



## ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

### Διπλωματική Διατριβή

«ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΚΑΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΠΙΛΟΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΩΝ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ  
ΡΟΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΥΓΡΟΥ ΑΠΟΒΛΗΤΟΥ ΕΛΑΙΟΤΡΙΒΕΙΟΥ»

ΜΟΣΧΟΓΙΑΝΝΗ ΔΗΜΗΤΡΑ

Αριθμός Μητρώου: 2017050093

Εξεταστική επιτροπή:

Επιβλέπων: Επίκουρος Καθηγητής Στεφανάκης Αλέξανδρος

Καθηγήτρια Βενιέρη Δανάη

Ομότιμος Καθηγητής Διαμαντόπουλος Ευάγγελος

Χανιά, Φεβρουάριος, 2025

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

## Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Αλέξανδρο Στεφανάκη, για την εμπιστοσύνη του, τις πολύτιμες συμβουλές του και κυρίως την θέληση του να μεταλαμπαδεύσει τις γνώσεις του και την αφοσίωση του στην περιβαλλοντική διαχείριση και την κυκλική οικονομία. Επίσης, την εργαστηριακή καθηγήτρια, κυρία Ελισσάβετ Κουκουράκη, η οποία ήταν πάντοτε διαθέσιμη και πρόθυμη για βοήθεια, χαρίζοντας μου πολύτιμες συμβουλές. Φυσικά, η εκπόνηση της μελέτης αυτής, οφείλεται και στην υποστήριξη από τους διδάκτορες και υποψήφιους διδάκτορες του εργαστηρίου, την Ειρήνη Αθανασιάδου, με την οποία συμπορεύτηκα και συνεργάστηκα άψογα καθ' όλη τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας, τον Παναγιώτη Ρεγκούζα και τον Ιωάννη Ασημακούλα, οι οποίοι βοήθησαν έμπρακτα, στο στήσιμο του πειράματος, καθώς και παρέχοντας μου χρήσιμες συμβουλές. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω πολύ την οικογένεια μου, η οποία ήταν υποστηρικτική καθ' όλη τη διάρκεια της φοιτητικής μου ζωής, όπως και τους φίλους μου που ήταν πάντα δίπλα μου σε ό,τι χρειαστώ.



## Περιεχόμενα

Ευχαριστίες .....	3
Περιεχόμενα .....	5
Ευρετήριο Πινάκων .....	7
Ευρετήριο Διαγραμμάτων .....	7
Ευρετήριο Εικόνων .....	8
Περίληψη .....	10
Abstract .....	12
Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή .....	13
Κεφάλαιο 2 – Θεωρητικό Υπόβαθρο .....	17
2.1 Υγροβιότοποι .....	17
2.1.1. Φυσικοί Υγροβιότοποι .....	17
2.1.2. Τεχνητοί Υγροβιότοποι και Επεξεργασία Λυμάτων .....	17
2.1.3. Υγρά Απόβλητα Ελαιοτριβείου .....	23
2.1.4 Ισχύουσα Νομοθεσία .....	23
2.1.5 Στόχος διπλωματικής .....	26
Κεφάλαιο 3 – Πειραματική Διαδικασία .....	27
3.1. Περιεχόμενο τεχνητών υγροβιότοπων και ΥΑΕ .....	27
3.1.1. ΥΑΕ .....	27
3.1.2. Βλάστηση .....	27
3.1.3. Πληρωτικά Υλικά .....	28
3.2. Πειραματική Διάταξη .....	33
3.2.1. Γενικές Πληροφορίες .....	33
3.2.2. Πειραματική Διαδικασία-Χρονοδιάγραμμα .....	37

3.2.3. Χωροθέτηση Πειράματος και Μετεωρολογικές Συνθήκες .....	41
3.3. Αναλυτικές Μέθοδοι.....	42
3.3.1 Ηλεκτρική Αγωγιμότητα .....	42
3.3.2 pH .....	43
3.3.3. Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο .....	43
3.3.4. Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο .....	44
3.3.5. Ολικά Αιωρούμενα Στερεά .....	45
3.3.6. Ολικός Φώσφορος .....	46
3.3.7. Φωσφορικά Ιόντα .....	47
3.3.8. Ολικό Άζωτο .....	47
3.3.9. Αμμωνιακό Άζωτο .....	48
3.3.10. Νιτρικό Άζωτο .....	48
3.3.11. Ολικές Φαινόλες .....	49
3.3.12. Χρώμα .....	49
Κεφάλαιο 4 – Ανάλυση Αποτελεσμάτων και Συμπεράσματα .....	51
4.1 Υδατικό Ισοζύγιο .....	51
4.2 Εργαστηριακές Αναλύσεις .....	52
4.2.1. Ανάλυση Ανεπεξέργαστου ΥΑΕ.....	52
4.2.2. Ανάλυση Εκρών .....	59
Κεφάλαιο 5 – Συμπεράσματα και μελλοντικοί στόχοι .....	81
Βιβλιογραφία .....	83
Πηγές Εικόνων .....	89
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	90

## Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1. Φυσικές και χημικές παράμετροι υγρών αποβλήτων ελαιοτριβείων .....	15
Πίνακας 2: Οριακές τιμές παραμέτρων για διάθεση ΥΑ σε διάφορους αποδέκτες.....	25
Πίνακας 3. Όγκοι φόρτισης ανά κλίνη .....	35
Πίνακας 4. Μετεωρολογικές Συνθήκες Πολυτεχνείου Κρήτης (έτος 2023) .....	42
Πίνακας 5: Χαρακτηριστικά ΥΑΕ χωρίς αραίωση (μέγιστες και ελάχιστες τιμές) .....	52
Πίνακας 6: Μετρήσεις ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) αραιωμένης εισροής & εκροών .....	59
Πίνακας 7: Μετρήσεις pH αραιωμένης εισροής & εκροών .....	61
Πίνακας 8: Μετρήσεις COD αραιωμένης εισροής & εκροών .....	62
Πίνακας 9: Μετρήσεις BOD <sub>5</sub> αραιωμένης εισροής & εκροών .....	65
Πίνακας 10: Μετρήσεις TSS αραιωμένης εισροής & εκροών .....	66
Πίνακας 11: Μετρήσεις TP αραιωμένης εισροής & εκροών .....	68
Πίνακας 12: Μετρήσεις PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P αραιωμένης εισροής & εκροών .....	71
Πίνακας 13: Μετρήσεις TN αραιωμένης εισροής & εκροών .....	73
Πίνακας 14: Μετρήσεις NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N αραιωμένης εισροής & εκροών.....	75
Πίνακας 15: Μετρήσεις ολικών φαινολών αραιωμένης εισροής & εκροών.....	77
Πίνακας 16: Μετρήσεις χρώματος αραιωμένης εισροής & εκροών .....	79

## Ευρετήριο Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1. Μέση Μηνιαία Εξατμισοδιαπνοή οριζόντιων τεχνητών υγροβιότοπων.....	51
Διάγραμμα 2: Συγκέντρωση COD ανεπεξέργαστου Υ.Α.Ε (χωρίς αραίωση) .....	54
Διάγραμμα 3: Συγκέντρωση Ολικού Αζώτου ανεπεξέργαστου ΥΑΕ (χωρίς αραίωση) .....	55
Διάγραμμα 4: Συγκέντρωση αμμωνιακών ιόντων ανεπεξέργαστου ΥΑΕ (χωρίς αραίωση) .....	56
Διάγραμμα 5: Συγκέντρωση Ολικών Φαινολών ανεπεξέργαστου ΥΑΕ (χωρίς αραίωση) .....	57
Διάγραμμα 6: Συγκέντρωση Ολικών Αιωρούμενων Στερεών ανεπεξέργαστου ΥΑΕ (χωρίς αραίωση) .....	58
Διάγραμμα 7: Συγκέντρωση ηλεκτρικής αγωγιμότητας αραιωμένης εισροής & εκροών .....	60

Διάγραμμα 8: Συγκέντρωση COD αραιωμένης εισροής & εκροών .....	63
Διάγραμμα 9: Ποσοστά απομάκρυνσης COD αραιωμένης εισροής & εκροών .....	63
Διάγραμμα 10: Ποσοστά απομάκρυνσης BOD <sub>5</sub> αραιωμένης εισροής & εκροών.....	65
Διάγραμμα 11: Ποσοστά απομάκρυνσης TSS αραιωμένης εισροής & εκροών.....	67
Διάγραμμα 12: Συγκέντρωση TP αραιωμένης εισροής & εκροών .....	69
Διάγραμμα 13: Ποσοστά απομάκρυνσης TP αραιωμένης εισροής & εκροών .....	69
Διάγραμμα 14: Συγκέντρωση PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P αραιωμένης εισροής & εκροών.....	71
Διάγραμμα 15: Ποσοστά απομάκρυνσης PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P αραιωμένης εισροής & εκροών.....	72
Διάγραμμα 16: Συγκέντρωση TN αραιωμένης εισροής & εκροών .....	73
Διάγραμμα 17: Ποσοστά απομάκρυνσης TN αραιωμένης εισροής & εκροών.....	74
Διάγραμμα 18: Συγκέντρωση ολικών φαινολών αραιωμένης εισροής & εκροών .....	77
Διάγραμμα 19: Ποσοστά απομάκρυνσης ολικών φαινολών αραιωμένης εισροής & εκροών.....	78
Διάγραμμα 20: Χρώμα αραιωμένης εισροής & εκροών.....	79

## Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1. Απεικόνιση παραγωγής παραπροϊόντων και συστατικών από ελαιοτριβεία .....	15
Εικόνα 2. <i>Phragmites australis</i> (Wikimedia Commons).....	20
Εικόνα 3: Βυτίο Αποθήκευσης ΥΑΕ .....	27
Εικόνα 4. Απεικόνιση φυσικού ζεόλιθου.....	29
Εικόνα 5. Απεικόνιση διογκωμένου αργίλου (Ieca) .....	30
Εικόνα 6. Απεικόνιση βιοεξανθρακώματος (biochar).....	32
Εικόνα 7. Απεικόνιση των τεχνητών υδροβιότοπων (Απρίλιος, 2023) .....	33
Εικόνα 8. Πιλοτικές μονάδες τεχνητών υδροβιότοπων.....	34
Εικόνα 9. Απεικόνιση Πειραματικής Διάταξης .....	35
Εικόνα 10. Χρονοδιάγραμμα Πειραματικής Διαδικασίας .....	37
Εικόνα 11. Συλλογή ανεπεξέργαστου ΥΑΕ με αραιώση 1:8 .....	40
Εικόνα 12: Απεικόνιση των τεχνητών υδροβιότοπων (Σεπτέμβριος, 2023).....	41





## Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αναφέρεται στην παρακολούθηση και μελέτη πιλοτικών τεχνητών υγροβιότοπων οριζόντιας υπόγειας ροής με σκοπό την μείωση του οργανικού φορτίου και την απομάκρυνση θρεπτικών και άλλων ρύπων από το υγρό απόβλητο τριφασικού ελαιοτριβείου, καθώς και την εξαγωγή συμπερασμάτων με γνώμονα τις πειραματικές μετρήσεις για την εγκυρότητα του σχεδιασμού και την αποτελεσματικότητά τους.

Η πειραματική διάταξη αποτελούνταν από τέσσερις μονάδες τεχνητών υγροβιότοπων οριζόντιας υπόγειας ροής, οι οποίοι τοποθετήθηκαν σε υπαίθριο χώρο του Πολυτεχνείου Κρήτης στα Χανιά, με τα εξής χαρακτηριστικά: η πρώτη μονάδα, η οποία ήταν αφύτευτη, με υλικά πλήρωσης ζεόλιθο και διογκωμένη άργιλο (Leca) και συμβολίζεται με “C”, ενώ στις επόμενες τρεις μονάδες έχει φυτευτεί το κοινό καλάμι *Phragmites australis* και περιέχονται τα εξής υλικά πλήρωσης: στην δεύτερη η πλήρωση αποτελείται από ζεόλιθο και διογκωμένη άργιλο με συμβολισμό “ZL”, στην τρίτη από ανακυκλωμένο πλαστικό (HDPE) και βιοεξανθράκωμα (biochar) με συμβολισμό “PB” και στην τέταρτη μόνο ανακυκλωμένο πλαστικό με συμβολισμό “P”.

Οι τεχνητοί υγροβιότοποι φορτίζονταν με υγρό απόβλητο ελαιοτριβείου, το οποίο προήλθε από τριφασικό ελαιουργείο της περιοχής των Περιβολιών στα Χανιά και συγκεκριμένα από τη φάση της απλής διοχέτευσης σε κλειστή δεξαμενή όλου του υγρού κλάσματος που παρήχθη κατά τη φυγοκέντρωση τριών φάσεων. Συγκεκριμένα, πριν την φόρτιση των μονάδων, το υγρό απόβλητο ελαιοτριβείου αραιωνόταν με νερό σε αναλογία 1:8. Επιπλέον, ανά τακτά χρονικά διαστήματα, συλλέγονταν δείγματα από την εισροή και τις εκροές των μονάδων και πραγματοποιούνταν οι απαραίτητες φυσικοχημικές αναλύσεις εργαστηριακά για να μελετηθεί η απόδοσή τους. Συγκεκριμένα, μετρούνταν εργαστηριακά οι παρακάτω παράμετροι: pH, αγωγιμότητα (EC), BOD<sub>5</sub>, COD, χρώμα (TCU), NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, ολικό άζωτο TN, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P, ολικό φώσφορο TP, ολικές φαινόλες και ολικά αιωρούμενα στερεά TSS.

Η παρούσα εργασία εξέτασε την αποτελεσματικότητα των τεχνητών υγροβιότοπων στη διαχείριση υγρών αποβλήτων και την προστασία του περιβάλλοντος. Τα αποτελέσματα της μελέτης ανέδειξαν σημαντικά συμπεράσματα για τον σχεδιασμό του συστήματος και την

αποδοτικότητα κάθε μίας από τις μονάδες οριζόντιας ροής C, ZL, P και PB. Πιο αναλυτικά, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μονάδα C έφθασε το ποσοστό απομάκρυνσης  $63 \pm 19\%$  για το COD,  $90 \pm 6\%$  για το BOD<sub>5</sub>,  $86 \pm 7\%$  για τις Ολικές Φαινόλες,  $52 \pm 30\%$  για τα Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (TSS),  $82 \pm 12\%$  για το Ολικό Άζωτο (TN),  $94 \pm 7\%$  για τον Ολικό Φώσφορο (TP) και  $81 \pm 7\%$  για απομάκρυνση χρώματος. Η μονάδα ZL, η οποία διαθέτει την ίδια πλήρωση με την C, αλλά περιέχει και βλάστηση, έφθασε τα ποσοστά απομάκρυνσης  $64 \pm 19\%$  για το COD,  $90 \pm 10\%$  για το BOD<sub>5</sub>,  $86 \pm 8\%$  για τις Ολικές Φαινόλες,  $59 \pm 27\%$  για τα Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (TSS),  $84 \pm 7\%$  για το Ολικό Άζωτο (TN),  $94 \pm 8\%$  για τον Ολικό Φώσφορο (TP) και  $81 \pm 7\%$  για απομάκρυνση χρώματος. Επιπρόσθετα, στην μονάδα P παρατηρήθηκαν ποσοστά απομάκρυνσης  $50 \pm 22\%$  για το COD,  $60 \pm 24\%$  για το BOD<sub>5</sub>,  $45 \pm 18\%$  για τις Ολικές Φαινόλες,  $52 \pm 17\%$  για τα Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (TSS),  $46 \pm 26\%$  για το Ολικό Άζωτο (TN),  $35 \pm 22\%$  για τον Ολικό Φώσφορο (TP), ενώ δεν παρατηρήθηκε απομάκρυνση χρώματος. Τέλος, για την μονάδα PB, παρατηρήθηκαν ποσοστά απομάκρυνσης  $51 \pm 23\%$  για το COD,  $63 \pm 25\%$  για το BOD<sub>5</sub>,  $48 \pm 20\%$  για τις Ολικές Φαινόλες,  $64 \pm 21\%$  για τα Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (TSS),  $49 \pm 23\%$  για το Ολικό Άζωτο (TN),  $33 \pm 23\%$  για τον Ολικό Φώσφορο (TP), ενώ και σε αυτήν την περίπτωση δεν παρατηρήθηκε απομάκρυνση χρώματος.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, συμπεραίνεται η υψηλή απόδοση των μονάδων C και ZL, που περιέχουν ως πληρωτικά υλικά τον ζεόλιθο και το Ieca, ως προς την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων ελαιοτριβείου, με καλύτερα αποτελέσματα από την ZL η οποία διαθέτει και το φυτό *Phragmites australis*. Οι μονάδες P και PB, που διαθέτουν HDPE και biochar για την πλήρωση τους, ενώ κατόρθωσαν ικανοποιητικά ποσοστά απομάκρυνσης όσον αφορά κάποιους ρύπους, δεν παρουσίασαν την υψηλή απόδοση που είχαν οι μονάδες C, ZL.

Τελικά, οι τεχνητοί υγροβιότοποι αποτελούν μια βιώσιμη και φιλική προς το περιβάλλον λύση για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων ελαιοτριβείου με υψηλή ικανότητα επεξεργασίας, συμβάλλοντας στη μείωση της ρύπανσης και στην αξιοποίηση φυσικών πόρων μέσω καινοτόμων σχεδιαστικών προσεγγίσεων.

The present thesis investigated the monitoring and performance of four pilot-scale constructed wetlands with horizontal subsurface flow which aim to reduce organic load and remove nutrients and other pollutants from the wastewater of a three-phase olive mill, without additional processes, as well as to draw conclusions based on experimental measurements for the validity of their design and effectiveness.

The followed method involves four units of constructed wetlands of horizontal subsurface flow with a volume of 188 litres, which were placed in the open space of Technical University of Crete in Chania, with the following filling mediums: the first unit does not contain any vegetation and it is filled with zeolite and expanded clay (Leca) symbolized as "C", while in the next three units the common reed *Phragmites australis* has been planted and contain the following filling materials: the second unit contains zeolite and expanded clay symbolized as "ZL", the third recycled plastic (HDPE) and biochar symbolized as "PB", and the fourth only recycled plastic symbolized as "P".

The units were loaded at specific intervals with different quantities of liquid waste from an olive mill, which originated from a three-phase olive mill in the area of Perivolia in Chania, specifically from the phase of simple drainage into a closed tank of all the liquid fraction produced during the centrifugation of three phases. Specifically, prior to loading the units, the liquid waste from the olive mill was diluted with water in a ratio of 1:8. Additionally, at regular intervals, samples were collected from the inflow and outflow of the units, and the necessary photochemical analyses were carried out in the laboratory to study their performance. Specifically, the following parameters were measured in the laboratory: pH, conductivity (EC), BOD<sub>5</sub>, COD, colour (TCU), NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, total nitrogen TN, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P, total phosphorus TP, total phenols, and total suspended solids TSS.

This study examined the effectiveness of constructed wetlands in wastewater treatment and environmental protection. The results provided important insights into system design and the efficiency of each horizontal flow unit (C, ZL, P, and PB). More specifically, the results showed that unit C achieved a removal efficiency of  $63 \pm 19\%$  for COD,  $90 \pm 6\%$  for BOD<sub>5</sub>,  $86 \pm 7\%$  for total

phenols,  $52 \pm 30\%$  for TSS,  $82 \pm 12\%$  for TN,  $94 \pm 7\%$  for TP, and  $81 \pm 7\%$  for color removal. The ZL unit, which had the same filling materials as unit C but included vegetation, achieved removal efficiencies of  $64 \pm 19\%$  for COD,  $90 \pm 10\%$  for BOD5,  $86 \pm 8\%$  for total phenols,  $59 \pm 27\%$  for TSS,  $84 \pm 7\%$  for TN,  $94 \pm 8\%$  for TP, and  $81 \pm 7\%$  for color removal.

Furthermore, unit P demonstrated removal efficiencies of  $50 \pm 22\%$  for COD,  $60 \pm 24\%$  for BOD5,  $45 \pm 18\%$  for total phenols,  $52 \pm 17\%$  for TSS,  $46 \pm 26\%$  for TN, and  $35 \pm 22\%$  for TP, while no significant color removal was observed. Finally, unit PB exhibited removal efficiencies of  $51 \pm 23\%$  for COD,  $63 \pm 25\%$  for BOD5,  $48 \pm 20\%$  for total phenols,  $64 \pm 21\%$  for TSS,  $49 \pm 23\%$  for TN, and  $33 \pm 23\%$  for TP, with no observed color removal in this case as well.

Based on the results, it can be concluded that the C and ZL units, which use zeolite and leca as filling materials, exhibit high performance in treating olive mill wastewater, with the ZL unit showing slightly better results due to the inclusion of the *Phragmites australis* plant.

The P and PB units, which use HDPE and biochar as filling materials, achieved adequate removal rates for certain pollutants but did not perform as efficiently as the C and ZL units.

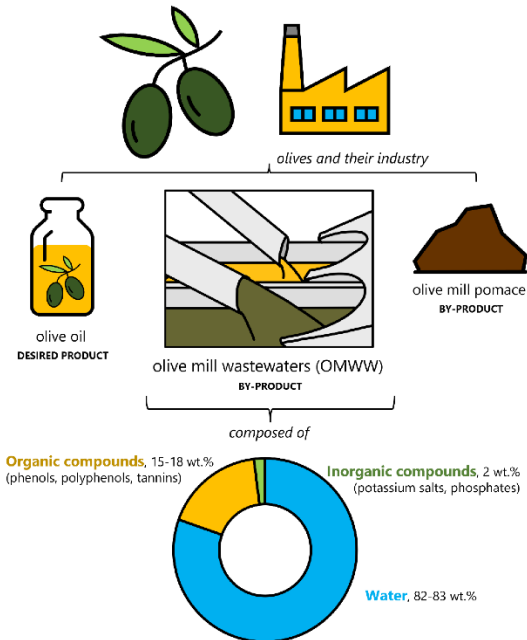
In conclusion, Constructed Wetlands represent a sustainable and environmentally friendly solution for the treatment of olive mill wastewater, contributing to pollution reduction and to sustainable utilization of natural resources through innovative design approaches.

## Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή

Η Μεσόγειος αποτελεί το λίκνο της καλλιέργειας ελαιόδεντρων, με την Ελλάδα να κατέχει σημαντική θέση στην παραγωγή ελαιολάδου. Οι κύριες χώρες παραγωγής ελαιόλαδου στη Μεσόγειο είναι η Ισπανία, η Ιταλία και η Ελλάδα. Είναι σημαντικό πως το μεσογειακό κλίμα είναι ιδανικό για την καλλιέργεια της ελιάς. Η Ελλάδα, με τους πιο ήπιους, υγρούς χειμώνες και με τα ζεστά, ξηρά της καλοκαίρια, προσφέρει τις τέλειες συνθήκες για την ανάπτυξη των ελαιόδεντρων. Έτσι, η Ελλάδα κατατάσσεται τρίτη στην παγκόσμια παραγωγή, καθώς παράγει περίπου το 10% της παγκόσμιας παραγωγής ελαιόλαδου. Περιοχές όπως η Κρήτη, η Πελοπόννησος, η Μυτιλήνη και η Χαλκιδική είναι γνωστές για την υψηλή ποιότητα του

ελαιολάδου που παράγουν. Γι' αυτό τον λόγο, η ελαιοπαραγωγή αποτελεί σημαντικό τομέα της ελληνικής αγροτικής οικονομίας, απασχολώντας χιλιάδες αγρότες και συμβάλλοντας σημαντικά στην εθνική οικονομία μέσω των εξαγωγών προς άλλες χώρες.

Σημαντικό ρόλο στην αλυσίδα παραγωγής ελαιολάδου στην χώρα μας έχουν τα ελαιотριβεία, τα οποία διασφαλίζουν της ποιότητας του τελικού προϊόντος, συνδυάζοντας παραδοσιακές μεθόδους με σύγχρονες τεχνολογίες για την παραγωγή ελαιολάδου υψηλής ποιότητας. Στην Ελλάδα, το έτος 2009 ήταν ενεργά 2369 ελαιотριβεία (ΕΛΣΤΑΤ). Υπάρχουν τρία είδη ελαιотριβείων, ανάλογα με την μέθοδο επεξεργασίας που χρησιμοποιούν. Οι μέθοδοι είναι είτε η φυγοκέντριση είτε η κλασσική παραδοσιακή μέθοδος της μηχανικής υδραυλικής πίεσης. Τα φυγοκεντρικά ελαιотριβεία, διακρίνονται εξίσου σε τριών και δύο φάσεων, ανάλογα με το είδος των αποβλήτων που παράγονται στο τέλος της επεξεργασίας του ελαιοκάρπου. Συγκεκριμένα, στα κλασσικά και στα τριφασικά φυγοκεντρικά ελαιотριβεία, παράγονται υγρά απόβλητα όπως ο κασίγαρος (Olive Mill Wastewater), που αποτελεί μίγμα των χυμών του καρπού με το νερό που χρησιμοποιήθηκε κατά την επεξεργασία του και στερεά απόβλητα, όπως ο ελαιοπυρήνας, δηλαδή το στερεό υπόλειμμα μετά την σύνθλιψη του καρπού. Αντίθετα, στα διφασικά ελαιотριβεία προκύπτει μόνο υγρός ελαιοπυρήνας, δηλαδή ένα μίγμα κασίγαρου με στερεό πυρήνα. Η χρήση λιγότερου νερού και η παραγωγή λιγότερων υγρών αποβλήτων, καθιστούν τα διφασικά ελαιотριβεία φιλικότερα στο περιβάλλον, από τα κλασσικά ή τριφασικά ελαιотριβεία, ωστόσο, στην Ελλάδα, τα ελαιотριβεία είναι κυρίως τριφασικής λειτουργίας.



Εικόνα 1. Απεικόνιση παραγωγής παραπροϊόντων και συστατικών από ελαιοτριβεία

Ανεξάρτητα του διφασικού ή τριφασικού συστήματος, η παραγωγή υγρών απόβλητων (κατσίγαρος) από τα ελαιοτριβεία είναι σημαντικά ογκώδης. Γενικά, από εκατό κιλά (100 kg) ελιών δύναται να παραχθούν 18 κιλά παρθένου ελαιόλαδου, ενώ παράγονται την ίδια στιγμή πενήντα κιλά (50 kg) στερεού πυρήνα και εξήντα κιλά (60 kg) κατσίγαρου (Massi, 2015). Ο κατσίγαρος, όμως, αποτελεί απόβλητο αρκετά επιβαρυντικό για το περιβάλλον λόγω των φυσικών και χημικών χαρακτηριστικών του και κυρίως του υψηλού οργανικού φορτίου και της υψηλής συγκέντρωσης φαινολών, οι οποίες επιφέρουν αντιβακτηριακές και φυτοτοξικές επιδράσεις στο περιβάλλον και το υποβαθμίζουν (Chiavola et al., 2014). Γι' αυτόν τον λόγο, απαγορεύεται η απευθείας διάθεση του κατσίγαρου στο υπάρχον αποχετευτικό δίκτυο και ταυτόχρονα υπάρχει αυστηρή νομοθεσία για την διάθεση του σε φυσικούς αποδέκτες.

Πίνακας 1. Φυσικές και χημικές παράμετροι υγρών αποβλήτων ελαιοτριβείων

Παράμετροι	Τιμές
pH (Görmez et al., 2020)	4,5-5,8
COD (g O <sub>2</sub> /L) (Solomakou and Goula, 2021)	30-320

Παράμετροι	Τιμές
BOD <sub>5</sub> (g O <sub>2</sub> /L) 2(Solomakou and Goula, 2021)	35-132
Total Phenols (g/L) (Görmez et al., 2020)	1-10
TSS (g/L) (Mert et al., 2010)	24-120

Επιπλέον, τα χαρακτηριστικά αυτά, καθιστούν τον κασίγαρο δύσκολο απόβλητο προς επεξεργασία, το οποίο δεν μπορεί να επεξεργαστεί στις συνήθεις εγκαταστάσεις επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. Οι κυριότερες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία του κασίγαρου είναι είτε μηχανικές, όπως η διήθηση και η φυγοκέντρωση, είτε θερμικές, όπως κάυση-πυρόλυση ή και λίμνες εξάτμισης (lagooning), είτε βιολογικές, όπως οι τεχνητοί υγροβιότοποι. Στην Ελλάδα, επικρατεί έλλειψη εγκαταστάσεων επεξεργασίας για τη χρήση των παραπάνω μεθόδων και η επικρατέστερη μέθοδος, ιδιαίτερα στην Κρήτη, είναι αυτή των λιμνών εξάτμισης ή εξατμισοδεξαμενών. Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι οικονομική και πρακτική για τους ελαιοπαραγωγούς, ωστόσο, παρουσιάζει πολλά μειονεκτήματα, όπως η έντονη δυσοσμία, οι υψηλές εκπομπές μεθανίου, η ρύπανση του εδάφους, αλλά ακόμα και η μόλυνση του επιφανειακού και υπόγειου νερού και γενικά του υδροφόρου ορίζοντα (Paraskeva and Diamadoroulos, 2006). Γι'αυτόν τον λόγο, είναι αναγκαίο να βρεθεί μία πιο βιώσιμη, οικονομικά, κοινωνικά αλλά και περιβαλλοντικά, λύση.

Μία καινοτόμος και φιλική προς το περιβάλλον μέθοδος διαχείρισης αποτελεί η επεξεργασία του κασίγαρου σε τεχνητούς υγροβιότοπους (Constructed Wetlands). Κυρίως, διότι βασίζεται σε φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες μέσω φυτών, μικροοργανισμών και υλικών οι οποίες λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό των υγροβιότοπων. Δεν απαιτείται δηλαδή χρήση χημικών συστατικών ή εντατική χρήση ενέργειας για την επεξεργασία του κασίγαρου. Επιπλέον, είναι μία απόλυτα οικονομική μέθοδος, καθώς δεν απαιτεί σημαντικά λειτουργικά έξοδα και έξοδα συντήρησης των υγροβιότοπων. Αξιοσημείωτο είναι πως η μέθοδος αυτή συμβάλει ακόμα και στην αιεφόρο ανάπτυξη της εκάστοτε περιοχής, προωθώντας τη δημιουργία νέων οικοσυστημάτων που λειτουργούν προς όφελος του περιβάλλοντος. Η προσέγγιση αυτή, λοιπόν, προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα προς όφελος της καταστολής σημαντικών περιβαλλοντικών



επιπτώσεων που συνδέονται με την διάθεση του υγρού αυτού αποβλήτου στο περιβάλλον (Yang, Chang, Huang, 2001) (Kadlec , Knight, 1996) (Vymazal J, 2007).

