεί ως λίπασμα φωσφόρου στη γεωργία (Mlih et al., 2020). Το πορώδες της διογκωμένης αργίλου υπολογίστηκε εργαστηριακά και βρέθηκε ίσο με, 53%.



Εικόνα 10. Διογκωμένη άργιλος LECA (<https://www.hydro-culture.net/>)

3.4.2.3 Ανακυκλωμένο Πλαστικό (RHDPE)

Το ακρωνύμιο RHDPE προέρχεται από το Recycled High Density Polyethylene και σημαίνει πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας, μια παραλλαγή πλαστικού υψηλής πυκνότητας. Προερχόμενο από το πετρέλαιο, το υλικό αυτό βρίσκει εκτεταμένες εφαρμογές σε διάφορες βιομηχανίες (όπως σωλήνες, πληρωτικό υλικό δεξαμενών και γεωμεμβράνες) και στην καθημερινή ζωή (όπως δοχεία τροφίμων, μπουκάλια και παιδικά παιχνίδια). Η ισχυρή αντοχή του στην υπεριώδη ακτινοβολία και στην υγρασία το καθιστούν κατάλληλο για ποικίλες χρήσεις. Με τον χαμηλό κίνδυνο απελευθέρωσης επικίνδυνων ουσιών, αποδεικνύεται ιδανικό για πειράματα σε εξωτερικούς χώρους, όπως οι TY. Ως θερμοπλαστικό, το RHDPE μαλακώνει και γίνεται χυτεύσιμο πάνω από τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (T_g). Αυτό του επιτρέπει να διαμορφώνεται επανειλημμένα σε διάφορες πλαστικές μορφές χωρίς ουσιαστική απώλεια ποιότητας. Κατά συνέπεια, θεωρείται ανακυκλώσιμο, συμβάλλοντας στη μείωση των αποβλήτων στην πηγή. Για το συγκεκριμένο πείραμα, χρησιμοποιήθηκαν δύο μεγέθη RHDPE, HX38 Biocarrier και HX25KLL Biocarrier που παρέχονται από την Εταιρία Christian Stöhr GmbH & Co. KG. Το πορώδες τους, υπολογίστηκε εργαστηριακά και βρέθηκε ίσο με 94%.



Εικόνα 11. Ανακυκλωμένο πλαστικό HX38 Biocarrier

3.4.2.4 Βιοεξανθράκωμα (biochar)

Το βιοεξανθράκωμα του συγκεκριμένου πειράματος ήταν αποτέλεσμα καύσης κλαδιών ελιάς του Πολυτεχνείου Κρήτης, με μια διεργασία γνωστή ως πυρόλυση. Η πυρόλυση περιλαμβάνει την καύση μιας οργανικής ουσίας σε υψηλές θερμοκρασίες χωρίς την παρουσία οξυγόνου. Λόγω αυτού του περιβάλλοντος, χωρίς οξυγόνο, η ουσία δεν καίγεται. Αντ' αυτού, υφίσταται θερμική αποσύνθεση, μετασχηματιζόμενη σε μια ουσία με υψηλή περιεκτικότητα σε θρεπτικά συστατικά, το βιοεξανθράκωμα, μια ανθεκτική μορφή άνθρακα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό. Καθίσταται ιδανικό ως πληρωτικό μέσο, χάρη στις πολλαπλές του ιδιότητες. Η θετική του δράση οφείλεται στην ικανότητα του να προσροφά ρύπους και να δεσμεύει μέταλλα. Ως αποτέλεσμα, η χρήση του οδηγεί σε σημαντικά οφέλη, όπως η ενίσχυση της ανάπτυξης των φυτών και την αύξηση της απομάκρυνσης αζώτου κατά τουλάχιστον 20% (Deng et al., 2021). Βελτιώνει φυσικά τον αερισμό του εδάφους, δημιουργώντας χώρους για να διεισδύσουν οι ευαίσθητες ρίζες. Αυτός ο βελτιωμένος αερισμός διευκολύνει τη βελτίωση της αποστράγγισης, καθιστώντας περισσότερο νερό προσβάσιμο στις ρίζες των καλαμιών. Καθώς τα θρεπτικά συστατικά μεταφέρονται με το νερό, αυτό ενισχύει επίσης την απορρόφηση των θρεπτικών συστατικών. Το πορώδες του βιοεξανθρακώματος που χρησιμοποιήθηκε στο συγκεκριμένο πείραμα, είχε προηγουμένως μετρηθεί εργαστηριακά και βρέθηκε ίσο με 66%.



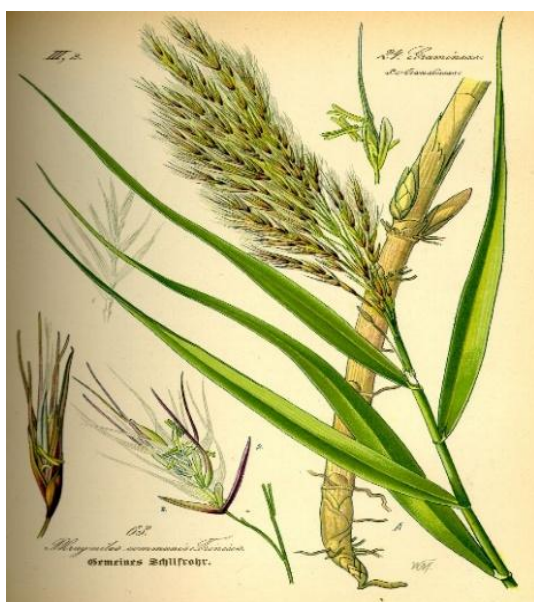
Εικόνα 12. Βιοεξανθράκωμα (<https://ecotreecompany.com/the-magical-biochar/>)

3.4.3 Βλάστηση

Η βλάστηση στους ΤΥ αποτελεί θεμελιώδες και ενεργό συστατικό τους, διαδραματίζοντας έναν λειτουργικό ρόλο που υπερβαίνει την απλή παθητική παρουσία αυτής και είναι ουσιώδης για την αποτελεσματική λειτουργία τους (Brix, 2003). Ο κύριος ρόλος της δεν είναι τόσο η άμεση απορρόφηση των ρύπων, όσο η δημιουργία των κατάλληλων φυσικών, χημικών και βιολογικών συνθηκών που συμβάλλουν στις διεργασίες καθαρισμού (Jethwa & Bajrai, 2016). Οι πυκνοί πληθυσμοί των φυτών, όπως τα καλάμια, επιβραδύνουν την ταχύτητα ροής του νερού, γεγονός που ευνοεί την καθίζηση των αιωρούμενων στερεών, αυξάνοντας το χρόνο παραμονής του υγρού αποβλήτου στο σύστημα (Sundaravadivel & Vigneswaran, 2001). Ταυτόχρονα, το εκτεταμένο ριζικό τους σύστημα και οι βυθισμένοι βλαστοί τους, παρέχουν μια τεράστια επιφάνεια για την προσκόλληση και ανάπτυξη μικροοργανισμών που σχηματίζουν βιοφίλμ, οι οποίοι αποτελούν τους κύριους παράγοντες αποικοδόμησης του οργανικού φορτίου (Tanner, 1996; Jethwa & Bajrai, 2016). Η πιο κρίσιμη βιολογική λειτουργία της βλάστησης είναι η μεταφορά οξυγόνου από την ατμόσφαιρα στη ριζόσφαιρα μέσω εξειδικευμένων ιστών (Brix, 2003). Αυτή η διαδικασία δημιουργεί οξειδωτικές μικρό-ζώνες γύρω από τις ρίζες, μέσα σε ένα αναερόβιο περιβάλλον, οι οποίες είναι απαραίτητες για αερόβιες μικροβιακές διεργασίες, όπως η νιτροποίηση (Tanner, 1996). Τα φυτά προσλαμβάνουν επίσης θρεπτικά συστατικά, όπως άζωτο και φώσφορο, ενσωματώνοντας τα στη βιομάζα τους, αν και αυτός ο μηχανισμός είναι συνήθως δευτερεύουσας σημασίας σε συστήματα υψηλού ρυπαντικού φορτίου (Brix, 2003; Gikas et al., 2018). Συμπερασματικά, η βλάστηση δρα ως «μηχανισμός του οικοσυστήματος», διαμορφώνοντας το περιβάλλον ώστε να μεγιστοποιούνται οι φυσικοχημικές και βιολογικές διεργασίες που καθιστούν τους ΤΥ μια αποτελεσματική τεχνολογία (Tanner, 1996). Στο συγκεκριμένο πείραμα, ως βλάστηση επιλέχθηκαν το κοινό καλάμι (*P. australis*) και το γιγαντοκάλαμο (*A. donax*).

3.4.3.1. *P. australis*

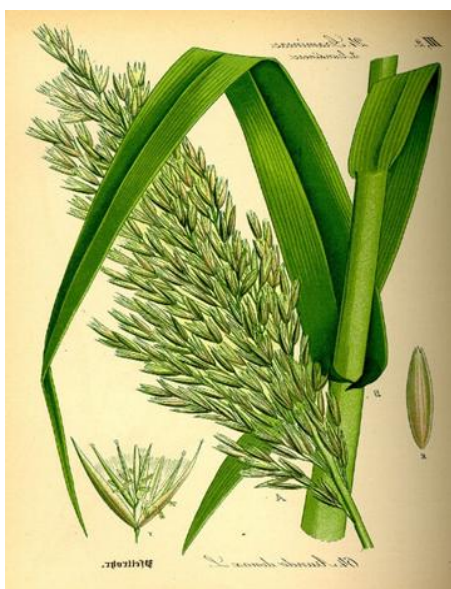
Το *P. australis*, ευρέως γνωστό ως κοινό καλάμι, είναι ένα πολυετές, ριζωματώδες, αναδυόμενο μακρόφυτο και αποτελεί ένα από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα και διαδεδομένα είδη φυτών και χαρακτηρίζονται από υψηλή προσαρμοστικότητα και ανταγωνιστικότητα (Kulik et al., 2023). Η ευρεία γεωγραφική του εξάπλωση και υψηλή ανθεκτικότητα του σε ποικίλες κλιματικές και εδαφικές συνθήκες το καθιστούν ιδανική επιλογή για χρήση σε ΤΥ σε διάφορες περιοχές του κόσμου (Tanner, 1996; Milke et al., 2020). Το φυτό χαρακτηρίζεται από υψηλή αντοχή σε αντίξοες περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως υψηλές συγκεντρώσεις ρύπων, μεταβολές στο pH και την αλατότητα, γεγονός που δικαιολογεί τη συχνή επιλογή του για συστήματα επεξεργασίας αποβλήτων (Sundaravadivel & Vigneswaran, 2001). Μία από τις σημαντικότερες λειτουργίες του είναι η μεταφορά οξυγόνου από την ατμόσφαιρα προς το ριζικό του σύστημα, δημιουργώντας οξειδωτικές μικρό-ζώνες σ' ένα κατά βάση αναερόβιο περιβάλλον (Brix, 2003). Αυτή η διαδικασία είναι καθοριστική για την αερόβια αποικοδόμηση της οργανικής ύλης και τη λειτουργία της νιτροποίησης (Tanner, 1996). Επιπλέον, το *P. australis* έχει την ικανότητα να προσλαμβάνει και να συσσωρεύει στους ιστούς του σημαντικές ποσότητες θρεπτικών συστατικών, όπως άζωτο και φώσφορο, καθώς και βαρέα μέταλλα και άλλους οργανικούς μικρορύπους, συμβάλλοντας άμεσα στη διαδικασία της φυτοεξυγίανσης (Vymazal, 2007; Gikas et al., 2018). Η υψηλή παραγωγικότητα φυτικής βιομάζας επιτρέπει την αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων ρύπων, οι οποίοι μπορούν να απομακρυνθούν οριστικά από το σύστημα μέσω της συγκομιδής των υπέργειων τμημάτων του (Tanner, 1996).



Εικόνα 13. *P. australis* (Wikipedia)

3.4.3.2. *A. donax*

Το γιγαντοκάλαμο είναι ένα πολυετές, ριζωματώδες φυτό της οικογένειας των ποσειδών (Poaceae), το οποίο είναι ευρέως διαδεδομένο και προσαρμοσμένο στο μεσογειακό περιβάλλον. Αν και ταξινομείται ως φυτό C3, παρουσιάζει εξαιρετικά υψηλούς φωτοσυνθετικούς ρυθμούς παρόμοιους με εκείνους των φυτών C4, χαρακτηριστικό που του προσδίδει υψηλό δυναμικό παραγωγής βιομάζας (Nasso et al., 2013; Licata et al., 2021). Η επιλογή του για χρήση σε ΤΥ βασίζεται στην εξαιρετική προσαρμοστικότητα του και την ανθεκτικότητά του σε υψηλά ρυπαντικά φορτία. Ο κύριος ρόλος του στα συστήματα επεξεργασίας αποβλήτων είναι η πρόσληψη και η συσσώρευση θρεπτικών συστατικών, επιδεικνύοντας υψηλή ικανότητα απορρόφησης αζώτου, το οποίο αποθηκεύεται στην υπόγεια και υπέργεια βιομάζα του (Leto et al., 2013). Παράλληλα, το πυκνό και εκτεταμένο ριζικό του σύστημα, παρέχει μια τεράστια επιφάνεια για την προσκόλληση και ανάπτυξη μικροβιακών βιοφίλμ, οι οποίες είναι θεμελιώδους σημασίας για τη βιολογική αποικοδόμηση των ρύπων στα απόβλητα (Nasso et al., 2013). Έχει αποδειχθεί ότι το γιγαντοκάλαμο όχι απλώς αντέχει το ρυπαντικό φορτίο του αποβλήτου, αλλά ευνοείται από την άρδευση με τα υγρά απόβλητα, παρουσιάζοντας σημαντικά αυξημένη ανάπτυξη σε ύψος, στέλεχος και παραγωγή βιομάζας σε σύγκριση με την άρδευση με γλυκό νερό. Αυτός ο συνδυασμός υψηλής παραγωγικότητας, ανθεκτικότητας και αποτελεσματικής αφαίρεσης θρεπτικών, το καθιστά μια ιδανική επιλογή για ΤΥ σε μεσογειακά κλίματα, όπου η διαχείριση των υδάτινων πόρων και η επεξεργασία αγροτοβιομηχανικών αποβλήτων είναι κρίσιμης σημασίας (Leto et al., 2013; Licata et al., 2021).



Εικόνα 14. *A. donax* (Wikipedia)

3.5 Αναλυτικές Μέθοδοι & Τεχνικές

Στο πλαίσιο του πειράματος της συγκεκριμένης εργασίας έλαβαν χώρα εργαστηριακές αναλύσεις για τις παρακάτω παραμέτρους, στις εκροές των δεξαμενών, στην αραιωμένη εισροή και στο ανεπεξέργαστο λύμα.

- ✓ pH
- ✓ Ηλεκτρική Αγωγιμότητα (EC)
- ✓ Χρώμα
- ✓ Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD_5)
- ✓ Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD)
- ✓ Ολικό άζωτο (TN)
- ✓ Αμμωνιακό άζωτο (NH_4^+ - N)
- ✓ Νιτρικό άζωτο (NO_3^- - N)
- ✓ Ολικός φώσφορος (TP)
- ✓ Φωσφορικά ιόντα (PO_4^{3-} - P)
- ✓ Ολικές Φαινόλες
- ✓ Ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS)

Οι μετρήσεις των παραπάνω παραμέτρων αποτελούν σημαντικό δείκτη αξιολόγησης της απόδοσης των πιλοτικών συστημάτων. Είναι απαραίτητες επίσης, για το χαρακτηρισμό των επεξεργασμένων εκροών ως προς την καταλληλότητα τους για διάθεση στο έδαφος και στο περιβάλλον.

3.5.1 pH

Ο όρος pH είναι ένα μέτρο της οξύτητας ή της αλκαλικότητας ενός υδατικού διαλύματος. Ορίζεται μαθηματικά ως ο αρνητικός δεκαδικός λογάριθμος της συγκέντρωσης κατιόντων υδρογόνου. Η μαθηματική περιγραφή της εξίσωσης φαίνεται παρακάτω:

$$pH = -\log [H^+]$$

Στο συγκεκριμένο πείραμα, οι μετρήσεις πραγματοποιούνται χρησιμοποιώντας πεχάμετρο της εταιρείας CRISON microPH 2002 με ηλεκτρόδιο υάλου. Πριν τις μετρήσεις του pH των δειγμάτων, απαιτείται βαθμονόμηση του πεχαμέτρου με χρήση δύο ρυθμιστικών διαλυμάτων, ενός όξινου με $pH=4$ και ενός ουδέτερου με $pH = 7$. Ακολουθώντας συγκεκριμένα βήματα και τις οδηγίες του πεχαμέτρου, η βαθμονόμηση επιτυγχάνεται με τη βύθιση του ηλεκτροδίου στα «γνωστά» διαλύματα, δηλαδή στο όξινο και στο ουδέτερο αντίστοιχα. Μετά τη βαθμονόμηση ακολουθεί η μέτρηση του pH των δειγμάτων, βυθίζοντας το ηλεκτρόδιο σε κάθε δείγμα, ξεπλένοντας πριν από κάθε μέτρηση με απιονισμένο νερό.



Εικόνα 15. Πεχάμετρο CRISON microPH 2002

3.5.2 Ηλεκτρική Αγωγιμότητα (EC)

Η EC σε ένα διάλυμα αναφέρεται στην ικανότητά του να άγει ηλεκτρικό ρεύμα, κυρίως λόγω της κίνησης φορτισμένων σωματιδίων, δηλαδή ιόντων, μέσα στο υγρό. Η μονάδα στο SI για την ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι (S/m), αν και συχνά αναφέρεται σε mS/cm ή μ S/cm για πρακτικές εφαρμογές.

Η μέτρηση της αγωγιμότητας των δειγμάτων πραγματοποιείται με χρήση κατάλληλου οργάνου της εταιρείας CRISON microCM 2202 με ηλεκτρόδιο υάλου. Για τη συγκεκριμένη συσκευή δεν απαιτείται βαθμονόμηση του οργάνου. Η μέτρηση τους γίνεται με τη βύθιση του ηλεκτροδίου σε κάθε δείγμα, ξεπλένοντας πριν από κάθε μέτρηση με απιονισμένο νερό.



Εικόνα 16. Αγωγιμόμετρο CRISON microCM 2202

3.5.3 Χρώμα

Το χρώμα προσδιορίζεται στα δείγματα που έχουν υποστεί μικροδιήθηση για την αποφυγή ύπαρξης στερεών στο διάλυμα. Μετράται η απορρόφηση των δειγμάτων αυτών με χρήση του φασματοφωτόμετρου μονής δέσμης της εταιρείας SHIMADZU UV-1202 σε μήκος κύματος $\lambda = 410 \text{ nm}$ και χρήση κυψελίδας μήκους διαδρομής 2.5 cm . Μονάδα μέτρησης του χρώματος είναι το 1 True Color Unit (T.C.U.). Η μετατροπή των αποτελεσμάτων σε Μονάδες Πραγματικού Χρώματος (TCU) βασίστηκε στη μέτρηση της απορρόφησης ενός πρότυπου διαλύματος. Το διάλυμα αυτό είχε συγκέντρωση 100 mg/L σε λευκόχρυσο (Pt) και παρασκευάστηκε σύμφωνα με την καθιερωμένη μέθοδο λευκόχρυσου-κοβαλτίου. Οι συγκεντρώσεις των δειγμάτων υπολογίζονται με τη μετατροπή των μετρούμενων απορροφήσεων σε συγκεντρώσεις με τη βοήθεια της καμπύλης βαθμονόμησης που παρατίθεται στο Παράρτημα Α της εργασίας.



Εικόνα 17. Φασματοφωτόμετρο μονής δέσμης SHIMADZU UV-1202

3.5.4 Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD)

Το βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD), είναι μια παράμετρος που χρησιμεύει ως δείκτης για την ποσότητα του διαλυμένου οξυγόνου που απαιτείται από τους αερόβιους μικροοργανισμούς για τη διάσπαση του οργανικού υλικού που υπάρχει σε ένα δείγμα νερού. Η μέτρηση αυτή αντανakλά τον βαθμό ρύπανσης των υδάτινων σωμάτων και χρησιμοποιείται ευρέως στην αξιολόγηση της ποιότητας του νερού και των διαδικασιών επεξεργασίας λυμάτων.

Στο συγκεκριμένο πείραμα, για τον υπολογισμό της βιοχημικής απαίτησης σε οξυγόνο των δειγμάτων, γίνεται χρήση πιεζομετρικών φιαλών Oxi Top και Aqualytic της WTW, μέγιστου όγκου $V = 500 \text{ mL}$. Τα δείγματα τοποθετούνται με τη βοήθεια κωνικής φιάλης στις φιάλες. Το

pH των δειγμάτων πρέπει να βρίσκεται σε ένα εύρος μεταξύ 6.5 και 7.5 της κλίμακας pH, προκειμένου να θεωρηθεί σωστή η μέτρηση της βιοχημικής απαίτησης σε οξυγόνο. Ο όγκος των δειγμάτων που θα τοποθετηθεί στις φιάλες, υπολογίζεται αναλογικά με τη συγκέντρωση των δειγμάτων της προηγούμενης μέτρησης και με τη βοήθεια του φύλλου οδηγιών του αντίστοιχου τύπου της φιάλης. Σε κάθε φιάλη προστίθεται ένας μαγνήτης, ο οποίος χρησιμοποιείται για τη συνεχή ανάδευση των φιαλών στην ειδική βάση. Στην ειδική θήκη σιλικόνης της κάθε φιάλης, τοποθετούνται με τη χρήση κατάλληλου εργαλείου δύο σφαιρίδια υδροξειδίου του καλίου (KOH), ώστε να δεσμεύεται το διοξείδιο του άνθρακα που θα παράγεται εντός κάθε φιάλης. Όλες οι φιάλες κλείνονται αεροστεγώς με αισθητήρα πίεσης, για την καταμέτρηση της πίεσης για το διάστημα των πέντε ημερών. Τέλος, οι φιάλες τοποθετούνται στην ειδική βάση συνεχούς ανάδευσης και με τις κατάλληλες ρυθμίσεις του αισθητήρα πίεσης, ξεκινάει η μέτρηση. Οι συνθήκες περιβάλλοντος είναι $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ και το διάστημα μετρήσεων είναι πέντε μέρες. Για τη μέτρηση του BOD_5 , απαιτείται η καταγραφή της πίεσης της πέμπτης μέρας.



Εικόνα 18. Πιεζομετρικές φιάλες BOD

3.5.5 Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD)

Το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο ή αλλιώς χημική απαίτηση οξυγόνου μετρά την ποσότητα οξυγόνου που απαιτείται για τη χημική οξείδωση οργανικών και ανόργανων ρύπων στο νερό. Αποτελεί δείκτη ποιότητας του νερού και των υγρών αποβλήτων καθώς και δείκτη βαθμού ρύπανσης τους. Η παράμετρος εκφράζεται σε χιλιοστόγραμμα οξυγόνου ανά λίτρο (mg/L). Σε αντίθεση με τη βιολογική ζήτηση οξυγόνου (BOD), η οποία βασίζεται σε βιολογικές διεργασίες για την εκτίμηση της κατανάλωσης οξυγόνου από βιοδιασπώμενες οργανικές ουσίες, το COD παρέχει ταχύτερη και πιο ολοκληρωμένη ανάλυση, ενσωματώνοντας τη χημική οξείδωση.

Στο χρησιμοποιούνται δύο COD Vario Tube Tests για εύρη συγκεντρώσεων 0 – 1500 mg/L και 0 – 15000 mg/L, τα οποία επιλέγονται σύμφωνα με τις αναμενόμενες συγκεντρώσεις.

Για το πρώτο kit με εύρος συγκέντρωσης 0 – 1500 mg/L, λαμβάνονται με τη βοήθεια κατάλληλης πιπέτας 2 mL από τα δείγματα και προστίθενται στα έτοιμα αντιδραστήρια του kit. Για το δεύτερο kit με εύρος συγκέντρωσης 0 – 15000 mg/L, λαμβάνονται με τη βοήθεια πιπέτας 0,2 mL από τα δείγματα και προστίθενται στα έτοιμα αντιδραστήρια του kit. Ανακινούνται πολύ καλά και τοποθετούνται στο θερμοαντιδραστήρα χώνευσης για 2 ώρες σε θερμοκρασία $T = 148\text{ }^{\circ}\text{C}$. Μετά το πέρας των 2 ωρών, ανακινούνται εκ νέου τα φιαλίδια και αφήνονται στην άκρη για να έρθουν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Στη συνέχεια, αφού γίνει μηδενισμός του οργάνου με τυφλό (blank) διάλυμα, μετράται η απορρόφηση των δειγμάτων τοποθετώντας με τον κατάλληλο τρόπο τα φιαλίδια στο φασματοφωτόμετρο μονής δέσμης SHIMADZU UV-1202. Τέλος, με τη βοήθεια της καμπύλης βαθμονόμησης που παρουσιάζεται στο Παράρτημα Α, πραγματοποιείται μετατροπή των απορροφήσεων σε συγκεντρώσεις.

3.5.6 Ολικό Άζωτο (TN)

Για τη μέτρηση του ολικού αζώτου των δειγμάτων, χρησιμοποιούνται έτοιμα αντιδραστήρια Nitrogen (total) Cell Test 1.14763.0001 με εύρος συγκεντρώσεων 10 – 150 mg/L της εταιρείας Supelco. Αρχικά, προστίθενται σε ειδικά μπουκαλάκια χώνευσης 10 mL αραιωμένου δείγματος και τα περιεχόμενα της συνταγής του kit. Ανακινούνται καλά και τοποθετούνται στο θερμοαντιδραστήρα Thermoreaktor TR200 της MERCK για χώνευση για 1 ώρα στους 120 $^{\circ}\text{C}$. Αφού περάσει η 1 ώρα, αφήνονται στην άκρη να έρθουν σε θερμοκρασία δωματίου. Στη συνέχεια, λαμβάνονται με τη βοήθεια πιπέτας, 1 mL από κάθε χωνευμένο φιαλίδιο και 1 mL αντιδραστηρίου από το kit. Τα φιαλίδια με τα δείγματα ανακινούνται και αφήνονται εκ νέου σε θερμοκρασία δωματίου. Τέλος, μετράται η απορρόφηση τους στο φασματοφωτόμετρο Merck Nova 60 που περιέχει τη βαθμονομημένη καμπύλη και δείχνει τις συγκεντρώσεις σε mg/L στην οθόνη, χωρίς να χρειάζεται κάποια περεταίρω μετατροπή.

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

Για τη μέτρηση του αζώτου σε αμμωνιακή μορφή, χρησιμοποιείται το kit Ammonium Test 1.000683.0001 για εύρος συγκεντρώσεων 2.0 – 150 mg/L. Ακολουθείται η διαδικασία που περιγράφεται στο kit και αναμιγνύονται όλα τα περιεχόμενα, σύμφωνα με τη δοσολογία που αναγράφεται, σε δοκιμαστικούς σωλήνες. Προκειμένου να υπάρχει καλή ανάμειξη, ανακινούνται οι σωλήνες στο Vortex για μερικά δευτερόλεπτα. Αφήνονται σε κατάσταση ηρεμίας για μερικά λεπτά και παράλληλα γίνεται μηδενισμός του φασματοφωτόμετρου μονής δέσμης SHIMADZU UV-1202 με τυφλό διάλυμα. Τελικά, μετράται η απορρόφηση των

δειγμάτων σε μήκος κύματος $\lambda = 690 \text{ nm}$. Οι συγκεντρώσεις των δειγμάτων σε άζωτο με μορφή αμμωνιακών υπολογίζονται με βάση της αντίστοιχης καμπύλης βαθμονόμησης που υπάρχει στο Παράρτημα Α.

