

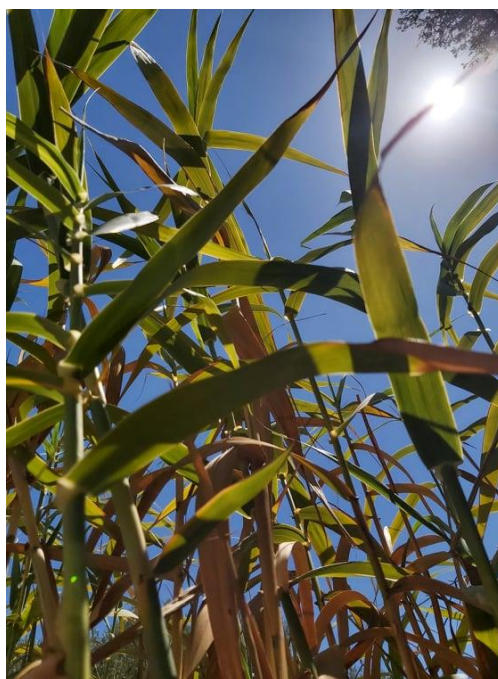


**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

**«Βελτιστοποίηση πιλοτικών μονάδων Τεχνητών Υγροβιότοπων  
με ανακυκλωμένο HDPE και βιοεξανθράκωμα για την  
επεξεργασία διασταλάγματος από τον Χ.Υ.Τ.Α. Χανίων»**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Θεοδωράκη Νικολέττα**



**Χανιά, 2022**



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ

ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

**«Βελτιστοποίηση πιλοτικών μονάδων Τεχνητών Υγροβιότοπων  
με ανακυκλωμένο HDPE και βιοεξανθράκωμα για την  
επεξεργασία διασταλάγματος από τον Χ.Υ.Τ.Α. Χανίων»**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Θεοδωράκη Νικολέττα**

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Επίκουρος Καθηγητής: Αλέξανδρος Στεφανάκης (επιβλέπων)

Καθηγητής, Πρύτανης Πολυτεχνείου Κρήτης: Ευάγγελος Διαμαντόπουλος

Επίκουρος Καθηγητής: Απόστολος Γιαννής

"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 τη συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τη συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης".

# ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με το πέρας της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους συνέβαλαν έμπρακτα στην εκπόνηση της.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω, από βάθους καρδιάς, τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Αλέξανδρο Στεφανάκη, για την ανάθεση ενός ενδιαφέροντος και σύγχρονου θέματος, για τη μεθοδική του καθοδήγηση, την αδιάκοπη στήριξη αλλά και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, τους κυρίους Ευάγγελο Διαμαντόπουλο και Απόστολο Γιαννή για το χρόνο που διέθεσαν αξιολογώντας την παρούσα διπλωματική εργασία.

Επιπλέον, ευχαριστώ θερμά την υπεύθυνη του Εργαστηρίου Τεχνολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος, κυρία Ελισάβετ Κουκουράκη, για την πολύτιμη βοήθεια, τις χρήσιμες συμβουλές αλλά και τη στήριξή της σε όλη την πορεία τόσο του πειράματος όσο και της συγγραφής της παρούσας εργασίας. Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Παναγιώτη Ρεγκούζα για τη βοήθεια του στην παραγωγή του βιοεξανθρακώματος, για τη γενικότερη ενθάρρυνση και για τη στήριξή του.

Θερμές ευχαριστίες απευθύνω στον φίλο και συμφοιτητή Ιωάννη Ασημακούλα, για την άψογη συνεργασία μας, χωρίς τη συμβολή του οποίου δεν θα ήταν εφικτή η εκπόνηση της παρούσας εργασίας. Επίσης ευχαριστώ και τα μέλη του εργαστηρίου, τους συμφοιτητές Μίλτο Γυαλίδη, Στράτο Δημόπουλο και Δημήτρη Μαυρογιάννη, καθένας από τους οποίους συνέβαλε με τον τρόπο του.

Θα ήταν παράλειψη να μην ευχαριστήσω ιδιαιτέρως τον κύριο Απόστολο Γιαννή και τον κύριο Γιάννη Μουκαζή για την πολύτιμη βοήθεια τους σχετικά με την κονιορτοποίηση των δειγμάτων στο εργαστήριο Διαχείρισης Τοξικών και Επικίνδυνων Αποβλήτων, καθώς και την κυρία Maria-Liliana Sagu για τις μετρήσεις των μετάλλων στο ICP-MS στο εργαστήριο Υδρογεωχημικής Μηχανικής και Αποκατάστασης Εδαφών.

Τέλος, θα αναφερθώ στην αμέριστη και ουσιαστική στήριξη της οικογένειάς μου και των φίλων μου, η συμβολή των οποίων ήταν καθοριστικής σημασίας για τη συνολική πορεία μου στο Πολυτεχνείο Κρήτης.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	4
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	9
ABSTRACT .....	10
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ .....	11
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	13
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ .....	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 <sup>ο</sup> : ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 <sup>ο</sup> : ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ .....	19
2.1 ΑΣΤΙΚΑ ΣΤΕΡΕΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ, Χ.Υ.Τ.Α. ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΛΑΓΜΑ Χ.Υ.Τ.Α. ....	19
2.1.1 Έννοιες .....	19
2.1.2 Α.Σ.Α. Και Επεξεργασία Των Α.Σ.Α. ....	20
Σύσταση Των Α.Σ.Α. ....	20
Μέθοδοι Επεξεργασίας Των Α.Σ.Α. ....	21
2.1.3 Διάθεση Α.Σ.Α. Σε Χ.Υ.Τ.Α. ....	23
2.1.4 Διασταλάγματα Χ.Υ.Τ.Α. ....	27
Ποιοτικά Χαρακτηριστικά Διασταλαγμάτων .....	27
Διαχείριση Διασταλαγμάτων .....	28
2.1.5 Χ.Υ.Τ.Α. Χανίων (Δ.Ε.ΔΙ.Σ.Α.) ....	30
2.1.6 Νομοθετικό Πλαίσιο .....	32
Νομοθεσία Για Τη Διαχείριση Των Στερεών Αποβλήτων.....	32
Νομοθεσία Για Την Υγειονομική Ταφή Αποβλήτων:.....	33
2.2 ΦΥΣΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ .....	35
2.2.1 Φυσικά Συστήματα Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων.....	35
Εδαφικά Συστήματα .....	35
Δεξαμενές Σταθεροποίησης.....	37
Συστήματα Υδροχαρών Φυτών .....	38
Συστήματα Τεχνητών Υγροβιότοπων.....	38
2.3 ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΙ.....	39
2.3.1 Φυσικοί Υγροβιότοποι .....	39
2.3.2 Τεχνητοί Υγροβιότοποι .....	41
2.3.3 Είδη Τεχνητών Υγροβιότοπων .....	42
Τεχνητοί Υγροβιότοποι Επιφανειακής Ροής .....	42

Τεχνητοί Υγροβιότοποι Υποεπιφανειακής Ροής .....	43
2.3.4 Πλεονεκτήματα Τεχνητών Υγροβιότοπων .....	46
2.3.5 Απομάκρυνση ρύπων στους τεχνητούς υγροβιότοπους .....	47
Απομάκρυνση Βιοχημικά Απαιτούμενου Οξυγόνου (BOD <sub>5</sub> ).....	47
Απομάκρυνση Αζώτου .....	48
Απομάκρυνση Φωσφόρου .....	49
Απομάκρυνση Αιωρούμενων Στερεών .....	50
Απομάκρυνση Μετάλλων .....	50
Απομάκρυνση Παθογόνων Μικροοργανισμών .....	51
2.3.6 Τεχνητοί Υγροβιότοποι Επεξεργασίας Διασταλάγματος από Χ.Υ.Τ.Α.....	52
2.4 ΒΙΟΕΞΑΝΘΡΑΚΩΜΑ (BIOCHAR) .....	54
2.4.1 Προϊόντα Πυρόλυσης.....	54
2.4.2 Βιοεξανθράκωμα (Biochar) .....	55
2.4.3 Εφαρμογές Του Βιοεξανθρακώματος .....	56
2.4.4 Τεχνητοί Υγροβιότοποι Με Βιοεξανθράκωμα.....	57
2.5 ΣΤΟΧΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	59
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 <sup>ο</sup> : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	60
3.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ .....	60
3.1.1 Περιγραφή Πειραματικής Διάταξης .....	60
3.1.2 Χωροθέτηση Πειραματικής Διάταξης Και Κλιματολογικά Στοιχεία .....	61
3.1.3 Πειραματική Διαδικασία .....	62
3.2 ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ.....	66
3.2.1 Διαστάλαγμα Χ.Υ.Τ.Α. Χανίων .....	66
3.2.2 HDPE.....	68
3.2.3 Βιοεξανθράκωμα.....	70
3.2.4 Βλάστηση.....	71
3.2.5 Μεθανόλη.....	73
3.3 ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	74
3.3.1 Μέθοδοι Υδατικών Δειγμάτων .....	74
I. Προσδιορισμός Βιοχημικά Απαιτούμενου Οξυγόνου BOD <sub>5</sub> .....	74
II. Προσδιορισμός Χημικά Απαιτούμενου Οξυγόνου COD .....	74
III. Προσδιορισμός Νιτρικού Αζώτου NO <sub>3</sub> -N.....	74
IV. Προσδιορισμός Νιτρώδους Αζώτου NO <sub>2</sub> -N .....	75

V.	Προσδιορισμός Αμμωνιακού Αζώτου $\text{NH}_4\text{-N}$ .....	75
VI.	Προσδιορισμός Φωσφορικών $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ .....	75
VII.	Προσδιορισμός Ολικών Αιωρούμενων Στερεών TSS.....	76
VIII.	Προσδιορισμός pH.....	77
IX.	Προσδιορισμός Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας (Electrical Conductivity) .....	77
X.	Προσδιορισμός Μετάλλων και Μεταλλοειδών .....	77
3.3.2	Μέθοδοι Για Φυτική Βιομάζα.....	78
I.	Προσδιορισμός Ολικών Μετάλλων TM .....	79
II.	Προσδιορισμός Ολικού Φωσφόρου TP .....	79
III.	Προσδιορισμός Ολικού Αζώτου TN.....	79
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 <sup>ο</sup> : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ .....		80
4.1	ΦΥΤΙΚΗ ΒΙΟΜΑΖΑ .....	80
4.1.1	Μέταλλα Και Μεταλλοειδή.....	82
4.1.2	Ολικός Φώσφορος TP .....	84
4.1.3	Ολικό Αζώτο TN .....	85
4.2	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΒΙΟΕΞΑΝΘΡΑΚΩΜΑΤΟΣ.....	86
4.3	ΥΔΑΤΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ .....	87
4.4	ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΔΙΑΣΤΑΛΑΓΜΑΤΟΣ .....	89
4.4.1	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΕΙΣΡΟΗΣ.....	89
4.4.2	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΕΚΡΟΩΝ .....	91
4.4.2.1.	Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο $\text{BOD}_5$ .....	91
4.4.2.2	Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο COD.....	92
4.4.2.3.	Νιτρικό Άζωτο $\text{NO}_3\text{-N}$ .....	94
4.4.2.4	Νιτρώδες Άζωτο $\text{NO}_2\text{-N}$ .....	97
4.4.2.5	Αμμωνιακό Άζωτο $\text{NH}_4\text{-N}$ .....	99
4.4.2.6	Φωσφορικά $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ .....	101
4.4.2.7	Ολικά Αιωρούμενα Στερεά TSS.....	102
4.4.2.8	pH.....	104
4.4.2.9	Ηλεκτρική Αγωγιμότητα EC .....	105
4.4.2.10	Μέταλλα και Μεταλλοειδή.....	107
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 <sup>ο</sup> : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....		113
5.1	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	113
5.2	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	115

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	116
ΕΛΛΗΝΙΚΗ.....	116
ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ.....	118
ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ.....	125
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....	126
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	126
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....	131



# ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας μελετήθηκαν πειραματικά και βελτιστοποιήθηκαν ορισμένες παράμετροι κατασκευής και λειτουργίας της τεχνολογίας των Τεχνητών Υγροβιότοπων για την επεξεργασία διασταλάγματος από τον Χ.Υ.Τ.Α. Χανίων. Το πείραμα αφορά δυο μονάδες τεχνητών υγροβιότοπων οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής, οι οποίες τοποθετήθηκαν στον υπαίθριο χώρο του θερμοκηπίου της Σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος στο Πολυτεχνείο Κρήτης. Το πληρωτικό υλικό και των δύο μονάδων είναι ανακυκλωμένο πλαστικό HDPE, ενώ στη μία από τις δύο μονάδες υπήρχε και ένα στρώμα από βιοεξανθράκωμα το οποίο παρήχθη από κλαδέματα ελιάς ως ένα υπόδειγμα κυκλικής διαχείρισης. Οι δύο πιλοτικές μονάδες χαρακτηρίζονται ως P (Plastic) και PB (Plastic & Biochar), και φυτεύτηκαν με το κοινό καλάμι *Phragmites Australis*.

Ως εισροή στις μονάδες εφαρμόστηκε διαστάλαγμα, το οποίο συλλεγόταν αμέσως μετά από το στάδιο της κροκίδωσης στη μονάδα επεξεργασίας διασταλάγματος στον Χ.Υ.Τ.Α. Χανίων. Για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο του πειράματος γινόταν προσθήκη μεθανόλης και στις δύο μονάδες. Ο λειτουργικός όγκος των δύο μονάδων ήταν 188.3 L έκαστη. Επιπρόσθετα, η μέση ημερήσια παροχή ήταν 3.3L/day. Οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν αφορούσαν την εισροή, την εκροή και τη φυτική βιομάζα των μονάδων. Πιο συγκεκριμένα για τις εισροές και τις εκροές προσδιορίστηκαν οι εξής παράμετροι: BOD<sub>5</sub>, COD, NO<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P, υδραυλική αγωγιμότητα, pH, μέταλλα και μεταλλοειδή. Οι αναλύσεις της φυτικής βιομάζας αποσκοπούσαν στον προσδιορισμό TN (ολικό άζωτο), TP (ολικό φώσφορο) και μετάλλων και μεταλλοειδών.

Τα αποτελέσματα των μέσων αποδόσεων για τις μονάδες P και PB είναι τα ακόλουθα. Για COD η απόδοση στη μονάδα P είναι 70.5±10.8% και στη PB είναι 72.5±10.6%. Για NO<sub>3</sub>-N η απόδοση της μονάδας P ισούται με 81.2±10.5%, ενώ για τη μονάδα PB η απόδοση αγγίζει το 95.2±3.0%. Για NO<sub>2</sub>-N η απόδοση είναι 88.9±7.0% της μονάδας P και 95.0±4.8% της μονάδας PB. Αναφορικά με το NH<sub>4</sub>-N, η μονάδα P φτάνει στο 71.3±12.4% και η μονάδα PB στο 79.9±9.4%. Αντίστοιχα, η απόδοση για τα TSS είναι για τη μονάδα P 87.1±8.6% και 86.6±5.4% για την PB. Επιπλέον, η υδραυλική αγωγιμότητα κυμαίνεται σχεδόν στα ίδια επίπεδα με αυτήν της εισροής, ενώ το pH είναι ελαφρώς αλκαλικό. Επίσης BOD<sub>5</sub> και PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P ήταν σχεδόν μη ανιχνεύσιμα στις εκροές των μονάδων P και PB. Τέλος, τα αποτελέσματα για τα μέταλλα και μεταλλοειδή έδειξαν ότι υπάρχουν ορισμένα στοιχεία που ανιχνεύονται σε υψηλότερες συγκεντρώσεις, όπως το B, Mg, K, Ca, Fe και Zn ωστόσο δεν υπερβαίνουν τα τυπικά νομοθετικά όρια εκροών δευτεροβάθμιας επεξεργασίας. Όσον αφορά τη φυτική βιομάζα διαπιστώνεται ότι τα φυτά έχουν κατά βάση την τάση να συγκεντρώνουν ποσότητες μετάλλων, φωσφόρου και αζώτου περισσότερο στις ρίζες τους και λιγότερο στα φύλλα και τους κορμούς τους. Το βασικό συμπέρασμα που προέκυψε είναι ότι η προσθήκη βιοεξανθράκωματος και μεθανόλης αυξάνει την απόδοση απομάκρυνσης ρύπων, ενώ ακόμη το ανακυκλωμένο πλαστικό HDPE, ως υλικό υποστρώματος, είναι μια καινοτόμος εναλλακτική αντί άλλων συμβατικών υλικών υποστρώματος.

# ABSTRACT

In the context of the present thesis, the optimization of construction and operation parameters of constructed wetlands have been experimentally studied for the treatment of leachate from the landfill of Chania. The experiment concerns two horizontal subsurface flow constructed wetlands, which were placed in the outdoor area of the greenhouse of the School of Chemical and Environmental Engineering at the Technical University of Crete. Recycled HDPE plastic was used as filling material to both units, while in one unit a layer of biochar was also placed. The units were labelled P (Plastic) and PB (Plastic & Biochar) and were planted with the common reed, *Phragmites Australis*.

The inflow for the units was leachate, which was collected after the flocculation stage at the leachate treatment plant of the Chania landfill. Moreover, methanol was added to both units at certain time period. The operating volume of each unit was 188.3 L. Additionally, the average flow rate of volume for the units was 3.3L/day. The follow-up analyses concerned the inflow, outflow and the plant biomass of the units. More specifically, the inflow and outflows were analyzed for the determination of the following parameters: BOD<sub>5</sub>, COD, NO<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P, Electrical Conductivity, pH, metals and metalloids. The analysis of the plant biomass aimed at the determination of TN (total Nitrogen), TP (total Phosphorus), metals and metalloids.

The results of the mean yields for the P and PB units are as follows. For COD the efficiency in unit P was 70.5±10.8% and in unit PB is 72.5±10.6%. For NO<sub>3</sub>-N the yield of unit P was equal to 81.2±10.5%, while for unit PB the yield reached 95.2±3.0%. For NO<sub>2</sub>-N the yield was 88.9±7.0% of the P unit and 95.0±4.8% of the PB unit. Regarding NH<sub>4</sub>-N, the unit P reached 71.3±12.4% and the unit PB 79.9±9.4%. Respectively, the yield for TSS was for unit P at 87.1±8.6% and 86.6±5.4% for PB. Moreover, the Electrical Conductivity seems to be almost at the same level as that of the inflow, while the pH is slightly alkaline. Also, BOD<sub>5</sub> and PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P were almost undetectable in the outflows of the P and PB units. Finally, the results for metals and metalloids showed that there are some elements that are detected at higher concentrations, such as B, Mg, K, Ca, Fe and Zn, but they do not exceed the standard legal secondary wastewater effluent limits. Regarding plant biomass, it is found that plants basically tend to retain amounts of minerals, phosphorus and nitrogen more in their roots and less in their leaves and stems. The main conclusion is that the addition of biochar and methanol increases the pollutants' removal efficiency, while the use of recycled HDPE plastic, as a substrate material, is an innovative alternative to other conventional substrate materials.

# ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

**Εικόνα 2.1.** Ποσοστιαία σύσταση των ΑΣΑ στην Ελλάδα. (ΥΠΕΚΑ, 2010)

**Εικόνα 2.2.** Η διαχείριση των αποβλήτων στις χώρες της Ε.Ε. (<https://www.europarl.europa.eu/>)

**Εικόνα 2.3.** Σύνθεση αερίου και υγρού καθώς αποσυντίθενται τα απορρίματα. (Peter Kjeldsen et al., 2010)

**Εικόνα 2.4.** Αεροφωτογραφίες της έκτασης της εγκατάστασης του Χ.Υ.Τ.Α. Χανίων. (<https://earth.google.com/>)

**Εικόνα 2.5.** Γενική Διάταξη Εγκαταστάσεων. ([www.dedisa.gr](http://www.dedisa.gr))

**Εικόνα 2.6.** Παραστατική παρουσίαση συστήματος βραδείας εφαρμογής. (Παρανυχιανάκης, 2021)

**Εικόνα 2.7.** Τροποποιημένη Παραστατική Απεικόνιση Συστήματος Ταχείας Διήθησης. (<https://sites.google.com/site/civilsorras/physika-systemata/edaphika-systemata>)

**Εικόνα 2.8.** Παραστατική παρουσίαση συστήματος ΟΦ. (Παρανυχιανάκης, 2021)

**Εικόνα 2.9.** Τροποποιημένη Σχηματική απεικόνιση συνδυασμού συστήματος λιμνών σταθεροποίησης. (Παρανυχιανάκης, 2021)

**Εικόνα 2.10.** Τοποθεσία Laguna de Rocha Ramsar στην Ουρουγουάη, μέρος ενός συγκροτήματος παράκτιων υγροβιότοπων στην ακτή του Ατλαντικού. (Ramsar, 2010)

**Εικόνα 2.11.** © André Dib WWF-Brazil — Pantanal, ο μεγαλύτερος τροπικός υγροβιότοπος στον κόσμο. (<https://wwf.medium.com/the-worlds-cities-rely-on-the-world-s-wetlands-b93af412ab54>)

**Εικόνα 2.12.** Υγροβιότοποι | Ζώα και φυτά του ζωολογικού κήπου του Σαν Ντιέγκο. (<https://animals.sandiegozoo.org/habitats/wetlands>)

**Εικόνα 2.13.** Τεχνητοί Υγροβιότοποι ~ Unlocking Water Treatment Technology At Shell, Adrian Irimia & Georg Stockinger. (<https://globalprojectengineering.ch/constructed-wetlands-unlocking-water-treatment-technology-at-shell/>)

**Εικόνα 2.14.** Είδη Τεχνητών Υγροβιότοπων.

**Εικόνα 2.15.** Τεχνητός Υγροβιότοπος Επιφανειακής Ροής, Orodhi Odhiambo ([https://www.researchgate.net/figure/Free-Water-Surface-Constructed-Wetland\\_fig4\\_286417697](https://www.researchgate.net/figure/Free-Water-Surface-Constructed-Wetland_fig4_286417697))

**Εικόνα 2.16.** Σχηματική Αναπαράσταση Τεχνητού Υγροβιότοπου Κατακόρυφης Ροής, (Abdelhakeem et al., 2016)

**Εικόνα 2.17.** Σχηματική Αναπαράσταση Τεχνητού Υγροβιότοπου Οριζόντιας Υποεπιφανειακής Ροής. Πηγή: TILLEY et al. (2014), <https://sswm.info/es/taxonomy/term/3933/horizontal-subsurface-flow-constructed-wetland>)

**Εικόνα 2.18.** Κύκλος άνθρακα σε συστήματα υδροβιοτόπων (Τροποποιημένη, Ακράτος, 2006)

**Εικόνα 2.19.** Κύκλος αζώτου σε συστήματα υδροβιοτόπων (Τροποποιημένη, Ακράτος, 2006)

**Εικόνα 2.20.** Κύκλος φωσφόρου σε συστήματα υδροβιοτόπων (Τροποποιημένη, Ακράτος 2006)

**Εικόνα 2.21.** Σάρωση Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου (SEM) για διάφορα είδη biochar,( Bruno Glaser, [https://www.researchgate.net/figure/Scanning-electron-microscopy-SEM-pictures-of-biochars-made-of-tomato-plant-wood\\_fig3\\_257304681](https://www.researchgate.net/figure/Scanning-electron-microscopy-SEM-pictures-of-biochars-made-of-tomato-plant-wood_fig3_257304681))

**Εικόνα 3.1.** Οι Μονάδες Τεχνητών Υδροβιοτόπων P & PB , τους μήνες Απρίλιο(αριστερά) και Ιούνιο(δεξιά), στο Θερμοκήπιο του Πολυτεχνείου Κρήτης.

**Εικόνα 3.2.** Μονάδες P & PB αντίστοιχα, το μήνα Αύγουστο.

**Εικόνα 3.3.** Οι Μονάδες Τεχνητών Υδροβιοτόπων στο Θερμοκήπιο του Πολυτεχνείου Κρήτης.

**Εικόνα 3.4.** Πιλοτική μονάδα P(Plastic) σε αρχικό στάδιο.

**Εικόνα 3.5.** Πιλοτική μονάδα PB (Plastic&Biochar) σε αρχικό στάδιο.

**Εικόνα 3.6.** Πιλοτική μονάδα P(Plastic) σε ώριμο στάδιο.

**Εικόνα 3.7.** Πιλοτική μονάδα PB(Plastic&Biochar) σε ώριμο στάδιο.

**Εικόνα 3.8.** Στάδια επεξεργασίας και λειτουργίας ΜΕΣ. ([www.dedisa.gr](http://www.dedisa.gr))

**Εικόνα 3.9.** Απεικόνιση HX38 Biocarrier, 38mm loose Recycled HDPE black και HX25KLL Biocarrier, 25mm loose Recycled HDPE black αντίστοιχα. (<https://www.hel-x.eu/en/technical-details/#hel-x-fuellkoerper>)

**Εικόνα 3.10.** Ανάπτυξη Βιοφίλμ στις μονάδες P&PB μετά το πέρας του πειράματος.

**Εικόνα 3.11.** Βιοεξανθράκωμα που χρησιμοποιήθηκε στη μονάδα PB.

**Εικόνα 3.12.** Phragmites Australis σε παραλία των Χανίων.

**Εικόνα 3.13.** Διήθηση, με τη βοήθεια αντλίας κενού, 75ml δείγματος για τον προσδιορισμό των αιωρούμενων στερεών.

**Εικόνα 3.14.** Μέτρηση pH σε δείγμα εκροής.

**Εικόνα 3.15.** Δείγματα των μονάδων P&PB από κορμούς, ρίζες, φύλλα, πριν και μετά την κονιορτοποίησή τους στο μαχαιρόμυλο.

# ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

**Πίνακας 2.1.** Σύσταση διασταλαγμάτων σε νέο και ώριμο Χ.Υ.Τ.Α.. (Tshobanoglous & Kreith, 2002)

**Πίνακας 3.1.** Μέση και Μέγιστη Θερμοκρασία, Μέση Βροχόπτωση, Μέση και Μέγιστη Ταχύτητα Ανέμου, Επικρατούσα Διεύθυνση. (<http://meteosearch.meteo.gr/stationInfo.asp>)

**Πίνακας 3.2.** Ημερομηνίες με τις περιόδους διαφορετικής αραίωσης λύματος & με προσθήκη μεθανόλης.

**Πίνακας 4.1.** Μετρήσεις της φυτικής βιομάζας των μονάδων P και PB.

**Πίνακας 4.2.** Αποτελέσματα αναλύσεων στη φυτική βιομάζα για μέταλλα και μεταλλοειδή, ολικό φώσφορο & ολικό άζωτο στις μονάδες P και PB.

**Πίνακας 4.3.** Συγκέντρωση (mg/kg) μετάλλων και μεταλλοειδών σε κορμούς, ρίζες και φύλλα για τις μονάδες P και PB.

**Πίνακας 4.4.** Πρόσληψη (mg/kg) φωσφόρου από κορμούς, ρίζες και φύλλα για τις μονάδες P και PB.

**Πίνακας 4.5.** Πρόσληψη (mg/kg) αζώτου από κορμούς, ρίζες και φύλλα για τις μονάδες P και PB.

**Πίνακας 4.6.** Αποτελέσματα Φυσικοχημικών αναλύσεων για τον χαρακτηρισμό του βιοεξανθρακώματος.

**Πίνακας 4.7.** Μέση τιμή και εύρος τιμών για παραμέτρους των εισροών.

**Πίνακας 4.8.** Μέση τιμή και εύρος τιμών για τα μέταλλα και μεταλλοειδή των εισροών.

**Πίνακας 4.9.** Αποτελέσματα μέσης τιμής και εύρους τιμών συγκέντρωσης COD και μέσης τιμής και εύρους τιμών απομάκρυνσης.

**Πίνακας 4.10.** Αποτελέσματα μέσης τιμής και εύρους τιμών συγκέντρωσης  $\text{NO}_3\text{-N}$  και μέσης τιμής και εύρους τιμών απομάκρυνσης.

**Πίνακας 4.11.** Αποτελέσματα μέσης τιμής και εύρους τιμών συγκέντρωσης  $\text{NO}_2\text{-N}$  και μέσης τιμής και εύρους τιμών απομάκρυνσης.

**Πίνακας 4.12.** Αποτελέσματα μέσης τιμής και εύρους τιμών συγκέντρωσης  $\text{NH}_4\text{-N}$  και μέσης τιμής και εύρους τιμών απομάκρυνσης.

**Πίνακας 4.13.** Αποτελέσματα μέσης τιμής και εύρους τιμών συγκέντρωσης TSS και μέσης τιμής και εύρους τιμών απομάκρυνσης.

**Πίνακας 4.14.** Αποτελέσματα μέσης τιμής και εύρους τιμών συγκέντρωσης pH.

**Πίνακας 4.15.** Μέση τιμή και εύρος τιμών ηλεκτρικής αγωγιμότητας EC για το initial και τις εκροές των P και PB.

**Πίνακας 4.16.** Μέση τιμή συγκέντρωσης (mg/L) και εύρος τιμών συγκέντρωσης (mg/L) για μέταλλα και μεταλλοειδή σε εισροή, P, PB.

**Πίνακας 4.17** Ρύποι προτεραιότητας και η επίπτωσή τους, σύμφωνα με τους (Metcalf & Eddy, 2006).

**Πίνακας 4.18.** Τυπικά όρια εκροών τοξικών συστατικών που συναντώνται σε δευτεροβάθμιες εκροές σύμφωνα με τους (Metcalf & Eddy, 2006).

# ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

**Διάγραμμα 4.1.** Διάγραμμα μέσης μηνιαίας εξατμισοδιαπνοής για τις μονάδες P και PB και μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας.

**Διάγραμμα 4.2.** Συγκέντρωση COD σε εισροή και εκροή των μονάδων P και PB.

**Διάγραμμα 4.3.** % Απομάκρυνση COD των μονάδων P και PB.

**Διάγραμμα 4.4.** Συγκέντρωση  $\text{NO}_3\text{-N}$  σε εισροή και εκροή των μονάδων P και PB, καθώς και οριοθέτηση των διαστημάτων προσθήκης μεθανόλης στις μονάδες P και PB.

**Διάγραμμα 4.5.** % Απομάκρυνση  $\text{NO}_3\text{-N}$  των μονάδων P και PB.

**Διάγραμμα 4.6.** Συγκέντρωση  $\text{NO}_2\text{-N}$  σε εισροή και εκροή των μονάδων P και PB.

**Διάγραμμα 4.7.** % Απομάκρυνση  $\text{NO}_2\text{-N}$  των μονάδων P και PB.

**Διάγραμμα 4.8.** Συγκέντρωση  $\text{NH}_4\text{-N}$  σε εισροή και εκροή των μονάδων P και PB.

**Διάγραμμα 4.9.** % Απομάκρυνση  $\text{NH}_4\text{-N}$  των μονάδων P και PB.

**Διάγραμμα 4.10.** Συγκέντρωση TSS σε εισροή και εκροή των μονάδων P και PB.

**Διάγραμμα 4.11.** % Απομάκρυνση TSS των μονάδων P και PB.

**Διάγραμμα 4.12.** pH σε εισροή και εκροή των μονάδων P και PB.

**Διάγραμμα 4.13.** Ηλεκτρική Αγωγιμότητα EC για το initial, P και PB.

**Διάγραμμα 4.14.** Συγκέντρωση B (mg/L) σε εισροή και εκροές μονάδων P και PB με την πάροδο του χρόνου.

**Διάγραμμα 4.15.** Συγκέντρωση Mg (mg/L) σε εισροή και εκροές μονάδων P και PB με την πάροδο του χρόνου.

**Διάγραμμα 4.16.** Συγκέντρωση K (mg/L) σε εισροή και εκροές μονάδων P και PB με την πάροδο του χρόνου.

**Διάγραμμα 4.17.** Συγκέντρωση Ca (mg/L) σε εισροή και εκροές μονάδων P και PB με την πάροδο του χρόνου.

**Διάγραμμα 4.18.** Συγκέντρωση Cr (mg/L) σε εισροή και εκροές μονάδων P και PB με την πάροδο του χρόνου.

**Διάγραμμα 4.19.** Συγκέντρωση Fe (mg/L) σε εισροή και εκροές μονάδων P και PB με την πάροδο του χρόνου.

**Διάγραμμα 4.20.** Συγκέντρωση Zn (mg/L) σε εισροή και εκροές μονάδων P και PB με την πάροδο του χρόνου.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στον 21<sup>ο</sup> αιώνα, αδιαμφισβήτητα έχουν προκύψει ραγδαίες μεταβολές στις κοινωνίες και στο πώς αυτές λειτουργούν. Η αστικοποίηση, η υπερκατανάλωση, η εκβιομηχάνιση και η γενικότερη υποβάθμιση της ποιότητας και του τρόπου ζωής των ανθρώπων συνδέονται άρρηκτα με την αύξηση των παραγόμενων Αστικών Στερεών Αποβλήτων (Α.Σ.Α.) και με τον τρόπο που τα διαχειρίζονται οι αρμόδιοι φορείς.

Η Υγειονομική Ταφή είναι η, πιο συχνά, αποδεκτή και χρησιμοποιούμενη μέθοδος για την επεξεργασία των Α.Σ.Α. Κατά τη διαδικασία της αποσύνθεσης οργανικών αποβλήτων παράγονται τα διασταλάγματα, ένας συνδυασμός κατεΐσδυσης ομβρίων υδάτων αλλά και της ήδη υπάρχουσας υγρασίας που περιέχεται στα στερεά απόβλητα. Η επεξεργασία των διασταλαγμάτων είναι ένα από τα πιο κρίσιμα ζητήματα που πρέπει να εφαρμοσθεί στο πλαίσιο ολοκληρωμένων στρατηγικών διαχείρισης απορριμμάτων. Επί του παρόντος, μελέτες έχουν ανιχνεύσει στα διασταλάγματα των Χ.Υ.Τ.Α. περισσότερες από 200 οργανικές ενώσεις, εκ των οποίων οι 30 χαρακτηρίζονται ως δυνητικά επιβλαβείς. Μία τυπική διαδικασία επεξεργασίας διασταλαγμάτων περιλαμβάνει συνήθως μεγάλα ποσά ενέργειας, απαιτεί υψηλό κόστος κατασκευής, συντήρησης και λειτουργίας. Χρειάζεται δε πολύπλοκα μηχανήματα και ακριβά χημικά. Όμως, σε περίπτωση μη σωστής διαχείρισης ή ελλειπούς διαχείρισης των διασταλαγμάτων τίθεται σε σοβαρή απειλή η οικολογική ισορροπία και η ανθρώπινη υγεία.

Με βάση την αρχή της αειφορίας και στα πλαίσια αναζήτησης λύσεων, όχι μόνο φιλικών προς το περιβάλλον αλλά και αυτών που προσφέρονται για το ίδιο το περιβάλλον, έχουν αποδειχθεί κατάλληλα τα συστήματα των τεχνητών υδροβιότοπων. Πλέον οι τεχνητοί υδροβιότοποι αποτελούν ένα αποδεκτό, πλήρες και αξιόπιστο σύστημα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, όπως για παράδειγμα για την επεξεργασία αστικών λυμάτων και διαφόρων βιομηχανικών εκροών (Stefanakis, et al., 2014; Stefanakis 2018). Οι τεχνητοί υδροβιότοποι είναι συστήματα που έχουν σχεδιαστεί και κατασκευαστεί για να μιμούνται τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα όπως στα φυσικά συστήματα. Επιπλέον, χαρακτηριστικό τους είναι η πλήρης εναρμόνισή τους με το εκάστοτε οικοσύστημα, αποτελώντας μάλιστα και μέρος διαβίωσης και διαφύλαξης της άγριας πανίδας ενώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν ακόμα και ως χώροι πρασίνου και αναψυχής, αναβαθμίζοντας το περιβάλλον που τους φιλοξενεί.

Οι τεχνητοί υδροβιότοποι είναι ικανοί να εξαλείψουν και να μεταμορφώσουν διάφορους ρύπους μέσω μιας σειράς φυσικών (π.χ. καθίζηση, διήθηση), βιολογικών (π.χ. μικροβιακή αποδόμηση, πρόσληψη από τη στήλη του νερού, ριζικού συστήματος) και χημικών (π.χ. προσρόφηση) διεργασιών βελτιώνοντας και αναβαθμίζοντας την ποιότητα του, προς επεξεργασία, ύδατος. Μάλιστα, η ανθεκτικότητά τους σε διακύμανσεις του υδραυλικού και ρυπαντικού φορτίου είναι μεγάλη, επιτυγχάνοντας έτσι την απομάκρυνση ρύπων σε ένα ευρύ φάσμα συνθηκών λειτουργίας (Stefanakis and Tsihrintzis, 2012).