## Κεφάλαιο 2 – Θεωρητικό Υπόβαθρο

### 2.1 Υγροβιότοποι

#### 2.1.1. Φυσικοί Υγροβιότοποι

Οι υγροβιότοποι αποτελούν ένα από τα πιο πολύτιμα και πολυδιάστατα οικοσυστήματα του πλανήτη, αφού οι επικρατούσες συνθήκες σε αυτούς ευνοούν σημαντικά την βιοποικιλότητα. Οι υγροβιότοποι, χαρακτηρίζονται από μόνιμη ή εποχιακή παρουσία νερού και συνήθως αποτελούνται από έλη, λίμνες, ποτάμια, εκβολές και άλλους υδάτινους χώρους. Κατέχουν σημαντικό ρόλο στη διατήρηση της βιοποικιλότητας, αλλά και στη δέσμευση εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου, συμβάλλοντας στην αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Ωστόσο, εξαιτίας συνεχών εξωτερικών ανθρωπογενών δραστηριοτήτων, όπως η αποξήρανση για γεωργικές χρήσεις και η ρύπανση του εδάφους και η ρύπανση από γεωργικές απορροές των επιφανειακών νερών και του υδροφόρου ορίζοντα πολλοί υγροβιότοποι απειλούνται, καθιστώντας αναγκαία πλέον την διατήρηση και την αποκατάστασή τους (Verhoeven et al., 2006).

Είναι πολύ σημαντικό, πως οι φυσικοί υγροβιότοποι δύναται να αφαιρέσουν θρεπτικά στοιχεία που προκαλούν ευτροφισμό στις υδάτινες μάζες, μειώνοντας έτσι την ρύπανση τους (Ramsar Convention Secretariat, 2016). Φυσικά, η ύπαρξη φυτών στους υγροβιότοπους, όπως των καλαμιών ή και των νούφαρων, συμβάλει στην πρόσληψη θρεπτικών συστατικών, που μπορούν να οδηγήσουν το σύστημα σε ρύπανση. Αυτό βοηθά στην εξισορρόπηση των θρεπτικών στοιχείων στο υδάτινο περιβάλλον, προλαμβάνοντας την υπερανάπτυξη άλγεων και άλλων ανεπιθύμητων οργανισμών.

#### 2.1.2. Τεχνητοί Υγροβιότοποι και Επεξεργασία Λυμάτων

Οι τεχνητοί υγροβιότοποι είναι κατασκευασμένα συστήματα που σκοπός τους είναι να προσομοιώσουν τις λειτουργίες των φυσικών υγροβιότοπων. Είναι λοιπόν, σχεδιασμένοι με

τέτοιο τρόπο, ώστε να μπορούν να επεξεργάζονται υγρά απόβλητα (Vymazal, 2011). Τα τελευταία χρόνια, χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση ρύπων διάφορων πηγών αποβλήτων όπως λυμάτων ή και βιομηχανικών αποβλήτων, που χαρακτηρίζονται από υψηλό οργανικό φορτίο. Επίσης, σε γεωργικές περιοχές για την επεξεργασία απορροών, οι οποίες είναι πλούσιες σε λιπάσματα και φυτοφάρμακα (Kadlec & Wallace, 2009).

#### *2.1.2.1. Τύποι Τεχνητών Υγροβιότοπων*

Με βάση την ροή του νερού, οι τεχνητοί υγροβιότοποι διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τους υγροβιότοπους Υπόγειας Ροής και τους υγροβιότοπους Επιφανειακής Ροής. Κάθε κατηγορία έχει τα δικά της χαρακτηριστικά και εφαρμογές, ενώ η κατηγορία των υγροβιότοπων Υπόγειας Ροής αποτελείται από δύο ακόμα τύπους συστήματος: ο πρώτος είναι Κατακόρυφης Ροής και ο δεύτερος Οριζόντιας Ροής. Υπάρχουν επίσης και τα υβριδικά συστήματα, τα οποία συνδυάζουν χαρακτηριστικά από διαφορετικούς τύπους με στόχο την βέλτιστη επεξεργασία των υγρών αποβλήτων.

Πιο αναλυτικά, τα συστήματα Επιφανειακής Ροής παρομοιάζονται με φυσικά έλη, όπου το νερό ρέει ελεύθερα πάνω από την επιφάνεια του εδάφους και έρχεται σε άμεση επαφή με την ατμόσφαιρα. Το νερό κυκλοφορεί μέσα από φυτά, επιτρέποντας φυσικές διεργασίες καθαρισμού, όπως η καθίζηση και η απομάκρυνση θρεπτικών συστατικών. Ως σύστημα παρουσιάζει υψηλή αισθητική αξία και συμβολή στη βιοποικιλότητα. Χρησιμοποιούνται κυρίως για την διαχείριση νερού σε αστικά περιβάλλοντα ή για τον καθαρισμό αποβλήτων από γεωργικές δραστηριότητες (Kadlec & Wallace, 2009).

Στα συστήματα Υπόγειας Ροής, το νερό ή το υγρό απόβλητο, εισρέει κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, μέσα από το υπόστρωμα και τις ρίζες των φυτών, χωρίς να είναι εκτεθειμένο στην ατμόσφαιρα. Στην υποκατηγορία των Κάθετης Ροής συστημάτων, το νερό ή το υγρό απόβλητο ρέει κάθετα, μέσα από το υπόστρωμα, επιτυγχάνοντας με αυτό τον τρόπο την καλύτερη οξυγόνωση του, η οποία ευνοεί την βιοαποικοδόμηση των ρύπων. Το σύστημα αυτό είναι ιδιαίτερα αποδοτικό για την απομάκρυνση αζώτου και οργανικών ρύπων (Vymazal, 2007). Απ' την άλλη πλευρά, στα συστήματα Οριζόντιας Ροής, το νερό ή το υγρό απόβλητο, ρέει οριζόντια, μέσα από το υπόστρωμα, το οποίο περιλαμβάνει κάποια πληρωτικά υλικά και τις ρίζες των

φυτών. Το σύστημα αυτό είναι κατάλληλο για την απομάκρυνση οργανικών ρύπων και παθογόνων από τα λύματα (Vymazal, 2010). Φυσικά, σημαντική είναι και η ύπαρξη υβριδικών συστημάτων, τα οποία συνδυάζουν χαρακτηριστικά κατακόρυφων και οριζόντιων ροών, δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο, ένα ολοκληρωμένο σύστημα επεξεργασίας που εκμεταλλεύεται τις δυνατότητες και των δύο τύπων. Αυτό επιτρέπει την πιο ολοκληρωμένη απομάκρυνση ρύπων και παθογόνων, ενώ παράλληλα προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία στον σχεδιασμό (Brix, 1994; Cooper et al., 1996).

#### *2.1.2.2. Βλάστηση Τεχνητών Υγροβιότοπων*

Η βλάστηση στους τεχνητούς υγροβιότοπους διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη διαδικασία επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων. Η ύπαρξη φυτών στους τεχνητούς υγροβιότοπους όχι μόνο βελτιώνει την αισθητική και την οικολογική αξία του συστήματος, αλλά λειτουργεί και ως μηχανισμός παρέχοντας κρίσιμες υπηρεσίες, όπως την αποφόρτιση των υγρών αποβλήτων, την σταθεροποίηση του υποστρώματος και την ευνόηση βιολογικών διεργασιών (Gikas et al., 2018) (Riggio et al., 2018). Παρακάτω περιγράφονται οι βασικοί ρόλοι της βλάστησης καθώς και τα είδη που χρησιμοποιούνται συχνά.

Συγκεκριμένα, τα φυτά δύνανται να φιλτράρουν και να απομακρύνουν τους ρύπους από το υγρό, αφού συμβάλουν στην μηχανική απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών των αποβλήτων, ενώ οι ρίζες τους αποτελούν επιφάνειες στις οποίες γίνεται πρόσληψη θρεπτικών συστατικών και βαρέων μετάλλων, όπως ο φώσφορος και το άζωτο. Επιπλέον, βοηθούν την οξυγόνωση του υποστρώματος, ενισχύοντας με αυτόν τον τρόπο τις αερόβιες μικροβιακές διεργασίες που διασπούν τους ρύπους (Brix, 1997; Tanner, 1996). Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως τα φυτά αυτά μειώνουν την ταχύτητα ροής του νερού και των υγρών αποβλήτων, παρέχοντας ευνοϊκές συνθήκες για τη μικροβιακή αποδόμηση οργανικών ρύπων. Παράλληλα, προσφέρουν και σκίαση, μείωση της θερμοκρασίας και προστασία από την εξάτμιση του νερού (Vymazal, 2011; Kadlec & Wallace, 2009). Τέλος, η βλάστηση, γενικά, προσελκύει συχνά πουλιά, έντομα και άλλους οργανισμούς, συμβάλλοντας έτσι στην αύξηση της βιοποικιλότητας στους τεχνητούς υγροβιότοπους.

Στους τεχνητούς υγροβιότοπους, η βλάστηση αποτελείται κυρίως από υδροχαρή ή υδρόβια μακρόφυτα. Τα μακρόφυτα, είναι φυτά που ζουν σε υγρό περιβάλλον. Η επιλογή του είδους φυτών που θα φυτευθεί στον υγροβιότο, εξαρτάται από τον τύπο του, αλλά και τους στόχους επεξεργασίας, ενώ είναι ταυτόχρονα πολύ σημαντική, καθώς ενισχύει τη συνολική αποδοτικότητα του συστήματος. Τα μακρόφυτα στους τεχνητούς υγροβιότοπους ανήκουν σε συγκεκριμένες οικογένειες φυτών, που είναι κατάλληλες για υγρό περιβάλλον και υποστηρίζουν τις διαδικασίες καθαρισμού του νερού.

Αρχικά, στην οικογένεια *Poaceae* (Γραμίνες), ανήκουν τα καλάμια *Phragmites australis*, ένα από τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα φυτά στους τεχνητούς υγροβιότοπους. Χαρακτηρίζεται από υψηλή ανθεκτικότητα, τόσο στις περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν όσο και στους φυτοτοξικούς ρύπους και αναπτύσσεται σε υγρές συνθήκες, προσφέροντας μεγάλες επιφάνειες δέσμευσης ρύπων, ενώ παίζει σημαντικό ρόλο στη σταθεροποίηση του εδάφους και την πρόσληψη θρεπτικών συστατικών (Brix, 1997; Vymazal, 2011).



Εικόνα 2. *Phragmites australis* (Wikimedia Commons)

Όσον αφορά τα καλάμια *P. Australis*, τα φυσικά χαρακτηριστικά τους έχουν μελετηθεί εκτενώς, ώστε να προσδιοριστεί η ικανότητα τους να φυτευθούν σε τεχνητούς υγροβιότοπους, όπου θα επεξεργάζονται υγρά απόβλητα και θα απομακρύνουν τους ρύπους. Πρόκειται για ένα πολυετές

φυτό που μπορεί να αναπτυχθεί έως τα 2-4 μέτρα σε ύψος, ενώ σε ιδανικές συνθήκες μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 6 μέτρα. Το εκτεταμένο ριζικό σύστημα του, είναι υπεύθυνο για την ταχεία εξάπλωση του φυτού στους υγροβιότοπους, βοηθώντας με αυτόν τον τρόπο την σταθεροποίηση του εδάφους και την αποτροπή διάβρωσης (Haslam S. M., 1972). Ταυτόχρονα, το υπόγειο ριζικό σύστημα του εκτείνεται σε μεγάλο βάθος και πλάτος, καθιστώντας το φυτό ιδιαίτερα ανθεκτικό σε αντίξοες συνθήκες. Το ριζικό σύστημα αυτό προσλαμβάνει θρεπτικά συστατικά, ενώ συμβάλλει και στη διήθηση των ρύπων (Vymazal J., 2007). Τα φύλλα του έχουν μεγάλο μήκος που φτάνει τα 50 εκατοστά, μικρό πλάτος και λογχοειδές σχήμα. Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού ανθίζει έντονα παράγοντας πυκνά θυσάνια με χρώμα από μπεζ έως καφέ.

Μία ακόμη οικογένεια είναι η *Cyperaceae* (Σκίρποι και Βούρλα), στην οποία ανήκουν τα *Schoenoplectus spp.* (Σκίρπος), που είναι μακρόβια φυτά με ριζικό σύστημα, που βοηθά στην απομάκρυνση οργανικών ουσιών, αλλά και την καθίζηση των αιωρούμενων. Χρησιμοποιούνται συχνά σε συστήματα κατακόρυφης και οριζόντιας ροής στερεών (Kadlec & Wallace, 2009). Επίσης, στην ίδια οικογένεια ανήκουν και τα *Cyperus spp.* (Σκίρπος ή Πάπυρος), τα οποία προσαρμόζονται εύκολα σε διαφορετικές συνθήκες υγρασίας και χρησιμοποιούνται και αυτά συχνά στην επεξεργασία νερού και την απομάκρυνση ρύπων (Brix, 1997).

Η οικογένεια *Typhaceae* (Καλάμια), στην οποία ανήκουν τα *Typha spp.*, κοινά υδροχαρή φυτά που τοποθετούνται σε τεχνητούς υγροβιότοπους και απομακρύνουν αποτελεσματικά ρύπους όπως το άζωτο και τον φώσφορο. Πιο συχνά, χρησιμοποιούνται σε συστήματα οριζόντιας ροής και ελεύθερης επιφάνειας νερού (Tanner, 1996; Vymazal, 2013)

Τέλος, η οικογένεια *Juncaceae* (Βούρλα), στην οποία υπάρχουν τα *Juncus spp.* (Βούρλα), που χρησιμοποιούνται σε υγροβιότοπους με υπόγεια ροή, παρέχοντας αποτελεσματική πρόσληψη θρεπτικών στοιχείων και δημιουργία κατάλληλων συνθηκών για μικροβιακές διεργασίες (Kadlec & Wallace, 2009).

### 2.1.2.3. Πλήρωση Τεχνητών Υγροβιότοπων

Η πλήρωση των τεχνητών υγροβιότοπων διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη λειτουργικότητά τους, καθώς καθορίζει τις ιδιότητες διήθησης, απομάκρυνσης ρύπων αλλά και της ανάπτυξη των φυτών (Mlih et al., 2020). Στους τεχνητούς υγροβιότοπους χρησιμοποιούνται διάφορα

πληρωτικά υλικά, καθένα από τα οποία έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και οφέλη. Στο υπόστρωμα που δημιουργούν τα υλικά αυτά, αναπτύσσεται το ριζικό σύστημα της βλάστησης και δημιουργείται βιοφίλμ, το οποίο αποτελεί στρώμα μικροοργανισμών που αποδομούν οργανικές ουσίες, αφαιρούν θρεπτικά στοιχεία, όπως το άζωτο και ο φώσφορος, και συμβάλλουν στην απομάκρυνση ρύπων από τα λύματα.

Αρχικά, τα υλικά που χρησιμοποιούνται πιο συχνά ως πληρωτικά σε τεχνητούς υγροβιότοπους, αποτελούν φυσικά ορυκτά υλικά, όπως το χαλίκι, η άμμος και ο ζεόλιθος. Είναι προφανές πως τα υλικά αυτά είναι εύκολα διαθέσιμα, οικονομικά και ταυτόχρονα αποτελεσματικά στην επεξεργασία νερού ή υγρών αποβλήτων. Συγκεκριμένα, το χαλίκι αποτελεί ένα από τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα υλικά, ιδιαίτερα σε πιλοτικές μονάδες υγροβιότοπων (Gikas et al., 2018). Ο ζεόλιθος, επίσης, είναι ένα ορυκτό με πορώδη δομή και ικανότητα ανταλλαγής ιόντων. Χρησιμοποιείται συχνά, γιατί διαθέτει εξαιρετική ικανότητα να προσροφά ρύπους και θρεπτικά στοιχεία, συμβάλλοντας στην απορρύπανση του νερού. Επιπλέον, βοηθά ενεργά και στην ρύθμιση του pH αλλά και στην απομάκρυνση βαρέων μετάλλων (Montalvo, 2020). Γενικά, τα ορυκτά υλικά ως υποστρώματα είναι αποτελεσματικά στους τεχνητούς υγροβιότοπους λόγω της υψηλής προσροφητικής τους ικανότητας, ενώ τα οργανικά υποστρώματα υποστηρίζουν την προσαρμογή και την ανάπτυξη των φυτών, παρέχοντας τους οργανική ύλη και τα απαραίτητα θρεπτικά συστατικά (Fraser et al., 2004; Wang et al., 2010).

Ένα πιο σύγχρονο πληρωτικό υλικό που χρησιμοποιείται σε τεχνητούς υγροβιότοπους, είναι τα ανακυκλωμένα υλικά. Τα τελευταία χρόνια έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούνται υλικά όπως σκωρίες (slag) ή ακόμα και ανακυκλωμένα προϊόντα πλαστικού (όπως HDPE), τα οποία προσφέρουν φθηνές και βιώσιμες λύσεις (García, Rousseau et al., 2010).

Επιπλέον, το LECA (Lightweight Expanded Clay Aggregate) είναι ένα ελαφρύ υλικό που παράγεται μέσω της επεξεργασίας πηλού σε υψηλές θερμοκρασίες, δημιουργώντας μικρές πορώδεις σφαίρες διογκωμένου αργίλου. Η πορώδης δομή του LECA διευκολύνει την αποστράγγιση του νερού και τη συγκράτηση υγρασίας. Επίσης, παρέχει στήριξη για την ανάπτυξη του ριζικού συστήματος των φυτών, βελτιώνοντας τη βιοποικιλότητα του οικοσυστήματος.

Τα πληρωτικά υλικά, λοιπόν, επιλέγονται με βάση τις ανάγκες της επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων και τον τύπο των ρύπων που πρέπει να απομακρυνθούν.

### 2.1.3. Υγρά Απόβλητα Ελαιοτριβείου

Τα υγρά απόβλητα ελαιοτριβείου (ΥΑΕ) είναι παραπροϊόν της διαδικασίας παραγωγής ελαιολάδου. Ο κασίγαρος, δηλαδή τα υγρά απόβλητα ελαιοτριβείου (ΥΑΕ), αποτελείται κυρίως από νερό (83–94%), οργανική ύλη, και ανόργανα συστατικά. Οι κυριότερες οργανικές ενώσεις περιλαμβάνουν πολυφαινόλες, λιπαρά οξέα, σάκχαρα, πρωτεΐνες και οργανικά οξέα, ενώ οι ανόργανες ενώσεις περιλαμβάνουν θρεπτικά συστατικά όπως φώσφορο και άζωτο. Το COD (Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο) των ΥΑΕ είναι εξαιρετικά υψηλό λόγω της συγκέντρωσης των οργανικών ενώσεων, ενώ το pH κυμαίνεται συνήθως από 4 έως 5, λόγω των οργανικών οξέων. Η παρουσία πολυφαινολών, όπως το υδροξυτυροσόλη και η τυροσόλη, καθιστούν τον κασίγαρο ιδιαίτερα τοξικό για το περιβάλλον, καθώς αυτές οι ενώσεις έχουν αντιμικροβιακές ιδιότητες που επηρεάζουν τη μικροβιακή δραστηριότητα στο έδαφος και τα υδάτινα οικοσυστήματα (Sygouni, Chrysikou et al).

### 2.1.4 Ισχύουσα Νομοθεσία

Η διαχείριση των υγρών αποβλήτων από τα ελαιοτριβεία στην Ελλάδα είναι ένα ζήτημα που έχει λάβει ιδιαίτερη προσοχή λόγω της έντονης ρύπανσης που προκαλούν τα απόβλητα αυτά, τα οποία είναι πλούσια σε οργανική ύλη, φαινολικές ενώσεις και άλλα επιβλαβή συστατικά. Η διαχείρισή τους και η νομοθεσία γύρω από αυτήν έχουν εξελιχθεί σημαντικά τις τελευταίες δεκαετίες, με στόχο τη μείωση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης και την προστασία των υδάτινων πόρων.

Συγκεκριμένα, τα παλαιότερα χρόνια, πριν το 2000, η διάθεση των αποβλήτων γινόταν ανεξέλεγκτα, χωρίς ιδιαίτερη επεξεργασία, όπως η απόρριψη τους σε φυσικούς αποδέκτες (ποτάμια, λίμνες, θάλασσα). Ωστόσο, η αυξημένη ρύπανση των υδάτων, δημιούργησε την ανάγκη για επιτακτικές αλλαγές όσον αφορά τη νομοθεσία και τα όρια διάθεσης των υγρών αποβλήτων αυτών.



Τα τελευταία χρόνια, η νομοθεσία έχει αυστηροποιηθεί. Υπάρχουν πλέον κανονισμοί που απαιτούν την προεπεξεργασία των αποβλήτων αυτών πριν από τη διάθεσή τους, καθώς και η χρήση φιλικών προς το περιβάλλον πρακτικών επεξεργασίας.

Συγκεκριμένα, η ευρωπαϊκή νομοθεσία για τη διάθεση υγρών αποβλήτων από ελαιοτριβεία εντάσσεται κυρίως στο πλαίσιο της προστασίας των υδάτων και της βιώσιμης διαχείρισης αποβλήτων. Οι κύριες οδηγίες και κανονισμοί που ισχύουν είναι οι εξής:

- ✓ Οδηγία Πλαίσιο για τα Νερά (2000/60/ΕΚ), η οποία ορίζει το γενικό πλαίσιο για την προστασία και τη διαχείριση των υδατικών πόρων στην ΕΕ. Ιδιαίτερα, καθορίζει ότι όλα τα υγρά απόβλητα, περιλαμβανομένων εκείνων από τα ελαιοτριβεία, πρέπει να υποβάλλονται σε επεξεργασία για την αποφυγή ρύπανσης των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων.
- ✓ Οδηγία 91/271/ΕΟΚ για την Επεξεργασία Αστικών Λυμάτων, η οποία αν και εστιάζει στα αστικά λύματα, εφαρμόζεται σε περιπτώσεις όπου απόβλητα από βιομηχανικές δραστηριότητες, όπως τα ελαιοτριβεία, συνδέονται με αστικά συστήματα επεξεργασίας.
- ✓ Οδηγία 2008/98/ΕΚ για τα Απόβλητα (Waste Framework Directive), η οποία περιλαμβάνει γενικές αρχές για τη διαχείριση αποβλήτων, όπως την ιεράρχηση (μείωση, επαναχρησιμοποίηση, ανακύκλωση) και την ευθύνη του παραγωγού για την κατάλληλη διάθεση.
- ✓ Οδηγία 2010/75/ΕΕ για τις Βιομηχανικές Εκπομπές (Industrial Emissions Directive), η οποία καθορίζει πρότυπα για την πρόληψη και τον έλεγχο της ρύπανσης από βιομηχανικές δραστηριότητες, περιλαμβάνοντας την επεξεργασία αποβλήτων.

Είναι προφανές ότι τα κράτη μέλη είναι υπεύθυνα για τη μεταφορά των οδηγιών αυτών στο εθνικό τους δίκαιο και για την ανάπτυξη εξειδικευμένων προγραμμάτων για τη διαχείριση αποβλήτων. Στην Ελλάδα, η νομοθεσία για τα υγρά απόβλητα εναρμονίζεται με αυτές τις ευρωπαϊκές οδηγίες, ενισχύοντας τις απαιτήσεις για επεξεργασία και επαναχρησιμοποίηση. Συγκεκριμένα ισχύουν τα εξής:

- ✓ Η Οδηγία (2000/60/ΕΚ) ενσωματώθηκε με τον Νόμο 3199/2003 («Προστασία και Διαχείριση Υδατικών Πόρων») και την ΚΥΑ 43504/2005, που καθορίζουν τους κανόνες για



την πρόληψη και τον έλεγχο της ρύπανσης των υδάτων από βιομηχανικές δραστηριότητες, συμπεριλαμβανομένων των ελαιοτριβείων.

- ✓ Η Οδηγία 91/271/ΕΟΚ ενσωματώθηκε με την ΚΥΑ 5673/400/1997, η οποία περιλαμβάνει πρόνοιες για τη διαχείριση υγρών αποβλήτων από μικρές βιομηχανικές μονάδες που συνδέονται με συστήματα αστικής επεξεργασίας.
- ✓ Η Οδηγία 2008/98/ΕΚ ενσωματώθηκε μέσω του Νόμου 4042/2012, ο οποίος θέτει τις αρχές της κυκλικής οικονομίας και ενισχύει την ευθύνη των παραγωγών αποβλήτων για την ασφαλή διαχείρισή τους.
- ✓ Η Οδηγία 2010/75/ΕΕ ενσωματώθηκε με τον Νόμο 4014/2011 και την ΚΥΑ 36060/1155/Ε.103/2013, που ρυθμίζουν τις απαιτήσεις για την περιβαλλοντική αδειοδότηση βιομηχανικών δραστηριοτήτων, συμπεριλαμβανομένων των ελαιοτριβείων.

*Πίνακας 2: Οριακές τιμές παραμέτρων για διάθεση ΥΑ σε διάφορους αποδέκτες<sup>1</sup>*

Παράμετρος	Θάλασσα	Έδαφος	Αποχετευτικό Σύστημα	Επιφανειακά Νερά
pH	6,5 - 8,5	6,5 - 9,0	6,5 - 9,5	6,5 - 8,5
BOD (mg/L)	< 25	< 100	< 250	< 25
COD (mg/L)	< 125	< 150	< 500	< 125
TSS (mg/L)	< 35	< 50	< 200	< 35
Φαινόλες (mg/L)	< 0,5	< 1,0	< 2,0	< 0,5
TN (mg/L)	< 10	< 15	< 50	< 15

Οι παραπάνω νομοθετικές ενέργειες αποσκοπούν στη βιώσιμη διαχείριση των υγρών αποβλήτων, την προστασία των υδάτινων πόρων και τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

<sup>1</sup> Οι αναγραφόμενες οριακές τιμές πηγάζουν από τον επίσημο ιστότοπο της Ευρωπαϊκής Ένωσης ([https://european-union.europa.eu/index\\_en](https://european-union.europa.eu/index_en)) και τις ΚΥΑ της εθνικής νομοθεσίας (kodiko.gr)

### 2.1.5 Στόχος διπλωματικής

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η κατασκευή και αξιολόγηση πιλοτικών μονάδων τεχνητών υδροβιότοπων, με χρήση διαφορετικών πληρωτικών υλικών και βλάστησης, για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων ελαιοτριβείου και βασικός της στόχος είναι η διερεύνηση της αποδοτικότητας αυτών των συστημάτων όσον αφορά την απομάκρυνση ρύπων και η σύγκριση των επιδόσεων των διαφορετικών τεχνητών υδροβιότοπων με διαφορετικά πληρωτικά υλικά και τη βλάστηση.

Η ανάγκη για τέτοιου είδους μελέτες είναι επιτακτική, καθώς η επεξεργασία των υγρών αποβλήτων από ελαιοτριβεία είναι κρίσιμη για την προστασία του περιβάλλοντος και το πρόβλημα αυτό είναι ιδιαίτερα έντονο στην Ελλάδα, στην οποία πραγματοποιείται μεγάλη παραγωγή ελαιολάδου και άρα υγρών αποβλήτων ελαιοτριβείου. Τα απόβλητα αυτά περιέχουν ρύπους που μπορούν να προκαλέσουν σοβαρή ρύπανση των υδάτων και της βιοποικιλότητας. Οι τεχνητοί υδροβιότοποι προσφέρουν μια βιώσιμη λύση με χαμηλό κόστος, χρησιμοποιώντας φυσικές και βιολογικές διαδικασίες για την αποδόμηση των ρύπων.

## Κεφάλαιο 3 – Πειραματική Διαδικασία

### 3.1. Περιεχόμενο τεχνητών υγροβιότοπων και ΥΑΕ

#### 3.1.1. ΥΑΕ

Για τον σκοπό του πειράματος, συλλέχθηκε υγρό απόβλητο ελαιοτριβείου, από τριφασικό ελαιοτριβείο που λειτουργεί στην περιοχή των Περιβολίων στα Χανιά, και συγκεκριμένα από το Koukakis Group. Το απόβλητο αυτό παρήχθη κατά την ελαιοκομική περίοδο του Οκτωβρίου έως Ιανουαρίου του 2023. Αφού συλλέχθηκε, αποθηκεύτηκε σε βυτία με όγκο 1 m<sup>3</sup>, τα οποία τοποθετήθηκαν πλησίον της πειραματικής διάταξης.



Εικόνα 3: Βυτίο Αποθήκευσης ΥΑΕ

#### 3.1.2. Βλάστηση

Για την επεξεργασία ΥΑΕ στις τρεις από τις τέσσερις μονάδες του πειράματος, με εξαίρεση δηλαδή την μονάδα Control, επιλέχθηκε να φυτευτεί το κοινό καλάμι *Phragmites australis*, το οποίο εντοπίζεται σε αρκετές περιοχές φυσικών υγροβιότοπων των Χανίων. Το φυτό αυτό παρουσιάζει υψηλή αντοχή και αποτελεσματικότητα στην απομάκρυνση ρύπων. Αναπτύσσει ένα αρκετά εκτεταμένο ριζικό σύστημα το οποίο υποστηρίζει την αποδόμηση οργανικών ρύπων μέσω αερόβιων και αναερόβιων διεργασιών. Απορροφά βαρέα μέταλλα και οργανικές ενώσεις

από τα απόβλητα, ενώ η μεγάλη του ανάπτυξη το καθιστά ανθεκτικό ακόμα και σε πολύ υψηλά ρυπαντικά φορτία. Επιπλέον, έχει υψηλή ικανότητα προσαρμογής σε περιοχές με έντονα μεταβαλλόμενο κλίμα, επιτρέποντας του να αναπτύσσεται σε ποικιλία περιβαλλόντων με διαφορετικά επίπεδα οξυγόνου και νερού και έχει υψηλή αντοχή ακόμα και σε ακραίες καιρικές συνθήκες, λόγω της ανθεκτικότητάς του σε ποικίλες θερμοκρασίες, ξηρασία, πλημμύρες, αλλά ακόμα και σε αλμυρό νερό (Lu et al., 2018; Vymazal, 2011).