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

Για τη μέτρηση του αζώτου σε μορφή νιτρικών, γίνεται χρήση του kit Standard Test NANOCOLOR Nitrate φασματοφωτομετρικής μεθόδου της NANOCOLOR για εύρος συγκεντρώσεων $0.10 - 30.0 \text{ mg/L}$. Ακολουθείται η διαδικασία που περιγράφεται στο kit και αναμιγνύονται όλα τα περιεχόμενα, σύμφωνα με τη δοσολογία που αναγράφεται, σε δοκιμαστικούς σωλήνες. Προκειμένου να υπάρχει καλή ανάμειξη, ανακινούνται οι σωλήνες στο Vortex για μερικά δευτερόλεπτα. Αφήνονται σε κατάσταση ηρεμίας για μερικά λεπτά προκειμένου να έρθουν σε θερμοκρασία κατάλληλη για μέτρηση στο φασματοφωτόμετρο. Αφού είναι έτοιμα τα δείγματα για μέτρηση, πραγματοποιείται μηδενισμός του φασματοφωτόμετρου μονής δέσμης SHIMADZU UV-1202 με τυφλό διάλυμα, το οποίο περιλαμβάνει απιονισμένο νερό μαζί με τα περιεχόμενα της συνταγής και στη συνέχεια, μετράται η απορρόφηση των δειγμάτων σε μήκος κύματος $\lambda = 365 \text{ nm}$. Οι συγκεντρώσεις των δειγμάτων σε άζωτο με μορφή νιτρικών, υπολογίζονται με βάση της αντίστοιχης καμπύλης βαθμονόμησης που υπάρχει στο Παράρτημα Α.

3.5.9 Ολικός Φώσφορος (TP)

Για το προσδιορισμό του ολικού φωσφόρου των δειγμάτων, προστίθενται σε ογκομετρικό κύλινδρο, 25 mL αρχικού δείγματος, τα οποία μεταφέροντα σε ποτηράκια ζέσεως. Σε αυτά προστίθενται 5 mL πυκνού νιτρικού οξέος HNO_3 και 1 mL πυκνού θειϊκού οξέος H_2SO_4 και μεταφέρονται στις εστίες με χρήση απαγωγού για χώνευση. Μετά τη χώνευση, ρυθμίζεται το pH τους σε ένα εύρος τιμών από 6.5 έως 7.5 της κλίμακας και ακολουθεί μικροδιήθηση με χρήση φίλτρων μεγέθους πόρων $0,45 \mu\text{m}$. Στη συνέχεια, τα διαλύματα αραιώνονται μέχρι τα 25 mL και προστίθενται σε αυτά 4 mL combined reagent.

Για την παρασκευή του combined reagent χρειάζονται:

- $50 \text{ mL H}_2\text{SO}_4 \text{ 5N}$ (70 mL πυκνού H_2SO_4 στα $500 \text{ mL H}_2\text{O}$)
- 5 mL Potassium antimonyl tartrate ($0.2743 \text{ g/ } 100 \text{ mL H}_2\text{O}$)
- 15 mL Ammonium molybdate ($10 \text{ g/ } 250 \text{ mL H}_2\text{O}$)
- 30 mL Ascorbic acid ($0.88 \text{ g/ } 50 \text{ mL H}_2\text{O}$)

Αφού προστεθεί το combined reagent και στο τυφλό διάλυμα, το οποίο περιλαμβάνει σκέτο απιονισμένο νερό μαζί με combined, τα διαλύματα αφήνονται για μερικά λεπτά να αντιδράσουν. Τέλος, μετράται η απορρόφηση τους στο φασματοφωτόμετρο διπλής δέσμης

SHIMADZU UV – 1601 σε μήκος κύματος $\lambda = 880$ nm. Οι απορροφήσεις, με τη χρήση των καμπυλών βαθμονόμησης της ανάλογης συγκέντρωσης, μετατρέπονται σε συγκεντρώσεις ολικού φωσφόρου στα εν λόγω δείγματα. Οι καμπύλες αυτές παρατίθενται στο Παράρτημα Α της εργασίας αυτής.

3.5.10 Φωσφορικά (PO_4^{3-} - P)

Για τη μέτρηση του φωσφόρου που βρίσκεται με τη μορφή φωσφορικών στα δείγματα, ακολουθεί η ίδια διαδικασία όπως με του ολικού φωσφόρου που αναφέρεται παραπάνω με τη διαφορά ότι οι αναλύσεις και οι μετρήσεις γίνονται στα δείγματα που έχουν υποστεί μικροδιήθηση και όχι στα αρχικά δείγματα.

3.5.11 Ολικές Φαινόλες

Για τη μέτρηση των ολικών φαινολών στο υγρό δείγμα, αρχικά, λαμβάνονται με πιπέτα 80 μL από τα δείγματα που έχουν υποστεί μικροδιήθηση φίλτρων 0,45 μm . Τοποθετούνται σε δοκιμαστικούς σωλήνες μαζί με 400 μL αντιδραστήριου Folin και 6.3 mL απιονισμένου νερού. Οι δοκιμαστικοί σωλήνες ανακινούνται καλά στο Vortex και στη συνέχεια αφήνονται σε κατάσταση ηρεμίας για μερικά λεπτά. Έπειτα, προστίθενται 1200 μL ανθρακικού νατρίου Na_2CO_3 και ανακινούνται εκ νέου στο Vortex. Μετά τη διαδικασία αυτή, αφήνονται οι δοκιμαστικοί σωλήνες σε κατάσταση ηρεμίας σε σκοτεινό μέρος για 1h. Μετά το πέρας της μιας ώρας, μετράται η απορρόφηση των διαλυμάτων, με τη χρήση δύο κυψελίδων μήκους διαδρομής 2.5 cm, σε μήκος κύματος $\lambda = 765$ nm, σε φασματοφωτόμετρο διπλής δέσμης. Πριν την μέτρηση των απορροφήσεων, το φασματοφωτόμετρο διπλής δέσμης SHIMADZU UV – 1601 πρέπει να μηδενιστεί με τυφλό διάλυμα, το οποίο θα είναι σκέτο απιονισμένο νερό. Με τη βοήθεια της καμπύλης βαθμονόμησης που παρατίθεται στο Παράρτημα Α, υπολογίζονται οι συγκεντρώσεις των ολικών φαινολών των δειγμάτων.

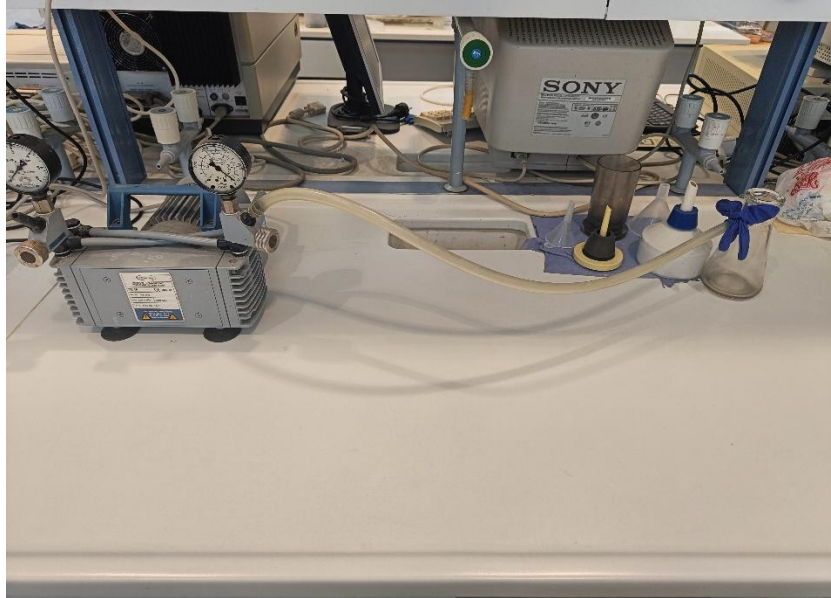
3.5.12 Ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS)

Για τον υπολογισμό των ολικών αιωρούμενων στερεών του διαλύματος, αρχικά, ζυγίζονται σε ζυγαριά ακριβείας 10^{-4} g, φίλτρα τα οποία συγκρατούν στερεά πάνω από 1 μm . Το κάθε φίλτρο τοποθετείται σε συσκευή διήθησης, ενώ παράλληλα λαμβάνεται, με τη βοήθεια ογκομετρικού κυλίνδρου, ο κατάλληλος όγκος που προστίθεται στη συσκευή διήθησης. Το φίλτρο με τα στερεά φυλάσσεται για μέτρηση του βάρους του μετά τη διήθηση και την ξήρανση. Αφού γίνει η ίδια διαδικασία για όλα τα δείγματα, τα φίλτρα τοποθετούνται στο φούρνο στους 100 °C για 1h, ώστε να ξηρανθούν και να μετρηθεί εκ νέου το βάρος τους.

Το διήθημα από τη συσκευή διήθησης, συλλέγεται σε ποτηράκια ζέσεως και αυτό στη συνέχεια υπόκειται σε μικροδιήθηση μεγέθους πόρων 0,45 μm .

Η μαθηματική σχέση που χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί η συγκέντρωση των ολικών αιωρούμενων στερεών (TSS) σε mg/L είναι ο παρακάτω:

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



Εικόνα 19. Συσκευή διήθησης

3.6 Μέθοδοι για τη φυτική βιομάζα

3.6.1 Προσδιορισμός ολικού φωσφόρου (TP)

Από κάθε δείγμα (κορμοί, φύλλα), ζυγίστηκε και τοποθετήθηκε σε χωνευτήρια πορσελάνης ποσότητα 1 g. Αυτά μεταφέρθηκαν στη συνέχεια σε κλίβανο High Therm της εταιρείας Linn και θερμάνθηκαν στους 500°C για 4 ώρες. Μετά από 24 ώρες, τα δείγματα αφαιρέθηκαν από το φούρνο και προστέθηκαν 10mL HCl 1M σε κάθε ένα από αυτά. Επέστρεψαν στο φούρνο στους 150°C μέχρι να διαλυθούν πλήρως τα στερεά. Στη συνέχεια προστέθηκε απιονισμένο νερό για να φτάσει ο συνολικός όγκος σε περίπου 12mL, και στη συνέχεια τα μείγματα φυγοκεντρήθηκαν για 4 λεπτά στις 4000 rpm. Το pH ρυθμίστηκε σε εύρος 6 έως 8 και ο όγκος συμπληρώθηκε σε 25mL με απιονισμένο νερό. Στη συνέχεια, προστέθηκαν 4mL του διαλύματος αντιδραστηρίου που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των φωσφορικών. Τέλος, τα δείγματα διηθήθηκαν μέσω φίλτρου μεμβράνης 0,45μm και αναλύθηκαν με φασματοφωτόμετρο SHIMADZU UV-1202 σε μήκος κύματος 880nm. Τα αποτελέσματα υπολογίστηκαν με βάση την καμπύλη βαθμονόμησης που παρουσιάζεται στο Παράρτημα Α.

3.6.2 Προσδιορισμός ολικού αζώτου (TN)

Αρχικά, μετρήθηκαν 0,5 g των δειγμάτων σε σκόνη και στη συνέχεια προστέθηκαν 10 mL H₂SO₄ και 10 σταγόνες H₂O₂. Το μείγμα χωνεύτηκε στους 350°C για 30 λεπτά. Μετά τα αρχικά 30 λεπτά, εισήχθησαν άλλες 10 σταγόνες H₂O₂ και η διαδικασία συνεχίστηκε για επιπλέον 30 λεπτά για να ολοκληρωθεί ο πρώτος κύκλος. Αυτό επαναλήφθηκε για δύο ακόμη πανομοιότυπους κύκλους. Μόλις τα δείγματα έφτασαν σε θερμοκρασία δωματίου, προστέθηκε απιονισμένο νερό για να φτάσει ο συνολικός όγκος στα 14 mL και τα δείγματα φυγοκεντρήθηκαν στις 4000 rpm για 4 λεπτά. Στη συνέχεια, ελήφθη 1 mL από κάθε δείγμα και ακολουθήθηκε το πρωτόκολλο που περιγράφεται στο φασματοφωτομετρικό kit Nitrogen (Total) Cell Test 1.4763.0001 της Merck για ένα εύρος συγκεντρώσεων 10-1500 mg/L N. Τέλος, τα δείγματα αναλύθηκαν στο φασματοφωτόμετρο Merck Nova 60, το οποίο ενσωμάτωσε την καμπύλη βαθμονόμησης και παρείχε μετρήσεις συγκέντρωσης σε mg/L.

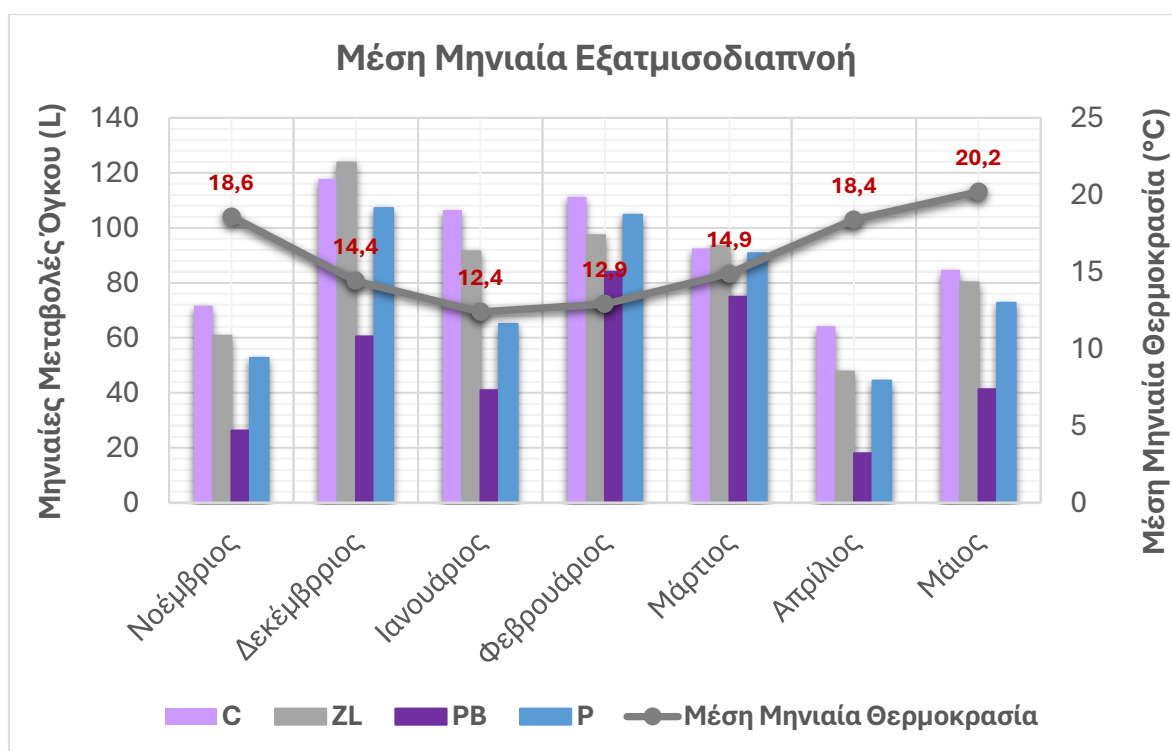
3.6.3 Προσδιορισμός ολικών μετάλλων (TM)

Αρχικά, ζυγίστηκαν 0,5 g για κάθε δείγμα, το οποίο έχει αλεστεί και ξηρανθεί στο φούρνο. Τοποθετήθηκαν οι ποσότητες των δειγμάτων σε ποτηράκια ζέσεως των 50 mL μαζί με 10 mL απιονισμένο νερό και 10 mL πυκνού νιτρικού οξέος. Στη συνέχεια, τα δείγματα χωνεύτηκαν για 15 λεπτά και αφού ήρθαν σε θερμοκρασία δωματίου, προστέθηκαν 3 mL υπεροξειδίου του υδρογόνου και χωνεύτηκαν εκ νέου, ολοκληρώνοντας έτσι τον πρώτο κύκλο. Ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία για 1 με 2 κύκλους ακόμα, έως ότου οι ατμοί να είναι διαυγείς και το υγρό σχετικά διαυγές και αποχρωματισμένο. Έπειτα, πραγματοποιήθηκε φυγοκέντρωση των δειγμάτων και διήθηση με φίλτρο 0,45 μm έως τα 25 mL. Οι ολικές συγκεντρώσεις των μετάλλων μετρήθηκαν με τη χρήση φασματογράφου μάζας επαγωγικά συζευγμένου πλάσματος (ICP-MS) της σειράς Agilent CX 7500 στο εργαστήριο Υδρογεωχημικής Μηχανικής και Αποκατάστασης Εδαφών της Σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης.

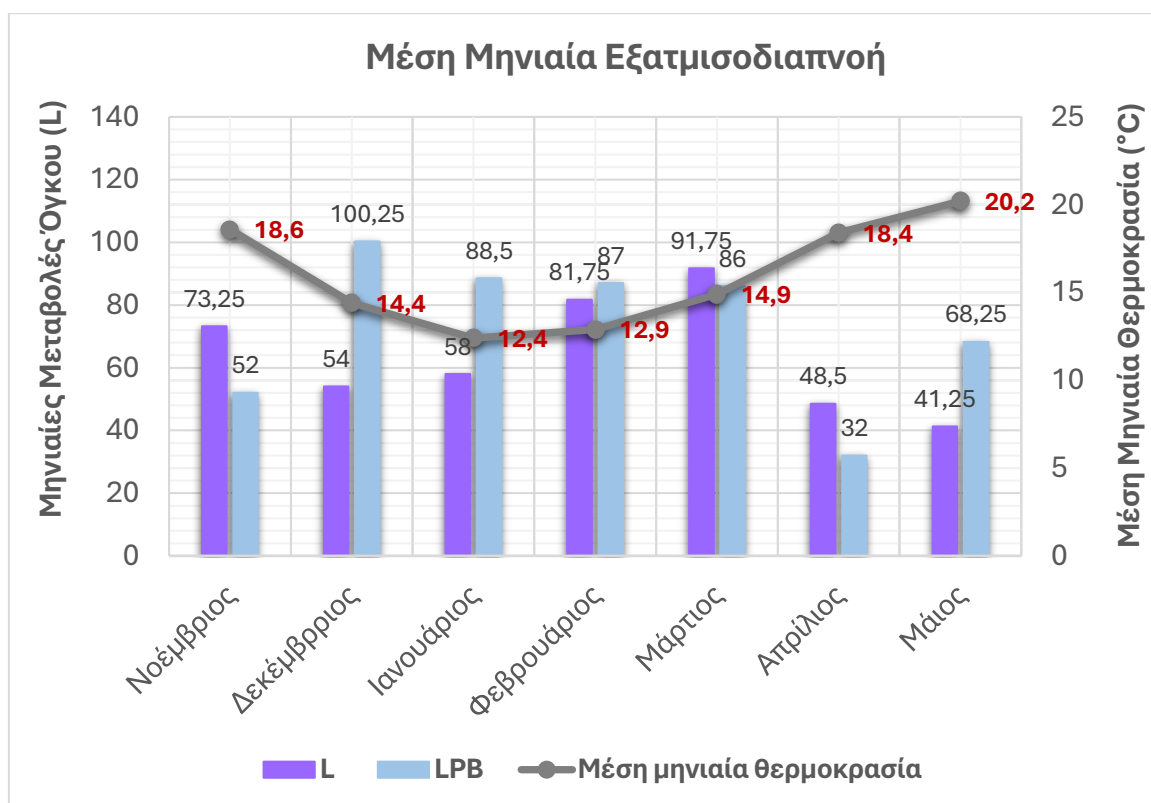
Κεφάλαιο 4°. Ανάλυση και Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

4.1 Υδατικό Ισοζύγιο

Το υδατικό ισοζύγιο αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο που αποτυπώνει τη μέση μηνιαία εξατμισοδιαπνοή, παρέχοντας ουσιαστικές πληροφορίες για το πως οι κλιματικές συνθήκες επηρεάζουν τους όγκους των εκροών σε μηνιαία βάση. Η εξατμισοδιαπνοή ορίζεται ως η συνδυασμένη απώλεια νερού που προκύπτει από την εξάτμιση από την επιφάνεια του εδάφους και τη διαπνοή της βλάστησης. Η ένταση του φαινομένου αυτού εξαρτάται άμεσα από ένα σύνολο κλιματικών παραγόντων, όπως η θερμοκρασία, η ηλιακή ακτινοβολία, οι βροχοπτώσεις, η ταχύτητα του ανέμου, η υγρασία και η βαρομετρική πίεση. Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, η ανάλυση της εξατμισοδιαπνοής είναι θεμελιώδης, καθώς αποσκοπεί στον ακριβή προσδιορισμό της επιρροής αυτών των συνθηκών στις εκροές των πιλοτικών συστημάτων των τεχνητών υδροβιότοπων. Τα παρακάτω διαγράμματα κατασκευάστηκαν με βάση τις μέσες μηνιαίες βροχοπτώσεις που παρατίθενται στον πίνακα 3.



Διάγραμμα 1. Μέση μηνιαία εξατμισοδιαπνοή για τις μονάδες C, ZL, PB και P και μέση μηνιαία θερμοκρασία



Διάγραμμα 2. Μέση μηνιαία εξατμισοδιαπνοή για τις μονάδες L, LPB και μέση μηνιαία θερμοκρασία

Στα παραπάνω διαγράμματα, που απεικονίζουν τη μέση μηνιαία εξατμισοδιαπνοή των μονάδων, παρατηρείται μια θετική συσχέτιση μεταξύ της εξατμισοδιαπνοής και της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας, καθώς η αύξηση της θερμοκρασίας κατά τους ανοιξιάτικους μήνες (Απρίλιος, Μάιος) οδηγεί σε εμφανή αύξηση της απώλειας νερού, ενώ οι χαμηλότερες θερμοκρασίες του χειμώνα (Ιανουάριος, Φεβρουάριος) αντιστοιχούν στις ελάχιστες τιμές. Επιπλέον, ο καθοριστικός ρόλος της βλάστησης επιβεβαιώνεται από τη σύγκριση της μονάδας C, η οποία είναι χωρίς φυτά, με τις υπόλοιπες, καθώς η μονάδα C παρουσιάζει σταθερά τις χαμηλότερες τιμές, αποδεικνύοντας ότι η διαπνοή των φυτών συνεισφέρει στην απώλεια νερού σε μεγαλύτερο βαθμό από την απλή εξάτμιση. Σύμφωνα και με τα μετεωρολογικά δεδομένα του πίνακα 3, οι υψηλές βροχοπτώσεις του χειμώνα σε συνδυασμό με τη χαμηλή εξατμισοδιαπνοή δημιουργούν πλεόνασμα νερού, ενώ οι χαμηλές βροχοπτώσεις τους ανοιξιάτικους μήνες και την υψηλή εξατμισοδιαπνοή, οδηγεί σε μειωμένους όγκους εκροής.

4.2 Φυσικοχημικές Αναλύσεις

4.2.1 Χαρακτηρισμός εισροής

Τα συγκεντρωτικά χαρακτηριστικά των διαφόρων παραμέτρων που αφορούν στη μη επεξεργασμένη εισροή, πριν από την αραίωση, παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 4. Μέσες τιμές συγκεντρώσεων και εύρος τιμών των παραμέτρων της εισροής

Παράμετρος	Μέση Τιμή	[ελάχιστη τιμή - μέγιστη τιμή]
pH	5.76 ± 1.35	[4.46 – 7.62]
EC (mS/cm)	7.48 ± 1.12	[6.24 – 9.30]
Χρώμα (T.C.U.)	9804 ± 2204	[7740 – 12900]
BOD ₅ (mg/L)	5923 ± 2266	[3140 – 8600]
COD (mg/L)	14372 ± 2669	[11093 – 17458]
TN (mg/L)	55 ± 14	[38 – 74]
NH ₄ ⁺ - N (mg/L)	1.13 ± 0.33	[<1 – 1.8]
NO ₃ ⁻ - N (mg/L)	18.52 ± 2.18	[16.15 – 21.42]
TP (mg/L)	64.35 ± 26.32	[37.33 – 94.04]
PO ₄ ³⁻ - P (mg/L)	54.24 ± 25.23	[24.54 – 89.38]
Ολικές φαινόλες (mg GAE/L)	1477.6 ± 477.8	[904 – 2098]
TSS (mg/L)	891.7 ± 396	[192 – 2638]

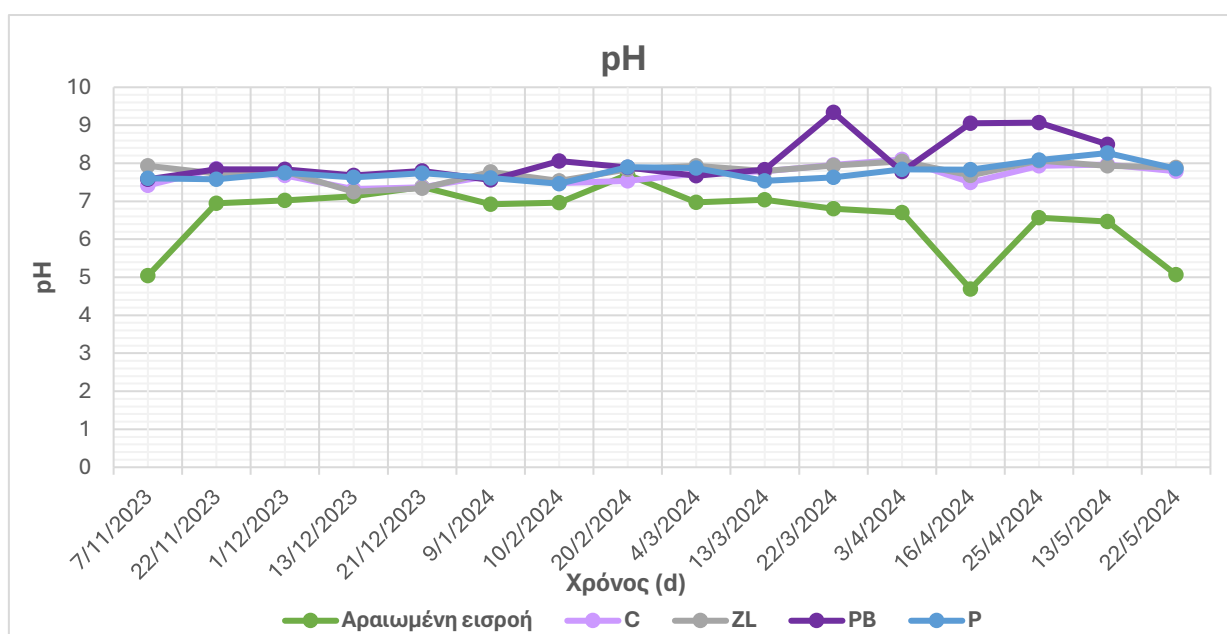
4.2.2 Χαρακτηρισμός εκροών

4.2.2.1 pH

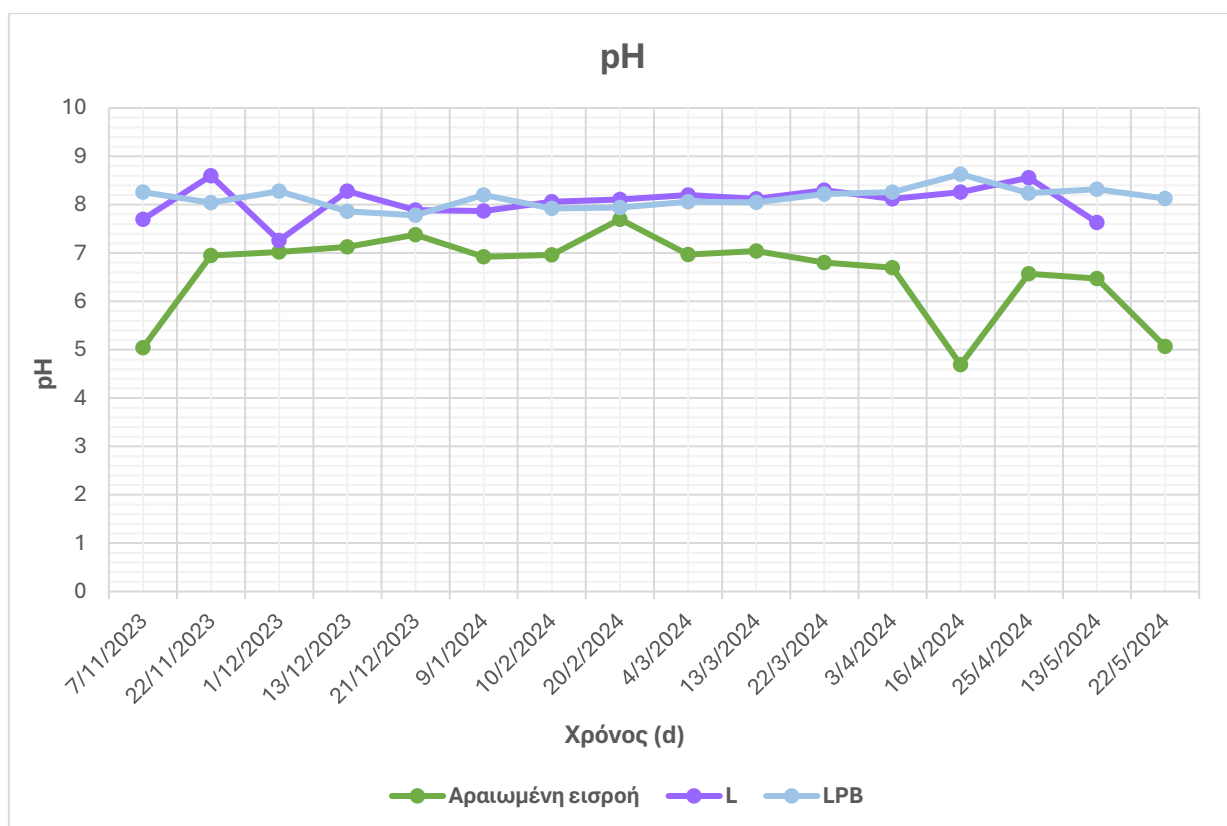
Βάσει της ισχύουσας νομοθεσίας (ΦΕΚ 192/Β/14-3-1997) για τα όρια εκπομπών, τα επεξεργασμένα υγρά απόβλητα πρέπει να έχουν τιμή εντός του εύρους 6-9 πριν την απόρριψη τους. Η τήρηση αυτού του ορίου είναι κρίσιμη για την αποφυγή αρνητικών επιπτώσεων στο υδάτινο περιβάλλον και τη διασφάλιση της δημόσιας υγείας.