Ένα επιπρόσθετο, ακανθώδες πρόβλημα, που καλούνται να αντιμετωπίσουν οι σύγχρονες κοινωνίες είναι η αλόγιστη χρήση πλαστικών, με τις βιομηχανίες και τους ανθρώπους να αγνοούν τη, σχεδόν, αιώνια διάρκεια ζωής τους. Η «πλαστική» ρύπανση είναι μια απτή απειλή η οποία εντοπίζεται παντού, από τους ωκεανούς μέχρι τον ίδιο τον οργανισμό, καθώς διάφορα μικροπλαστικά μπορούν να φτάσουν διαμέσου της τροφικής αλυσίδας μέχρι και στον άνθρωπο. Η επιβλαβής αυτή πρακτική χρειάζεται να αντιστραφεί. Πλέον είναι επιτακτική ανάγκη, πέραν του να μειωθεί η παραγωγή νέων συσκευασιών και πλαστικών, η επαναχρησιμοποίηση των ήδη υπαρχόντων καθώς και η ανακύκλωσή τους. Λαμβάνοντας υπόψη το μοντέλο της κυκλικής οικονομίας και αποσκοπώντας σε μια βιώσιμη για το περιβάλλον λύση (Nikolaou

et al., 2021), γίνονται προσπάθειες να χρησιμοποιηθεί ανακυκλωμένο πλαστικό, ως πορώδες μέσο, και στους τεχνητούς υγροβιότοπους (αντί για τα ήδη υπάρχοντα, πχ. χαλίκι ή χώμα). Οι πρώτες μελέτες έχουν υποδείξει τα οφέλη της χρήσης τους ως υλικά υποστρώματος τεχνητών υγροβιότοπων (Tatoulis et al., 2017)

Συνοψίζοντας, σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η βελτιστοποίηση των παραμέτρων των τεχνητών υγροβιότοπων που αφορούν την επεξεργασία διασταλάγματος συνδυαστικά με την εφαρμογή του μοντέλου της κυκλικής οικονομίας. Η παρούσα μελέτη λαμβάνει υπόψη τα προαναφερθέντα πρόβληματα εστιάζοντας σε μία σύγχρονη λύση, παράλληλα προσέγγιζει ένα ζήτημα που αφορά το αστικό και περιαστικό περιβάλλον αλλά και την οικολογική ισορροπία εν γένει. Η μελέτη αποσκοπεί στη βελτίωση της διαδικασίας και στην αύξηση της απόδοσης των τεχνητών υγροβιότοπων αναφορικά με την απομάκρυνση ρύπων που εντοπίζονται στο διαστάλαγμα.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

## 2.1 ΑΣΤΙΚΑ ΣΤΕΡΕΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ, Χ.Υ.Τ.Α. ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΛΑΓΜΑ Χ.Υ.Τ.Α.

### 2.1.1 ΈΝΝΟΙΕΣ

#### ΑΣΤΙΚΑ ΣΤΕΡΕΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ (Α.Σ.Α.)

Με τον όρο Αστικά Στερεά Απόβλητα (Α.Σ.Α.) χαρακτηρίζονται συνήθως στερεά υλικά ή υλικά με ελάχιστο υγρό περιεχόμενο, τα οποία προέρχονται από οικιακές, εμπορικές ή ιδρυματικές δραστηριότητες και ο κάτοχος τους θέλει ή υποχρεούται να απαλλαγεί από αυτά. Επισημαίνεται ότι δεν περιλαμβάνονται στον κατάλογο επικινδύνων αποβλήτων της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Hazardous Waste Catalogue) (Γιαννής, 2020).

#### ΧΩΡΟΣ ΥΓΕΙΟΝΟΜΙΚΗΣ ΤΑΦΗΣ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ (Χ.Υ.Τ.Α.)

Οι Χώροι Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (Χ.Υ.Τ.Α.) είναι ειδικές εγκαταστάσεις, αυστηρών προδιαγραφών, που αποσκοπούν στη διάθεση των Α.Σ.Α.. Βασικός στόχος της λειτουργίας τους είναι ο περιορισμός των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που ενδέχεται να προκαλέσει η ανεξέλεγκτη διάθεση των στερεών αποβλήτων στο φυσικό περιβάλλον. Η μέθοδος διάθεσης στο έδαφος ξεκίνησε με Χώρους Ανεξέλεγκτης Διάθεσης Αποβλήτων (Χ.Α.Δ.Α.), οι οποίοι δεν τηρούσαν καμία προδιαγραφή υγειονομικής διάθεσης και λειτουργούσαν χωρίς αδειοδότηση (Στούπας, 2020).

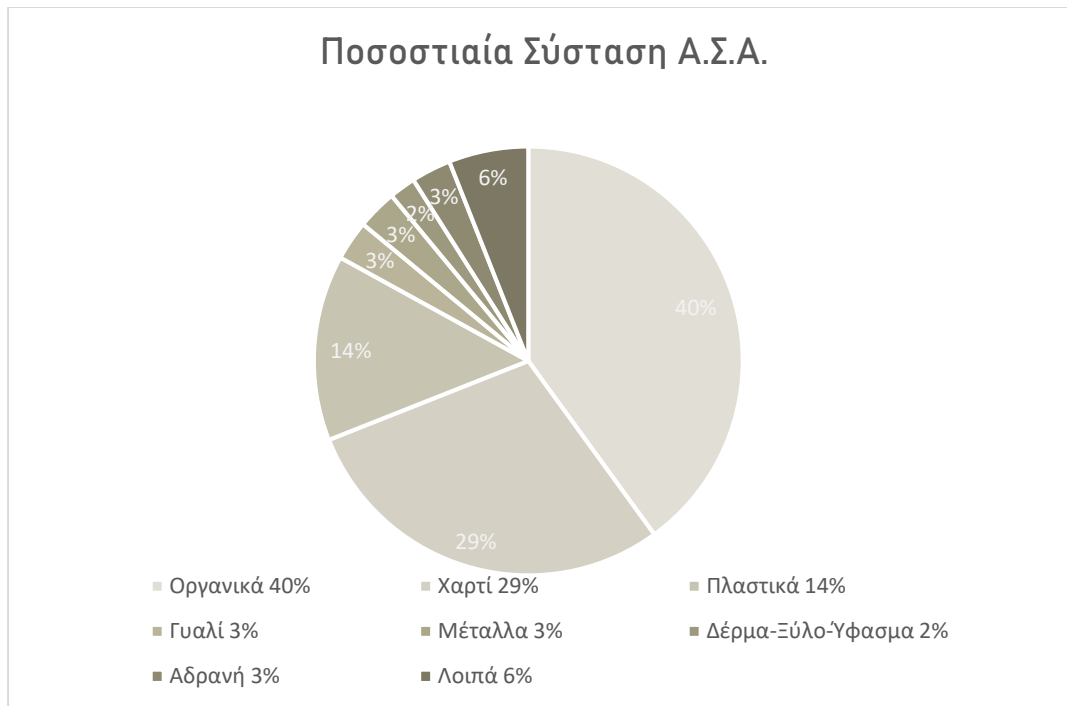
#### ΔΙΑΣΤΑΛΑΓΜΑΤΑ Χ.Υ.Τ.Α.

Διασταλάγματα ή στραγγίσματα (leachates) είναι τα υγρά που συλλέγονται στον πυθμένα του Χ.Υ.Τ.Α.. Είναι το αποτέλεσμα της κατείσδυσης ομβρίων υδάτων, ανεξέλεγκτης επιφανειακής απορροής, υδάτων που περιέχονται αρχικά στα απόβλητα και υπογείων υδάτων σε περιοχές ρηχού υδροφόρου ορίζοντα (Ντζαμίλης & Χάβας, 2004).

## 2.1.2 Α.Σ.Α. ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ Α.Σ.Α.

### ΣΥΣΤΑΣΗ ΤΩΝ Α.Σ.Α.

Τα Αστικά Στερεά Απόβλητα (Α.Σ.Α.) απαρτίζουν ένα ποσοστό της τάξης του 14% των συνολικών παραγομένων στερεών αποβλήτων, ωστόσο για τη χάραξη πολιτικής συχνά επισύρουν τη μεγαλύτερη προσοχή των αρμοδίων αρχών, καθώς η συλλογή και η επεξεργασία τους κατά κανόνα εμπίπτει στις αρμοδιότητες των δημοσίων αρχών, όσο και στην ανομοιογένεια που τα διακρίνει (Νταρακάς, 2011). Η σύσταση των αστικών στερεών αποβλήτων ποικίλει ανάλογα με τη γεωγραφική διακύμανση, όσο και τη χρονική μεταβολή (χώρα, περιοχή, εποχή, κοινωνικοοικονομικές συνθήκες).



**Εικόνα 2.1.** Ποσοστιαία σύσταση των Α.Σ.Α. στην Ελλάδα (ΥΠΕΚΑ, 2010).

Η αστικοποίηση, η ανάπτυξη της οικονομίας, και η βελτίωση του βιοτικού επιπέδου έχουν οδηγήσει τόσο σε αύξηση της ποσότητας αλλά και σε πολυπλοκότητα της σύνθεσης των Αστικών Στερεών Αποβλήτων (Khajuria et al., 2010). Επιπρόσθετα, τα χαρακτηριστικά και η σύνθεση των Α.Σ.Α. διαφέρουν ανάλογα την τοπογραφία της περιοχής, την εποχή, τις διατροφικές συνήθειες κλπ. Η σύνθεση των οικιακών απορριμμάτων αντικατοπτρίζει σε μεγάλο βαθμό και την οικονομική κατάσταση των κατοίκων, τη ξέχωρη συλλογή ανακυκλώσιμων υλικών, την οικιακή κομποστοποίηση (Den Boer et al., 2010). Επίσης, παρατηρείται ότι, από το 2005 μέχρι το 2018, η μέση ποσότητα αστικών αποβλήτων (κατά κεφαλή) μειώθηκε στην Ευρωπαϊκή Ένωση, ωστόσο διακρίνονται διαφορετικές τάσεις ανά χώρα. Οι πλουσιότερες χώρες τείνουν να παράγουν περισσότερα απόβλητα (κατά κεφαλή), ενώ ο τουρισμός συμβάλλει σε υψηλότερα ποσοστά αστικών αποβλήτων. Το 2018 η Ε.Ε. έθεσε νέους στόχους για την ανακύκλωση, τη συσκευασία και την υγειονομική ταφή αποβλήτων. Στόχος των νέων κανόνων είναι η προώθηση της μετάβασης προς το, πιο βιώσιμο, μοντέλο της κυκλικής οικονομίας. (<https://www.europarl.europa.eu/>)

## ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΩΝ Α.Σ.Α.

Οι κυριότερες μέθοδοι επεξεργασίας των αστικών στερεών αποβλήτων είναι οι ακόλουθες:

### ΘΕΡΜΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Η θερμική επεξεργασία των Α.Σ.Α. έχει σημαντικό ρόλο καθώς μειώνει αφενός τον όγκο των αποβλήτων και ανακτάται αφετέρου ενέργεια. Μέσω της θερμικής επεξεργασίας τα στερεά απορρίμματα μετατρέπονται σε αέρια, υγρά και στερεά προϊόντα με ταυτόχρονη απελευθέρωση θερμικής ενέργειας. Για να είναι επιτυχής η διαδικασία πρέπει να έχει εξατμιστεί η υγρασία των αποβλήτων και να είναι γνωστή η σύσταση και η θερμογόνος δύναμη τους (Ανδρεαδάκης, 2000). Κύριοι στόχοι της θερμικής επεξεργασίας είναι: η μείωση του όγκου των αποβλήτων, η μετατροπή τους σε υλικά λιγότερο επιβλαβή (αδρανοποίηση), η εκμετάλλευση της θερμογόνου δύναμης με σκοπό την ανάκτηση ενέργειας (θέρμανση, ηλεκτρικό ρεύμα, καύσιμη ύλη) και η ελαχιστοποίηση της περιβαλλοντικής ρύπανσης (Χιονίδης, 2007). Η διαφοροποίηση των συστημάτων θερμικής επεξεργασίας είναι ανάλογη των απαιτούμενων αναγκών σε οξυγόνο και είναι:

- Αποτέφρωση ή Καύση (incineration)
- Πυρόλυση (pyrolysis)
- Αεριοποίηση (gasification)
- Τεχνική πλάσματος (plasma gasification)
- Άλλες συνδυαστικές μέθοδοι

### ΒΙΟΛΟΓΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Η βιολογική επεξεργασία εφαρμόζεται σε βιοαποδομήσιμα ή οργανικά απόβλητα. Περιλαμβάνεται ποικιλία αγροτικών αποβλήτων και υπολειμμάτων (κοπριές, φυτικά υπολείμματα καλλιεργειών, απόβλητα εκκοκκιστηρίων βάμβακος, ελαιοπυρήνα κλπ), πολλά στερεά απόβλητα και ιλύες από βιομηχανίες τροφίμων. Περιλαμβάνεται επίσης η ιλύς βιολογικών καθαρισμών αστικών λυμάτων καθώς και το βιοαποδομήσιμο κλάσμα των αστικών αποβλήτων. Το κύριο πλεονέκτημα των βιολογικών μεθόδων επεξεργασίας αποβλήτων έγκειται στη δυνατότητα επιστροφής των οργανικών υλικών στο έδαφος, ολοκληρώνοντας έτσι έναν σημαντικό οικολογικό κύκλο ενώ βασικός στόχος είναι η ανάκτηση compost, ενέργειας, η μείωση των αερίων του θερμοκηπίου, η μείωση διασταλαγμάτων και βιοαερίου στους Χ.Υ.Τ.Α. (Παναγιωτακόπουλος, 2002). Διακρίνονται δύο βασικές μορφές επεξεργασίας των οργανικών αποβλήτων:

- Αερόβια επεξεργασία ή κομποστοποίηση
- Αναερόβια επεξεργασία

### ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Αναφέρεται στις διαδικασίες προετοιμασίας και διαχωρισμού των αποβλήτων με μηχανικά μέσα. Στην πρώτη κατηγορία περιλαμβάνονται τεχνολογίες σκισίματος των σακουλών, ελάττωσης του μεγέθους και αποκατάσταση της ομοιομορφίας των αποβλήτων. Στη δεύτερη κατηγορία επιτυγχάνεται ο διαχωρισμός της εισερχόμενης μάζας των αποβλήτων σε δύο ρεύματα, εκ των οποίων το ένα περιέχει το προς ανάκτηση υλικό σε υψηλή συγκέντρωση και το άλλο είναι σε μεγάλο βαθμό απαλλαγμένο από την παρουσία του (<http://www.eedsa.gr>).

#### ΥΓΕΙΟΝΟΜΙΚΗ ΤΑΦΗ (Χ.Υ.Τ.Α.)

Με την υγειονομική ταφή, ειδικά μηχανήματα συμπιέζουν τα απορρίματα, τα οποία στη συνέχεια καλύπτονται, στο τέλος κάθε ημέρας λειτουργίας, ή πιο συχνά, όταν κρίνεται απαραίτητο, με ένα στρώμα από εδαφικό υλικό. Το επιφανειακό στρώμα κάλυψης των απορριμμάτων χαρακτηρίζεται ως ένα συμπιεσμένο γαιώδες υλικό, σκοπός του οποίου είναι να ελαχιστοποιεί τη διείσδυση νερού στο εσωτερικό του χώρου διάθεσης. Το υλικό αυτό μπορεί να είναι άργιλος, μίγμα άμμου-μπετονίτη, συνθετικές γεωμεμβράνες ή συνδυασμός τους. Κυριαρχούν δυο τύποι Χ.Υ.Τ.Α.: (α) εκτεταμένη ταφή σε σχετικά επίπεδες θέσεις και (β) ταφή υπό πίεση σε φυσικά ή τεχνητά έγκοιλα (παλαιοί χώροι λατομείων, μικρές φυσικές ή τεχνητές λεκάνες, κ.λπ.) (Κασινού, 2006). Η υγειονομική ταφή αποτελεί την πλέον ολοκληρωμένη, οικονομική, συμβατή με τον εθνικό σχεδιασμό και περιβαλλοντικά αποδεκτή μέθοδο διαχείρισης των απορριμμάτων (50% των παγκοσμίως παραγόμενων απορριμμάτων διατίθεται με αυτόν τον τρόπο) (Βουδούρης, 2009).

### 2.1.3 ΔΙΑΘΕΣΗ Α.Σ.Α. ΣΕ Χ.Υ.Τ.Α.

Η μεταβολή της σύστασης, αλλά και οι παραγόμενες ποσότητες των Α.Σ.Α. παράλληλα με την εξελισσόμενη περιβαλλοντική πολιτική που ακολουθείται σε παγκόσμιο αλλά και σε επίπεδο κρατών, και η οποία στοχεύει σε ολοκληρωμένα συστήματα διαχείρισης στερεών αποβλήτων, έχουν προσανατολιστεί σε μεθόδους διαχείρισης που βασίζονται στην εξής ιεράρχηση: πρόληψη, ελαχιστοποίηση και όσο το δυνατόν συχνότερη επαναχρησιμοποίηση των προϊόντων. Σε περίπτωση που δεν υπάρχει αυτή η δυνατότητα, προτείνεται η μέθοδος της ανακύκλωσης (συμπεριλαμβανομένης της κομποστοποίησης) σε συνδυασμό με τη χρήση των αποβλήτων για ανάκτηση και παραγωγή ενέργειας. Ως επιβλαβέστερη λύση για το περιβάλλον και την υγεία, κρίνεται η απλή διάθεση των αποβλήτων (<https://www.europarl.europa.eu/>)



Από την άλλη, συγκριτικές μελέτες, οι οποίες διεξήχθησαν σε διάφορες χώρες, διαπίστωσαν δύο βασικούς λόγους της ευρείας χρήσης των υγειονομικών χώρων ταφής: (i) η επιλογή αυτή είναι πιο οικονομική, μεταξύ των εναλλακτικών μεθόδων διάθεσης των αστικών αποβλήτων, (ii) εκτός των οικονομικών πλεονεκτημάτων, οι υγειονομικοί χώροι ταφής επιτρέπουν σε περισσότερα στερεά απόβλητα να αποσυντεθούν κάτω από περισσότερο ελεγχόμενες συνθήκες, μέχρι την ενδεχόμενη μετατροπή τους σε σχετικά αδρανή, σταθεροποιημένα υλικά (Βιδάλη, 2011). Η ανάγκη κατάλληλου χώρου διάθεσης απορριμάτων για υγειονομική ταφή στην Ελλάδα ανάγεται στο 1986, στην Αττική. Πλέον, οι σύγχρονοι Χ.Υ.Τ.Α. ακολουθούν τα περιβαλλοντικά πρότυπα για τις καταλληλότερες μεθόδους επεξεργασίας και διάθεσης αποβλήτων.



**Εικόνα 2.2.** Η διαχείριση των αποβλήτων στις χώρες της Ε.Ε.,(<https://www.europarl.europa.eu/>).

Για να χωροθετηθεί και να κατασκευασθεί ένας Χ.Υ.Τ.Α. οφείλουν να λαμβάνονται υπόψη κριτήρια και παράμετροι συγκοινωνιακής, κοινωνικής, νομικής, οικονομικής, τοπογραφικής και γεωλογικής φύσεως, σχετικά με την επιλογή της κατάλληλης για αυτόν θέσης, χωρίς συγχρόνως να παραβλέπονται και κάποια κριτήρια που αφορούν τη φύση των αποβλήτων. Αυτό αποσκοπεί στο να αποτραπούν πιθανές αρνητικές επιπτώσεις όπως για παράδειγμα η υποβάθμιση του περιβάλλοντος αλλά και η προστασία της δημόσιας υγείας. Τα κριτήρια αυτά έχουν βραχυπρόθεσμο, μεσοπρόθεσμο και μακροπρόθεσμο χαρακτήρα και βασίζονται στις ιδιότητες που έχουν τα απορρίμματα (Παπαγιάννης, 2015).



Ορισμένα απο τα πλεονεκτημάτα και τα μειονεκτήματα της διάθεσης των Α.Σ.Α. σε Χ.Υ.Τ.Α. είναι τα εξής: (Ζαγγάνα, 2015)

### ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- Κατάλληλος για ένα ευρύ φάσμα απορριμμάτων
- Οικονομική μέθοδος διαχείρισης απορριμμάτων
- Πλήρης μέθοδος σε σύγκριση με την καύση και τη λιπασματοποίηση
- Παραγωγή βιοαερίου, ανανεώσιμη πηγή ενέργειας για θέρμανση και παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος
- Ανάπλαση μετά το κλείσιμο του Χ.Υ.Τ.Α. και αναδιαμόρφωση του χώρου
- Σωστός σχεδιασμός Χ.Υ.Τ.Α. δεν αλλοιώνει αισθητικά την περιοχή

### ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

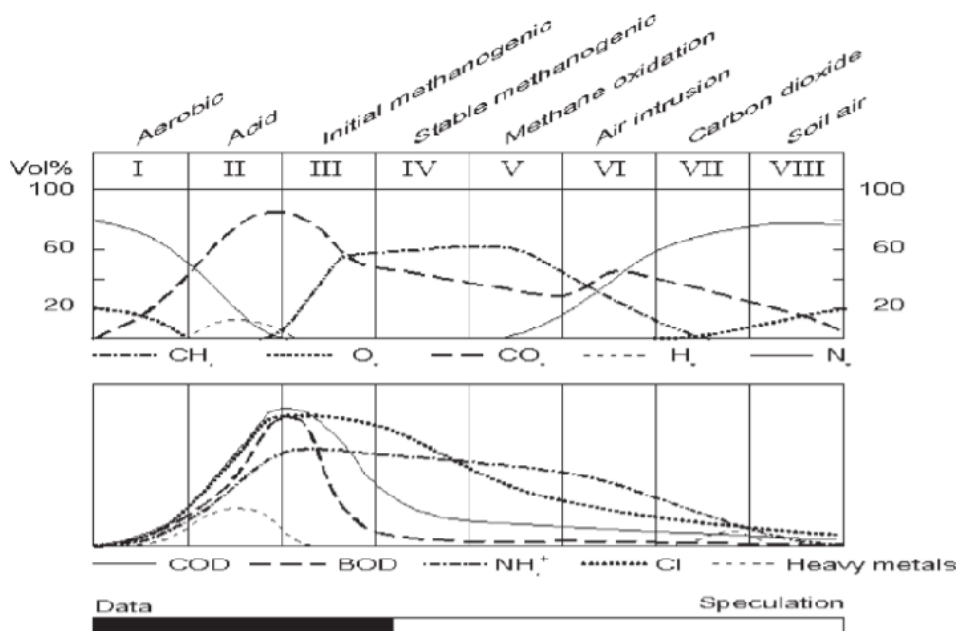
- Δυσκολία εντοπισμού κατάλληλου χώρου διάθεσης
- Κίνδυνος ρύπανσης αέρα εξαιτίας παραγωγής  $\text{CH}_4$  και άλλων αερίων
- Διήθηση επιφανειακών νερών και κατείσδυση των διασταλαγμάτων στο υπέδαφος
- Κίνδυνος καθίζησης και διάβρωσης του υλικού επικάλυψης
- Επιπτώσεις σε πανίδα, χλωρίδα, αλλοίωση φυσικού περιβάλλοντος
- Κίνδυνος ανάφλεξης, κατολίσθησης

Επιγραμματικά, τα απαραίτητα βήματα κατασκευής και λειτουργίας ενός Χ.Υ.Τ.Α. είναι η διαμόρφωση χώρου με κατάλληλο υπέδαφος, η κάλυψη με στεγανωτική στρώση αργίλου, πάνω στον οποίο θα τοποθετηθεί συνθετική στεγανωτική μεμβράνη (για αποφυγή ρύπανσης υδροφόρων στρωμάτων), η τοποθέτηση σωλήνων για συλλογή διασταλαγμάτων και η τελική διάθεση απορριμμάτων, με ταυτόχρονη μείωση του όγκου τους και επικάλυψη με χώμα. Επιπλέον παράγεται βιοαέριο, που σε περίπτωση μεγάλης ποσότητας, είναι δυνατόν να παραχθεί και ηλεκτρικό ρεύμα. Τέλος, μετά το πέρας λειτουργίας του Χ.Υ.Τ.Α, δημιουργείται ένας νέος χώρος πρασίνου (Ζαγγάνα, 2015).

Ο χρόνος ζωής ενός Χ.Υ.Τ.Α. μπορεί να φτάσει έως και 30 χρόνια λειτουργίας. Καθόλη τη διάρκεια λειτουργίας του, έχει αναπτυχθεί, με αυξητικές τάσεις, η κατανόηση της πολυπλοκότητας και της συνθετότητας της σειράς των χημικών και βιολογικών αντιδράσεων, που ξεκινούν με την ταφή των απορριμμάτων σε Χ.Υ.Τ.Α. (Peter Kjeldsen et al., 2010). Η Εικόνα 2.3 που ακολουθεί παρουσιάζει τη σύνθεση του αερίου και του υγρού καθώς τα απορρίμματα αποσυντίθενται. Η Εικόνα 2.3 αναπτύσσεται από την πρώτη περιγραφή των φάσεων υγειονομικής ταφής που δόθηκε από τους (Farquhar and Rovers, 1973). Οι τέσσερις πρώτες φάσεις που αναφέρονται είναι οι εξής:

1. αερόβια φάση. Κατά τη διάρκεια της οποίας το οξυγόνο που υπάρχει στα απόβλητα, καταναλώνεται γρήγορα με την αποσύνθεση οργανικών ενώσεων.
2. αναερόβια φάση. Κατά την οποία παράγονται μεγάλες ποσότητες καρβοξυλικών οξέων- απουσία οξυγόνου.
3. αρχική φάσης μεθανογένεσης. Κατά την οποία παράγεται μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα.
4. σταθερή φάση μεθανογένεσης ή αλλιώς ώριμη φάση. Κατά την οποία η αποσύνθεση έχει ωριμάσει, κρίνεται χαμηλής δραστηριότητας φάση με ταυτόχρονη χαμηλή παραγωγή μεθανίου.

Μεταγενέστερες φάσεις αποσύνθεσης, στις οποίες τα απόβλητα αρχίζουν να γίνονται αερόβια, βασίζονται στη θεωρία και δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα πεδίου για την τεκμηρίωση αυτών των συνθηκών (Christensen & Kjeldsen, 1995). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι περισσότεροι χώροι υγειονομικής ταφής με καλή παρακολούθηση είναι ηλικίας μικρότερης των 30 ετών και εξακολουθούν να βρίσκονται στη σταθερή φάση μεθανογένεσης (Peter Kjeldsen et al., 2010).



**FIGURE 1.** The lifetime of a landfill showing general trends in gas and leachate quality development.

**Εικόνα 2.3.** Σύνθεση αερίου και υγρού καθώς αποσυντίθενται τα απορρίμματα, (Peter Kjeldsen et al., 2010).

Τέλος, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι το κυρίαρχο πρόβλημα της υγειονομικής ταφής είναι η δημιουργία διασταλαγμάτων και η παραγωγή αέριων εκπομπών (βιοαέριο).

- Όσον αφορά τα **διασταλάγματα**, αυτά εμφανίζονται κατά την κατείσδυση νερού στο χώρο, όταν υπερνικηθεί η ικανότητα κατακράτησης υγρασίας από τα απορρίμματα. (αναλυτικά βλ. κεφάλαιο 2.1.4)
- Η παραγωγή και διαφυγή **βιοαερίου** (κυρίως μεθανίου και διοξειδίου του άνθρακα) αποτελεί έναν αρκετά ρυπογόνο παράγοντα κατά την ταφή των απορριμμάτων. Το βιοαέριο παράγεται κατά την αναερόβια αποδόμηση του οργανικού κλάσματος των απορριμμάτων (Κασινού, 2006). Αποτελείται από μονοξειδίο του άνθρακα CO, μεθανίο CH<sub>4</sub>, αμμωνία NH<sub>3</sub>, διοξειδίο του άνθρακα CO<sub>2</sub>, υδρογόνο H<sub>2</sub>, υδρόθειο H<sub>2</sub>S, άζωτο N και οξυγόνο O. Για τη συλλογή του βιοαερίου συνιστάται η ανόρυξη γεωτρήσεων στη μάζα των απορριμμάτων (Willumsen, 2001). Το βιοαέριο πρέπει να καίγεται επιτόπου ή σε κεντρικό σημείο με ειδική διάταξη, αλλιώς υπάρχει ενδεχόμενος κίνδυνος έκρηξης ή πυρκαγιάς. Σε αντίθετη περίπτωση μη επεξεργασίας του βιοαερίου, η εκπομπή του στην ατμόσφαιρα συμβάλλει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Ωστόσο, με κατάλληλη γνώση και σωστή διαχείριση, το μεθάνιο είναι ικανό να αποτελέσει πηγή ενέργειας.

## 2.1.4 ΔΙΑΣΤΑΛΑΓΜΑΤΑ Χ.Υ.Τ.Α.

Τα διασταλάγματα της υγειονομικής ταφής είναι αποτέλεσμα της στράγγισης των όμβριων υδάτων και της αποσύνθεσης των αποβλήτων σε έναν Χ.Υ.Τ.Α. (Vilar et al., 2011). Στην πραγματικότητα, η ρύπανση αυτή είναι το αποτέλεσμα μιας σειράς φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών (Bandala et al., 2021). Ο τύπος και η φύση των ρύπων στα διασταλάγματα εξαρτάται από τα στερεά απόβλητα που περιέχονται στον χώρο υγειονομικής ταφής, τη σύνθεση και την ηλικία, καθώς και τα τοπικά κλιματικά χαρακτηριστικά. Οι ρυπογόνοι παράγοντες που συνήθως βρίσκονται στα διασταλάγματα ενός Χ.Υ.Τ.Α. είναι ανόργανες και οργανικές ουσίες, οι περισσότερες από τις οποίες μπορεί να είναι ιδιαίτερα τοξικές και επίμονες στο περιβάλλον (Bandala et al., 2021).

### ΠΟΙΟΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΑΣΤΑΛΑΓΜΑΤΩΝ

Γενικά, κυριότεροι δείκτες ποιότητας στα διασταλάγματα ενός Χ.Υ.Τ.Α. είναι: το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD), ο συνολικός οργανικός άνθρακας (TOC), το βιολογικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD), τα αιωρούμενα στερεά, το pH, η αμμωνία ( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ) και οι συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων (Esfahani et al., 2021). Επίσης, παλαιότερες μελέτες έχουν εντοπίσει ένα ευρύ φάσμα τοξικών ρύπων στα διασταλάγματα Χ.Υ.Τ.Α., συμπεριλαμβανομένων πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων (PAHs) (Ates and Argun, 2021), φαινολικών ενώσεων (Boonyaraj et al., 2017), φυτοφάρμακων (Wang and Banks, 2007), παθογόνων οργανισμών (Ye et al., 2017), μικροπλαστικών (Rodríguez-Narvaez et al., 2021) και φαρμακευτικών προϊόντων (Lu et al., 2016). Τα μη επεξεργασμένα ή ανεπαρκώς επεξεργασμένα διασταλάγματα, χαρακτηρίζονται ως τοξικοί ρύποι και ενέχουν σημαντικούς κινδύνους για το οικοσύστημα και την ανθρώπινη υγεία (Bandala et al., 2021).

Τα διασταλάγματα υγειονομικής ταφής κατατάσσονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: στα ακετογόνα και στα μεθανογενή, ανάλογα με τη χρονική διακύμανση των παραμέτρων του διασταλάγματος κατά τη διαδικασία αποικοδόμησης των αποβλήτων. Οι αναλογίες  $\text{BOD}_5/\text{COD}$  και  $\text{COD}/\text{TOC}$  είναι τυπικοί δείκτες για τη βιοδιάσπαση οργανικών ενώσεων και την οξειδωμένη κατάσταση οργανικού άνθρακα (Dabaghian et al. 2018). Έχει αποδειχθεί ότι το COD, το BOD και ο λόγος  $\text{BOD}:\text{COD}$  δείχνουν τις υψηλότερες τιμές για ακετογόνα διαλύματα λόγω της παρουσίας αυξημένων επιπέδων οργανικών ρύπων (Robinson, 2007). Αυξημένα επίπεδα ρύπων βαρέων μετάλλων υπάρχουν επίσης στο ακετογόνο διάλυμα λόγω της όξινης φύσης του, ενισχύοντας τη διαλυτότητα του μετάλλου (Bhalla et al., 2012).

Από τα δεδομένα προκύπτει ότι η ηλικία του χώρου υγειονομικής ταφής, και έτσι ο βαθμός σταθεροποίησης των στερεών αποβλήτων έχει σημαντική επίδραση στα χαρακτηριστικά των διασταλαγμάτων (Renou et al., 2008). Για παράδειγμα, σε ένα Χ.Υ.Τ.Α. λειτουργίας κάτω του 1 έτους, επικρατεί κυρίως το αερόβιο στάδιο και το στάδιο ζύμωσης, επομένως οι τιμές που θα χαρακτηρίζουν τα διασταλάγματα είναι: τιμές  $\text{COD} > 15\text{g/L}$ , τα καρβοξυλικά οξέα  $> 80\%$  του υδατικού ρεύματος και ο λόγος  $\text{BOD}_5/\text{COD} > 0,5$ . Αντίθετα, σε ένα Χ.Υ.Τ.Α. λειτουργίας άνω των 5 ετών, επικρατεί το στάδιο σταθερής φάσης μεθανογένεσης, και τα διασταλάγματα χαρακτηρίζονται από με τιμές όπως:  $\text{COD} < 3\text{g/L}$ , αποτελούνται κυρίως από ανθεκτικά μίγματα Χουμικών Οξέων (HA) και Λιπαρών Οξέων (FA). Ο λόγος  $\text{BOD}_5/\text{COD} < 0,1$  (Στούπας, 2020). Σχετικά με ένα Χ.Υ.Τ.Α. λειτουργίας μεταξύ 1 έως 5 ετών, επικρατεί το στάδιο της μεθανογένεσης, και οι τιμές που χαρακτηρίζουν τα διασταλάγματα είναι ενδιάμεσες (Gao et al., 2015). Παρακάτω παρουσιάζεται η σύσταση των διασταλαγμάτων σε νέο (λειτουργία  $< 2$  έτη) Χ.Υ.Τ.Α. και σε ώριμο (λειτουργία  $> 10$  έτη) Χ.Υ.Τ.Α.

**Πίνακας 2.1.** Σύσταση διασταλαγμάτων σε νέο και ώριμο Χ.Υ.Τ.Α. (Tshobanoglous & Kreith, 2002)

Συστατικά	Νέος Χ.Υ.Τ.Α.		Ώριμος Χ.Υ.Τ.Α.
	Διακύμανση	Τυπική τιμή	
BOD <sub>5</sub> (mg/l)	2000-30000	10000	100-200
TOC (mg/L)	1500-20000	6000	80-160
COD (mg/L)	3000-60000	18000	100-500
Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (mg/L)	200-2000	500	100-400
Οργανικό Άζωτο (mg/L)	10-800	200	80-120
Αμμωνιακό Άζωτο (mg/L)	10-800	200	20-40
Νιτρικά (mg/L)	5-40	25	5-10
Ολικός Φώσφορος (mg/L)	5-100	30	5-10
Ορθοφωσφορικά (mg/L)	4-80	20	4-8
Ολική Αλκαλικότητα (mg/L)	1000-10000	3000	200-1000
pH	4,5-7,5	6	6,6-7,6
Ολική Σκληρότητα (mg/L)	300-10000	3500	200-500
Ασβέστιο (mg/L)	200-3000	1000	100-400
Μαγνήσιο (mg/L)	50-1500	250	50-200
Κάλιο (mg/L)	200-1000	300	50-400
Νάτριο (mg/L)	200-2500	500	100-200
Χλωριούχα (mg/L)	200-3000	500	100-400
Θειικά (mg/L)	50-1000	300	20-50
Ολικός Σίδηρος (mg/L)	50-1200	60	20-200

## ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΔΙΑΣΤΑΛΑΓΜΑΤΩΝ

Για τη μείωση και την παραγόμενη ποσότητα διασταλαγμάτων κρίνεται απαραίτητη η σωστή διαχείριση τους. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω κατάλληλου σχεδιασμού και μόνωσης του Χ.Υ.Τ.Α., με συστήματα συλλογής διασταλαγμάτων, και τέλος με Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Διασταλαγμάτων. Παρόλα αυτά, πολλές φορές συναντάται δυσκολία στην επεξεργασία τους. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι τα διασταλάγματα έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε οργανικά (ύπαρξη τοξικών ουσιών). Ακόμη, για να πληρούνται οι κατάλληλες προδιαγραφές, είναι απαραίτητος ο συνδυασμός βιολογικών και φυσικοχημικών διαδικασιών. Επίσης, παρουσιάζουν υψηλές συγκεντρώσεις αμμωνιακού αζώτου κάνοντας δύσκολη την επιλογή κατάλληλης μεθόδου απομάκρυνσης. Σημαντικός παράγοντας δυσκολίας στην επεξεργασία τους είναι και οι εποχιακές διακυμάνσεις. Τέλος, λόγω των υψηλών ρυπαντικών φορτίων των διασταλαγμάτων και των αυστηρών προδιαγραφών που πρέπει να τηρούνται για τη διάθεση τους, χρειάζονται πολύπλοκες και κοστοβόρες τεχνολογίες.

Σύμφωνα με τον (Στούπας, 2020) οι διαθέσιμες τεχνολογίες επεξεργασίας των διασταλαγμάτων είναι είτε αερόβιες βιολογικές, αναερόβιες βιολογικές και φυσικοχημικές μέθοδοι επεξεργασίας.

Πιο αναλυτικά, στην *αερόβια βιολογική επεξεργασία* εντάσσονται οι κατηγορίες των αεριζόμενων λιμνών (aerated lagoons), η μέθοδος ενεργού ιλύος (aerobic activated sludge), αντιδραστήρας διαλείποντος έργου (sequencing batch reactors, SBR), βιοδίσκοι (rotating biological contactors RBC), χαλικοδυλιστήρια (tricking filters), βιοαντιδραστήρες μεμβρανών (membrane biological reactor, MBR), τεχνητοί υγροβιότοποι (constructed wetlands).