### 3.1.3. Πληρωτικά Υλικά

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, τα υλικά που κρίθηκε καταλληλότερο να χρησιμοποιηθούν για την πλήρωση των ΤΥ είναι ο ζεόλιθος, το Ieca, το ανακυκλωμένο πλαστικό και το βιοεξανθράκωμα.

#### 3.1.3.1. Ζεόλιθος

Ο ζεόλιθος είναι ένα κρυσταλλικό αργιλοπυριτικό υλικό με υψηλή επιφάνεια και εξαιρετικές ιδιότητες προσρόφησης, γεγονός που το καθιστά κατάλληλο ως πληρωτικό υλικό σε τεχνητούς υγροβιότοπους για την επεξεργασία αποβλήτων. Η μικροπορώδης δομή του ζεόλιθου βοηθά στην απομάκρυνση αμμωνίας, φωσφόρου και βαρέων μετάλλων από τα λύματα, λειτουργώντας έτσι ως φίλτρο για τον έλεγχο της ρύπανσης (Hossain & Nayan, 2017). Επιπλέον, ο ζεόλιθος έχει υψηλή ανθεκτικότητα σε ακραίες κλιματολογικές συνθήκες και συμβάλλει στην ανάπτυξη των μικροοργανισμών που ευθύνονται για την αποικοδόμηση των οργανικών ρύπων στους υγροβιότοπους. Η ικανότητά του να ανταλλάσσει ιόντα, όπως την δέσμευση αμμωνίας και την αντικατάστασή της με άλλα ιόντα) ενισχύει τη βιολογική διεργασία καθαρισμού των υδάτων, προσφέροντας αποτελεσματική λύση για την απομάκρυνση των ρύπων (Jiang et al., 2012).



*Εικόνα 4. Απεικόνιση φυσικού ζεόλιθου*

Για τον σκοπό του πειράματος αυτού, το υλικό leca προμηθεύτηκε από φυτώριο των Χανίων.

Το πορώδες του ζεόλιθου που χρησιμοποιήθηκε μετρήθηκε με εργαστηριακό εξοπλισμό και είναι ίσο με 48%.

#### *3.1.3.2. Leca*

Το υλικό LECA (Light Expanded Clay Aggregate) είναι διογκωμένη άργιλος που χρησιμοποιείται συχνά ως πληρωτικό υλικό στους τεχνητούς υδροβιότοπους λόγω των ευνοϊκών φυσικών και χημικών του χαρακτηριστικών. Κατασκευάζεται από πηλό, ο οποίος θερμαίνεται σε υψηλές θερμοκρασίες, με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα υλικό πορώδες, ελαφρύ και σταθερό. Αυτή η πορώδης υφή προσφέρει ουσιαστικά μεγάλες επιφάνειες για την ανάπτυξη μικροοργανισμών, συμβάλλοντας στην απομάκρυνση ρύπων μέσω βιολογικών διεργασιών (Ávila et al., 2017). Επιπλέον, το LECA προσφέρει καλή αποστράγγιση και αερισμό, βοηθώντας τη διατήρηση της υδατοπερατότητας και την αποφυγή της συμπίεσης στο υπόστρωμα των υδροβιοτόπων. Εξαιτίας αυτών των ιδιοτήτων, προτιμάται σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλή απόδοση στην επεξεργασία αποβλήτων και σταθερότητα στις συνθήκες υγρασίας (Stefanakis et al., 2014).



*Εικόνα 5. Απεικόνιση διογκωμένου αργίλου (leca)*

Για τον σκοπό του πειράματος αυτού, το υλικό leca προμηθεύτηκε από φυτώριο των Χανίων.

Το πορώδες του διογκωμένου πηλού που χρησιμοποιήθηκε μετρήθηκε με εργαστηριακό εξοπλισμό και είναι ίσο με 53%.

#### *3.1.3.3. Ανακυκλωμένο Πλαστικό*

Το ανακυκλωμένο HDPE (πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας) είναι ένα είδος πλαστικού που παράγεται από πετρέλαιο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πληρωτικό υλικό σε τεχνητούς υγροβιότοπους, λόγω των ιδιοτήτων που παρουσιάζει. Η δομή του HDPE του προσδίδει υψηλή αντοχή σε υγρασία και σε ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες, καθιστώντας το υλικό αυτό κατάλληλο για την αποστράγγιση και τη σταθεροποίηση του υποστρώματος των υγροβιότοπων. (Bialowiec et al., 2014). Το HDPE παρουσιάζει επιπλέον ένα χαμηλό κίνδυνο διαρροής επικίνδυνων ουσιών, ακόμα και μετά από εκτεταμένη χρήση, ενώ ταυτόχρονα είναι ανθεκτικό στις UV ακτίνες, προσφέροντας τη δυνατότητα μακροχρόνιας χρήσης σε εξωτερικά περιβάλλοντα. Φυσικά, ως ανακυκλωμένο υλικό, συμβάλλει σημαντικά στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος, προσφέροντας έναν βιώσιμο τρόπο χρήσης πλαστικών αποβλήτων σε κατασκευές και εφαρμογές διαχείρισης νερού και υγρών αποβλήτων (Samsó et al., 2016).

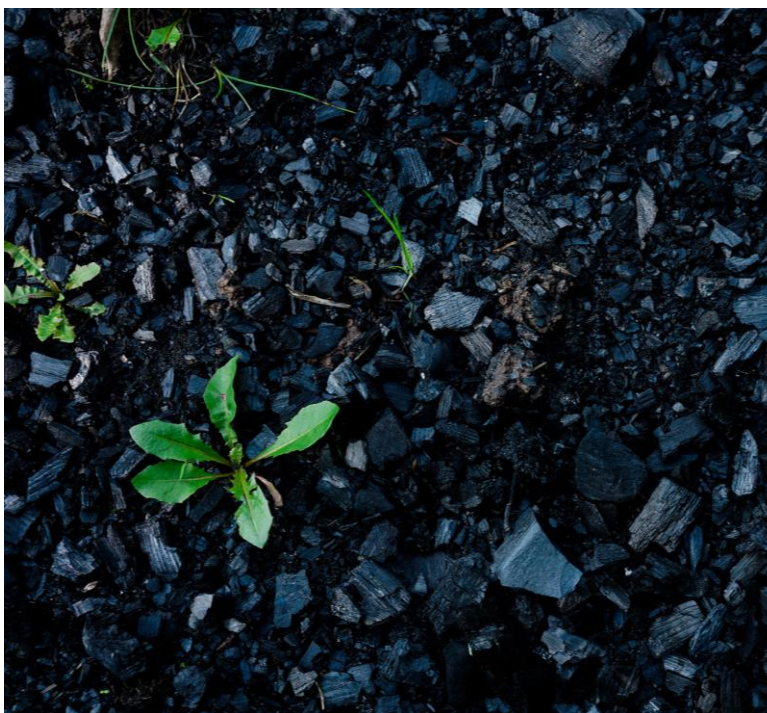


Για τον σκοπό του πειράματος, χρησιμοποιήθηκαν δύο είδη ανακυκλωμένου HDPE, με διαφορετικό μέγεθος και συγκεκριμένα τα HX38 Biocarrier και HX25KLL Biocarrier που παρέχονται από την Εταιρία Christian Stöhr GmbH & Co. KG.

Το πορώδες των πλαστικών που χρησιμοποιήθηκαν μετρήθηκε με εργαστηριακό εξοπλισμό και είναι ίσο με 94%.

#### *3.1.3.4. Βιοεξανθράκωμα*

Το βιοεξανθράκωμα ή αλλιώς biochar, είναι ένα ιδιαίτερα αποτελεσματικό πληρωτικό υλικό για τεχνητούς υγροβιότοπους, καθώς διαθέτει πορώδη δομή και μεγάλη ειδική επιφάνεια, η οποία επιτρέπει την προσρόφηση και κατακράτηση ρύπων, όπως βαρέων μετάλλων και οργανικών ενώσεων. Η πορώδης επιφάνεια του βιοάνθρακα δημιουργεί ευνοϊκές συνθήκες για την ανάπτυξη μικροοργανισμών, οι οποίοι θα διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στη βιοαποδόμηση των ρύπων και την ενίσχυση του βιοφίλμ που πρόκειται να αναπτυχθεί. Το υλικό αυτό συμβάλλει επίσης και στη σταθερότητα του pH και αυξάνει την ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων, διευκολύνοντας έτσι την απομάκρυνση θρεπτικών συστατικών και βαρέων μετάλλων από τα υγρά απόβλητα (Inyang et al., 2015; Meyer et al., 2011). Αξιοσημείωτο είναι επίσης, πως η προσθήκη του biochar σε τεχνητούς υγροβιότοπους βελτιώνει την αποδοτικότητα του συστήματος σε υψηλά οργανικά φορτία, αυξάνοντας την αποθήκευση άνθρακα και μειώνοντας τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, όπως το διοξείδιο του άνθρακα και το μεθάνιο. Αυτή η ιδιότητα καθιστά το βιοεξανθράκωμα μια περιβαλλοντικά βιώσιμη επιλογή για υγροβιότοπους που επεξεργάζονται απόβλητα με οργανικά ρυπαντικά φορτία (Yao et al., 2012).

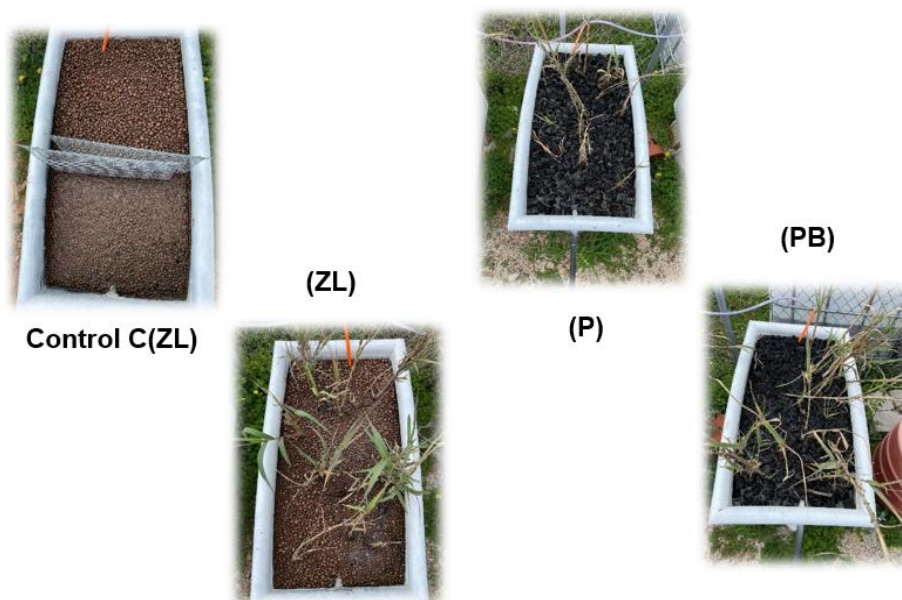


*Εικόνα 6. Απεικόνιση βιοεξανθρακώματος (biochar)*

Για τους σκοπούς του πειράματος, συλλέχθηκε βιοεξανθράκωμα (biochar) από τη διεργασία πυρόλυσης κλαδιών ελιάς, του Πολυτεχνείου Κρήτης. Αρχικά, διαχωρίστηκαν τα φύλλα και τα μικρότερα κλαδιά από το υλικό. Στη συνέχεια, τα κλαδιά κόπηκαν σε κομμάτια με διάμετρο 2-3 cm. Το υλικό στη συνέχεια αφυδατώθηκε σε φούρνο ξήρανσης στους 100°C για 48 ώρες, ώστε να απομακρυνθεί η υγρασία. Μετά από αυτό, υποβλήθηκε σε πυρόλυση σε φούρνο, όπου θερμάνθηκε στους 450 °C για μία ώρα υπό συνεχή παροχή αζώτου (N<sub>2</sub>) με ρυθμό 200 L/h. Τέλος, το προϊόν αποθηκεύτηκε σε ξηραντήρα έως ότου χρησιμοποιηθεί στους τεχνητούς υγροβιότοπους.

Το πορώδες του βιοεξανθρακώματος που χρησιμοποιήθηκε μετρήθηκε με εργαστηριακό εξοπλισμό και είναι ίσο με 66%.





Εικόνα 7. Απεικόνιση των τεχνητών υγροβιότοπων (Απρίλιος, 2023)

## 3.2. Πειραματική Διάταξη

### 3.2.1. Γενικές Πληροφορίες

Για τον σκοπό της παρούσας ερευνητικής εργασίας, κατασκευάστηκαν τέσσερις πιλοτικές μονάδες και συγκεκριμένα, τέσσερις (4) τεχνητοί υγροβιότοποι (CWs) οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής. Οι τεχνητοί υγροβιότοποι που κατασκευάστηκαν, τοποθετήθηκαν σε υπαίθριο χώρο του Πολυτεχνείου Κρήτης και ο ρόλος τους είναι να επεξεργάζονται υγρά απόβλητα ελαιοτριβείου, το οποίο χρησιμοποιεί την τριφασική μέθοδο επεξεργασίας και βρίσκεται στην περιοχή των Περιβολίων, στα Χανιά.

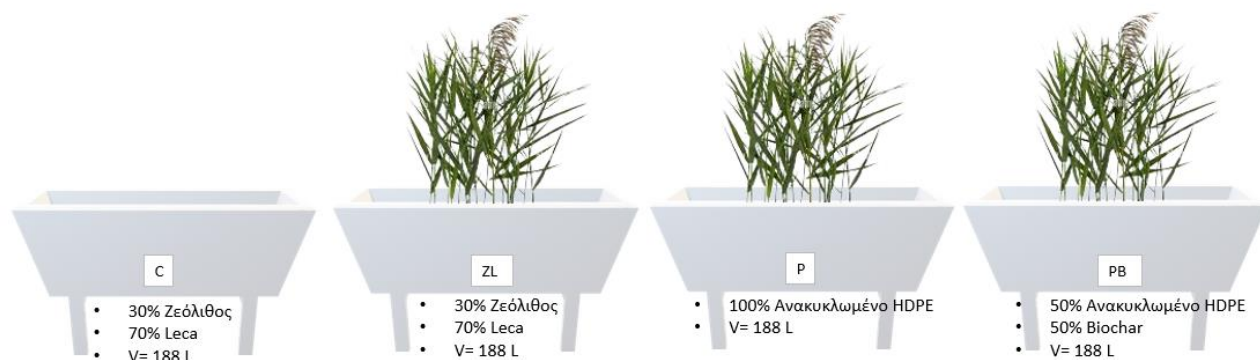


Εικόνα 8. Πιλοτικές μονάδες τεχνητών υγροβιότοπων

Οι τέσσερις δεξαμενές όγκου 188 L η καθεμιά επισημάνθηκαν ως ακολούθως

Μονάδα – Control (**C**), Μονάδα – Zeolite/Leca (**ZL**), Μονάδα – Recycled Plastic (**P**), Μονάδα – Recycled Plastic/Biochar (**PB**)

Όλες οι δεξαμενές, με εξαίρεση την μονάδα-Control (C), διαθέτουν βλάστηση και συγκεκριμένα το κοινό καλάμι *Phragmites australis*. Τα υλικά πλήρωσης κάθε μονάδας, τα οποία προσδιορίζουν και την ονομασία τους, αποτελούνται από διογκωμένη άργιλο (Leca), ζεόλιθο (Zeolite), ανακυκλωμένο πλαστικό (HDPE) και βιοεξανθράκωμα (Biochar). Τα ποσοστά των υλικών πλήρωσης παρουσιάζονται στην παρακάτω απεικόνιση της διάταξης των μονάδων.



Εικόνα 9. Απεικόνιση Πειραματικής Διάταξης

Οι όγκοι φόρτισης της κάθε μονάδας με κατσίγαρο παρουσιάζονται παρακάτω:

Πίνακας 3. Όγκοι φόρτισης ανά κλίνη

Χρονικό Διάστημα	Κλίνη	Όγκος φόρτισης (L)
Τέλος Φεβρουαρίου-τέλος Ιουλίου	C & ZL	5,5
	P & PB	13
τέλος Ιουλίου-τέλος Αυγούστου	C & ZL	10
	P & PB	13
τέλος Αυγούστου-τέλος Σεπτεμβρίου	C & ZL	10
	P & PB	10

Για τις μονάδες C και ZL και για την χρονική περίοδο από το τέλος Φεβρουαρίου έως τις αρχές Ιουλίου, επιλέχθηκαν 5,5 L, ενώ στην συνέχεια, από τέλος Ιουλίου έως τέλος Σεπτεμβρίου, επιλέχθηκαν 10 L.

Για τις μονάδες P και PB και για την χρονική περίοδο από το τέλος Φεβρουαρίου έως το τέλος του Αυγούστου, επιλέχθηκαν 13 L, ενώ στην συνέχεια, από το τέλος Αυγούστου έως το τέλος Σεπτεμβρίου, επιλέχθηκαν 10 L.

Επιπλέον, η φόρτιση COD κάθε μονάδας είναι οι εξής:

- Για τις C και ZL:  $0,087 \frac{kg\ COD}{m^2*day}$  (τέλος Φεβρουαρίου έως αρχές Απριλίου με όγκο φόρτισης 5,5 L και αραίωση 1:4)
- Για τις C και ZL:  $0,034 \frac{kg\ COD}{m^2*day}$  (αρχές Απριλίου έως αρχές Ιουλίου με όγκο φόρτισης 5,5 L και αραίωση 1:8)
- Για τις C και ZL:  $0,061 \frac{kg\ COD}{m^2*day}$  (αρχές Ιουλίου έως τέλος Σεπτεμβρίου με όγκο φόρτισης 10 L και αραίωση 1:8)
- Για την P και PB:  $0,205 \frac{kg\ COD}{m^2*day}$  (τέλος Φεβρουαρίου έως αρχές Απριλίου με όγκο φόρτισης 5,5 L και αραίωση 1:4)
- Για την P και PB:  $0,079 \frac{kg\ COD}{m^2*day}$  (αρχές Απριλίου έως αρχές Ιουλίου με όγκο φόρτισης 5,5 L και αραίωση 1:8)
- Για την P και PB:  $0,061 \frac{kg\ COD}{m^2*day}$  (αρχές Ιουλίου έως τέλος Σεπτεμβρίου με όγκο φόρτισης 10 L και αραίωση 1:8)

Η φόρτιση των μονάδων, γίνεται με χρονικό σύστημα «1<sup>η</sup> ημέρα φόρτιση, 2 ημέρες ανάπαυσης, 4<sup>η</sup> μέρα εκ νέου φόρτιση» και γίνεται χειρωνακτικά, όπως και η συλλογή των εκροών τους που οδηγούνται προς εργαστηριακή ανάλυση.

Για τον καθορισμό των απαραίτητων όγκων και χρόνων παραμονής, έγιναν υπολογισμοί, σύμφωνα με την εξίσωση:

$$V = V_{\text{δεξαμενής}} * \text{πορώδες υλικού πλήρωσης}$$

- $V_C = 188\ L * (0,53 * 0,70 + 0,48 * 0,30) = 96,8\ L$
- $V_{ZL} = 188\ L * (0,53 * 0,70 + 0,48 * 0,30) = 96,8\ L$
- $V_P = 188\ L * (0,94 * 1) = 176,72\ L$
- $V_{PB} = 188\ L * (0,94 * 0,50 + 0,66 * 0,50) = 150,4\ L$

Βάσει των παραπάνω όγκων, υπολογίζονται και οι υδραυλικοί χρόνοι ως εξής:

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

- $HRT_{C,ZL} = 17,6$  (τέλος Φεβρουαρίου έως τέλος Ιουλίου)
- $HRT_{C,ZL} = 9,7$  d (τέλος Ιουλίου έως τέλος Σεπτεμβρίου)
- $HRT_P = 13,6$  d (τέλος Φεβρουαρίου έως τέλος Αυγούστου)
- $HRT_P = 17,6$  d (τέλος Αυγούστου έως τέλος Σεπτεμβρίου)
- $HRT_{PB} = 11,6$  d (τέλος Φεβρουαρίου έως τέλος Αυγούστου)
- $HRT_{PB} = 15$  d (τέλος Αυγούστου έως τέλος Σεπτεμβρίου)

### 3.2.2. Πειραματική Διαδικασία-Χρονοδιάγραμμα

Για τον σκοπό της παρούσας ερευνητικής εργασίας, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, κατασκευάστηκαν τέσσερις πιλοτικές μονάδες τεχνητών υδροβιότοπων, δηλαδή μονάδες επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων ελαιοτριβείου, από την αρχή. Το χρονικό διάστημα λειτουργίας τους που θα μελετηθεί, αποτελείται από 7 μήνες και συγκεκριμένα από τις αρχές του Φεβρουαρίου έως το τέλος του Σεπτεμβρίου του 2023.

Παρουσιάζεται το χρονοδιάγραμμα της πειραματικής διαδικασίας, το οποίο θα αναλυθεί παρακάτω.



Εικόνα 10. Χρονοδιάγραμμα Πειραματικής Διαδικασίας

- Κατασκευή και Χωροθέτηση Πειραματικής Διάταξης: Αρχικά, επιλέχθηκε η κατάλληλη τοποθεσία για την χωροθέτηση των κλινών του πειράματος, καθώς και των βυτίων που διαθέτουν το υγρό απόβλητο ελαιοτριβείου, τον κασίγαρο. Αφού τοποθετήθηκαν τα

βυτία με το ΥΑΕ και οι τέσσερις κλίνες, ξεκίνησε η υλοποίηση του σχεδιασμού των ΤΥ. Πρώτο βήμα ήταν η δημιουργία κλίσης ίση με 1% στις μονάδες, έτσι ώστε να ευνοηθεί η φυσική ροή των ΥΑΕ στους πυθμένες και προς την εκροή. Επιπλέον, σε κάθε κλίνη, τοποθετήθηκε εξωτερικός σωλήνας, ο οποίος συνδέει τον πυθμένα της με το δοχείο συλλογής της εκροής (του επεξεργασμένου λύματος), με σκοπό να διατηρείται η στάθμη της κλίνης, σε κάθε τροφοδότηση της με το ΥΑΕ. Επόμενο βήμα ήταν η πλήρωση των δεξαμενών με υλικά κατάλληλα για τον σκοπό του πειράματος: οι δύο πρώτες δεξαμενές, C και ZL, πληρώθηκαν με 70% Ieca και 30% ζεόλιθο, ενώ οι επόμενες δύο, P και PB, πληρώθηκαν με 100% ανακυκλωμένο πλαστικό και 50% ανακυκλωμένο πλαστικό - 50% βιοεξανθράκωμα αντίστοιχα. Στη συνέχεια, οι δεξαμενές ZL, P και PB φυτεύτηκαν με το φυτό *Phragmites australis*.

- Ανάπτυξη και Προσαρμογή των ΤΥ: Πριν την φόρτιση των μονάδων με το ΥΑΕ, το οποίο χαρακτηρίζεται από αρκετά επιβαρυντικό φορτίο, είναι αναγκαία, η προσαρμογή της βλάστησης των ΤΥ, έτσι ώστε να αναπτύξουν το ριζικό τους σύστημα, στο οποίο θα επιτελούνται όλες οι απαραίτητες διεργασίες για την επεξεργασία του λύματος. Γι'αυτόν τον λόγο, το χρονικό διάστημα του πρώτου περίπου μήνα (μέσα Φεβρουαρίου έως αρχές Μαρτίου), οι μονάδες φορτίζονταν μόνο με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα από την εκροή κατακόρυφων ΤΥ, οι οποίοι επεξεργάζονταν την πρωτοβάθμια εκροή της Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων των Χανίων.
- Έναρξη Λειτουργίας της Πειραματικής Διαδικασίας: Σε αυτό το στάδιο ξεκινά η φόρτιση των μονάδων με ΥΑΕ για την επεξεργασία του. Φυσικά, είναι απαραίτητη αρχικά η αραίωση του ΥΑΕ, που λειτουργεί ως εισροή του συστήματος, διότι αυτό το είδος αποβλήτου περιέχει υψηλές συγκεντρώσεις οργανικών και ανόργανων ενώσεων, όπως φαινόλες και λιπαρά οξέα. Αυτές οι ενώσεις, αν δεν αραιωθούν, μπορούν να προκαλέσουν τοξικότητα και να καταστρέψουν τους μικροοργανισμούς που είναι κρίσιμοι για τη βιοδιάσπαση μέσα στο σύστημα του υδροβιότοπου. Η αραίωση, επίσης, βοηθά στην προσαρμογή των φυτών και μικροοργανισμών στα υψηλά φορτία οργανικής ύλης και συμβάλλει στη σταδιακή ενσωμάτωση των αποβλήτων στο οικοσύστημα χωρίς να προκαλούνται απότομες αλλαγές στα επίπεδα οξυγόνου ή στο pH. Τα καλάμια έχουν

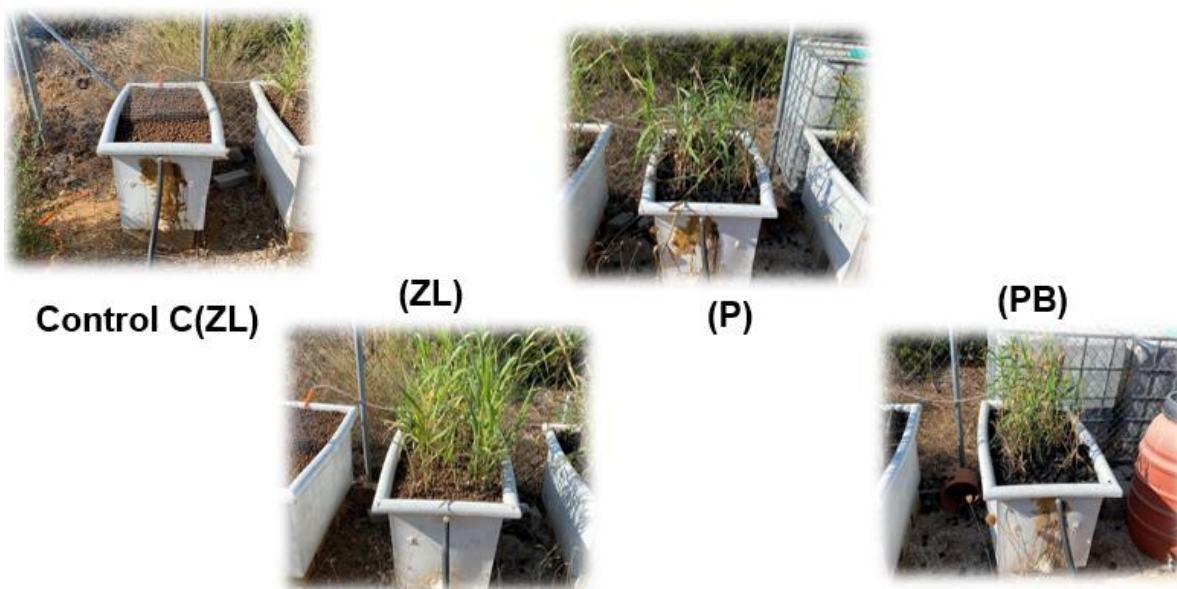
τη δυνατότητα να αναπτύσσουν ριζικά συστήματα που υποστηρίζουν αερόβιες και αναερόβιες διεργασίες, ωστόσο, για να είναι αποτελεσματικά, χρειάζεται η αποφυγή υπερβολικού οργανικού φορτίου, ώστε να μην δημιουργούνται ανεπιθύμητες αναερόβιες συνθήκες που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε δυσοσμία και ανεπαρκή αποδόμηση των ρύπων (Masi et al., 2014; Scholz, 2006). Για τον πρώτο μήνα λειτουργίας επιλέχθηκε αραιώση 1:4, δηλαδή 1 μέρος ΥΑΕ και 3 μέρη νερού, ωστόσο για το επόμενο διάστημα λειτουργίας έως και το πέρας του πειράματος, η αραιώση που επιλέχθηκε και επικράτησε ήταν 1:8, ώστε η βλάστηση των κλινών να λειτουργεί φυσιολογικά και να αποφευχθεί οποιοδήποτε πρόβλημα στην ανάπτυξη της. Οι αραιωμένοι όγκοι των ΥΑΕ από τα βυτία καθίζησης που φυλάσσονται, συλλέγονταν σε δύο κυκλικές δεξαμενές, οι οποίες πριν την συλλογή των όγκων εισροής για κάθε κλίνη, αναδεύονταν χειρωνακτικά. Όταν οι κυκλικές αυτές δεξαμενές, ήταν γεμάτες σε ποσοστό 20% του όγκου τους, γεμίζονταν εκ νέου με αραιωμένα ΥΑΕ. Η ύπαρξη δύο τέτοιων δεξαμενών και η ανανέωση του περιεχόμενου τους πριν αυτές αδειάσουν, εξυπηρετεί την αποφυγή λανθασμένης μέτρησης στερεών στα δείγματα των εισροών, καθώς πραγματοποιείται καθίζηση, με αποτέλεσμα την δημιουργία υποκείμενου στρώματος. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι μονάδες φορτίζονταν 1 ημέρα και οι επόμενες 2 ημέρες ήταν ημέρες ανάπαυσης, ώστε να υπάρχει ο κατάλληλος χρόνος για την επεξεργασία του φορτίου και την συλλογή των εκροών. Οι όγκοι εισροής και εκροής καταμετρούνταν κάθε φορά για κάθε κλίνη ξεχωριστά. Κάθε 10 περίπου ημέρες, ανάλογα με την αναγκαιότητα των μετρήσεων του πειράματος, πραγματοποιούνταν οι εργαστηριακές αναλύσεις των εκροών των κλινών της δεδομένης δειγματοληψίας. Επιπλέον, αναλύσεις πραγματοποιούνταν και για την εισροή κάθε κλίνης (αραιωμένος όγκος ΥΑΕ), ενώ για το ανεπεξέργαστο αρχικό ΥΑΕ γινόταν ανάλυση ανά 3 εργαστηριακές μετρήσεις περίπου. Αναλύσεις για την αραιωμένη εισροή γίνονταν σε κάθε δειγματοληψία, ενώ για την αρχική ανεπεξέργαστη, που φυλάσσεται στα βυτία καθίζησης, πλησίον των κλινών, σε κάθε δεύτερη ή τρίτη μέτρηση.