Πίνακας 5. Αποτελέσματα μετρήσεων pH αραιωμένης εισροής και εκροών

pH	Μέση τιμή	[ελάχιστη τιμή - μέγιστη τιμή]
Αραιωμένη εισροή	6.59 ± 0.87	[4.69 – 7.70]
C	7.69 ± 0.24	[7.32 – 8.10]
ZL	7.78 ± 0.23	[7.25 – 8.07]
PB	8.10 ± 0.59	[7.56 – 9.34]
P	7.76 ± 0.21	[7.46 – 8.27]
L	8.06 ± 0.35	[7.26 – 8.60]
LPB	8.14 ± 0.21	[7.78 – 8.63]



Διάγραμμα 3. Μετρήσεις pH αραιωμένης εισροής και εκροών C, ZL, PB, & P



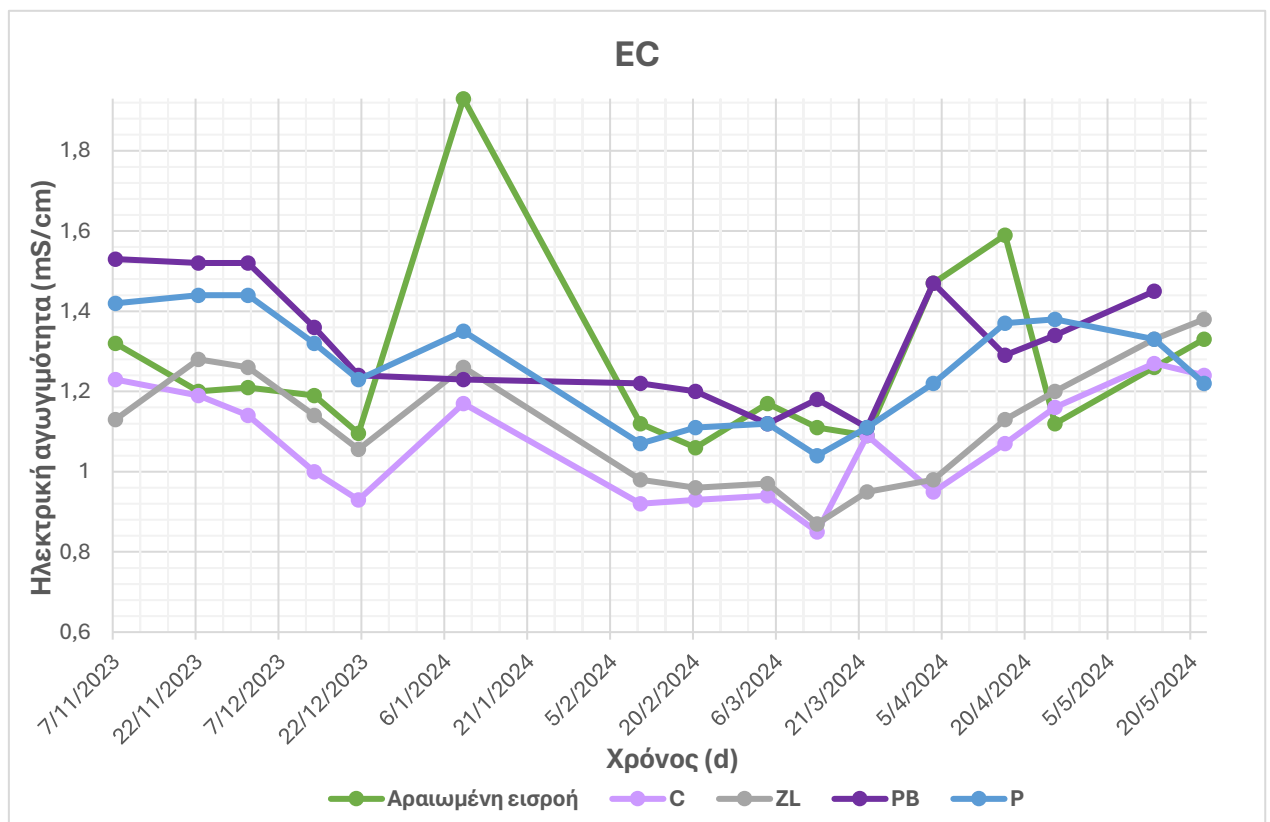
Διάγραμμα 4. Μετρήσεις pH αραιωμένης εισροής και εκροών L & LPB

Σύμφωνα με τις μετρήσεις του πίνακα και την απεικόνιση των παραπάνω διαγραμμάτων, διαπιστώθηκε μια καθολική και σημαντική αύξηση του pH σε όλες τις πιλοτικές μονάδες σε σύγκριση με την όξινη αραιωμένη εισροή, με την τιμή του pH στις εκροές να σταθεροποιείται σε ουδέτερα έως ελαφρώς αλκαλικά επίπεδα. Η αύξηση αυτή οφείλεται σε ένα συνδυασμό βιολογικών και φυσικοχημικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα εντός των τεχνητών υγροβιότοπων (Vymazal, 2014). Στις βιολογικές διεργασίες περιλαμβάνεται η διάσπαση της οργανικής ύλης και των οργανικών οξέων από βακτήρια, κατά την οποία απελευθερώνεται διοξείδιο του άνθρακα (Berego et al., 2022). Επιπλέον, οι μικροοργανισμοί και τα φυτά απορροφούν διοξείδιο του άνθρακα μέσω της φωτοσύνθεσης, μειώνοντας τη συγκέντρωση ανθρακικών οξέων στο νερό, γεγονός που αυξάνει το pH (Vymazal, 2011). Ωστόσο, η κυρίαρχη βιολογική διαδικασία που ευνοεί την αύξηση pH είναι η απονιτροποίηση, καθώς η μετατροπή των νιτρικών σε αέριο άζωτο, προκαλεί αύξηση της αλκαλικότητας στις εκροές (Green et al., 1998).

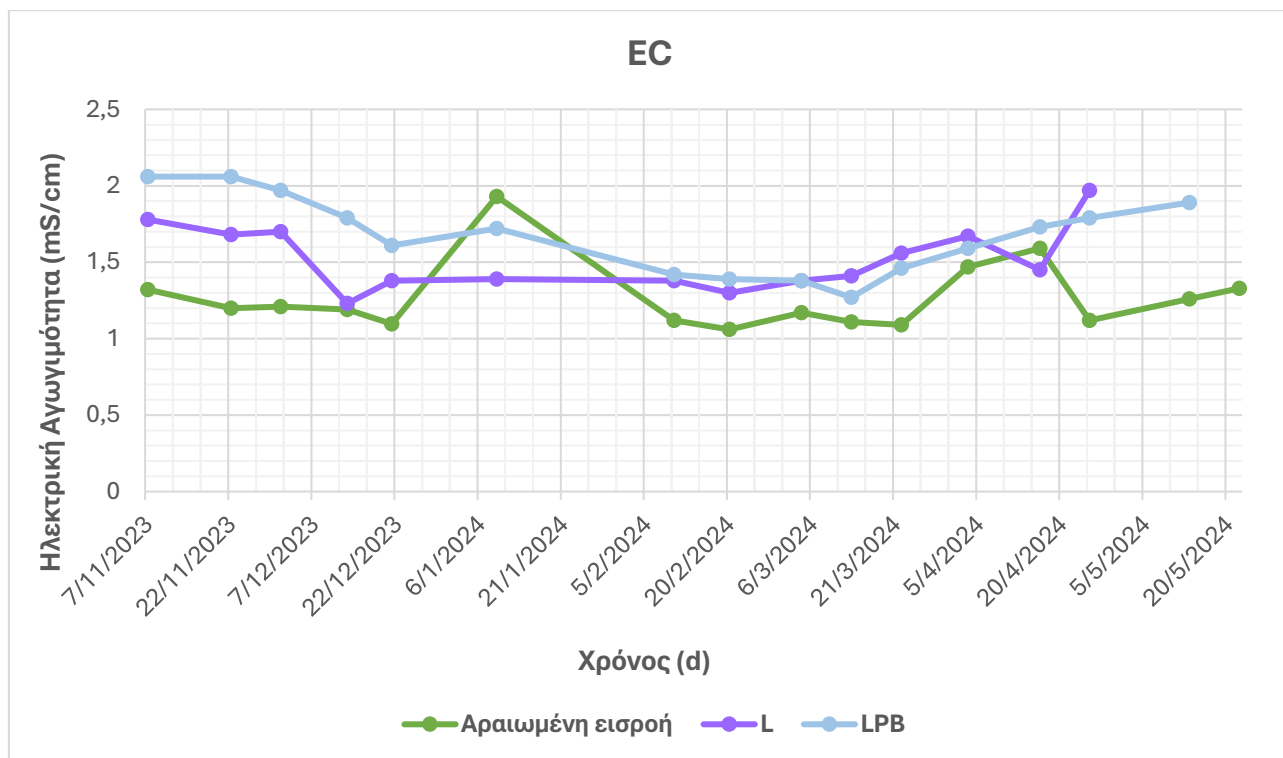
4.2.2.2 Ηλεκτρική Αγωγιμότητα (EC)

Πίνακας 6. Αποτελέσματα μετρήσεων ηλεκτρικής αγωγιμότητας αραιωμένης εισροής και εκροών

EC	Μέση τιμή (mS/cm)	[ελάχιστη τιμή - μέγιστη τιμή] (mS/cm)
Αραιωμένη εισροή	1.27 ± 0.23	[1.06 – 1.93]
C	1.07 ± 0.14	[0.85 – 1.27]
ZL	1.12 ± 0.16	[0.87 – 1.38]
PB	1.32 ± 0.15	[1.11 – 1.53]
P	1.26 ± 0.14	[1.04 – 1.44]
L	1.46 ± 0.31	[0.62 – 1.97]
LPB	1.61 ± 0.35	[0.66 – 2.06]



Διάγραμμα 5. Μετρήσεις EC αραιωμένης εισροής και εκροών C, ZL, PB, & P



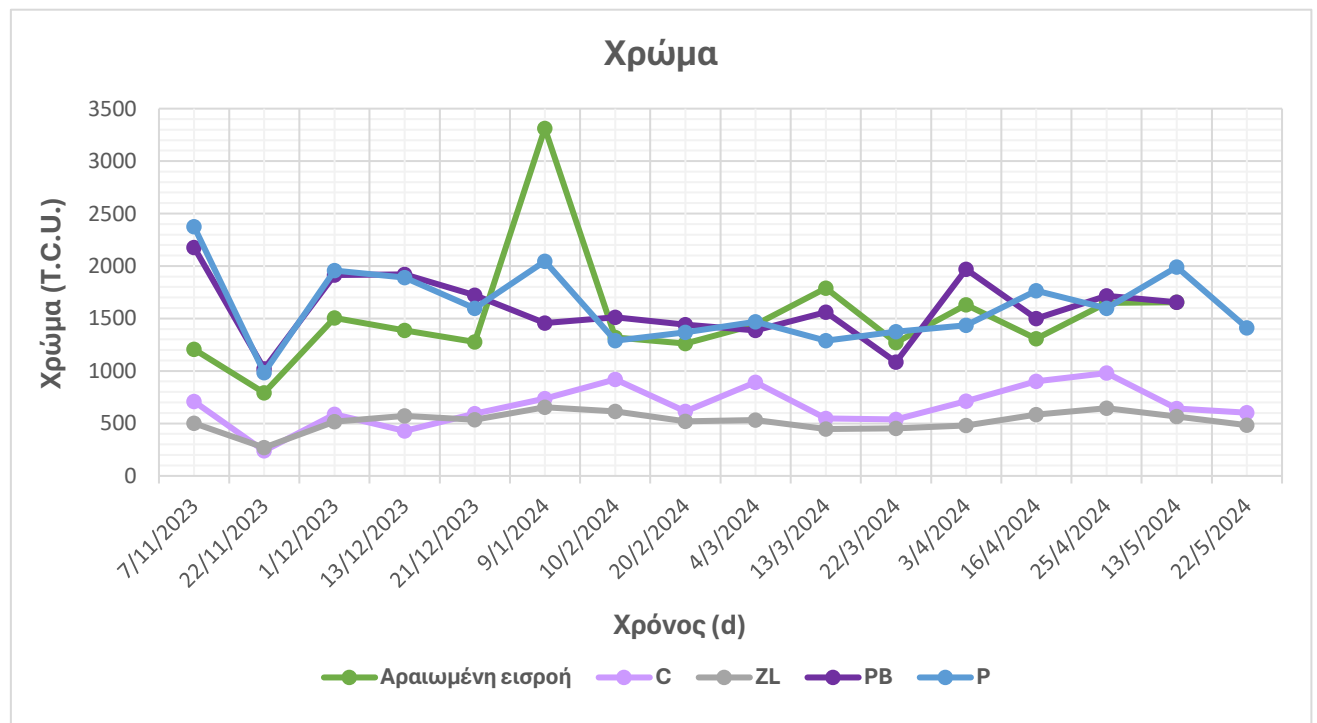
Διάγραμμα 6. Μετρήσεις EC αραιωμένης εισροής και εκροών L & LPB

Από την ανάλυση των παραπάνω διαγραμμάτων, παρατηρείται ότι η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) στις εκροές των περισσότερων πιλοτικών μονάδων (PB, P, L, LPB) είναι συστηματικά υψηλότερη από την αγωγιμότητα της αραιωμένης εισροής. Αυτή η αύξηση υποδηλώνει ότι οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα μέσα στα συστήματα, κυρίως η εξατμισοδιαπνοή, οδηγούν σε συμπύκνωση των διαλυμένων αλάτων στο νερό. Ωστόσο, μια αξιοσημείωτη εξαίρεση παρατηρείται στις μονάδες C και ZL, όπου η ηλεκτρική αγωγιμότητα της εκροής είναι σταθερά χαμηλότερη από αυτή της αραιωμένης εισροής. Συμπεραίνεται ότι σε αυτές τις δύο μονάδες, λαμβάνει χώρα ένας επιπλέον μηχανισμός που απομακρύνει ενεργά ιόντα από το υδατικό διάλυμα και αυτό συνδέεται με τη χρήση του ζεόλιθου μαζί με τη LECA ως υπόστρωμα. Η γενική τάση αύξησης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας που παρατηρείται στις περισσότερες μονάδες είναι ένα φαινόμενο που συχνά εντοπίζεται στους ΤΥ και αποδίδεται κυρίως στην εξατμισοδιαπνοή. Η διαδικασία αυτή απομακρύνει νερό από το σύστημα, προκαλώντας τη συμπύκνωση των διαλυμένων αλάτων και, κατά συνέπεια, την αύξηση της αγωγιμότητας στην εκροή (Tatoulis et al., 2017). Στις μονάδες C και ZL, η παρουσία ζεόλιθου και leca φαίνεται να οδηγεί σε μείωση της αγωγιμότητας. Ο ζεόλιθος είναι γνωστός για την ικανότητα του να απομακρύνει ιόντα, μέσω της ιοντοανταλλαγής, μια διαδικασία που μειώνει τον αριθμό των διαλυμένων ιόντων και συνεπώς την ηλεκτρική αγωγιμότητα. Αντίθετα, οι μονάδες που περιέχουν RHDPE παρουσιάζουν αύξηση της αγωγιμότητας, καθώς το πλαστικό είναι ένα αδρανές υλικό.

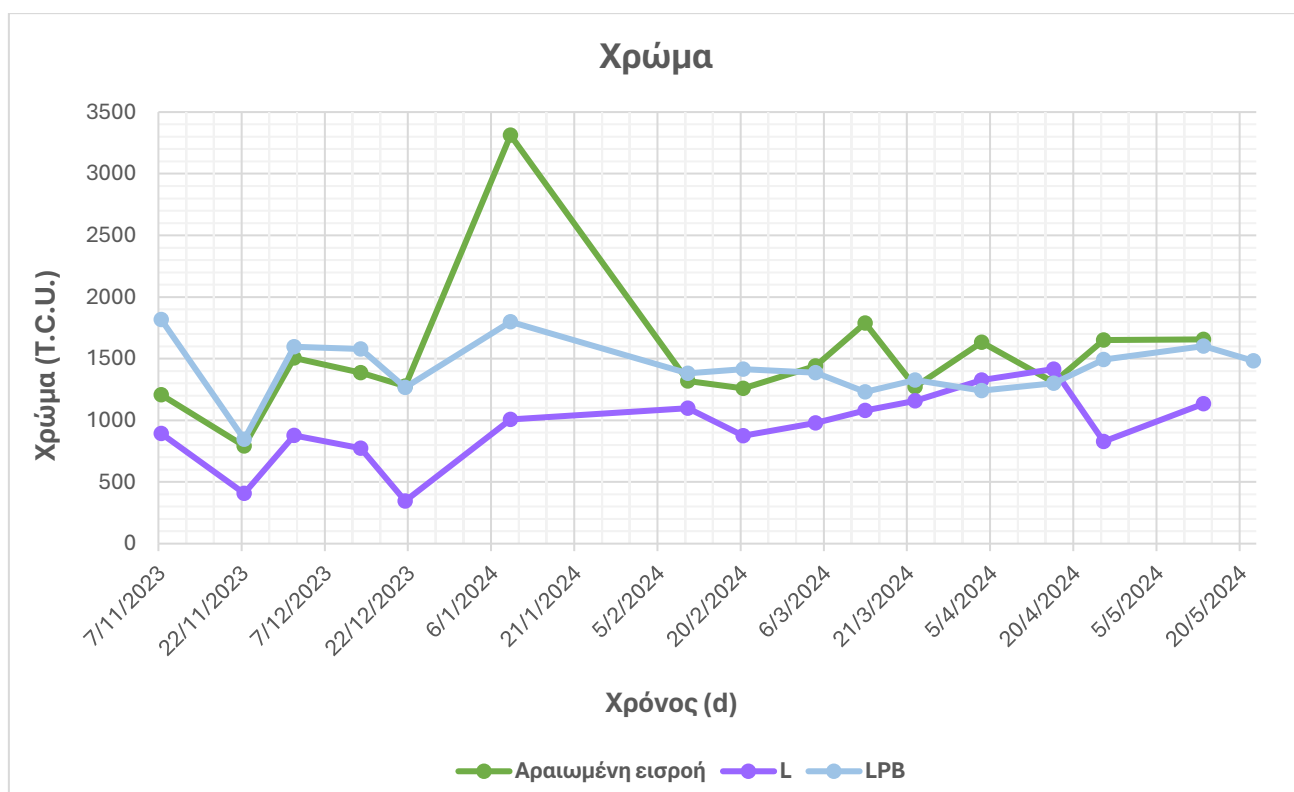
4.2.2.3 Χρώμα

Πίνακας 7. Αποτελέσματα μετρήσεων χρώματος αραιωμένης εισροής και εκροών

Χρώμα	Μέση τιμή συγκέντρωσης (T.C.U.)	Εύρος τιμών συγκεντρώσεων (T.C.U.)
Αραιωμένη εισροή	1520.4 ± 551.4	[792 – 3312]
C	665.3 ± 194.5	[238 – 980]
ZL	523.6 ± 92.3	[270 – 654]
PB	1602.4 ± 317.7	[1020 – 2178]
P	1614.8 ± 360.2	[984 – 2376]
L	946.8 ± 292.4	[346 – 1416]
LPB	1422.8 ± 237.7	[846 – 1818]



Διάγραμμα 7. Χρώμα αραιωμένης εισροής και εκροών C, ZL, PB & P



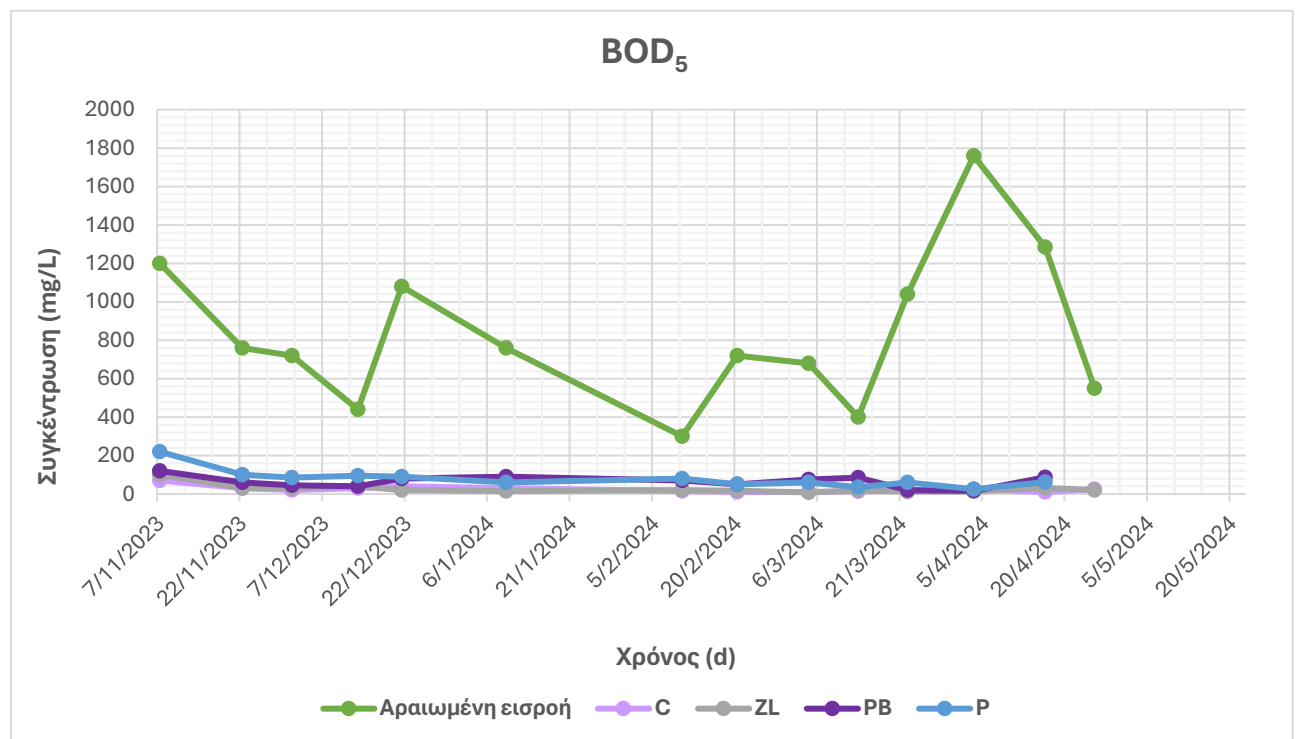
Διάγραμμα 8. Χρώμα αραιωμένης εισροής και εκροών L & LPB

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα, η απομάκρυνση του χρώματος από τα απόβλητα παρουσίασε σημαντικές διαφοροποιήσεις, οι οποίες εξαρτιόνταν άμεσα από τη διαμόρφωση και τα υλικά πλήρωσης της κάθε πιλοτικής μονάδας. Στις μονάδες οριζόντιας ροής, οι δεξαμενές που περιείχαν συνδυασμό LECA και ζεόλιθου (C,ZL) παρουσίασαν την υψηλότερη απόδοση, επιτυγχάνοντας τις χαμηλότερες μέσες συγκεντρώσεις χρώματος στις εκροές τους. Η αποτελεσματικότητα αυτή αποδίδεται κυρίως στην ικανότητα του ζεόλιθου για ανταλλαγή ιόντων και προσρόφηση οργανικών και ανόργανων χρωστικών ουσιών. Ακόμη και η μονάδα C, χωρίς βλάστηση, διατήρησε χαμηλές τιμές χρώματος, επιβεβαιώνοντας τον καθοριστικό ρόλο των φυσικοχημικών ιδιοτήτων των υλικών πλήρωσης. Αντιθέτως, οι μονάδες που περιείχαν RHDPE και biochar (PB,P) εμφάνισαν σημαντικά υψηλότερες συγκεντρώσεις χρώματος. Η μειωμένη απόδοση σε αυτές τις μονάδες συνδέεται με τη χαμηλή προσροφητική ικανότητα του πλαστικού, η οποία επιτρέπει τη συσσώρευση οργανικών ενώσεων στην επιφάνεια του (Kapellakis et al., 2012). Στις δεξαμενές κατακόρυφης ροής, η μονάδα L παρουσίασε καλύτερη απόδοση αποχρωματισμού σε σύγκριση με τη μονάδα LPB, η οποία φαίνεται να μην είχε απομάκρυνση χρώματος. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο ότι η LECA, λόγω της εσωτερικής της πορώδους δομής, διαθέτει μια μεγάλη ειδική επιφάνεια για την προσκόλληση μορίων φαινολών και άλλων οργανικών ενώσεων που προκαλούν το χρώμα.