Στην *αναερόβια βιολογική επεξεργασία*, εντάσσονται οι κατηγορίες, της αναερόβιας χώνευσης, του αντιδραστήρα με αναερόβιο φίλτρο, του αντιδραστήρα ανοδικής ροής με κουβέρτα ιλύος (Up-flow anaerobic sludge blanket reactor, UASB) και Anammox.

Τέλος, η *φυσικοχημική επεξεργασία* είναι για διασταλάγματα με μικρό οργανικό φορτίο. Κύριες κατηγορίες της είναι: η κροκίδωση- συσσωμάτωση, ο διαχωρισμός με μεμβράνες, η μικροδιήθηση (MF), η υπερδιήθηση, η νανοδιήθηση, η αντίστροφη όσμωση, η προσρόφηση με ενεργό άνθρακα (AC), η χημική κατακρήμνιση, η ιοανταλλαγή, η χημική οξείδωση, οι προηγμένες διεργασίες οξείδωσης, και η ηλεκτροχημική επεξεργασία.

## 2.1.5 Χ.Υ.Τ.Α. ΧΑΝΙΩΝ (Δ.Ε.ΔΙ.Σ.Α.)

Ο Χώρος Υγειονομικής Ταφής Απορριμάτων Χανίων ιδρύθηκε το 1993, με τη μονάδα να λειτουργεί υπό την εποπτεία εξειδικευμένου στελεχιακού δυναμικού απο το 2005 και ύστερα. Πλέον παρέχεται ένα πιο βιώσιμο και καθαρό περιβάλλον σε 7 Δήμους και στην Περιφέρεια των Χανίων. Η Βιώσιμη Διαχείριση Αστικών Στερεών Αποβλήτων από τη Διαδημοτική Επιχείρηση Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων (Δ.Ε.ΔΙ.Σ.Α.), στηρίζεται στην εφαρμογή προηγμένων μεθόδων αλλά και σε εισαγωγή καινοτομιών στη διαχείριση Α.Σ.Α.. Το Ε.Μ.Α.Κ. (Εργοστάσιο Μηχανικής Ανακύκλωσης και Κομποστοποίησης) και ο Χ.Υ.Τ.Α. βρίσκονται στην τοποθεσία «Κορακιά» Ακρωτηρίου Χανίων, νότια της χαράδρας του Κουρουπητού, σε μια έκταση που καλύπτει 235.5 στρέμματα, εκ των οποίων τα 130 διατίθενται για την Υγειονομική Ταφή Απορριμάτων.

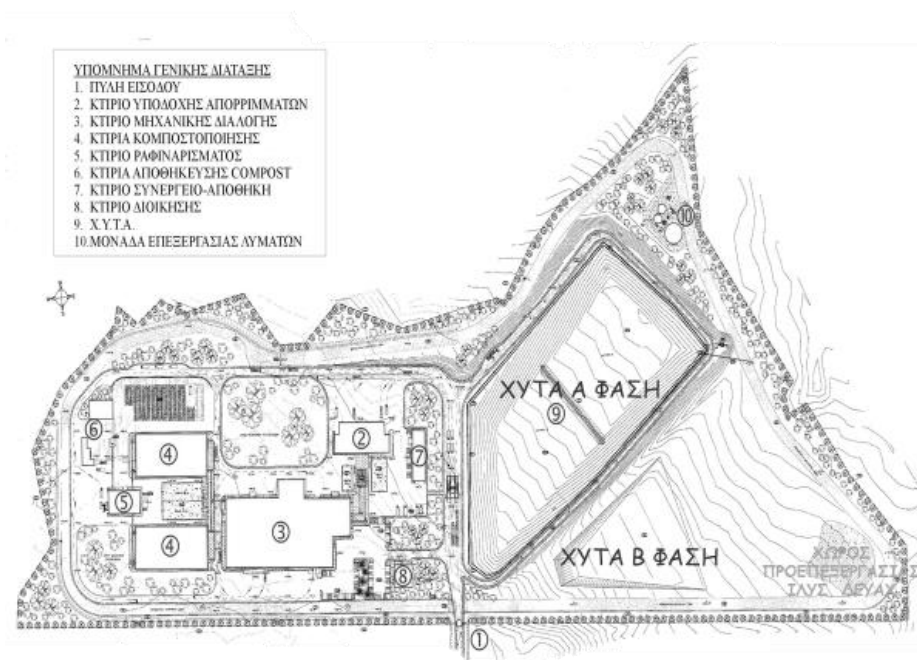


**Εικόνα 2.4.** Αεροφωτογραφίες της έκτασης της εγκατάστασης του Χ.Υ.Τ.Α. Χανίων, (<https://earth.google.com/>)

Το Ε.Μ.Α.Κ., είναι μία μονάδα περισυλλογής και διαχωρισμού απορριμάτων συνολικής ισχύος 3.3 MW. Διαθέτει ζυγιστήριο κατά την είσοδο των απορριμάτων, μηχανική διαλογή και χειροδιαλογή αποβλήτων, κομποστοποίηση οργανικού υλικού και τέλος τη συσκέυαση σε συμπιεσμένους κύβους μέσω πρέσας διάφορων διαχωρισμένων υλικών (αλουμίνιο, λευκοσίδηρος, χαρτιά κ.α.) προς πώληση τους σε εργοστάσια προκειμένου να ανακυκλωθούν.

Όσον αφορά τον Χ.Υ.Τ.Α., έχει κατασκευαστεί σε δύο φάσεις (Α' και Β'), που πλέον έχουν ενοποιηθεί. Οι λεκάνες απόθεσης, καταλαμβάνουν συνολική έκταση 39120 m<sup>2</sup> και περιστοιχίζονται από πλευρικές επιφάνειες κλίσεως 1:3. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η συγκράτηση και στεγανοποίηση των προς διάθεση απορριμάτων. Οι πυθμένες των λεκανών έχουν την μορφή ανάποδου W ώστε να διευκολύνεται η συλλογή των διασταλαγμάτων, και να οδηγούνται στην εγκατάσταση του βιολογικού καθαρισμού. Οι

λεκάνες, είναι στεγανοποιημένες τόσο στον πυθμένα τους όσο και στα πρανή τους, αποκλείοντας έτσι την διαρροή ρύπων ή ουσιών προς το περιβάλλον. Πλέον ο συγκεκριμένος Χ.Υ.Τ.Α. έχει περάσει στο τελικό στάδιο λειτουργίας του, με διαθέσιμη χωρητικότητα μικρότερη του 2% του συνολικού διαθέσιμου όγκου.



**Εικόνα 2.5.** Γενική Διάταξη Εγκαταστάσεων, ([www.dedisa.gr](http://www.dedisa.gr))

([www.dedisa.gr](http://www.dedisa.gr))

## 2.1.6 ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

### ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

Η διαχείριση των αποβλήτων στην Ελλάδα διέπεται από το εξής νομικό πλαίσιο (<https://ypen.gov.gr>):

#### ΚΥΑ 113944/97 (ΦΕΚ 1016/Β` 17.11.1997)

Ορίζει τις γενικές κατευθύνσεις της διαχείρισης των αποβλήτων σε εθνικό επίπεδο. Ειδικότερα: α) θέτει το γενικό πλαίσιο και τους διαχρονικούς στόχους για τη μελέτη και τον καθορισμό των μεθόδων διαχείρισης των στερεών αποβλήτων, β) θεσπίζει τους όρους καταλληλότητας και τα κριτήρια συγκριτικής αξιολόγησης και επιλογής των χώρων διάθεσης και αξιοποίησης των στερεών απορριμμάτων (π.χ. να μην προκαλείται αλλοίωση του τοπίου, να μην δημιουργούνται κίνδυνοι στο νερό, το έδαφος και τον αέρα κ.α.), γ) καθιερώνει τις διαδικασίες και τους όρους του σχεδιασμού διαχείρισης των στερεών απορριμμάτων (καθορισμός αρμόδιων φορέων διαχείρισης, επιλογή μεθόδου διαχείρισης, οικονομικές και περιβαλλοντικές συνέπειες, γεωλογικά, χωροταξικά, κλιματολογικά στοιχεία, κ.ά.).

#### ΚΥΑ 114218/97(ΦΕΚ 1016 Β/17-11-97)

«Κατάρτιση πλαισίου προδιαγραφών και γενικών προγραμμάτων διαχείρισης στερεών αποβλήτων». Περιλαμβάνει το πλαίσιο τεχνικών προδιαγραφών διαχείρισης στερεών αποβλήτων, τους όρους και τα κριτήρια καταλληλότητας και επιλογής θέσεων εγκατάστασης διαχείρισης αποβλήτων.

#### Ν. 2939/2001 (ΦΕΚ 179/Α/6-8-2001) (ΜΕΡΙΚΗ ΚΑΤΑΡΓΗΣΗ)

«Συσκευασίες και εναλλακτική διαχείριση των συσκευασιών άλλων προϊόντων – ίδρυση Εθνικού Οργανισμού Εναλλακτικής Διαχείρισης Συσκευασιών και άλλων Προϊόντων (ΕΟΕΔΣΑΠ) και άλλες διατάξεις», όπως τροποποιήθηκε με το Ν. 3854/10 (ΦΕΚ 94/Α/23.06.2010) «Τροποποίηση της νομοθεσίας για την εναλλακτική διαχείριση των συσκευασιών και άλλων προϊόντων και τον Εθνικό Οργανισμό Εναλλακτικής Διαχείρισης Συσκευασιών και Άλλων Προϊόντων (Ε.Ο.Ε.Δ.Σ.Α.Π.) και άλλες διατάξεις» και το Ν.4042/2012.

#### ΚΥΑ 22912/1117/2005 (ΦΕΚ 759 Β)

«Μέτρα και όροι για την πρόληψη και τον περιορισμό της ρύπανσης του περιβάλλοντος από την αποτέφρωση των αποβλήτων», προς ενσωμάτωση της Οδηγίας 2000/76/ΕΚ, ενώ έχει άμεση ισχύ ο Ευρωπαϊκός Κατάλογος Αποβλήτων (ΕΚΑ), σύμφωνα με το Παράρτημα της Απόφασης 2002/532/ΕΚ, όπως έχει τροποποιηθεί και ισχύει.

#### ΚΥΑ 13588/725/2006 (ΦΕΚ 383/Β` 28.3.2006)

«Μέτρα, όροι και περιορισμοί για την διαχείριση επικινδύνων αποβλήτων σε συμμόρφωση με τις διατάξεις της οδηγίας 91/689/ΕΟΚ «για τα επικίνδυνα απόβλητα» του Συμβουλίου της 12ης Δεκεμβρίου 1991. Αντικατάσταση της υπ' αριθμ. 19396/1546/1997.

#### Ν. 4014/11(ΦΕΚ 209/Α/21-9-11)

«Περιβαλλοντική αδειοδότηση έργων και δραστηριοτήτων, ρύθμιση αυθαιρέτων σε συνάρτηση με δημιουργία περιβαλλοντικού ισοζυγίου και άλλες διατάξεις αρμοδιότητας Υπουργείου Περιβάλλοντος» όπως τροποποιήθηκε και ισχύει.



N.4042/2012 (ΦΕΚ 24/Α/13-2-2012)

«Ποινική Προστασία του περιβάλλοντος – Εναρμόνιση με την Οδηγία 2008/99/ΕΚ – Πλαίσιο παραγωγής και διαχείρισης αποβλήτων – Εναρμόνιση με την Οδηγία 2008/98/ΕΚ – Ρύθμιση θεμάτων Υπουργείου Περιβάλλοντος Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής» που ενσωματώνει στο εθνικό δίκαιο την Οδηγία-πλαίσιο 2008/98/ΕΕ για τα απόβλητα.

ΚΥΑ 146163//2012 (ΦΕΚ 1537/Β/8-5-2012)

«Μέτρα και όροι για τη Διαχείριση Αποβλήτων Υγειονομικών Μονάδων »

ΚΥΑ 4685/2020 (ΦΕΚ 92/Α/7-5-2020)

«Εκσυγχρονισμός περιβαλλοντικής νομοθεσίας», ενσωμάτωση στην ελληνική νομοθεσία των Οδηγιών 2018/844 και 2019/692 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου και λοιπές διατάξεις. Σχετίζεται με την απλοποίηση περιβαλλοντικής αδειοδότησης, τη διαδικασία αδειοδότησης ΑΠΕ- Α΄φαση, τη διαχείριση προστατευόμενων περιοχών, τις ζώνες εντός προστατευόμενων περιοχών, οικιστικές πυκνώσεις, ρυθμίσεις κτηματολογίου, ζητήματα διαχείρισης αποβλήτων.

ΚΥΑ ΥΠΕΝ/ΔΔΑ/90439/1846/2021 (ΦΕΚ 4514/Β/30-9-2021)

«Μέτρα και όροι για την υγειονομική ταφή των αποβλήτων» σε εναρμόνιση με τις διατάξεις της οδηγίας 99/31/ΕΚ του Συμβουλίου της 26ης Απριλίου 1999 «περί υγειονομικής ταφής των αποβλήτων», όπως τροποποιήθηκε με την οδηγία (ΕΕ) 2018/850.

ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΥΓΕΙΟΝΟΜΙΚΗ ΤΑΦΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ:

Μέτρα και όροι για την υγειονομική ταφή αποβλήτων:

ΝΟΜΟΣ 1650/1986 (ΦΕΚ 160 Α΄/18-10-86)

«Για την προστασία του περιβάλλοντος»

ΚΥΑ 69269/5387/90 (ΦΕΚ 678Β΄/25-10-1990)

«Κατάταξη έργων και δραστηριοτήτων σε κατηγορίες, περιεχόμενο Μελέτης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΜΠΕ), καθορισμός περιεχομένου ειδικών περιβαλλοντικών μελετών (ΕΠΜ) και λοιπές συναφείς διατάξεις, σύμφωνα με το ν.1650/1986». Με την Υ.Α. Η.Π.15393/2332/2002 - ΦΕΚ 1022/Β/5.8.2002) καταργήθηκαν τα άρθρα 4 και 5 της παρούσης. Αναφέρεται στις Μελέτες Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων σε ΧΥΤΑ.

Σε χώρους υγειονομικής ταφής δεν γίνονται δεκτά από τους υπόχρεους φορείς λειτουργίας των ΧΥΤΑ τα ακόλουθα απόβλητα: α) τα υγρά απόβλητα, β) τα απόβλητα τα οποία σε συνθήκες υγειονομικής ταφής, είναι εκρηκτικά, διαβρωτικά, οξειδωτικά, πολύ εύφλεκτα ή εύφλεκτα, γ) απόβλητα νοσοκομείων και συναφή, προερχόμενα από ιατρικές ή κτηνιατρικές εγκαταστάσεις, δ) ολόκληρα μεταχειρισμένα ελαστικά αυτοκινήτων, εκτός από υλικά που προορίζονται για χρήση σε κατασκευαστικά έργα εντός του ΧΥΤΑ και τεμαχισμένα μεταχειρισμένα ελαστικά αυτοκινήτων, ε) οποιοσδήποτε άλλος τύπος αποβλήτων που δεν πληροί τα κριτήρια αποδοχής που καθορίζονται σύμφωνα με το Παράρτημα ΙΙ του άρθρου 20, όπως απόβλητα με έντονες οσμές, μη εξακριβωμένα ή νέα χημικά απόβλητα και απόβλητα τα οποία κατά την υγειονομική ταφή τους λόγω της περιεκτικότητάς τους σε επικίνδυνες ουσίες δύσκολα βιοαποδομήσιμες

ή με μεγάλη βιοσυσσώρευση, δημιουργούν επιβλαβείς επιπτώσεις στην υγεία του ανθρώπου (Εφημερίς της Κυβερνήσεως, Τεύχος Δεύτερο, Αρ. Φύλλου 1527,16 Δεκεμβρίου 2002).

#### ΟΔΗΓΙΑ 199/31/ΕΚ ΤΗΣ Ε.Ε.

Τέλος, η Οδηγία 199/31/ΕΚ της Ε.Ε. δεσμεύει τους Χ.Υ.Τ.Α. να διαθέτουν μόνο επεξεργασμένα αποβλήτα. Τα επικίνδυνα απόβλητα και τα αδρανή θα διατίθενται σε ειδικούς χώρους. Κάθε χώρος υγειονομικής ταφής αποβλήτων κατατάσσεται σύμφωνα με τη (Φάττα, 2005) σε:

- Χ.Υ.Τ. μη επικίνδυνων αποβλήτων,
- Χ.Υ.Τ. επικίνδυνων αποβλήτων
- Χ.Υ.Τ. αδρανών
- 

Αναφορικά με τη διαδικασία έγκρισης και έκδοσης άδειας λειτουργίας ενός Χ.Υ.Τ.Α., ορίζεται από την ανάλογη νομοθεσία και ακολουθείται από τα εξής στάδια:

- Καταγραφή των υποψήφιων χώρων
- Συγκρότηση από τον Νομάρχη γνωμοδοτικής επιτροπής
- Σύνταξη μελέτης προέγκρισης χωροθέτησης
- Εκπόνηση Μελέτης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (Μ.Π.Ε.)
- Απόφαση έγκρισης μελέτης περιβαλλοντικών όρων
- Εκπόνηση τεχνικής μελέτης κατασκευής
- Κατασκευή του Χ.Υ.Τ.Α. και άδεια λειτουργίας.

#### ΚΥΑ 49541/1424/86 (ΦΕΚ 358Β'/17-5-1996)

«Στερεά απόβλητα σε συμμόρφωση με την οδηγία 75/422/ΕΟΚ του Συμβουλίου της 15ης Ιουλίου 1975». Καθορίζει τις ορθές διαδικασίες για την έγκριση της λειτουργίας ενός χώρου διάθεσης απορριμμάτων.

## 2.2 ΦΥΣΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

### 2.2.1 ΦΥΣΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

Με τον όρο φυσικά συστήματα επεξεργασίας αποβλήτων, εννοούνται οι εγκαταστάσεις αφαίρεσης ρύπων και ρυπογόνων ουσιών μέσω διεργασιών του εδάφους, του φυτού και του νερού (Reed et al., 1995). Τα φυσικά συστήματα εκμεταλλεύονται τις φυσικοχημικές και βιολογικές διεργασίες ή συνδυασμό τους, που συμβαίνουν στο περιβάλλον έδαφος-απόβλητο-φυτό (Kadlec and Knight, 1996). Όπως είναι γνωστό, διάφορες φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες συμβαίνουν στο φυσικό περιβάλλον με την αλληλοεπίδραση του νερού, εδάφους, ατμόσφαιρας και μικροοργανισμών.

Τα φυσικά συστήματα επεξεργασίας σχεδιάζονται με σκοπό να εκμεταλλεύονται τις φυσικές διεργασίες για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων, οι οποίες είναι ίδιες με αυτές που συμβαίνουν στα μηχανικά ή συμβατικά συστήματα επεξεργασίας (Αγγελάκης, 1994). Στα φυσικά συστήματα οι διεργασίες επεξεργασίας συμβαίνουν με "φυσικές" ταχύτητες και τείνουν να εντοπίζονται περισσότερες από μια συγχρόνως και σε ένα "οικο-αντιδραστήρα". Σε αντίθεση με τα συμβατικά συστήματα, που εξελίσσονται διαδοχικά, σε διαφορετικούς αντιδραστήρες εν σειρά ή δεξαμενές και με υψηλότερες ταχύτητες (Αγγελάκης και Τσομπάνογλου, 1995; Metcalf and Eddy, 1991).

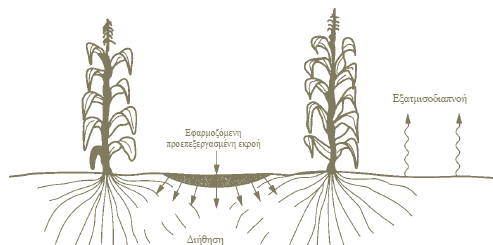
Σήμερα, τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται επιτυχώς για την επεξεργασία διαφόρων τύπων υγρών αποβλήτων (αστικών, κτηνοτροφικών, γεωργικών και βιομηχανικών) σε πολλές περιοχές του κόσμου υπό διαφορετικές κλιματικές συνθήκες. Οι κατηγορίες, κατά Metcalf and Eddy, Inc. (1991) στις οποίες κατατάσσονται τα φυσικά συστήματα είναι τα εδαφικά συστήματα, οι δεξαμενές σταθεροποίησης (τεχνητές λίμνες), τα συστήματα υδροχαρών φυτών και τα συστήματα τεχνητών υγροβιότοπων. Αναλυτικότερα:

#### ΕΔΑΦΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Αφού τα προεπεξεργασμένα υγρά απόβλητα έρθουν σε επαφή με την επιφάνεια του εδάφους, ακολουθεί μια φυσικοχημική-βιολογική διεργασία, κατά την οποία τα απόβλητα θα υποστούν περαιτέρω επεξεργασία. Πραγματοποιείται μέσω τριών διαφορετικών συστημάτων. Σύμφωνα με τον (Παρανυχιανάκης, 2021) :

- **ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΒΡΑΔΕΙΑΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ**

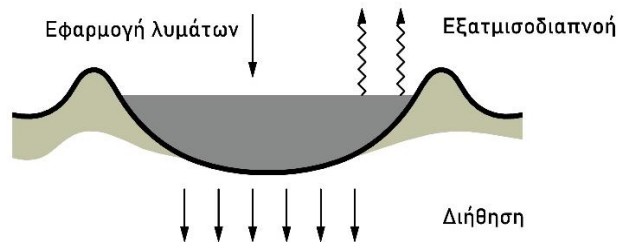
Τα συστήματα βραδείας εφαρμογής περιλαμβάνουν την επεξεργασία του απόβλητου και την επαναχρησιμοποίηση των εκροών τους. Έτσι, σε αγροτικές περιοχές τα συστήματα αυτά μπορούν να συμβάλλουν στη συστηματική επαναχρησιμοποίηση εκροών υγρών αποβλήτων για άρδευση, με αυτό να συνεπάγεται εξοικονόμηση υδατικών πόρων.



Εικόνα 2.6. Παραστατική παρουσίαση συστήματος βραδείας εφαρμογής. (Παρανυχιανάκης, 2021)

- **ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΑΧΕΙΑΣ ΔΙΗΘΗΣΗΣ**

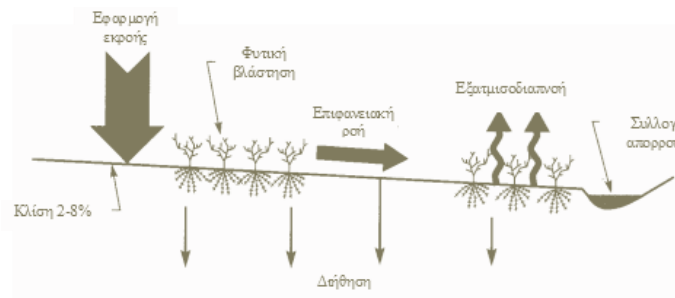
Τα συστήματα ταχείας διήθησης διαθέτουν το προεπεξεργασμένο υγρό απόβλητο σε επιφανειακές λεκάνες. Η επεξεργασία του αποβλήτου διενεργείται καθώς αυτό διηθείται στο έδαφος και κατεισδύει σε βαθύτερα γεωλογικά στρώματα. Οι κύριοι μηχανισμοί που συνεισφέρουν στην επεξεργασία του είναι η φίλτρωση, η προσρόφηση, η ιονική ανταλλαγή και η μικροβιακή αποδόμηση. Η λειτουργία τέτοιων συστημάτων επιτυγχάνεται με εναλλασσόμενες περιόδους εφαρμογής και ξήρανσης.



**Εικόνα 2.7.** Τροποποιημένη Παραστατική Απεικόνιση Συστήματος Ταχείας Διήθησης, (<https://sites.google.com/site/civilsorras/physika-systemata/edaphika-systemata>)

- **ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΡΟΗΣ**

Τα συστήματα επιφανειακής ροής εφαρμόζουν το προεπεξεργασμένο υγρό απόβλητο κατά μήκος του υψηλότερου τμήματος της κεκλιμένης επιφάνειας, ούτως ώστε να επιτρέπεται ομοιόμορφη κατανομή. Εφαρμόζονται κυρίως σε θέσεις με σχετικά αδιαπερατά εδάφη. Σύμφωνα με τους (Smith and Schroeder, 1985) έχουν εφαρμογή και σε εδάφη με σχετικά υψηλές τιμές περατότητας. Η εποχή του έτους, οι τοπικές κλιματικές συνθήκες, αλλά και το είδος της φυτικής βλάστησης καθορίζουν τις συνολικές απώλειες του υγρού αποβλήτου, ενώ ακόμα η λειτουργία τέτοιων συστημάτων επιτυγχάνεται με εναλλασσόμενες περιόδους εφαρμογής και ξήρανσης, αναλόγως του σκοπού επεξεργασίας (Αγγελάκης και Τσομπάνογλου, 1995).

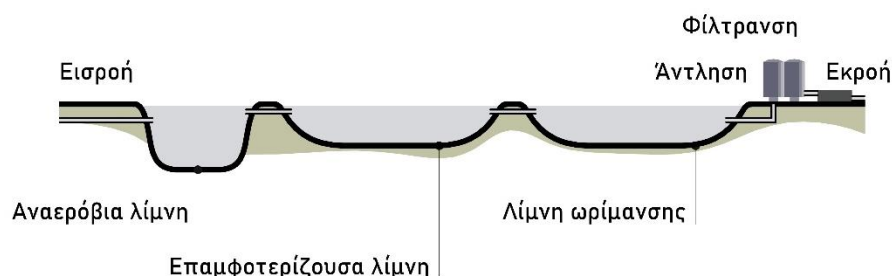


**Εικόνα 2.8.** Παραστατική παρουσίαση συστήματος OF (Παρανυχιανάκης, 2021)

## ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗΣ

Οι τεχνητές λίμνες ή αλλιώς δεξαμενές σταθεροποίησης θεωρούνται τα δεύτερα πιο διαδεδομένα φυσικά συστήματα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, μετά τα συστήματα που βασίζονται στο έδαφος. Τα πλεονεκτήματα τέτοιων συστημάτων επεξεργασίας ποικίλουν. Πρωταρχικά πλεονεκτήματα αποτελούν η απλότητα κατασκευής, λειτουργίας και συντήρησης, καθώς και οι μικρότερες απαιτήσεις εξειδικευμένου προσωπικού. Επιπλέον, έχουν ελάχιστο κόστος ενέργειας και μικρή παραγωγή ιλύος ενώ ταυτόχρονα χαρακτηρίζονται από υψηλές αποδόσεις απομάκρυνσης παθογόνων μικροοργανισμών.

Ανάλογα το βάθος τους αλλά και τις βιολογικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε αυτές, ταξινομούνται στις εξής κατηγορίες: αναερόβιες, επαμφοτερίζουσες, λίμνες ωρίμανσης. Ενώ, ακόμη είναι δυνατόν να συνδυαστούν μεταξύ τους, για βέλτιστο αποτέλεσμα. Όπως για παράδειγμα, σε μεγάλες παροχές μπορούν να εγκατασταθούν παράλληλα μια αερόβια, μια επαμφοτερίζουσα και μια λίμνη ωρίμανσης.



**Εικόνα 2.9.** Τροποποιημένη Σχηματική απεικόνιση συνδυασμού συστήματος λιμνών σταθεροποίησης (Παρανυχιανάκης, 2021)

- **ΑΝΑΕΡΟΒΙΕΣ ΤΕΧΝΗΤΕΣ ΛΙΜΝΕΣ**

Κύριες χρήσεις των αναερόβιων τεχνητών λιμνών συναντώνται σε ισχυρά βιομηχανικά και αστικά απόβλητα. Χαρακτηρίζονται από το μεγάλο βάθος τους (έως 5m) και τη μικρή τους επιφάνεια, ενώ ο χρόνος κράτησης κυμαίνεται από 24 έως 50h. Η επιφάνεια τους καλύπτεται είτε με φυσικό τρόπο με λίπη και έλαια, που περιέχονται στο απόβλητο, είτε τεχνητά με πλαστικά ή άλλα υλικά για να διατηρηθεί υψηλή θερμοκρασία. Σε αυτό το είδος λιμνών κρίνεται απαραίτητη επιπλέον επεξεργασία, πριν την τελική διάθεση ενώ βασικό μειονέκτημα αποτελούν οι δυσάρεστες οσμές που προκαλούνται με την έκλυση υδρόθειου, αμμωνίας, μεθανίου κατά την αναερόβια ζύμωση (Παρανυχιανάκης, 2021).

- **ΕΠΑΜΦΟΤΕΡΙΖΟΥΣΕΣ ΛΙΜΝΕΣ**

Κατηγοριοποιούνται στις πρωτοβάθμιες, οι οποίες δέχονται ανεπεξέργαστα υγρά απόβλητα, και στις δευτεροβάθμιες, οι οποίες δέχονται προεπεξεργασμένα υγρά απόβλητα. Το σύνθηρες βάθος τους κυμαίνεται από 1 έως 2m και σχεδιάζονται με σκοπό την απομάκρυνση οργανικού φορτίου μέσω του O<sub>2</sub> που παράγεται κατά τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης (Παρανυχιανάκης, 2021).

- **ΛΙΜΝΕΣ ΩΡΙΜΑΝΣΗΣ**

Είναι οι λίμνες που συνήθως θα δεχτούν την εκροή των επαμφοτερίζουσών λιμνών. Το βάθος τους κυμαίνεται από 1 έως 1,5m και είναι κατάλληλα σχεδιασμένες για να απομακρύνουν παθογόνους μικροοργανισμούς μαζί με οργανικό φορτίο αλλά και θρεπτικά. Κύριοι παράγοντες που καθορίζουν την απομάκρυνση των παθογόνων είναι ο χρόνος, η θερμοκρασία, το υψηλό pH, η υπερϊώδης ηλιακή ακτινοβολία και η υψηλή συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου (Παρανυχιανάκης, 2021).

### ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΥΔΡΟΧΑΡΩΝ ΦΥΤΩΝ

Τα συστήματα αυτά διαφοροποιούνται από τις δεξαμενές σταθεροποίησης, καθώς υπάρχει προσθήκη υδροχαρών φυτών. Τα συστήματα αυτά χωρίζονται επιμέρους σε συστήματα με επιπλέοντα υδροχαρή φυτά και σε συστήματα με βυθισμένα υδροχαρή φυτά. Τα πιο κοινά υδροχαρή, τα οποία χρησιμοποιούνται, κατά κύριο λόγο, είναι τα νούφαρα, τα λήμνα κλπ. Με αυτό το σύστημα επιτυγχάνεται η επεξεργασία των ρύπων χάρη στο εκτεταμένο ριζικό σύστημα των φυτών (Ακράτος, 2006).

### ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΩΝ

Τα συστήματα αυτά αποτελούνται από λεκάνες μικρού βάθους, στις οποίες τοποθετείται μια εδαφική στρώση και καλλιεργούνται διάφορα είδη υδροχαρών φυτών, για παράδειγμα καλαμιές, βούρλα κλπ. Η επεξεργασία ρύπων γίνεται με παρόμοιο τρόπο με αυτή των συστημάτων υδροχαρών φυτών. (Αναλυτικότερα βλ. Κεφάλαιο 2.3.2)

## 2.3 ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΙ

### 2.3.1 ΦΥΣΙΚΟΙ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΙ

Οι υγροβιότοποι, είναι περιοχές στις οποίες περιλαμβάνεται μια ποικιλία γεωμορφολογικών σχηματισμών όπως λίμνες, λιμνοθάλασσες, παρυδάτια δάση και δέλτα ποταμών. Αποτελούνται από έλη, από μη αποκλειστικώς ομβροδίατα έλη με τυρφώδες υπόστρωμα, από τυρφώδεις γαίες ή από νερό. Οι περιοχές αυτές είναι μονίμως ή προσωρινώς κατακλυζόμενες από νερό, το οποίο είναι στάσιμο ή ρέον, γλυκό ή υφάλμυρο ή αλμυρό. Περιλαμβάνονται και οι περιοχές που καλύπτονται με θαλασσινό νερό, το βάθος του οποίου κατά την άμπωτη δεν υπερβαίνει τα 6m. Οι υγροβιότοποι διακρίνονται αφενός σε θαλάσσιους και παράκτιους και αφετέρου σε εσωτερικούς.



**Εικόνα 2.10.** Τοποθεσία Laguna de Rocha Ramsar στην Ουρουγουάη, μέρος ενός συγκροτήματος παράκτιων υγροβιότοπων στην ακτή του Ατλαντικού. (Ramsar, 2010)

Οι υγροβιότοποι χαρακτηρίζονται ως εξαιρετικά ευπαθή οικοσυστήματα. Η προστασία τους διέπεται από τη Διεθνή Συνθήκη Ραμσάρ, η οποία υπεγράφη το 1971. Στόχος της Συνθήκης είναι η διασφάλιση της ποικιλομορφίας του φυσικού περιβάλλοντος με τη διατήρηση διαφορετικών οικοσυστημάτων, η προστασία της βιοποικιλότητας, η διαφύλαξη της χλωρίδας και της πανίδας, καθώς και η αλληλεπίδραση των οικοσυστημάτων, η οποία είναι αναγκαία για την οικολογική ισορροπία και την αναγέννηση της φύσης (Σιούτη, 2018).





**Εικόνα 2.11.** © André Dib WWF-Brazil — Pantanal, ο μεγαλύτερος τροπικός υγροβιότοπος στον κόσμο.  
(<https://wwf.medium.com/the-worlds-cities-rely-on-the-world-s-wetlands-b93af412ab54>)

Η συνεχόμενη ή περιοδική παρουσία επιφανειακού ή κοντά στην επιφάνεια, νερού αποτελεί το κοινό χαρακτηριστικό όλων των υγροβιότοπων. Η υδρολογία των υγροβιότοπων χαρακτηρίζεται από μικρές παροχές και ρηχά νερά ή κορεσμένα υποστρώματα. Το γεγονός αυτό επιτρέπει τη δημιουργία καθιζήσεων, καθώς το νερό εισέρχεται μέσα στον υγροβιότοπο. Η πολύπλοκη μάζα οργανικής και ανόργανης ύλης και διάφορες αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα, δημιουργούν πληθώρα μικροοργανισμών. Τέλος, οι υγροβιότοποι παρέχουν πολλές και σημαντικές λειτουργίες στο οικοσύστημα και στον άνθρωπο (Bassi et al., 2014).



**Εικόνα 2.12.** Υγροβιότοποι | Ζώα και φυτά του ζωολογικού κήπου του Σαν Ντιέγκο.  
(<https://animals.sandiegozoo.org/habitats/wetlands>)



### 2.3.2 ΤΕΧΝΗΤΟΙ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΙ

Οι τεχνητοί υδροβιότοποι είναι μια τεχνολογία οικολογικής μηχανικής, η οποία έχει εφαρμοστεί ευρέως τις τελευταίες δεκαετίες καθώς προσφέρει πληθώρα οφελών και συμβάλλει στην επεξεργασία λυμάτων. Η τεχνολογία αυτή βασίζεται στη χρήση φυτών, τα οποία είναι ικανά να απομακρύνουν ρύπους ή να τους μετατρέψουν σε λιγότερο επιβλαβείς ενώσεις μέσω μιας σειράς φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών. Ουσιαστικά, βασική ιδέα κατασκευής ενός τεχνητού υδροβιότοπου, είναι η μίμηση των διάφορων διεργασιών των φυσικών υδροβιότοπων με πιο ευεργετικό για τον άνθρωπο τρόπο, χωρίς όμως να ενέχεται κάποιος κίνδυνος απειλής του φυσικού οικοσυστήματος, παράλληλα με τα οικονομικά οφέλη αυτής της τεχνολογίας (Stefanakis et al., 2014).

Εξαιτίας του ότι η λειτουργία τέτοιου είδους συστημάτων έγγυται σε χημικές και βιολογικές διεργασίες, η απόδοση απομάκρυνσης ρύπων ποικίλει ανάλογα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες καθώς και διάφορες άλλες παραμέτρους (Hammer, 1989). Για παράδειγμα, σε χαμηλές θερμοκρασίες ο υδροβιότοπος κρίνεται αναγκαίο να έχει σχετικά μεγάλους χρόνους παραμονής. Η αρχή λειτουργίας τους, για την περαιτέρω επεξεργασία και τον καθαρισμό των υγρών αποβλήτων, στηρίζεται στο εκτεταμένο ριζικό σύστημα των φυτών, το οποίο μεταφέρει το οξυγόνο που χρησιμοποιούν οι μικροοργανισμοί, οι οποίοι έχουν αναπτυχθεί στις ρίζες των φυτών με αποτέλεσμα να αποικοδομούνται οι διάφοροι ρύποι (Ακράτος, 2006).