*Εικόνα 11. Συλλογή ανεπεξέργαστου ΥΑΕ με αρραίωση 1:8*

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





*Εικόνα 12: Απεικόνιση των τεχνητών υγροβιότοπων (Σεπτέμβριος, 2023)*

### 3.2.3. Χωροθέτηση Πειράματος και Μετεωρολογικές Συνθήκες

Η πειραματική διάταξη που περιγράφηκε παραπάνω, χωροθετήθηκε σε υπαίθριο χώρο του Πολυτεχνείου Κρήτης, πλησίον της σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος και οι εργαστηριακές αναλύσεις των δειγμάτων εισροής και εκροών εξυπηρετούνταν από το Εργαστήριο Τεχνολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος (L.E.E.M.) του Πολυτεχνείου.

Οι μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούσαν για το χρονικό διάστημα του πειράματος (Φεβρουάριος 2023-τέλος Σεπτεμβρίου 2023), παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4. Μετεωρολογικές Συνθήκες Πολυτεχνείου Κρήτης (έτος 2023)<sup>2</sup>

Μήνας	Μέση Θερμοκρασία (°C)	Μέγιστη Θερμοκρασία (°C)	Μέση Βροχόπτωση (mm)	Μέση Ταχύτητα Ανέμου (km/h)	Μέγιστη Ταχύτητα Ανέμου (km/h)	Διεύθυνση Ανέμου
Φεβρουάριος	12,2	24,6	44,40	10,7	70,8	NΔ
Μάρτιος	15,1	23,4	39,60	10,4	70,8	NΔ
Απρίλιος	16,8	27,9	20,00	8,0	57,9	NΔ
Μάιος	19,1	27,3	21,40	8,0	51,5	A
Ιούνιος	23,5	32,2	23,40	3,9	37,0	BBΔ
Ιούλιος	28,5	42,9	0,00	4,6	33,8	BΔ
Αύγουστος	27,8	37,1	0,00	6,6	43,5	Δ
Σεπτέμβριος	23,9	34,1	69,60	4,7	41,8	BΔ

### 3.3. Αναλυτικές Μέθοδοι

Για τον σκοπό του παρόντος πειράματος, πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακές αναλύσεις δειγμάτων τόσο του υγρού αποβλήτου (χωρίς να έχει υποστεί αραίωση), όσο και της εισροής (τροφοδοτούμενο δείγμα ποτίσματος) και των εκροών των μονάδων. Συγκεκριμένα, οι αναλύσεις αφορούν μετρήσεις Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας (EC), pH, Χημικά Απαιτούμενου Οξυγόνου (COD), Βιοχημικά Απαιτούμενου Οξυγόνου (BOD<sub>5</sub>), Ολικών Αιωρούμενων Στερεών (TSS), Ολικού Φωσφόρου (TP), Φωσφορικών Ιόντων ( $PO_4^{3-} - P$ ), Ολικού Αζώτου (TN), Αμμωνιακού Αζώτου ( $NH_4^+ - N$ ), Νιτρικού Αζώτου ( $NO_3^- - N$ ), Ολικών Φαινολών (Total Phenols) και χρώματος. Επιλέχθηκαν αυτές οι παράμετροι, καθώς κρίνεται ότι είναι κατάλληλες για την σύγκριση των δειγμάτων εξασφαλίζοντας με αυτόν τον τρόπο μια τεκμηριωμένη αξιολόγηση της ποιότητάς του επεξεργασμένου αποβλήτου και της λειτουργίας των μονάδων τεχνητών υγροβιότοπων που κατασκευάστηκαν.

#### 3.3.1 Ηλεκτρική Αγωγιμότητα

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα εκφράζει την ικανότητα ενός διαλύματος να άγει ηλεκτρικό ρεύμα, και εξαρτάται από την παρουσία ιόντων και τη συγκέντρωσή τους στο νερό. Χρησιμοποιείται ως δείκτης της συνολικής ποσότητας διαλυμένων αλάτων ή ρυπαντών σε ένα υδατικό διάλυμα,

<sup>2</sup> Δεδομένα από τον μετεωρολογικό σταθμό Χανίων, ο οποίος βρίσκεται στον χώρο του Πολυτεχνείου Κρήτης, στο Ακρωτήρι, Χανίων (meteosearch.gr).

αποτελώντας βασική παράμετρο για την αξιολόγηση της ποιότητας του νερού. Η μονάδα μέτρησης της είναι 1 mS/cm.

Στο εργαστήριο που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις, χρησιμοποιείται το αγωγιμόμετρο CRISON microCM 2202, το οποίο διαθέτει ηλεκτρόδιο που τοποθετείται στο εσωτερικό του δείγματος και μετράται η τιμή του, η οποία και εμφανίζεται στην οθόνη της συσκευής.

### 3.3.2 pH

Το pH μετρά τον βαθμό οξύτητας ή αλκαλικότητας ενός διαλύματος και εκφράζεται σε μια κλίμακα από 0 έως 14, με το 7 να είναι ουδέτερο. Οι τιμές κάτω από 7 υποδεικνύουν οξύτητα, δηλαδή το διάλυμα χαρακτηρίζεται ως οξύ, ενώ τιμές πάνω από 7 δείχνουν αλκαλικότητα, δηλαδή το διάλυμα είναι βασικό. Επίσης, το pH συνδέεται άμεσα με τα οξόνια ( $\text{H}_3\text{O}^+$ ), καθώς είναι ο αρνητικός δεκαδικός λογάριθμος της συγκέντρωσής τους σε ένα διάλυμα. Όταν η συγκέντρωση των οξωνίων αυξάνεται, το pH μειώνεται, κάνοντας το διάλυμα πιο όξινο. Αντίθετα, χαμηλότερες συγκεντρώσεις οξωνίων οδηγούν σε υψηλότερο pH, που σημαίνει ότι το διάλυμα είναι πιο αλκαλικό.

Για την εργαστηριακή μέτρηση του pH, χρησιμοποιείται το πεχάμετρο CRISON microPH 2002, το οποίο διαθέτει ηλεκτρόδιο από γυαλί. Προτού το ηλεκτρόδιο τοποθετηθεί στο δείγμα, βαθμονομείται με τη χρήση δύο ρυθμιστικών διαλυμάτων όπου το ένα είναι όξινο με τιμή pH 4 και το δεύτερο ουδέτερο με pH 7. Το ηλεκτρόδιο έπειτα τοποθετείται στο δείγμα και η τιμή του pH εμφανίζεται στην οθόνη.

### 3.3.3. Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο

Το COD (Chemical Oxygen Demand) ή Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο είναι ένας δείκτης που μετρά την ποσότητα οξυγόνου που χρειάζεται για την χημική οξείδωση των οργανικών υλικών σε ένα υγρό δείγμα, χρησιμοποιώντας ισχυρά χημικά αντιδραστήρια. Αντιπροσωπεύει το επίπεδο ρύπανσης ενός δείγματος και επιτρέπει την εκτίμηση της οργανικής φόρτισης, ιδιαίτερα σε βιομηχανικά και αστικά λύματα. Οι υψηλές τιμές COD δείχνουν έντονη οργανική ρύπανση, που μπορεί να προκαλέσει μείωση του διαλυμένου οξυγόνου στο νερό, επηρεάζοντας αρνητικά τα υδάτινα οικοσυστήματα.

Για τον σκοπό του πειράματος, το COD μετράται για την συνολική ποσότητα οξυγόνου που απαιτείται για τη χημική οξείδωση του οργανικού φορτίου του υγρού αποβλήτου ελαιοτριβείου. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν δύο δοκιμαστικά kit, τα COD Vario Tube Tests, τα οποία καλύπτουν συγκεντρώσεις COD από 0 έως 15000 mg/L ή από 0 έως 1500 mg/L, ανάλογα με την επιλογή του kit, η οποία γίνεται σύμφωνα με την αραιώση που έγινε στα προς ανάλυση δείγματα. Γενικά, παρατηρείται ότι τα αδιάλυτα και αραιωμένα υγρά απόβλητα ελαιοτριβείου (εισροές), παρουσιάζουν υψηλές συγκεντρώσεις COD σε αντίθεση με τις εκροές. Με την χρήση του πρώτου kit COD (0-15000 mg/L), λαμβάνονται 0.2 mL από κάθε δείγμα και προστίθενται σε έτοιμα φιαλίδια, τα οποία ανακινούνται καλά και τοποθετούνται σε θερμοαντιδραστήρα για χώνευση στους 148 °C για 2 ώρες. Με τη χρήση του δεύτερου kit (0-1500 mg/L), προστίθενται 3 mL δείγματος και ακολουθεί η ίδια διαδικασία. Μετά την ολοκλήρωση της χώνευσης, τα φιαλίδια αφήνονται έως ότου φτάσουν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Έπειτα, πραγματοποιείται η μέτρηση στο φασματοφωτόμετρο SHIMADZU UV-1202, όπου μετράται η απορρόφηση του δείγματος (τοποθετημένο σε κυψελίδα) σε μήκος κύματος  $\lambda = 610$  nm, αφού πρώτα έχει μηδενιστεί με τυφλό διάλυμα. Οι συγκεντρώσεις των δειγμάτων υπολογίζονται βάσει των απορροφήσεων με τη βοήθεια καμπύλης βαθμονόμησης, η οποία είναι διαθέσιμη στο Παράρτημα.

#### 3.3.4. Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο

Το BOD (Biochemical Oxygen Demand) ή Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο, είναι η μέτρηση της ποσότητας οξυγόνου που απαιτείται για τη βιολογική διάσπαση των οργανικών υλικών από μικροοργανισμούς σε ένα δείγμα νερού, κατά τη διάρκεια μιας προκαθορισμένης περιόδου (συνήθως 5 ημερών – BOD<sub>5</sub>). Χρησιμοποιείται για να εκτιμηθεί η οργανική ρύπανση του νερού ή γενικά του υγρού αποβλήτου, καθώς υψηλές τιμές BOD υποδεικνύουν αυξημένη βιολογική δραστηριότητα, που μπορεί να εξαντλήσει το διαλυμένο οξυγόνο και να επηρεάσει αρνητικά τα υδάτινα οικοσυστήματα.

Στο παρόν πείραμα μετρήθηκε το BOD<sub>5</sub>, δηλαδή το BOD 5 ημερών, με τη χρήση κατάλληλων πιεζομετρικών φιαλών και συγκεκριμένα τα είδη Aqualytic και Oxi-Tor της WTW, οι οποίες έχουν όγκο ίσο με 500 mL. Πριν το δείγμα τοποθετηθεί στις φιάλες για την μέτρηση, θα πρέπει το pH

του να κυμαίνεται μεταξύ 6.5-7.5 έτσι ώστε να θεωρείται κατάλληλο για τις μετρήσεις. Φυσικά, ανάλογα με το εύρος της μετρήσιμης τιμής BOD<sub>5</sub>, εισέρχεται διαφορετικός όγκος δείγματος σε κάθε, ακολουθώντας τις οδηγίες των ειδών των φιαλών. Πριν το σφράγισμα των φιαλών, προστίθεται μία θήκη σιλικόνης, στην οποία τοποθετούνται δισκία υδροξειδίου του καλίου (KOH), τα οποία συμβάλουν στην απορρόφηση του διοξειδίου του άνθρακα που πρόκειται να παραχθεί στην φιάλη, μέσω των διεργασιών που θα λάβουν χώρα. Τελικά, οι φιάλες σφραγίζονται αεροστεγώς με έναν αισθητήρα πίεσης και τοποθετούνται σε ειδικές βάσεις που διασφαλίζουν τη συνεχή ανάδευση, αφού πρώτα έχει τοποθετηθεί ένας μαγνήτης στο εσωτερικό τους. Οι περιβαλλοντικές συνθήκες κατά τη διάρκεια της μέτρησης ήταν T= 20 °C, στο σκοτάδι, και η διάρκεια των μετρήσεων ήταν 5 ημέρες.

### 3.3.5. Ολικά Αιωρούμενα Στερεά

Τα TSS (Total Suspended Solids) ή Ολικά Αιωρούμενα Στερεά, αναφέρονται στη συγκέντρωση στερεών σωματιδίων που αιωρούνται στο νερό και δεν διαλύονται. Αυτά τα σωματίδια μπορεί να περιλαμβάνουν ανόργανα υλικά, οργανικές ενώσεις, και μικροοργανισμούς. Το επίπεδο των TSS αποτελεί σημαντικό δείκτη ποιότητας του νερού, καθώς υψηλές συγκεντρώσεις μειώνουν τη διαπερατότητα του φωτός, επηρεάζοντας τη φωτοσύνθεση και την ύπαρξη ζωής στους υδάτινους οργανισμούς. Συνήθως, τα TSS μετρώνται σε mg/L μέσω διήθησης και ζύγισης του υπολείμματος.

Για τον προσδιορισμό των ολικών αιωρούμενων στερεών (TSS) των δειγμάτων του πειράματος, χρησιμοποιούνται φίλτρα GF/C, τα οποία κατακρατούν τα στερεά με διάμετρο μεγαλύτερη από 1 μm. Πριν τη χρήση τους, τα φίλτρα ζυγίζονται με ζυγαριά ακριβείας 10<sup>-4</sup> g. Έπειτα, το δείγμα αναδεύεται και λαμβάνεται ο όγκος δείγματος που κρίνεται κατάλληλος για την διήθηση του μέσω του φίλτρου. Μετά τη διήθηση, το φίλτρο τοποθετείται σε φούρνο για 1 ώρα στους 100 °C, ώστε να αφαιρεθεί η υγρασία και να επιτευχθεί η ξήρανση. Μετά την ψύξη του φίλτρου, γίνεται εκ νέου ζύγιση στην ζυγαριά ακριβείας. Για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης των TSS σε mg/L ισχύει:

$$TSS = \frac{\text{τελικό βάρος φίλτρου} - \text{αρχικό βάρος φίλτρου}}{\text{όγκος διηθήματος}} * 100$$

Το διήθημα θα υποστεί περεταίρω μικροδιήθηση μεγέθους πόρων 0.45  $\mu\text{m}$ .

### 3.3.6. Ολικός Φώσφορος

Η μέτρηση του ολικού φωσφόρου (TP) είναι η μέτρηση της συνολικής ποσότητας φωσφόρου που υπάρχει σε ένα δείγμα νερού, περιλαμβάνοντας τόσο τα οργανικά όσο και τα ανόργανα φωσφορικά ιόντα. Αποτελεί σημαντική παράμετρο για την ποιότητα του νερού, καθώς υψηλές συγκεντρώσεις ολικού φωσφόρου μπορούν να συμβάλλουν στον ευτροφισμό, μια διαδικασία που προκαλεί υπερβολική ανάπτυξη φυκών και μείωση του διαλυμένου οξυγόνου, επηρεάζοντας αρνητικά την υδάτινη ζωή. Συνήθως μετράται σε  $\text{mg/L}$  και απαιτείται προηγούμενη κατεργασία, όπως η διάλυση και οξείδωση, για την ακριβή καταγραφή της συνολικής συγκέντρωσής του στο δείγμα.

Στο πείραμα αυτό, για τον προσδιορισμό του ολικού φωσφόρου των δειγμάτων, λαμβάνονται αρχικά 25 mL του αρχικού διαλύματος, αφού πρώτα έχει αναδευτεί, 5 mL πυκνού νιτρικού οξέος ( $\text{HNO}_3$ ) και 1 mL θειικού οξέος ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), τα οποία και θα χωνευθούν σε απαγωγό. Έπειτα, ακολουθεί μικροδιήθηση μέσω φίλτρου πόρων 0.45  $\mu\text{m}$ . Φυσικά το pH ρυθμίζεται και σε αυτήν την περίπτωση μεταξύ 6.5–7.5 και τα διαλύματα αραιώνονται μέχρι και τα 25 mL. Για τη μέτρηση του ολικού φωσφόρου χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές μέθοδοι, ανάλογα των συγκεντρώσεων των δειγμάτων. Στην πρώτη περίπτωση, με την μέθοδο Ascorbic acid (4500 - P.E.) παρασκευάστηκε ένα αντιδραστήριο με βανάδιο, το οποίο περιλαμβάνει 12.5 g ammonium molybdate, σε 150 mL νερού (διάλυμα Α) και 0.625 g ammonium monovanadate σε 150 mL νερού (διάλυμα Β). Το διάλυμα Β οδηγείται για βρασμό και όταν φτάσει στη θερμοκρασία δωματίου, προστίθενται 165 mL HCl, ενώ ακολουθεί η ανάδευση του. Τα δύο διαλύματα αναμιγνύονται σε ογκομετρική φιάλη των 500 mL και αραιώνονται. Στη συνέχεια, 2.5 mL από το αντιδραστήριο προστίθενται σε 10 mL δείγματος (μετά από μικροδιήθηση) και η απορρόφησή τους μετράται στο φασματοφωτόμετρο SHIDMAZU UV-160 στα 400 nm. Στη δεύτερη μέθοδο, την μέθοδο Vanadomolybdophosphoric acid (4500- P.C), προστίθενται 4 mL από ένα αντιδραστήριο, combined, το οποίο δημιουργείται εργαστηριακά, σε 25 mL δείγματος και το φασματοφωτόμετρο μηδενίζεται με το τυφλό δείγμα. Η μέτρηση πραγματοποιείται στα 880 nm. Το αντιδραστήριο combined περιέχει συστατικά, όπως  $\text{H}_2\text{SO}_4$  5N (50 mL), Potassium antimonyl

tartrate (5 mL), Ammonium molybdate (15 mL) και Ascorbic acid (30 mL). Οι συγκεντρώσεις των δειγμάτων υπολογίζονται μέσω καμπυλών βαθμονόμησης, οι οποίες παρουσιάζονται στο Παράρτημα.

### 3.3.7. Φωσφορικά Ιόντα

Τα φωσφορικά ιόντα, γνωστά και ως ανόργανα φωσφορικά ιόντα ( $\text{PO}_4^{3-}\text{P}$ ), αποτελούν σημαντική μορφή του ολικού φωσφόρου στο νερό και είναι η άμεσα διαθέσιμη μορφή για τη βιολογική δραστηριότητα, ιδιαίτερα για την ανάπτυξη φυτών και φυκιών.

Για τον προσδιορισμό των φωσφορικών ιόντων, ακολουθούνται οι ίδιες μέθοδοι με αυτή του ολικού φωσφόρου (TP), όπως περιγράφεται παραπάνω, με την διαφορά ότι οι αναλύσεις σε αυτή την περίπτωση θα πραγματοποιηθούν στο διηθημένο δείγμα και όχι στο αρχικό ολικό δείγμα.

### 3.3.8. Ολικό Άζωτο

Το ολικό άζωτο (TN) αναφέρεται στο συνολικό ποσό αζωτούχων ενώσεων που περιέχονται σε ένα δείγμα, συμπεριλαμβανομένων των οργανικών και ανόργανων μορφών, όπως η αμμωνία, τα νιτρικά και τα νιτρώδη ιόντα. Η παρουσία ολικού αζώτου είναι σημαντική στην παρακολούθηση της ποιότητας των υδάτων, καθώς υψηλά επίπεδα μπορεί να οδηγήσουν σε ευτροφισμό, προκαλώντας υπερβολική ανάπτυξη άλγης και μείωση του οξυγόνου.

Για τον προσδιορισμό του συνολικού αζώτου των δειγμάτων, χρησιμοποιείται το Nitrogen (total) Cell Test 1.14763.0001 της εταιρείας Supelco, το οποίο έχει εύρος μέτρησης 10-150 mg/L N. Στο kit αυτό περιλαμβάνονται τα φιαλίδια έτοιμα με τα κατάλληλα αντιδραστήρια, στα οποία τοποθετείται 10 mL από το αραιωμένο δείγμα. Ακολουθούνται οι οδηγίες του kit και τα φιαλίδια τοποθετούνται σε θερμοαντιδραστήρα για χώνευση στους 120 °C για 1 ώρα. Αφού ολοκληρωθεί η χώνευση, τα φιαλίδια αφήνονται να κρυώσουν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Στη συνέχεια, λαμβάνεται 1 mL από κάθε χωνευμένο φιαλίδιο, καθώς και 1 mL του αντίστοιχου αντιδραστηρίου από το kit. Τα δείγματα φωτομετρούνται στο φασματοφωτόμετρο Merck Nova 60, το οποίο έχει βαθμονομημένη καμπύλη και εμφανίζει τις συγκεντρώσεις σε mg/L στην οθόνη.



### 3.3.9. Αμμωνιακό Άζωτο

Το αμμωνιακό άζωτο ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ) είναι η μορφή αζώτου που βρίσκεται ως ιόν αμμωνίου σε υδατικά διαλύματα και προέρχεται κυρίως από τη διάσπαση οργανικών ουσιών και αποβλήτων. Αποτελεί σημαντική παράμετρο ποιότητας νερού, καθώς υψηλές συγκεντρώσεις αμμωνιακού αζώτου μπορεί να υποδεικνύουν μόλυνση από λύματα ή απόβλητα. Το αμμωνιακό άζωτο μπορεί να είναι τοξικό για τους υδρόβιους οργανισμούς, ειδικά σε υψηλές τιμές pH, όπου αυξάνεται η τοξική μορφή αμμωνίας ( $\text{NH}_3$ ).

Για τον προσδιορισμό του αζώτου σε μορφή αμμωνιακών ιόντων, χρησιμοποιείται το kit Ammonium Test 1.00683.0001 της Supelco, το οποίο καλύπτει το εύρος συγκέντρωσης από 2.0 έως 150 mg/L. Ακολουθείται η διαδικασία που περιγράφεται στις οδηγίες του kit για τα δείγματα, καθώς και η παρασκευή τυφλού δείγματος για τον μηδενισμό του φασματοφωτόμετρου. Προηγείται η ανάδευση των δειγμάτων με τη χρήση του εργαστηριακού μηχανήματος Vortex. Η μέτρηση της απορρόφησης γίνεται στο μήκος κύματος των 690 nm, χρησιμοποιώντας το φασματοφωτόμετρο μονής δέσμης SHIMADZU UV-1202. Στη συνέχεια, οι συγκεντρώσεις των δειγμάτων υπολογίζονται με τη βοήθεια της καμπύλης βαθμονόμησης, η οποία είναι διαθέσιμη στο Παράρτημα.

### 3.3.10. Νιτρικό Άζωτο

Το νιτρικό άζωτο ( $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ) είναι μια μορφή αζώτου που συναντάται κυρίως στα υδάτινα συστήματα, συνήθως ως αποτέλεσμα της νιτροποίησης της αμμωνίας από βακτήρια. Χρησιμοποιείται από τα φυτά ως θρεπτικό συστατικό, αλλά υψηλές συγκεντρώσεις του στο νερό μπορεί να προέρχονται από γεωργικά λιπάσματα ή οργανικά απόβλητα και να προκαλέσουν ευτροφισμό, αυξάνοντας υπερβολικά την ανάπτυξη φυκιών. Το νιτρικό άζωτο είναι επίσης επικίνδυνο για τον άνθρωπο σε υπερβολικές ποσότητες, καθώς μπορεί να προκαλέσει επιπλοκές, όπως το σύνδρομο της κυάνωσης στα βρέφη.

Για τον προσδιορισμό του νιτρικού αζώτου ( $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ), χρησιμοποιήθηκε η φασματοφωτομετρική μέθοδος με το Standard Test NANOCOLOR Nitrate της NANOCOLOR, η οποία καλύπτει εύρος συγκεντρώσεων από 0.10 έως 30.0 mg/L. Ακολουθήθηκαν οι οδηγίες του kit για τη διαδικασία μέτρησης, και οι απορροφήσεις μετρήθηκαν στο μήκος κύματος των 365 nm χρησιμοποιώντας



το φασματοφωτόμετρο μονής δέσμης SHIMADZU UV-1202. Πριν τη μέτρηση, το φασματοφωτόμετρο μηδενίστηκε με τυφλό διάλυμα. Οι συγκεντρώσεις των δειγμάτων υπολογίστηκαν με τη βοήθεια της καμπύλης βαθμονόμησης, η οποία παρουσιάζεται στο Παράρτημα.

### 3.3.11. Ολικές Φαινόλες

Οι φαινόλες στο έδαφος είναι οργανικές ενώσεις που προέρχονται από φυσικές πηγές, όπως την αποσύνθεση φυτικών υλικών, αλλά και από ανθρωπογενείς δραστηριότητες, όπως τα γεωργικά και βιομηχανικά απόβλητα. Αυτές οι ενώσεις έχουν τη δυνατότητα να προσροφούνται από τα σωματίδια του εδάφους, επηρεάζοντας τη μικροβιακή δραστηριότητα και τη βιοδιαθεσιμότητα άλλων θρεπτικών συστατικών. Σε ορισμένες περιπτώσεις, υψηλές συγκεντρώσεις φαινολών μπορούν να γίνουν τοξικές για τους μικροοργανισμούς του εδάφους και να αναστείλουν την ανάπτυξη φυτών. Η παρουσία τους μπορεί να αποτελεί ένδειξη ρύπανσης, ειδικά όταν προέρχονται από λύματα ή απόβλητα, και συνδέεται με τη γενικότερη ποιότητα και υγεία του εδάφους.

Για την κατασκευή της καμπύλης βαθμονόμησης για τις φαινόλες, χρησιμοποιείται πρότυπο διάλυμα που παρασκευάζεται με την διάλυση 0.125 g γαλλικού οξέος σε 2.5 mL αιθανόλης και αραιώση με νερό μέχρι τα 25 mL. Για τον προσδιορισμό των φαινολών στο δείγμα, σύμφωνα με τη μέθοδο Folin–Ciocalteu, λαμβάνονται 40  $\mu$ L από το διηθημένο δείγμα (με φίλτρο 0.45  $\mu$ m) και τοποθετούνται σε δοκιμαστικό σωλήνα. Στον σωλήνα προστίθενται 200  $\mu$ L αντιδραστηρίου Folin, 3.15 mL νερού και ανακινείται καλά με το Vortex. Ο σωλήνας αφήνεται σε ηρεμία για 2 λεπτά, στη συνέχεια προστίθεται 600  $\mu$ L ανθρακικού νατρίου ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) και η διαδικασία συνεχίζεται με ανακίνηση και άλλη ώρα ηρεμίας για 1 ώρα. Η απορρόφηση μετράται σε φασματοφωτόμετρο διπλής δέσμης SHIMADZU UV-1601, χρησιμοποιώντας μήκος κύματος  $\lambda = 765$  nm και μηδενίζοντας με τυφλό δείγμα απιονισμένου νερού. Οι καμπύλες βαθμονόμησης παρουσιάζονται στο Παράρτημα.

### 3.3.12. Χρώμα

Το χρώμα των αποβλήτων μπορεί να υποδεικνύει την παρουσία συγκεκριμένων ρύπων και να έχει σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις όταν απορρίπτεται στο έδαφος. Τα απόβλητα με

υψηλή συγκέντρωση χρωστικών ουσιών (όπως φυτοφάρμακα, βαφές ή οργανικές ενώσεις) μπορούν να προκαλέσουν μόλυνση των υδάτων, επηρεάζοντας τη διαυγαστικότητα του νερού και μειώνοντας την ποσότητα του διαθέσιμου οξυγόνου για την υδρόβια ζωή. Αυτές οι οργανικές ενώσεις συχνά απορροφώνται από τα σωματίδια του εδάφους, κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε μακροχρόνιες επιπτώσεις στην ποιότητα του εδάφους και τη βιοποικιλότητα. Επιπλέον, τα χρωματισμένα απόβλητα επηρεάζουν και τις αισθητικές ιδιότητες των φυσικών υδάτινων πόρων, προκαλώντας δυσάρεστες οσμές και υποβαθμίζοντας την ποιότητα του τοπίου. Ορισμένα χρώματα μπορεί να είναι τοξικά για τα φυτά και τα ζώα, εμποδίζοντας τη φωτοσύνθεση ή προκαλώντας άμεσες βλάβες στους οργανισμούς. Η μέτρηση του χρώματος μπορεί να γίνει με τη χρήση φασματοφωτομετρίας, όπου το χρώμα του διαλύματος μετράται σε μονάδες True Colour Unit (TCU), επιτρέποντας την εκτίμηση της συγκέντρωσης των χρωστικών ουσιών.

Για τον σκοπό του πειράματος, το χρώμα των δειγμάτων προσδιορίστηκε μέσω φασματοφωτομετρικής μέτρησης σε μήκος κύματος  $\lambda = 410 \text{ nm}$ , χρησιμοποιώντας το φασματοφωτόμετρο SHIMADZU UV-1202 και κυψελίδα μήκους 2.5 cm. Για τη μετατροπή των αποτελεσμάτων σε True Color Units χρησιμοποιήθηκε διάλυμα αναφοράς που περιείχε 100 mg/L (Pt), το οποίο περιέχει 1.246 g πλατίνας, 1 g κοβάλτιο και 100 mL πυκνού HCl σε 1 L νερού. Οι συγκεντρώσεις των δειγμάτων υπολογίζονται με τη χρήση καμπύλης βαθμονόμησης, η οποία παρέχεται στο Παράρτημα.