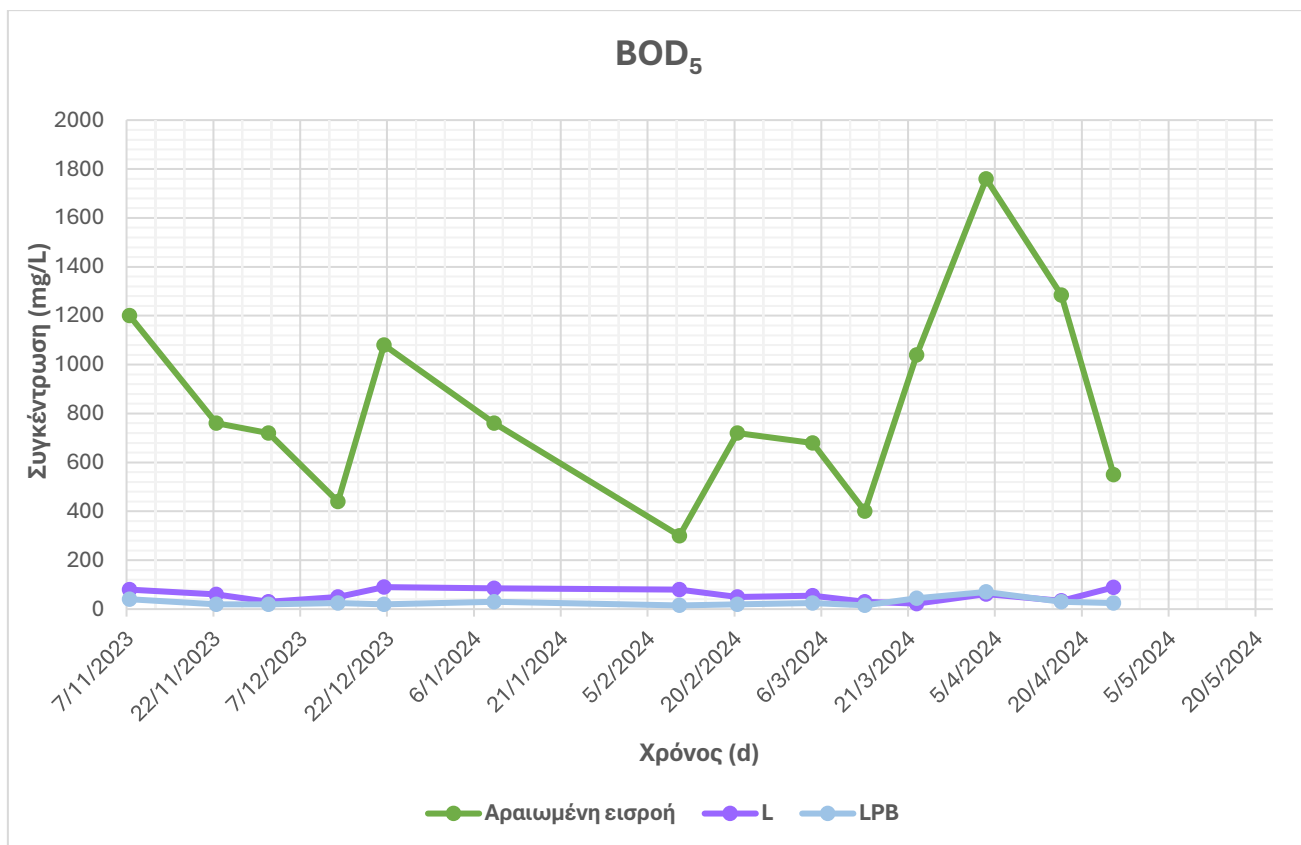
4.2.2.4 Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD₅)

Πίνακας 8. Αποτελέσματα μετρήσεων BOD₅ αραιωμένης εισροής και εκροών

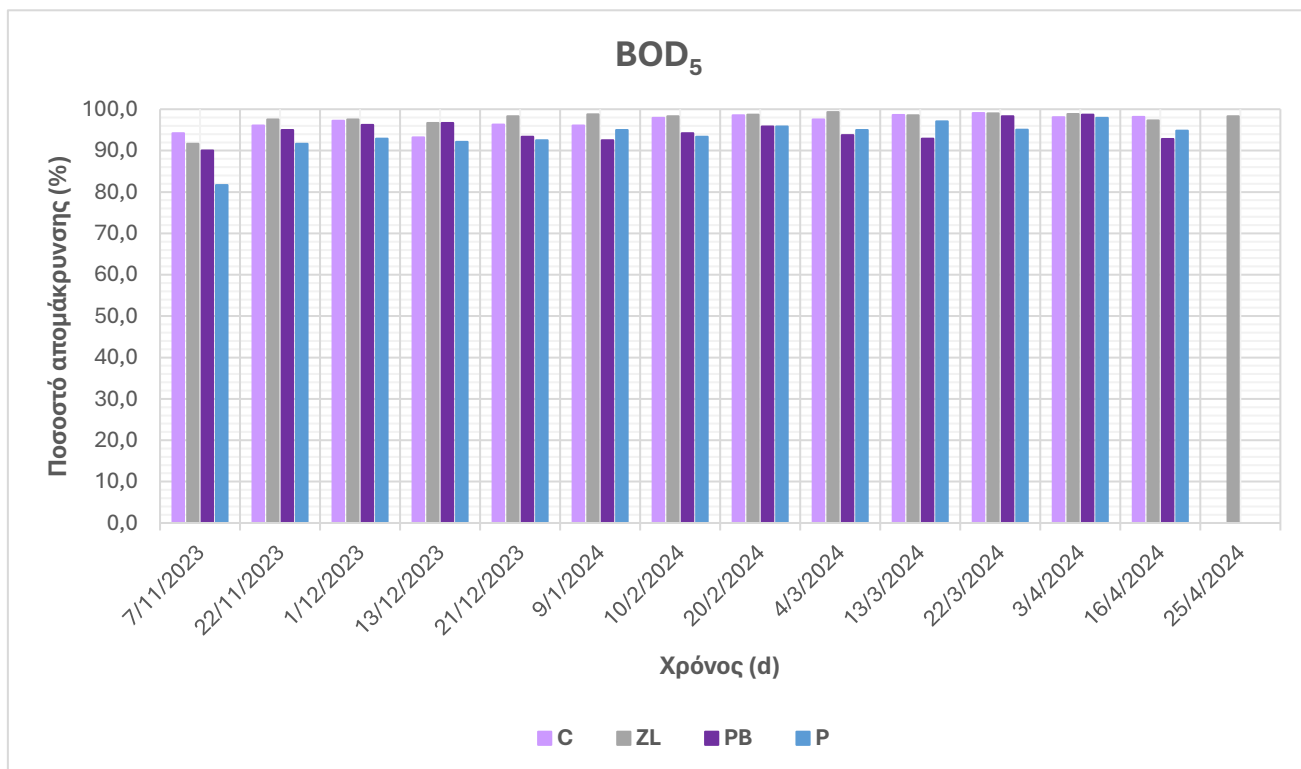
BOD ₅	Εύρος τιμών συγκεντρώσεων (mg/L)	Μέση τιμή απομάκρυνσης (%)	Εύρος τιμών απομάκρυνσης (%)
Αραιωμένη εισροή	[300 – 1760]	-	-
C	[10 – 70]	97.0 ± 1.8	[93.2 – 99.1]
ZL	[8 -100]	97.7 ± 2.0	[91.7 – 99.3]
PB	[15.9 – 120]	94.8 ± 2.5	[90 – 98.7]
P	[24.9 – 220]	93.3 ± 4.2	[81.7 – 97.9]
L	[22.5 – 90]	95.3 ±1.9	[92.5 – 98.1]
LPB	[15 – 70]	97.6 ± 1.3	[94.2 – 98.8]



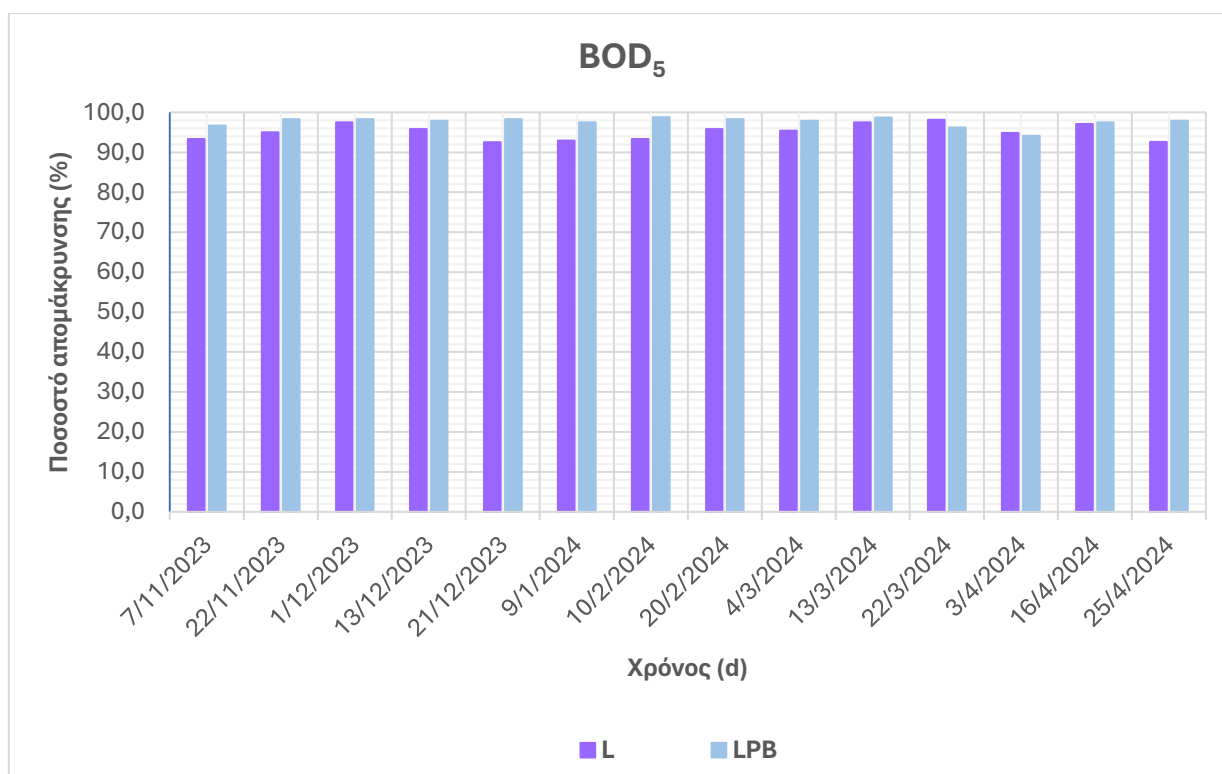
Διάγραμμα 9. Συγκεντρώσεις BOD₅ αραιωμένης εισροής και εκροών C, ZL, PB & P



Διάγραμμα 10. Συγκεντρώσεις BOD₅ αραιωμένης εισροής και εκροών L & LPB



Διάγραμμα 11. Ποσοστά απομακρύνσεων BOD₅ για τις μονάδες C, ZL, PB & P



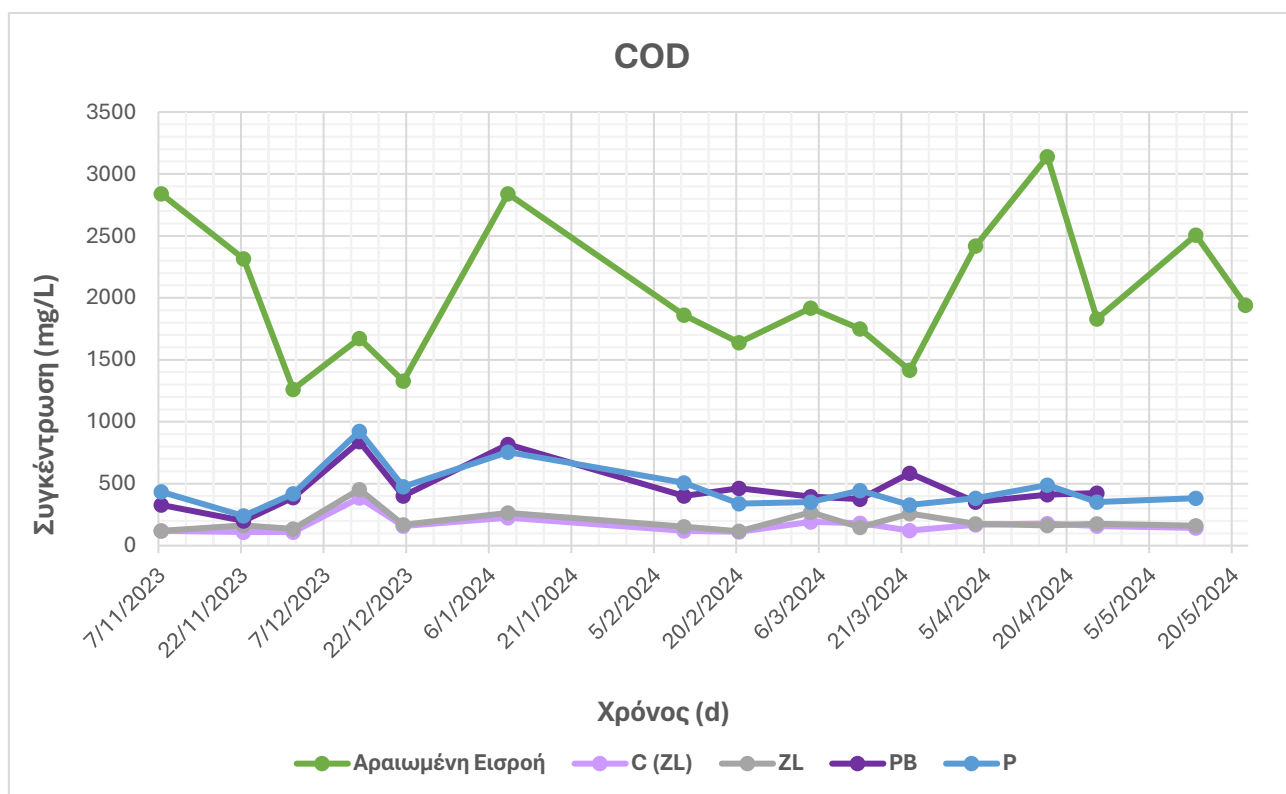
Διάγραμμα 12. Ποσοστά απομακρύνσεων BOD₅ για τις μονάδες L & LPB

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 9, παρατηρήθηκε ότι τα πιλοτικά συστήματα οριζόντιας ροής έδειξαν πολύ υψηλή απόδοση στην απομάκρυνση του οργανικού φορτίου (BOD₅) από τα ΥΑΕ. Η μέση συγκέντρωση του BOD₅ στις οριζόντιες μονάδες είναι σημαντικά χαμηλότερη συγκριτικά με την αραιωμένη εισροή. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τον πίνακα 8, η μονάδα ZL, εμφάνισε την καλύτερη απόδοση και τη μέγιστη μέση τιμή απομάκρυνσης BOD₅, ίση με $97.7 \pm 2.0 \%$. Όσον αφορά τα πιλοτικά συστήματα κατακόρυφης ροής, έδειξαν και αυτά υψηλή απόδοση στην απομάκρυνση του BOD₅, με τη μέγιστη απομάκρυνση να έχει πραγματοποιηθεί στη μονάδα LPB με μέση τιμή $97.6 \pm 1.3\%$. Η απομάκρυνση της οργανικής ύλης σ' έναν ΤΥ υποεπιφανειακής ροής, επιτυγχάνεται κυρίως από τους αερόβιους οργανισμούς που είναι προσκολλημένοι στο πορώδες υλικό και στις ρίζες των καλαμιών (Akratos & Tsihrintzis, 2007). Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει την απομάκρυνση του οργανικού υλικού μέσω καθίζησης και διήθησης και την αερόβια αποικοδόμηση της υπόλοιπης οργανικής ύλης, η οποία απαιτεί υψηλή παροχή οξυγόνου και αποτελεί την επικρατέστερη διαδικασία απομάκρυνσης, ιδιαίτερα στα συστήματα κατακόρυφης ροής, καθιστώντας τα πολύ αποτελεσματικά στην απομάκρυνση του BOD₅. Αυτή η βιοαποικοδόμηση λαμβάνει χώρα στο βιοφίλμ που αναπτύσσεται κατά μήκος των ριζών των καλαμιών και στην επιφάνεια του υποστρώματος (Stefanakis et al., 2014).

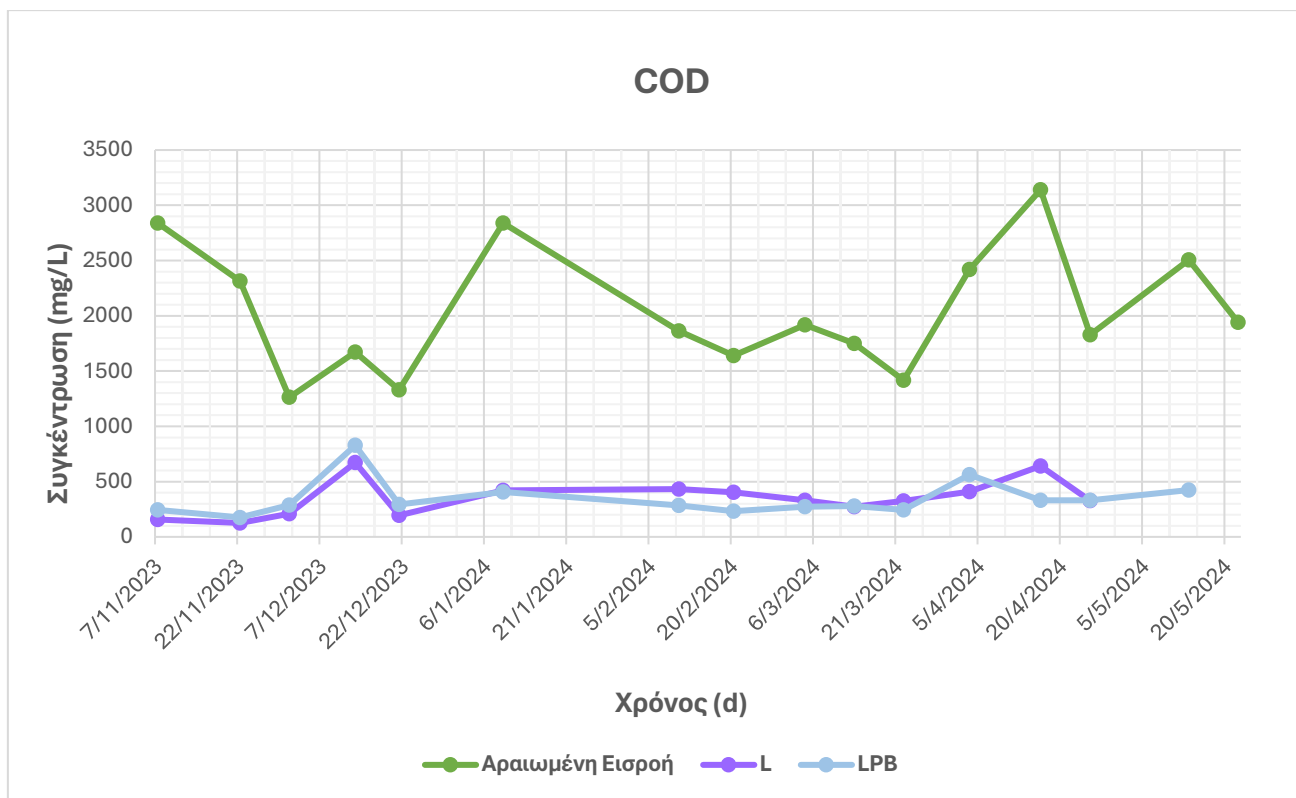
4.2.2.5 Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD)

Πίνακας 9. Αποτελέσματα μετρήσεων COD αραιωμένης εισροής και εκροών

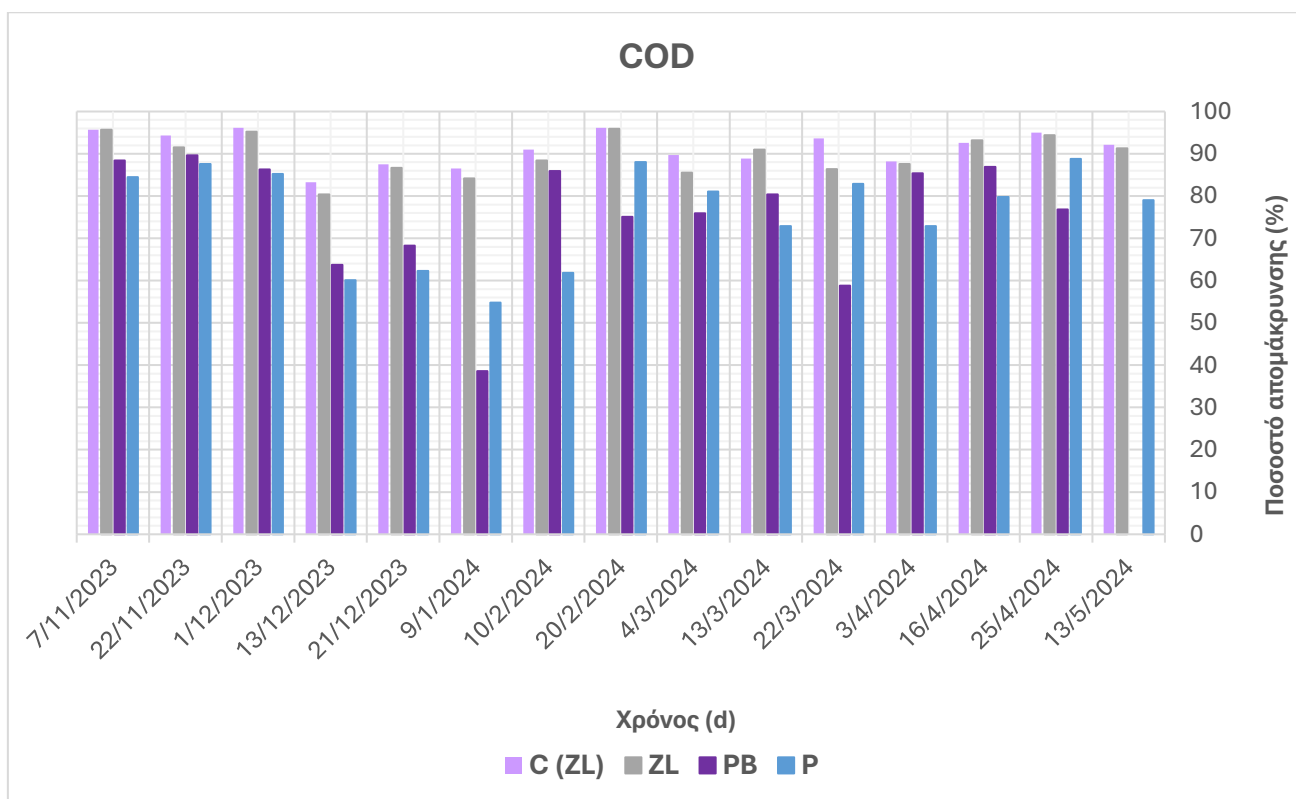
COD	Μέση τιμή συγκέντρωσης (mg/L)	Εύρος τιμών συγκεντρώσεων (mg/L)	Μέση τιμή απομάκρυνσης (%)	Εύρος τιμών απομάκρυνσης (%)
Αραιωμένη εισροή	2042.6 ± 571.7	[1262.2 – 3140]	-	-
C	165.7 ± 70.2	[110 – 386]	91.4 ± 3.9	[83.3 – 96.1]
ZL	195.3 ± 86.8	[116 – 454]	89.8 ± 4.7	[80.4 – 95.9]
PB	455.7 ± 177.6	[200 – 840]	75.7 ± 14.3	[38.6 – 89.6]
P	455.5 ± 173.9	[240 – 924]	76.1 ± 11.4	[54.8 – 88.8]
L	351.3 ± 162.9	[126 – 672]	82.5 ± 7.8	[68.4 – 94.5]
LPB	346.5 ± 163.1	[176 – 828]	81.8 ± 9.8	[60.2 – 91.8]



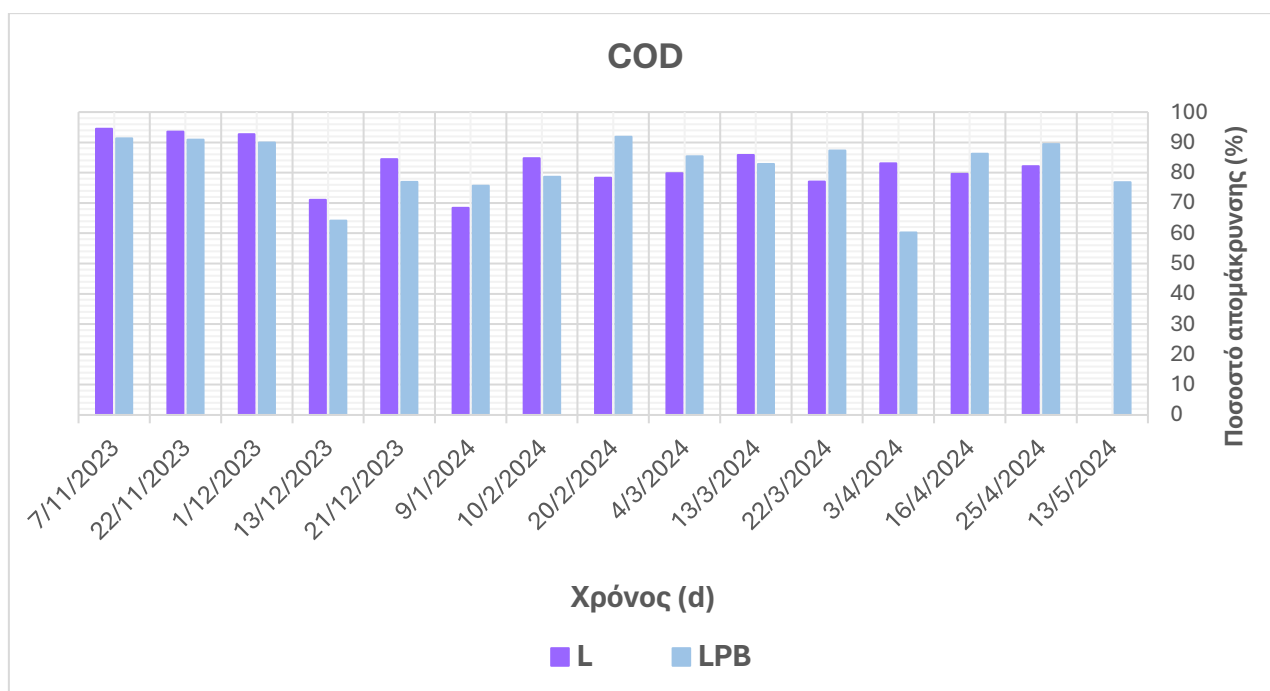
Διάγραμμα 13. Συγκεντρώσεις COD αραιωμένης εισροής και εκροών C, ZL, PB & P



Διάγραμμα 14. Συγκεντρώσεις COD αραιωμένης εισροής και εκροών L & LPB



Διάγραμμα 15. Ποσοστά απομακρύνσεων COD για τις μονάδες C, ZL, PB & P



Διάγραμμα 16. Ποσοστά απομακρύνσεων COD για τις μονάδες L & LPB

Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα, παρατηρήθηκε ότι οι οριζόντιες μονάδες C και ZL, έδειξαν την υψηλότερη και πιο σταθερή απόδοση, με ποσοστά απομάκρυνσης COD που ξεπερνούσαν σταθερά το 90%. Η αυξημένη αυτή απόδοση μπορεί να αποδοθεί στην πορώδη φύση και τη μεγάλη ειδική επιφάνεια αυτών των υλικών, τα οποία παρέχουν ιδανικές συνθήκες για την ανάπτυξη του μικροβιακού βιοφίλμ και ταυτόχρονα ευνοούν την προσρόφηση οργανικών ρύπων (El Ghadraoui et al., 2020). Η σύγκριση μεταξύ της μονάδας ZL (με βλάστηση) και της μονάδας C (χωρίς βλάστηση) δείχνει παρόμοια αποτελεσματικότητα, υποδηλώνοντας ότι το ίδιο το υπόστρωμα ήταν ο κυρίαρχος παράγοντας. Ωστόσο, η παρουσία των φυτών θεωρείται γενικά σημαντική, καθώς το ριζικό τους σύστημα μεταφέρει οξυγόνο στο υπόστρωμα, δημιουργώντας αερόβιες συνθήκες που ενισχύουν τη μικροβιακή δραστηριότητα και την αποικοδόμηση των ρύπων, κάτι που είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε συστήματα που δέχονται υψηλό οργανικό φορτίο (Herounim et al., 2011; Achak et al., 2019). Οι μονάδες κάθετης ροής (L και LPB) παρουσίασαν επίσης πολύ καλή απόδοση (άνω του 80%), καθώς ο σχεδιασμός τους επιτρέπει καλύτερο αερισμό του υποστρώματος και ενίσχυση των αερόβιων διεργασιών αποικοδόμησης (Herounim et al., 2011). Αντίθετα, οι οριζόντιες μονάδες που βασίστηκαν στο RHDPE (P και PB) είχαν συγκριτικά χαμηλότερη απόδοση, καθώς το πλαστικό είναι ένα χημικά αδρανές υλικό που δεν προσφέρει τις ίδιες δυνατότητες προσρόφησης ή ανάπτυξης βιοφίλμ με τα πορώδη υλικά όπως ο ζεόλιθος και η LECA (El Ghadraoui et al., 2020).