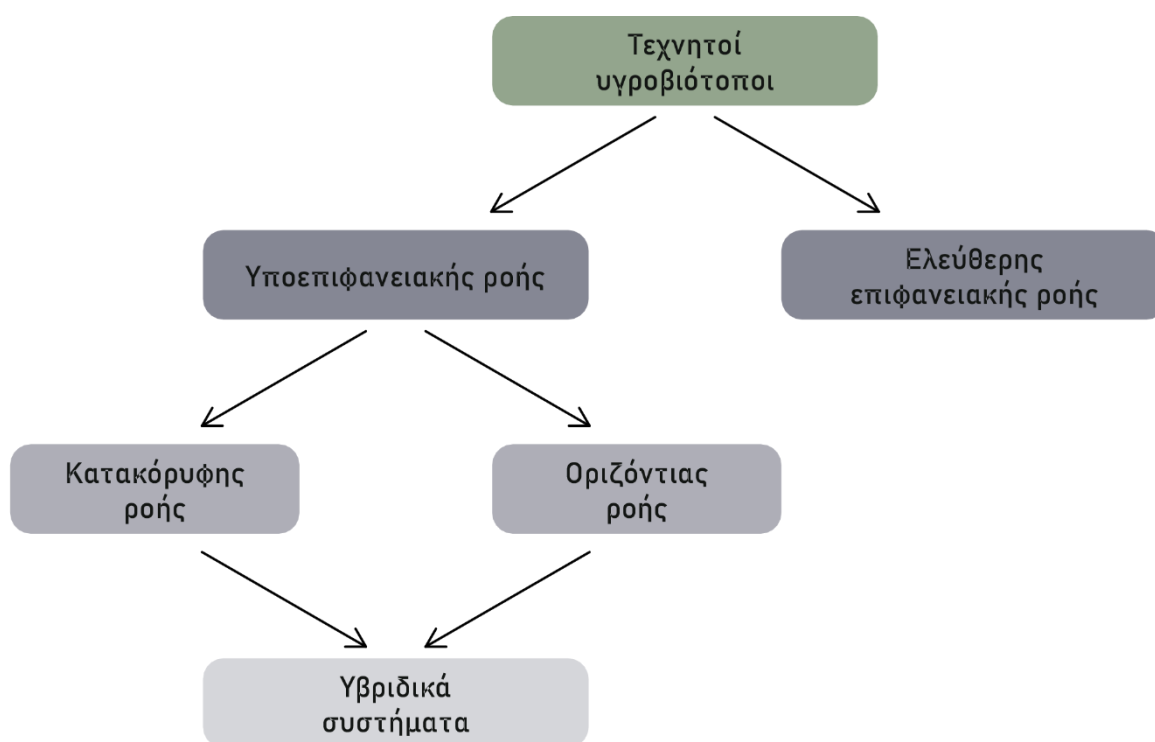
Όπως όλα τα φυσικά συστήματα επεξεργασίας, έτσι και οι τεχνητοί υδροβιότοποι εκμεταλλεύονται την ηλιακή ακτινοβολία, την κινητική ενέργεια του ανέμου, το νερό της βροχής, το επιφανειακό νερό, το έδαφος και την αποθήκευση ενδεχόμενης ενέργειας σε βιομάζα και στα εδάφη (Kadlec and Knight, 1996). Γενικά, οι τεχνητοί υδροβιότοποι θεωρούνται εναλλακτικές λύσεις επεξεργασίας δημοτικών, αγροτικών και βιομηχανικών υγρών αποβλήτων. Βασικό κριτήριο για την αξιοποίησή τους ως σύστημα επεξεργασίας, αποτελεί το γεγονός ότι ο έλεγχος τους καθίσταται πιο εύκολος, αφού εκμεταλλεύονται λιγότερα μηχανικά συστήματα (Kadlec and Knight, 1996). Αυτή η νέα αξιόπιστη και αποδοτική τεχνολογία παρέχει χαμηλό κόστος και μικρές απαιτήσεις συντήρησης, επομένως μπορεί να εφαρμοστεί ως τεχνολογία επεξεργασίας λυμάτων (Ayaz and Akca, 2001; Haberl et al., 1995; Hammer, 1989).



**Εικόνα 2.13.** Τεχνητοί Υδροβιότοποι ~ Unlocking Water Treatment Technology At Shell, Adrian Irimia & Georg Stockinger (<https://globalprojectengineering.ch/constructed-wetlands-unlocking-water-treatment-technology-at-shell/>)

### 2.3.3 ΕΙΔΗ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΩΝ

Η τεχνολογία και η ανάπτυξη των συστημάτων των τεχνητών υγροβιότοπων για την επεξεργασία ρυπασμένων υδάτων κατηγοριοποιείται σε διάφορα είδη. Ο επιμερισμός αυτός περιλαμβάνει: Τεχνητούς Υγροβιότοπους Επιφανειακής ή Ελεύθερης Ροής και Τεχνητούς Υγροβιότοπους Υποεπιφανειακής Ροής. Στην δεύτερη κατηγορία (υποεπιφανειακής ροής), εντάσσονται άλλες δυο υποκατηγορίες, της κατακόρυφης και της οριζόντιας ροής. Τέλος, υπάρχουν και τα υβριδικά συστήματα, όπου είναι συνδυασμός των παραπάνω κατηγοριών.



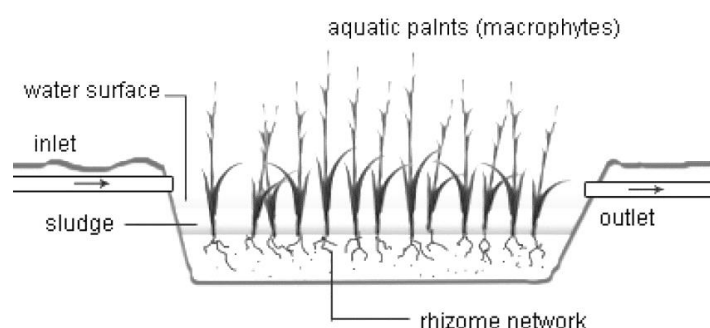
Εικόνα 2.14. Είδη Τεχνητών Υγροβιότοπων (Stefanakis et al., 2014)

#### ΤΕΧΝΗΤΟΙ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΙ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΡΟΗΣ

Οι τεχνητοί υγροβιότοποι επιφανειακής ροής, ή αλλιώς FWS CWs (Free Water Surface Constructed Wetlands), χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά για επεξεργασία αστικών λυμάτων (Kadlec and Wallace, 2009), αν και υπάρχουν αρκετές εφαρμογές για βιομηχανικές εκροές (Stefanakis, 2020). Οι τεχνητοί υγροβιότοποι επιφανειακής ροής, σύμφωνα με τους Stefanakis et al. (2014), αποτελούνται από ρηχές λεκάνες, με καλυμμένο πυθμένα (γεωύφασμα, άργιλο) ούτως ώστε να μην υπάρξει διαρροή λυμάτων στον υδροφόρο ορίζοντα. Περιέχουν ένα εδαφικό στρώμα πάχους 20-50cm, στο οποίο φυτεύονται μακρόφυτα. Η κίνηση του νερού χαρακτηρίζεται ως οριζόντια με μικρή ταχύτητα και λαμβάνει χώρα στο άνω μέρος του εδαφικού στρώματος (δημιουργώντας στήλη νερού πάχους 20 εως

80cm) και έρχεται σε επαφή με την ατμόσφαιρα και το ηλιακό φως. Η ροή του νερού διαπερνά τους κόκκους του εδάφους και έρχεται σε επαφή με τα διάφορα μέρη των φυτών, επιτρέποντας μια σειρά φυσικών, βιολογικών και χημικών διεργασιών, οι οποίες συμβάλλουν στην απομάκρυνση ρύπων.

Τα συστήματα τεχνητών υδροβιότοπων ελεύθερης ροής έχουν αποδειχθεί αποτελεσματικά στην αφαίρεση των αιωρούμενων στερεών (SS) και του βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου (BOD<sub>5</sub>). Επισημαίνεται επίσης ότι η απομάκρυνση αζώτου (N), παθογόνων και άλλων ρύπων (π.χ. βαρέα μέταλλα, HM) είναι υψηλή ενώ ο φώσφορος (P) και η αφαίρεση του είναι περιορισμένη. Τέλος, λόγω της ελεύθερης υδάτινης επιφάνειας, αναπαριστούν καλύτερα τους φυσικούς υδροβιότοπους. Παράλληλα, συμβάλλουν στην φιλοξενία διαφόρων ειδών πανίδας. Βασικό όμως μειονέκτημα είναι η μεγαλύτερη απαίτηση σε έκταση σε σχέση με τους άλλους τύπους τεχνητών υδροβιότοπων. Προβλήματα που μπορούν να εμφανιστούν σχετίζονται με την πιθανότητα εμφάνισης στάσιμου νερού και την αναπαραγωγή κουνουπιών, τα οποία όμως αντιμετωπίζονται με το σωστό σχεδιασμό και κατασκευή.



**Εικόνα 2.15.** Τεχνητός Υδροβιότοπος Επιφανειακής Ροής, Orod Odhiambo  
([https://www.researchgate.net/figure/Free-Water-Surface-Constructed-Wetland\\_fig4\\_286417697](https://www.researchgate.net/figure/Free-Water-Surface-Constructed-Wetland_fig4_286417697))

## ΤΕΧΝΗΤΟΙ ΥΔΡΟΒΙΟΤΟΠΟΙ ΥΠΟΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΡΟΗΣ

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η κατηγορία των τεχνητών υδροβιότοπων υποεπιφανειακής ροής, χωρίζεται σε δυο επιμέρους κατηγορίες, κατακόρυφης και οριζόντιας ροής.

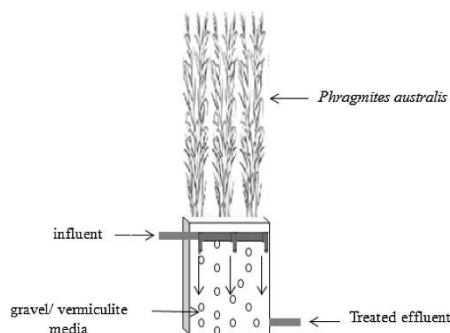
### • ΤΕΧΝΗΤΟΙ ΥΔΡΟΒΙΟΤΟΠΟΙ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΡΟΗΣ

Η τεχνολογία των τεχνητών υδροβιότοπων κατακόρυφης ροής, ή αλλιώς VFCWs (Vertical Flow Constructed Wetlands), βρίσκει ευρεία εφαρμογή στην Ευρώπη αλλά και στις Ηνωμένες Πολιτείες (Kadlec και Wallace, 2009). Οι υδροβιότοποι αυτής της κατηγορίας σύμφωνα με τους Stefanakis et al. (2014) αποτελούνται από κλίνες κυμαινόμενου βάθους μεταξύ 0,45 έως 1,20 m και κλίσης πυθμένα 1 έως 2%, η οποία ευνοεί την ροή και τη συλλογή του επεξεργασμένου λύματος. Ομοίως με τους άλλους τύπους τεχνητών υδροβιότοπων, ο πυθμένας και τα πρανή καλύπτονται με γεωεμβράνη ή με οπλισμένο σκυρόδεμα, ενώ το σύνθετο πληρωτικό υλικό είναι άμμος και/ή χαλίκια διαφορετικής διαμέτρου. Η πιο κοινή βλάστηση που επιλέγεται είναι τα καλάμια (*Phragmites Australis*).

Δεδομένου ότι η ροή στο σύστημα είναι κατακόρυφη, το λύμα καταφέρνει να φτάσει στον πυθμένα χάρη στη βαρύτητα. Το απόβλητο εισάγεται στο σύστημα από διάτρητους, καταναεμημένους σε όλη την επιφάνεια, αγωγούς. Κατά μήκος τους, φέρουν ειδικές οπές από τις οποίες παρέχεται το υγρό απόβλητο.

Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται ομοιόμορφη διανομή σε όλη την κλίνη (Kadlec and Knight 1996; Reed et al. 1995). Το απόβλητο κατακλύζει την επιφάνεια και αφού διέλθει μέσα από το πληρωτικό υλικό, συλλέγεται από ένα σύστημα σωλήνων με οπές, ο οποίοι είναι κατανομημένοι ομοιόμορφα στον πυθμένα της δεξαμενής και λειτουργούν ως στραγγιστικό δίκτυο για τη συλλογή και τελική διάθεση του επεξεργασμένου αποβλήτου (Ακράτος, 2006).

Τα πλεονεκτήματα αυτού του είδους τεχνητού υδροβιότοπου είναι η απαίτηση μικρότερης σχετικά έκτασης έναντι άλλων τεχνητών υδροβιότοπων, καθώς και η διατήρηση αερόβιων συνθηκών, λόγω της περιοδικής ανάπαυσης και επομένως αποκατάστασης αερόβιων συνθηκών εντός της κλίνης. Η περιοδική κατάκλιση οφείλεται στο μεγάλο πάχος υποστρώματος και στις συνθήκες ακόρεστης ροής (Καραμούζης, 2003).



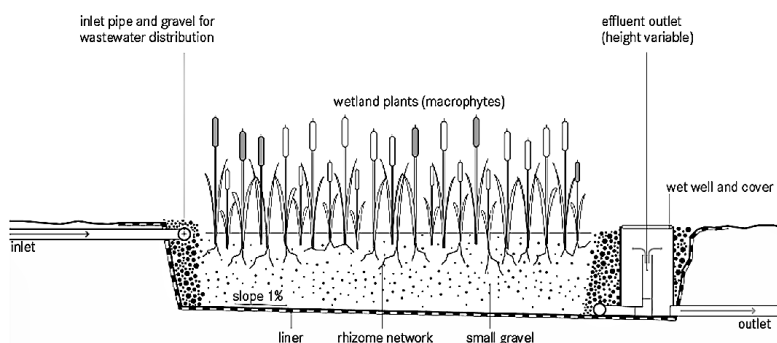
**Εικόνα 2.16.** Σχηματική Αναπαράσταση Τεχνητού Υδροβιότοπου Κατακόρυφης Ροής, (Abdelhakeem et al., 2016)

#### • ΤΕΧΝΗΤΟΙ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΙ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΡΟΗΣ

Οι τεχνητοί υδροβιότοποι οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής, ή αλλιώς HSF CWs (Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands) κατασκευάζονται από στεγανοποιημένες λεκάνες (αργιλική στρώση ή συνθετικό υλικό ή ολισμένο σκυρόδεμα) μέσου βάθους 40 εως 60cm. Τοποθετείται, επιπλέον, αδρανές πληρωτικό υλικό, διάμετρου κόκκων 2,5 εως 5cm, στο οποίο φυτεύεται η κατάλληλη υδροχαρής βλάστηση. Η κλίση του πυθμένα των λεκανών είναι 1 εως 2% και το απόβλητο ρέει με υποεπιφανειακή οριζόντια ροή. Συνήθης βλάστηση είναι τα καλάμια και τα βούρλα (Kadlec and Knight 1996; Reed et al. 1995). Επιπλέον, η στάθμη του νερού διατηρείται περίπου 5-15 cm κάτω από την κορυφή του υποστρώματος. Σημαντικό ρόλο επιτελεί η ομοιόμορφη κατανομή των υγρών αποβλήτων, για αυτό η εισροή τους γίνεται μέσω ενός διάτρητου σωλήνα που διαμοιράζει το λύμα κατά πλάτος της κλίνης (Stefanakis et al., 2014). Εξαιτίας των παραπάνω δεδομένων, εξασφαλίζονται συνθήκες βραδείας ροής. Με αυτόν τον τρόπο η ροή διέρχεται μέσα από το πληρωτικό υλικό της κλίνης πετυχαίνοντας αποτελεσματικότερο καθαρισμό του υγρού αποβλήτου καθώς έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια του πληρωτικού υλικού και το ριζικό σύστημα της βλάστησης (Ακράτος, 2006).

Ένα ακόμα χαρακτηριστικό που αξίζει να αναφερθεί είναι ότι λόγω της παρουσίας των ριζών του φυτού αλλά και του πορώδους μέσου, ευνοείται η ανάπτυξη του βιοφίλμ (συσσωρευμένη βιομάζα βακτηρίων και εξωκυτταρικού υλικού). Το βιοφίλμ συμβάλλει δραστικά στην αφαίρεση της οργανικής ύλης και των αιωρούμενων στερεών (Stefanakis et al., 2014).

Η βασική διαφορά των τεχνητών υδροβιότοπων οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής με τους τεχνητούς υδροβιότοπους ελεύθερης επιφάνειας είναι η μη ύπαρξη επιφανειακού νερού εκτεθειμένου στην ατμόσφαιρα. Το νερό ρέει οριζόντια και κάτω από την επιφάνεια του υποστρώματος, γεγονός που μειώνει τους κινδύνους του βιότοπου, της πανίδας και του ανθρώπου, ενώ, δεν είναι και τόσο ευνοϊκή η αναπαραγωγή κουνουπιών (Stefanakis et al., 2014). Οι υδροβιότοποι αυτής της κατηγορίας απαιτούν μικρή έκταση, πετυχαίνοντας παράλληλα υψηλές αποδόσεις απομάκρυνσης ρύπων. Ωστόσο, η κατασκευή τους έχει υψηλό σχετικά κόστος. Τέλος, ένα βασικό μειονέκτημα τους, είναι η πιθανή φραγή των πόρων του υλικού από μη καλό διαχωρισμό των λεπτόκοκκων στερεών από το υγρό (Ακράτος, 2006).



**Εικόνα 2.17.** Σχηματική Αναπαράσταση Τεχνητού Υδροβιότοπου Οριζόντιας Υποεπιφανειακής Ροής. Πηγή: TILLEY et al. (2014), <https://sswm.info/es/taxonomy/term/3933/horizontal-subsurface-flow-constructed-wetland>

- **ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ**

Τα υβριδικά συστήματα είναι συνδυασμοί διαφόρων τύπων τεχνητών υδροβιότοπων, κυρίως VFCW και HSF, με στόχο τη βελτιστοποίηση της συνολικής απόδοσης. Η ιδέα είναι να αξιοποιηθούν τα πλεονεκτήματα του ενός τύπου για να αντισταθμιστούν με τα μειονεκτήματα του άλλου (Stefanakis et al., 2014), καθώς και να αξιοποιηθούν οι διαφορετικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε κάθε διαφορετικό τύπο τεχνητού υδροβιότοπου.

### 2.3.4 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΩΝ

Τα τελευταία χρόνια έχει αποδειχθεί ότι η τεχνολογία των τεχνητών υγροβιότοπων είναι αξιόπιστη για την επεξεργασία ρυπασμένου ύδατος, ειδικά για περιοχές με μικρό πληθυσμό. Παρακάτω και σύμφωνα με τους (Ζουραράκη, 2002; Stefanakis et al., 2014) παρουσιάζονται ορισμένα από τα πολλαπλά πλεονεκτήματά τους:

- Παρέχουν αποτελεσματική επεξεργασία με παθητικό τρόπο, ελαχιστοποιώντας το μηχανικό εξοπλισμό, την ενέργεια και εξειδικευμένους εξοπλισμούς για τον χειριστή.
- Εξασφαλίζουν πολύτιμη προσθήκη στο «πράσινο», και περιέχουν τη συγχώνευση περιβάλλοντος με επαρκή ψυχαγωγία του κοινού.
- Δεν παράγουν υπολείμματα βιοστερεών ή ιλύος, επομένως δεν απαιτείται επιπρόσθετη επεξεργασία ή απόθεση.
- Τα έξοδα συντήρησης και λειτουργίας είναι χαμηλά.
- Η συντήρηση και η λειτουργία τους απαιτεί μόνο περιοδική και όχι συνεχή εργασία (δεν απαιτείται παρουσία μόνιμου προσωπικού)
- Δεν απαιτείται εξοπλισμός υψηλής τεχνολογίας και χημικά κατά την λειτουργία τους.
- Κατασκευάζονται με χαμηλό κόστος συγκριτικά με άλλες μεθόδους.
- Απομακρύνουν υψηλό ποσοστό BOD<sub>5</sub> και στερεών και ήπιο ποσοστό παθογόνων μικροοργανισμών.
- Ενισχύουν το μοντέλο ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης του νερού.
- Αποφεύγονται, με τον κατάλληλο σχεδιασμό και τη σωστή συντήρηση, οι οσμές.
- Λειτουργούν καθ' όλη τη διάρκεια του έτους με το σωστό σχεδιασμό.
- Αξιοποιούνται φυσικές διεργασίες και ενέργεια.

### 2.3.5 ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΡΥΠΩΝ ΣΤΟΥΣ ΤΕΧΝΗΤΟΥΣ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΥΣ

Οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε ένα σύστημα τεχνητών υδροβιότοπων είναι όμοιες με αυτές που πραγματοποιούνται στα φυσικά συστήματα. Εντούτοις με την τεχνολογία αυτή επιτυγχάνονται υψηλά ποσοστά αφαίρεσης ρύπων. Κατά κύριο λόγο απομακρύνονται οργανικοί ρύποι, άζωτο, φώσφορος, στερεά σωματίδια, μέταλλα, αμμωνία, καθώς και παθογόνοι οργανισμοί.

Παράλληλα η αφαίρεση ρύπων εξαρτάται και από τις επικρατούσες περιβαλλοντικές συνθήκες και το τοπικό κλίμα. Αναλυτικότερα, η θερμοκρασία που επικρατεί στην περιοχή, ο υδραυλικός χρόνος παραμονής (HRT) αλλά και το είδος βλάστησης είναι από τις σημαντικότερες παραμέτρους, οι οποίες είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με την απομάκρυνση ρύπων από τους τεχνητούς υδροβιότοπους. Πιο συγκεκριμένα, η θερμοκρασία του περιβάλλοντος επηρεάζει τις διαδικασίες αφαίρεσης ρύπων, όπως αζώτου, οργανικής ύλης κα. Σύμφωνα με τους Bakhshoodeh et al. (2020) μελέτες έχουν διαπιστώσει ότι η βέλτιστη θερμοκρασία για την αποδοτικότερη απομάκρυνση είναι αυτή των 30°C σε αντίθεση με το φώσφορο, ο οποίος δεν επηρεάζεται τόσο από τη θερμοκρασία αλλά εξαρτάται κυρίως από την προσρόφηση και κατακρήμνιση.

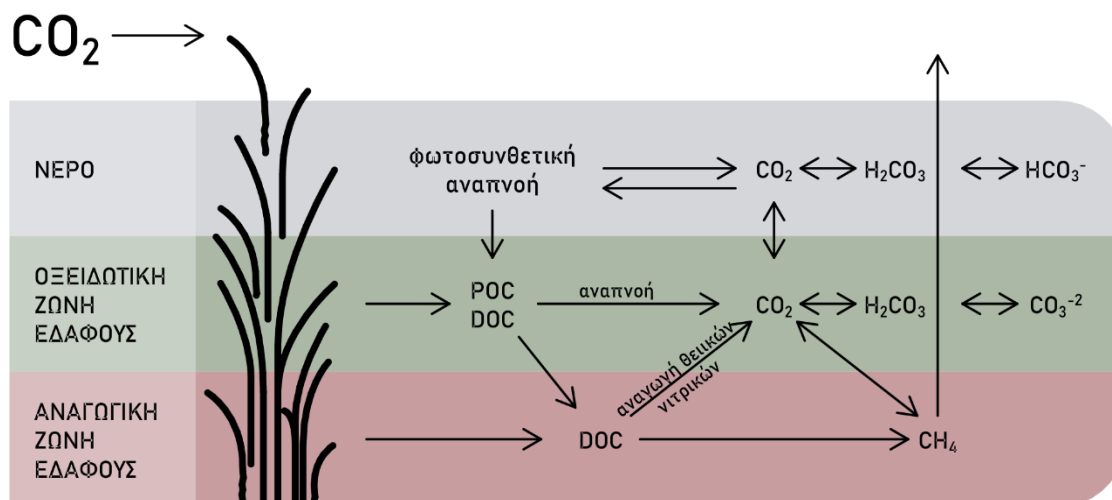
Επιπλέον, ο υδραυλικός χρόνος παραμονής (HRT) είναι μια παράμετρος καθοριστικής σημασίας για την αφαίρεση ρύπων σε τεχνητούς υδροβιότοπους. Ένας υψηλός χρόνος παραμονής κρίνεται ότι επιτυγχάνει υψηλότερη απομάκρυνση ρύπων, αντίθετα με ένα μικρότερο χρόνο παραμονής. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι όσο πιο αργά το λύμα οδηγείται στην έξοδο της εγκατάστασης, τόσο περισσότερο χρόνο επαφής θα έχει με το εσωτερικό περιβάλλον της μονάδας. Όμως, ένας μεγάλος υδραυλικός χρόνος παραμονής συνεπάγεται με μεγαλύτερες απαιτήσεις σε έκταση, άρα και σε μεγαλύτερο κόστος κατασκευής.

Τέλος, είναι εξίσου σημαντική, πλην όμως έμμεση, η βλάστηση στους τεχνητούς υδροβιότοπους. Σύμφωνα με τους (Kadlec & Wallace, 2008) τα μακρόφυτα παρέχουν μεγάλο μέρος της ορατής δομής των συστημάτων των τεχνητών υδροβιότοπων. Πολυάριθμες μελέτες έχουν καταλήξει στο συμπέρασμα ότι σχεδόν πάντα η απόδοση είναι υψηλότερη όταν στο σύστημα υπάρχουν φυτά, σε σχέση με ένα σύστημα χωρίς φυτά. Η απομάκρυνση των ρύπων μέσω της βλάστησης επιτυγχάνεται με την πρόσληψη θρεπτικών ουσιών και βαρέων μετάλλων που εντοπίζονται στο υγρό απόβλητο. Για να είναι επιτυχής η απομάκρυνση των θρεπτικών συστατικών η υπέργεια βιομάζα χρειάζεται να 'κουρεύεται' ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Επίσης, σημαντικό ρόλο συντελλεί και η υπόγεια βιομάζα (ρίζες και ριζικό σύστημα), αφού πάνω τους προσκολλούνται βακτήρια που εμπλέκονται σε διεργασίες αφαίρεσης ρύπων.

#### ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΒΙΟΧΗΜΙΚΑ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟΥ ΟΞΥΓΟΝΟΥ (BOD<sub>5</sub>)

Η αφαίρεση των οργανικών ουσιών επιτυγχάνεται με υψηλές ταχύτητες σε όλα τα συστήματα υδροβιότοπων και είναι αποτέλεσμα των αδιατάρακτων συνθηκών που επικρατούν στα συστήματα επιφανειακής ροής, στη διήθηση και στα συστήματα υποεπιφανειακής ροής, στην απόθεση. Ανάλογα με την ποσότητα οξυγόνου, το BOD<sub>5</sub>, το οποίο έχει καθιζάνει υπόκειται σε αερόβια ή αναερόβια αποσύνθεση. Το υπολειπόμενο BOD<sub>5</sub> συνεχίζει να αφαιρείται καθώς το λύμα έρχεται σε επαφή με τα μικρόβια που έχουν αναπτυχθεί στο πληρωτικό υλικό και στο ριζικό σύστημα των φυτών (Reed et al., 1995; Vymazal et al., 1998). Η αναερόβια αποσύνθεση επικρατεί σε όλο το σύστημα, ενώ η αερόβια επικρατεί κοντά στην επιφάνεια των συστημάτων επιφανειακής ροής, καθώς και σε αερόβιες περιοχές των συστημάτων υποεπιφανειακής ροής.

Εξαιτίας της αποσύνθεσης της φυτικής μάζας, είναι πιθανό η αφαίρεση οργανικών ρύπων να επηρεαστεί με αποτέλεσμα να μην μπορεί να επιτευχθεί μηδενική συγκέντρωση εκροής για BOD<sub>5</sub>. Ένας ακόμα σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τις συγκεντρώσεις BOD<sub>5</sub> είναι η θερμοκρασία και οι εποχιακές μεταβολές. Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι παρατηρείται ταχύτερη αφαίρεση BOD<sub>5</sub> στους υδροβιότοπους υποεπιφανειακής ροής συγκριτικά με τους υδροβιότοπους επιφανειακής ροής (Kadlec and Knight, 1996).



Εικόνα 2.18. Κύκλος άνθρακα σε συστήματα υδροβιοτόπων (Τροποποιημένη, Ακράτος, 2006)

## ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΑΖΩΤΟΥ

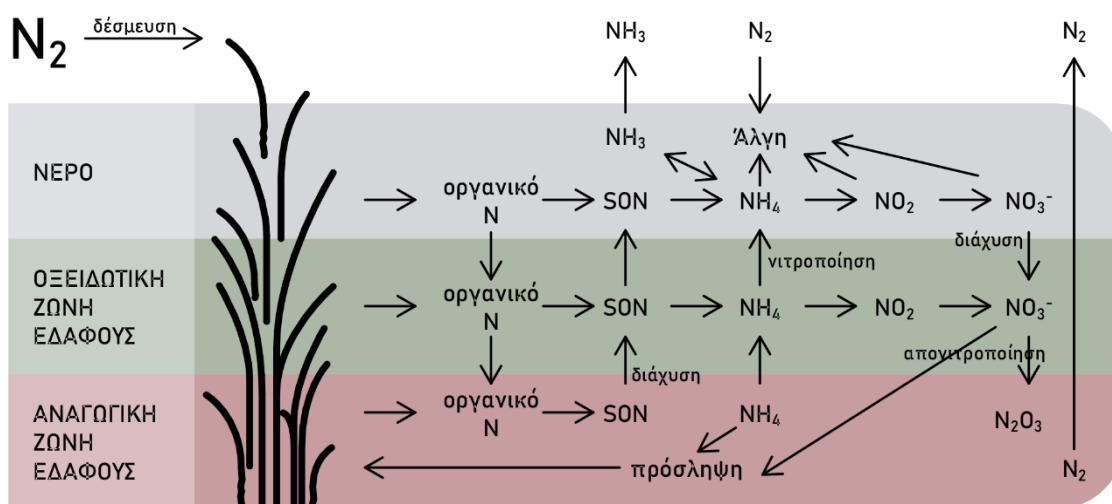
Η αφαίρεση αζώτου επιτυγχάνεται σε κάθε είδος τεχνητού υδροβιότοπου. Ο βαθμός αφαίρεσης του είναι μια πολύπλοκη συνάρτηση, καθώς το άζωτο εισέρχεται στο σύστημα με ποικίλες μορφές (δηλαδή οργανικό άζωτο, ενώσεις αμμωνίου NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, διαλυμένη αέρια αμμωνία NH<sub>3</sub>, νιτρικό NO<sub>3</sub> και νιτρώδες άζωτο NO<sub>2</sub>). Αν και τα φυτά προσλαμβάνουν άζωτο, μόνο ένα μικρό μέρος του ολικού αζώτου μπορεί να απομακρυνθεί από το συγκεκριμένο μηχανισμό. Επιπλέον, το οργανικό άζωτο βρίσκεται κυρίως στα στερεά που περιέχονται στα υγρά απόβλητα και αφαιρείται αμέσως με την καθίζηση των στερεών, αποσυντίθεται ή δημιουργούνται άλατα και τελικά παράγεται αμμωνία. Οργανικό άζωτο επίσης εισέρχεται στο σύστημα με φυσικό τρόπο από τα υπολείμματα βλάστησης (Reed et al., 1995).

Το άζωτο απομακρύνεται από το σύστημα με πλήθος διεργασιών, όπως με τη διαδικασία της νιτροποίησης και της απονιτροποίησης, τη δέσμευση από τα φυτά, την προσρόφηση, όπου η ιονισμένη αμμωνία αντιδρά με το πληρωτικό υλικό, καθώς και με την εξάτμιση της αμμωνίας, αφού μετατραπεί σε ελεύθερη αμμωνία (Kadlec and Knight 1996; Vymazal, 2002; Yang et al. 2001).

Η νιτροποίηση εξαρτάται από την θερμοκρασία, ιδανικά σε θερμοκρασίες άνω των 15°C, αφού τα μικρόβια που σχετίζονται με αυτή τη διεργασία αποδίδουν περισσότερο σε αυτές τις θερμοκρασίες. Ταυτόχρονα σε θερμοκρασίες άνω των 15°C αναπτύσσονται τα φυτά που παρέχουν το διαλυμένο οξυγόνο για να ξεκινήσει η διαδικασία της νιτροποίησης (Kusch et al., 2003; Reed et al., 1995; Vymazal 1999).



Τέλος, για να αφαιρεθούν τα νιτρικά ως μορφή αζώτου, με την απονιτροποίηση, απαιτείται μια πηγή άνθρακα, κατάλληλο εύρος θερμοκρασιών και αναερόβιες συνθήκες. Η ύπαρξη αναερόβιων συνθηκών είναι αυτονόητη στα περισσότερα συστήματα τεχνητών υδροβιότοπων. Όμως, η θερμοκρασία του ύδατος εξαρτάται από το εκάστοτε τοπικό κλίμα, ενώ κύρια πηγή άνθρακα αποτελούν τα φυτικά κατάλοιπα, καθώς και άλλα φυσικά οργανικά στοιχεία που υπάρχουν στο σύστημα. Η πηγή άνθρακα ενδέχεται να αποτελέσει περιοριστικό παράγοντα της απονιτροποίησης (Ακράτος, 2006).

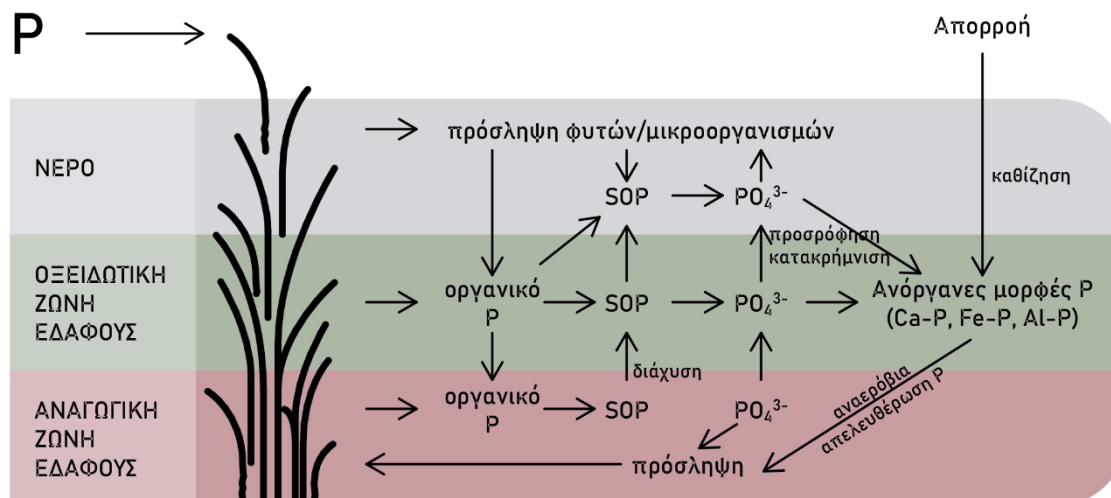


**Εικόνα 2.19.** Κύκλος αζώτου σε συστήματα υδροβιότοπων, (Τροποποιημένη, Ακράτος, 2006)

## ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΦΩΣΦΟΡΟΥ

Η απομάκρυνση φωσφόρου γίνεται συνήθως με απορρόφηση από τα φυτά, προσρόφηση στο υπόστρωμα και κατακρήμνιση. Ένα σύστημα υδροβιότοπου μπορεί να επιτύχει αποτελεσματική απομάκρυνση φωσφόρου κατά τα πρώτα χρόνια λειτουργίας του λόγω της προσροφητικής ικανότητας του εδάφους. Όταν όμως στο σύστημα επέλθει κορεσμός, η αφαίρεση φωσφόρου είναι πιθανό να μειωθεί. Επιπλέον, τα φυτά απορροφούν φώσφορο, ενώ αναπτύσσονται πριν φθάσουν σε ωριμότητα, αλλά μέρος του φωσφόρου που απορροφούν επανέρχεται πίσω στο σύστημα ως νεκρή φυτική ύλη. Μετρήσεις έδειξαν ότι μακροπρόθεσμα η αφαίρεση κυμαίνεται μεταξύ 30 και 50% (Reed et al., 1995).

Η αφαίρεση του φωσφόρου στα φυσικά συστήματα είναι αποτέλεσμα της προσρόφησης, της κατακρήμνισης και της δέσμευσης από τα μικρόβια και τα φυτά, τα οποία δεσμεύουν και αφαιρούν μόνο ορθοφωσφορικών ιόντα. Οι υπόλοιποι μηχανισμοί είναι υπεύθυνοι για την αφαίρεση όλων των μορφών φωσφόρου (Kadlec and Knight, 1996). Η αφαίρεση φωσφόρου εξαρτάται από το είδος του πληρωτικού υλικού. Οι τεχνητοί υδροβιότοποι δεν είναι το ίδιο αποτελεσματικοί στην αφαίρεση φωσφόρου εξαιτίας των περιορισμένων δυνατοτήτων επαφής του λύματος και του υποστρώματος (Vymazal et al., 1998).



**Εικόνα 2.20.** Κύκλος φωσφόρου σε συστήματα υδροβιοτόπων, (Τροποποιημένη, Ακράτος 2006)

#### ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ

Τα ανόργανα και τα αιωρούμενα στερεά απομακρύνονται με φυσικές διεργασίες. Κύριοι μηχανισμοί αφαίρεσης ολικών αιωρούμενων στερεών (TSS) είναι η καθίζηση και διήθηση. Τα στερεά παγιδεύονται μέσα στους πόρους, καθώς το λύμα διέρχεται μέσα στους πόρους του υποστρώματος (Stefanakis et al., 2014).

Το μεγαλύτερο πρόβλημα απομάκρυνσης αιωρούμενων σωματιδίων, είναι η έμφραξη του υποστρώματος της κλίνης. Στην περίπτωση αυτή παρατηρείται υπερχειλίση του φίλτρου, επιφανειακή ροή και χαμηλότερη απόδοση. Ένα ακόμα πρόβλημα χαμηλής απόδοσης μπορεί να προκύψει με το φαινόμενο του υδραυλικού βραχυκυκλώματος (Reed et al., 1995).

#### ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΜΕΤΑΛΛΩΝ

Οι μηχανισμοί αφαίρεσης των μετάλλων σε υδροβιότοπους είναι παρόμοιοι αυτών της αφαίρεσης φωσφόρου με κύρια την προσρόφηση στα ιζήματα του πυθμένα και σε μικρότερο βαθμό με την πρόσληψη από τις ρίζες των φυτών. Η τελική συγκέντρωση που απομακρύνεται από τον υδροβιότοπο εξαρτάται από την αλληλεπίδραση των παραπάνω μηχανισμών, τη σύνθεση του υποστρώματος, το είδος, τα χαρακτηριστικά του λύματος, το είδος της φυτικής βλάστησης αλλά και το pH των ιζημάτων. (Αγιουτάντη, 2018).

Άλλες διεργασίες απομάκρυνσης μετάλλων πέραν της προσρόφησης, είναι η ιοντοανταλλαγή, η κατακρήμνιση και η φυτοαπορρόφηση. Σε αντίθεση με το φωσφόρο, τα ποσοστά αφαίρεσης μετάλλων από τεχνητούς υδροβιότοπους όλων των τύπων είναι πολύ υψηλά και πλησιάζουν το 100%. Παρόλα αυτά, σύνηθες πρόβλημα είναι η συσσώρευση μετάλλων στο σύστημα του υδροβιότοπου. Το γεγονός αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψη σε περιπτώσεις κατασκευής υδροβιοτόπων για επεξεργασία βιομηχανικών λυμάτων. Πρόβλημα, πιθανόν, να υπάρχει και με υδροβιότοπους που γίνονται αποδέκτες αστικής επιφανειακής απορροής (Reed et al., 1995).

#### ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΠΑΘΟΓΟΝΩΝ ΜΙΚΡΟΟΡΓΑΝΙΣΜΩΝ

Οι διεργασίες απομάκρυνσης παθογόνων μικροοργανισμών σε τεχνητούς υγροβιότοπους είναι παρόμοιες με αυτές σε λίμνες σταθεροποίησης με επιπρόσθετη τη διεργασία της διήθησης, η οποία απομακρύνει παθογόνους μικροοργανισμούς μέσω των φυτών σε υγροβιότοπους επιφανειακής ροής. Παράλληλα συγκρατεί τους παθογόνους μικροοργανισμούς στο πορώδες μέσο στην περίπτωση υγροβιότοπων υποεπιφανειακής ροής.

Τα ποσοστά αφαίρεσης υπερβαίνουν το 90% για περιττωματικά κολοβακτηρίδια και ιούς για χρόνους παραμονής από 3 έως 6 ημέρες. Γενικά, η αφαίρεση των παθογόνων για χρόνο παραμονής 3-7 ημέρες είναι 1-2 τάξεις μεγέθους και για χρόνο παραμονής άνω των 14 ημερών είναι 3-4 τάξεις μεγέθους (Reed et al., 1995; Stefanakis, A.I., and Akratos C.S., 2016 ).

### 2.3.6 ΤΕΧΝΗΤΟΙ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΔΙΑΣΤΑΛΑΓΜΑΤΟΣ ΑΠΟ Χ.Υ.Τ.Α.

Οι τεχνητοί υδροβιότοποι, έχουν ευρεία εφαρμογή στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων. Τα τελευταία χρόνια εφαρμόζονται επιτυχώς και για την επεξεργασία βιομηχανικών υγρών απόβλητων και απορροών όπως τα διασταλάγματα ενός Χ.Υ.Τ.Α. (Stefanakis, 2018), όπου τα απόβλητα παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις σε όγκο και συγκεντρώσεις φορτίου. Παρακάτω παρατίθενται ορισμένες μελέτες και αναφορές σε τεχνητούς υδροβιότοπους επεξεργασίας διασταλάγματος σε παγκόσμιο επίπεδο.

Οι (Peverly et al., 1995) κατασκεύασαν στο Cornell University της Αμερικής τεχνητό υδροβιότοπο για την επεξεργασία διασταλάγματος από Χ.Υ.Τ.Α. χρησιμοποιώντας ως βλάστηση *Phragmites australis*. Η ανάπτυξη του φυτού πραγματοποιήθηκε παρουσία υψηλών συγκεντρώσεων  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  (300 mg/l), BOD (300 mg/l), Fe (30 mg/l) και Mn (1,5 mg/l) ενώ το pH του διασταλάγματος είχε τιμές από 7 έως 7,2. Τα βαρέα μέταλλα συσσωρεύτηκαν στους βλαστούς και κυρίως στα ριζώματα σε αυξημένα επίπεδα Fe 3700 mg/kg, Cu 65 mg/kg, Zn 45 mg/kg, Pb 12 mg/kg και Cd 0,2 mg/kg. Τέλος, η μικροανάλυση SEM ακτινών-Χ έδειξε πως πραγματοποιήθηκε συσσώρευση Fe κυρίως στις επιφάνειες του ριζικού συστήματος και σε μικρότερο βαθμό στον εσωτερικό ιστό της ρίζας.

Οι (Dan et al., 2017) κατασκεύασαν στο Osaka University της Ιαπωνίας τεχνητούς υδροβιότοπους κατακόρυφης ροής εργαστηριακής κλίμακας για την επεξεργασία συνθετικού διασταλάγματος Χ.Υ.Τ.Α.. Η βλάστηση που χρησιμοποιήθηκε ήταν *Phragmites australis* και *Juncus effusus* ενώ ο ένας υδροβιότοπος δεν περιείχε βλάστηση. Οι τεχνητοί υδροβιότοποι κατάφεραν να επιτύχουν υψηλές απομακρύνσεις βαρέων μετάλλων από το λύμα όπως Zn, Cr, Ni, Cd, Fe, Pb αλλά όχι Mn. Τέλος, τα Cd, Cr, Pb, Ni και Zn συσσωρεύτηκαν σε μεγάλο βαθμό στο ανώτερο στρώμα εδάφους στους υδροβιότοπους με βλάστηση σε σύγκριση με τον υδροβιότοπο που δεν περιείχε βλάστηση δείχνοντας πως τα φυτά βοηθούν στην αποφυγή διείσδυσης των βαρέων μετάλλων στα βαθύτερα στρώματα του εδάφους.

Οι (Bakhshoodeh et al., 2020) πραγματοποίησαν μια ανασκόπηση 85 διατριβών από 20 χώρες, η οποία εστιάζει στην απόδοση επεξεργασίας τριών διαφορετικών τύπων τεχνητών υδροβιότοπων [ελεύθερη επιφανειακή ροή νερού, υπόγεια ροή (οριζόντια και κάθετη) και υβριδικά συστήματα], χρησιμοποιώντας δεδομένα από μελέτες πεδίου και πιλοτικής κλίμακας. Οι αναφερόμενες μέσες αποδόσεις απομάκρυνσης % των BOD<sub>5</sub>, COD, TP, PO<sub>4</sub>, Ammonia-N, TKN, TN και TSS, για Οριζόντια/ Κάθετη/ Υβριδική/ Ελεύθερη επιφάνεια νερού ήταν, αντίστοιχα: 60.1/79.7/72.2/80.6%. 54.5/59.2/56.2/45.4%; 63.5/46.2/-6.4/5.5%; 67.7/62.1/5.2/-1.6%; 67.2/66.7/68.9/70.0%; 45.4/64.2/64.9/10.6%; 72.1/88.2/67.3/81,7%; και 69.3/55.5/51.8/59.5%.

Οι (Yalcuk et al., 2009) κατασκεύασαν τρεις τεχνητούς υδροβιότοπους δύο κάθετης και έναν οριζόντιας ροής, με διαφορετικά υλικά στρώσης όπως χαλίκι και ζεόλιθο, για αντιμετώπιση της οργανικής ρύπανσης, της αμμωνίας και των βαρέων μετάλλων που υπάρχουν στα στραγγίσματα των Χ.Υ.Τ.Α.. Διερευνήθηκε επίσης η επίδραση διαφορετικών υλικών στρώσης (επιφάνεια χαλίκι και ζεόλιθο). Τα δύο κάθετα συστήματα διέφεραν μεταξύ τους με το υλικό στρώσης τους. Οι μονάδες φυτεύτηκαν με ψαθί (*Typha latifolia*). Η μέση απομάκρυνση για VF1, VF2 και HF ήταν  $\text{NH}_4\text{-N}$ , 62.3%, 48.9% και 38.3%. COD, 27.3%, 30.6% και 35.7%. PO<sub>4</sub>-P, 52.6%, 51.9% και 46.7%; Fe(III), 21%, 40% και 17%, αντίστοιχα. Καλύτερη απόδοση αφαίρεσης  $\text{NH}_4\text{-N}$  παρατηρήθηκε στο κατακόρυφο σύστημα με στρώμα ζεόλιθου από εκείνη του κάθετου 2 και του οριζόντιου συστήματος. Αντίθετα, το οριζόντιο σύστημα ήταν πιο αποτελεσματικό στην αφαίρεση COD.

Η (Bulc, 2006) κατασκεύασε τρεις τεχνητούς υδροβιότοπους, για τον παλιό χώρο υγειονομικής ταφής της πρωτεύουσας της Σλοβενίας. Η εγκατάσταση αποτελούνταν από τρεις αλληλοσυνδεόμενες κλίνες, δύο κάθετης ροής και μία οριζόντιας ροής. Η απόδοση των συστημάτων CW αξιολογήθηκε για 7 χρόνια και ήταν: COD 50%, BOD<sub>5</sub> (59%), αμμωνιακό άζωτο (51%), νιτρικό (αρνητικό), ολικός φώσφορος (P) (53%), θειικά άλατα (αρνητικά), σουλφίδια (49%), χλωρίδια (35). % και Fe (84%). Οι μέσες συγκεντρώσεις των αιωρούμενων στερεών, COD, BOD<sub>5</sub>, νιτρικών, ολικού P, θειικών, σουλφιδίων και Fe ήταν κάτω από τα όρια μετά την επεξεργασία. Η αναλογία μεταξύ N και P έδειξε περιορισμένο επίπεδο P για βιολογικές διεργασίες.

Οι (Akinbile et al., 2012) κατασκεύασαν έναν τεχνητό υδροβιότοπο υποεπιφανειακής ροής για την επεξεργασία στραγγισμάτων από τον Χ.Υ.Τ.Α. του Pulau Burung (PBSL). Ο υδροβιότοπος φυτεύτηκε με *Cyperus haspan*, ενώ ως υλικά υποστρώματος χρησιμοποιήθηκαν άμμος και χαλίκι. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο τεχνητός υδροβιότοπος με *C. haspan* ήταν ικανός να απομακρύνει το: 39.3–86.6% της θολερότητας, το 63.5–86.6% του χρώματος, το 59.7–98.8% του TSS, το 39.2–91.8% του COD, 60.8–78.7% του BOD<sub>5</sub>, 29.8–53.8% του NH<sub>3</sub>-N, 59.8–99.7% του TP, 33.8–67.0% του TN, 34.9–59.0% του Fe, 29.0–75.0% του Mg και 75,9–89,4% του Zn.

Οι (Torres et al., 2020) κατασκεύασαν στο Universidad de Cartagena στην Κολομβία τρεις τεχνητούς υδροβιότοπους οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής. Ο ένας εξ αυτών δεν είχε βλάστηση, ενώ για τους άλλους δύο χρησιμοποιήθηκαν *Rhizophora mangle* και *Typha latifolia*. Η απομάκρυνση ρύπων πραγματοποιήθηκε κυρίως στις δύο μονάδες που περιείχαν βλάστηση, με ικανοποιητικά ποσοστά απομάκρυνσης: COD 73–77%, NO<sub>2</sub> 55–67%, NO<sub>3</sub> 90–98%.

Οι (Yang et al., 2021) κατασκεύασαν στο Guizhou University της Κίνας τέσσερις τεχνητούς υδροβιότοπους κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής με ανακυκλοφορία, πετυχαίνοντας μέσο ποσοστό απομάκρυνσης COD, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, TP πάνω από 85%. Το πληρωτικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν το πορώδες σκυρόδεμα, ενώ η βλάστηση αποτελούνταν από *Canna indica*, *Phragmites australis* και *Cyperus involucratus*.

## 2.4 ΒΙΟΕΞΑΝΘΡΑΚΩΜΑ (BIOCHAR)

### 2.4.1 ΠΡΟΙΟΝΤΑ ΠΥΡΟΛΥΣΗΣ

Η πυρόλυση είναι μια διαδικασία αποτέφρωσης υψηλών θερμοκρασιών (300 έως 1200°C), η οποία λαμβάνει χώρα κάτω από συνθήκες έλλειψης οξυγόνου ή περιορισμένες σε οξυγόνο. Έτσι, επιτυγχάνεται η αποσύνθεση της οργανικής ύλης, η οποία περιέχεται στη βιομάζα, μέσω μιας θερμικής διαδικασίας διάσπασης και συμπύκνωσης. Απο τη θερμική επεξεργασία, προκύπτουν σταθερά προϊόντα, τα οποία διαχωρίζονται σε τρία βασικά κλάσματα: αέριο, υγρό και στερεό. Από τα αυτά τα κλάσματα παράγονται χρήσιμα προϊόντα, όπως υγρά και στερεά καύσιμα (βιοκαύσιμα), χημικά προϊόντα (διαλύτες και πρώτες ύλες της χημικής βιομηχανίας), καθώς και το στερεό εξανθράκωμα, το οποίο έχει ευρεία εφαρμογή (Boateng et al., 2015). Πιο συγκεκριμένα και σύμφωνα με τον (Ρεγκούζας, 2017) το αποτέλεσμα της πυρόλυσης διακρίνεται σε:

#### ΥΓΡΑ ΠΡΟΪΟΝΤΑ-ΒΙΟΕΛΑΙΟ (BIO-OIL)

Τα υγρά προϊόντα της πυρόλυσης χαρακτηρίζονται από ένα μίγμα νερού σκούρου χρώματος, σε περιεκτικότητα 15-35%, παράλληλα με μία σειρά οργανικών χημικών ενώσεων, κυρίως οξυγονωμένων υδρογονανθράκων, σε περιεκτικότητα 55-75%. Χρησιμοποιείται ως καύσιμο σε μηχανές εσωτερικής καύσης ή σε λέβητες, για την παραγωγή θερμικής ή ηλεκτρικής ενέργειας.

#### ΑΕΡΙΑ ΠΡΟΪΟΝΤΑ-ΒΙΟΑΕΡΙΟ ΣΥΝΘΕΣΗΣ (BIO-SYNGAS)

Το αέριο προϊόν της πυρόλυσης περιέχει ένα μίγμα αερίων, όπως μονοξείδιο του άνθρακα (CO), διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), μεθάνιο (CH<sub>4</sub>), υδρογόνο (H<sub>2</sub>), αιθυλένιο (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>), καθώς και κάποια οργανικά αέρια μεγαλύτερου μοριακού βάρους σε μικρότερες ποσότητες (Βάμβουκα, 2009). Χάρη στη σύσταση σύνθεσης του, είναι κατάλληλο για απευθείας χρήση σε στροβίλους ή μηχανές εσωτερικής καύσης ως αέρια καύσιμη ύλη.

#### ΣΤΕΡΕΑ ΠΡΟΪΟΝΤΑ-ΒΙΟΕΞΑΝΘΡΑΚΩΜΑ (BIOCHAR)

Το βιοεξανθράκωμα αποτελεί το δεύτερο μεγαλύτερο κλάσμα των προϊόντων της πυρόλυσης, μετά από το βιοέλαιο. Είναι ένα πορώδες υλικό, πλούσιο σε οργανικό άνθρακα. (Αναλυτικότερα βλ. κεφάλαιο 2.4.2.)

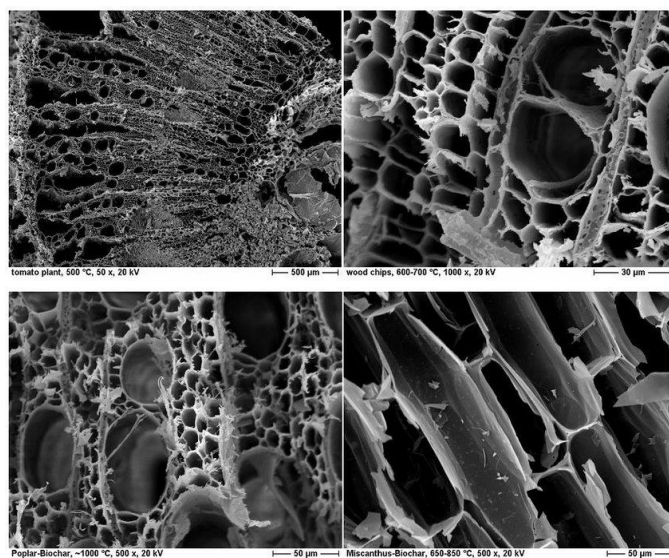
## 2.4.2 ΒΙΟΞΑΝΘΡΑΚΩΜΑ (BIOCHAR)

Το βιοξανθράκωμα, ή αλλιώς biochar είναι ένα επεξεργασμένο, ανθρακούχο, στερεό προϊόν κατασκευασμένο από βιομάζα, το οποίο παρουσιάζει βελτιωμένες φυσικοχημικές παραμέτρους σε σχέση με το αρχικό περιεχόμενο της βιομάζας και χαρακτηρίζεται από μια πορώδη μικροδομή, μια υψηλή ειδική επιφάνεια και ικανότητα ανταλλαγής ιόντων (Brassard et al., 2016; Gwenzi et al., 2017). Οι φυσικοχημικές ιδιότητες του βιοξανθρακώματος εξαρτώνται κυρίως από τις συνθήκες που εφαρμόζονται κατά τη διεργασία της πυρόλυσης (Βάμβουκα, 2009).

Επιπλέον, η ενισχυμένη πορώδης δομή που παρουσιάζει, είναι μια από τις σημαντικότερες ιδιότητές του. Η δομή του ποικίλει ανάλογα με την θερμοκρασία που διεξάγεται η πυρόλυση. Σε χαμηλές θερμοκρασίες 300°C έως 400°C, η δομή του είναι άμορφη, ενώ σε υψηλότερες θερμοκρασίες >700°C δημιουργούνται ισχυρές ενώσεις με κρυσταλική δομή. Σε ακόμα υψηλότερες θερμοκρασίες, η δομή γίνεται γραφιτική με παράλληλες συζευγμένες στοίβες αρωματικού άνθρακα (Ρεγκούζας, 2015). Κατά την πυρόλυση, η βιομάζα μετατρέπεται σε πτητικές ενώσεις, δημιουργώντας έτσι διάκενα και ρωγμές στο αρχικό υλικό, με αποτέλεσμα την αύξηση του πορώδους και της ειδικής επιφάνειας του βιοξανθρακώματος, με τον βαθμό της αύξησης να εξαρτάται από τη θερμοκρασία και τον χρόνο παραμονής (Inyang et al., 2015).

Ακόμη, από το πορώδες του βιοξανθρακώματος εξαρτάται και η ειδική του επιφάνεια, καθώς αυξάνεται όσο δημιουργούνται περισσότεροι πόροι. Σύμφωνα με τους (Chia et al., 2015) τα βιοξανθρακώματα διακρίνονται, ανάλογα με το πορώδες τους, σε:

- Μικροπορώδες (<2 nm).
- Μεσοπορώδες (2-50 nm).
- Μακροπορώδες (>50 nm).



**Εικόνα 2.21.** Σάρωση Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου (SEM) για διάφορα είδη biochar, ( Bruno Glaser, [https://www.researchgate.net/figure/Scanning-electron-microscopy-SEM-pictures-of-biochars-made-of-tomato-plant-wood\\_fig3\\_257304681](https://www.researchgate.net/figure/Scanning-electron-microscopy-SEM-pictures-of-biochars-made-of-tomato-plant-wood_fig3_257304681))

### 2.4.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ ΒΙΟΕΞΑΝΘΡΑΚΩΜΑΤΟΣ

Λόγω της ειδικής επιφάνειας, του μικρού πορώδους και του ανόργανου περιεχομένου σε τέφρα, το βιοεξανθράκωμα καθίσταται κατάλληλο για αγρονομικές χρήσεις ως εδαφοβελτιωτικό, αλλά και για περιβαλλοντικές εφαρμογές ως προσροφητικό υλικό (Ahmad et al., 2014). Αναλυτικότερα:

#### ΩΣ ΕΔΑΦΟΒΕΛΤΙΩΤΙΚΟ

Με την εφαρμογή του στο έδαφος και χάρη στις φυσικο-βιολογικές του ιδιότητες, μπορεί να λειτουργήσει είτε ως υλικό ικανό για τη δέσμευση του οργανικού άνθρακα (συνεπάγεται μείωση εκπομπών CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα) είτε μετριάζοντας το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Επιπλέον, είναι ικανό να προσροφά μεγάλες ποσότητες θρεπτικών συστατικών και συμβάλει σε πιο αποτελεσματική ανάπτυξη, αλλά και ενδυνάμωση της άμυνας του καλλιεργούμενου φυτού (Ρεγκούζας, 2017). Παράλληλα, μειώνει τις απώλειες από την έκπλυση των θρεπτικών συστατικών στο έδαφος, ελαχιστοποιώντας τις ανάγκες λίπανσης της καλλιέργειας. Επίσης αυξάνει την κατακράτηση νερού στο έδαφος, ενώ αυξάνει το pH των όξινων εδαφών, χάρη στην αλκαλικότητά του (Artiola et al., 2012; Biederman et al., 2013).

Τα πλεονεκτήματα, κατά τους (Lehmann and Joseph, 2009) που εμφανίζουν εδάφη εμπλουτισμένα με βιοεξανθράκωμα, συνοψίζονται στα ακόλουθα. Αρχικά παρατηρούνται μειωμένες εκπομπές οξειδίων του αζώτου, αυξημένη κατακράτηση νερού και ανάπτυξη μικροβιακών κοινοτήτων στο έδαφος. Ακόμα επιτυγχάνεται αποτελεσματικότερος αερισμός του εδάφους, με ταυτόχρονη μακροχρόνια αποθήκευση άνθρακα σε αυτό. Τέλος, η απόδοση της παραγώμενης καλλιέργειας αυξάνεται και τα θρεπτικά συστατικά στους φυτικούς ιστούς έχουν βελτιωμένη διαθεσιμότητα.

#### ΩΣ ΠΡΟΣΡΟΦΗΤΗΣ ΓΙΑ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΡΥΠΩΝ

Πλέον, το βιοεξανθράκωμα αρχίζει να υποκαθιστά τον ενεργό άνθρακα λόγω του χαμηλού κόστους, της σχετικής αφθονίας και των συγκριτικών προσροφητικών του ικανοτήτων (Inyang et al., 2015). Επιγραμματικά, με τον όρο 'ενεργός' εννοείται η βελτιωμένη ειδική επιφάνεια που διαθέτει ο άνθρακας, ύστερα από την θερμοχημική επεξεργασία που έχει υποστεί (Ahmad et al., 2014). Το χαρακτηριστικό που διαφοροποιεί αυτά τα δύο υλικά μεταξύ τους είναι ότι, κατά κανόνα, το βιοεξανθράκωμα παράγεται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες πυρόλυσης και δεν υπόκειται σε περαιτέρω ενεργοποίηση (Inyang et al., 2015). Επιπρόσθετα, το βιοεξανθράκωμα δεν ανθρακοποιείται πλήρως και το τμήμα που δεν έχει υποστεί ανθρακοποίηση (καρβοξυλικές, υδροξυλικές και φαινολικές λειτουργικές ομάδες της επιφάνειας που περιέχουν δεσμούς οξυγόνου) μπορεί να δεσμεύσει διάφορους οργανικούς ρύπους που συναντώνται στο έδαφος. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω χαρακτηριστικά του, διαπιστώνεται η ικανότητα του να χρησιμοποιείται ως προσροφητικό υλικό για την απομάκρυνση οργανικών και ανόργανων ρύπων (Ρεγκούζας, 2017).

Χαρακτηριστικό παράδειγμα της αποτελεσματικότητας του ως προσροφητικό υλικό είναι η προσρόφηση ανόργανων ενώσεων, και πιο συγκεκριμένα, των βαρέων μετάλλων. Η ικανότητα αυτή αποδίδεται στις ηλεκτροστατικές αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στις αρνητικά φορτισμένες επιφάνειες άνθρακα και στα κατιόντα των μετάλλων αλλά και στην ανταλλαγή ιόντων μεταξύ των επιφανειακών πρωτονίων και των μεταλλικών κατιόντων. Τα κύρια, υπό μελέτη, μεταλλικά κατιόντα είναι As, Cr, Pb, Cu, Ni και Cd (Mohan et al., 2014).



Οι μηχανισμοί απομάκρυνσης των βαρέων μετάλλων από το βιοεξανθράκωμα, σύμφωνα με τους (Ahmad et al., 2014; Mohan et al., 2014) είναι οι ακόλουθοι. Η ανταλλαγή ιόντων, αρχικά, μεταξύ του βαρέος μετάλλου και των μετάλλων που υπάρχουν στο βιοεξανθράκωμα, λόγω ηλεκτροστατικής συμπλοκοποίησης. Καθώς και η ανταλλαγή ιόντων μεταξύ του μετάλλου και μετάλλων του βιοεξανθρακώματος που είτε έχουν κατακρημνιστεί στην επιφάνεια του βιοεξανθρακώματος είτε έχουν δημιουργήσει σύμπλοκα με επιφανειακές λειτουργικές ομάδες, όπως η οργανική ύλη και τα οξειδία μετάλλων του βιοεξανθρακώματος. Ένας ακόμα μηχανισμός είναι η δημιουργία συμπλόκων με ενεργές καρβοξυλικές ομάδες ή η δημιουργία συμπλόκων με ενεργές υδροξυλικές ομάδες. Τέλος, η επιφανειακή κατακρήμνιση αποτελεί έναν ακόμα μηχανισμό απομάκρυνσης.

## 2.4.4 ΤΕΧΝΗΤΟΙ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΙ ΜΕ ΒΙΟΞΑΝΘΡΑΚΩΜΑ

Το βιοεξανθράκωμα (biochar) έχει εξεταστεί τα τελευταία χρόνια σε τεχνητούς υγροβιότοπους, με σκοπό την εντατικοποίηση της απομάκρυνσης ρύπων από λύματα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα/άζωτο (C/N). Ακολουθούν ορισμένες μελέτες και αναφορές τεχνητών υγροβιότοπων με βιοεξανθράκωμα, παγκόσμιας κλίμακας, οι οποίες υπογραμμίζουν τη χρησιμότητα του ως πληρωτικό υλικό σε έναν τεχνητό υγροβιότοπο.

Οι (Saeed et al., 2021) κατασκεύασαν στο University of Asia Pacific στο Μπαγκλαντές τέσσερις τεχνητούς υγροβιότοπους κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής, με ανακυκλοφορία, χρησιμοποιώντας ως πληρωτικό υλικό οργανικό εξανθράκωμα (coco peat) μαζί με δομικά υλικά (τσιμεντόλιθους, τούβλα, άμμο). Η βλάστηση των υγροβιότοπων ήταν *Phragmites australis* και *Chrysopogon zizanioides*. Τέλος, η διακύμανση των ποσοστών απομάκρυνσης ήταν: COD 55-76%, N 50-93%, P 69-100% και BOD 34-89%.

Οι (Zhang et al., 2021) ανέπτυξαν τέσσερα πιλοτικά συστήματα VFCW για την επεξεργασία οικιακών λυμάτων, με διαφορετικές αναλογίες βιοεξανθρακώματος (0%, 25%, 50%, 75%). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι όλοι οι τεχνητοί υγροβιότοποι πέτυχαν καλύτερη αφαίρεση COD (άνω του 90%) και NH-N (άνω του 99%) λόγω επαρκούς συμπληρώματος οξυγόνου ενώ η καλύτερη αφαίρεση TN (67%) επιτεύχθηκε στον τεχνητό υγροβιότοπο με 50% προσθήκης βιοεξανθρακώματος. Η αφαίρεση TP αυξήθηκε σταδιακά με την αυξανόμενη αναλογία τροποποίησης του βιοεξανθρακώματος. Τέλος, η δραστηριότητα των ενζύμων και η αναλογία των *Proteobacteria* και *Patescibacteria* σε επίπεδο φυλής ενισχύθηκαν αισθητά με την προσθήκη βιοεξανθρακώματος.

Οι (Chand et al., 2022) κατασκεύασαν τρεις τεχνητούς υγροβιότοπους κάθετης ροής (VFCWs), οι οποίες λειτουργούσαν ως SB, SBP και SP. Όλες οι ρυθμίσεις διατηρήθηκαν σε εξωτερικούς χώρους του Πανεπιστημίου Doon, Dehradun, Ινδία από τον Μάιο έως τον Αύγουστο, σε κλίμα μουσώνων. Οι Πειραματικές αναλύσεις απεικόνισαν το συνεχές υψηλό επίπεδο DO ( $2.7-5.7 \text{ mg L}^{-1}$ ) σε SB και SBP μετά τον κύκλο I και II της παλιρροιακής ροής (72 ώρες πλημμύρας και 24 ώρες ξηρής φάσης). Οι αποδόσεις μείωσης COD αυξήθηκαν από 15.75 - 61.86% σε 48.55-96.80% μετά την παλιρροιακή λειτουργία. Η αφαίρεση N ( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ) και N ( $\text{NO}_3-\text{N}$ ) βρέθηκε να είναι 88.16% και 76.02%, 49.32 και 57.85% και 40.23% και 48.94% σε SBP, SP και SB, αντίστοιχα. Η θεωρία της βελτιωμένης νιτροποίησης και προσρόφησης μέσω υποστρώματος τροποποιημένου βιοεξανθρακώματος προτάθηκε για συστήματα TFCW. Η αφαίρεση  $\text{PO}_4^{-3}$  και  $\text{SO}_4^{-2}$  βελτιώθηκε από 22.63 σε 80.50% και 19.69 σε 75.20%, αντίστοιχα μετά την πρώτη παλιρροϊκή λειτουργία σε όλες τις μονάδες.

Οι (Chand et al.,2021) κατασκεύασαν έξι υγροβιότοπους κάθετης ροής (VFCW), φυτεμένους με *Colocasia esculenta* και με πληρωτικό υλικό βιοεξανθράκωμα, οι οποίοι τροφοδοτήθηκαν με συνθετικά οικιακά λύματα με αυξανόμενη παροχή οργανικού φορτίου. Ο λόγος εισερχόμενου COD/N των συνθετικών λυμάτων στις μονάδες τροποποιήθηκε αλλάζοντας την ποσότητα σακχαρόζης για τις πέντε αναλογίες COD/N (1:1, 3:1, 5:1, 8:1 και 10:1). Από τα αποτελέσματα συμπεραίνουμε ότι ο διαλείπων αερισμός και η προσθήκη βιοεξανθράκωματος βελτίωσαν τη λειτουργία των VFCW. Ακόμη, επιτεύχθηκε υψηλό ποσοστό απομάκρυνσης COD (99.0%),  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  (97.0%),  $\text{NO}_3-\text{N}$  (87.0%) και TP (89.0%).

Οι (Chand et al. 2021) κατασκεύασαν τρεις τεχνητούς υγροβιότοπους ύπογειας κατακόρυφης ροής μέσης κλίμακας (SB, SBP και SP) φυτευμένους με *Colocasia esculenta* και πληρωτικό υλικό βιοεξανθράκωμα, οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν στο εργαστήριο επεξεργασίας στερεών και υγρών αποβλήτων, στο Πανεπιστήμιο Doon, Dehradun, Ινδία για να συγκριθούν τα αποτελέσματα της απομάκρυνσης των ρύπων των λυμάτων σε διαφορετικούς τύπους εγκαταστάσεων CW. Αξίζει να αναφερθεί ότι οι τεχνητοί υγροβιότοποι με βιοεξανθράκωμα έδειξαν 92.6 (COD), 81.7 ( $\text{NO}_3-\text{N}$ ), 81.2 ( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ) % απομάκρυνση σε σχέση με τους τεχνητούς υγροβιότοπους χωρίς το υλικό αυτό.

## 2.5 ΣΤΟΧΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης ρύπων με την αξιοποίηση των εφαρμογών των τεχνητών υγροβιότοπων. Η τεχνολογία αυτή επιλέγεται με γνώμονα την αναγκαιότητα ανάπτυξης, και περαιτέρω βελτιστοποίησης μιας φιλικής για το περιβάλλον διαχείρισης ρυπογόνων λυμάτων. Συγχρόνως αξιοποιείται το μοντέλο της κυκλικής οικονομίας, της ανακυκλοφορίας και επαναχρησιμοποίησης υλικών ώστε να επεκταθεί ο κύκλος ζωής τους.

Πιο συγκεκριμένα, κατασκευάστηκαν δύο μονάδες τεχνητών υγροβιότοπων οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής, οι οποίες μελετήθηκαν ως προς την απόδοση επεξεργασίας τους για διαστάλαγμα από τον Χ.Υ.Τ.Α. Χανίων. Οι δύο μονάδες είχαν ως πληρωτικό υλικό ανακυκλωμένο πλαστικό HDPE (High Density Poly Ethylene) και βιοεξανθράκωμα (biochar), ενώ η βλάστηση που καλλιεργήθηκε ήταν το καλάμι *Phragmites Australis*.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

## 3.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

### 3.1.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

Η πειραματική διάταξη της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελείται από δυο μονάδες τεχνητών υγροβιότοπων οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής. Οι διαστάσεις τους είναι 93cm μήκος, 45cm πλάτος και 45cm ύψος. Το πληρωτικό υλικό που υπάρχει στην πρώτη μονάδα είναι πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας HDPE (P=Plastic), ενώ στην δεύτερη μονάδα επικρατεί το HDPE μαζί με 10% κατ' όγκο βιοεξανθράκωμα (biochar) (PB=Plastic&Biochar). Η βλάστηση που επιλέχθηκε και στις δυο μονάδες είναι το κοινό καλάμι *Phragmites Australis*.

Όσον αφορά το σχεδιασμό των μονάδων, απαρτίζονται από δύο πλαστικές ορθογώνιες κλίνες, οι οποίες είναι επενδυμένες εσωτερικά από πλαστικό υλικό HDPE, σκοπός του οποίου είναι να στεγανοποιεί τη μονάδα για αποφυγή διαρροών. Στον πυθμένα των μονάδων, υπάρχει ένας εύκεμπτος σωλήνας ο οποίος εκτείνεται σε όλο το πλάτος της μονάδας στα κατάντη και εξέρχεται από αυτήν, οδηγώντας το επεξεργασμένο λύμα εντός ενός δοχείου συλλογής. Ως εισροή στην εγκατάσταση, εφαρμόζεται διαστάλαγμα του Χ.Υ.Τ.Α Χανίων, διαφόρων αραιώσεων, το οποίο κατανέμεται ομοιόμορφα στην ανάντη πλευρά κάθε μονάδας. Η διαδικασία εφαρμογής αλλά και συλλογής του λύματος γίνεται χειρωνακτικά. Τέλος, υπάρχει μια κλίση της τάξης του 1%, ούτως ώστε να διευκολύνεται η ροή του λύματος προς την έξοδο.



**Εικόνα 3.1.** Οι Μονάδες Τεχνητών Υγροβιότοπων P & PB , τους μήνες Απρίλιο(αριστερά) και Ιούνιο(δεξιά), στο Θερμοκήπιο του Πολυτεχνείου Κρήτης



**Εικόνα 3.2.** Μονάδες P & PB αντίστοιχα, το μήνα Αύγουστο.

### 3.1.2 ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Το πειραματικό μέρος της παρούσας διπλωματικής έλαβε χώρα στο Πολυτεχνείο Κρήτης. Πιο συγκεκριμένα, οι εβδομαδιαίες εργαστηριακές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος της σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος ενώ ο χώρος τοποθέτησης της πειραματικής διάταξης ήταν στο θερμοκήπιο της σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος.



**Εικόνα 3.3.** Οι Μονάδες Τεχνητών Υγροβιότοπων στο θερμοκήπιο του Πολυτεχνείου Κρήτης

Τα κλιματολογικά στοιχεία που επικρατούσαν καθόλη τη διάρκεια του πειράματος συλλέχθηκαν από το μετεωρολογικό σταθμό Chania (LG25), ο οποίος βρίσκεται σε υψόμετρο 137m, εντός του χώρου του Πολυτεχνείου Κρήτης. Η διεξαγωγή του πειράματος διήρκεσε τους μήνες Απρίλιο με Αύγουστο. Παρακάτω και σύμφωνα με το (<http://meteosearch.meteo.gr/>) παρουσιάζονται οι μέσες τιμές (μέσης και μέγιστης θερμοκρασίας, βροχόπτωσης, μέσης και μέγιστης ταχύτητας ανέμου, καθώς και επικρατούσας διεύθυνσης ανέμου) για τους μήνες αυτούς.

**Πίνακας 3.1.** Μέση και Μέγιστη Θερμοκρασία, Μέση Βροχόπτωση, Μέση και Μέγιστη Ταχύτητα Ανέμου, Επικρατούσα Διεύθυνση (<http://meteosearch.meteo.gr/stationInfo.asp>).