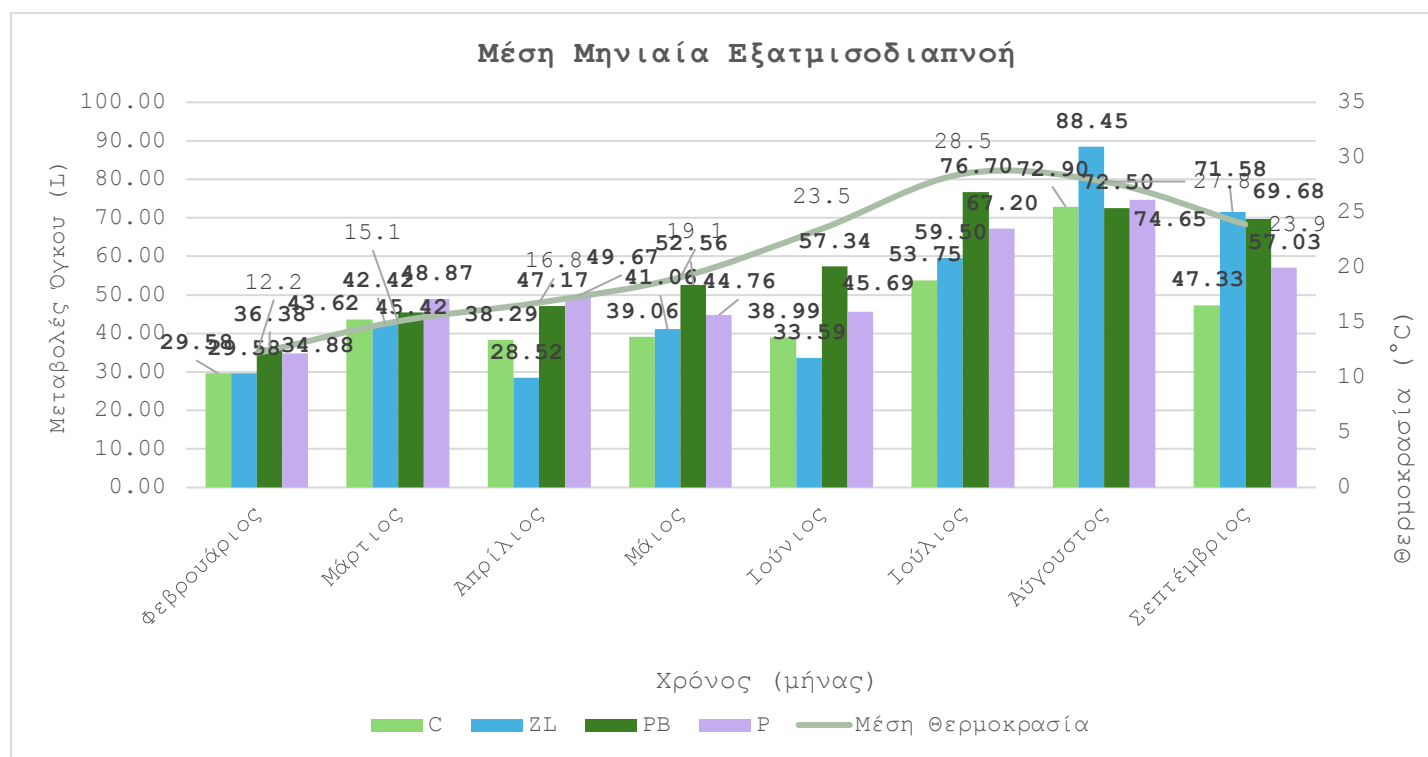
## Κεφάλαιο 4 – Ανάλυση Αποτελεσμάτων και Συμπεράσματα

### 4.1 Υδατικό Ισοζύγιο

Η εξατμισοδιαπνοή, γενικά, εκφράζει την απώλεια νερού μέσω της διεργασίας της εξατμισμού από το έδαφος και της διαπνοής από την βλάστηση. Επηρεάζεται από παράγοντες όπως η θερμοκρασία, η ηλιακή ακτινοβολία, η ύπαρξη βροχοπτώσεων, η ταχύτητα ανέμου, η υγρασία και η βαρομετρική πίεση. Για τον σκοπό του πειράματος, εξετάζεται ώστε να προσδιοριστεί η επιρροή των κλιματικών συνθηκών στις εκροές των μονάδων. Επιπλέον, αποτελεί κρίσιμη παράμετρο για τη διατήρηση της υδρολογικής ισορροπίας των πιλοτικών τεχνητών υγροβιότοπων.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται αναλυτικά η μέση μηνιαία εξατμισοδιαπνοή, με δεδομένα από τους όγκους εισρών και εκροών των μονάδων, καθώς και των μηνιαίων βροχοπτώσεων που προέκυψαν (Πίνακας 4).

Διάγραμμα 1. Μέση Μηνιαία Εξατμισοδιαπνοή οριζόντιων τεχνητών υγροβιότοπων



Παρατηρείται, λοιπόν, ότι κατά τους αρχικούς μήνες (Φεβρουάριος – Ιούνιος) όλοι οι υγροβιότοποι παρουσιάζουν σχετικά χαμηλή εξατμισοδιαπνοή, καθώς οι θερμοκρασίες είναι

χαμηλές τους δύο πρώτους μήνες, σε συνδυασμό με την περιορισμένη ανάπτυξη της βλάστησης των τεχνητών υδροβιότοπων. Σύμφωνα με τις μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν τους μήνες της πειραματικής διαδικασίας (Πίνακας 4), η πιο έντονη βροχόπτωση παρουσιάζεται τους μήνες Φεβρουάριο, Μάιο και Σεπτέμβριο.

Κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, παρατηρήθηκε έντονη ανάπτυξη της βλάστησης και οι απαιτήσεις σε νερό αυξήθηκαν. Συγκεκριμένα, το μέγιστο της εξατμισοδιαπνοής παρατηρείται τον μήνα Αύγουστο. Η διαφορά μεταξύ των υδροβιότοπων είναι πιο έντονη, με την PB να υπερσχύει και την C (που δεν διαθέτει βλάστηση) να παραμένει σε χαμηλότερα επίπεδα.

Τον Σεπτέμβριο, όλοι οι υδροβιότοποι παρουσιάζουν μείωση, ωστόσο η μονάδα PB εξακολουθεί να παρουσιάζει υψηλότερη εξατμισοδιαπνοή.

## 4.2 Εργαστηριακές Αναλύσεις

### 4.2.1. Ανάλυση Ανεπεξέργαστου ΥΑΕ

Οι τεχνητοί υδροβιότοποι τροφοδοτούνται κατά διαστήματα με υγρό απόβλητο από τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε τριφασικό ελαιοτριβείο της Κρήτης για την παραγωγή ελαιόλαδου και κατά τις οποίες γίνεται χρήση νερού. Το ανεπεξέργαστο αυτό απόβλητο όπως συλλέχθηκε από το ελαιοτριβείο, χωρίς κάποια αραίωση, υποβλήθηκε σε εργαστηριακές αναλύσεις (τέλος Φεβρουαρίου - τέλος Σεπτεμβρίου).

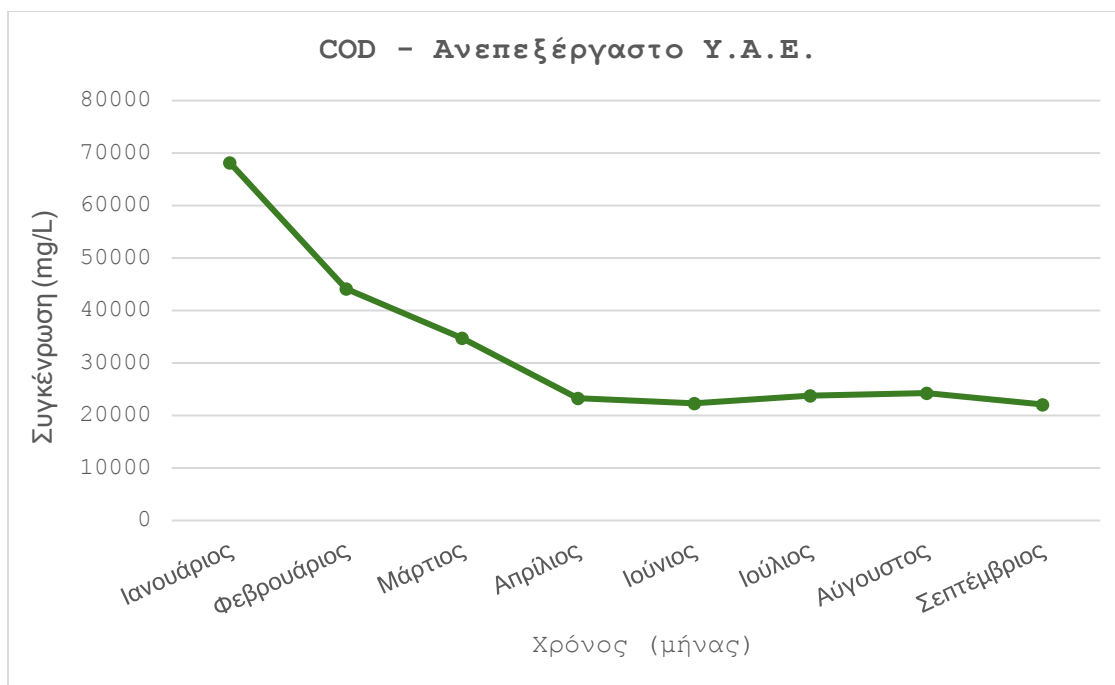
Παρακάτω, παρουσιάζονται οι βασικές παράμετροι που μετρήθηκαν από την αρχή έως το τέλος του πειράματος και τα αντίστοιχα αποτελέσματα.

*Πίνακας 5: Χαρακτηριστικά ΥΑΕ χωρίς αραίωση (μέγιστες και ελάχιστες τιμές)*

Παράμετρος	Εύρος τιμών
EC (mS/ cm)	[6,3-7,8]
pH	[4,4-4,8]
COD (mg/ L)	[22116-68168]

Παράμετρος	Εύρος τιμών
BOD5 (mg/ L)	[3800-19000]
TSS (mg/ L)	[557-26080]
TP (mg/ L)	[52-462]
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> P (mg/ L)	[29-383]
TN (mg/ L)	[56-840]
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N(mg/ L)	[1-31]
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N(mg/ L)	[10,1-26,4]
Ολικές φαινόλες (mg/ L)	[1573-1753]
Χρώμα (T.C.U.)	[10542-15390]

#### 4.2.1.1. Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (COD)



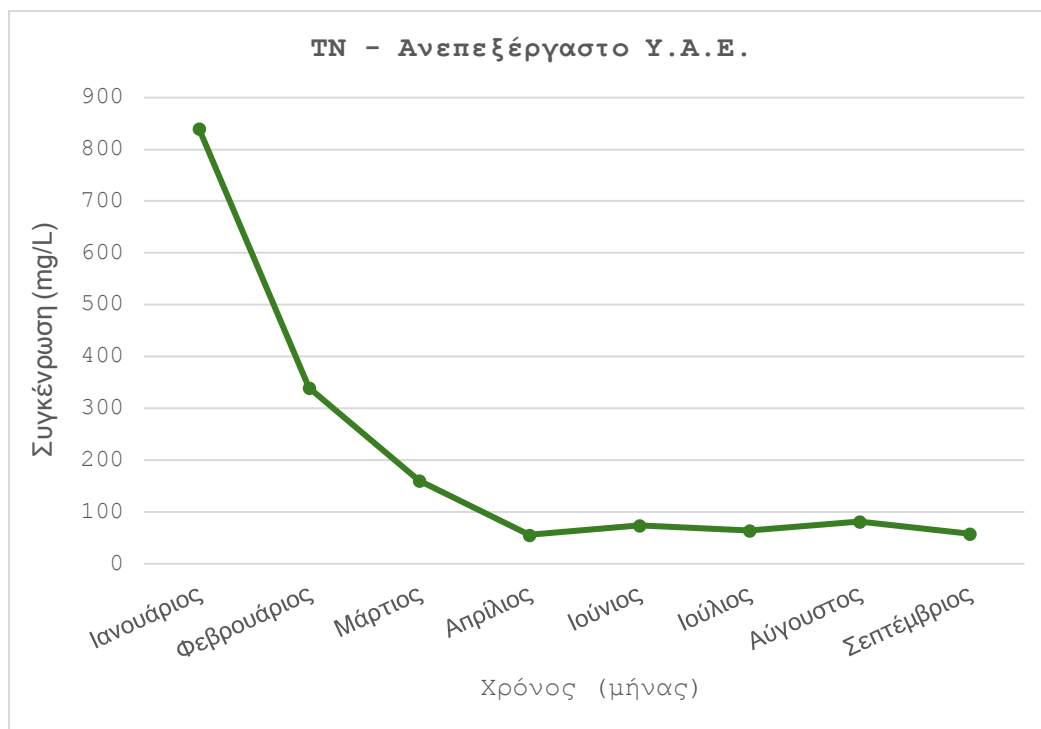
*Διάγραμμα 2: Συγκέντρωση COD ανεπεξέργαστου Υ.Α.Ε (χωρίς αραιώση)*

Το παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζει τη συγκέντρωση του **COD (Χημικά Απαιτούμενου Οξυγόνου)** στα υγρά απόβλητα ελαιοτριβείου από το τέλος Ιανουαρίου έως το τέλος Σεπτεμβρίου του 2023 αποτυπώνοντας τις διακυμάνσεις του οργανικού φορτίου κατά τη διάρκεια της πειραματικής περιόδου.

Αρχικά, κατά τον πρώτο εργαστηριακό έλεγχο, ο οποίος πραγματοποιήθηκε ήδη από τα τέλη Ιανουαρίου με σκοπό να προσδιοριστούν τα απαραίτητα kit μέτρησης με το κατάλληλο εύρος τιμών, παρατηρείται πολύ υψηλή τιμή COD ίση με 68.168 mg/L. Αυτές οι τιμές είναι χαρακτηριστικές για υγρά απόβλητα ελαιοτριβείων λόγω της μεγάλης ποσότητας οργανικών ενώσεων. Το COD αποτελεί κρίσιμο δείκτη ρύπανσης, γεγονός το οποίο υποδεικνύει την δυσκολία επεξεργασίας του συγκεκριμένου υγρού αποβλήτου. Στη συνέχεια, παρατηρείται έντονη πτώση του COD, με τις συγκεντρώσεις να μειώνονται σχεδόν κατά 50%. Η μείωση αυτή μπορεί να αποδοθεί σε φυσικές διαδικασίες όπως η βιοαποικοδόμηση εύκολων οργανικών ενώσεων και η καθίζηση των Ολικών Αιωρούμενων Στερεών. Οι Alhajoj και Alowaiesh στο Desalination and Water Treatment (2019) αναφέρουν ότι το COD των αποβλήτων ελαιοτριβείου μπορεί να φτάσει έως 72.150 mg/L, αλλά μειώνεται με την πάροδο του χρόνου λόγω αυτών των μηχανισμών. Από τον Ιούνιο και μετά, οι τιμές του COD παραμένουν σχετικά σταθερές περίπου

22.000-25.000 mg/L. Αυτή η σταθεροποίηση υποδηλώνει ότι οι εύκολα βιοαποικοδομήσιμες οργανικές ενώσεις έχουν ήδη αποδομηθεί, ενώ οι πιο ανθεκτικές ενώσεις παραμένουν.

#### 4.2.1.2. Ολικό Άζωτο (TN)

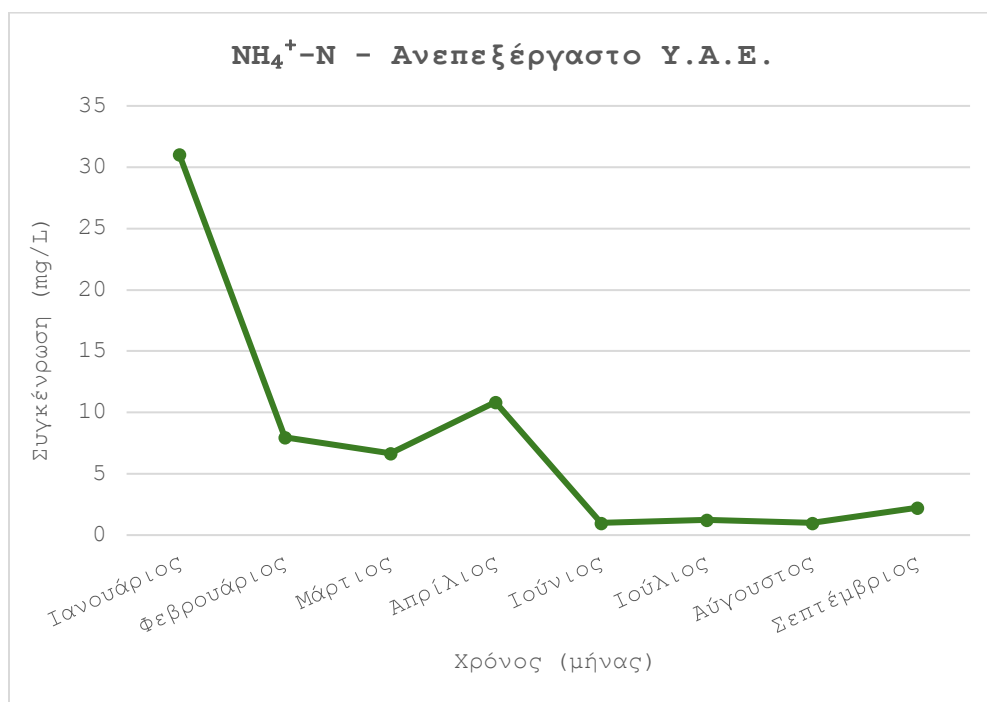


Διάγραμμα 3: Συγκέντρωση Ολικού Αζώτου ανεπεξέργαστου ΥΑΕ (χωρίς αραίωση)

Το παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζει τη συγκέντρωση του **TN (Ολικού Αζώτου)** στα υγρά απόβλητα ελαιοτριβείου από το τέλος Ιανουαρίου έως το τέλος Σεπτεμβρίου του 2023.

Αρχικά, κατά τον πρώτο εργαστηριακό έλεγχο, παρατηρείται υψηλή τιμή αζώτου ίση με 840 mg/L. Αυτές οι τιμές είναι χαρακτηριστικές για υγρά απόβλητα. Κατά τη διάρκεια του πειράματος γίνεται σταδιακή μείωση της τιμής του ολικού αζώτου η οποία φθάνει μέχρι και τα 58 mg/L. Το γεγονός αυτό στηρίζεται κυρίως στην δραστηριότητα των μικροοργανισμών, οι οποίοι χρησιμοποιούν το άζωτο για τον μεταβολισμό τους, ειδικά κατά τη διάρκεια της αναερόβιας αποδόμησης (Li et al., 2020).

#### 4.2.1.3. Αμμωνιακό Άζωτο ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ )



Διάγραμμα 4: Συγκέντρωση αμμωνιακών ιόντων ανεπεξέργαστου ΥΑΕ (χωρίς αραιώση)

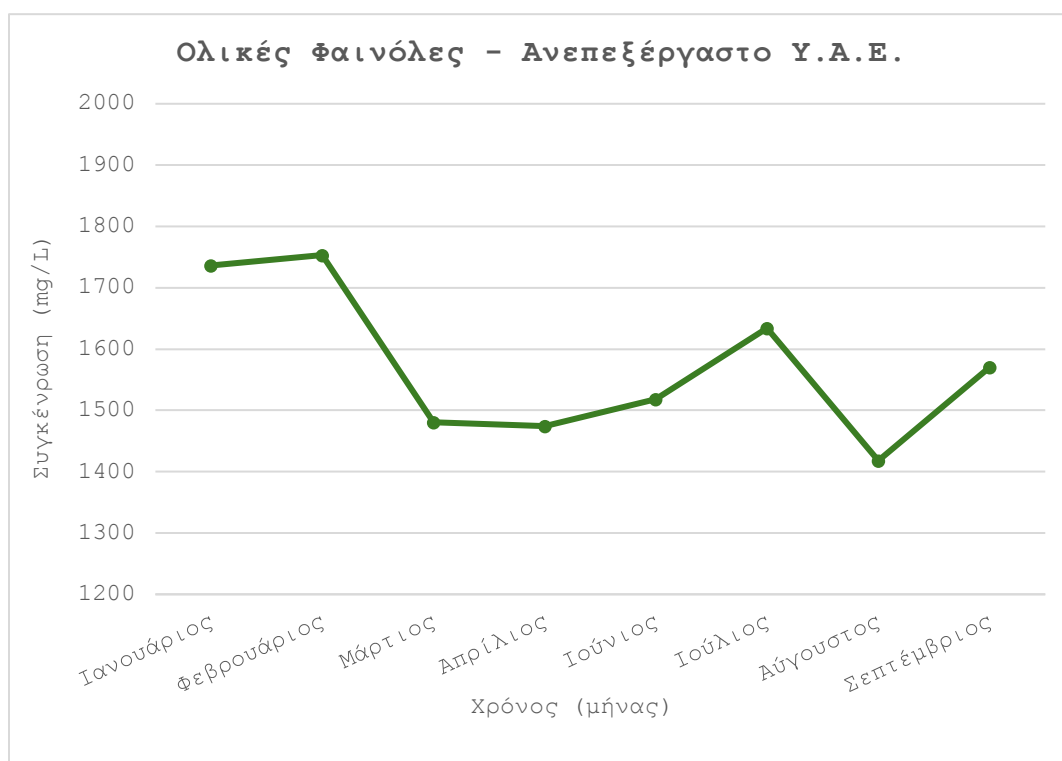
Το παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζει τη συγκέντρωση των **αμμωνιακών ιόντων** στα υγρά απόβλητα ελαιοτριβείου από το τέλος Ιανουαρίου έως το τέλος Σεπτεμβρίου του 2023.

Γενικά το άζωτο με μορφή αμμωνιακών ιόντων, αποτελεί μέρος του Ολικού Αζώτου. Παρατηρείται υψηλή τιμή στην πρώτη μέτρηση, ίση με 31,04 mg/L. Στη συνέχεια, είναι φανερή η απότομη μείωση της συγκέντρωσης, κατα τον πρώτο μήνα παραμονής του ΥΑΕ, στις δεξαμενές (βυτία) όπου φυλάσσεται. Αυτό δικαιολογείται καθώς κατά την παραμονή του ΥΑΕ στις δεξαμενές γίνεται βιολογική αποδόμηση. Συγκεκριμένα, στη δεξαμενή αποθήκευσης του ΥΑΕ



μπορεί να αναπτυχθούν μικροοργανισμοί που χρησιμοποιούν τα αμμωνιακά ιόντα ως πηγή αζώτου για τη δική τους ανάπτυξη και αναπαραγωγή. Αυτά τα βακτήρια καταναλώνουν τα αμμωνιακά ιόντα μέσω της διαδικασίας της νιτροποίησης, όπου τα  $\text{NH}_4^+$  μετατρέπονται σε νιτρικά ιόντα ( $\text{NO}_3^-$ ) με τη βοήθεια βακτηρίων όπως τα *nitrosomonas* και *nitrobacter*.

#### 4.2.1.4. Ολικές Φαινόλες (Total Phenols)



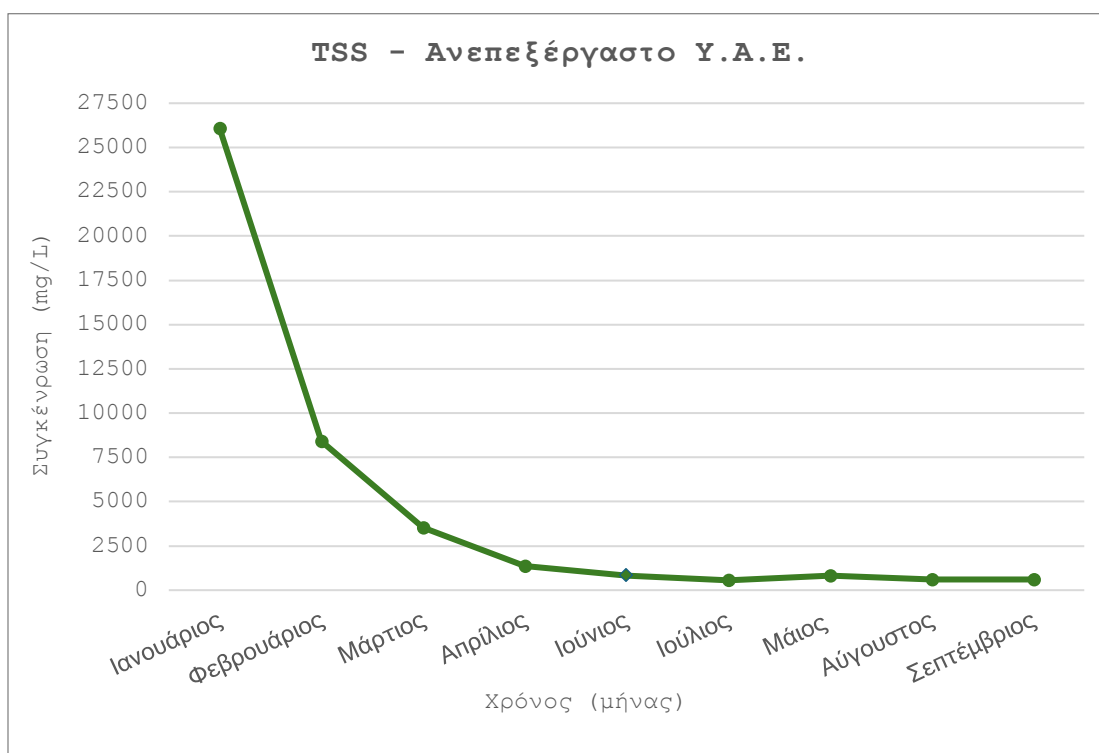
Διάγραμμα 5: Συγκέντρωση Ολικών Φαινολών ανεπεξέργαστου ΥΑΕ (χωρίς αραίωση)

Το παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζει τη συγκέντρωση των **Ολικών Φαινολών** στα υγρά απόβλητα ελαιοτριβείου από το τέλος Ιανουαρίου έως το τέλος Σεπτεμβρίου του 2023.

Όσον αφορά τις ολικές φαινόλες, δεν παρουσιάζεται αξιοσημείωτη μείωση, ενώ φαίνεται να διατηρούνται σχεδόν σταθερές οι συγκεντρώσεις με το πέρασμα του χρόνου. Ειδικότερα, οι φαινόλες είναι ενώσεις ανθεκτικές στη βιολογική αποδόμηση λόγω της σταθερής τους χημικής

δομής και των χαρακτηριστικών τους που περιορίζουν την επαφή με μικροοργανισμούς ή την αφομοίωσή τους από βακτήρια (Figueroa, Jaramillo, 2015), γεγονός το οποίο δικαιολογεί την σταθερή συγκέντρωσή τους.

#### 4.2.1.4. Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (TSS)



Διάγραμμα 6: Συγκέντρωση Ολικών Αιωρούμενων Στερεών ανεπεξέργαστου ΥΑΕ (χωρίς αραίωση)

Το παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζει τη συγκέντρωση των **Ολικών Αιωρούμενων Στερεών** στα υγρά απόβλητα ελαιολιβερίου από το τέλος Ιανουαρίου έως το τέλος Σεπτεμβρίου του 2023.

Είναι φανερή η σταδιακή μείωση των TSS, καθώς η συγκέντρωσή τους αρχικά είναι ίση με 26.080 mg/L και μειώνεται σε περίπου 8000 mg/L, έως και 500 mg/L.

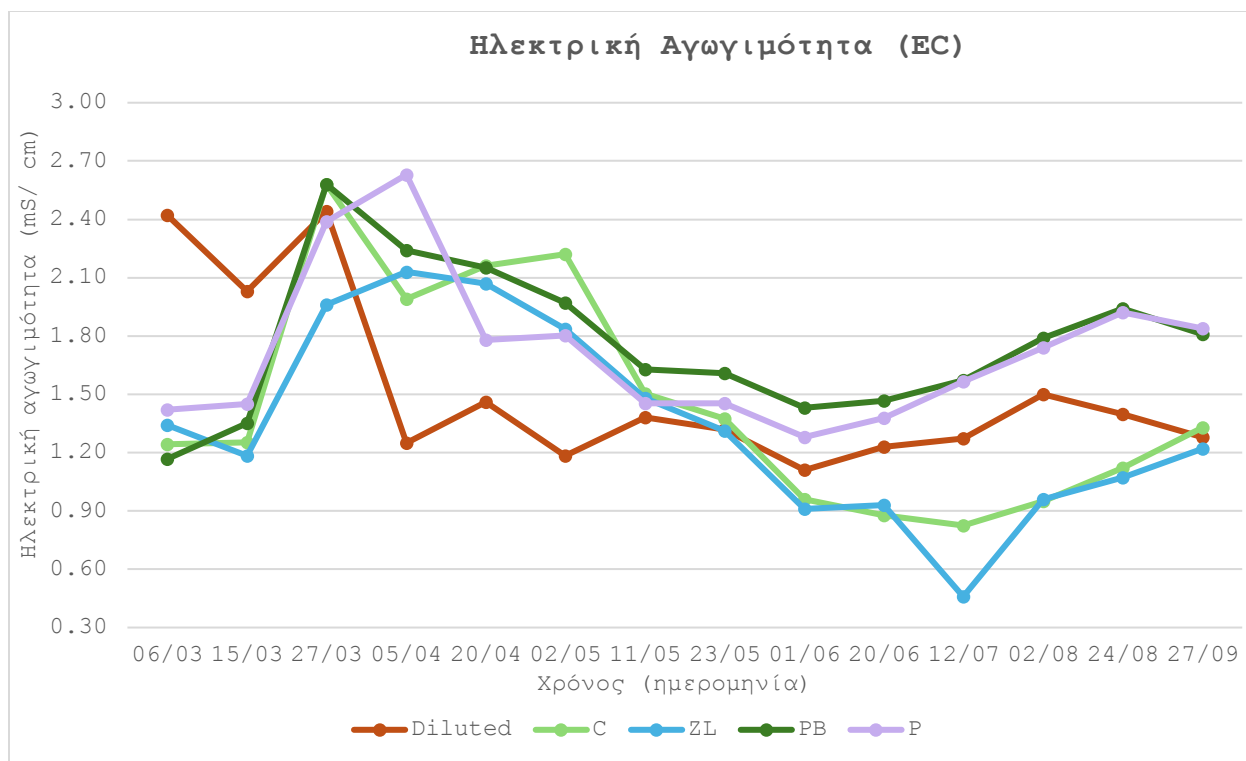
#### 4.2.2. Ανάλυση Εκροών

##### 4.2.2.1. Ηλεκτρική Αγωγιμότητα

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα στα υγρά απόβλητα αντανακλά τη συγκέντρωση διαλυμένων ιόντων και αποτελεί κρίσιμο δείκτη για την ποιότητα του νερού και τις διεργασίες επεξεργασίας. Για παράδειγμα, η αυξημένη αγωγιμότητα μπορεί να υποδηλώνει υψηλή παρουσία αλάτων, επηρεάζοντας τη βιολογική επεξεργασία ή τις ηλεκτροχημικές διεργασίες (Yonar & Akin, 2021).

Πίνακας 6: Μετρήσεις ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) αραιωμένης εισροής & εκροών

	EC (mS/cm)	
	Μέση Τιμή	Εύρος τιμών
Εισροή-Αραιωμένο ΥΑΕ	1,55 ± 0,44	[1,11-2,44]
C	1,46 ± 0,56	[0,83-2,58]
ZL	1,35 ± 0,5	[0,46-2,13]
PB	1,76 ± 0,38	[1,17-2,58]
P	1,72 ± 0,39	[1,28-2,63]



Διάγραμμα 7: Συγκέντρωση ηλεκτρικής αγωγιμότητας αραιωμένης εισροής & εκροών

Στον Πίνακα 6 παρουσιάζεται η μέση τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας ίση με 1,46 mS/cm για την μονάδα C, 1,35 mS/cm για την ZL, 1,76 mS/cm για την PB, ενώ για την P 1,72 mS/cm.