4.2.2.6 Ολικό άζωτο (TN)

Πίνακας 10. Αποτελέσματα μετρήσεων TN αραιωμένης εισροής και εκροών

Εύρος τιμών συγκεντρώσεων (mg/L)	
TN	
Αραιωμένη εισροή	[<5 – 32]
C	[<5 – 25]
ZL	[<5 – 12]
PB	[<5 – 12]
P	[<5 – 20]
L	[<5 – 12]
LPB	[<5 – 16]

Με βάση τα αποτελέσματα των μετρήσεων TN της αραιωμένης εισροής και των εκροών των μονάδων, οι μονάδες που είχαν την καλύτερη και πιο σταθερή απόδοση ήταν οι οριζόντιες ZL και PB, καθώς και η κάθετη μονάδα L, διατηρώντας τις συγκεντρώσεις της εκροής σταθερά κάτω από τα 12 mg/L. Η σύγκριση των φυτεμένων μονάδων με την μονάδα C (χωρίς βλάστηση) αποδεικνύει την καθοριστική συμβολή της βλάστησης, καθώς όλες οι φυτεμένες μονάδες είχαν σημαντικά αυξημένη απόδοση, κάτι που επιβεβαιώνει ότι η παρουσία φυτών ενισχύει σημαντικά την απομάκρυνση του αζώτου σε τεχνητούς υδροβιότοπους (Herounim et al., 2011). Αυτή η απομάκρυνση αποδίδεται κυρίως στη μεταφορά οξυγόνου από τα φυτά στο ριζικό σύστημα, η οποία δημιουργεί τις απαραίτητες αερόβιες συνθήκες για τη διαδικασία της νιτροποίησης από τους μικροοργανισμούς που αναπτύσσονται στο υπόστρωμα (Akratos & Tsihrintzis, 2007). Οι μονάδες με πληρωτικά υλικά όπως ο ζεόλιθος και το biochar παρουσίασαν αυξημένη απόδοση σε σχέση με τη μονάδα που περιείχε μόνο RHDPE, καθώς υποστρώματα με υψηλή ικανότητα προσρόφησης και μεγάλη ειδική επιφάνεια ενισχύουν την απομάκρυνση της αμμωνίας (Stefanakis et al., 2014). Η απόδοση επηρεάζεται τόσο από τις φυσικές ιδιότητες όσο και από τη χημική σύσταση του υποστρώματος, με υλικά πλούσια σε αργίλιο και σίδηρο να δείχνουν καλύτερα αποτελέσματα (Akratos & Tsihrintzis, 2007). Μολονότι, τα συστήματα κάθετης ροής είναι αποδοτικότερα στη νιτροποίηση λόγω της καλύτερης οξυγόνωσης, ενώ τα συστήματα οριζόντιας ροής ευνοούν την απονιτροποίηση

λόγω των αναερόβιων συνθηκών που επικρατούν (Vymazal, 2007), στο πείραμα μας αποδείχθηκε ότι η μονάδα οριζόντιας ροής παρουσίασε την καλύτερη απόδοση και έτσι συμπεραίνεται ότι η οξυγόνωση μέσω του ριζικού συστήματος των φυτών ήταν επαρκής για να πραγματοποιηθεί αποτελεσματική νιτροποίηση.

4.2.2.7 Αμμωνιακό άζωτο ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)

Πίνακας 11. Αποτελέσματα μετρήσεων $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ αραιωμένης εισροής και εκροών

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	Μέση τιμή συγκέντρωσης (mg/L)
Αραιωμένη εισροή	1.1 ± 0.24
C	1.35 ± 0.51
ZL	1.04 ± 0.1
PB	1.23 ± 0.35
P	1.34 ± 0.77
L	1.05 ± 0.12
LPB	1.19 ± 0.39

Βάσει του παραπάνω πίνακα, παρατηρήθηκε ότι οι μονάδες που είχαν την καλύτερη απόδοση είναι η ZL (1.04 mg/L) και η L (1.05 mg/L), καθώς παρουσιάζουν τις χαμηλότερες μέσες συγκεντρώσεις αμμωνιακών στην εκροή. Πρέπει να σημειωθεί, ότι οι περισσότερες μονάδες (C, PB, P, LPB) παρουσίασαν υψηλότερη συγκέντρωση αμμωνιακών στην εκροή από ό,τι στην εισροή (1.1 mg/L). Αυτό μπορεί να σημαίνει ότι, όχι μόνο δεν επιτυγχάνεται απομάκρυνση, αλλά αντίθετα λαμβάνει χώρα η διαδικασία της αμμωνιοποίησης, δηλαδή η βιολογική μετατροπή του οργανικού азώτου (που υπάρχει σε αφθονία στα απόβλητα ελαιοτριβείου) σε αμμωνιακό άζωτο (Vymazal, 2007). Αυτό σημαίνει ότι ο ρυθμός παραγωγής αμμωνιακών από την αποικοδόμηση της οργανικής ύλης ήταν μεγαλύτερος από τον ρυθμό απομάκρυνσής τους μέσω νιτροποίησης ή φυτικής πρόσληψης στις συγκεκριμένες μονάδες.

Οι μονάδες ZL και L, που κατάφεραν να μειώσουν, έστω και λίγο τη συγκέντρωση, είναι αυτές όπου η διαδικασία της νιτροποίησης (η αερόβια μετατροπή της αμμωνίας σε νιτρικά) κατάφερε να υπερισχύσει έναντι της διαδικασίας της αμμωνιοποίησης. Η μονάδα L, ως σύστημα κάθετης ροής, διαθέτει καλύτερες αερόβιες συνθήκες που ευνοούν τη νιτροποίηση, εξηγώντας την καλή της απόδοση. Η μονάδα ZL, αν και οριζόντιας ροής (με θεωρητικά λιγότερο οξυγόνο), είχε την καλύτερη απόδοση χάρη στο υλικό πλήρωσης. Ο ζεόλιθος είναι γνωστός για την υψηλή του ικανότητα στην προσρόφηση αμμωνιακών ιόντων μέσω ανταλλαγής ιόντων και ιδιαίτερα κατιόντων, ένας μηχανισμός που δρα παράλληλα με τη βιολογική απομάκρυνση (Stefanakis et al., 2014). Η παρουσία βλάστησης στη μονάδα ZL, σε σύγκριση με την μονάδα C (χωρίς βλάστηση), συνέβαλε επίσης θετικά, πιθανότατα μέσω της μεταφοράς οξυγόνου στο ριζικό σύστημα των καλαμιών και της διαδικασίας της νιτροποίησης (Akratos & Tsihrintzis, 2007).

4.2.2.8 Νιτρικό άζωτο (NO_3^- - N)

Πίνακας 12. Αποτελέσματα μετρήσεων NO_3^- - N αραιωμένης εισροής και εκροών

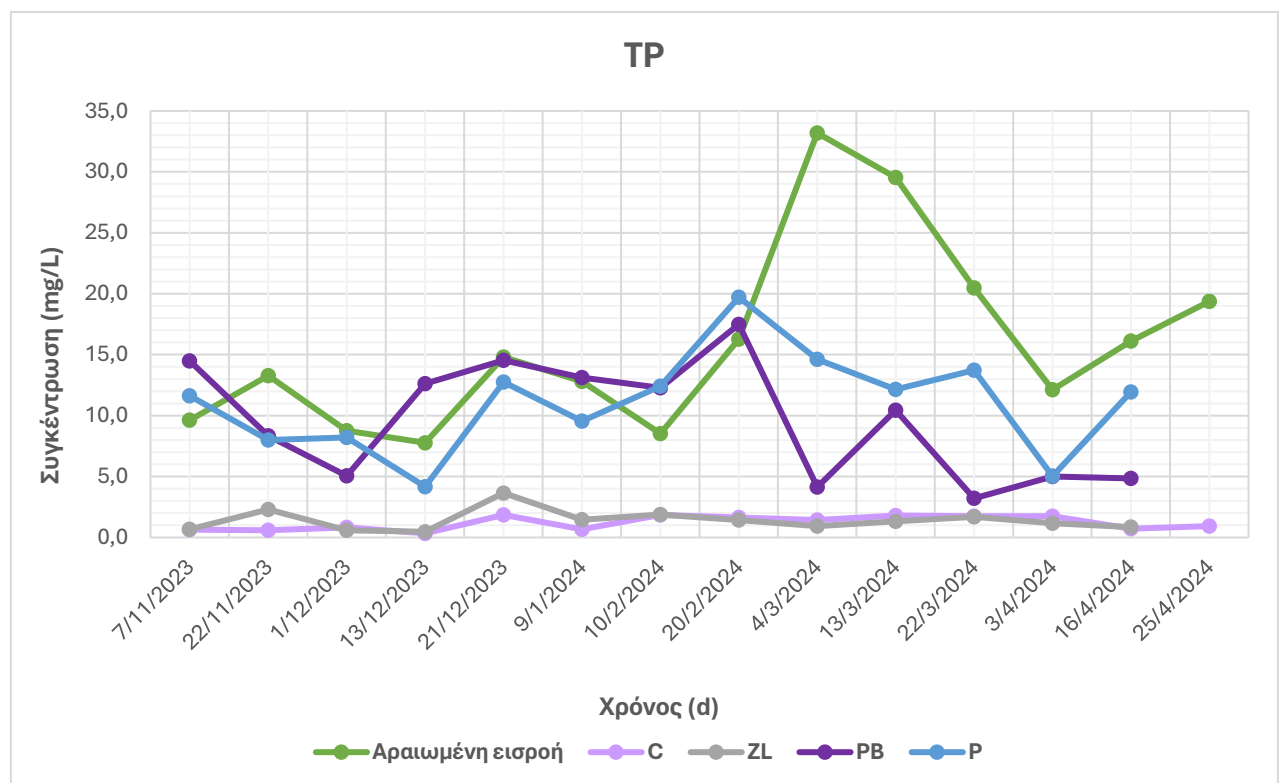
NO_3^- - N	Μέση τιμή συγκέντρωσης (mg/L)
Αραιωμένη εισροή	1.85 ± 0.67
C	1.08 ± 0.23
ZL	1.03 ± 0.1
PB	1.91 ± 0.73
P	1.72 ± 0.5
L	1.18 ± 0.24
LPB	1.28 ± 0.3

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα, που απεικονίζει τα αποτελέσματα μετρήσεων των NO_3^- - N, διαπιστώθηκε ότι οι μονάδες οριζόντιας ροής ZL (1.03 mg/L) και C (1.08 mg/L) παρουσίασαν την καλύτερη απόδοση, επιτυγχάνοντας τη μεγαλύτερη μείωση της συγκέντρωσης σε σχέση με την εισροή (1.85 mg/L). Η χαμηλή τελική συγκέντρωση νιτρικών σημαίνει ότι στα συστήματα αυτά λαμβάνει χώρα η διαδικασία της απονιτροποίησης, η βιολογική διεργασία που μετατρέπει τα νιτρικά ιόντα σε αέριο άζωτο και αποτελεί τον κύριο μηχανισμό οριστικής απομάκρυνσης του αζώτου από το νερό (Vymazal, 2007). Η αυξημένη αποδοτικότητα των συστημάτων οριζόντιας ροής στην απομάκρυνση των νιτρικών ιόντων είναι αναμενόμενη, καθώς δημιουργούνται οι απαραίτητες αναερόβιες συνθήκες που ευνοούν τη δράση των απονιτροποιητικών βακτηρίων (Akratos & Tsihrintzis, 2007). Αντίθετα, οι μονάδες κάθετης ροής (L και LPB), αν και παρουσίασαν κάποια μείωση, ήταν λιγότερο αποτελεσματικές, διότι ο αερόβιος χαρακτήρας τους, που ευνοεί τη νιτροποίηση, περιορίζει την απονιτροποίηση (Stefanakis et al., 2014). Η σύγκριση της φυτεμένης μονάδας ZL με την C (χωρίς βλάστηση) δείχνει ελάχιστη διαφορά στην απόδοση, πράγμα που σημαίνει ότι ο καθοριστικός παράγοντας για την απονιτροποίηση είναι το ίδιο το κατά βάση αναερόβιο περιβάλλον του συστήματος οριζόντιας ροής και όχι τόσο η παρουσία των φυτών. Ωστόσο, τα φυτά μπορούν να συνεισφέρουν δευτερευόντως, παρέχοντας οργανικό άνθρακα από τις ρίζες τους, ο οποίος είναι απαραίτητος ως πηγή ενέργειας για τους απονιτροποιητικούς μικροοργανισμούς (Vymazal, 2007). Η επιλογή του υλικού πλήρωσης έπαιξε επίσης ρόλο, καθώς οι μονάδες με αδρανή υλικά (P και PB) είχαν τη χειρότερη απόδοση, μιας και παρατηρήθηκε ότι η μέση συγκέντρωση στη μονάδα PB (1.91 ± 0.73) βρέθηκε παραπάνω από την αραιωμένη εισροή. Αυτό δείχνει ότι το RHDPE και το biochar σαν πληρωτικά υλικά, δεν ευνόησαν τη διαδικασία της απονιτροποίησης.

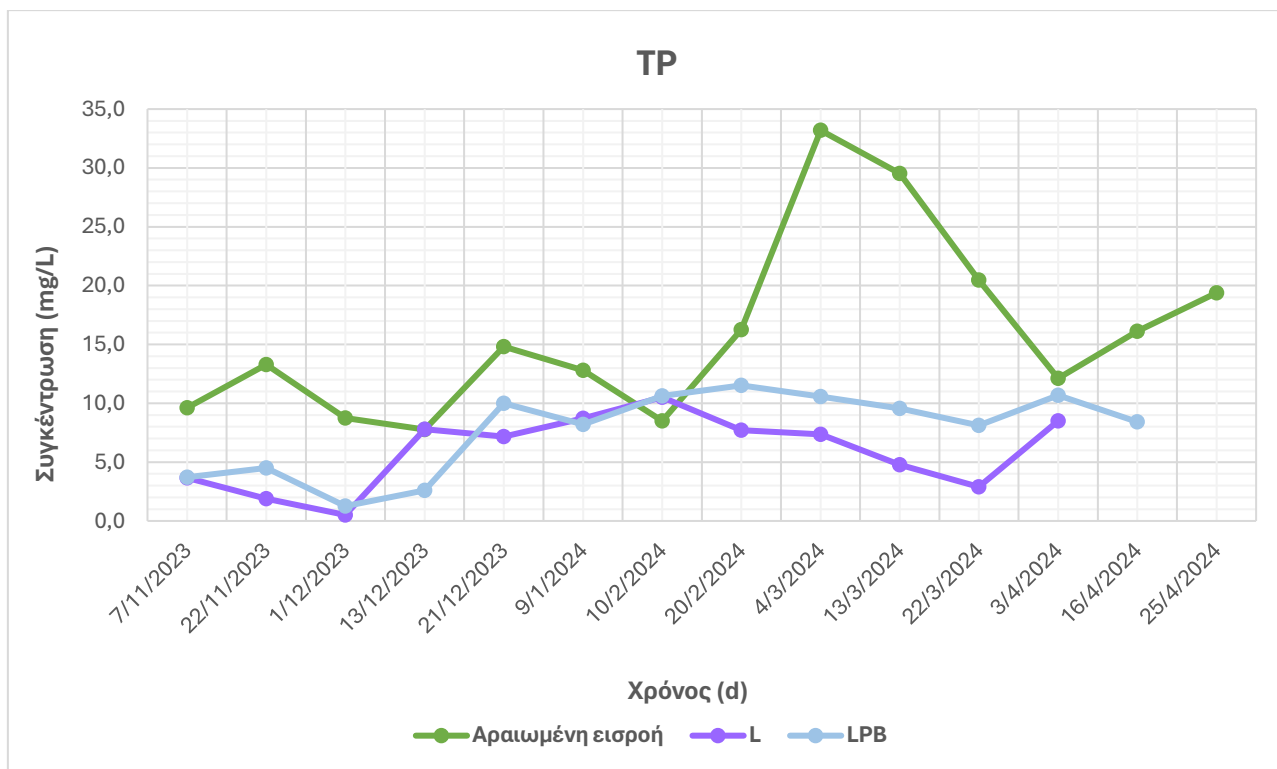
4.2.2.9 Ολικός φώσφορος (TP)

Πίνακας 13. Αποτελέσματα μετρήσεων TP αραιωμένης εισροής και εκροών

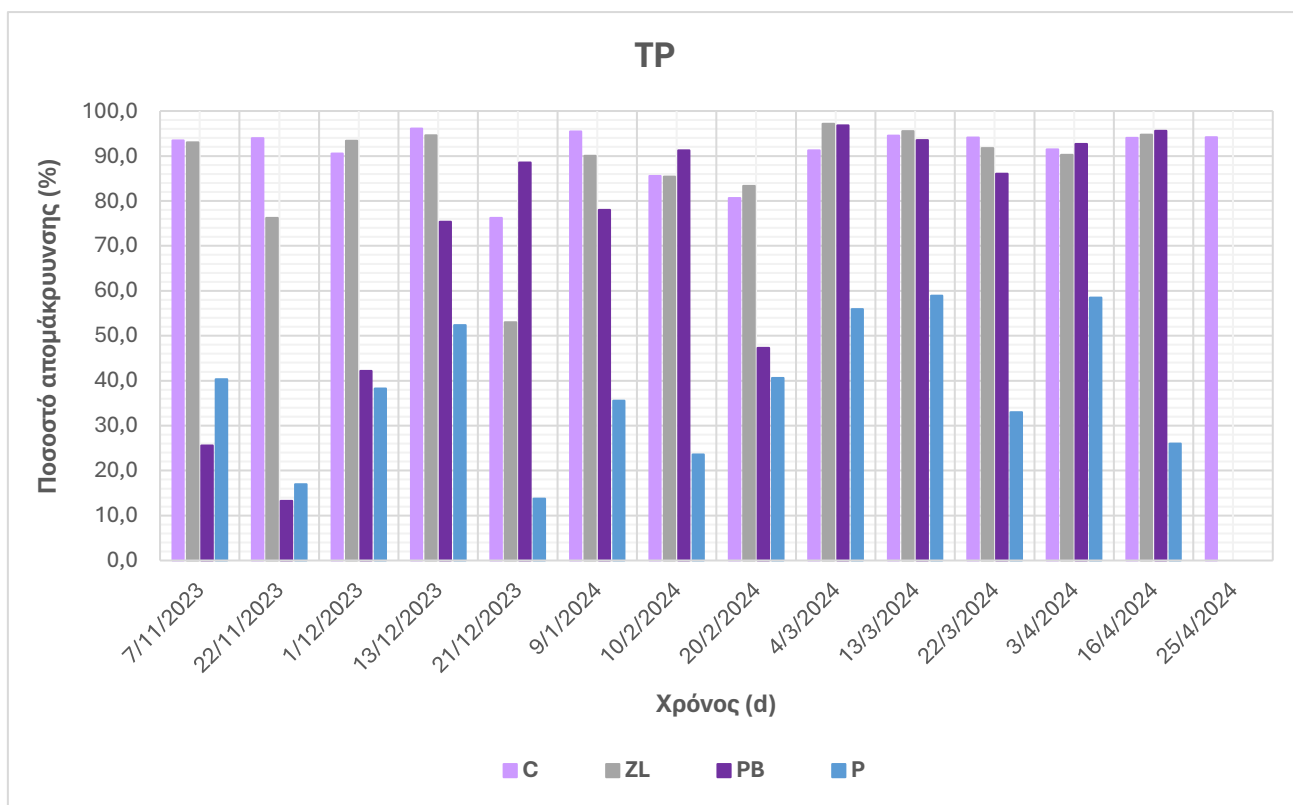
TP	Μέση τιμή συγκέντρωσης (mg/L)	Εύρος τιμών συγκεντρώσεων (mg/L)	Μέση τιμή απομάκρυνσης (%)	Εύρος τιμών απομάκρυνσης (%)
Αραιωμένη εισροή	15.9 ± 7.65	[7.77 – 33.19]	-	-
C	1.2 ± 0.57	[0.34 – 1.85]	90.8 ± 5.95	[76.2 – 96.1]
ZL	1.42 ± 0.86	[0.47 – 3.65]	87.6 ± 11.89	[53 – 97.2]
PB	9.66 ± 4.8	[3.21 – 17.49]	71.2 ± 28.93	[13.3 – 96.8]
P	11.07 ± 4.14	[4.17 – 19.71]	38 ± 15.29	[13.8 – 58.9]
L	5.96 ± 3.12	[0.51 – 10.51]	61.9 ± 21.08	[15.9 – 94.2]
LPB	7.68 ± 3.46	[1.26 – 11.52]	51.5 ± 18.4	[21.9 – 85.6]



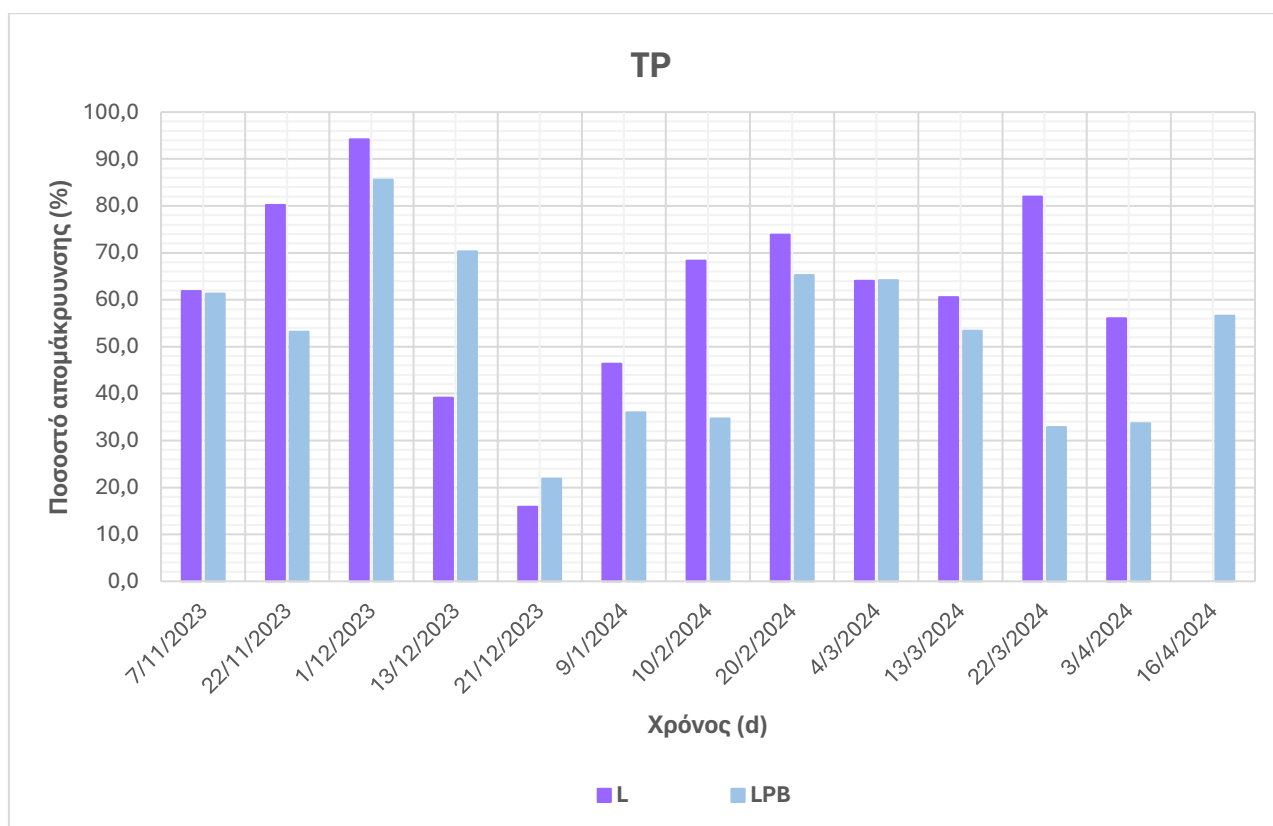
Διάγραμμα 17. Συγκεντρώσεις TP αραιωμένης εισροής και εκροών C, ZL, PB & P



Διάγραμμα 18. Συγκεντρώσεις TP αραιωμένης εισροής και εκροών L & LPB



Διάγραμμα 19. Ποσοστά απομακρύνσεων TP για τις μονάδες C, ZL, PB & P



Διάγραμμα 20. Ποσοστά απομακρύνσεων TP για τις μονάδες L & LPB

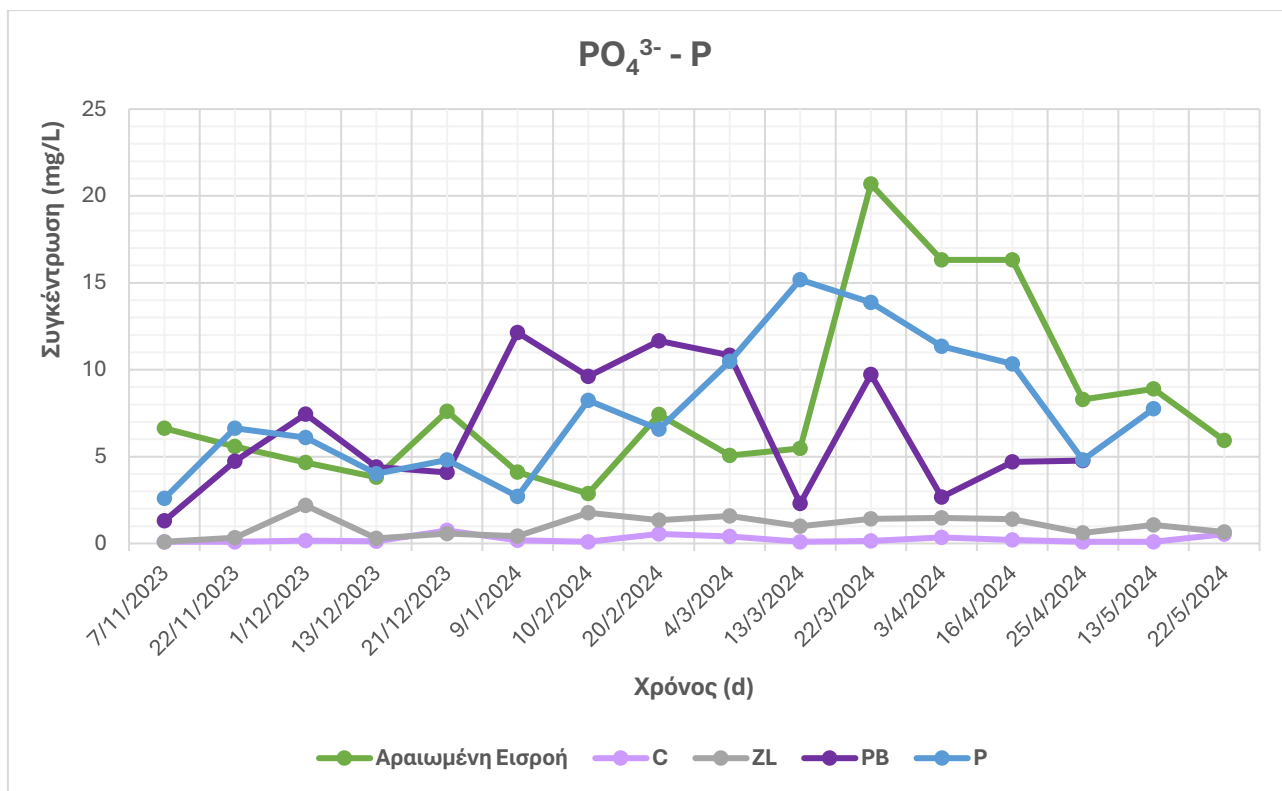
Η απομάκρυνση του ολικού φωσφόρου στα συστήματα τεχνητών υγροβιότοπων επιτυγχάνεται κυρίως μέσω φυσικοχημικών διεργασιών, όπως η προσρόφηση και η καθίζηση, που λαμβάνουν χώρα μέσα στο υλικό πλήρωσης (Yang et al., 2019). Η αποτελεσματικότητα αυτών των διεργασιών εξαρτάται άμεσα από τις χημικές ιδιότητες του υποστρώματος που χρησιμοποιείται (Vohla et al., 2011). Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ότι οι μονάδες οριζόντιας ροής C & ZL παρουσίασαν την καλύτερη απόδοση, καθώς η μονάδα C είχε ποσοστό απομάκρυνσης ίσο με $90.8 \pm 5.95\%$. Αυτή η υψηλή απόδοση αποδίδεται στην χημική σύσταση των πληρωτικών υλικών αυτών, τα οποία είναι πλούσια σε οξείδια του ασβεστίου (Ca), του σιδήρου (Fe) και του αργιλίου (Al), στοιχεία που δημιουργούν ενεργές θέσεις για τη δέσμευση του φωσφόρου μέσω προσρόφησης και καθίζησης (Mliḥ et al., 2020). Ειδικότερα, το ασβέστιο έχει αποδειχθεί ότι έχει την ισχυρότερη συσχέτιση με την ικανότητα προσρόφησης φωσφόρου, υποδηλώνοντας ότι η καθίζηση με τη μορφή φωσφορικού ασβεστίου είναι ένας κυρίαρχος μηχανισμός απομάκρυνσης (Zhu et al., 1997). Αντίθετα, οι μονάδες P και PB παρουσίασαν σημαντικά χαμηλότερη απόδοση, καθώς το πλαστικό δεν διαθέτει τις απαραίτητες χημικές ιδιότητες για την αποτελεσματική δέσμευση του φωσφόρου. Συγκρίνοντας τη μονάδα ZL (με βλάστηση) με την μονάδα C (χωρίς βλάστηση), παρατηρείται ότι η απόδοσή τους στην απομάκρυνση του φωσφόρου είναι παρόμοια. Από αυτό συμπεραίνεται ότι η παρουσία των φυτών έχει δευτερεύοντα ρόλο στην

απομάκρυνση του φωσφόρου σε σύγκριση με το υπόστρωμα, καθώς η πρόσληψη από τα φυτά αποτελεί έναν μηχανισμό που μπορεί να οδηγήσει σε επαναπελευθέρωση του φωσφόρου κατά την αποσύνθεση της βιομάζας (Mlih et al., 2020).