Μήνες	Μέση Θερμοκρασία (°C)	Μέγιστη Θερμοκρασία (°C)	Μέση Βροχόπτωση (mm)	Μέση Ταχύτητα Ανέμου (km/h)	Μέγιστη Ταχύτητα Ανέμου (km/h)	Επικρατούσα Διεύθυνση Ανέμου
Απρίλιος	16.7	31.2	0.153	9.1	69.2	SW
Μάιος	21.7	37.4	0.206	8.9	53.1	W
Ιούνιος	24.5	38.8	0.087	6.4	33.8	SW
Ιούλιος	27.7	43.2	0	7.3	54.7	SW
Αύγουστος	28.1	41.6	0.06	7.2	54.7	SW

Στο Παράρτημα Α βρίσκονται τα κλιματολογικά στοιχεία ανά μήνα.

### 3.1.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

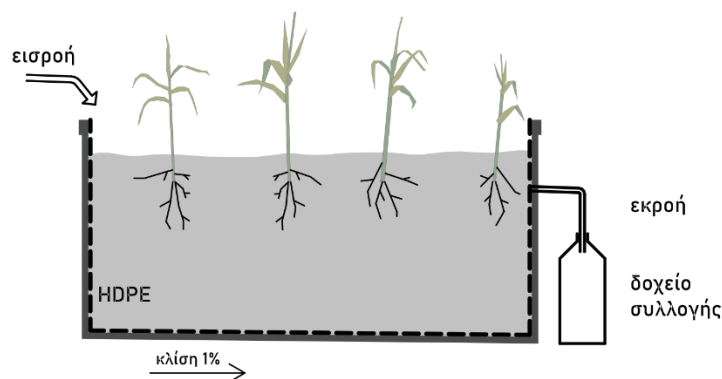
Το πείραμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας είχε διάρκεια 5 μήνες (Απρίλιος με Αύγουστο) ενώ η πλήρης ηλικία των πιλοτικών μονάδων ήταν 7 μήνες κατά την έναρξη του πειράματος. Ακολουθούν, κατά χρονική σειρά, τα στάδια διεξαγωγής του πειράματος, καθένα από τα οποία συμβάλλει σημαντικά στην επίτευξη των ιδανικών συνθηκών, της κατάλληλης προσαρμογής του κάθε μέσου στη μονάδα για τη σωστή διεξαγωγή του πειράματος και των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις εργαστηριακές αναλύσεις.

#### ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΙΛΟΤΙΚΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ

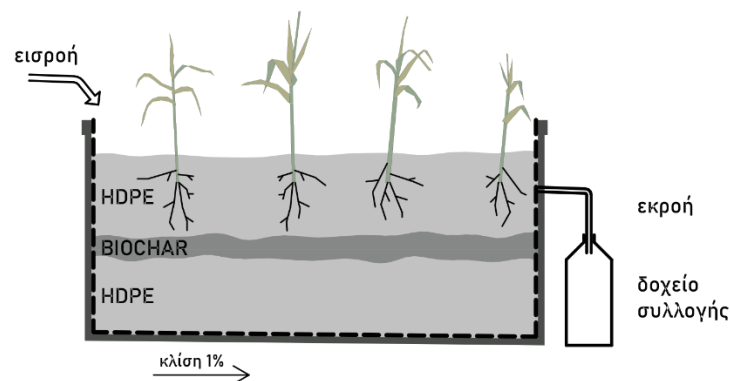
Αρχικά χωροθετείται η πειραματική διάταξη, επιλέγονται οι πιλοτικές μονάδες που θα φιλοξενήσουν τους τεχνητούς υγροβιότοπους και το κατάλληλο στεγανωτικό υλικό με το οποίο θα επενδυθούν εσωτερικά. Στη συνέχεια τοποθετείται ως πληρωτικό υλικό και των δύο μονάδων ανακυκλωμένο πλαστικό HDPE. Το βιοεξανθράκωμα τοποθετείται στη μία μονάδα εκ των δύο, περίπου στο μέσο του ύψους της, σε μια ποσότητα που αντιστοιχεί στο 10% του όγκου της μονάδας. Όσον αφορά τη βλάστηση των τεχνητών υγροβιότοπων, επιλέγονται ρίζες από το κοινό καλάμι *Phragmites Australis*. Τέλος, και οι δυο μονάδες τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο ώστε να παρουσιάζουν κλίση πυθμένα της τάξης του 1%.

#### ΣΤΑΔΙΟ ΩΡΙΜΑΝΣΗΣ-ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗΣ

Έπεται ένα χρονικό διάστημα 2 μηνών, στο οποίο τα καλάμια προσαρμόζονται στο περιβάλλον και το ριζικό τους σύστημα αναπτύσσεται με σκοπό να είναι ικανό να τους παρέχει όλα τα απαραίτητα θρεπτικά συστατικά για τη σωστή ανάπτυξη και επιβίωσή τους.



**Εικόνα 3.4.** Πιλοτική μονάδα P(Plastic) σε αρχικό στάδιο.



**Εικόνα 3.5.** Πιλοτική μονάδα PB(Plastic&Biochar) σε αρχικό στάδιο.

#### ΕΝΑΡΞΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

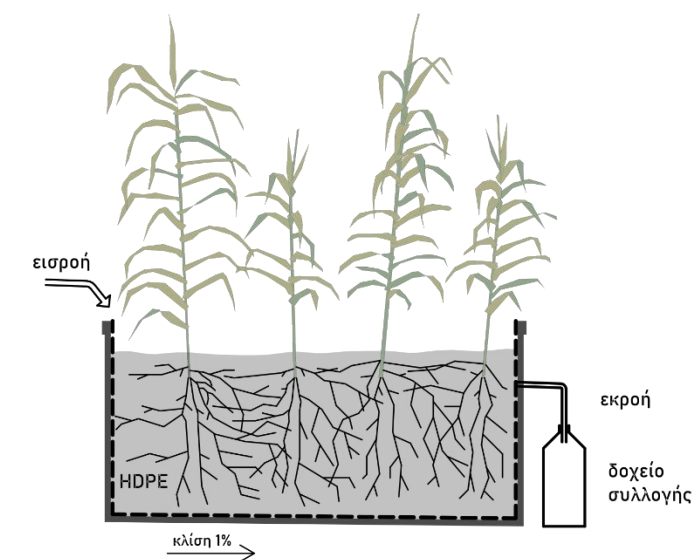
Αφού περάσει το στάδιο ωρίμανσης και τα καλάμια έχουν προσαρμοστεί στο περιβάλλον του τεχνητού υδροβιότοπου, ξεκινάει η πειραματική διαδικασία. Αυτή περιελάμβανε καθημερινή φόρτιση με διαστάλαγμα, μέτρηση όγκου εκροής της κάθε μονάδας και δειγματοληψίες και εργαστηριακές αναλύσεις σε εβδομαδιαία βάση.

#### ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

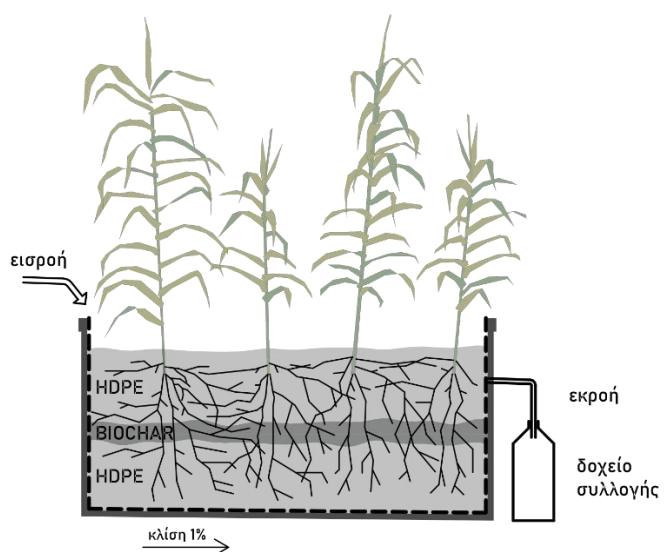
Καθόλη τη διάρκεια της εφαρμογής του διασταλάγματος στις πιλοτικές μονάδες, ο όγκος του λύματος καθώς και οι αραιώσεις των εισροών μεταβάλλονταν. Πιο συγκεκριμένα, η αραιώση του λύματος κατά το μεγαλύτερο μέρος του πειράματος ήταν 1:4 (1l διαστάλαγμα και 3l νερό βρύσης), ενώ υπήρξε και ένα μικρό διάστημα όπου πραγματοποιήθηκε αραιώση 1:2. Η μέση ημερήσια παροχή Q για τις μονάδες P και PB ήταν 3.3L/day. Επιπρόσθετα, η διαδικασία εφαρμογής του αραιωμένου διασταλάγματος συνοδεύτηκε, κατά περιόδους, από την προσθήκη ποκίλων δοσολογιών, ανάλογα τις ανάγκες κάθε μονάδας, μεθανόλης με στόχο να αυξηθεί η διαθέσιμη πηγή άνθρακα εντός των μονάδων και να εξεταστεί η συνεισφορά της στη διεργασία της απονιτροποίησης.

**Πίνακας 3.2.** Ημερομηνίες με τις περιόδους διαφορετικής αραίωσης διασταλάγματος & με προσθήκη μεθανόλης.

Ημερομηνίες	12 Απριλίου-22 Απριλίου	23 Απριλίου-18 Μαΐου	19 Μαΐου-27 Μαΐου	28 Μαΐου-1 Ιουλίου	2 Ιουλίου- 20 Αυγούστου
Αραίωση Διασταλάγματος	1:4	1:4	1:2	1:4	1:4
Προσθήκη Μεθανόλης	-	+	+	-	+



**Εικόνα 3.6.** Πιλοτική μονάδα P(Plastic) σε ώριμο στάδιο.



**Εικόνα 3.7.** Πιλοτική μονάδα PB(Plastic&Biochar) σε ώριμο στάδιο.



#### ΤΕΛΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Μετά το διάστημα σχεδόν 5 μηνών και καθημερινής εφαρμογής διασταλάγματος και εβδομαδιαίων δειγματοληψιών, ολοκληρώθηκε η πειραματική διαδικασία. Οι απαραίτητες μετρήσεις, για ένα πλήρες και έγκυρο αποτέλεσμα της λειτουργίας και επεξεργασίας του τεχνητού υγροβιότοπου, είχαν συγκεντρωθεί.

#### ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΥΤΙΚΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ

Αφού ολοκληρώθηκε η πειραματική διαδικασία, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις και στη φυτική βιομάζα των μονάδων, με σκοπό να διαπιστωθεί εάν και σε τί ποσοστό, η ανάπτυξη των φυτών αλληλεπίδρασε με τους ρύπους που προερχόντουσαν από το διαστάλαγμα.

## 3.2 ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ

### 3.2.1 ΔΙΑΣΤΑΛΑΓΜΑ Χ.Υ.Τ.Α. ΧΑΝΙΩΝ

Το διαστάλαγμα που χρησιμοποιήθηκε για την περάτωση του πειράματος προέρχεται από τον Χ.Υ.Τ.Α. Χανίων. Η συγκεκριμένη μονάδα επεξεργασίας διασταλαγμάτων, επεξεργάζεται 12.500 m<sup>3</sup> διασταλάγματα ετησίως. Τα διασταλάγματα μέσω αντλιών οδηγούνται στις δεξαμενές εξισορρόπησης. Τα λύματα που προέρχονται από διάφορες δραστηριότητες της εγκατάστασης, μαζί με τα λύματα της μονάδας κομποστοποίησης, συλλέγονται από δίκτυο σωληνώσεων και καταλήγουν στο αντλιοστάσιο εκπλυμάτων από το οποίο υποβρύχιες αντλίες τα μεταφέρουν στη δεξαμενή εξισορρόπησης.

Με το που φτάσουν τα λύματα στη δεξαμενή εξισορρόπησης, πραγματοποιείται ομογενοποίηση των ρευμάτων των διασταλαγμάτων και επιτυγχάνεται εξισορρόπηση ροής. Στη συνέχεια, ακολουθεί η βιολογική επεξεργασία σε αντιδραστήρες διαλείποντος έργου πλήρους ανάμιξης τύπου Batch (SBR), οι οποίοι είναι τοποθετημένοι σε σειρά. Περιλαμβάνουν δε όλα τα στάδια μιας συμβατής βιολογικής επεξεργασίας όπως αερισμό, ανάμειξη, καθίζηση, απομάκρυνση των επεξεργασμένων λυμάτων και απομάκρυνση ιλύος. Οι δεξαμενές παρέχουν μετρήσεις pH, αιωρούμενων στερεών, διαλυμένου οξυγόνου και σταθμήμετρο ενώ είναι εγκατεστημένοι σε κάθε δεξαμενή αεριστήρες για τον αερισμό των διασταλαγμάτων.

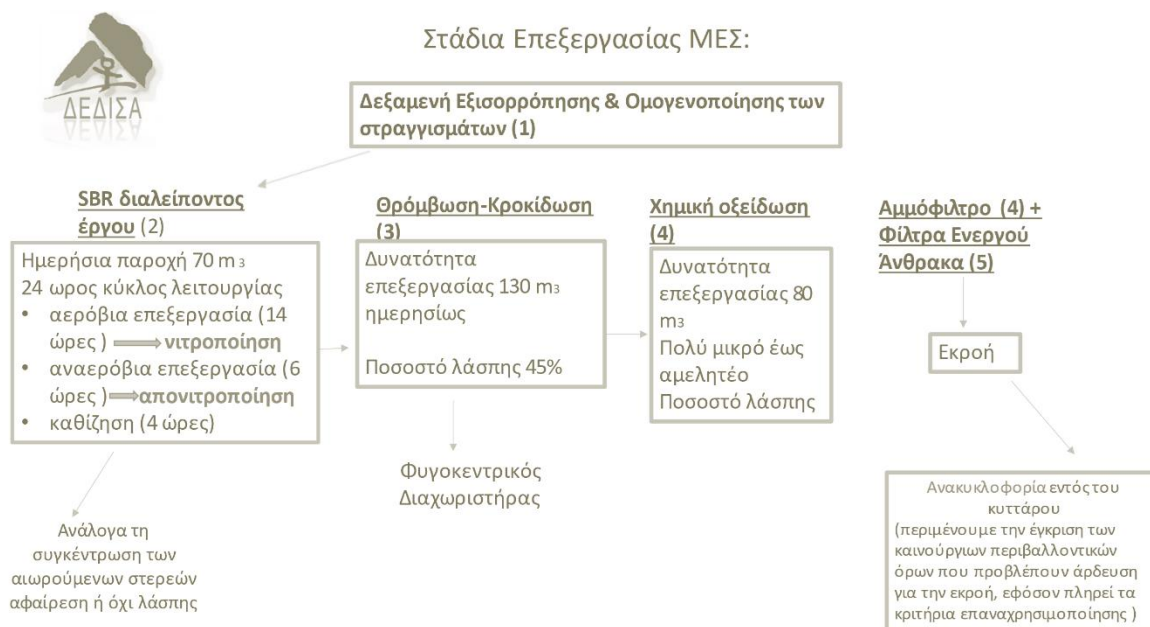
Τα μερικώς επεξεργασμένα διασταλάγματα από τις δεξαμενές SBR αντλούνται με κατεύθυνση τις δεξαμενές κροκίδωσης, στις οποίες προστίθενται αντιδραστήρια και πραγματοποιείται αποσταθεροποίηση των κολλοειδών σωματιδίων και σχηματισμός κροκίδων. Στη συνέχεια, καθιζάνουν και απομακρύνονται τα αιωρούμενα και κολλοειδή σωματίδια. Η διεργασία αυτή επιτυγχάνει τη μείωση των βαρέων μετάλλων, της θολερότητας, του χρώματος και του οργανικού φορτίου. Η ιλύς που προκύπτει από τη διεργασία της κροκίδωσης οδηγείται σε φυγοκεντρικό διαχωριστήρα με σκοπό να αφυδατωθεί.

Τα επεξεργασμένα διασταλάγματα, μετά τη διεργασία της κροκίδωσης οδηγούνται σε διάταξη χημικής οξειδωσης. Η οξείδωση, σε συνδυασμό με τη χρήση οξειδωτικών και τη ρύθμιση του pH, απομακρύνει θειικά, θειώδη, φορμαλδεΰδες, κυανίδια και φαινόλες ενώ ταυτόχρονα μειώνει τη συγκέντρωση των βακτηρίων και άλλων παθογόνων μικροοργανισμών. Ακολούθως μέσω αντλιών ξηρού τύπου οδηγούνται στη μονάδα του ενεργού άνθρακα, η οποία περιλαμβάνει ένα φίλτρο άμμου – ανθρακίτη (όπου γίνεται κατακράτηση αιωρούμενων στερεών) και δύο φίλτρα ενεργού άνθρακα (όπου πραγματοποιείται η τριτοβάθμια επεξεργασία).

Τέλος, τα επεξεργασμένα διασταλάγματα καταλήγουν στην δεξαμενή αποθήκευσης – άρδευσης, απ' όπου μέσω πιεστικού αντλητικού συγκροτήματος τροφοδοτούνται προς το δίκτυο άρδευσης ή επανακυκλοφορούν στην εγκατάσταση.

([www.dedisa.gr](http://www.dedisa.gr))

Παρουσιάζεται σχηματικά το Διάγραμμα λειτουργίας της Μονάδας Επεξεργασίας Στραγγισμάτων (διασταλαγμάτων) (Μ.Ε.Σ.) του Χ.Υ.Τ. Χανίων.



**Εικόνα 3.8.** Στάδια επεξεργασίας και λειτουργίας ΜΕΣ, ([www.dedisa.gr](http://www.dedisa.gr))

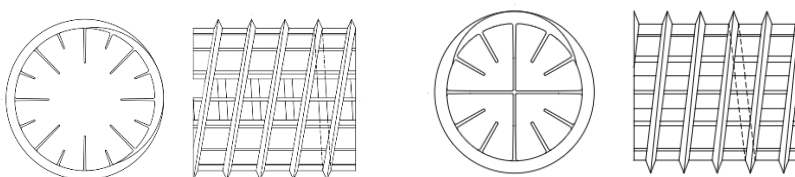
Ως εισροή στις μονάδες χρησιμοποιήθηκε διαστάλαγμα, έπειτα από τις απαραίτητες αραιώσεις όπως φαίνονται στον πίνακα 3.2, το οποίο προερχόταν μετά από το στάδιο της κροκίδωσης και πριν από το στάδιο της χημικής οξείδωσης. Μετά τη συλλογή του από τον Χ.Υ.Τ.Α., το διαστάλαγμα υπόκειται άμεσα σε μια σειρά εργαστηριακών αναλύσεων.

Στο Παράρτημα Α βρίσκεται το διάγραμμα ροής της εγκατάστασης, όπως παραχωρήθηκε από τη Δ.Ε.ΔΙ.Σ.Α..

### 3.2.2 HDPE

Το πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE) είναι ένα θερμοπλαστικό πολυμερές κατασκευασμένο από πετρέλαιο. Χαρακτηρίζεται ως ένα από τα πιο ευέλικτα πλαστικά υλικά, αφού το πλαστικό HDPE έχει ευρεία χρήση, όπως σε δοχεία τροφίμων ή ποτών, σε μπουκάλια σαμπουάν, χλωρίνης, σε σανίδες κοπής, σε σωληνώσεις, σε νήμα για 3-D εκτυπώσεις ενώ η χρησιμότητά του συναντάται και στην πλαστική χειρουργική. Επιπρόσθετα, χαρακτηριστικά του πλεονεκτήματα είναι ότι λιώνει εύκολα και χυτεύεται, είναι ανθεκτικό στη διάβρωση και είναι εύκολα ανακυκλώσιμο. Το HDPE αντικαθιστά συχνά βαρύτερα υλικά και έτσι επιδιώκονται πιο βιώσιμοι και προσιτοί στόχοι παραγωγής και έργων. Χάρη στα παραπάνω στοιχεία, το HDPE είναι ο ιδανικός συνδυασμός αντοχής, οικονομικής απόδοσης και φιλικότητας προς το περιβάλλον.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν δύο μεγέθη ανακυκλωμένου πλαστικού, ως πληρωτικό υλικό των μονάδων, με εμπορικές ετικέτες HX38 Biocarrier και HX25KLL Biocarrier που παρέχονται από την Εταιρία Christian Stöhr GmbH & Co. KG. Χαρακτηριστικά για HX38: ειδική επιφάνεια  $188 \text{ m}^2/\text{m}^3$ , μήκος 38mm και διάμετρος 38mm. Χαρακτηριστικά για HX25KLL: ειδική επιφάνεια  $360 \text{ m}^2/\text{m}^3$ , μήκος 25mm και διάμετρος 25mm. Το πορώδες και των δύο τύπων πλαστικού ανέρχεται στο 95%.



**Εικόνα 3.9.** Απεικόνιση HX38 Biocarrier, 38mm loose Recycled HDPE black και HX25KLL Biocarrier, 25mm loose Recycled HDPE black αντίστοιχα, (<https://www.hel-x.eu/en/technical-details/#hel-x-fuellkoerper>)

Γενικά, κύριες εφαρμογές τους είναι για τη διαχείριση υδατικών λυμάτων, για τις υδατοκαλλιέργειες, για τις ιχθυοκαλλιέργειες και για τις εγκαταστάσεις βιοαερίου. Σε ότι αφορά τη διαχείριση υδατικών λυμάτων, σχετίζονται με την επεξεργασία λυμάτων με διαδικασίες ανάπτυξης βιοφίλμ. Η επιλογή αυτής της επεξεργασίας ολοένα και αναπτύσσεται και τα τελευταία χρόνια προτιμάται από τις συμβατικές μεθόδους. Ουσιαστικά, τα πλεονεκτήματα των διεργασιών βιοφίλμ είναι ο λιγότερος χώρος που απαιτείται, η μικρότερη ποσότητα ενεργοποιημένης λάσπης προς διαχωρισμό και η αυξημένη σταθερότητα της διαδικασίας λόγω του σχηματισμού μιας ακινητοποιημένης και εξειδικευμένης βακτηριακής καλλιέργειας.

Η επιλογή των πλαστικών μέσων βασίστηκε τόσο στα προαναφερθέντα πλεονεκτήματα για επεξεργασία λυμάτων με βιοφίλμ, όσο και σε προηγούμενη εμπειρία για την επεξεργασία αγροβιομηχανικών λυμάτων με φίλτρα διαβροχής (Michailides et al., 2011; Tatoulis et al., 2015). Χαρακτηριστικά πλεονεκτήματα των πλαστικών μέσων σύμφωνα με τους (Tatoulis et al., 2017; Luis et al., 2021) είναι ότι:

- a. έχουν υψηλό πορώδες, καθώς η χρήση πλαστικού υποστρώματος αυξάνει το πορώδες και το υδραυλικό φορτίο του τεχνητού υγροβιότοπου κατά 3 φορές.
- b. μπορούν να δέχονται υψηλά ρυπογόνα φορτία.

- c. ελαχιστοποιείται η έμφραξη υποστρώματος και η απαιτούμενη επιφάνεια κατασκευής τεχνητών υγροβιότοπων.
- d. δεν επηρεάζεται η αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης των ρύπων του τεχνητού υγροβιότοπου με τη χρήση πλαστικού υποστρώματος.
- e. ευκολία στον χειρισμό του τόσο στη μονάδα όσο και στο εργοτάξιο καθώς συγκριτικά με άλλα πληρωτικά μέσα (πχ χαλίκι) είναι ελαφρύτερο.
- f. μειώνεται το κόστος μεταφοράς και η πιθανότητα βλάβης του αδιαπερατού στρώματος.
- g. η χρήση ανακυκλωμένου πλαστικού βελτιώνει τη βιωσιμότητα της διαδικασίας.



**Εικόνα 3.10.** Ανάπτυξη Βιοφίλμ στις μονάδες P&PB μετά το πέρας του πειράματος.

### 3.2.3 ΒΙΟΕΞΑΝΘΡΑΚΩΜΑ

Στο πείραμα χρησιμοποιήθηκαν ως πρώτη ύλη (βιομάζα) κλαδιά ελιάς. Αρχικά, αφού έγιναν οι απαραίτητες διαδικασίες απομάκρυνσης φύλλων και παρακλαδιών, τα κλαδιά τεμαχιστήκαν, με πάχος κορμού διαμέτρου περίπου 2-3 cm. Στη συνέχεια μεταφέρθηκαν τα δείγματα στο εργαστήριο, τοποθετήθηκαν σε δίσκους και εισήχθησαν σε φούρνο ξήρανσης, όπου παρέμειναν για 48h στους 800°C ουτως ώστε να απομακρυνθεί η υγρασία τους.

Μετά την προεργασία τους, τα δείγματα τοποθετήθηκαν σε μεταλλικές κάψες και εισήχθησαν στον φούρνο πυρόλυσης (συνθήκες σταθερής κλίνης). Σύμφωνα με τον πειραματικό σχεδιασμό, η πυρόλυση πραγματοποιήθηκε σε θερμοκρασία 400°C, με ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας ίσο με 6°C/min, συνεχή παροχή καθαρού 99% αζώτου με ρυθμό 200 ml/min και διάρκεια πυρόλυσης 1h από τη στιγμή που επιτυγχανόταν η επιθυμητή θερμοκρασία. Μετά την πυρόλυση, τα δείγματα τοποθετήθηκαν σε ξηραντήρα μέχρι να φτάσουν σε θερμοκρασία δωματίου. Ακολούθως, αποθηκεύτηκαν σε αεροστεγή πλαστικά δοχεία έως ότου χρησιμοποιηθούν.



**Εικόνα 3.11.** Βιοεξανθράκωμα που χρησιμοποιήθηκε στη μονάδα PB.

### 3.2.4 ΒΛΑΣΤΗΣΗ

Γενικά, για να κριθεί ένα φυτό κατάλληλο για χρήση σε τεχνητούς υδροβιότοπους επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, πρέπει να συνδυάζει τα εξής χαρακτηριστικά, σύμφωνα με τους (Tanner et al., 1996):

1. Οικολογική αποδοχή, δηλαδή να μην είναι πιθανή η εμφάνιση ζιζανίων, ασθενειών ή κινδύνων για οικολογική και γενετική ακεραιότητα των φυσικών συστημάτων που εμπλέκονται στο σύστημα αυτό.
2. Αντοχή στις τοπικές κλιματολογικές συνθήκες.
3. Αντοχή σε ρύπους και σε συνθήκες υπερτροφικού στάσιμου νερού.
4. Ταχεία προσαρμογή, ανάπτυξη και εξάπλωση.
5. Υψηλή ικανότητα απομάκρυνσης ρύπων, είτε μέσω άμεσης αφομοίωσης είτε έμμεσα με αύξηση των μικροβιακών μετατροπών, όπως η νιτροποίηση.

Η βασική ιδέα για την κατασκευή τεχνητών υδροβιότοπων είναι η ικανότητα των φυτών να μεταφέρουν στις ρίζες τους οξυγόνο. Τα πιο συνηθισμένα φυτά που χρησιμοποιούνται σε τέτοιες εγκαταστάσεις είναι τα αναδυόμενα υδρόφυτα, και κυρίως το κοινό καλάμι *Phragmites Australis* και το ψαθί *Typha Latifolia*. Λόγω της αντοχής τους σε υψηλή υγρασία, αυξομειώσεις της θερμοκρασίας αλλά και της μεγάλης διάθεσής τους κρίνονται ως τα πλέον αξιόπιστα μακρόφυτα για τεχνητούς υδροβιότοπους.

Επιπλέον, σύμφωνα με τους (Coleman et al., 2001), τα φυτά συνεισφέρουν στην επεξεργασία των υγρών αποβλήτων, ενώ παράλληλα ενισχύουν τη σταθερότητα της επιφάνειας του υποστρώματος, αυξάνουν το πορώδες, προφυλάσσουν το σύστημα του τεχνητού υδροβιότοπου το χειμώνα και βελτιώνουν αισθητικά το περιβάλλον στο οποίο εντάσσονται.

Οι διάφοροι τρόποι συνεισφοράς του φυτού επιτυγχάνονται είτε μέσω του φυτικού ιστού που βρίσκεται εκτός νερού, είτε μέσω των ριζών και των ριζωμάτων. Κύρια χαρακτηριστικά για τον ιστό του φυτού που βρίσκεται εκτός νερού είναι η μείωση του φωτός που εισέρχεται στο σύστημα, άρα και η μείωση στην ανάπτυξη φυτοπλαγκτόν, η λειτουργία του φυτικού ιστού ως σύστημα μόνωσης, η μείωση στην ταχύτητα του ανέμου και η αποθήκευση θρεπτικών. Όσον αφορά τον ιστό εντός του υποστρώματος καθώς και το ριζικό σύστημα του φυτού, ευνοεί το σύστημα του τεχνητού υδροβιότοπου καθώς επιτυγχάνεται διήθηση μεγάλων θραυσμάτων και υλικών, αυξάνεται ο βαθμός της ιζηματοποίησης και η αερόβια αποδόμηση, ενώ ταυτόχρονα καταναλώνονται θρεπτικά. Επιπλέον, σταθεροποιείται η επιφάνεια, απελευθερώνεται οξυγόνο και ευνοούνται οι διεργασίες της οργανικής αποδόμησης καθώς και της νιτροποίησης (EPA, 1995).

Στο συγκεκριμένο πείραμα ως βλάστηση επιλέχθηκε το κοινό καλάμι *Phragmites Australis*, του γένους *Phragmites*. Είναι το πιο σύνηθες φυτό σε υδροβιότοπους και η ανάπτυξη του κορμού του μπορεί να φτάσει από 2 έως 4m (σε ζεστό κλίμα και γόνιμες συνθήκες μπορεί να φτάσει έως και τα 6m) ενώ το μήκος των φύλλων του φτάνει έως και τα 60-70cm. Χαρακτηρίζεται ως ένα ανθεκτικό, φαινοτυπικά και κυτταρολογικά μεταβλητό αναδυόμενο φυτό. Επιπλέον είναι εξαιρετικά προσαρμοστικό φυτό γλυκού και υφάλμυρου νερού. Κατά κύριο λόγο εντοπίζεται σε συστήματα με πληθώρα θρεπτικών συστατικών, σε στάσιμα ή αργά ρέοντα νερά και περιοχές με υψηλή υδάτινη στάθμη ή εποχικά κατακλυζόμενες.

Κύριοι λόγοι επιλογής του, πλην των προαναφερθέντων, είναι ότι έχει μεγάλες ποσότητες βιομάζας τόσο στα φύλλα όσο και στο υπόγειο ριζικό του σύστημα. Ο υπόγειος ιστός του, παρουσιάζει ένα συνδυασμό ριζικών διακλαδώσεων που μπορούν και διεισδύουν στο υπόστρωμα ή στα επιφανειακά στρώματα



ιζήματος. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται η πρόσληψη μεγάλων ποσοτήτων από τα διαθέσιμα θρεπτικά συστατικά, ακόμα και σε συνθήκες περιορισμένου χώρου (βάλτος). Αυτό συνεπάγεται με μια μεγάλη διαθέσιμη επιφάνεια για την απορρόφηση θρεπτικών και ιόντων. Τέλος, αερόβιοι μικροοργανισμοί αναπτύσσονται σε ένα λεπτό στρώμα γύρω από τις ρίζες του, ενώ αναερόβιοι μικροοργανισμοί εντοπίζονται στο υποκείμενο υπόστρωμα (Shutes, 2001). Όπως προαναφέρθηκε, το κοινό καλάμι *P. Australis* κατέχει βασικό ρόλο σε συστήματα επεξεργασίας αποβλήτων από τεχνητούς υγροβιότοπους. Μπορεί να πετύχει απομάκρυνση του αζώτου, παροχή της απαιτούμενης ζήτησης βιολογικού οξυγόνου και μείωση των συνολικών αιωρούμενων στερεών από τα λύματα (Elias and Dykeman, 2009). Τέλος, είναι σημαντικό η επιλογή της βλάστησης του τεχνητού υγροβιότοπου να συμβαδίζει με την βλάστηση τοπικών υγροβιότοπων για καλύτερο αποτέλεσμα, να είναι βιώσιμο στις τοπικές κλιματολογικές συνθήκες, ανθεκτικό σε παράσιτα, έντομα, ασθένειες, αλλά και σε μία μεγάλη ποικιλία ρύπων που συναντώνται στα λύματα (οργανική ύλη, άζωτο, βαρέα μέταλλα κ.α.) (Stefanakis et al., 2014).



**Εικόνα 3.12.** *Phragmites Australis* σε φυσικό υγροβιότοπο των Χανίων.



### 3.2.5 ΜΕΘΑΝΟΛΗ

Κατά την είσοδο τους σε μονάδα επεξεργασίας, τα υγρά απόβλητα περιέχουν μεγάλες συγκεντρώσεις αμμωνίας. Μέσω βακτηριακής δράσης, η αμμωνία μετατρέπεται σε νιτρικά ιόντα. Ωστόσο, τα νιτρικά ιόντα είναι ανεπιθύμητα στα επεξεργασμένα λύματα. Η παρουσία νιτρικών στα απόβλητα οδηγεί σε φαινόμενα ευτροφισμού, δηλαδή σε μια υπερβολική ανάπτυξη ορισμένων αλγών, που μειώνουν τα επίπεδα οξυγόνου, προκαλώντας συνθήκες ασφυξίας στους υδρόβιους οργανισμούς και δημιουργώντας 'νεκρές' ζώνες στους αποδέκτες των λυμάτων.

Για την απομάκρυνση των νιτρικών ιόντων, τα επεξεργασμένα λύματα υπόκεινται στη διαδικασία της απονιτροποίησης, κατά την οποία τα βακτήρια μετατρέπουν τα νιτρικά ανιόντα σε ακίνδυνο αέριο άζωτο, το οποίο απομακρύνεται στην ατμόσφαιρα. Η διαδικασία αυτή είναι αναερόβια και απαιτεί μια πηγή οξειδώσιμου άνθρακα ως τροφή των βακτηρίων. Σκοπός της χρήσης της μεθανόλης  $\text{CH}_3\text{OH}$ , γνωστή και ως μεθυλική αλκοόλη, στο πείραμα είναι ότι αποτελεί ιδανική πηγή άνθρακα και με την παρουσία της επιτυγχάνει σημαντικά τη δράση τους. Επιπλέον, χαρακτηρίζεται ως υδατοδιαλυτή και άμεσα βιοδιασπώμενη.

Ο υπολογισμός για την δοσολογία της προκύπτει από την μέση τιμή συγκέντρωσης του νιτρικού αζώτου  $\text{NO}_3\text{-N}$  των εκροών συνδυαστικά με τον όγκο της εισροής και την αναλογία αραίωσής της. Ως αποτέλεσμα χρειάζεται η αναλογία του βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου  $\text{BOD}_5$  προς τη συγκέντρωση του νιτρικού αζώτου  $\text{NO}_3\text{-N}$  να είναι 4:1. Τέλος, η ποσότητα της μεθανόλης κατά τη διάρκεια του πειράματος σταδιακά αυξανόταν για να διαπιστωθεί εάν και σε τί βαθμό επιδρά στη διαδικασία.

## 3.3 ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

### 3.3.1 ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ

Τόσο το διαστάλαγμα που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα ως εισροή στις μονάδες (initial), όσο και η εκροή τους, υπόκειται σε μια σειρά εργαστηριακών αναλύσεων με σκοπό τον προσδιορισμό του Βιοχημικά Απαιτούμενου Οξυγόνου BOD<sub>5</sub>, του Χημικά Απαιτούμενου Οξυγόνου COD, του Νιτρώδους Αζώτου NO<sub>3</sub>-N, του Νιτρικού Αζώτου NO<sub>2</sub>-N, του Αμμωνιακού Αζώτου NH<sub>4</sub>-N, των Φωσφορικών PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P, των Ολικών Αιωρούμενων Στερεών TSS, του pH, της Ηλεκτρικής αγωγιμότητας, των Μετάλλων και των Μεταλλοειδών.

#### I. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΒΙΟΧΗΜΙΚΑ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟΥ ΟΞΥΓΟΝΟΥ BOD<sub>5</sub>

Για τον προσδιορισμό του βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου BOD<sub>5</sub>, χρησιμοποιήθηκε κατάλληλη φιάλη όγκου 500ml με πιεζομετρικό αισθητήρα OxiTop της εταιρείας WTW. Κάθε φορά επιλεγόταν ο κατάλληλος όγκος δείγματος σύμφωνα με την αναμενόμενη τιμή BOD<sub>5</sub> και ετοποθετείτο στη φιάλη. Στη συνέχεια σφραγιζόταν με μανομετρικό αισθητήρα και τοποθετούνταν σε κατάλληλη βάση, η οποία προσέφερε συνεχή ανάδευση με τη βοήθεια μαγνήτη, σε περιβάλλον 20°C εντός επωαστικού κλιβάνου για διάστημα 5 ημερών.

#### II. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΧΗΜΙΚΑ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟΥ ΟΞΥΓΟΝΟΥ COD

Για τον προσδιορισμό του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου COD, χρησιμοποιήθηκε το kit COD Cell Test HC039826 φασματοφωτομετρικής μεθόδου για εύρος συγκεντρώσεων 25-1000 mg/l της εταιρείας WTW. Αρχικά, συλλέγονται 2ml δείγματος στα φιαλίδια που περιέχονται στο kit και στη συνέχεια τοποθετούνται σε προθερμασμένη εστία στους 148°C για 2h. Ακολούθως, και αφού τα φιαλίδια έχουν φτάσει σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, τοποθετούνται στο φασματοφωτόμετρο της εταιρείας SHIMADZU UV-1202. Το φασματοφωτόμετρο έχει ρυθμιστεί στα 610nm και μηδενιστεί με τη χρήση του τυφλού διαλύματος. Τέλος, υπολογίζονται οι συγκεντρώσεις των δειγμάτων με τη χρήση καμπύλης βαθμονόμησης, η οποία παρουσιάζεται στο Παράρτημα Β.