Επιπλέον στο Διάγραμμα 7, είναι φανερό ότι δεν παρουσιάζονται σημαντικές διαφορές συγκρίνοντας τις εκροές των τεσσάρων μονάδων. Ωστόσο, παρατηρείται ότι οι εκροές των μονάδων P και PB παρουσιάζουν υψηλότερη EC από τις εκροές των μονάδων με Ieca και ζεόλιθο. Η αυξημένη ηλεκτρική αγωγιμότητα στις μονάδες που είναι πληρωμένες με HDPE (P και PB) μπορεί να αποδοθεί στην αδράνεια του υλικού καθώς το HDPE είναι ένα αδρανές υλικό που δεν αλληλεπιδρά με τα διαλυμένα ιόντα, γεγονός που σημαίνει ότι δεν απομακρύνει ούτε δεσμεύει σημαντικές ποσότητες ανόργανων ή οργανικών ουσιών από τα υγρά απόβλητα. Αντίθετα, τα διαλυμένα ιόντα παραμένουν στο υγρό, διατηρώντας υψηλότερη την ηλεκτρική αγωγιμότητα. Ο ζεόλιθος, ωστόσο, είναι γνωστός για την ικανότητά του να προσροφά και να ανταλλάσσει ιόντα, ιδιαίτερα κατιόντα, γεγονός που μειώνει την συγκέντρωση ιόντων στο διάλυμα (Hedström, 2001) σε αντίθεση με τα αδρανή υλικά όπως το HDPE που δεν προσφέρουν τέτοιες δυνατότητες, αφήνοντας τη συνολική αγωγιμότητα να παραμένει υψηλή.

Είναι αξιοσημείωτο ότι η αραιωμένη εισροή παρουσιάζει χαμηλότερες τιμές EC από τις εκροές των P και PB. Η αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στις εκροές τεχνητών υδροβιότοπων σε σύγκριση με την εισροή δύναται να οφείλεται σε διάφορους παράγοντες, όπως η διάλυση ανόργανων αλάτων από το υπόστρωμα ή η εξάτμιση των υγρών αποοβλήτων, που αυξάνει τη συγκέντρωση των διαλυμένων ιόντων. Σύμφωνα με μελέτη των Vymazal και Kröpfelová (2008), η αύξηση της αγωγιμότητας στις εκροές μπορεί να αποδοθεί στην απελευθέρωση ανόργανων ιόντων από το υπόστρωμα του υδροβιότοπου κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας των αποβλήτων.

#### 4.2.2.2. pH

Το pH είναι σημαντικός δείκτης για την αξιολόγηση της ποιότητας των υγρών αποβλήτων, καθώς επηρεάζει την τοξικότητα, τη διαλυτότητα των ρύπων και την απόδοση των βιολογικών και χημικών διεργασιών επεξεργασίας (Metcalf & Eddy, 2014).

Πίνακας 7: Μετρήσεις pH αραιωμένης εισροής & εκροών

	pH	
	Μέση Τιμή	Εύρος τιμών
Εισροή-Αραιωμένο ΥΑΕ (1:4)	4,7 ± 0,1	[4,5-4,8]
Εισροή-Αραιωμένο ΥΑΕ (1:8)	5,6 ± 0,8	[4,8-7,5]
C	7,8 ± 0,3	[7,2-8,3]
ZL	7,9 ± 0,4	[7,3-8,4]
PB	7,3 ± 0,8	[6,1-8,6]
P	7,3 ± 0,8	[5,6-8,4]

Στον παραπάνω πίνακα, παρουσιάζεται η αύξηση του pH και των μονάδων C, ZL, PB, P σε σύγκριση με την αραιωμένη εισροή, η οποία έχει αρκετά χαμηλό pH. Συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι η εισροή των υγρών αποβλήτων είναι όξινη, ενώ οι εκροές των μονάδων είναι πλέον ουδέτερες. Ωστόσο, δεν παρουσιάζονται διαφορές μεταξύ των μονάδων.

Το pH στις εκροές των τεχνητών υγροτόπων είναι υψηλότερο από την εισροή λόγω της διαδικασίας νιτροποίησης, όπου κατά την απομάκρυνση της αμμωνίας, δημιουργούνται συνθήκες που αυξάνουν το pH, ιδιαίτερα σε συστήματα με υψηλές θερμοκρασίες και λόγω της αλληλεπίδρασης της εισροής με τα υλικά πλήρωσης. Υλικά όπως ο ζεόλιθος ή το Ieca μπορεί να έχουν αλκαλική επίδραση στο νερό, αυξάνοντας το pH μέσω απελευθέρωσης αλκαλικών ιόντων. Επιπλέον, οι μικροοργανισμοί και τα φυτά απορροφούν CO<sub>2</sub> μέσω της φωτοσύνθεσης, μειώνοντας τη συγκέντρωση ανθρακικών οξέων στο νερό, γεγονός που αυξάνει το pH (Vymazal J., 2011).

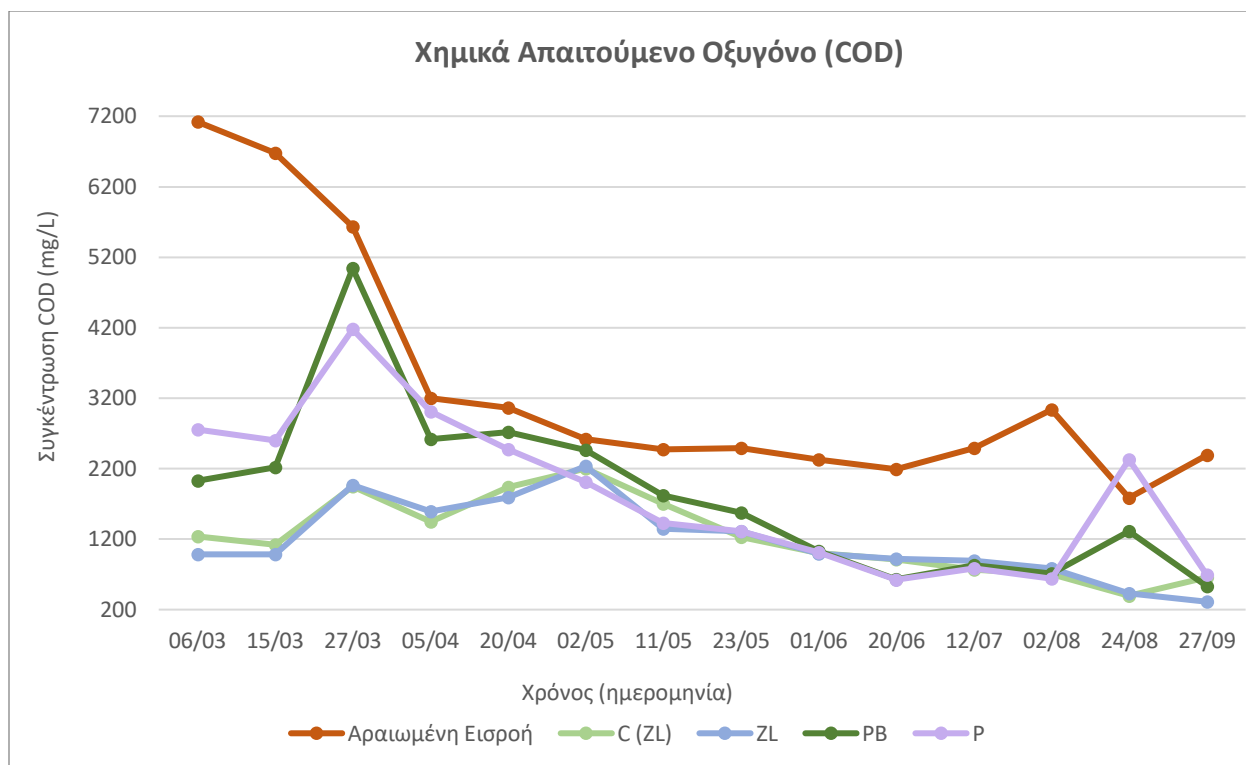
#### 4.2.2.3. Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (COD)

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των εργαστηριακών αναλύσεων για το COD.

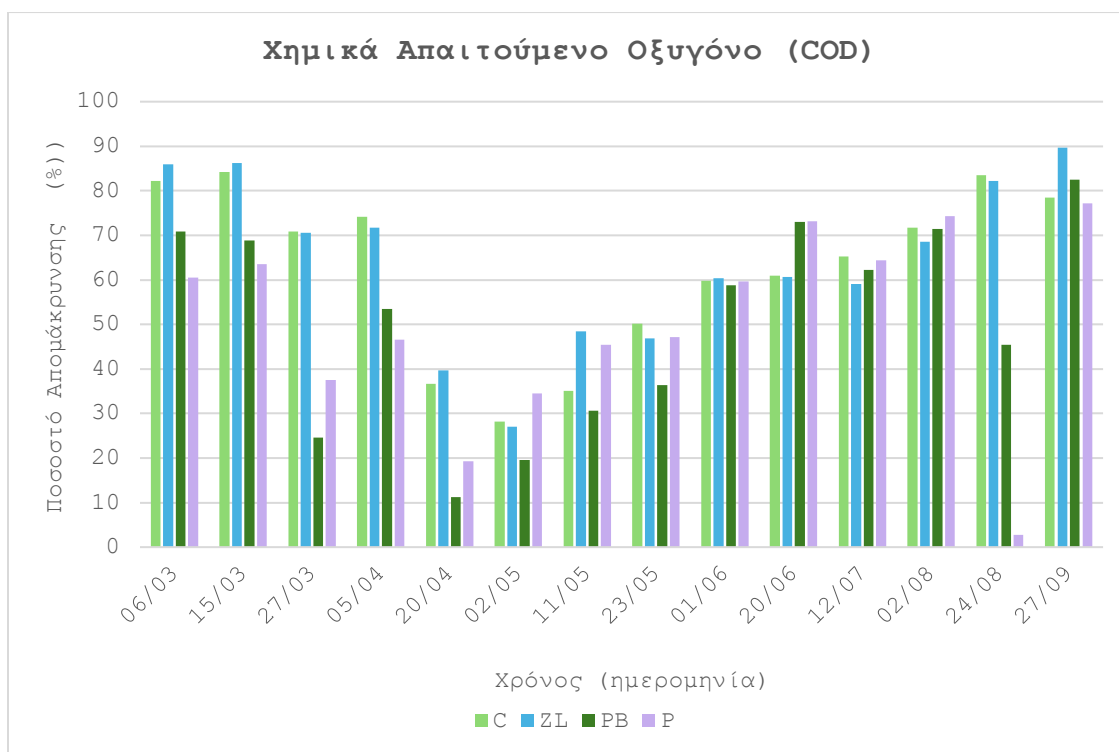
Πίνακας 8: Μετρήσεις COD αραιωμένης εισροής & εκροών

	COD (mg/L)			
	Μέση Τιμή	Εύρος τιμών	Μέση τιμή απομάκρυνσης (%)	Εύρος τιμών απομάκρυνσης (%)
Εισροή-Αραιωμένο ΥΑΕ (1:4)	6599 ± 224	[5629-7120]		
Εισροή-Αραιωμένο ΥΑΕ (1:8)	2553 ± 351	[1784-3200]		
C	1233 ± 213	[396-2200]	63 ± 18	[28-84]
ZL	1182 ± 202	[312-2235]	64 ± 19	[27-90]
PB	1823 ± 126	[532-5040]	51 ± 23	[11-82]
P	1845 ± 70	[624-4176]	50 ± 22	[3-77]

Είναι εμφανές από τον παραπάνω πίνακα, ότι όσον αφορά το COD, οι μονάδες με πληρωτικό υλικό Ieca και ζεόλιθο (C και ZL) επιτυγχάνουν υψηλότερα ποσοστά απομάκρυνσης από τις μονάδες με πληρωτικό υλικό HDPE και biochar. Ωστόσο, η επίδραση της βλάστησης, που περιέχεται στην μονάδα ZL, δεν φαίνεται να είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς το ποσοστό απομάκρυνσης ανάμεσα σε C και ZL διαφέρει κατά 1,2% (62,9% έναντι 64,1%).



Διάγραμμα 8: Συγκέντρωση COD αραιωμένης εισροής & εκροών



Διάγραμμα 9: Ποσοστά απομάκρυνσης COD αραιωμένης εισροής & εκροών

Βάσει άλλων επιστημονικών μελετών και έρευνας, είναι γνωστό ότι η αποτελεσματικότητα των τεχνητών υδροβιότοπων οριζόντιας ροής (HF CWs) στην απομάκρυνση του COD ποικίλλει ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας, αλλά επιτυγχάνει ποσοστά απομάκρυνσης που κυμαίνονται από 40% έως 90%. Συγκεκριμένα, οι παράγοντες που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης, είναι ο χρόνος παραμονής (HRT), όπου μεγαλύτερος χρόνος παραμονής αυξάνει την απόδοση απομάκρυνσης, το υλικό πλήρωσης των δεξαμενών, όπου υλικά όπως ο ζεόλιθος και το LECA συμβάλλουν στην καλύτερη προσρόφηση των ρύπων και στην βιολογική δραστηριότητα στο εσωτερικό των μονάδων, στη βλάστηση, όπου τα φυτά ενισχύουν τη βιολογική δραστηριότητα και βοηθούν στη σταθεροποίηση του υποστρώματος και στην εισροή των μονάδων, όπου η αρχική συγκέντρωση COD επηρεάζει την αποτελεσματικότητα, καθώς υψηλά φορτία μπορεί να μειώσουν την απόδοση λόγω υπερφόρτωσης του συστήματος. Αυτό αποδεικνύεται μέσω του παραπάνω διαγράμματος, καθώς είναι φανερό η μείωση της συγκέντρωσης του COD μετά τις 05/04/2022, όπου η αραίωση της εισροής μεταβλήθηκε σε 1:8 αντί του 1:4 που επικρατούσε αρχικά.

Σύμφωνα με τον Vymazal (2005) τα ποσοστά απομάκρυνσης σε τεχνητούς υδροβιότοπους επεξεργασίας οικιακών αποβλήτων οριζόντιας ροής, φθάνουν έως και το 85%, ενώ σύμφωνα με τον Wu, Masi et al. (2014), τα ποσοστά απομάκρυνσης COD κυμαίνονται σε 70%-90% σε καλά σχεδιασμένα συστήματα με βέλτιστο χρόνο παραμονής.

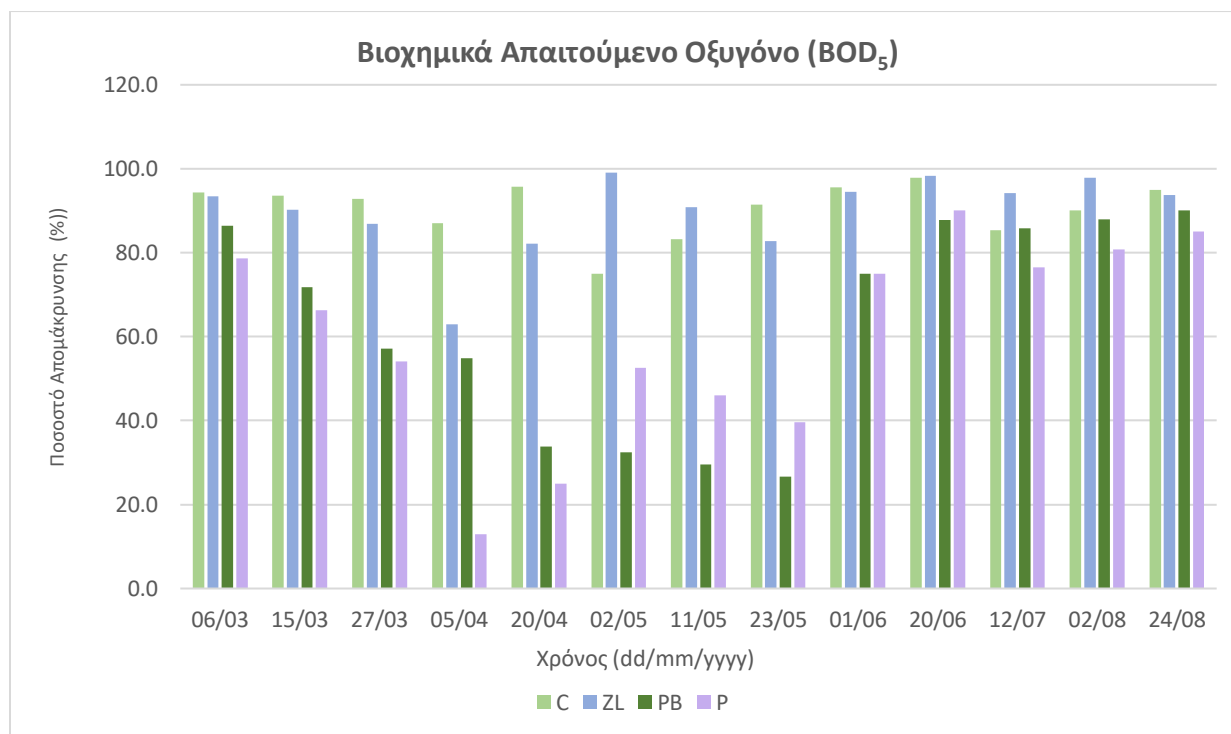
Επιπλέον, παρατηρείται ότι η συγκέντρωση του COD της αραιωμένης εισροής σταδιακά μειώνεται. Κατά την παραμονή των ΥΑΕ στα βυτία αποθήκευσης, αλλά και στα δοχεία αποθήκευσης του αραιωμένου ΥΑΕ (αραιωμένο), οι οργανικές ουσίες αποδομούνται από αναερόβιους μικροοργανισμούς που αναπτύσσονται σε αυτά λόγω έλλειψης οξυγόνου. Αυτή η διαδικασία μετατρέπει τα οργανικά φορτία σε αέρια, όπως το μεθάνιο και το διοξείδιο του άνθρακα. Επίσης, μέρος των οργανικών και ανόργανων σωματιδίων κατακάθονται στον πυθμένα των δεξαμενών αποθήκευσης, αφαιρώντας έτσι μέρος του COD από την στήλη του ΥΑΕ που λαμβάνεται. Τέλος, οι χημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται στις δεξαμενές, όπως οξειδοαναγωγικές διεργασίες και διάσπαση οργανικών ενώσεων, δύναται να οδηγήσουν στην μείωση του COD κατά τη διάρκεια παραμονής του ΥΑΕ (Dermeche S. et al, 2013).



#### 4.2.2.4. Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (BOD<sub>5</sub>)

Πίνακας 9: Μετρήσεις BOD<sub>5</sub> αραιωμένης εισροής & εκροών

	BOD <sub>5</sub> (mg/L)		
	Εύρος τιμών	Μέση τιμή απομάκρυνσης (%)	Εύρος τιμών απομάκρυνσης (%)
Εισροή-Αραιωμένο ΥΑΕ (1:4)	[1400 -4900]		
Εισροή-Αραιωμένο ΥΑΕ (1:8)	[800-2557]		
C	[15-500]	90 ± 6	[75-98]
ZL	[20-1150]	90 ± 10	[63-99]
PB	[50-2100]	63 ± 20	[27-90]
P	[50-2700]	60 ± 19	[13-90]



Διάγραμμα 10: Ποσοστά απομάκρυνσης BOD<sub>5</sub> αραιωμένης εισροής & εκροών

Από τα δεδομένα αποδεικνύεται ότι τα ποσοστά απομακρύνσεων είναι υψηλά και φθάνουν έως και το 90%, στην περίπτωση των ΤΥ με Ieca και ζεόλιθο. Αυτό σημαίνει πως οι μικροοργανισμοί

κατανάλωσαν υψηλά ποσοστά οξυγόνου έτσι ώστε να πραγματοποιήσουν την αποδόμηση των οργανικών ουσιών. Υποδεικνύεται λοιπόν, η αποτελεσματικότητα του συστήματος των ΤΥ στην αποδόμηση των οργανικών ουσιών που περιέχονται στα υγρά απόβλητα ελαιοτριβείου.

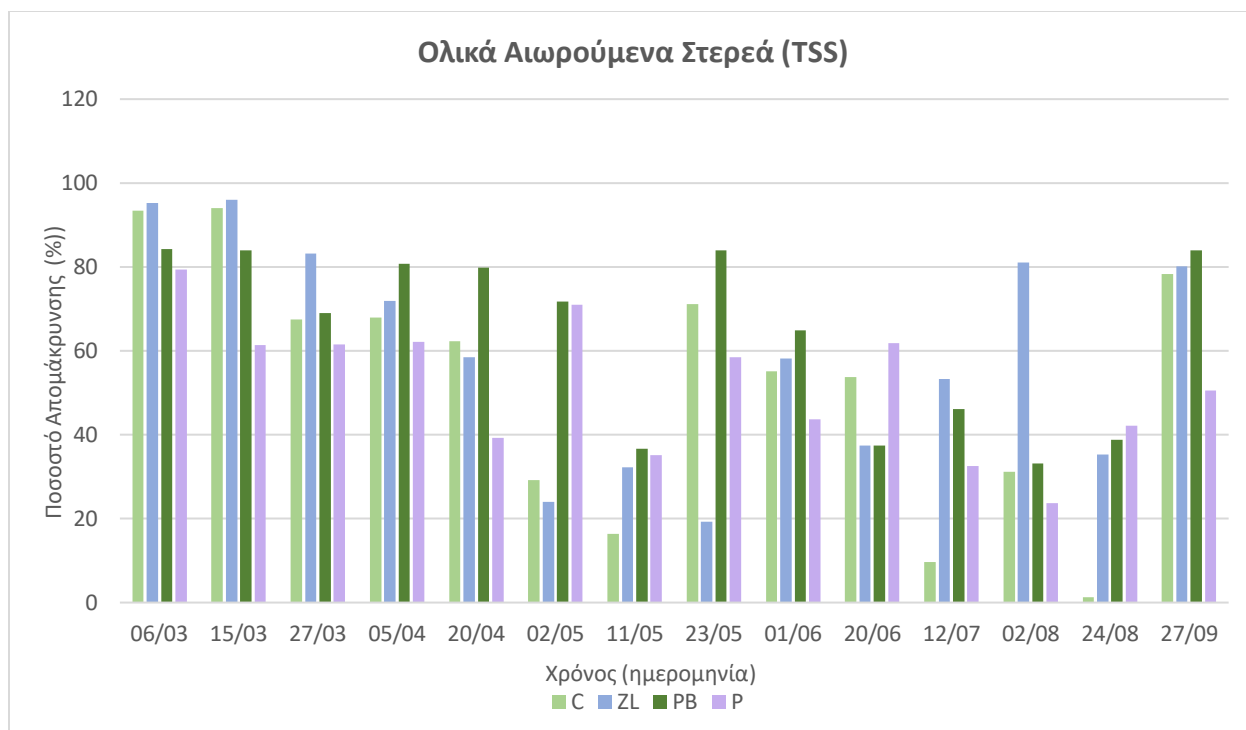
Πιο συγκεκριμένα,Οι τεχνητοί υγροβιότοποι μπορούν να επιτύχουν ποσοστά απομάκρυνσης BOD από 70% έως και 95%, ανάλογα με το σχεδιασμό και τις συνθήκες λειτουργίας (Vymazal, 2007).

#### 4.2.2.5. Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (TSS)

Κατά τη βιβλιογραφία, τα Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (TSS) αποτελούν έναν βασικό δείκτη για τον χαρακτηρισμό των υγρών αποβλήτων. Οι υψηλές τιμές συγκεντρώσεων TSS οδηγούν στον περιορισμό της διάχυσης του φωτός, επηρεάζοντας αρνητικά τη βιοποικιλότητα και επιπλέον δύναται τα TSS να λειτουργήσουν ως μέσο μεταφοράς προσροφημένων ρύπων (Yang et al., 2018).

Πίνακας 10: Μετρήσεις TSS αραιωμένης εισροής & εκροών

	TSS (mg/L)			
	Μέση Τιμή	Εύρος τιμών	Μέση τιμή απομάκρυνσης (%)	Εύρος τιμών απομάκρυνσης (%)
Εισροή-Αραιωμένο ΥΑΕ (1:4)	285,8 ± 40,8	[106-383]		
Εισροή-Αραιωμένο ΥΑΕ (1:8)	111,1 ± 29,4	[46-192]		
C	73,9 ± 29,6	[18-173]	52 ± 31	[2-94]
ZL	78,5 ± 19,3	[12-168]	59 ± 27	[19-96]
PB	52,9 ± 13,9	[20-122]	64 ± 21	[33-84]
P	96,3 ± 8	[47-215]	52 ± 17	[24-79]



*Διάγραμμα 11: Ποσοστά απομάκρυνσης TSS αραιωμένης εισροής & εκροών*

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, φαίνεται οι μονάδες τεχνητών υγροβιότοπων PB και ZL να παρουσιάζουν τα υψηλότερα ποσοστά απομάκρυνσης TSS, με την μονάδα PB (64%) να είναι η πιο αποδοτική. Επίσης, η ZL (59%), που συνδυάζει πληρωτικά υλικά όπως ο ζεόλιθος και το Ieca, αλλά και βλάστηση (*Phragmites australis*), έχει υψηλότερη αποδοτικότητα από τις C και P, γεγονός που υποδεικνύει τη συμβολή της φυτικής κάλυψης στη συγκράτηση και απομάκρυνση των στερεών του ΥΑΕ.

Οι μονάδες με ζεόλιθο και LECA (C, ZL) δείχνουν συγκρίσιμη απόδοση, με τον ζεόλιθο να προσφέρει μεγαλύτερη συνοχή στο υπόστρωμα και την βλάστηση στη μονάδα ZL να συμβάλει στην επεξεργασία της εισροής.

Οι μονάδες με HDPE πληρωτικό υλικό (P, PB) έχουν ελαφρώς χαμηλότερη αποδοτικότητα. Γενικά, ο ζεόλιθος και το LECA διαθέτουν υψηλό πορώδες και μεγάλη ειδική επιφάνεια, γεγονός που επιτρέπει την αποτελεσματική προσρόφηση και συγκράτηση αιωρούμενων σωματιδίων (Kavitha S. et al., 2020). Αντίθετα, το HDPE δεν ευνοεί τόσο την ανάπτυξη βιοφίλμ ή την διήθηση αιωρούμενων σωματιδίων (Stević D. et al., 2019).

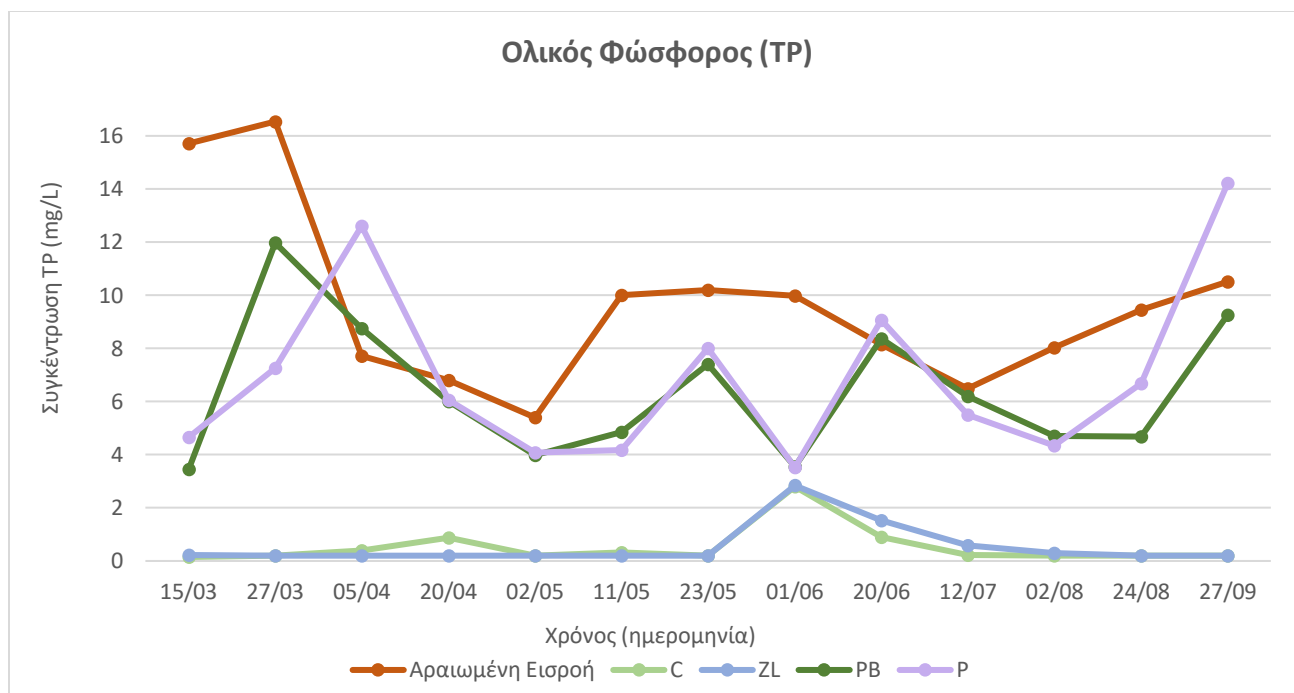
Μετά την 5/4/2023, η εισροή αραιώνεται περισσότερο (1:8), μειώνοντας τη συγκέντρωση των TSS. Αυτό αντανακλάται στα χαμηλότερα TSS εισροής μετά την αλλαγή. Παρότι η συγκέντρωση εισροής μειώνεται, τα ποσοστά απομάκρυνσης στις μονάδες παραμένουν σχετικά σταθερά, κάτι που δείχνει την προσαρμοστική αποτελεσματικότητα των υγροβιοτόπων.

Στο διάγραμμα, φαίνεται ότι οι τιμές απομάκρυνσης του TSS παρουσιάζουν διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια του χρόνου, πιθανώς λόγω μεταβολών στις συνθήκες, την ποιότητα της εισροής και την περιβαλλοντική θερμοκρασία.