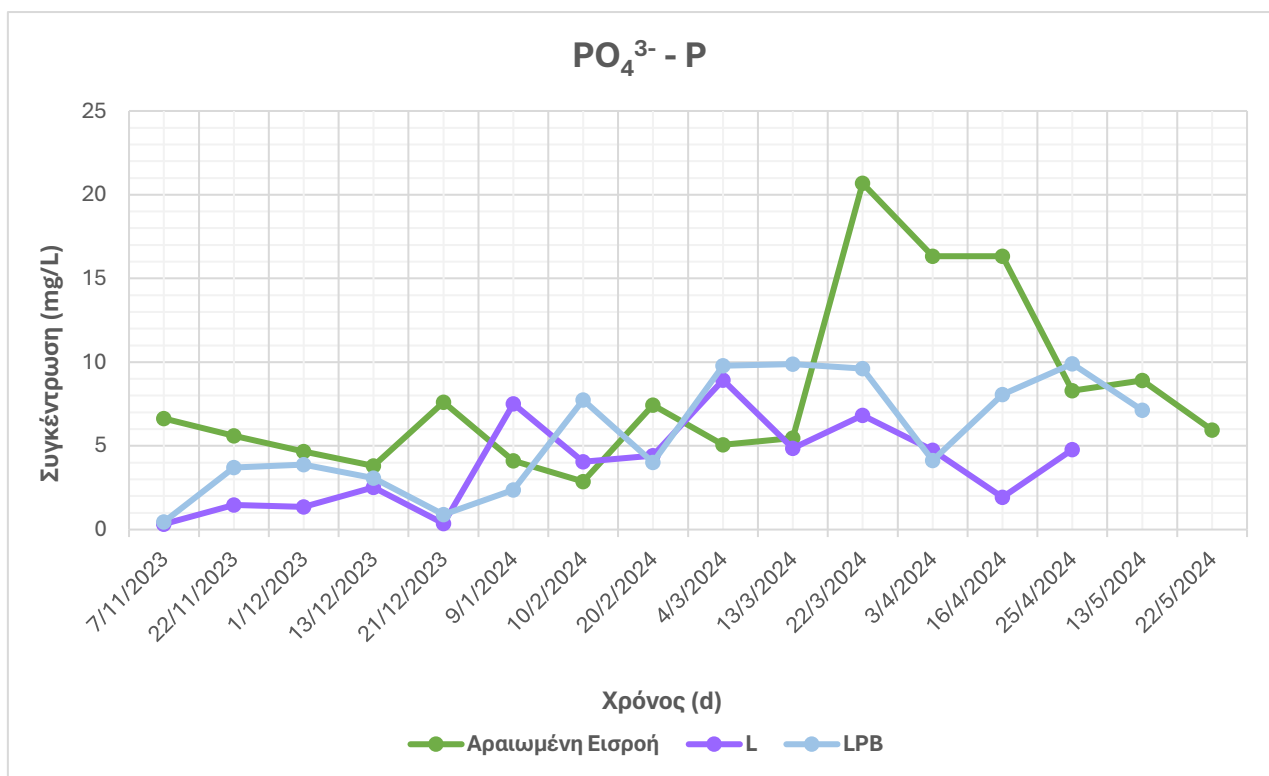
4.2.2.10 Φωσφορικά (PO_4^{3-} - P)

Πίνακας 14. Αποτελέσματα μετρήσεων PO_4^{3-} - P αραιωμένης εισροής και εκροών

TP	Μέση τιμή συγκέντρωσης (mg/L)	Εύρος τιμών συγκεντρώσεων (mg/L)	Μέση τιμή απομάκρυνσης (%)	Εύρος τιμών απομάκρυνσης (%)
Αραιωμένη εισροή	8.11 ± 5.15	[2.87 – 20.68]	-	-
C	0.25 ± 0.21	[0.1 – 0.75]	95.4 ± 6.0	[80.3 – 99.4]
ZL	1.01 ± 0.61	[0.1 – 2.19]	83.2 ± 14.8	[53.0 – 99.0]
PB	6.46 ± 3.69	[1.3 – 12.14]	48.5 ± 22.2	[15.2 – 88.8]
P	7.70 ± 3.86	[2.59 – 15.18]	39.6 ± 14.7	[12.9 – 68.2]
L	3.86 ± 2.67	[0.33 – 8.93]	63.9 ± 21.7	[13.0 – 96.7]
LPB	5.64 ± 3.38	[0.46 – 9.90]	53.4 ± 19.7	[19.9 – 95.5]



Διάγραμμα 21. Συγκεντρώσεις PO₄³⁻ - P αραιωμένης εισροής και εκροών C, ZL, PB & P



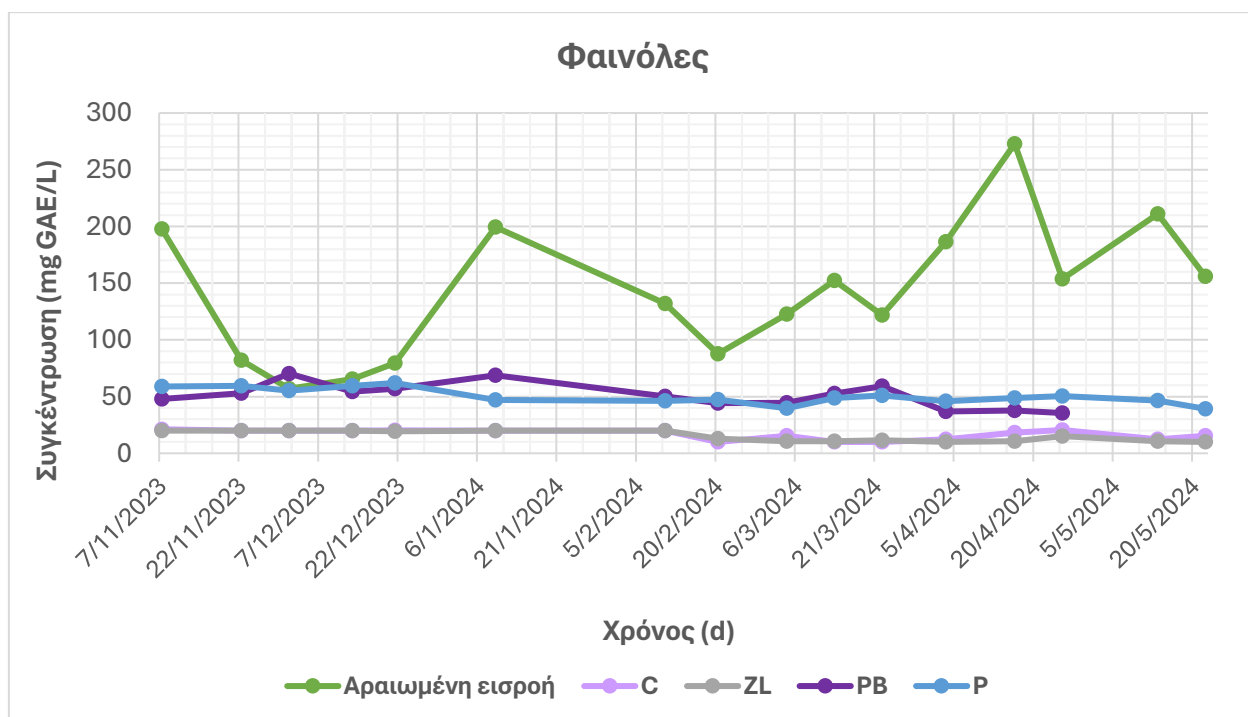
Διάγραμμα 22. Συγκεντρώσεις PO₄³⁻ - P αραιωμένης εισροής και εκροών L & LPB

Σύμφωνα με τον πίνακα 14, τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ότι τα υλικά πλήρωσης, όπως ο ζεόλιθος και η LECA είναι εξαιρετικά αποτελεσματικά στην απομάκρυνση των φωσφορικών. Αυτό φαίνεται καθαρά στην απόδοση των μονάδων C και ZL, οι οποίες πέτυχαν εντυπωσιακά ποσοστά απομάκρυνσης που έφτασαν το 95%. Αντίθετα, οι μονάδες P και PB είχαν πολύ χαμηλότερη απόδοση, με την απομάκρυνση να κυμαίνεται μόλις στο 39-49%. Η μεγάλη αυτή διαφορά οφείλεται αποκλειστικά στα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν. Στις μονάδες C και ZL, ο ζεόλιθος δεσμεύει τα φωσφορικά ιόντα μέσω της ικανότητάς του για ιοντοανταλλαγή, ενώ η LECA προσφέρει μια κατάλληλη επιφάνεια για την ανάπτυξη μικροοργανισμών που βοηθούν στην απομάκρυνση. Παρατηρήθηκε ότι και οι δύο αυτές μονάδες είχαν παρόμοια συμπεριφορά. Από την άλλη πλευρά, το RHDPE που χρησιμοποιήθηκε στις μονάδες P και PB είναι ένα αδρανές υλικό που δεν βοηθά στην απομάκρυνση του φωσφόρου. Παρόλο που το biochar έχει κάποια ικανότητα προσρόφησης, αυτή είναι πολύ μικρότερη σε σύγκριση με την εξειδικευμένη δράση του ζεόλιθου. Όσον αφορά τις μονάδες κατακόρυφης ροής, L και LPB, αποδοτικότερη φάνηκε να είναι η μονάδα που περιέχει 100% LECA. Αυτό πιθανόν οφείλεται στη σύνθεση των μονάδων με τα πληρωτικά υλικά, καθώς η LPB περιέχει σε μεγαλύτερο ποσοστό ανακυκλωμένο πλαστικό RHDPE και μικρότερο ποσοστό διογκωμένης αργίλου, πράγμα που σημαίνει ότι η LECA διαθέτει ισχυρότερους μηχανισμούς απομάκρυνσης των φωσφορικών σε σχέση με το πλαστικό και το biochar. Τέλος, είναι λογικό η απομάκρυνση των φωσφορικών ιόντων να ακολουθεί την ίδια πορεία με την απομάκρυνση του ολικού φωσφόρου, καθώς τα φωσφορικά αποτελούν τη βασική μορφή με την οποία ο φώσφορος υπάρχει στα συγκεκριμένα απόβλητα.

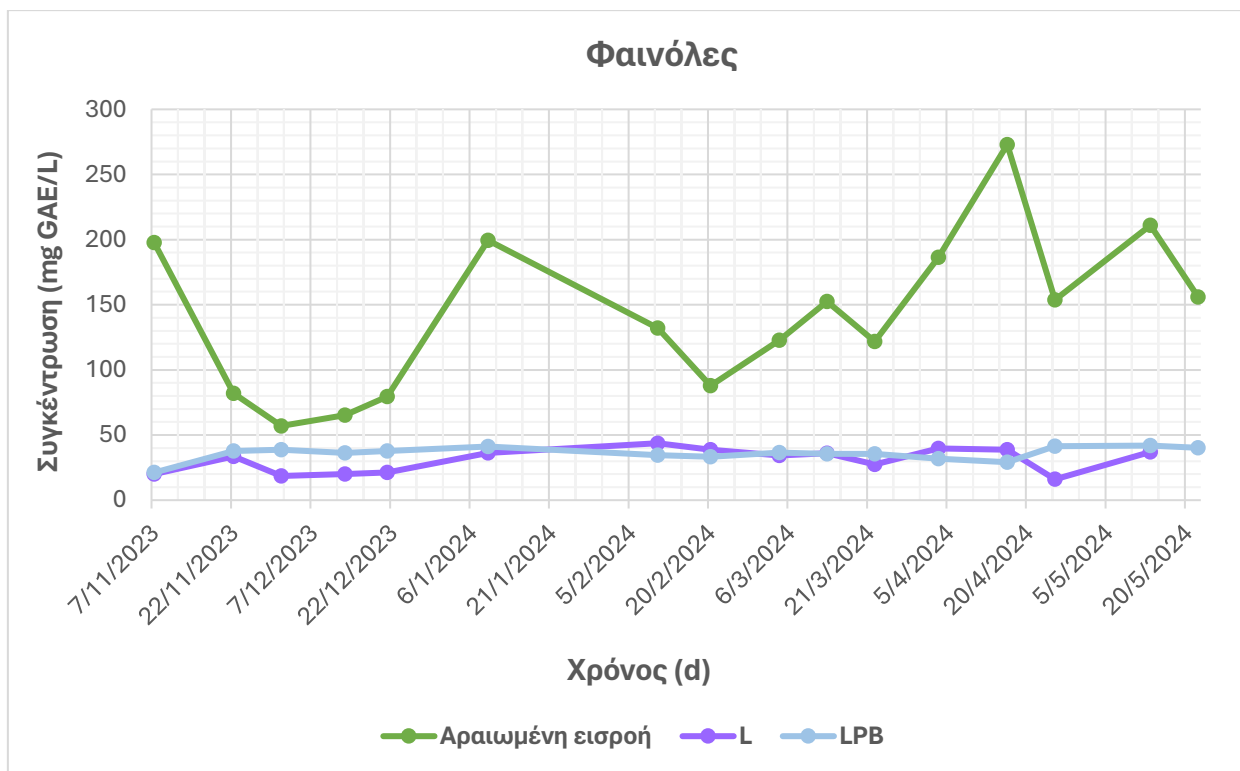
4.2.2.11 Ολικές Φαινόλες

Πίνακας 15. Αποτελέσματα μετρήσεων φαινολών αραιωμένης εισροής και εκροών

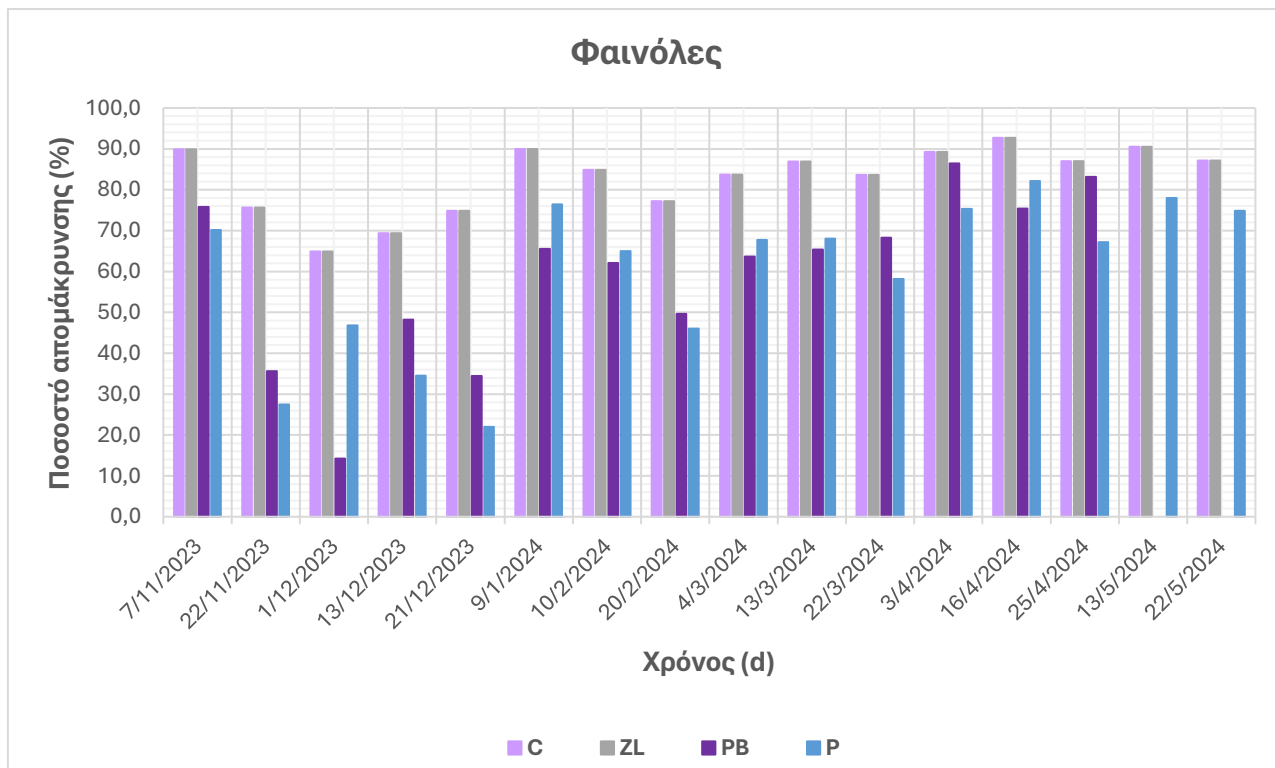
Φαινόλες	Μέση τιμή συγκέντρωσης (mg/L)	Εύρος τιμών συγκεντρώσεων (mg/L)	Μέση τιμή απομάκρυνσης (%)	Εύρος τιμών απομάκρυνσης (%)
Αραιωμένη εισροή	142.4 ± 60.6	[57– 272.9]	-	-
C	16.6 ± 4.3	[10 – 21.2]	83 ± 8.2	[64.9 – 92.7]
ZL	15.1 ± 4.6	[10 – 20]	83 ± 8.2	[64.9 – 92.7]
PB	50.9 ± 10.8	[35.5 – 70.3]	59.1 ± 20.5	[14.3 – 86.5]
P	50.4 ± 6.9	[39.2 – 62]	60 ± 18.9	[22 – 82.2]
L	30.7 ± 9.2	[16 – 43.7]	76.7 ± 9.6	[55.9 – 89.9]
LPB	35.8 ± 5.3	[21.2 – 41.9]	69.1 ± 16.1	[32.2 – 89.3]



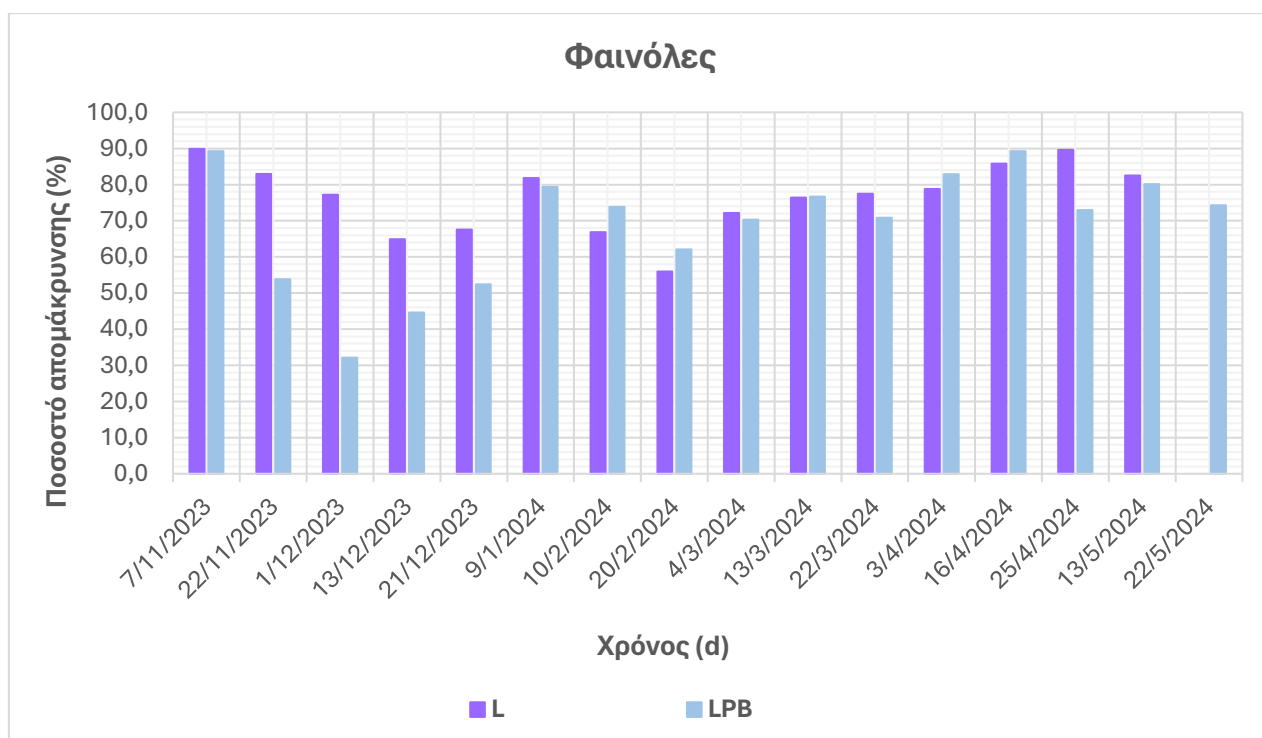
Διάγραμμα 23. Συγκεντρώσεις φαινολών αραιωμένης εισροής και εκροών C, ZL, PB & P



Διάγραμμα 24. Συγκεντρώσεις φαινολών αραιωμένης εισροής και εκροών L & LPB



Διάγραμμα 25. Ποσοστά απομακρύνσεων φαινολών για τις μονάδες C, ZL, PB & P



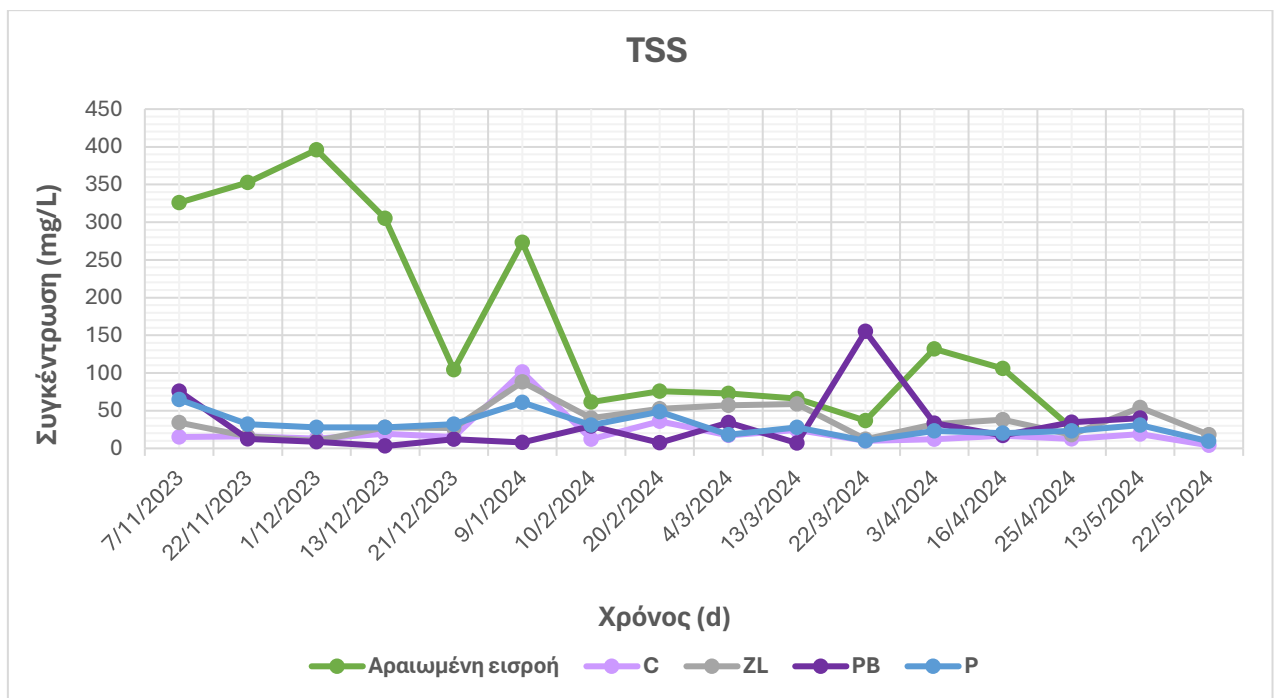
Διάγραμμα 26. Ποσοστά απομακρύνσεων φαινολών για τις μονάδες L & LPB

Η απομάκρυνση των ολικών φαινολών, που αποτελούν έναν από τους πιο τοξικούς ρύπους στα απόβλητα ελαιολιβεύου, παρουσίασε σημαντικές διακυμάνσεις, με τις οριζόντιες μονάδες C (83%) και ZL (83%) να έχουν την ίδια σταθερή και καλύτερη απόδοση. Η κύρια διεργασία που λαμβάνει χώρα και μπορεί να εξηγήσει αυτή την απομάκρυνση είναι η μικροβιακή αποικοδόμηση, καθώς οι φαινόλες αποτελούν πηγή άνθρακα για κάποιους μικροοργανισμούς που αναπτύσσουν βιοφίλμ πάνω στο υπόστρωμα και τις ρίζες των φυτών (Stefanakis et al., 2014). Η σύγκριση της μονάδας ZL (με βλάστηση) με την C (χωρίς βλάστηση) δείχνει παρόμοια συμπεριφορά, ωστόσο η παρουσία φυτών θεωρείται γενικά ευεργετική, καθώς η μεταφορά οξυγόνου στο ριζικό σύστημα ενισχύει την αερόβια μικροβιακή δραστηριότητα, η οποία είναι και ο κύριος μηχανισμός αποικοδόμησης των φαινολών (Herounim et al., 2011). Επιπλέον, οι C και ZL ήταν αποδοτικότερες έναντι των P και PB, των οποίων η απόδοση ήταν χαμηλότερη και πιο ασταθής. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι πορώδη υλικά όπως ο ζεόλιθος και η LECA παρέχουν αρκετά μεγαλύτερη ειδική επιφάνεια για την ανάπτυξη του βιοφίλμ και για την προσρόφηση των φαινολικών ενώσεων, σε σύγκριση με το σχετικά αδρανές πλαστικό (Akratos & Tsihrintzis, 2007). Η προσθήκη βιοεξανθρακώματος (μονάδες PB και LPB) δε φάνηκε να βελτίωσε την απόδοση σε σχέση με το εξ' ολοκλήρου πλαστικό υπόστρωμα, όπως θα ήταν αναμενόμενο, μιας και το biochar λόγω της υψηλής προσροφητικής του ικανότητας θα έπρεπε να δώσει καλύτερη απόδοση σε σχέση με τη μονάδα με σκέτο RHDPE (Stefanakis et al., 2014).