#### III. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΝΙΤΡΙΚΟΥ ΑΖΩΤΟΥ NO<sub>3</sub>-N

Για τον προσδιορισμό του νιτρικού αζώτου NO<sub>3</sub>-N, χρησιμοποιήθηκε το kit Nitrate Cell Test HC036730 φασματοφωτομετρικής μεθόδου για εύρος συγκεντρώσεων 0.5-25.0 mg/l NO<sub>3</sub>-N της εταιρείας WTW. Αρχικά, πραγματοποιούνται οι απαραίτητες αραιώσεις στα δείγματα και ακολουθεί η διήθησή τους με φίλτρα μεμβράνης Whatman 0.45μm. Στη συνέχεια ακολουθούνται τα απαραίτητα βήματα με τη χρήση του kit και την εισαγωγή των δειγμάτων εντός των φιαλιδίων. Τα φιαλίδια μετρούνται στο φασματοφωτόμετρο της εταιρείας SHIMADZU UV-1202. Το φασματοφωτόμετρο έχει ρυθμιστεί στα 525nm και μηδενιστεί με τη χρήση του τυφλού διαλύματος. Τέλος, υπολογίζονται οι συγκεντρώσεις των δειγμάτων με τη χρήση καμπύλης βαθμονόμησης η οποία παρουσιάζεται στο Παράρτημα Β.

#### IV. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΝΙΤΡΩΔΟΥΣ ΑΖΩΤΟΥ $\text{NO}_2\text{-N}$

Για τον προσδιορισμό του νιτρώδους αζώτου  $\text{NO}_2\text{-N}$ , χρησιμοποιήθηκε το kit Nitrite Cell Test 1.14547.0001 φασματοφωτομετρικής μεθόδου για εύρος συγκεντρώσεων 1.0-90.0 mg/l  $\text{NO}_2\text{-N}$  της εταιρείας Merck. Ακολουθούνται τα απαραίτητα βήματα με τη χρήση του kit για να ολοκληρωθούν οι αντιδράσεις και στη συνέχεια μετριοούνται στο φασματοφωτόμετρο της εταιρείας SHIMADZU UV-1202. Το φασματοφωτόμετρο έχει ρυθμιστεί 605nm και μηδενιστεί με τη χρήση του τυφλού διαλύματος. Τέλος, υπολογίζονται οι συγκεντρώσεις των δειγμάτων με τη χρήση καμπύλης βαθμονόμησης η οποία παρουσιάζεται στο Παράρτημα Β.

#### V. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΑΜΜΩΝΙΑΚΟΥ ΑΖΩΤΟΥ $\text{NH}_4\text{-N}$

Για τον προσδιορισμό του αμμωνιακού αζώτου  $\text{NH}_4\text{-N}$ , χρησιμοποιήθηκε το kit Ammonium Test 1.00683.0001 φασματοφωτομετρικής μεθόδου για εύρος συγκεντρώσεων 2.0-150 mg/l  $\text{NH}_4\text{-N}$  της εταιρείας Supelco. Ακολουθούνται τα απαραίτητα βήματα με τη χρήση του kit για να ολοκληρωθούν οι αντιδράσεις και μετριοούνται στο φασματοφωτόμετρο της εταιρείας SHIMADZU UV-1202. Το φασματοφωτόμετρο έχει ρυθμιστεί στα 690nm και μηδενιστεί με τη χρήση του τυφλού διαλύματος. Τέλος, υπολογίζονται οι συγκεντρώσεις των δειγμάτων με τη χρήση καμπύλης βαθμονόμησης η οποία παρουσιάζεται στο Παράρτημα Β.

#### VI. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΦΩΣΦΟΡΙΚΩΝ $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$

Για τον προσδιορισμό του φωσφόρου σε μορφή φωσφορικών  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ , ακολουθείται η πρότυπη μέθοδος 4500-P Ascorbic method, σύμφωνα με την οποία απαιτείται η παρασκευή ενός αντιδραστηρίου (combined reagent) που περιέχει τα παρακάτω συστατικά:

1. Sulfuric Acid 5M : 70mL στα 500mL
2. Ammonium Molybdate : 20g στα 500mL
3. Potassium Antimonyl Tartrate: 1.3715g στα 500mL
4. Ascorbic Acid : 1.76g στα 100mL

Με το πέρας της παρασκευής των παραπάνω, παρασκευάζεται το combined reagent 100ml όπου περιέχει τις παρακάτω δοσολογίες:

- 50ml από το (1)
- 15ml από το (2)
- 5ml από το (3)
- 30ml από το (4)

Έπειτα, προστίθενται 8ml του παραπάνω διαλύματος σε 50ml διηθημένου δείγματος με φίλτρο 0.45μm. Ύστερα, πραγματοποιείται μέτρηση των διαλυμάτων στο φασματοφωτόμετρο της εταιρείας SHIMADZU UV-1202. Το φασματοφωτόμετρο έχει ρυθμιστεί στα 880nm και μηδενιστεί με τη χρήση του τυφλού διαλύματος. Τέλος, υπολογίζονται οι συγκεντρώσεις των δειγμάτων με τη χρήση καμπύλης βαθμονόμησης, η οποία παρουσιάζεται στο Παράρτημα Β.

## VII. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΟΛΙΚΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ TSS

Για τον προσδιορισμό των ολικών αιωρούμενων στερεών TSS, αρχικά ζυγίζονται, πριν χρησιμοποιηθούν, τα υαλόφιλτρα διήθησης τύπου GF/C της εταιρείας Whatman και διαμέτρου 47mm σε ζυγό SHIMADZU LIBROR AEG-220 ακρίβειας 0.0001g και ύστερα από καλή ανάδευση των δειγμάτων διηθείται ποσότητα 75ml στα παραπάνω φίλτρα με την βοήθεια αντλίας κενού της εταιρείας Vaccubrand παροχής 3.6 / 4.0 m<sup>3</sup>/h. Στη συνέχεια τα φίλτρα τοποθετούνται στον φούρνο για ξήρανση στους 103°C για 1h. Έπειτα, αφού επιστρέψουν σε θερμοκρασία δωματίου, πραγματοποιείται εκ νέου ζύγιση και ο προσδιορισμός της ξηρής μάζας τους. Ο προσδιορισμός των ολικών αιωρούμενων στερεών γίνεται ως εξής:

$$TSS\left(\frac{mg}{L}\right)=\frac{\text{βάρος φίλτρου μετά (g)}-\text{βάρος φίλτρου πριν(g)}}{\text{όγκος διηθημένου δείγματος (L)}} \star 1000$$



**Εικόνα 3.13.** Διήθηση, με τη βοήθεια αντλίας κενού, 75ml δείγματος για τον προσδιορισμό των αιωρούμενων στερεών.

## VIII. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ pH

Ο προσδιορισμός του pH γίνεται με τη συσκευή CRISON microPH 2002. Πριν από τις μετρήσεις των δειγμάτων πραγματοποιείται βαθμονόμηση της συσκευής με δύο διαλύματα με pH 4 και 7. Στη συνέχεια βυθίζοντας το ηλεκτρόδιο της συσκευής στο κάθε δείγμα μετριοούνται και καταγράφονται οι τιμές τους.



Εικόνα 3.14. Μέτρηση pH σε δείγμα εκροής

## IX. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ (ELECTRICAL CONDUCTIVITY)

Ο προσδιορισμός της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των δειγμάτων πραγματοποιείται μέσω της συσκευής CRISON microCM 2202. Η διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται βυθίζοντας το ηλεκτρόδιο στα δείγματα και καταγράφοντας τις τιμές τους

## X. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑΛΛΟΕΙΔΩΝ

Για τον προσδιορισμό των ολικών μετάλλων στις εισροές συλλέγονται 50mL από το δείγμα, τους προστίθεται 1ml πυκνό νιτρικό  $\text{HNO}_3$  και 5ml  $\text{HCl}$ . Στη συνέχεια χωνεύονται έως ο όγκος του δείγματος να φτάσει τα 15ml. Έπειτα προστίθεται απιονισμένο νερό έως ο όγκος να φτάσει ξανά τα 50ml. Στη συνέχεια το δείγμα διηθείται με φίλτρο μεμβράνης Whatman 0.45μm και τα φιαλίδια τοποθετούνται σε ψυγείο μέχρι τη μέτρησή τους. Η ολική συγκέντρωση μετάλλων προσδιορίστηκε στο σύστημα Φασματομετρίας ατομικών μαζών σε επαγωγικά συζευγμένο πλάσμα (ICP-MS) του οίκου Agilent μοντέλο CX 7500 series, στο εργαστήριο Υδρογεωχημικής Μηχανικής και Αποκατάστασης Εδαφών της Σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Στα δείγματα των εκροών, λόγω χαμηλής περιεκτικότητας σε στερεά δεν πραγματοποιείται η παραπάνω χώνευση και τα μέταλλα προσδιορίζονται με την εξής διαδικασία. Αρχικά, συλλέγονται 10mL διηθημένου με φίλτρο μεμβράνης Whatman 0.45μm δείγματος και στη συνέχεια προστίθεται 1mL πυκνού νιτρικού οξέος  $\text{HNO}_3$ . Τέλος, τα φιαλίδια τοποθετούνται σε ψυγείο μέχρι τη μέτρησή τους. Η συγκέντρωση μετάλλων προσδιορίζεται στο σύστημα Φασματομετρίας ατομικών μαζών σε επαγωγικά συζευγμένο

πλάσμα (ICP-MS) του οίκου Agilent μοντέλο CX 7500 series, στο εργαστήριο Υδρογεωχημικής Μηχανικής και Αποκατάστασης Εδαφών της Σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης

### 3.3.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΓΙΑ ΦΥΤΙΚΗ ΒΙΟΜΑΖΑ

Αρχικά μετρήθηκε το πλήθος και το μέγιστο ύψος κορμού κάθε μονάδας και στη συνέχεια αφαιρέθηκε η φυτική βλάστηση από τις μονάδες και διαχωρίστηκε σε κορμούς, ρίζες και φύλλα. Έπειτα, ζυγίστηκε η κάθε επιμέρους ομάδα (κορμοί, ρίζες, φύλλα) προσδιορίζοντας την υγρή τους μάζα και έπειτα από διάστημα ξήρανσης 4 ημερών στο 40°C, ζυγίστηκε ξανά για να προσδιοριστεί η ξηρή τους μάζα.

Μετά τη διαδικασία ξήρανσης, ακολούθησε ο τεμαχισμός των επιμέρους κλασμάτων (κορμοί, ρίζες, φύλλα) σε μαχαιρόμυλο PULVERISETTE 19 της εταιρίας FRITSCH με διάμετρο εξόδου σωματιδίων <0,5mm. Η διαδικασία αυτή έλαβε χώρα στο εργαστήριο Διαχείρισης Τοξικών και Επικίνδυνων Αποβλήτων της Σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης. Στη συνέχεια ακολούθησαν οι πειραματικές διαδικασίες προσδιορισμού Ολικών Μετάλλων, Ολικού Φωσφόρου και Ολικού Αζώτου.



**Εικόνα 3.15.** Δείγματα των μονάδων P&PB από κορμούς, ρίζες, φύλλα, πριν και μετά την κονιορτοποίησή τους στο μαχαιρόμυλο.

## I. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΟΛΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΤΜ

Για τον προσδιορισμό ολικών μετάλλων ΤΜ, ζυγίζεται 0.5g από το κάθε τεμαχισμένο κλάσμα (κορμοί, ρίζες, φύλλα), προστίθεται 10mL πυκνού νιτρικού οξέος και τέλος πραγματοποιείται χώνευση στους 120°C για 2h. Έπειτα, γίνεται διήθηση των δειγμάτων με φίλτρο μεμβράνης Whatman 0.45μm και συμπλήρωση τους με απιονισμένο νερό έως τελικό όγκο 10mL. Από το διάλυμα αυτό συλλέγεται 1ml και τοποθετείται σε φιαλίδια μαζί με 9mL απιονισμένου νερού. Η ολική συγκέντρωση μετάλλων προσδιορίζεται στο σύστημα Φασματομετρίας ατομικών μαζών σε επαγωγικά συζευγμένο πλάσμα (ICP-MS) του οίκου Agilent μοντέλο CX 7500 series, στο εργαστήριο Υδρογεωχημικής Μηχανικής και Αποκατάστασης Εδαφών της Σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης.

## II. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΟΛΙΚΟΥ ΦΩΣΦΟΡΟΥ ΤΡ

Για τον προσδιορισμό ολικού φωσφόρου ΤΡ, ζυγίζεται 1g από το κάθε τεμαχισμένο κλάσμα (κορμοί, ρίζες, φύλλα) σε πορσελάνινες κάψες, οι οποίες στη συνέχεια εισέρχονται στο φούρνο High Therm της εταιρείας Linn στους 500°C για 4h. Έπειτα, τους προστίθεται ποσότητα 10mL HCl 1M και τοποθετούνται σε θερμαντικό μάτι στους 150°C έως ότου διαλυτοποιηθούν τα στερεά. Στη συνέχεια, προστίθεται απιονισμένο νερό έως ότου ο τελικός όγκος φτάσει περίπου στα 12mL. Τέλος, τα δείγματα εισέρχονται στη φυγόκεντρο για 4min στα 4000rpm. Ακολουθεί η ρύθμιση του pH σε εύρος 6 έως 7 και συμπληρώνεται έως τα 25mL με απιονισμένο νερό και διηθείται με φίλτρο μεμβράνης Whatman 0.45μm. Τέλος, ακολουθεί η διαδικασία της πρότυπης μεθόδου 4500-P Ascorbic method, όπως αναλύεται παραπάνω, με τη διαφορά ότι σε 25ml δείγματος προστίθενται 4mL από το combined reagent. Η μέτρηση τους πραγματοποιείται στο φασματοφωτόμετρο της εταιρείας SHIMADZU UV-1202, όπου έχει ρυθμιστεί στα 880nm. Στο παράρτημα Β παρουσιάζονται οι καμπύλες βαθμονόμησης.

## III. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΟΛΙΚΟΥ ΑΖΩΤΟΥ ΤΝ

Για τον προσδιορισμό του ολικού αζώτου ΤΝ, ζυγίζεται 0.5g από τα κονιορτοποιημένα δείγματα, προστίθενται 10mL H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> και 10 σταγόνες H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> και πραγματοποιείται χώνευση στους 350°C για 30min. Με το πέρας των 30min προστίθενται άλλες 10 σταγόνες H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> και αφού περάσουν επιπλέον 30min ολοκληρώνεται ο πρώτος κύκλος της διαδικασίας. Ακολουθούν άλλοι δύο όμοιοι κύκλοι. Ύστερα, αφού έρθουν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, προστίθεται στο κάθε δείγμα απιονισμένο νερό έως τελικό όγκο 14mL και πραγματοποιείται φυγοκέντρωση για 4min στα 4000rpm. Έπειτα, συλλέγεται 1mL δείγματος, και ακολουθεί η διαδικασία του kit Nitrogen (Total) Cell Test 1.4763.0001 φασματοφωτομετρικής μεθόδου της Merck για εύρος συγκεντρώσεων 10.0-1500.0 mg/l N. Τέλος, πραγματοποιείται φωτομέτρηση στο μηχάνημα Merck NOVA 60, το οποίο περιέχει έτοιμη την καμπύλη βαθμονόμησης και οι μετρήσεις δίνονται απεύθείας σε mg/L.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

## 4.1 ΦΥΤΙΚΗ ΒΙΟΜΑΖΑ

Μετά το πέρας του πειράματος, έγιναν αναλύσεις και στη φυτική βιομάζα των μονάδων, η οποία διαπιστώνεται ότι αποτέλεσε σημαντικό παράγοντα και στα υπόλοιπα αποτελέσματα των εκροών και των αποδόσεων των μονάδων P και PB. Αρχικά μετρήθηκε το πλήθος των ριζών στη μονάδα P και στη μονάδα PB, με τα αποτελέσματα να δείχνουν ότι στη μονάδα PB επικρατούσαν ιδανικότερες συνθήκες ανάπτυξης καθώς το πλήθος των ριζών ήταν σχεδόν διπλάσιο από ότι στη μονάδα P. Πιο συγκεκριμένα, το πλήθος των ριζών στη μονάδα PB εντοπίστηκε στις 100 ρίζες, ενώ στη μονάδα P το πλήθος ήταν 51 ρίζες, γεγονός που όπως διαπιστώθηκε συνέβαλε σημαντικά στη μέση μηνιαία εξατμισοδιαπνοή αλλά και στην απομάκρυνση του αζώτου από το σύστημα. Παράλληλα, μετρήθηκε και το ύψος του υψηλότερου κορμού και στις δύο μονάδες. Στη μονάδα P το ύψος του υψηλότερου κορμού ανερχόταν στα 1.5m, ενώ στη μονάδα PB το αντίστοιχο ύψος ανερχόταν στα 1.35m. Αφού πραγματοποιήθηκαν αυτές οι μετρήσεις, τα καλάμια της κάθε μονάδας τεμαχίστηκαν και διαχωρίστηκαν σε κορμούς, ρίζες και φύλλα, με σκοπό να διαπιστωθεί σε τι βαθμό συνεισέφεραν στην απομάκρυνση ρύπων από τους τεχνητούς υγροβιότοπους, και να μελετηθεί η απορρόφησή τους σε μέταλλα και μεταλλοειδή, φώσφορο και άζωτο. Παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας 4.1 με τις μετρήσεις της φυτικής βιομάζας των μονάδων P και PB καθώς και ο πίνακας 4.2 με τα αποτελέσματα των αναλύσεων στη φυτική βιομάζα.

**Πίνακας 4.1.** Μετρήσεις της φυτικής βιομάζας των μονάδων P και PB.

	P		PB	
Πλήθος Ριζών	51		100	
Μέγιστο Ύψος Κορμού (m)	1.5		1.35	
	Υπόγεια Βιομάζα	Υπέργεια Βιομάζα	Υπόγεια Βιομάζα	Υπέργεια Βιομάζα
Υγρή Βιομάζα(kg/m <sup>2</sup> )	3.32	2.13	3.94	3.06
Ξηρή Βιομάζα(kg/m <sup>2</sup> )	1.07	1.17	1.73	1.58

**Πίνακας 4.2.** Αποτελέσματα αναλύσεων στη φυτική βιομάζα για μέταλλα και μεταλλοειδή, ολικό φώσφορο & ολικό άζωτο στις μονάδες P και PB.

Συγκέντρωση Μετάλλων και Μεταλλοειδών στη φυτική βιομάζα	Κορμοί		Ρίζες		Φύλλα	
	P	PB	P	PB	P	PB
B (mg/kg)	3.8	2.6	16.4	23.6	59.2	72.4
Mg (mg/kg)	892.6	324.6	1162.0	1217.0	2158.8	3434.0



K (mg/kg)	4160.0	3981.2	9269.2	10067.2	15534.0	15203.8
Ca (mg/kg)	3913.6	3323.8	7047.6	8609.6	7652.6	10045.0
Cr (mg/kg)	1.8	1.4	3.6	5.8	1.8	0.8
Mn (mg/kg)	36.8	10.6	41.2	57.2	101.4	198.8
Fe (mg/kg)	32.2	27.4	297.0	296.2	92.2	108.6
Co (mg/kg)	0.2	0.2	0.6	0.8	0.2	0.2
Ni (mg/kg)	0.2	Δ.Α.	0.18	1.6	0.1	Δ.Α.
Cu (mg/kg)	2.4	2.8	21.8	7.4	2.6	4.8
Zn (mg/kg)	457.8	127.0	119.2	105.8	63.2	278.4
As (mg/kg)	-	-	-	-	-	-
Se (mg/kg)	-	-	-	-	-	-
Mo (mg/kg)	0.8	0.2	1.4	0.6	0.6	0.4
Cd (mg/kg)	-	-	-	-	-	-
Hg (mg/kg)	0.4	0.06	0.1	0.1	0.04	0.08
Pb (mg/kg)	Δ.Α.	Δ.Α.	3.0	1.0	0.4	0.6
Πρόσληψη Ολικού Φωσφόρου από φυτική βιομάζα	Κορμοί		Ρίζες		Φύλλα	
	P	PB	P	PB	P	PB
	(mg/kg)	5.55	9.78	8.66	4.38	4.38
Πρόσληψη Ολικού Αζώτου από φυτική βιομάζα	Κορμοί		Ρίζες		Φύλλα	
	P	PB	P	PB	P	PB
	(mg/kg)	2968	2128	700	616	2268

Ο πιο σημαντικός ρόλος των φυτών σε τεχνητούς υγροβιότοπους είναι η πρόσληψη και αποθήκευση θρεπτικών ουσιών και βαρέων μετάλλων (Maddison et al., 2005; Vymazal and Březinová, 2015), η λειτουργία τους σαν πηγή άνθρακα για τον μικροβιακό μεταβολισμό, η παροχή περιοχών προσκόλλησης για τα μικρόβια πάνω στο εκτεταμένο ριζικό τους σύστημα και η μεταφορά οξυγόνου μέσω των ριζών (Στεφανάκης, 2011). Έχει παρατηρηθεί ότι η απευθείας λήψη θρεπτικών (άζωτο και φώσφορος) από τα φυτά είναι αυξάνεται καθώς τα φυτά αναπτύσσονται. Εάν η γηρασμένη βιομάζα δεν αφαιρεθεί από το σύστημα, τόσο τα θρεπτικά συστατικά όσο και τα βαρέα μέταλλα διοχετεύονται πίσω στο νερό. Έχουν υπάρξει πολυάριθμες αναφορές για την απομάκρυνση των θρεπτικών ουσιών μέσω της συγκομιδής φυτών σε κατασκευασμένους υγροτόπους, ειδικά για το κοινό καλάμι *Phragmites Australis* (Březinová et al, 2022).

#### 4.1.1 ΜΕΤΑΛΛΑ ΚΑΙ ΜΕΤΑΛΛΟΕΙΔΗ

**Πίνακας 4.3.** Συγκέντρωση (mg/kg) μετάλλων και μεταλλοειδών σε κορμούς, ρίζες και φύλλα για τις μονάδες P και PB.

Παράμετρος	Κορμοί		Ρίζες		Φύλλα	
	P	PB	P	PB	P	PB
B (mg/kg)	3.8	2.6	16.4	23.6	59.2	72.4
Mg (mg/kg)	892.6	324.6	1162.0	1217.0	2158.8	3434.0
K (mg/kg)	4160.0	3981.2	9269.2	10067.2	15534.0	15203.8
Ca (mg/kg)	3913.6	3323.8	7047.6	8609.6	7652.6	10045.0
Cr (mg/kg)	1.8	1.4	3.6	5.8	1.8	0.8
Mn (mg/kg)	36.8	10.6	41.2	57.2	101.4	198.8
Fe (mg/kg)	32.2	27.4	297.0	296.2	92.2	108.6
Co (mg/kg)	0.2	0.2	0.6	0.8	0.2	0.2
Ni (mg/kg)	0.2	Δ.Α.	0.18	1.6	0.1	Δ.Α.
Cu (mg/kg)	2.4	2.8	21.8	7.4	2.6	4.8
Zn (mg/kg)	457.8	127.0	119.2	105.8	63.2	278.4
As (mg/kg)	-	-	-	-	-	-
Se (mg/kg)	-	-	-	-	-	-
Mo (mg/kg)	0.8	0.2	1.4	0.6	0.6	0.4
Cd (mg/kg)	-	-	-	-	-	-
Hg (mg/kg)	0.4	0.06	0.1	0.1	0.04	0.08
Pb (mg/kg)	Δ.Α.	Δ.Α.	3.0	1.0	0.4	0.6

\* Στον πίνακα 4.3, όπου Δ.Α., η τιμή δεν ανιχνεύθηκε.

Από τον πίνακα 4.3 διαπιστώνεται ότι οι μονάδες P και PB παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά σχετικά με τη συγκέντρωση των μετάλλων στους κορμούς, στις ρίζες και στα φύλλα τους. Πιο αναλυτικά, διαπιστώνεται ότι τα στοιχεία B, Mg, K, Ca και Mn έχουν τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις τους στα φύλλα των φυτών. Από την άλλη πλευρά, τα στοιχεία Cr, Fe, Co και Cu εντοπίζονται σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις στις ρίζες των φυτών. Το Ni και Pb εντοπίζονται και αυτά σε μεγαλύτερη συγκέντρωση στις ρίζες των φυτών, ωστόσο παρουσιάζονται και δυο σφάλματα στις μετρήσεις αυτές, εξαιτίας πιθανής παρεμπόδισης του οργάνου κατά τη διαδικασία της μέτρησης, επομένως δεν είναι δυνατόν να προκύπτει ένα απολύτως έγκυρο αποτέλεσμα. Τα στοιχεία As, Se, Mo, Cd και Hg είτε εντοπίζονται κάτω του ανιχνεύσιμου ορίου είτε σε παρά πολύ μικρές συγκεντρώσεις. Διαπιστώνεται επίσης, ότι το Zn διαφέρει σε σχέση με το πού εντοπίζεται σε μεγαλύτερη συγκέντρωση μεταξύ των δύο μονάδων, καθώς στη μονάδα P έχει τη μέγιστη συγκέντρωση στον κορμό του, ενώ στη μονάδα PB έχει τη μέγιστη συγκέντρωση στα φύλλα του. Τέλος, σημάδια τοξικότητας παρουσιάστηκαν τον Αύγουστο, τελευταίο μήνα του πειράματος (πχ. κιτρίνισμα φύλλων) και ενδέχεται τότε να ήταν και η μεγαλύτερη απορρόφησή τους σε βαρέα μέταλλα, αφού όπως προαναφέρθηκε όσο μεγαλώνει το φυτό, τόσο αυξάνεται και η συγκέντρωση των βαρέων μετάλλων σε αυτό.

Τα αποτελέσματα του πειράματος, συνάδουν με αποτελέσματα άλλων μελετών που αφορούν την απορρόφηση των φυτών τεχνητών υγροβιοτόπων σχετικά με τα βαρέα μέταλλα όπως Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Mo, Cd, Hg και Pb. Σύμφωνα με τους (Barley et al. 2005; Březinová et al., 2022; Khan et al.

2009; Sheoran & Sheoran, 2006) τα φυτά στους τεχνητούς υδροβιότοπους φαίνεται πως έχουν την τάση να συγκρατούν σημαντικές ποσότητες μετάλλων κατά βάση στα υπόγεια τμήματά τους (ρίζες) και δευτερευόντως στα άκρα (φύλλα) των υπέργειων τμημάτων τους. Οι ρίζες έχει αναφερθεί ότι είναι οι πιο ωφέλιμες για τη φυτοσταθεροποίηση των μεταλλικών ρύπων. Επιπλέον, το κοινό καλάμι *Phragmites Australis* διαπιστώνεται ιδιαίτερα ανθεκτικό στις συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων, καταδεικνύοντας το έτσι ιδανικό φυτό για χρήση σε αυτά τα συστήματα. Το κοινό καλάμι *Phragmites australis* δεσμεύει περισσότερα μέταλλα σε σχέση με άλλα μακρόφυτα που έχουν χρησιμοποιηθεί σε τεχνητούς υδροβιότοπους (Sheoran & Sheoran, 2006).

Οι μεγάλες συγκεντρώσεις του μαγνησίου Mg, καλίου K και ασβεστίου Ca που παρατηρήθηκαν κατά κύριο λόγο στα φύλλα των φυτών είναι αναμενόμενες, καθώς τα τρία αυτά στοιχεία είναι από τα πιο βασικά για την ανάπτυξη και τη ζωή των φυτών. Πιο αναλυτικά, το Mg παίζει σημαντικό ρόλο στην ενεργοποίηση των ενζύμων που εμπλέκονται στην αναπνοή, τη φωτοσύνθεση και τη σύνθεση νουκλεϊκών οξέων. Βοηθά στο μεταβολισμό των φωσφορικών, χρησιμεύοντας ως φορέας φωσφορικών ενώσεων μέσω του φυτού. Σχετικά με το K, χαρακτηρίζεται ως ένα από τα τρία βασικά μακροθρεπτικά συστατικά των φυτών, εμπλέκεται στην ενεργοποίηση ενζυματικών συστημάτων στο φυτικό κύτταρο και στη σύνθεση πρωτεϊνών, βιταμινών, αμύλου και κυτταρίνης που διασφαλίζουν τον φυσιολογικό μεταβολισμό των φυτών, την ανάπτυξη των φυτών. Το K βοηθά στη φωτοσύνθεση, ελέγχει επίσης το άνοιγμα και το κλείσιμο των στομάτων των φύλλων, τα οποία ρυθμίζουν την κατάσταση του νερού στο φυτό. Τέλος, το Ca κατέχει έναν εξαιρετικά σημαντικό ρόλο στην παραγωγή φυτικών ιστών και επιτρέπει στα φυτά να αναπτυχθούν καλύτερα, είναι υπεύθυνο για τη συγκράτηση των κυτταρικών τοιχωμάτων των φυτών. Είναι επίσης ζωτικής σημασίας για την ενεργοποίηση ορισμένων ενζύμων και για την αποστολή σημάτων που συντονίζουν ορισμένες κυτταρικές δραστηριότητες.

Επιπλέον, σύμφωνα με τους (Stefanakis et al., 2014) η σχετικά χαμηλή απορρόφηση Ni, είναι πιθανό να οφείλεται στην παρουσία ανταγωνιστικών μετάλλων όπως για παράδειγμα το Cu, Fe και Zn. Γενικά, σε σχετικά υψηλές συγκεντρώσεις εντοπίζονται τα στοιχεία Cu, Mn και Zn, τα οποία λειτουργούν ανταγωνιστικά και παρεμποδίζουν την προσρόφηση άλλων μετάλλων. Πιο συγκεκριμένα, η συγκέντρωση του Cu στις ρίζες και η φυτοτοξικότητα του κυρίως εντοπίζεται με μειωμένη ανάπτυξη των ριζών και καταστροφές των μεμβρανών των κυττάρων της ρίζας (Gharbi et al. 2005). Επιπλέον, ο Zn συνδέεται με το μεταβολισμό των πρωτεϊνών, σακχάρων και φωσφορικών μέσα στο σύστημα του φυτού. Συγκριτικά με την συγκέντρωση στις ρίζες, η συγκέντρωση βαρέων μετάλλων στα φύλλα είναι πιο μικρή, εκτός από τα στοιχεία Zn και Mn, τα οποία εμφανίζουν μεγαλύτερη συγκέντρωση στα φύλλα, καθώς είναι τα πιο απαραίτητα μέταλλα για τα φυτά. Επιπρόσθετα, οι (Zazo et al., 2008) αναφέρουν ότι οι αυξημένοι ρυθμοί εξατμισοδιαπνοής από τα φυτά ενισχύουν τη μείωση του Cr(VI) σε Cr(III) λόγω της αντίστοιχης αύξησης των χημικών συστατικών στο νερό. Τέλος σύμφωνα με τους (Batty and Younger, 2007; Stefanakis et al., 2014) η παροχή άνθρακα από την αποσύνθεση των αποβλήτων ευνοεί την κατακρήμνιση οξειδίων του Fe και την προσρόφηση Zn.

#### 4.1.2 ΟΛΙΚΟΣ ΦΩΣΦΟΡΟΣ TP

**Πίνακας 4.4.** Πρόσληψη (mg/kg) φωσφόρου από κορμούς, ρίζες και φύλλα για τις μονάδες P και PB.

Πρόσληψη από φυτική βιομάζα mg/kg	Κορμοί		Ρίζες		Φύλλα	
	P	PB	P	PB	P	PB
	5.55	9.78	8.66	4.38	4.38	18.80

Παρατηρώντας τον Πίνακα 44, διαπιστώνεται ότι η μέγιστη ποσότητα φωσφόρου εντοπίζεται στις ρίζες για τη μονάδα P με 8.66mg/kg και στα φύλλα για τη μονάδα PB με 18.80mg/kg. Η τόσο μεγάλη διαφορά μεταξύ των τιμών της μονάδας P και PB οφείλεται στην ύπαρξη του βιοεξανθρακώματος στη μονάδα PB και στο ότι το βιοεξανθράκωμα προσφέρει φώσφορο στο σύστημα, επομένως δεσμεύεται από τα φυτά της μονάδας PB σε μεγαλύτερη ποσότητα, αφού υπάρχει σε αφθονία. Έτσι τα φυτά της μονάδας PB είναι πιο πλούσια σε θρεπτικά. Ο φώσφορος είναι ένα απαραίτητο θρεπτικό συστατικό, τόσο ως συστατικό πολλών βασικών δομικών ενώσεων των φυτών, όσο και ως καταλύτης σε πολλές βασικές βιοχημικές αντιδράσεις στα φυτά. Ο φώσφορος διακρίνεται ιδιαίτερα για το ρόλο του στη δέσμευση και τη μετατροπή της ενέργειας του ήλιου σε χρήσιμες ενώσεις. Η λήψη φωσφόρου από τα φυτά είναι ένας ακόμη μηχανισμός απομάκρυνσης θρεπτικών από τους τεχνητούς υδροβιότοπους. Σε περίπτωση που τα φυτά ξεραθούν, μικρή ποσότητα επιστρέφεται πίσω στον υδροβιότοπο.

Η απομάκρυνση του φωσφόρου επιτυγχάνεται κατά κύριο λόγο μέσω της προσρόφησής του από τα υλικά του τεχνητού υδροβιότοπου, της χημικής καθίζησης, της μικροβιακής κατανάλωσης, της λήψης από τα φυτά και της ενσωμάτωσης σε οργανικά σωματίδια (Drizo et al. 1999). Η πρόσληψη του φωσφόρου από τα φυτά επιτυγχάνεται με πιο αργούς ρυθμούς σε σχέση την προσρόφησή του στο υπόστρωμα. Κύριο λόγο έχουν οι ρίζες των φυτών, μέσω των οποίων επιτυγχάνεται η πρόσληψή του από τα φυτά. Αυτή η πρόσληψη είναι πιο έντονη του πρώτους μήνες της άνοιξης, περίοδο κατά την οποία αναγεννώνται οι νέοι βλαστοί (Reddy et al., 1999). Σύμφωνα με τους (Stefanakis et al., 2014) η ποσότητα φωσφόρου που αφαιρείται από τα φυτά και η επακόλουθη συγκομιδή της παραγόμενης φυτικής βιομάζας είναι αρκετά μικρή συγκριτικά με τη συνολική αφαιρούμενη ποσότητα, λαμβάνοντας επίσης υπόψη ότι το κύριο μέρος που προσλαμβάνει φώσφορο εντοπίζεται στο ριζικό σύστημα στην υπόγεια βιομάζα.

### 4.1.3 ΟΛΙΚΟ ΑΖΩΤΟ TN

**Πίνακας 4.5.** Πρόσληψη (mg/kg) αζώτου από κορμούς, ρίζες και φύλλα για τις μονάδες P και PB.

Πρόσληψη από φυτική βιομάζα mg/kg	Κορμοί		Ρίζες		Φύλλα	
	P	PB	P	PB	P	PB
	2968	2128	700	616	2268	2520

Παρατηρώντας τον πίνακα 4.5 διαπιστώνεται ότι η μεγαλύτερη απορρόφηση αζώτου πραγματοποιείται στους κορμούς και στα φύλλα των καλαμιών τόσο για τη μονάδα P, όσο και για τη μονάδα PB. Εντοπίζεται μια μικρή διαφοροποίηση της μέγιστης πρόσληψης αζώτου μεταξύ των δύο μονάδων, καθώς η μέγιστη απορρόφηση της φυτικής βιομάζας της μονάδας P εντοπίζεται στους κορμούς με 2968mg/kg, ενώ η αντίστοιχη μέγιστη απορρόφηση της φυτικής βιομάζας της μονάδας PB είναι στα φύλλα με 2520mg/kg. Ωστόσο η πρόσληψη στα φύλλα της μονάδας P και των κορμών της μονάδας PB είναι εξίσου μεγάλη.

Το άζωτο είναι ένα σημαντικό συστατικό των φυτών, καθώς είναι απαραίτητο για τις δομικές, τις γενετικές και τις μεταβολικές ενώσεις στα κύτταρα των φυτών. Είναι επίσης ένα στοιχειώδες συστατικό οργανικών ενώσεων, όπως των αμινοξέων, των πρωτεϊνών, των νουκλεϊκών οξέων, των ενζύμων και του μορίου της χλωροφύλλης. Το άζωτο είναι το θρεπτικό συστατικό που συνήθως παράγει τη μεγαλύτερη απόκριση απόδοσης στα φυτά καλλιεργειών, προάγοντας την ταχεία βλαστική ανάπτυξη και δίνοντας στο φυτό ένα υγιές πράσινο χρώμα. Δεδομένου ότι το άζωτο είναι υπεύθυνο για το πράσινο χρώμα στα φύλλα, ενδεχομένως να εξηγείται το γεγονός ότι τα φύλλα τη μονάδας P κιτρίνισαν γρηγορότερα από τα φύλλα της μονάδας PB, αφού διαπιστώνεται ότι η πρόσληψη αζώτου στα φύλλα της μονάδας P ήταν μικρότερη από την πρόσληψη αζώτου στα φύλλα της μονάδας PB.