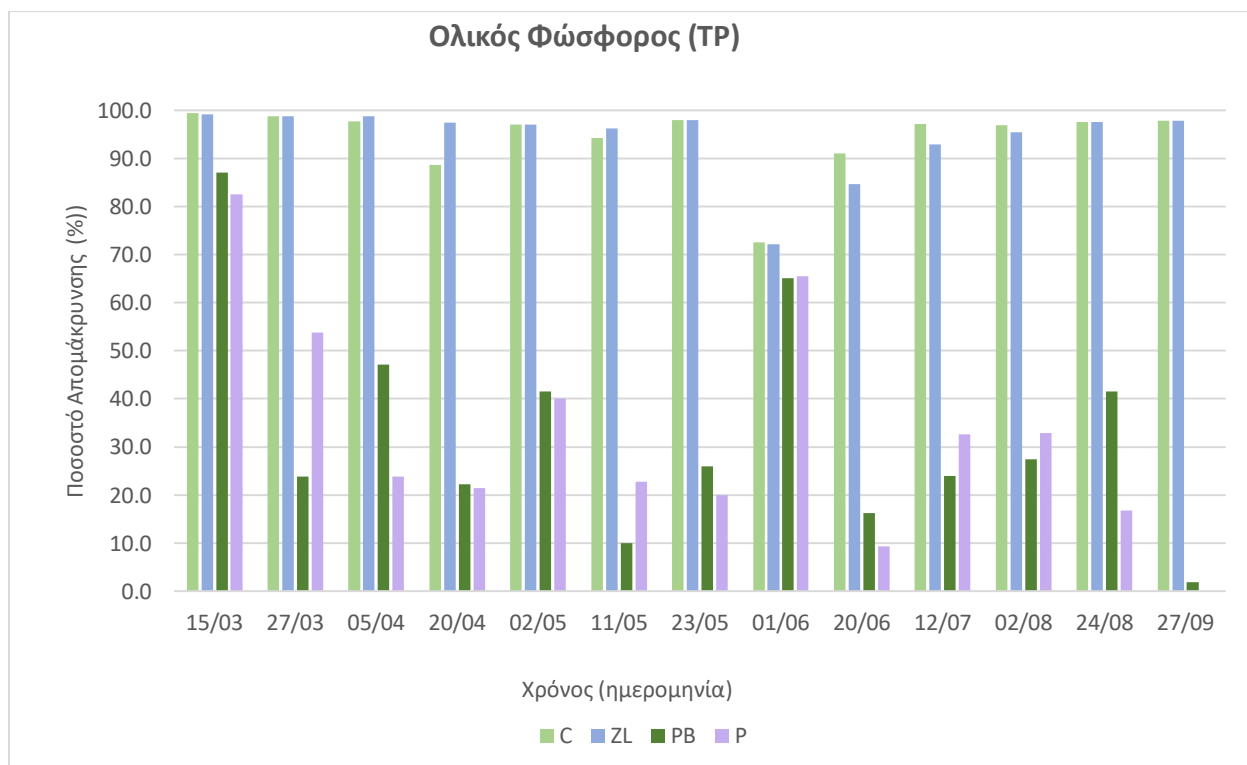
#### 4.2.2.6. Ολικός Φώσφορος (TP)

Πίνακας 11: Μετρήσεις TP αραιωμένης εισροής & εκροών

	TP (mg/L)			
	Μέση Τιμή	Εύρος τιμών	Μέση τιμή απομάκρυνσης (%)	Εύρος τιμών απομάκρυνσης (%)
Εισροή-Αραιωμένο ΥΑΕ (1:4)	16,64 ± 6,24	[7,71-26,6]		
Εισροή-Αραιωμένο ΥΑΕ (1:8)	8,5 ± 1,8	[5,4-10,5]		
C	0,53 ± 0,02	[0,15-2,8]	94 ± 7	[73-99]
ZL	0,54 ± 0,03	[0,2-2,84]	94 ± 8	[72-99]
PB	6,40 ± 0,89	[3,45-11,97]	33 ± 23	[2-87]
P	6,93 ± 1,32	[3,52-14,21]	35 ± 22	[9-82]



Διάγραμμα 12: Συγκέντρωση TP αραιωμένης εισροής & εκροών



Διάγραμμα 13: Ποσοστά απομάκρυνσης TP αραιωμένης εισροής & εκροών

Σύμφωνα με τους Zhao Y. et al. το 2011, το ποσοστό απομάκρυνσης ολικού φωσφόρου (TP) σε τεχνητούς υγροβιότοπους κυμαίνεται από 75-94%, γεγονός που επιβεβαιώνει την αποδοτικότητα των μονάδων C και ZL του πειράματος, οι οποίες παρουσιάζουν μέση τιμή απομάκρυνσης περίπου 94%. Επίσης, επιβεβαιώνεται εξίσου και από τους Kadlec & Wallace (2009), οι οποίοι ανέφεραν παρόμοια επίπεδα απομάκρυνσης φωσφόρου σε υγροβιότοπους με υποστρώματα υψηλής προσρόφησης, όπως είναι ο ζεόλιθος και το leca. Ωστόσο, οι τεχνητοί υγροβιότοποι με πληρωτικό υλικό το ανακυκλωμένο HDPE (P) και το biochar (PB), συμπεριφέρονται διαφορετικά, παρουσιάζοντας μέση τιμή απομάκρυνσης περίπου στο 35%.

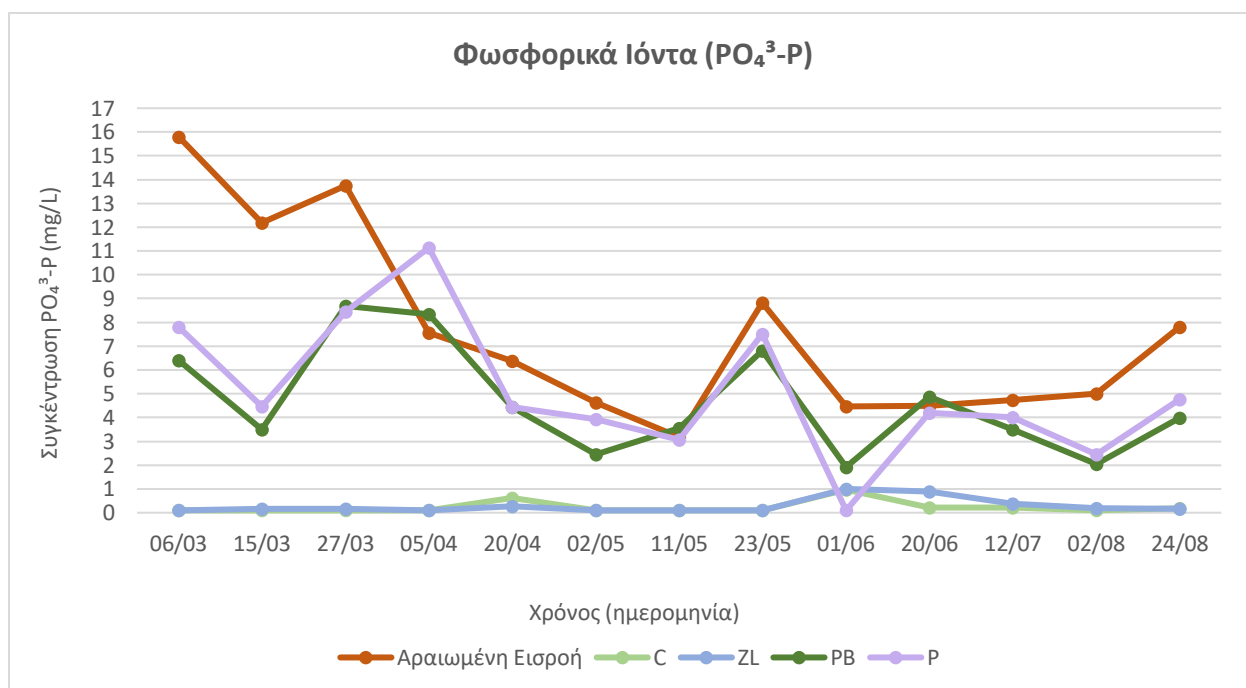
Η απομάκρυνση φωσφόρου σε μονάδες TY με τη χρήση ζεολίθου και leca είναι συχνά πιο αποτελεσματική από αυτές που χρησιμοποιούν ανακυκλωμένο HDPE και biochar, λόγω των διαφορετικών φυσικοχημικών ιδιοτήτων αυτών των υλικών. Ο ζεόλιθος χρησιμοποιείται ευρέως για την προσρόφηση ιόντων φωσφόρου, λόγω της ιοντικής του ικανότητας και της μεγάλης ειδικής επιφάνειάς του. Οι μελέτες έχουν δείξει ότι ο ζεόλιθος μπορεί να δεσμεύσει φωσφορικά ιόντα ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) μέσω ανταλλαγής κατιόντων (Aksu & Kutsal, 2005). Επιπλέον, αν και το leca δεν έχει τις ίδιες ιοντικές ικανότητες όπως ο ζεόλιθος, η πορώδης δομή του και η μεγάλη ειδική επιφάνεια του το καθιστούν αποτελεσματικό υλικό για την υποστήριξη βιολογικών διεργασιών και τη δημιουργία βιοφίλμ που συμβάλλουν στη απομάκρυνση του φωσφόρου (Zhao et al., 2016). Η αστάθεια στις μονάδες PB και P ενδέχεται να συνδέεται με μειωμένη ανάπτυξη μικροοργανισμών ή διακυμάνσεις στο pH (Wu et al., 2014). Τέλος, το γεγονός ότι οι μονάδες PB και P παρουσιάζουν χαμηλότερα ποσοστά απομάκρυνσης, περίπου 33%-35%, δύναται να αποδοθεί στην μη επαρκή ανάπτυξη βιοφίλμ.

Επίσης, σύμφωνα με τα αποτελέσματα, δεν διαπιστώνεται σημαντική διαφορά μεταξύ των μονάδων C και ZL, γεγονός που υποδεικνύει ότι η βλάστηση δεν έχει καθοριστική επίδραση στην απομάκρυνση του φωσφόρου.

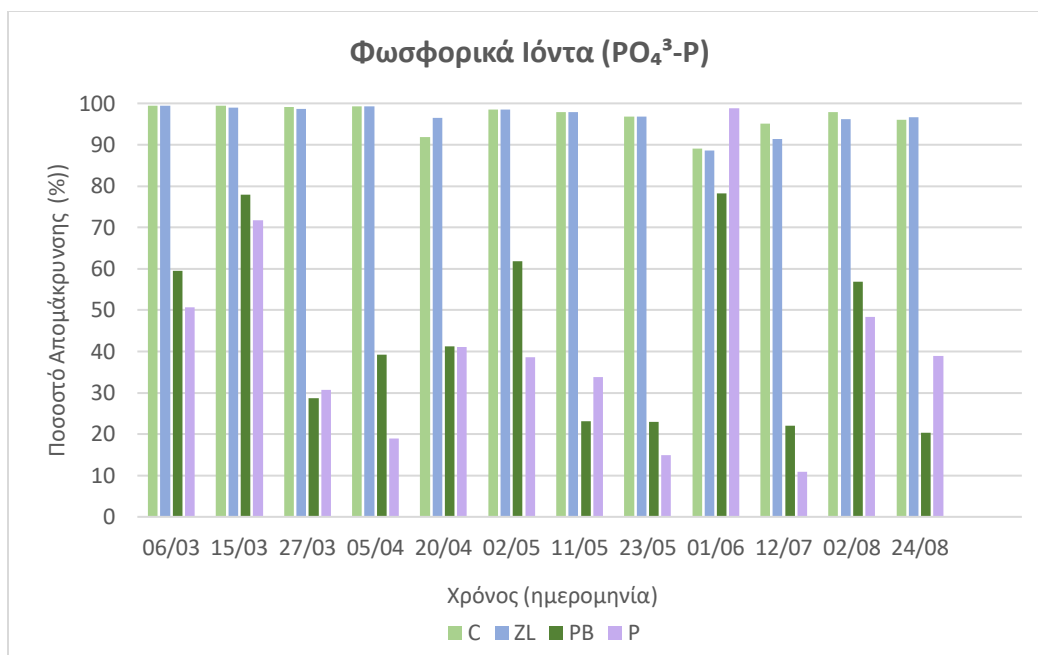
#### 4.2.2.7. Φωσφορικά Ιόντα ( $\text{PO}_4^{3-}$ -P)

Πίνακας 12: Μετρήσεις  $PO_4^{3-}P$  αραιωμένης εισροής & εκροών

	$PO_4^{3-}P$ (mg/L)			
	Μέση Τιμή	Εύρος τιμών	Μέση τιμή απομάκρυνσης (%)	Εύρος τιμών απομάκρυνσης (%)
Εισροή-Αραιωμένο ΥΑΕ (1:4)	12,32 ± 3,5	[4,46-11,14]		
Εισροή-Αραιωμένο ΥΑΕ (1:8)	5,79 ± 1,93	[0,1-10,65]		
C	0,23 ± 0,14	[0,1-0,97]	96 ± 3	[89-99]
ZL	0,28 ± 0,05	[0,1-1]	95 ± 5	[80-99]
PB	4,54 ± 0,78	[1,92-8,69]	46 ± 21	[20-78]
P	5,5 ± 0,78	[0,1-11,14]	41 ± 24	[11-99]



Διάγραμμα 14: Συγκέντρωση  $PO_4^{3-}P$  αραιωμένης εισροής & εκροών



Διάγραμμα 15: Ποσοστά απομάκρυνσης  $PO_4^{3-}P$  αραιωμένης εισροής & εκροών

Όπως αναλύθηκε και παραπάνω, σύμφωνα με επιστημονικές μελέτες, τα πληρωτικά υλικά όπως ο ζεόλιθος και το leca ευνοούν την απομάκρυνση φωσφορικών ιόντων, όπως και του ολικού φωσφόρου ευρύτερα. Παρατηρείται και σε αυτήν την περίπτωση, λοιπόν, η υψηλή απόδοση των μονάδων C και ZL, οι οποίες έχουν ποσοστό απομάκρυνσης  $PO_4^{3-}P$  περίπου 96%, σε αντίθεση με τις P και PB που χαρακτηρίζονται από ποσοστό απομάκρυνσης περίπου 41-46%.

Το γεγονός αυτό οφείλεται επίσης στα διαφορετικά υλικά πλήρωσης των μονάδων ΤΥ. Ο ζεόλιθος έχει υψηλή ικανότητα ιοντικής ανταλλαγής και μπορεί να δεσμεύσει το φωσφόρο, ενώ το LECA προσφέρει υποστήριξη για την ανάπτυξη μικροοργανισμών που βοηθούν στην απομάκρυνση φωσφόρου (C,ZL). Μεταξύ των δύο μονάδων, παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά.

Αντίθετα, το HDPE δεν συνεισφέρει στην απομάκρυνση του φωσφόρου, ενώ το biochar, αν και έχει κάποιες ικανότητες προσρόφησης, είναι λιγότερο αποτελεσματικό σε σχέση με τον ζεόλιθο.

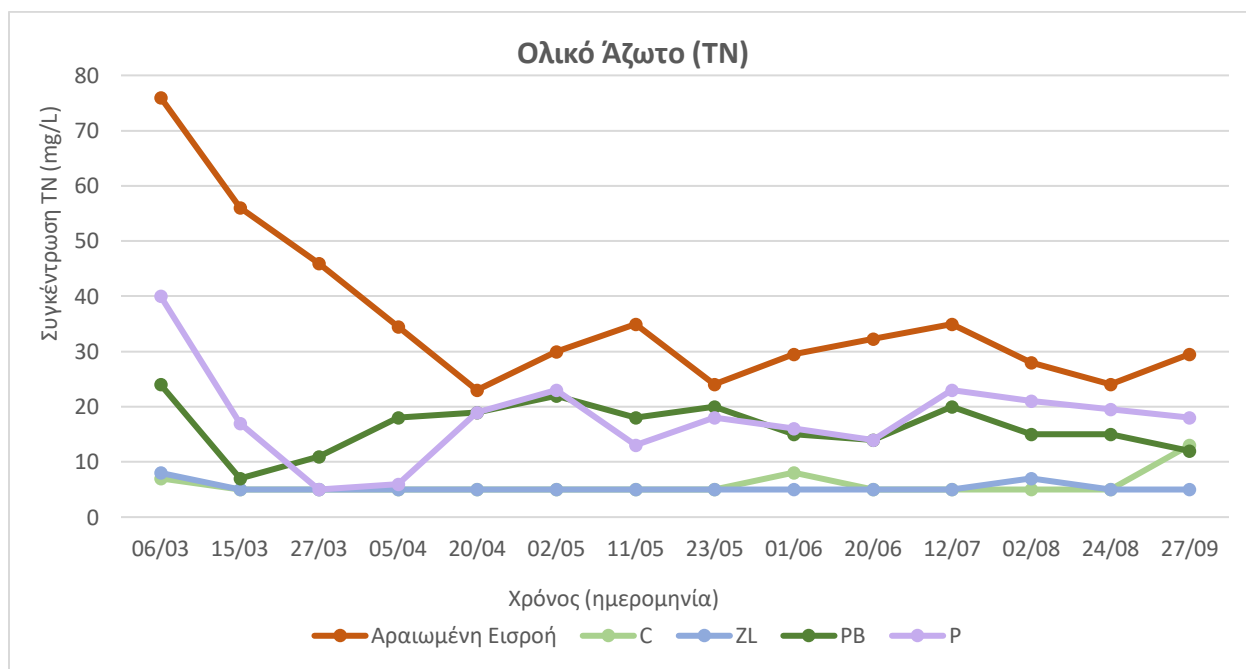
Τέλος, παρατηρείται ότι η απομάκρυνση των φωσφορικών ιόντων ακολουθεί την ίδια τάση με την απομάκρυνση ολικού φωσφόρου, καθώς ο ολικός φώσφορος βρίσκεται κατά κύριο λόγο σε μορφή φωσφορικών ιόντων.



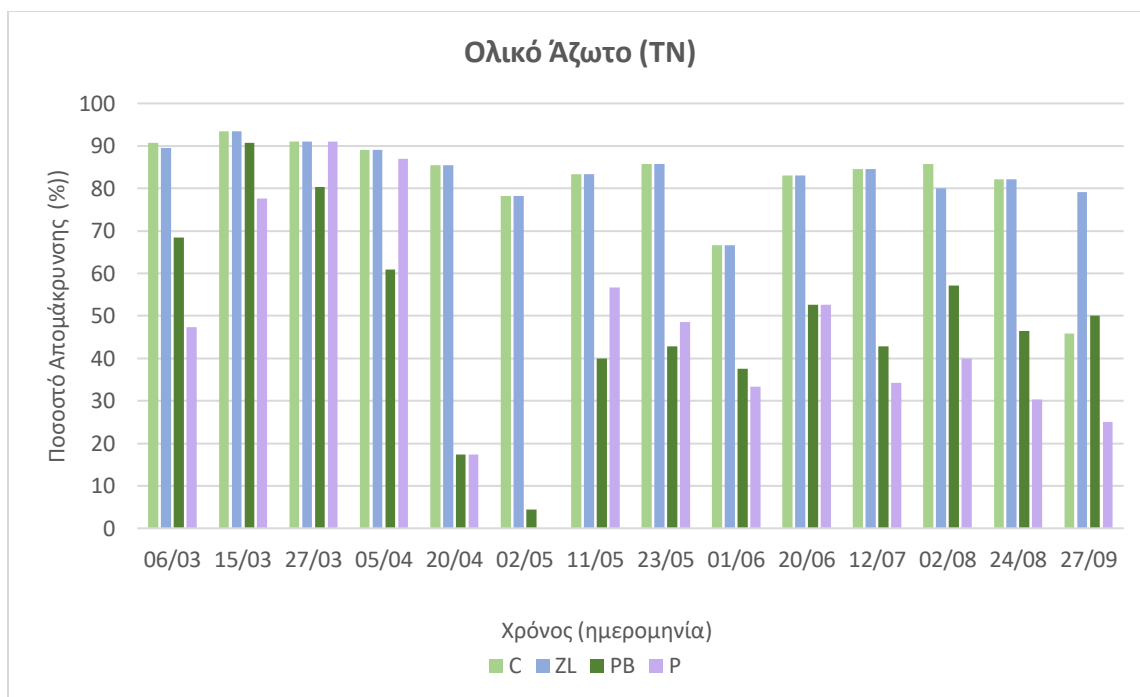
#### 4.2.2.8. Ολικό Άζωτο (TN)

Πίνακας 13: Μετρήσεις TN αραιωμένης εισροής & εκροών

	TN (mg/L)			
	Μέση Τιμή	Εύρος τιμών	Μέση τιμή απομάκρυνσης (%)	Εύρος τιμών απομάκρυνσης (%)
Εισροή-Αραιωμένο ΥΑΕ (1:4)	53,13 ± 17,6	[34,5-76]		
Εισροή-Αραιωμένο ΥΑΕ (1:8)	29,03 ± 4,36	[23-35]		
C	5,93 ± 2,23	[5-13]	82 ± 12	[46-93]
ZL	5,36 ± 0,93	[5-8]	84 ± 7	[67-93]
PB	16,43 ± 4,6	[7-24]	49 ± 23	[4-91]
P	18,04 ± 8,34	[5-40]	46 ± 26	[0-91]



Διάγραμμα 16: Συγκέντρωση TN αραιωμένης εισροής & εκροών



*Διάγραμμα 17: Ποσοστά απομάκρυνσης TN αραιωμένης εισροής & εκροών*

Παρατηρείται και στην περίπτωση του ολικού αζώτου, η ικανοποιητική απόδοση των μονάδων C και ZL, οι οποίες επιτυγχάνουν ποσοστά απομάκρυνσης 81% και 84% αντίστοιχα. Σύμφωνα με επιστημονική μελέτη, η απομάκρυνση αζώτου μπορεί να επιτευχθεί έως και 65-75% σε υγροβιότοπους οριζόντιας ροής, μέσω της σημαντικής συμβολής των βακτηρίων που εμπλέκονται στην απονιτροποίηση (García et al., 2010).

Επιπλέον, σε μια ακόμη μελέτη, η απομάκρυνση του ολικού αζώτου σε οριζόντιους υγροβιότοπους ήταν περίπου 60-80%, με τη μεγαλύτερη αποδοτικότητα να παρατηρείται σε συστήματα με υψηλή φυτοκάλυψη (βλάστηση) και μικρότερη ροή νερού (Maszyta et al., 2019).

Από τα διαγράμματα, διαπιστώνεται η χαμηλότερη απόδοση των μονάδων P και PB στην απομάκρυνση αζώτου, η οποία κυμαίνεται στο 46-49%. Η χαμηλότερη αποδοτικότητα των μονάδων με HDPE ως πληρωτικό υλικό στην απομάκρυνση αζώτου μπορεί να εξηγηθεί από διάφορους παράγοντες. Σύμφωνα με τον Nymazal (2013), το HDPE, λόγω της μη πορώδους δομής του, παρέχει περιορισμένη επιφάνεια για την ανάπτυξη μικροοργανισμών που εμπλέκονται στην νιτροποίηση και απονιτροποίηση. Επίσης, σύμφωνα με τους Garcia et al.

(2010) η απονιτροποίηση απαιτεί αναερόβιες συνθήκες, τις οποίες δεν υποστηρίζει καλά το HDPE σε σχέση με τα πορώδη υλικά όπως ο ζεόλιθος.

#### 4.2.2.9. Αμμωνιακό Άζωτο ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ )

Πίνακας 14: Μετρήσεις  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  αραιωμένης εισροής & εκροών

	$\text{NH}_4^+\text{-N}$ (mg/L)		
	Μέση Τιμή	Εύρος τιμών	Μέση τιμή απομάκρυνσης (%)
Εισροή-Αραιωμένο ΥΑΕ (1:4)	3,27 ± 2,65		
Εισροή-Αραιωμένο ΥΑΕ (1:8)	1,55 ± 0,91		
C	<1	-	55 ± 23
ZL	<1	-	49 ± 23
PB	1,27 ± 0,79	[1-3,9]	51 ± 23
P	1,48 ± 0,87	[1-3,5]	45 ± 32

Στις εργαστηριακές αναλύσεις που αφορούν το αμμωνιακό άζωτο, ενώ στο αραιωμένο ΥΑΕ της εισροής ανιχνεύεται μικρή συγκέντρωση αμμωνιακών ιόντων, στις εκροές των μονάδων τις περισσότερες φορές το αποτέλεσμα ήταν κάτω της μονάδας ή σε πολύ μικρή συγκέντρωση. Η απουσία αμμωνιακού αζώτου ( $\text{NH}_4^+$ ) στις εκροές των ΤΥ μπορεί να εξηγηθεί μέσω διάφορων φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών που συμβαίνουν μέσα στο σύστημα. Στην μελέτη του Zhang et al. (2014), παρατηρήθηκε ότι η νιτροποίηση αποτελεί βασική διεργασία απομάκρυνσης αμμωνιακού αζώτου σε τεχνητούς υδροβιότοπους, με σημαντική μείωση του αμμωνιακού αζώτου στην εκροή, λόγω της υψηλής δραστηριότητας των νιτροποιητικών μικροοργανισμών. Επιπλέον, σύμφωνα με τη μελέτη του Wu et al. (2017), η παρουσία οξυγόνου και η μικροβιακή νιτροποίηση σε τεχνητούς υδροβιότοπους είναι κυρίαρχες διεργασίες που μειώνουν σημαντικά τα επίπεδα αμμωνιακού αζώτου στην εκροή. Τέλος, η μελέτη του Vymazal (2007) αναφέρει ότι η πρόσληψη του αμμωνιακού αζώτου από τα φυτά σε τεχνητούς υδροβιότοπους (όπως η καλαμιά) είναι μια σημαντική διαδικασία για την απομάκρυνση του, ιδιαίτερα σε βιολογικά ενεργά συστήματα.

#### 4.2.2.10. Νιτρικό Άζωτο ( $\text{NO}_3^- \text{N}$ )

Όπως αναλύθηκε παραπάνω, στην περίπτωση του αμμωνιακού αζώτου, και σε αυτήν την περίπτωση, οι μετρήσεις του νιτρικού αζώτου ήταν πολύ χαμηλές και στην περίπτωση των μονάδων C και ZL, ήταν κάτω από την μονάδα ( $<1$ ).

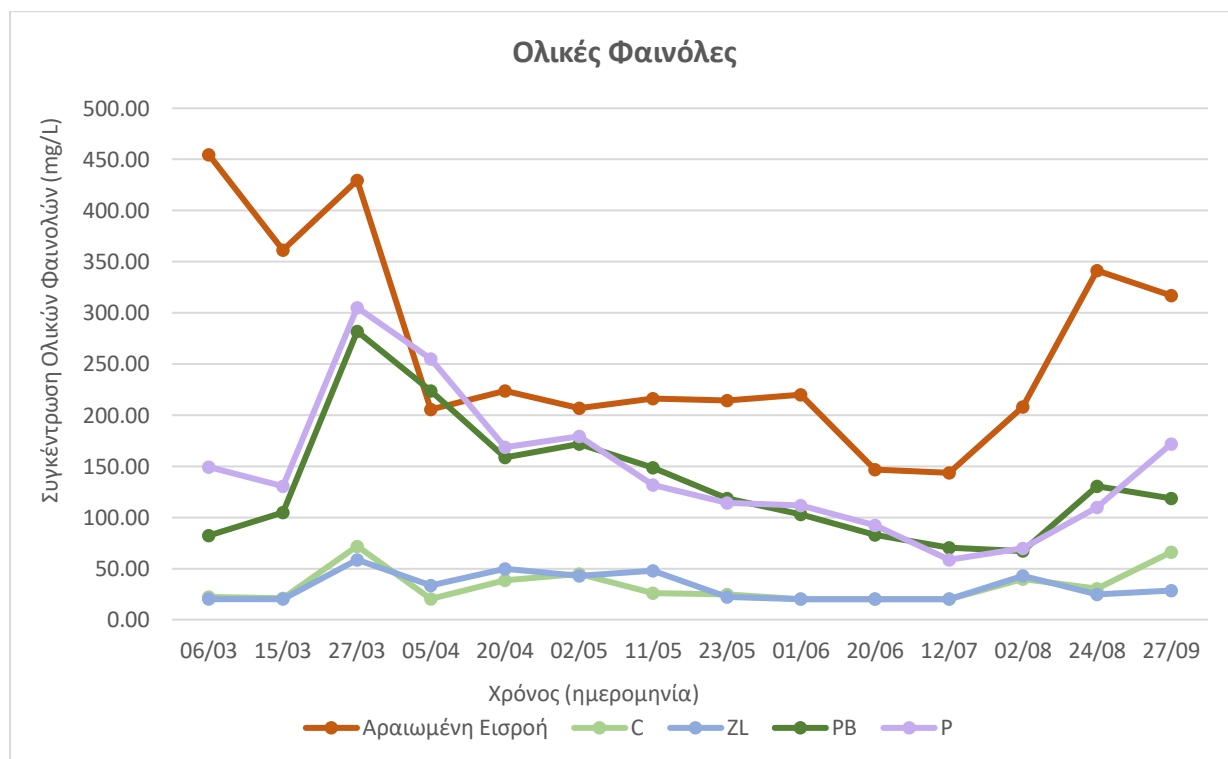
Είναι γνωστό, ότι η νιτροποίηση και η απονιτροποίηση είναι οι δύο βασικές βιολογικές διαδικασίες που επηρεάζουν την απομάκρυνση του νιτρικού αζώτου σε τεχνητούς υγροβιότοπους. Η διαδικασία της νιτροποίησης περιλαμβάνει την οξείδωση του αμμωνιακού αζώτου ( $\text{NH}_4^+$ ) σε νιτρικό άλας ( $\text{NO}_3^-$ ) από νιτροποιητικά βακτήρια. Παρά την ύπαρξή του, αυτή η διαδικασία δεν επηρεάζει άμεσα την απομάκρυνση του νιτρικού αζώτου, αλλά προετοιμάζει το έδαφος για την απονιτροποίηση. Η απονιτροποίηση είναι η αναγωγή του νιτρικού αζώτου ( $\text{NO}_3^-$ ) σε αέρια άζωτο ( $\text{N}_2$ ), μέσω αναερόβιων συνθηκών. Αυτή η διαδικασία είναι καθοριστική για την απομάκρυνση του νιτρικού αζώτου στους υγροβιότοπους. Τα αναερόβια μικρόβια χρησιμοποιούν το νιτρικό άλας ως αποδέκτη ηλεκτρονίων για τη διαδικασία της αναπνοής. Όσο περισσότερη απονιτροποίηση συμβαίνει, τόσο μεγαλύτερη είναι η απομάκρυνση του νιτρικού αζώτου (Vymazal et al., 2007).