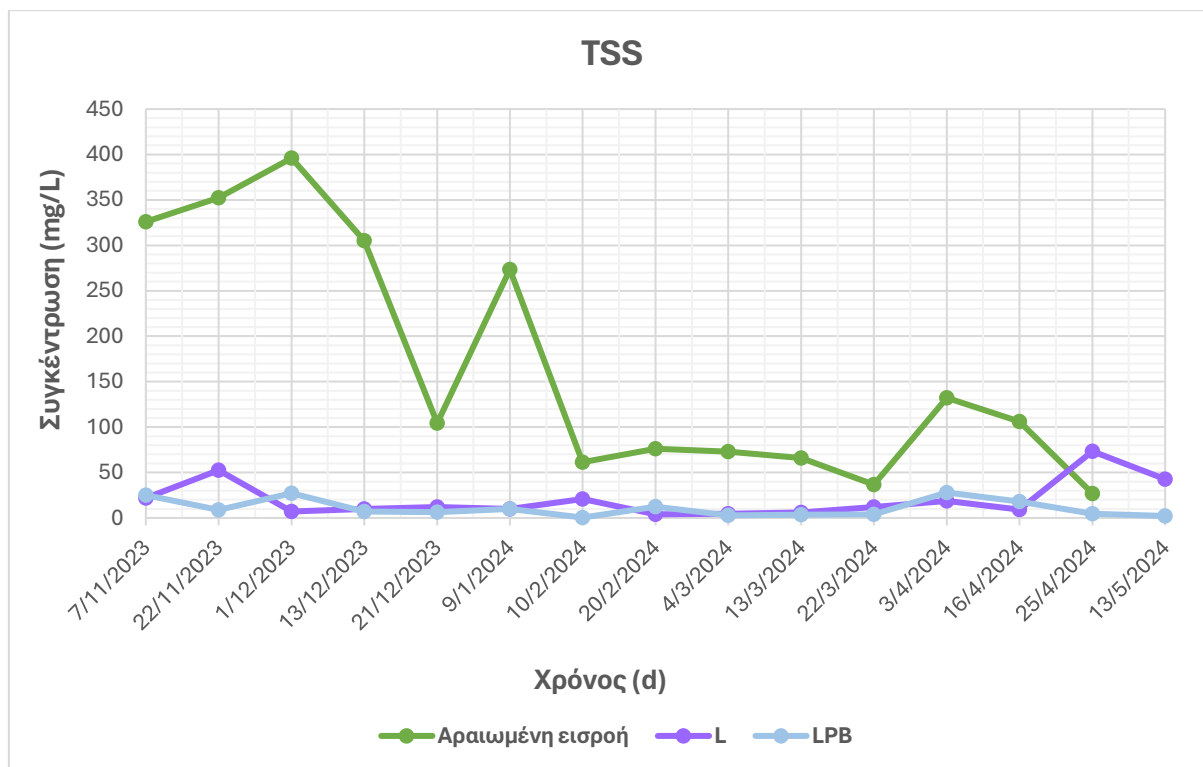
4.2.2.12 Ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS)

Πίνακας 16. Αποτελέσματα μετρήσεων TSS αραιωμένης εισροής και εκροών

TSS	Εύρος τιμών συγκεντρώσεων (mg/L)	Μέση τιμή απομάκρυνσης (%)	Εύρος τιμών απομάκρυνσης (%)
Αραιωμένη εισροή	[27 – 396]	-	-
C	[4 – 101]	79.6 ± 25.9	[2.7 – 99.0]
ZL	[10 – 88]	73.2 ± 25.0	[21.8 – 98.1]
PB	[3 – 155]	76.7 ± 28.1	[5.0 – 99.2]
P	[9 -65]	71.2 ± 27.5	[19.0 – 98.8]
L	[4 – 73]	83.2 ± 17.0	[44.4 – 99.0]
LPB	[0.43 – 28]	87.8 ± 15.6	[50.9 – 99.8]



Διάγραμμα 27. Συγκεντρώσεις TSS αραιωμένης εισροής και εκροών C, ZL, PB & P



Διάγραμμα 28. Συγκεντρώσεις TSS αραιωμένης εισροής και εκροών L & LPB

Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα, παρατηρήθηκε αρκετά υψηλή απομάκρυνση των ολικών αιωρούμενων στερεών (TSS) σε όλες τις πιλοτικές μονάδες πράγμα που οφείλεται κατά κύριο λόγο σε φυσικές διεργασίες, όπως η διήθηση και η καθίζηση (Vymazal, 2005). Καθώς το νερό ρέει με χαμηλή ταχύτητα μέσα από το πορώδες υπόστρωμα, τα στερεά παγιδεύονται μηχανικά στους πόρους του υλικού πλήρωσης ή προσκολλώνται σε αυτό. Συγκρίνοντας τις μονάδες, τα υλικά πλήρωσης φαίνεται να αποτελούν τον σημαντικότερο παράγοντα στην απομάκρυνση των TSS, αφού ακόμη και η μονάδα C (χωρίς βλάστηση) έδειξε σημαντικά αποτελέσματα, μιας και η σημασία του υποστρώματος αποτελεί το κύριο μέσο για τη φυσική κατακράτηση των στερεών. Η παρουσία βλάστησης, ωστόσο, ενισχύει τη διαδικασία, καθώς το πυκνό ριζικό σύστημα επιβραδύνει τη ροή του νερού και παρέχει επιπλέον επιφάνεια για την συγκράτηση των στερεών (Stefanakis et al., 2014). Την καλύτερη απόδοση φαίνεται να παρουσίασε η μονάδα κάθετης ροής LPB, με το εύρος συγκεντρώσεων στην εκροή, να είναι το χαμηλότερο. Αυτό αποδίδεται στο γεγονός ότι η κατακόρυφη διήθηση μέσω της βαρύτητας μεγιστοποιεί τη φυσική κατακράτηση των στερεών σε ολόκληρο το βάθος της κλίνης, καθιστώντας τα συστήματα αυτά ιδιαίτερα αποτελεσματικά για την απομάκρυνση των TSS (Stefanakis et al., 2014).

4.3 Φυτική Βιομάζα

Η φυτική βιομάζα, αξιολογήθηκε για τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας. Συγκεκριμένα, συλλέχθηκαν δείγματα κορμών και φύλλων και υποβλήθηκαν σε τεμαχισμό για να εξεταστεί η συνεισφορά τους στη συσσώρευση μετάλλων, φωσφόρου και αζώτου.

Πίνακας 17. Αποτελέσματα ανίχνευσης μετάλλων και μεταλλοειδών στη φυτική βιομάζα

Unit	Φύλλα					Κορμοί				
	ZL _φ	PB _φ	P _φ	L _φ	LPB _φ	ZL _κ	PB _κ	P _κ	L _κ	LPB _κ
Zn ($\frac{\text{mg}}{\text{kg}}$)	43.45	112.69	57.75	43.94	33.26	36.26	49.51	73.26	40.81	34.24
Cu ($\frac{\text{mg}}{\text{kg}}$)	2.29	4.82	4.30	2.39	1.73	2.87	3.59	3.22	2.14	2.84
Ni ($\frac{\text{mg}}{\text{kg}}$)	0.57	1.70	0.65	0.70	0.67	0.82	1.09	0.67	0.76	1.78
Fe ($\frac{\text{mg}}{\text{kg}}$)	199.81	184.28	246.26	153.48	137.46	147.73	123.16	136.16	97.23	97.78
Mn ($\frac{\text{mg}}{\text{kg}}$)	396.29	67.37	127.11	119.34	144.63	198.14	10.34	48.93	77.41	46.64
Cr ($\frac{\text{mg}}{\text{kg}}$)	-	-	-	-	-	0.28	-	-	-	2.09
Pb ($\frac{\text{mg}}{\text{kg}}$)	-	0.72	6.71	0.79	-	-	-	0.48	7.76	-
B ($\frac{\text{mg}}{\text{kg}}$)	4.07	2.79	6.90	5.25	3.99	1.90	0.23	0.24	0.61	-

Na $\left(\frac{\text{mg}}{\text{kg}}\right)$	0.60	0.67	1.35	0.90	0.93	0.44	0.40	0.61	0.58	0.44
Mg $\left(\frac{\text{mg}}{\text{kg}}\right)$	2.72	1.45	2.70	2.09	3.05	1.84	1.50	1.33	1.24	0.95
K $\left(\frac{\text{mg}}{\text{kg}}\right)$	4.45	4.63	5.41	2.91	6.23	5.67	4.46	7.35	4.40	6.68
Ca $\left(\frac{\text{mg}}{\text{kg}}\right)$	7.48	3.77	5.40	4.18	5.48	1.87	0.38	1.31	1.66	0.77

Πίνακας 18. Αποτελέσματα ανίχνευσης ολικού φωσφόρου στη φυτική βιομάζα

Πρόσληψη TP από τη φυτική βιομάζα	Φύλλα					Κορμοί				
	ZL _φ	PB _φ	P _φ	L _φ	LPB _φ	ZL _κ	PB _κ	P _κ	L _κ	LPB _κ
$\left(\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right)$	8.31	38.17	2.87	5.66	19.72	31.60	32.16	46.60	8.91	9.40

Πίνακας 19. Αποτελέσματα ανίχνευσης ολικού αζώτου στη φυτική βιομάζα

Πρόσληψη TN από τη φυτική βιομάζα	Φύλλα					Κορμοί				
	ZL _φ	PB _φ	P _φ	L _φ	LPB _φ	ZL _κ	PB _κ	P _κ	L _κ	LPB _κ
$\left(\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right)$	11	68	24	48	5	39	29	18	40	72

4.3.1 Μέταλλα & Μεταλλοειδή

Στο συγκεκριμένο πείραμα, τα κύρια στοιχεία που εντοπίστηκαν στις υψηλότερες συγκεντρώσεις στα φύλλα και τον κορμό των καλαμιών ήταν το μαγγάνιο (Mn), ο σίδηρος (Fe), ο ψευδάργυρος (Zn), το κάλιο (K) και το ασβέστιο (Ca). Το πιο αξιοσημείωτο αποτέλεσμα ήταν η αρκετά υψηλή συγκέντρωση μαγγανίου, η οποία βρέθηκε ίση με 396.29 mg/kg και παρατηρήθηκε στα φύλλα της μονάδας ZL, γεγονός που υποδεικνύει ότι ο συνδυασμός ζεόλιθου και LECA ως υποστρώμα ενισχύει τη βιοδιαθεσιμότητα και την πρόσληψη του συγκεκριμένου μετάλλου. Επιπλέον, η επίδραση του υποστρώματος ήταν εμφανής και στις άλλες μονάδες, καθώς η μονάδα PB έδειξε την υψηλότερη συσσώρευση ψευδαργύρου (Zn), ενώ η μονάδα P εμφάνισε την υψηλότερη πρόσληψη μόλυβδου (Pb). Ως προς την κατανομή εντός των φυτικών ιστών, παρατηρήθηκε μια γενική τάση υψηλότερης συσσώρευσης στα φύλλα των καλαμιών σε σύγκριση με τους κορμούς.

4.3.2 Ολικός φώσφορος (TP)

Ο ρόλος της φυτικής βιομάζας στην απομάκρυνση του φωσφόρου είναι η άμεση πρόσληψη και αποθήκευσή του στους φυτικούς ιστούς. Η συγκομιδή της βιομάζας οδηγεί στην οριστική απομάκρυνση του συσσωρευμένου φωσφόρου από το υδάτινο σύστημα, με τη φυτική πρόσληψη να μπορεί να αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό ποσοστό της συνολικής απομάκρυνσης του φωσφόρου στον υδροβιότοπο. Στα φυτά με διαφοροποιημένους ιστούς, οι υψηλότερες συγκεντρώσεις μακροθρεπτικών στοιχείων, όπως ο φώσφορος, παρατηρούνται στα φύλλα σε σύγκριση με τους βλαστούς. Αυτή η κατανομή οφείλεται στον κρίσιμο φυσιολογικό ρόλο των φύλλων ως κέντρων μεταβολικής δραστηριότητας, όπου ο φώσφορος είναι απαραίτητος για τη μεταφορά ενέργειας (π.χ. ATP) (Tanner, 1996). Έρευνες έχουν δείξει ότι ο φώσφορος, όπως και το άζωτο, συσσωρεύεται κυρίως στους υπέργειους ιστούς (Wdowczyk & Szymańska-Pulikowska, 2023). Κατά τη διάρκεια της αυξητικής περιόδου, θρεπτικά στοιχεία μετακινούνται από το ριζικό σύστημα προς την υπέργεια βιομάζα για να υποστηρίξουν την ενεργό ανάπτυξη (Nasso et al., 2013).

Σχετικά με την απομάκρυνση του ολικού φωσφόρου (TP), η φυτική βιομάζα έπαιξε μεγάλο ρόλο και η αποτελεσματικότητα της οφείλεται κυρίως στα πληρωτικά υλικά της κάθε πιλοτικής μονάδας. Ειδικότερα, η υψηλότερη πρόσληψη φωσφόρου καταγράφηκε στις μονάδες που περιείχαν RHDPE και biochar. Η μονάδα P παρουσίασε υψηλή συσσώρευση στους κορμούς, ενώ η μονάδα PB παρουσίασε υψηλή πρόσληψη τόσο στα φύλλα όσο και στους κορμούς. Συμπεραίνεται, ότι τα συγκεκριμένα υλικά του υποστρώματος διευκολύνουν την απορρόφηση του φωσφόρου από το ριζικό σύστημα των καλαμιών, ενισχύοντας έτσι τη συνολική απομάκρυνση του συγκεκριμένου θρεπτικού από τα απόβλητα.

4.3.3 Ολικό άζωτο (TN)

Ο ρόλος της φυτικής βιομάζας στην απομάκρυνση του αζώτου είναι διπλός. Πρώτον, περιλαμβάνει την άμεση πρόσληψη και αφομοίωση του αζώτου στους φυτικούς ιστούς, το οποίο στη συνέχεια απομακρύνεται με τη συγκομιδή. Δεύτερον, τα φυτά συμβάλλουν έμμεσα παρέχοντας επιφάνειες για την ανάπτυξη μικροοργανισμών και απελευθερώνοντας οξυγόνο στο ριζικό σύστημα, το οποίο ενισχύει τις μικροβιακές διεργασίες της νιτροποίησης και της απονιτροποίησης. Αντίστοιχα με τον φώσφορο, οι υψηλότερες συγκεντρώσεις ολικού αζώτου εντοπίζονται στα φύλλα σε σχέση με τους βλαστούς. Τα φύλλα αποτελούν τις κύριες θέσεις φωτοσύνθεσης και απαιτούν υψηλές συγκεντρώσεις αζώτου για τη σύνθεση ενζύμων, χλωροφύλλης και άλλων πρωτεϊνών που είναι απαραίτητες για τις μεταβολικές διεργασίες (Tanner, 1996). Αυτή η κατανομή είναι επίσης αποτέλεσμα του εποχιακού κύκλου των θρεπτικών, όπου το άζωτο μεταφέρεται από τα υπόγεια μέρη προς τα υπέργεια κατά την περίοδο της έντονης ανάπτυξης (Nasso et al., 2013).

Η συμβολή του βιοεξανθρακώματος στην απομάκρυνση του ολικού αζώτου (TN) μέσω της πρόσληψης των φυτών ήταν ιδιαίτερα σημαντική. Οι πιλοτικές μονάδες που περιλάμβαναν biochar στο υπόστρωμα τους, δηλαδή η PB στα οριζόντια συστήματα ροής και η LPB στα κάθετα συστήματα ροής, παρουσίασαν υψηλότερη συσσώρευση αζώτου σε σύγκριση με όλες τις υπόλοιπες μονάδες. Αξίζει να σημειωθεί ότι η υψηλότερη τιμή πρόσληψης καταγράφηκε στον κορμό της μονάδας LPB. Συμπεραίνεται ότι ο συνδυασμός του biochar με τη φυτική βιομάζα, μεγιστοποιεί τη πρόσληψη του αζώτου από τα καλάρια.

Κεφάλαιο 5°. Συμπεράσματα & Μελλοντικές Προτάσεις

5.1 Συμπεράσματα

Από τη συνολική ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων, προκύπτει ότι τα πιλοτικά συστήματα ΤΥ έδειξαν σημαντική ικανότητα στην επεξεργασία των ΥΑΕ, με την απόδοση ωστόσο να διαφοροποιείται αισθητά ανάλογα με τον τύπο ροής και, κυρίως, τη σύνθεση του υλικού πλήρωσης. Οι οριζόντιες μονάδες που περιείχαν συνδυασμό ζεόλιθου και διογκωμένης αργίλου (C και ZL) αναδείχθηκαν ως οι πλέον αποτελεσματικές, επιτυγχάνοντας εξαιρετικά υψηλά ποσοστά απομάκρυνσης σε ένα ευρύ φάσμα παραμέτρων. Συγκεκριμένα, οι μονάδες αυτές πέτυχαν μέση απομάκρυνση του οργανικού φορτίου που ξεπερνούσε το 90% για το COD και το 97% για το BOD₅, ενώ ταυτόχρονα ήταν εξαιρετικά αποδοτικές στην απομάκρυνση του ολικού φωσφόρου (TP) και των φωσφορικών (PO₄³⁻), με ποσοστά που άγγιζαν το 91% και 95% αντίστοιχα, καθώς και των ολικών φαινολών με απομάκρυνση 83%. Ένα κρίσιμο συμπέρασμα είναι ότι η απόδοση της μονάδας C (χωρίς βλάστηση) ήταν σχεδόν παρόμοια με αυτή της φυτεμένης ZL, γεγονός που υποδεικνύει ότι το ίδιο το υπόστρωμα αποτέλεσε τον κυρίαρχο παράγοντα καθαρισμού και απομάκρυνσης, υπερτερώντας της συμβολής της βλάστησης. Αντιθέτως, οι οριζόντιες μονάδες που βασίστηκαν στο χημικά αδρανές RHDPE (P και PB) παρουσίασαν σημαντικά χαμηλότερη απόδοση, ιδιαίτερα στην απομάκρυνση του φωσφόρου (38-71%) και των φαινολών (59-60%), επιβεβαιώνοντας την καθοριστική σημασία των φυσικοχημικών ιδιοτήτων του υποστρώματος. Οι μονάδες κατακόρυφης ροής (L και LPB) παρουσίασαν επίσης ικανοποιητική απόδοση, κυρίως στη μείωση του οργανικού φορτίου (COD 82%, BOD₅ >95%), αλλά ήταν λιγότερο αποτελεσματικές στην απομάκρυνση των θρεπτικών. Όσον αφορά τις υπόλοιπες παραμέτρους, όλες οι μονάδες κατάφεραν να εξουδετερώσουν επιτυχώς το αρχικά όξινο pH της εισροής, σταθεροποιώντας το σε ουδέτερες τιμές. Αξιοσημείωτη ήταν η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC), όπου μόνο οι μονάδες με ζεόλιθο (C και ZL) παρουσίασαν μείωση, υποδηλώνοντας ενεργή δέσμευση ιόντων, ενώ στις υπόλοιπες παρατηρήθηκε αύξηση λόγω της εξατμισοδιαπνοής. Τέλος, όλα τα συστήματα συνέβαλαν στην αποτελεσματική απομάκρυνση των ολικών αιωρούμενων στερεών (TSS) μέσω διήθησης, ολοκληρώνοντας τη συνολικά θετική εικόνα της τεχνολογίας, με ξεκάθαρη υπεροχή των συστημάτων που αξιοποιούν υλικά με υψηλή προσροφητική ικανότητα όπως ο ζεόλιθος και η διογκωμένη άργιλος.

5.2 Μελλοντικές Προτάσεις

Σε αυτή την ενότητα, παρουσιάζονται προτάσεις για τροποποιήσεις στο σύστημα, με στόχο τη βελτίωση της λειτουργίας των μονάδων και της αύξησης της απόδοσης τους μελλοντικά.

Για να επιτευχθούν ακόμη καλύτερα αποτελέσματα στην απομάκρυνση ρύπων, μια πιθανή λύση είναι η χρήση των εκροών των κατακόρυφων μονάδων L & LPB ως εισροή στα συστήματα ΤΥ οριζόντιας υπόγειας ροής. Ο συγκεκριμένος τρόπος θα μπορούσε επίσης να βοηθήσει στην αύξηση της αντοχής του συστήματος σε μεγαλύτερο φορτίο ρύπων.

Άλλη μια πιθανή λύση για αποδοτικότερα συστήματα είναι η προσθήκη τεχνητού αερισμού εισάγοντας φυσαλίδες αέρα που ανεβαίνουν μέσω της στήλης κορεσμένου υγρού του υδροβιότοπου. Με αυτόν τον τρόπο, το οξυγόνο μεταφέρεται από την αέρια φάση και διαλύεται στο νερό. Η εφαρμογή αυτής της φιλικής προς το περιβάλλον τεχνολογίας αναμένεται να οδηγήσει σε βελτίωση της απομάκρυνσης αερόβιων ρύπων, όπως οι φαινόλες, λόγω της αυξημένης ποσότητας διαθέσιμου οξυγόνου.

Βιβλιογραφικές αναφορές

Ελληνική

- <http://www.agroenergy.gr/en/content/%ce%b1%ce%be%ce%b9%ce%bf%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>
- Ελληνική Στατιστική Αρχή (ΕΛΣΤΑΤ). (2009). Στατιστικά στοιχεία ελαιοπαραγωγής στην Ελλάδα.
- <https://penteli.meteo.gr/stations/chania/>

Ξένη

- <https://www.urbangreenup.eu/solutions/natural-wastewater-treatment.kl>
- https://en.wikipedia.org/wiki/Arundo_donax
- <https://cnps-yerbabuena.org/common-reed-phragmites-australis/>
- <https://www.internationaloliveoil.org/>
- <https://www.waterandwastewater.com/constructed-wetlands-in-wastewater-treatment-natures-solution-for-water-purification/>
- <https://nap.nationalacademies.org/catalog/4766/wetlands-characteristics-and-boundaries>
- https://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/wetlands/pdf/Wetlands_separate_files/W_S_Ch6_Constructed_Wetlands.pdf

- Achak, M., Boumya, W., Ouazzani, N., & 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, 141–151. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.06.007>
- Akratos, C. S., & Tsihrintzis, V. A. (2007). Effect of temperature, HRT, vegetation and porous media on removal efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 29(2), 173–191. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.06.013>
- Berego, Y. S., Sota, S. S., Ulsido, M. D., & 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, 11786302221142749. <https://doi.org/10.1177/11786302221142749>
- Brix, H. (1994). Functions of macrophytes in constructed wetlands. *Water Science and Technology*, 29(4), 71–78.
- Brix, H. (1997). Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? *Wetland Systems for Water Pollution Control 1996*, 35(5), 11–17. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(97\)00047-4](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00047-4)
- Brix, H. (2003). *Plants used in constructed wetlands and their functions*. 81–109.
- Chiavola, A., Farabegoli, G., & Rolle, E. (2010). Combined biological and chemical-physical process for olive mill wastewater treatment. *Desalination and Water Treatment*, 23(1), 135–140. <https://doi.org/10.5004/dwt.2010.1987>
- Deng, S., Chen, J., & 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, 126156. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126156>

- Dermeche, S., Nadour, M., Larroche, C., Moulti-Mati, F., & Michaud, P. (2013). Olive mill wastes: Biochemical characterizations and valorization strategies. *Process Biochemistry*, 48(10), 1532–1552. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2013.07.010>
- El Ghadraoui, A., Ouazzani, N., Ahmali, A., El Mansour, T. E. H., Aziz, F., Hejjaj, A., Del Bubba, M., & Mandi, L. (2020). Treatment of olive mill and municipal wastewater mixture by pilot scale vertical flow constructed wetland. *Desalination and Water Treatment*, 198, 126–139.
- Gikas, G. D., Vryzas, Z., & Tsihrintzis, V. A. (2018). S-metolachlor herbicide removal in pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Chemical Engineering Journal*, 339, 108–116. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.01.056>
- Green, M., Friedler, E., & Safrai, I. (1998). Enhancing nitrification in vertical flow constructed wetland utilizing a passive air pump. *Water Research*, 32(12), 3513–3520. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(98\)00182-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(98)00182-1)
- Herouvim, E., Akratos, C. S., Tekerlekopoulou, A., & Vayenas, D. V. (2011). Treatment of olive mill wastewater in pilot-scale vertical flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 37(6), 931–939. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.01.018>
- Jethwa & Bajpai. (2016) . *Role of plants in constructed wetlands (CWS): A review*. Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences. <https://www.jchps.com/specialissues/2016%20Special%20Issue%202/jchps%202%20Kruti%204-10.pdf>
- Kaggwa, R. Nature based solutions for wastewater treatment. National water & sewerage corporation, Kampala,Uganda
Availableat: https://snapp.icra.cat/factsheets/17_Natural%20wetland.pdf
- Kapellakis, I. E., Paranychianakis, N. V., Tsagarakis, K. P., & Angelakis, A. N. (2012). Treatment of olive mill wastewater with constructed wetlands. *Water*, 4(1), 260–271.