#### 4.2.2.11. Ολικές Φαινόλες

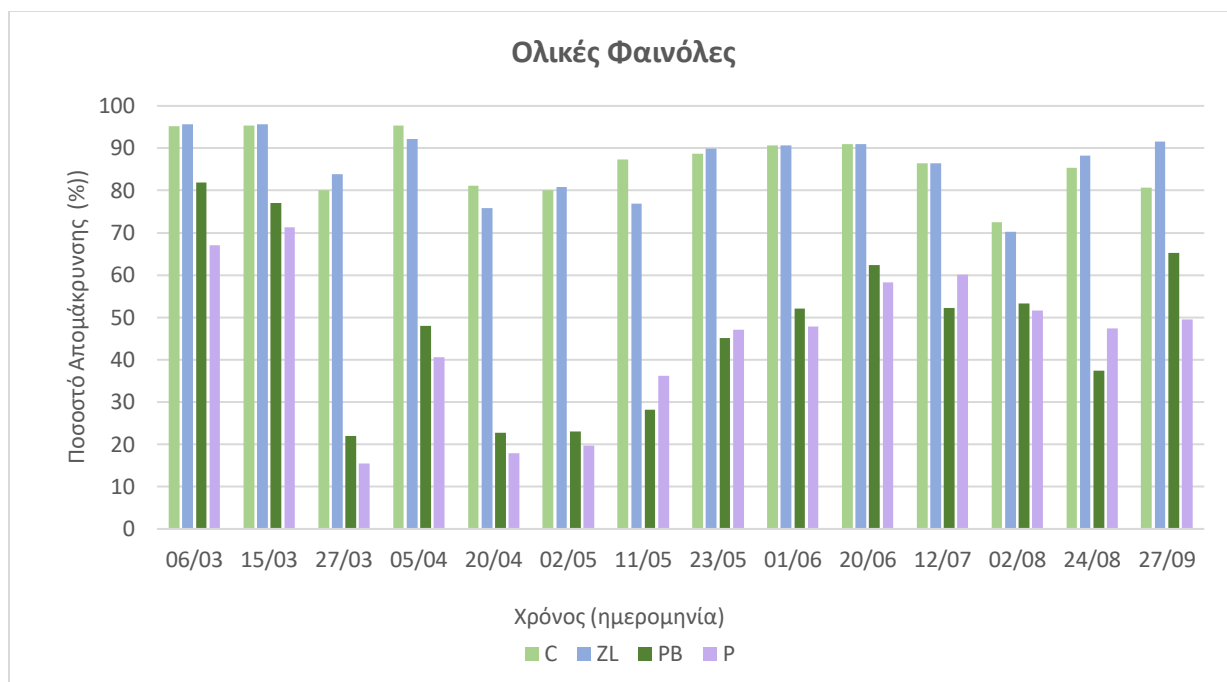
Η απομάκρυνση των ολικών φαινολών από τα υγρά απόβλητα ελαιοτριβείου κρίνεται εξαιρετικά σημαντική λόγω των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που αυτές δύναται να προκαλέσουν. Οι φαινολικές ενώσεις είναι γνωστές για την τοξικότητά τους, η οποία μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τα υδάτινα οικοσυστήματα και τη βιοποικιλότητα. Επιπλέον, η υψηλή οργανική φόρτιση (BOD και COD) που σχετίζεται με την παρουσία φαινολών μπορεί να οδηγήσει σε υποξικές συνθήκες στους υδάτινους αποδέκτες, υποβαθμίζοντας την ποιότητα του νερού.

Πίνακας 15: Μετρήσεις ολικών φαινολών αραιωμένης εισροής & εκροών

	Ολικές Φαινόλες (mg/L)			
	Μέση Τιμή	Εύρος τιμών	Μέση τιμή απομάκρυνσης (%)	Εύρος τιμών απομάκρυνσης (%)
Εισροή-Αραιωμένο ΥΑΕ (1:4)	363 ± 48	[205-454]		
Εισροή-Αραιωμένο ΥΑΕ (1:8)	224 ± 33	[144-341]		
C	33,22 ± 7,37	[20-72]	86 ± 7	[72-95]
ZL	32,16 ± 12,11	[20-59]	86 ± 8	[70-96]
PB	133 ± 31	[67-282]	48 ± 20	[22-82]
P	146 ± 28	[59-305]	45 ± 18	[15-71]



Διάγραμμα 18: Συγκέντρωση ολικών φαινολών αραιωμένης εισροής & εκροών



*Διάγραμμα 19: Ποσοστά απομάκρυνσης ολικών φαινολών αραιωμένης εισροής & εκροών*

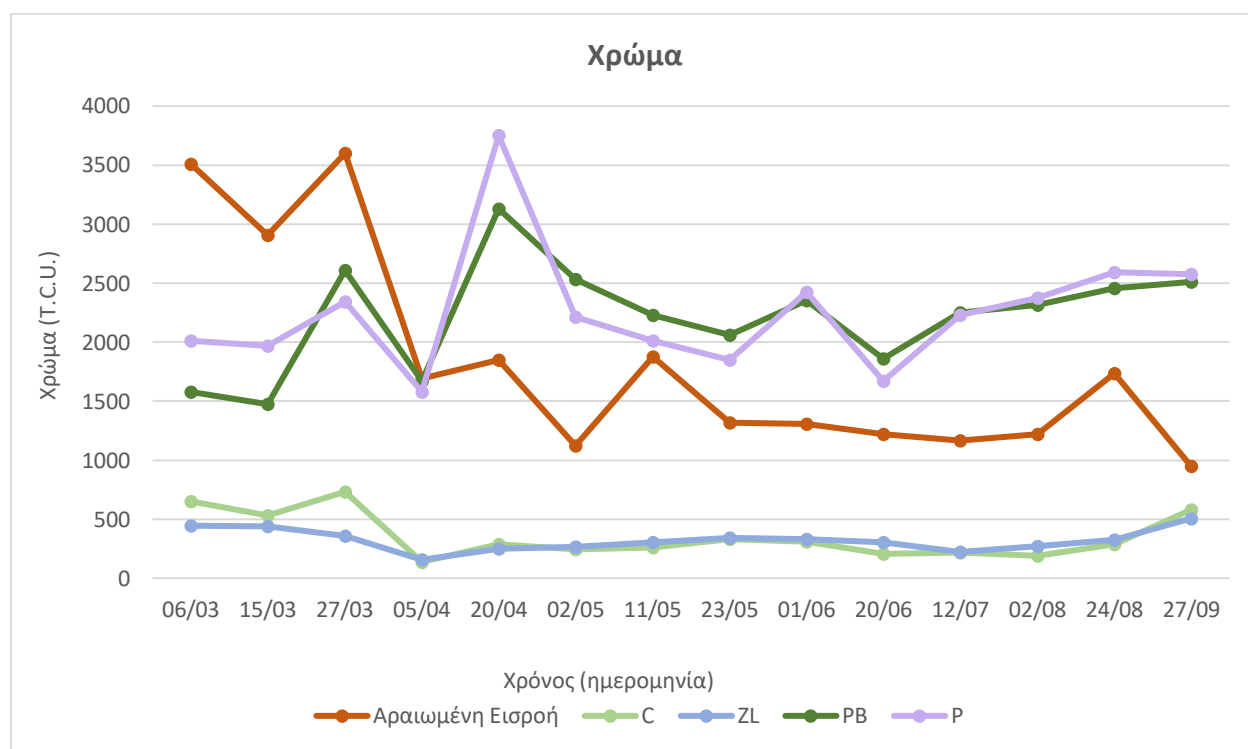
Παρατηρώντας τα αποτελέσματα, γίνεται εύκολα κατανοητό ότι οι μονάδες C και ZL παρουσιάζουν μεγάλη απόδοση ως προς την απομάκρυνση φαινολών από το ΥΑΕ, με μέση τιμή απομάκρυνσης περίπου στο 86%. Ωστόσο, οι μονάδες P και PB και σε αυτήν την περίπτωση, επιτυγχάνουν χαμηλότερη απομάκρυνση, περίπου στο 45-47%. Η υψηλή απόδοση των μονάδων με ζεόλιθο και Ieca, μπορεί να αποδοθεί στον συνδυασμό της υψηλής προσροφητικής τους ικανότητας, της καταλυτικής δραστηριότητας τους στις διεργασίες και υποστήριξης τους στην μικροβιολογική αποδόμηση. Αντίθετα, οι μονάδες με HDPE και biochar, πιθανόν να είναι λιγότερο αποτελεσματικές λόγω περιορισμένης προσρόφησης από το biochar, αλλά και μικρότερης ανάπτυξης βιοφίλμ πάνω στο ανακυκλωμένο HDPE.

Επιπλέον, κατά την αλλαγή της αραιώσης της εισροής (ΥΑΕ), φαίνεται η απότομη πτώση στην συγκέντρωση των φαινολών. Ιδιαίτερα, κατά τους θερινούς μήνες, η συγκέντρωση τους έχει πτωτική τάση και επιτυγχάνονται οι υψηλότερες απομακρύνσεις.

#### 4.2.2.12. Χρώμα

Πίνακας 16: Μετρήσεις χρώματος αραιωμένης εισροής & εκροών

	Χρώμα (T.C.U)			
	Μέση Τιμή	Εύρος τιμών	Μέση τιμή απομάκρυνσης (%)	Εύρος τιμών απομάκρυνσης (%)
Εισροή-Αραιωμένο ΥΑΕ (1:4)	2927 ± 376	[1690-3600]		
Εισροή-Αραιωμένο ΥΑΕ (1:8)	1375 ± 256	[948-1875]		
C	355 ± 59	[138-732]	81,14 ± 6,83	[66,55-96,17]
ZL	322 ± 93	[156-506]	81,29 ± 7,29	[70,82-95,67]
PB	2216 ± 453	[1474-3130]	-	-
P	2256 ± 582	[1580-3750]	-	-



Διάγραμμα 20: Χρώμα αραιωμένης εισροής & εκροών

Όσον αφορά το χρώμα της ανεπεξέργαστης εισροής (αραιωμένο ΥΑΕ), παρατηρείται αρχικά για το χρονικό διάστημα έως 05/04/2023, όπου η αραιώση του ΥΑΕ ήταν 1:4, πολύ υψηλή τιμή T.C.U. (Total Colour Units), περίπου 2927 T.C.U. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς το ΥΑΕ χαρακτηρίζεται από έντονο χρώμα λόγω της ύπαρξης πολυφαινολών, που είναι ισχυροί αντιοξειδωτικοί παράγοντες στο ελαιόλαδο, καθώς και άλλων οργανικών ενώσεων όπως οι

χρωστικές (π.χ. χλωροφύλλη), που συμβάλλουν στην αυξημένη τιμή T.C.U. Αυτές οι ουσίες δίνουν στο ΥΑΕ το χαρακτηριστικό πράσινο ή κίτρινο χρώμα που είναι υπεύθυνο για την υψηλή τιμή T.C.U. Στη συνέχεια, όπου το ΥΑΕ αραιώνεται σε αναλογία 1:8, είναι φανερή η πτώση των T.C.U. περίπου κατά το ήμισυ στα 1375 T.C.U.

Παρατηρείται από τα διαγράμματα και τον πίνακα, ότι οι μονάδες C και ZL, επιτυγχάνουν απομάκρυνση χρώματος στο απόβλητο, όπου η απομάκρυνση φθάνει σε ποσοστό 81%, ποσοστό το οποίο είναι αρκετά ικανοποιητικό.

Ωστόσο, οι μονάδες P και PB δεν επιτυγχάνουν απομάκρυνση χρώματος. Αυτό, ίσως οφείλεται στην χρήση πληρωτικού υλικού όπως το HDPE. Η δέσμευση χρωστικών ουσιών από το HDPE δύναται να μην είναι τόσο αποδοτική σε τεχνητούς υγροβιότοπους για λόγους, οι οποίοι σχετίζονται κυρίως με τις φυσικές και χημικές ιδιότητες του υλικού.



Αρχικά, ως προς την απόδοση των συστημάτων τεχνητών υγροβιότοπων οριζόντιας ροής στην επεξεργασία του υγρού αποβλήτου ελαιοτριβείου, οι μονάδες C (χωρίς βλάστηση) και ZL (με βλάστηση) αποδείχθηκαν οι πιο αποδοτικές στην επεξεργασία του υγρού αποβλήτου ελαιοτριβείου σε σύγκριση με τις μονάδες P και PB, με πιο ευνοϊκά αποτελέσματα από την μονάδα ZL. Η απομάκρυνση θρεπτικών συστατικών και η βελτίωση της ποιότητας της εκροής ήταν ικανοποιητική, γεγονός που ενισχύει την ικανότητα των τεχνητών υγροβιοτόπων στην επεξεργασία αυτών των υγρών αποβλήτων.

Όσον αφορά, το pH και την ηλεκτρική αγωγιμότητα, η επεξεργασία του αποβλήτου στις μονάδες, κατέληξε σε εκροή με ουδέτερο pH και μειωμένη αγωγιμότητα στην περίπτωση των μονάδων C και ZL.

Επιπλέον, οι μονάδες C και ZL πέτυχαν πολύ ικανοποιητικά ποσοστά απομάκρυνσης οργανικών ενώσεων (COD έως και 64% απομάκρυνση) αλλά και φαινολών (έως και 86% απομάκρυνση), δείκτες οι οποίοι είναι κρίσιμοι για την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων.

Συγκεκριμένα για τα Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (TSS), η μονάδα TY με την μεγαλύτερη απόδοση, ήταν η PB με ποσοστό απομάκρυνσης περίπου 64%. Έπειτα, ακολουθεί η μονάδα ZL με ποσοστό απομάκρυνσης 59%.

Όσον αφορά την απομάκρυνση φωσφόρου και αζώτου, οι μονάδες C και ZL παρουσίασαν υψηλά ποσοστά απομάκρυνσης φωσφόρου και αζώτου, με ιδιαίτερη έμφαση στην απομάκρυνση του φωσφόρου που έφθασε σε ποσοστό 94% (μέση τιμή απομάκρυνσης C και ZL). Η αποτελεσματικότητα του συστήματος μπορεί να αποδοθεί στην καλή επιλογή υλικών πλήρωσης και στις συνθήκες ροής που ευνοούν την απομάκρυνση ή προσρόφηση, καθώς και τη βιολογική αποικοδόμηση των θρεπτικών συστατικών.

Οι μονάδες C και ZL συνείσφεραν στην απομάκρυνση και του χρώματος, του σκουρόχρωμου υγρού αποβλήτου ελαιοτριβείου, αλλά από την άλλη πλευρά οι μονάδες με πληρωτικό υλικό ανακυκλωμένο HDPE ή/και biochar (P και PB) δεν παρουσίασαν μείωση χρώματος.

Επιπλέον, η βλάστηση δεν κατείχε σημαντικό ρόλο στην απομάκρυνση των ρύπων. Ο κύριος μηχανισμός απομάκρυνσης ήταν τα υλικά πλήρωσης που επιλέχθηκαν. Πιο αναλυτικά, αν και η μονάδα ΖΛ περιλάμβανε βλάστηση, η παρουσία της δεν είχε σημαντικά θετική επίδραση στην απομάκρυνση του φωσφόρου ή του αζώτου. Αυτό δύναται να οφείλεται στην μη επαρκή ανάπτυξη της βλάστησης και του ριζικού συστήματος, ώστε να ευνοηθεί η ανάπτυξη βιοφιλμ για την βιοαποδόμηση. Ωστόσο, είναι αξιοσημείωτη η ταχύτερη ανάπτυξη των φυτών στις μονάδες με Ieca και ζεόλιθο, σε αντίθεση με τις μονάδες που περιέχουν ανακυκλωμένο πλαστικό, γεγονός το οποίο δικαιολογεί και την καλύτερη απόδοση των C και ΖΛ στην βιοαποδόμηση των οργανικών ρύπων.

Η χρήση υλικών όπως ο ζεόλιθος και το LECA συνεισέφερε σημαντικά στην απομάκρυνση των θρεπτικών συστατικών, ενώ η παρουσία των φυτών δεν φαίνεται να έχει αρνητική επίδραση στην αποδοτικότητα των υλικών αυτών. Η σωστή επιλογή πληρωτικού υλικού φαίνεται να είναι καθοριστικός παράγοντας για την αποτελεσματική επεξεργασία των υγρών αποβλήτων ελαιοτριβείου.

Τελικά, η γενική εικόνα της απόδοσης της ΖΛ υποδεικνύει ότι οι τεχνητοί υδροβιότοποι είναι μια αποτελεσματική και βιώσιμη τεχνολογία για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων ελαιοτριβείων. Η καλή απόδοση των συστημάτων υπογραμμίζει την αναγκαιότητα για την εφαρμογή αυτών των τεχνολογιών σε βιομηχανίες που παράγουν υγρά απόβλητα με υψηλά επίπεδα θρεπτικών συστατικών.

Η μελέτη της αλληλεπίδρασης βλάστησης και υλικών πλήρωσης, καθώς και η βελτίωση των συνθηκών ροής και οξυγόνωσης των συστημάτων, μπορεί να οδηγήσει σε περαιτέρω βελτιώσεις στην απόδοση των τεχνητών υδροβιοτόπων στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων. Επίσης, η αξιολόγηση της μακροπρόθεσμης απόδοσης και της ανθεκτικότητας των υλικών πλήρωσης, υπό πραγματικές συνθήκες επεξεργασίας, θα μπορούσε να προσφέρει χρήσιμα δεδομένα για την εφαρμογή αυτών των συστημάτων σε μεγαλύτερη κλίμακα.

## Βιβλιογραφία

- Michelakos N., 2000, “Απόβλητα ελαιοτριβείων: Οικονομικότητα-εφικτότητα των μεθόδων διαχείρισης αποβλήτων”, Εκδόσεις Γεωργική Τεχνολογία Ελαιοκομία p. 150-157
- Masi F., Bresciani R., Munz G., Lubello C., 2015, Evaporation–condensation of olive mill wastewater: Evaluation of condensate treatability through SBR and constructed wetlands, Ecological Engineering, p. 156–161
- Paraskeva, P., Diamadopoulos, E., 2006. Technologies for olive mill wastewater (OMW) treatment: a review. J. Chem. Technol. Biotechnol. 81, p. 1475–1485
- Verhoeven J., Arheimer B., Yin C., Hefting M., 2006, Regional and global concerns over wetlands and water quality, Trends in Ecology & Evolution, 21(2), p. 96-103
- L. Yang, H. Chang, M.L. Huang, 2001, Nutrient removal in gravel- and soil-based wetland microcosms with and without vegetation, Ecological Engineering, p. 91
- Mitsch, W.J., & Gosselink, J.G., 2015, Wetlands. John Wiley & Sons, p.56
- Kadlec R.H. & Knight, R.L., 1996, "Treatment Wetlands.", Lewis Publishers, p. 147-150
- Vymazal J., 2007, "Removal of nutrients in various types of constructed wetlands.", Science of the Total Environment, 380(1), p. 12-21
- Ramsar Convention Secretariat, 2016, "An Introduction to the Ramsar Convention on Wetlands." p. 14-15
- Kadlec, R.H., & Wallace, S.D., 2009, Treatment Wetlands, CRC Press, p. 221-240
- Vymazal J., 2007, Constructed Wetlands for Wastewater Treatment, Ecological Engineering, p.12-15
- Vymazal J., 2010, Constructed Wetlands for Wastewater Treatment, Water Science and Technology, p. 3-5

- Brix H., 1994, Functions of macrophytes in constructed wetlands, Water Science and Technology, p. 25-27 (Ανάλυση των υβριδικών συστημάτων και πώς συνδυάζουν χαρακτηριστικά κατακόρυφης και οριζόντιας ροής για βέλτιστη επεξεργασία).
- Cooper P.F. et al., 1996, Constructed Wetlands in Water Pollution Control, p. 30-35:
- Brix H., 1997, Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands?, Water Science and Technology, p.11-17
- Kadlec R.H. & Wallace S.D., 2009, Treatment Wetlands, CRC Press, p. 200-215.
- Vymazal J., 2011, Constructed wetlands for wastewater treatment: Five decades of experience, Environmental Science & Technology, p.15-20.
- Tanner C.C., 1996, Plants as ecosystem engineers in constructed wetlands, Water Science and Technology, p. 40-45.
- Haslam S. M., 1972, Biology of *Phragmites australis* in relation to its control, Proceedings of the Royal Society of London, Series B. Biological Sciences, p. 155-167.
- Vymazal J., 2007, Removal of nutrients in various types of constructed wetlands, Science of the Total Environment, p. 348-65
- Vymazal, J., 2011, Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Five Decades of Experience. Environmental Science & Technology, p. 10-12
- Kadlec, R.H., & Wallace, S.D., 2009, Treatment Wetlands. CRC Press, p. 55-70 (περιγράφει τη λειτουργία και τις εφαρμογές των τεχνητών υδροβιοτόπων)
- Mann, A., 2005, Constructed Wetlands: A Practical Guide. National Water Quality Inventory, p. 24-30
- Mlih, R., Bydalek, F., Klumpp, E., Yaghi, N., Bol, R. and Wenk, J., 2020, Light-expanded clay aggregate (LECA) as a substrate in constructed wetlands – A review, Ecological Engineering, 148, p.105783 ([Light-expanded clay aggregate \(LECA\) as a substrate in constructed wetlands – A review - ScienceDirect](#))
- Gikas G.D., Vryzas Z., Tsihrintzis V.A., 2018, S-metolachlor herbicide removal in pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands , Chem. Eng. J. 339, p. 108-116 ([S-metolachlor herbicide removal in pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands - ScienceDirect](#))

- Montalvo S., Huilnir C., Borja R., Sanchez E., Hermann C., 2020a, Application of zeolites for biological treatment processes of solid wastes and wastewaters – A review, *Bioresour. Technol*, 301, 122808 (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852420300778>)
- L.H. Fraser, S.M. Carty, D. Steer, 2004, “A test of four plant species to reduce total nitrogen and total phosphorus from soil leachate in subsurface wetland microcosms”, *Bioresour. Technol.*, 94, p. 185-192 (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212371723000033#bib26>)
- R. Wang, N. Korboulewsky, P. Prudent, M. Domeizel, C. Rolando, G. Bonin, 2010, Feasibility of using an organic substrate in a wetland system treating sewage sludge: impact of plant species, *Bioresour. Technol.*, 101, p. 51-57 (<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852409009328>)
- García J., Rousseau D. P. L., Morató J., Lesage E., Matamoros V., Bayona J. M., 2010, Contaminant removal processes in subsurface-flow constructed wetlands: A review, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 40(7), p. 561-661 (<https://biblio.ugent.be/publication/3239789>)
- Masi et al., 2014, *Ecological Engineering*, p.79
- Scholz, 2006, *Wetland Systems to Control Urban Runoff*, p.89
- Lu S., Pei L., Bai X., Xi Y., 2018, "Performance of four plant species in constructed wetlands for the treatment of aquaculture wastewater, *Science of the Total Environment*, p. 230
- Vymazal, 2011, Plants used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow: A review., *Ecological Engineering*, p. 114
- Hossain A., Nayan N., 2017, *Zeolite in Water Treatment*, p. 1-23
- Jiang Y., Dong Z., Zhang Z., Li Z., 2012, Application of zeolite-filled constructed wetland for wastewater treatment, *Bioresource Technology*, p. 45-47
- Ávila C., Garfí M., García J., 2017, Three-stage hybrid constructed wetland system for wastewater treatment and reuse in warm climate regions, *Bioresource Technology*, p. 342-351

- Stefanakis A., Akratos C. S., Tsihrintzis V. A., 2014, Vertical flow constructed wetlands: Eco-engineering systems for wastewater and sludge treatment, *Ecological Engineering*, p. 212-218
- Bialowiec A., Wojnowska-Baryła I., Agopsowicz M., 2014, The role of recycled plastic carriers in the treatment of wastewater in hybrid constructed wetlands., *Ecological Engineering*, p. 122-128
- Liu Y., & Zhang L., 2014, "The Use of Expanded Clay Aggregate (LECA) in the Construction of Green Roofs.", *Sustainable Cities and Society*, 10, p. 139-146
- Samsó R., García J., 2016, "Technology review: Hybrid constructed wetlands for wastewater treatment." *Water Research*, p. 233-244
- Inyang M., Gao B., Yao Y., Xue Y., Zimmerman A., Mosa A., Cao X.. 2015, A review of biochar as a low-cost adsorbent for aqueous heavy metal removal." *Environmental Science and Pollution Research*, p. 48-58
- Meyer S., Glaser B., Quicker P., 2011, Technical, economical, and climate-related aspects of biochar production technologies: A literature review, *Bioresource Technology*, p. 7257-7264
- Yao Y., Gao B., Inyang M., Zimmerman A. R., Cao X., Pullammanappallil P., Yang L., 2012, Biochar derived from anaerobically digested sugar beet tailings: Characterization and phosphate removal potential, *Chemosphere*, p. 085-1091.
- Wu S., Kusch P., Brix H., Vymazal J., & Dong R., 2014, "Development of constructed wetlands in performance intensifications for wastewater treatment: A nitrogen and organic matter targeted review.", p. 60-67 ([Development of constructed wetlands in performance intensifications for wastewater treatment: A nitrogen and organic matter targeted review - ScienceDirect](#))
- Sygouni V., Chrysikou L. P., Gounaris C. E. & Mantzavinos D., 2019, Olive mill wastewater: Recent advances for the sustainable development of its treatment and valorization. *Science of the Total Environment*, 646, p. 1169–1194 (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092134491930001X>)

- Alhajoj A., Alowaiesh B., 2019, Innovative solutions for reduction of olive mill wastewater pollution, Desalination and Water Treatment, 155, p. 48–54. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1944398624140453?via%3Dihub>)
- Li H., Ye S., Ye J. et al., 2020, Phosphorus removal performance of microbial-enhanced constructed wetlands that treat saline wastewater, Environmental Science and Pollution Research, 27(35), p. 44112–44122.
- Figueroa L. I., Jaramillo R., 2015, Degradation of phenolic compounds in wastewater: Challenges and advancements, Journal of Hazardous Materials, 299, p. 273–283, (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389415005373?via%3Dihub>)
- Yonar T., Akin E., 2021, The role of conductivity in wastewater treatment processes: A review of applications and effects., Journal of Environmental Science and Technology, p. 235–245
- Hedström A., 2001, Ion exchange capacities of zeolites in water treatment applications., Environmental Technology, p. 11–19
- Vymazal J., Kröpfelová L., 2008, Wastewater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow, Springer, p. 210
- Metcalf L., Eddy H. P., 2014, Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery (5th ed.), McGraw-Hill Education, p. 129
- Vymazal J., 2011, Constructed wetlands for wastewater treatment: Five decades of experience, Environmental Science & Technology, p. 61–69
- Vymazal J., 2005, Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment, Ecological Engineering, p. 478–490
- Wu S., Wallace S., Brix H., Kusch P., Kirui W. K., Masi F., Dong R., 2014, Treatment of industrial wastewater by constructed wetlands: Performance, challenges, and future research directions. Environmental Science & Technology, p. 1369–1381
- Dermeche S., Nadour M., Larroche C., Moulti-Mati F., Michaud P., 2013, Olive mill wastes: Biochemical characterizations and valorization strategies, Process Biochemistry, p. 1532–1552

- Vymazal J., 2007, Removal of nutrients in various types of constructed wetlands, *Science of the Total Environment*, p. 48-65
- Yang X., Wang R., Zhang L., 2018, Assessment of suspended solids in wastewater treatment processes, *Journal of Environmental Management*, p. 160–165
- Kavitha S., Chandrasekaran N., Rajasekar A., 2020, Assessment of zeolite-based materials for wastewater treatment applications, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, p. 104305
- Stević D., Skoro N., & Hadzima-Nyarko M., 2019, Comparison of filtration efficiency in constructed wetlands with LECA and HDPE media, *Ecological Engineering*, 130, p. 89-96
- Zhao Y., Babatunde A., Hu Y., Kumar J., Zhao X., 2011, Pilot field-scale demonstration of a novel alum sludge-based constructed wetland system for enhanced wastewater treatment, *Process Biochem.*, 46 (1), p. 278-283
- Aksu Z., Kutsal T., 2005), A study of biosorption of phosphates from aqueous solutions by some waste materials, *Journal of Hazardous Materials*, 122 (1-2), p. 143-150
- Reddy K. R., Kadlec R. H., Gale P., 2005), Phosphorus removal in wetlands: A review, *Ecological Engineering*, 25(1), p. 1-20
- Zhao D., Zhang L., Zhang J., 2016, Performance of LECA in treatment of wastewater and phosphorus removal, *Environmental Science and Pollution Research*, 23(9), p. 8927-8935
- Zhang Q., Zhang X., Fang C., 2013, Phosphorus removal by biochar: The role of physical and chemical properties. *Bioresource Technology*, 149, p. 365-370
- Wu S., Wallace S., Brix H., 2014, Nitrogen transformation and balance in constructed wetlands for wastewater treatment, *Environmental Science & Technology*, 48(14), p. 7992-8003
- Ávila C., Garfí M., García J., 2017, Three-stage hybrid constructed wetland system for wastewater treatment and reuse in warm climate regions, *Ecological Engineering*, 107, p. 57-66
- García J., Rodríguez A., Medina S., 2010, "Performance of horizontal subsurface flow constructed wetlands for the removal of nitrogen and phosphorus from wastewater.", *Science of the Total Environment*, 408 (19), p. 3884-3891



- Masyita M., Takizawa S., Suzuki M., 2019, "Effectiveness of horizontal subsurface flow constructed wetlands for nitrogen removal: Influence of hydraulic loading and plant species.", *Environmental Technology & Innovation*, 15, p. 100358.
- Vymazal J., 2013, "The use of constructed wetlands for treatment of municipal wastewater.", *Environmental Pollution*, 173, p. 43-56
- García et al., 2010, "Performance of horizontal subsurface flow constructed wetlands for the removal of nitrogen and phosphorus from wastewater.", *Science of the Total Environment*, 408 (19), p. 3884-3891
- Zhang L., et al., 2014, "Removal of nitrogen and phosphorus in constructed wetlands.", *Environmental Science and Pollution Research*
- Vymazal J., 2007, "Removal of nutrients in various types of constructed wetlands." , *Science of the Total Environment*
- Wu Z., et al., 2017, "Biological nitrogen removal in constructed wetlands.", *Environmental Science and Pollution Research*
- Vymazal J., 2007, "Removal of nutrients in various types of constructed wetlands.", *Science of the Total Environment*

### Πηγές Εικόνων

- [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Phragmites\\_australis\\_habit18\\_\(8253944372\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Phragmites_australis_habit18_(8253944372).jpg)

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