- Kulik, M., Sender, J., Bochniak, A., Jaźwa, M., & Ciesielski, D. (2023). The influence of mowing frequency on the growth and development of *Phragmites australis*. *Journal for Nature Conservation*, 76, 126492. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2023.126492>
- Kumari, S., Chowdhry, J., Kumar, M., & Chandra Garg, M. (2024). Zeolites in wastewater treatment: A comprehensive review on scientometric analysis, adsorption mechanisms, and future prospects. *Environmental Research*, 260, 119782. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119782>
- Leto, C., Tuttolomondo, T., Bella, S. L., Leone, R., & Licata, M. (2013). Growth of *Arundo donax* L. and *Cyperus alternifolius* L. in a horizontal subsurface flow constructed wetland using pre-treated urban wastewater—A case study in Sicily (Italy). *Desalination and Water Treatment*, 51(40), 7447–7459. <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.792134>
- Licata, M., Rossini, F., Virga, G., Ruggeri, R., Farruggia, D., & Iacuzzi, N. (2021). Performance of a Pilot-Scale Constructed Wetland and Medium-Term Effects of Treated Wastewater Irrigation of *Arundo donax* L. on Soil and Plant Parameters. *Water*, 13(15). <https://doi.org/10.3390/w13151994>
- Milke, J., Gałczyńska, M., & 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). <https://doi.org/10.3390/w12061770>
- Mlih, R., Bydalek, F., Klumpp, E., Yaghi, N., Bol, R., & Wenk, J. (2020). Light-expanded clay aggregate (LECA) as a substrate in constructed wetlands – A review. *Ecological Engineering*, 148, 105783. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105783>
- Nasso, N. N. o D., Roncucci, N., & Bonari, E. (2013). Giant reed (*Arundo donax* L.) as energy crop in Central Italy: A review. *Italian Journal of Agronomy*, 8, 10–17. [https://doi.org/10.1016/S1125-4718\(24\)00196-8](https://doi.org/10.1016/S1125-4718(24)00196-8)

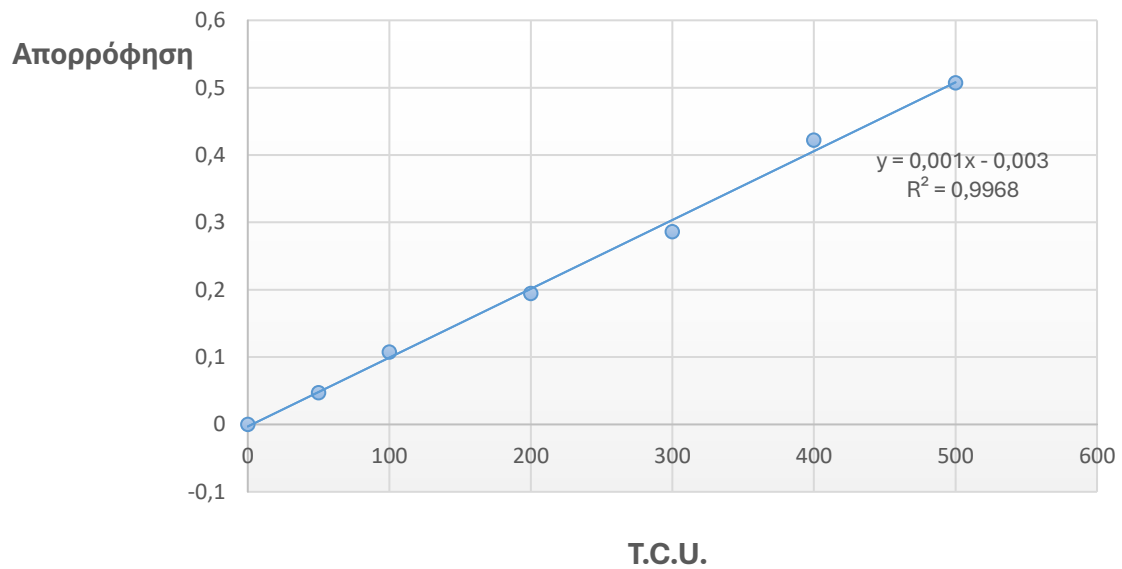
- Paraskeva, P., & Diamadopoulos, E. (2006). Technologies for olive mill wastewater (OMW) treatment: A review. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology: International Research in Process, Environmental & Clean Technology*, 81(9), 1475–1485.
- Stefanakis, A., Akratos, C. S., & Tsihrintzis, V. A. (2014). Chapter 5—Treatment Processes in VFCWs. Στο A. Stefanakis, C. S. Akratos, & V. A. Tsihrintzis (Επιμ.), *Vertical Flow Constructed Wetlands* (σελ. 57–84). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-404612-2.00005-2>
- Sundaravadivel, M., & Vigneswaran, S. (2001). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 31(4), 351–409. <https://doi.org/10.1080/20016491089253>
- Tanner, C. C. (1996). Plants for constructed wetland treatment systems—A comparison of the growth and nutrient uptake of eight emergent species. *Ecological Engineering*, 7(1), 59–83. [https://doi.org/10.1016/0925-8574\(95\)00066-6](https://doi.org/10.1016/0925-8574(95)00066-6)
- Tatoulis, T. (2014). Start-up of a free water surface constructed wetland for treating olive mill wastewater. *Hemijiska Industrija*. <https://doi.org/10.2298/HEMIND140820076M>
- Tatoulis, T., Akratos, C. S., Tekerlekopoulou, A. G., Vayenas, D. V., & Stefanakis, A. I. (2017). A novel horizontal subsurface flow constructed wetland: Reducing area requirements and clogging risk. *Chemosphere*, 186, 257–268. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.07.151>
- Vohla, C., Köiv, M., Bavor, H. J., Chazarenc, F., & Mander, Ü. (2011). Filter materials for phosphorus removal from wastewater in treatment wetlands—A review. *Special Issue: Enhancing ecosystem services on the landscape with created, constructed and restored wetlands*, 37(1), 70–89. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.08.003>

- Vymazal, J. (2005). Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. *Constructed wetlands for wastewater treatment*, 25(5), 478–490. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2005.07.010>
- Vymazal, J. (2007). Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Contaminants in Natural and Constructed Wetlands: Pollutant Dynamics and Control*, 380(1), 48–65. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.09.014>
- Vymazal, J. (2008). Types of Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. *Environmental Pollution*. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8580-2_4
- Vymazal, J. (2010). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment <https://doi.org/10.3390/w2030530>
- Vymazal, J. (2011). Plants used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow: A review. *Hydrobiologia*, 674(1), 133–156. <https://doi.org/10.1007/s10750-011-0738-9>
- Vymazal, J. (2014). Constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters: A review. *Ecological Engineering*, 73, 724–751. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.09.034>
- Wdowczyk, A., & Szymańska-Pulikowska, A. (2023). Effect of substrates on the potential of *Phragmites australis* to accumulate and translocate selected contaminants from landfill leachate. *Water Resources and Industry*, 29, 100203. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2023.100203>
- Yalcuk, A. (2011). Removal of phenol from olive mill wastewater in constructed wetlands using different bedding media. *Ekoloji*, 80, 1–5. Scopus. <https://doi.org/10.5053/ekoloji.2011.801>
- Yang, L., Chang, H.-T., & Huang, M.-N. L. (2001). Nutrient removal in gravel- and soil-based wetland microcosms with and without vegetation. *Ecological Engineering*, 18(1), 91–105. [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(01\)00068-4](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(01)00068-4)

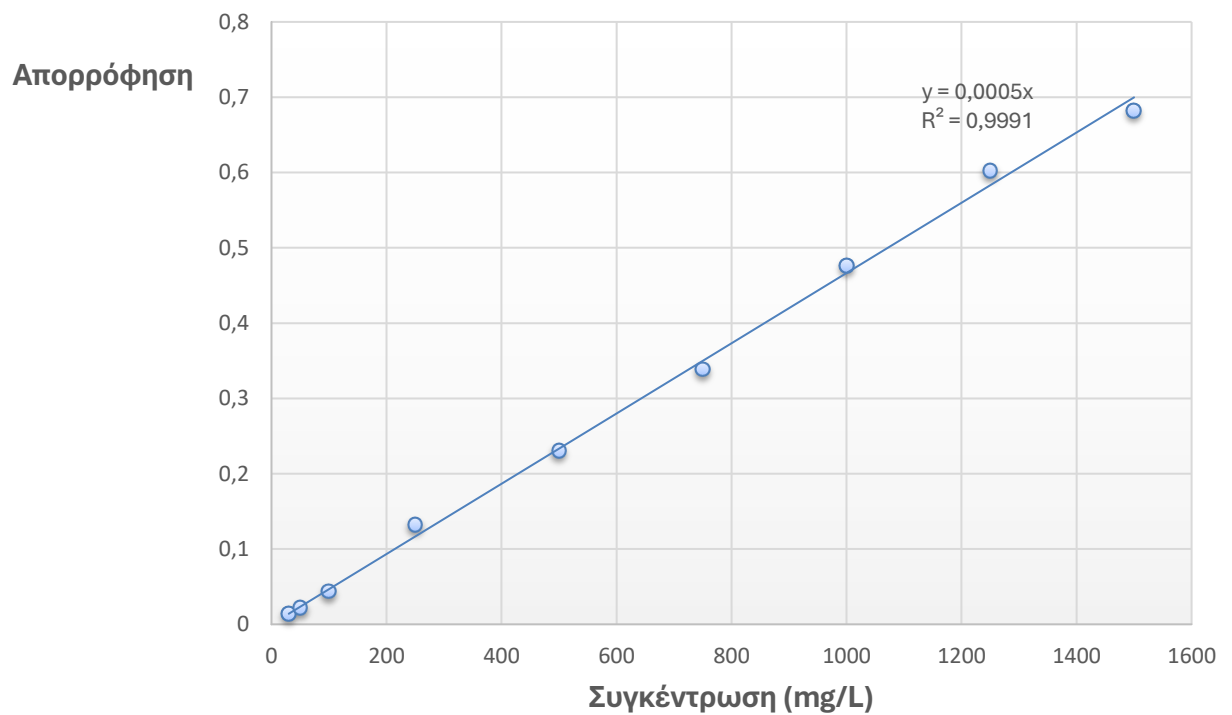
- Yang, Y., Liu, J., Zhang, N., Xie, H., Zhang, J., Hu, Z., & Wang, Q. (2019). Influence of application of manganese ore in constructed wetlands on the mechanisms and improvement of nitrogen and phosphorus removal. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 170, 446–452. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.12.024>
- 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 Science and Technology*, 35(5), 103–108. <https://doi.org/10.2166/wst.1997.0175>

Παράρτημα Α

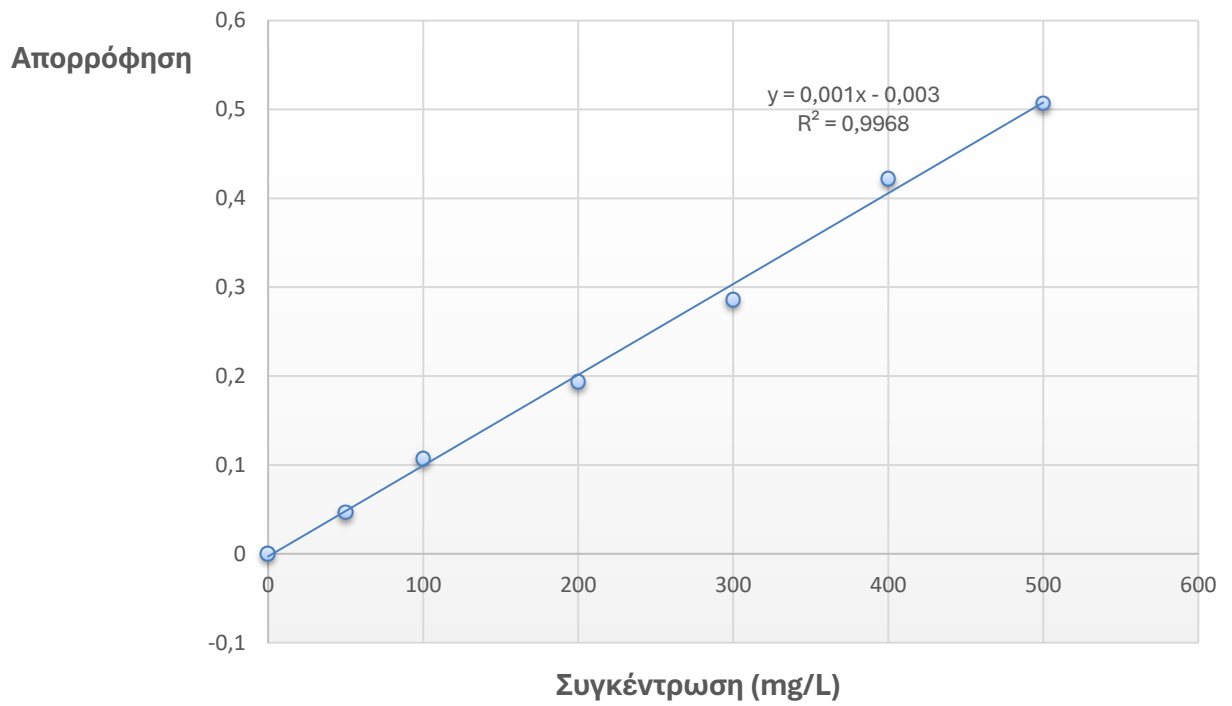
Πρότυπη Καμπύλη Χρώματος (Τ.Σ.Υ.)



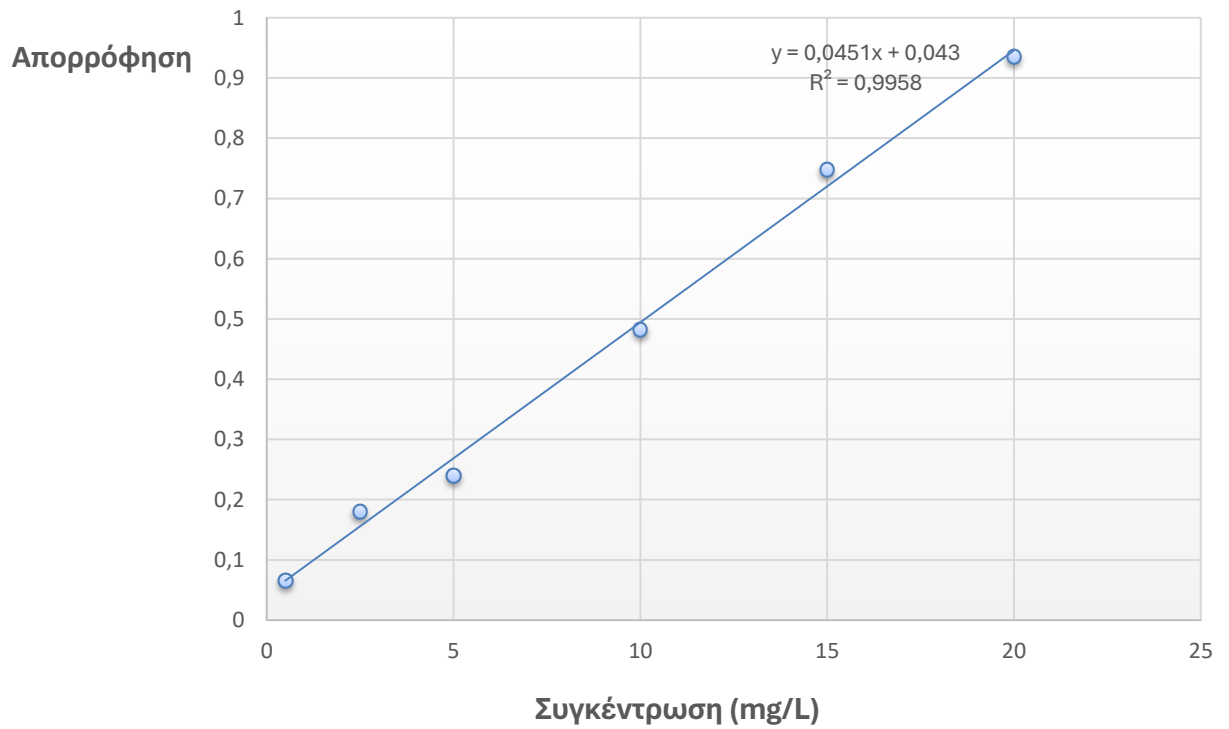
Πρότυπη καμπύλη COD έως 1500 mg/L

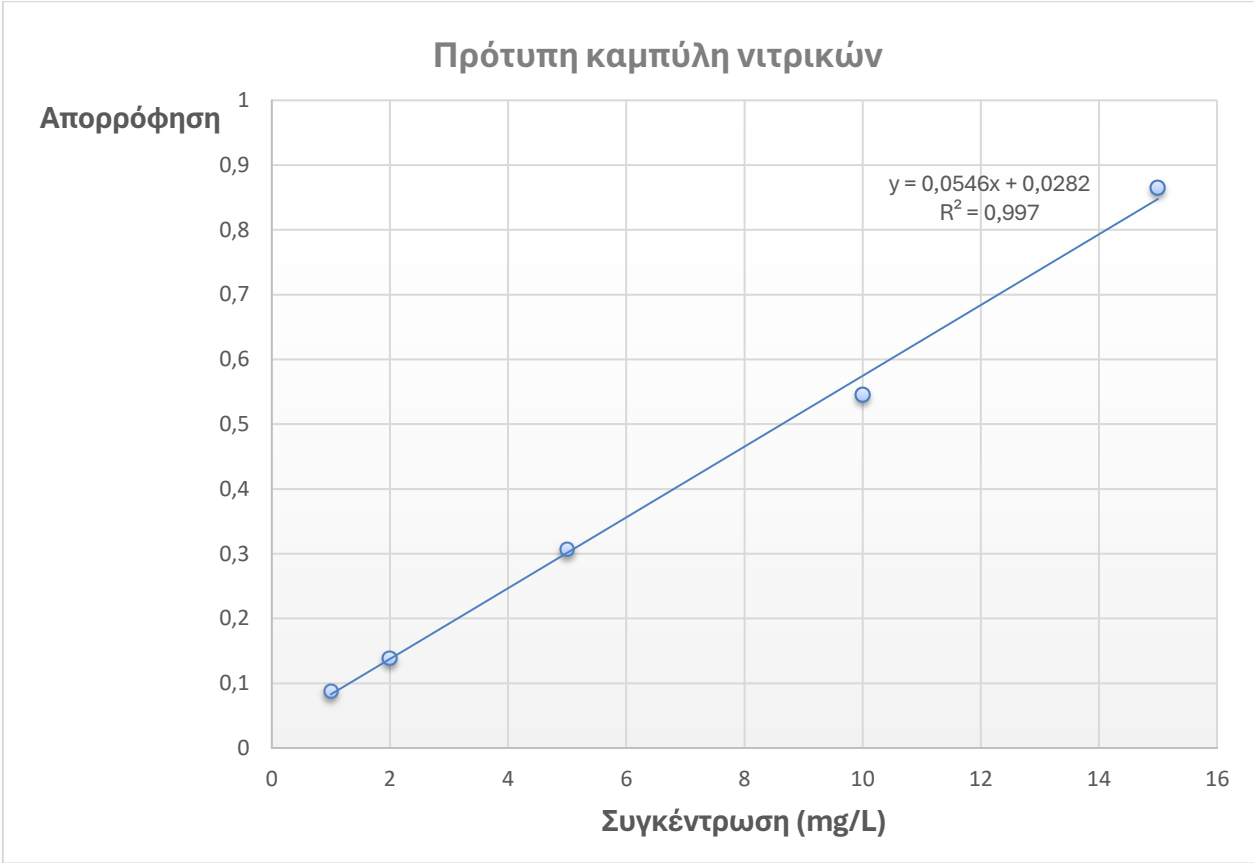


Πρότυπη καμπύλη COD έως 15000 mg/L

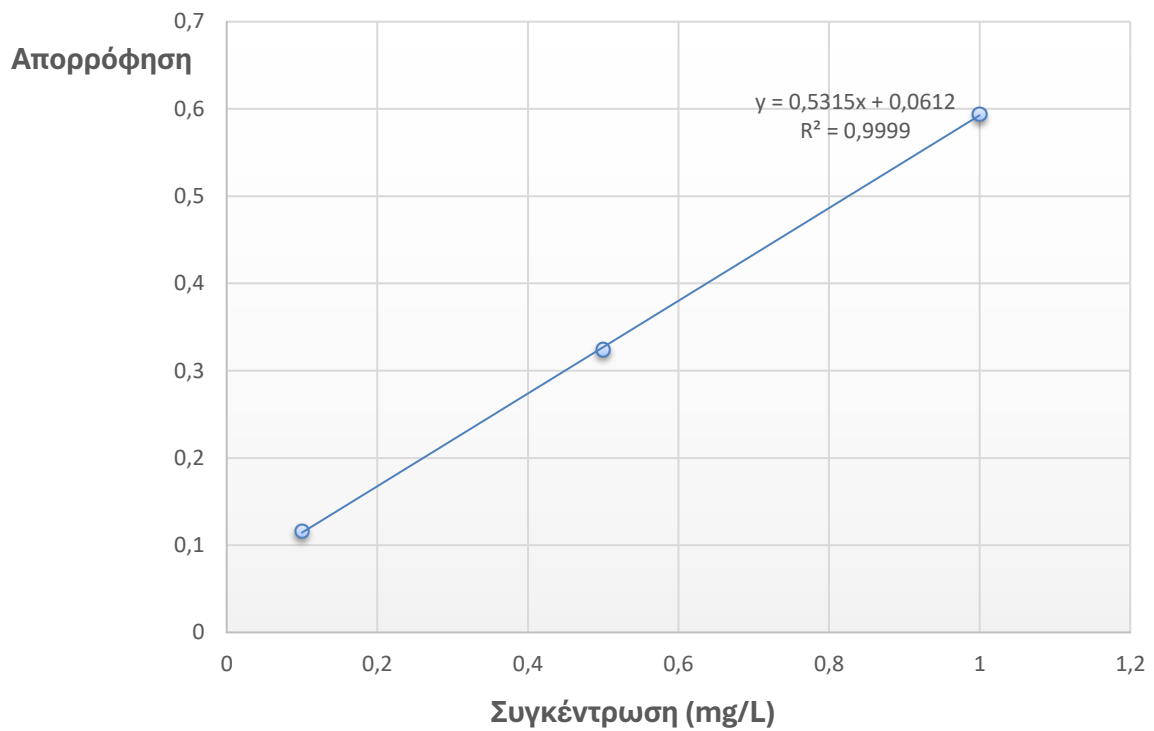


Πρότυπη καμπύλη αμμωνιακών

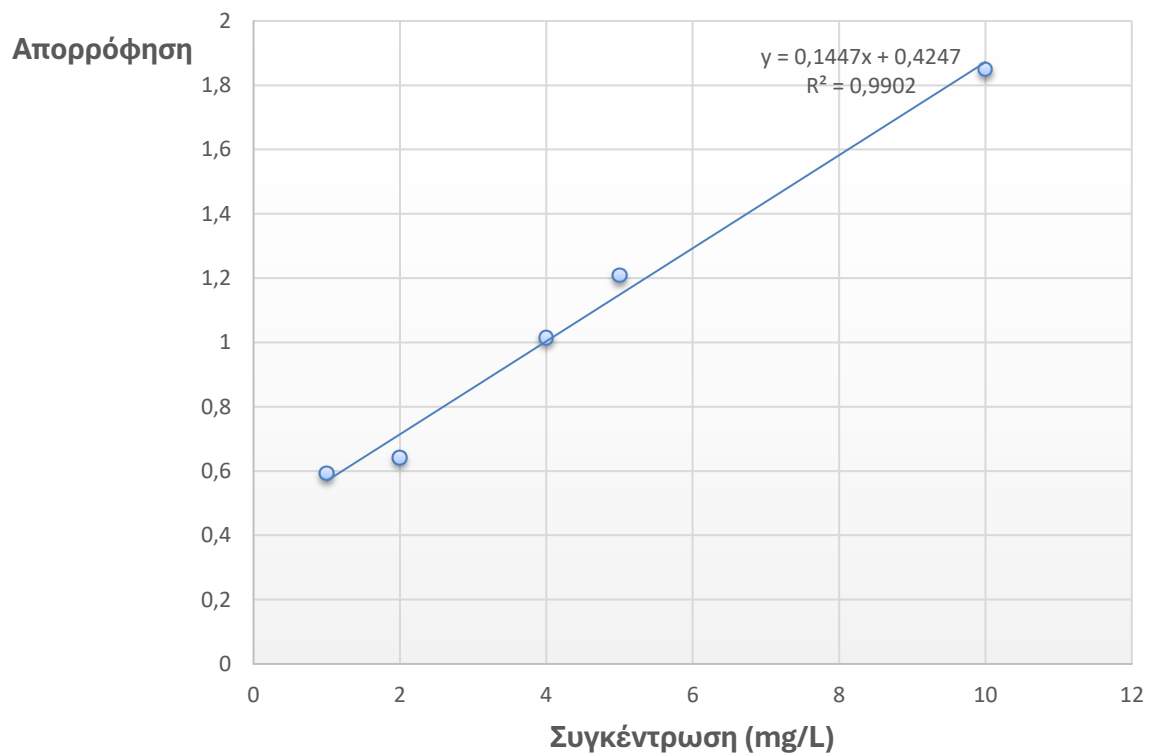




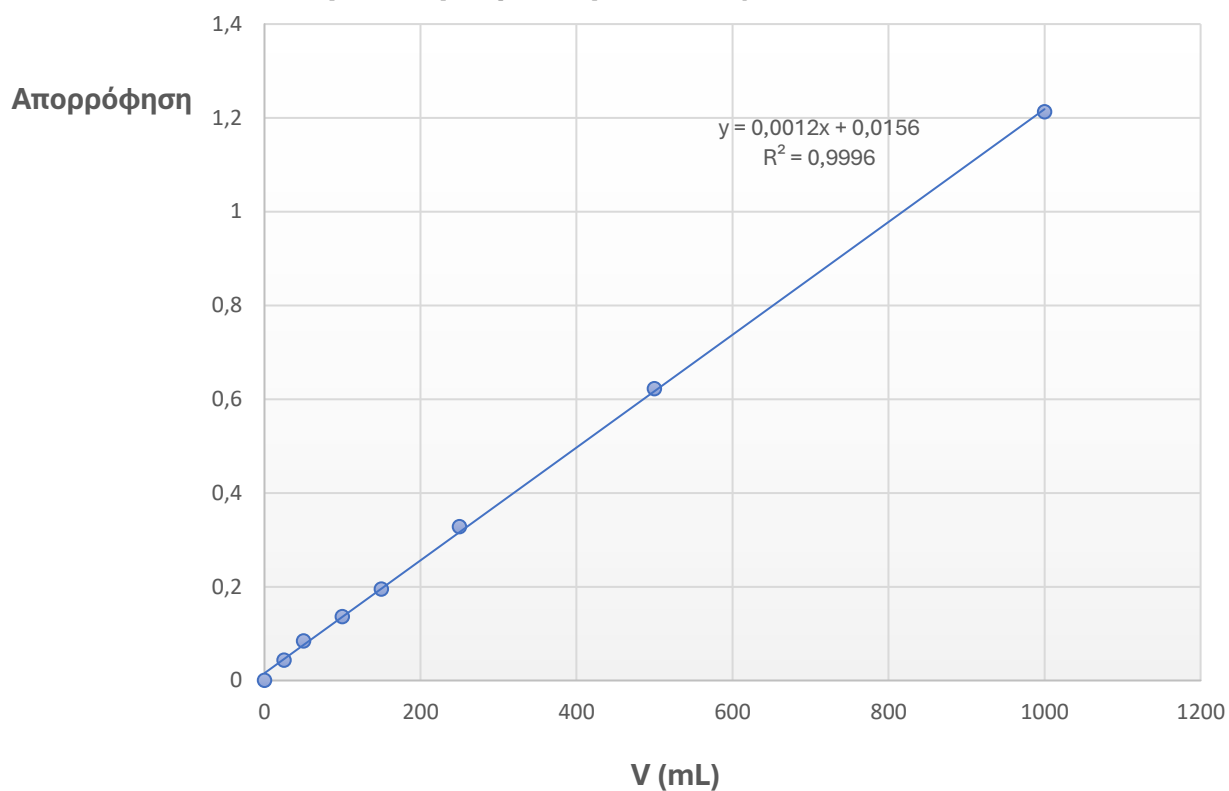
Πρότυπη καμπύλη φωσφορικών για $A < 0,6$



Πρότυπη καμπύλη φωσφορικών για $A > 0,6$



Πρότυπη καμπύλη ολικών φαινολών



Πρότυπη καμπύλη ολικών φαινολών (Κυψ. 2.5)