Η παρουσία φυτών επιτυγχάνει την απομάκρυνση του αζώτου στους τεχνητούς υδροβιότοπους είτε άμεσα είτε έμμεσα. Τα φυτά απορροφούν και χρησιμοποιούν θρεπτικά συστατικά που υπάρχουν στα λύματα (π.χ. άζωτο και φώσφορο) για να αναπτυχθούν. Η έκταση αυτής της πρόσληψης διαφέρει ανάλογα με τη διαμόρφωση της κλίνης, το ρυθμό φόρτισης, το είδος των λυμάτων, τον τύπο της εγκατάστασης, την πυκνότητα των καλαμιών εντός της κλίνης (συστάδες καλαμιών/m<sup>2</sup>), το ύψος της φυτικής βιομάζας και τις επικρατούσες περιβαλλοντικές συνθήκες (Saeed and Sun, 2012; Stefanakis et al., 2014). Η πρόσληψη του αμμωνιακού αζώτου επιτυγχάνεται μέσω του ριζικού συστήματος, το οποίο και ενσωματώνεται στη βιομάζα του φυτού. Μια ενδιαφέρουσα παρατήρηση, η οποία έχει διαπιστωθεί από μεγάλο εύρος ερευνητών, είναι ότι το μεγαλύτερο μέρος του συσσωρευμένου αζώτου στη φυτική βιομάζα εντοπίζεται στα φύλλα των φυτών. Η περιεκτικότητα σε θρεπτικά συστατικά που αφομοιώνονται στους φυτικούς ιστούς αφαιρείται από το σύστημα με ετήσια συλλογή της παραγόμενης βιομάζας.

## 4.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΒΙΟΞΑΝΘΡΑΚΩΜΑΤΟΣ

Για να χαρακτηριστεί το βιοξανθράκωμα (OT400: Olive Tree 400°C) που παράχθηκε με τη διεργασία της πυρόλυσης, πραγματοποιήθηκε μια σειρά φυσικοχημικών αναλύσεων. Ακολουθεί ο Πίνακας 4.6 με τα αποτελέσματα αναφορικά με την απόδοση της πυρόλυσης, τη μέτρηση του pH και της Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας EC, την περιεκτικότητα σε τέφρα, τον προσδιορισμό της ειδικής επιφάνειας  $S_{BET}$ , της στοιχειακής ανάλυσης των δειγμάτων με σκοπό τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας σε άνθρακα, άζωτο και υδρογόνο, καθώς και της φαινόμενης πυκνότητας και του  $pH_{pzc}$ .

**Πίνακας 4.6.** Αποτελέσματα Φυσικοχημικών αναλύσεων για τον χαρακτηρισμό του βιοξανθρακώματος.

Παράμετροι	Yield (%)	pH	EC (μS/cm)	Ash (%)	$S_{BET}$ (m <sup>2</sup> /g)	TOC(%)	Bulk Density (kg/m <sup>3</sup> )	$pH_{pzc}$
OT400	61.3±0.6	9.0±0.07	226.3±22.2	4.1±0.3	0.4±0.1	89.09	3.1±0.3	11.2

Γενικά, οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν το βιοξανθράκωμα είναι η θερμοκρασία πυρόλυσης, στο πείραμα ήταν 400°C και το ίδιο το υλικό του βιοξανθρακώματος. Σύμφωνα με τον (Ρεγκούζας, 2017) η αύξηση στη θερμοκρασία της πυρόλυσης οδηγεί σε βελτίωση των φυσικοχημικών ιδιοτήτων του βιοξανθρακώματος. Επιπλέον, η απόδοση πυρόλυσης προσδιορίζεται από το yield. Το δείγμα του πειράματος, το οποίο προέρχεται από κλαδιά ελαιόδεντρων, έχει καλή απόδοση της τάξης του 61.3%. Επιπλέον, η τιμή του pH είναι γύρω στο 9, ενώ η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι περίπου 226.3μS/cm.

Μία ακόμα σημαντική παράμετρος που χαρακτηρίζει το δείγμα είναι το ποσοστό της τέφρας, το οποίο είναι και πολύ μικρό και ανέρχεται στο 4.1%. Ουσιαστικά με το ποσοστό της τέφρας εννοούνται τα ανόργανα στοιχεία στη δομή του βιοξανθρακώματος, οι ανόργανες ενώσεις που εμπεριέχονται στη βιομάζα του δείγματος, καθώς και η παρουσία βαρέων μετάλλων. Όλα τα παραπάνω λειτουργούν συνδυαστικά και παρεμποδίζουν την ικανότητα αποθήκευσης του οργανικού άνθρακα στη δομή του βιοξανθρακώματος. Το ποσοστό του ολικού οργανικού άνθρακα στη συγκεκριμένη περίπτωση ανέρχεται στο 89.09%, γεγονός που υποδηλώνει το πόσο πλούσιο σε οργανικό άνθρακα ήταν το συγκεκριμένο βιοξανθράκωμα.

Ένα ακόμα χαρακτηριστικό, το οποίο είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με την προσροφητική ικανότητα του βιοξανθρακώματος είναι η ειδική επιφάνεια  $S_{BET}$ . Στο συγκεκριμένο πείραμα, η τιμή της είναι ίση με 0.4m<sup>2</sup>/g. Ενώ ακόμα η φαινόμενη πυκνότητα του δείγματος είναι 3.1 kg/m<sup>3</sup>. Τέλος, το  $pH_{pzc}$ , δηλαδή το pH στο οποίο το καθαρό φορτίο της συνολικής επιφάνειας του απορροφητικού μέσου των σωματιδίων είναι ίσο με μηδέν, είναι 11.2.

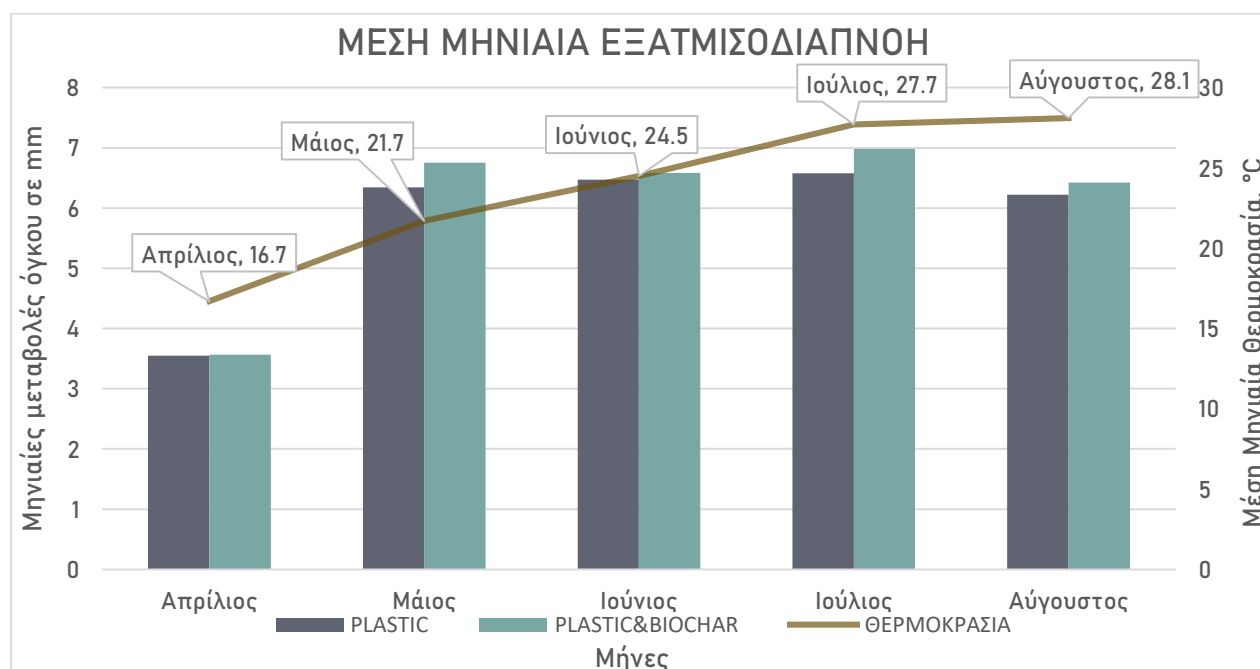
Οι Li et al. (2019b) μελέτησαν διεξοδικά την επίδραση του βιοξανθρακώματος (v/v=10%, 20%) στη διεργασία της απονιτροποίησης σε συστήματα τεχνητών υγροβιότοπων. Η μελέτη έδειξε ότι ο ενεργός οργανικός άνθρακας που απελευθερώθηκε από το βιοξανθράκωμα επιτάχυνε σημαντικά τη διαδικασία απονιτροποίησης. Επιπρόσθετα, η προσθήκη βιοξανθρακώματος (v/v=10%, 20%) αύξησε τη φυτική βιομάζα, με αυτή την αύξηση να συνεπάγεται με την απελευθέρωση στοιχείων άνθρακα και αζώτου από το βιοξανθράκωμα για την παροχή θρεπτικών συστατικών. Σύμφωνα με μελέτες των (Cayuela et al.,

2013; Ding et al., 2010) επισημαίνεται ότι το βιοεξανθράκωμα παρέχει μια ευνοϊκή συνθήκη για το σχηματισμό μικροβιακού βιοφιλμ.

## 4.3 ΥΔΑΤΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ

Καθόλη τη διάρκεια του πειράματος, οι μονάδες φορτίζονταν σε καθημερινή βάση με αραιωμένο διαστάλαγμα συγκεκριμένων ποσοτήτων. Κατά μέσο όρο η ημερήσια παροχή ήταν 3.3 L/d. Μαζί με τον όγκο της ημερήσιας παροχής των μονάδων, μετρούνταν και ο όγκος της ημερήσιας εκροής τους. Τα δεδομένα αυτά, σε συνδυασμό με τη μέση μηνιαία βροχόπτωση συνέβαλαν στο να φτιαχτεί το υδατικό ισοζύγιο, το οποίο μας παρουσιάζει τη μέση μηνιαία εξατμισοδιαπνοή.

Η δημιουργία του υδατικού ισοζυγίου παρέχει πληροφορίες τόσο για τις ίδιες τις μονάδες αλλά και για το πώς επηρεάστηκαν οι μηνιαίες απομακρύνσεις των όγκων κάθε μονάδας και από τα κλιματολογικά στοιχεία που επικρατούσαν αυτούς τους μήνες. Στο διάγραμμα 4.1 που ακολουθεί παρουσιάζεται η μέση μηνιαία εξατμισοδιαπνοή για τις μονάδες P και PB. Γενικά, ως εξατμισοδιαπνοή χαρακτηρίζονται οι απώλειες τους συστήματος μέσω νερού και εδάφους (εξάτμιση) και από τα ανώτερα τμήματα των φυτών (διαπνοή). Η εξατμισοδιαπνοή σχετίζεται με τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής, όπως τη θερμοκρασία, την ηλιακή ακτινοβολία, τις βροχοπτώσεις, την ταχύτητα του ανέμου, την υγρασία και τη βαρομετρική πίεση. Η εξατμισοδιαπνοή αποτελεί σημαντική παράμετρο στην υδρολογική ισορροπία των υδροβιότοπων.



**Διάγραμμα 4.1.** Διάγραμμα μέσης μηνιαίας εξατμισοδιαπνοής για τις μονάδες P και PB και μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας.

Από το διάγραμμα 4.1 παρατηρείται ότι κατά το μήνα Απρίλιο υπάρχει σχεδόν η ίδια απομάκρυνση για τις δύο μονάδες P και PB. Η απομάκρυνση όγκου για τη μονάδα P ισούται με 3.55mm και για τη μονάδα PB ισούται με 3.56mm. Το σύστημα σταθεροποιείται το μήνα Απρίλιο καθώς οι βροχοπτώσεις έχουν σχεδόν σταματήσει (ή είναι πολύ λίγες και δεν επηρεάζουν το σύστημα), ενώ η μέση θερμοκρασία που επικρατεί είναι αυτή των 16.7°C.

Όσον αφορά το μήνα Μάιο, διαπιστώνεται ότι η μέση θερμοκρασία έχει αυξηθεί σημαντικά και μάλιστα κατά 5°C, το οποίο συμβάλλει καθοριστικά στην αύξηση των απωλειών νερού και στην εξατμισοδιαπνοή. Επίσης, για το μήνα Μάιο οι τιμές των απωλειών νερού είναι 6.34mm για τη μονάδα P και 6.75mm για τη μονάδα PB.

Το ίδιο παρατηρείται και τους μήνες Ιούνιο και Ιούλιο κατά τους οποίους η μέση θερμοκρασία αυξήθηκε και άλλο, με μέσες τιμές θερμοκρασίας 24.5°C και 27.7°C, αντίστοιχα. Ακόμα, για το μήνα Ιούνιο οι απομακρύνσεις της μονάδας P ήταν 6.47mm και της μονάδας PB ήταν 6.58mm. Το μήνα Ιούλιο και οι δύο μονάδες είχαν τις μέγιστες απομακρύνσεις με τιμές 6.58mm για τη μονάδα P και 6.98mm για τη μονάδα PB. Η μέση θερμοκρασία του μήνα Ιουλίου κυμαινόταν στους 27.7°C. Γενικά, η αυξημένη δραστηριότητα των φυτών σε θερμοκρασίες πάνω από 15-16°C συνεπάγεται αύξηση του ρυθμού εξατμισοδιαπνοής.

Τέλος, το μήνα Αύγουστο παρατηρείται μια μικρή πτώση των τιμών των απομακρύνσεων, αντίθετα με την αύξηση επιπλέον της μέσης θερμοκρασίας σε 28.1°C. Δηλαδή για τη μονάδα P έχουμε τιμή 6.22mm και για τη μονάδα PB η αντίστοιχη τιμή ισούται με 6.42mm. Αυτό πιθανόν να οφείλεται στο γεγονός ότι το μήνα Αύγουστο τα καλάμια και στις δύο μονάδες είχαν ανάγκη περισσότερου όγκου νερού για να ανταπεξέλθουν στις επικρατούσες συνθήκες και επομένως οι ανάγκες εξατμισοδιαπνοής ήταν μεγαλύτερες. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι οι μήνες από τον Μάιο έως τον Αύγουστο αντιστοιχούν στην περίοδο κατά την οποία τα καλάμια είναι πλήρως ανεπτυγμένα και φθάνουν τη μέγιστη δραστηριότητά τους, άρα και σε υψηλότερα επίπεδα διαπνοής.

Από τα διαγράμματα παρατηρείται επίσης ότι η απομάκρυνση όγκου της μονάδας PB ήταν καθόλη τη διάρκεια των πειραμάτων μεγαλύτερη συγκριτικά με την απομάκρυνση της μονάδας P. Το γεγονός αυτό οφείλεται και στο σχεδόν διπλάσιο πλήθος ριζών που εντοπίστηκε στη μονάδα PB και άρα στις πιο αυξημένες ανάγκες της φυτικής βιομάζας για νερό. Από τον πίνακα 4.1, ο οποίος αφορά τις μετρήσεις της φυτικής βιομάζας, εξάγεται το συμπέρασμα ότι όσο μεγαλύτερη τιμή φυτικής βιομάζας ανά επιφάνεια έχει η μονάδα, τόσο μεγαλύτερες είναι οι ανάγκες για περισσότερο όγκο νερού.

Συμπεραίνεται επίσης, ότι κατά τους θερινούς μήνες και όσο αυξάνεται η θερμοκρασία τα φυτά παρουσιάζουν αυξημένη δυνητική εξατμισοδιαπνοή. Η εξατμισοδιαπνοή το καλοκαίρι εντείνεται εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών και της συνακόλουθης υψηλής ροής θερμότητας (έντονη ηλιακή ακτινοβολία), ευνοώντας την εξάτμιση του νερού και περιορίζοντας τη διαθέσιμη ποσότητα νερού για τη διαπνοή των φυτών. Τέλος, σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι και οι δυο μονάδες δεν ήταν τοποθετημένες κάτω από κάποιο σκιερό μέρος, επομένως η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας συνέβαλλε σημαντικά στα παραπάνω αποτελέσματα.



## 4.4 ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΔΙΑΣΤΑΛΑΓΜΑΤΟΣ

### 4.4.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΕΙΣΡΟΗΣ

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3.2.1, το διαστάλαγμα του παρόντος πειράματος προερχόταν από τον Χ.Υ.Τ.Α. Χανίων. Το δείγμα συλλεγόταν αμέσως μετά από τη διαδικασία της κροκίδωσης, όπου καθιζάνουν και απομακρύνονται τα αιωρούμενα και κολλοειδή σωματίδια, ενώ ακόμη μειώνονται τα βαρέα μέταλλα, η θολερότητα, το χρώμα και το οργανικό φορτίο. Στους Πίνακες 4.7 και 4.8 παρουσιάζονται η μέση τιμή και το εύρος τιμών για τις παραμέτρους στην εισροή καθώς και για τα μέταλλα των εισροών, αντίστοιχα.

**Πίνακας 4.7.** Μέση τιμή και εύρος τιμών για παραμέτρους των εισροών.

Παράμετροι	Μέση Τιμή	Εύρος Τιμών
BOD <sub>5</sub>	68.0± 82.2 mg/L	0-150 mg/L
COD	981.6±427.6 mg/L	725-1776 mg/L
NO <sub>3</sub> -N	1034.6±196.8 mg/L	832.1-1305.5 mg/L
NO <sub>2</sub> -N	144.9±30.0 mg/L	91.6-193.8 mg/L
NH <sub>4</sub> -N	131.5± 34.0 mg/L	82-305.4 mg/L
PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> -P	0.75±1.05 mg/L	0.21-1.26 mg/L
TSS	197.6± 87.1 mg/L	65.3-283 mg/L
pH	6.3±0.28	6.06-7.02
EC	6.5 ±2.3 mS/cm	3.68-10.1 mS/cm
BOD <sub>5</sub> /COD	0.07	

**Πίνακας 4.8.** Μέση τιμή και εύρος τιμών για τα μέταλλα και μεταλλοειδή των εισροών.

Παράμετρος	Εισροή	
	Μέση Τιμή (mg/L)	Εύρος Τιμών (mg/L)
B	2.04±0.66	1.57-3.04
Mg	37.13±13.29	25.11-57.33
K	662.65± 486.85	271.79-1379.33
Ca	458.00± 207.96	173.0-641.31
Cr	0.19±0.10	0.11-0.32
Mn	0.08±0.05	0.02-0.15
Fe	2.18±2.94	0.63-8.13
Co	0.03±0.01	0.03-0.04
Ni	0.17±0.01	0.17-0.18
Cu	0.52± 0.47	0.19-0.85
Zn	0.70±0.63	0.15-1.61
As	-	-
Mo	0.11±0.08	0.06-0.20
Cd	-	-
Hg	0.02±0.01	0.01-0.04
Pb	0.02	-

Από τους παραπάνω Πίνακες 4.7 και 4.8 μπορούν να προκύψουν κάποια συμπεράσματα σχετικά με τις τιμές των παραμέτρων της εισροής. Αρχικά, ο λόγος  $BOD_5/COD$  ισούται με 0.07, τιμή που φανερώνει τη μικρή βιοαποδομησιμότητα του λύματος καθώς και τη σταθερότητα που έχει επέλθει στο σύστημα του Χ.Υ.Τ.Α.. Γενικά, οι αναλογίες  $BOD_5/COD$  τυπικά κυμαίνονται μεταξύ 0.03 και 0.76. Ο λόγος  $BOD_5/COD$  χρησιμοποιείται ως δείκτης βιοαποδομησιμότητας της οργανικής ύλης, λόγω μετατροπής της οργανικής ύλης σε φουλβικά και χουμικά οξέα (Tchobanoglous et al., 1993). Οι Χ.Υ.Τ.Α. ηλικίας μεταξύ 3-5 ετών μπορεί να έχουν αναλογίες  $BOD_5/COD$  έως και 0,7, ενώ οι πιο ώριμοι Χ.Υ.Τ.Α. ηλικίας 5-10 ετών, έχουν χαμηλότερο λόγο  $BOD_5/COD$  περίπου 0.3-0.5 (Bakhshoodeh et al., 2020). Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει ότι ο Χ.Υ.Τ.Α. Χανίων βρίσκεται στα τελευταία έτη λειτουργίας του, επομένως και τα διασταλάγματά του χαρακτηρίζονται ως ώριμα.

Η τιμή του COD είναι αυξημένη, με αυτό να συνεπάγεται ότι κάποιες οργανικές ενώσεις μπορεί να είναι τοξικές και να μη μπορούν να οξειδωθούν βιολογικά. Επίσης ο λόγος  $BOD_5/COD$  φανερώνει ότι το απόβλητο είναι δύσκολα βιο-αποικοδομήσιμο. Το αποτέλεσμα είναι λογικό, αφού η διαδικασία της χημικής οξειδωσης ως μέθοδος προεπεξεργασίας μπορεί να βελτιώσει το λόγο αυτό, ωστόσο το δείγμα συλλέγεται ακριβώς πριν από αυτή τη διαδικασία.

Αναφορικά με τη σχετικά αυξημένη συγκέντρωση του  $NO_3-N$ , συμπεραίνεται ότι επικρατούν κυρίως αερόβιες συνθήκες στη φάση, γι' αυτό και τα νιτρικά βρίσκονται σε υψηλές συγκεντρώσεις. Η σχετικά χαμηλή τιμή του  $NO_2-N$  επιβεβαιώνει το συμπέρασμα αυτό. Πιθανός λόγος χαμηλής τιμής συγκέντρωσης  $NO_2-N$  μπορεί να είναι επίσης και η έλλειψη επαρκούς ποσότητας βιολογικής πηγής άνθρακα. Όσον αφορά το  $NH_4-N$  κυμαίνεται και αυτό σε χαμηλά επίπεδα, γεγονός που σχετίζεται άμεσα με το pH αλλά και τη θερμοκρασία που επικρατεί στη φάση αυτή. Τέλος, τα  $PO_4^{3-}-P$  εντοπίζονται σε πολύ χαμηλή συγκέντρωση, ενώ, η ηλεκτρική αγωγιμότητα, κρίνεται και αυτή χαμηλής τιμής συγκριτικά με μελέτες ολοκληρωμένου συστήματος του Χ.Υ.Τ.Α. Χανίων.

Επιπλέον, όπως προαναφέρθηκε, τα διασταλάγματα του πειράματος προέρχονται μετά το στάδιο της κροκίδωσης, γεγονός που συνεπάγεται με το σχετικά υψηλό αριθμό TSS, καθώς είναι πιθανό τα αιωρούμενα στερεά να μην έχουν προλάβει να καθιζάνουν και να επικρατούν σε μορφές συσσωματωμάτων στο λύμα. Μία ακόμα παράμετρος, η οποία δηλώνει το βαθμό σταθεροποίησης του Χ.Υ.Τ.Α., είναι το pH. Δεδομένου ότι το pH που ευνοεί τις ιδανικότερες συνθήκες ανάπτυξης κυμαίνεται μεταξύ 6 έως 8, τα διασταλάγματα χαρακτηρίζονται από αντίστοιχες τιμές pH στη φάση της μεθανογένεσης.

Παράλληλα με την αύξηση ηλικίας του Χ.Υ.Τ.Α. αυξάνονται και τα οξειδωμένα συστατικά που είναι προϊόντα αποικοδόμησης της μικροβιακής δραστηριότητας. Ωστόσο, η συγκέντρωση των ανόργανων συστατικών των διασταλαγμάτων όπως το Ca, Mg, Na, K,  $NH_4^+$ , Fe, Mn, Cl μειώνεται με την αύξηση ηλικίας του Χ.Υ.Τ.Α. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται και από τις τιμές των Πινάκων. Τα περισσότερα κατιόντα όπως Ca, Mg, Fe, Mn είναι ελάχιστα στη φάση της μεθανογένεσης, λόγω του pH και της χαμηλής περιεκτικότητας της διαλυμένης οργανικής ύλης. Το K δε διαφοροποιείται μεταξύ της όξινης και της μεθανογενούς φάσης (Παπασταύρου, 2007). Η προσρόφηση, η συμπλοκοποίηση και η καθίζηση δεν επηρεάζουν σημαντικά το συστατικό αυτό. Σε αυτό οφείλεται και η σχετικά υψηλή τιμή του συγκριτικά με τα υπόλοιπα μέταλλα του Πίνακα 2. Επίσης, με βάση έρευνες τα βαρέα μέταλλα όπως Cr, C, Fe, Zn έχουν υψηλές συγκεντρώσεις σε αρχικό στάδιο, όμως αυτές οι συγκεντρώσεις μειώνονται γρηγορότερα με την ηλικία τους Χ.Υ.Τ.Α. σε σχέση με άλλα ανόργανα συστατικά (Lo et al., 1996). Τέλος, μέταλλα όπως Hg και Co εντοπίζονται σπάνια σε διασταλάγματα, καθώς και το μεταλλοειδές As (Christensen et al., 2001). Παρατηρείται επίσης ότι η συγκέντρωση για Cd και Pb είναι μη ανιχνεύσιμη.

## 4.4.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΕΚΚΡΩΝ

### 4.4.2.1. ΒΙΟΧΗΜΙΚΑ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟ ΟΞΥΓΟΝΟ BOD<sub>5</sub>

Από τα αποτελέσματα σχετικά με τη συγκέντρωση του Βιοχημικά Απαιτούμενου Οξυγόνου BOD<sub>5</sub> στην εκροή των μονάδων Ρ και ΡΒ, συμπεραίνεται ότι το σύστημα κατανάλωνε όλο το παρεχόμενο διαλυμένο οξυγόνο. Γενικά, το BOD είναι ένα χαρακτηριστικό που δείχνει την ποσότητα του διαλυμένου οξυγόνου που χρειάζονται οι μικροοργανισμοί για την αποσύνθεση οργανικών ενώσεων σε αερόβιες συνθήκες. Ουσιαστικά, το BOD είναι μια απεικόνιση της ποσότητας της οργανικής ύλης που αποσυντίθεται εύκολα (Andrino et al., 2019). Ακόμα, το BOD<sub>5</sub> λειτουργεί και σα δείκτης επισημάνσης πιθανής επεξεργασίας με βιολογικές διεργασίες.

Οι μετρήσεις που έλαβαν χώρα στην αρχή του πειράματος είχαν ως αποτέλεσμα πολύ χαμηλές τιμές συγκέντρωσης εκροής, τόσο για τη μονάδα Ρ όσο και για τη μονάδα ΡΒ, συνήθως κάτω από 10-15 mg/L. Για το λόγο αυτό το BOD<sub>5</sub> δεν μετριοτάταν σε εβδομαδιαία βάση. Ανά τακτά χρονικά διαστήματα γινόταν η μέτρηση και επιβεβαιωνόταν το γεγονός αυτό. Ακόμη, ο λόγος BOD<sub>5</sub>/COD βρέθηκε και αυτός αρκετά χαμηλός, με τιμή 0.07, υποδηλώνοντας πως το διαστάλαγμα ήταν πλούσιο σε ανόργανους μη βιοδιασπάσιμους ρύπους.

Τέλος, το BOD είναι απαραίτητο και κατά τη διαδικασία της απονιτροποίησης, καθώς οι μικροοργανισμοί που έχουν αναπτυχθεί εντός των μονάδων το καταναλώνουν μαζί με τα NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Δεδομένου ότι η διαδικασία της απονιτροποίησης, όπως διαπιστώνεται παρακάτω, φάνηκε να δουλεύει σε μεγάλο βαθμό, συμπεραίνεται ότι το BOD είναι λογικό να καταναλώθηκε όλο εντός των μονάδων και οι τιμές συγκέντρωσης στην εκροή να είναι μηδενικές. Σχετικά με τις ιδανικές θερμοκρασίες, δεν αναφέρεται κάποια συγκεκριμένη επίπτωση από ολοκληρωμένες μελέτες πάνω σε συστήματα τεχνητών υγροβιότοπων, καθώς σε θερμοκρασίες από 5°C και άνω επιτυγχάνεται η απομάκρυνση οργανικής ύλης από αερόβια και αναερόβια βακτήρια.

#### 4.4.2.2 ΧΗΜΙΚΑ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟ ΟΞΥΓΟΝΟ COD

**Πίνακας 4.9.** Αποτελέσματα μέσης τιμής και εύρους τιμών συγκέντρωσης COD και μέσης τιμής και εύρους τιμών απομάκρυνσης.

COD	Μέση τιμή Συγκέντρωσης (mg/l)	Εύρος Τιμών Συγκέντρωσης(mg/L)	Μέση Τιμή Απομάκρυνσης (%)	Εύρος Τιμών Απομάκρυνσης (%)
Εισροή	981.64 ± 427.60	725.0 –1776.00	-	-
P	311.44 ± 224.54	84.00 – 750.00	70.52±10.75	57.77–89.13
PB	283.78± 191.78	64.00–692.00	72.54±10.57	59.32–91.72

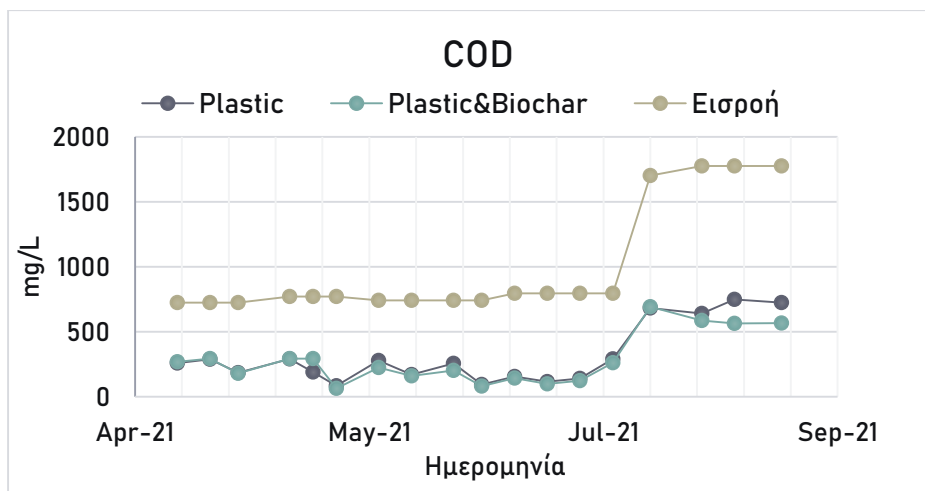
Παρατηρώντας τον Πίνακα 4.9 καθώς και τα διαγράμματα 4.2 και 4.3, σχετικά με τις συγκεντρώσεις εκροής και τις απομακρύνσεις των μονάδων P και PB, διαπιστώνεται ότι η μονάδα PB με μέση τιμή συγκέντρωσης 283.78± 191.78 mg/L έχει μικρότερη τιμή συγκέντρωσης εκροών συγκριτικά με τη μονάδα P, η οποία έχει μέση τιμή συγκέντρωσης εκροών 311.44± 224.54mg/L. Επιπλέον, οι αντίστοιχες αποδόσεις των μονάδων βρίσκονται σε ικανοποιητικά επίπεδα με σχετικά καλύτερα αποτελέσματα αυτά της μονάδας PB και μέση τιμή απομάκρυνσης ίση με 72.54±10.57 %, ενώ για τη μονάδα P ίση με 70.52±10.75%. Τέλος, οι συνθήκες που επικρατούσαν το μήνα Μάιο, Ιούνιο και Ιούλιο φάνηκε να ήταν οι πιο ιδανικές, καθώς εκεί συναντήθηκαν τα μεγαλύτερα ποσοστά απομάκρυνσης και για τις δύο μονάδες. Για τη μονάδα PB το μέγιστο ποσοστό απομάκρυνσης για τους μήνες Μάιο, Ιούνιο και Ιούλιο, έφτασε στο 91.72, 88.9 και 87.4% αντίστοιχα, ενώ για τη μονάδα P το μέγιστο ποσοστό απομάκρυνσης για τους ίδιους μήνες, έφτασε στο 89.13, 87.3 και 85.2%, αντίστοιχα.

Γενικά, η απομάκρυνση της οργανικής ύλης είναι ως επί το πλείστον αποτέλεσμα της μικροβιακής δραστηριότητας αερόβιων και αναερόβιων βακτηρίων (Greenway and Woolley, 1999, Steer et al., 2002, Vymazal, 2002), τα οποία δρουν ακόμη και σε θερμοκρασίες των 5 °C. Εφόσον οι κατώτερες θερμοκρασίες που επικρατούσαν στη διάρκεια του πειράματος ήταν γύρω στους 16.7°C, συμπεραίνεται ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας ευνοείται η απομάκρυνση ρύπων. Παράλληλα με την αύξηση της θερμοκρασίας διαπιστώνεται η ταυτόχρονη μείωση τόσο σε BOD<sub>5</sub> αλλά και σε COD. Η έκταση της αποικοδόμησης και της μετατροπής καθορίζεται επίσης και από την παροχή O<sub>2</sub>, η οποία μπορεί να επηρεαστεί από τη μέθοδο λειτουργίας, την υδραυλική φόρτιση και το είδος του εδαφικού υλικού (Von Felde & Kunst, 1997). Επιπλέον, η οργανική ύλη απομακρύνεται με καθίζηση και φυσική διήθηση, ακολουθούμενη από υδρόλυση. Η εξάτμιση μπορεί επίσης να είναι ένας σημαντικός μηχανισμός απομάκρυνσης οργανικών ρύπων.

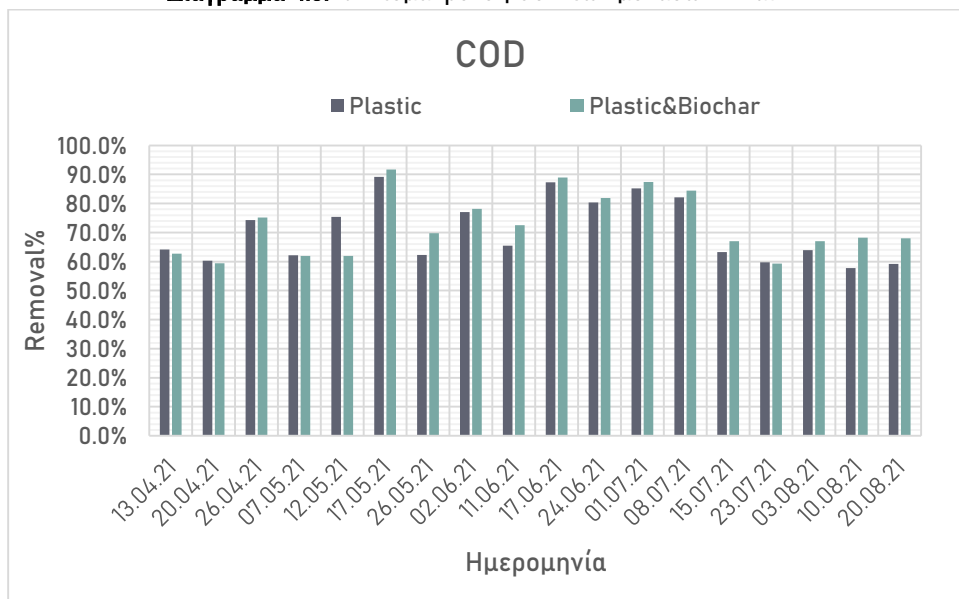
Ένα χαρακτηριστικό επίσης συμπέρασμα είναι ότι η απόδοση αφαίρεσης COD στη μονάδα PB είναι ελαφρώς μεγαλύτερη συγκριτικά με τη μονάδα P. Σύμφωνα με μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί, το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται και από τους Zhou et al., 2018a, Zhou et al., 2018b. Πιθανός λόγος αυτού του αποτελέσματος να οφείλεται στην παρουσία πολλαπλών λειτουργικών ομάδων στην επιφάνεια του βιοεξανθρακώματος, όπως νιτρο-, χλωρο-, υδροξύλιο, αμίνη, καρβονύλιο και καρβοξυλικό οξύ που ενισχύουν την ηλεκτροστατική προσρόφηση της οργανικής ύλης, ενώ ακόμη το πορώδες του βιοεξανθρακώματος ευνοεί τις συνθήκες για ανάπτυξη αερόβιων και αναερόβιων μικροοργανισμών, οι οποίοι προσκολλώνται πάνω του, πολλαπλασιάζονται και προωθούν την απομάκρυνση του COD (He et

al., 2018; Zhang et al., 2021). Ακόμα, δεδομένου ότι οι υδραυλικοί χρόνοι παραμονής HRT των μονάδων P(57.2days) και PB(58.4 days) είναι αρκετά μεγάλοι, και σύμφωνα με τους (Bakhshoodeh et al., 2020) έχει διαπιστωθεί τόσο για το COD όσο και το BOD<sub>5</sub> ότι οι αυξανόμενοι υδραυλικοί χρόνοι HRT συνεπάγονται με υψηλότερη απόδοση αφαίρεσης για τεχνητούς υδροβιότοπους υποεπιφανειακής ροής και για υβριδικά συστήματα.

**Διάγραμμα 4.2.** Συγκέντρωση COD σε εισροή και εκροή των μονάδων P και PB.



**Διάγραμμα 4.3.** % Απομάκρυνση COD των μονάδων P και PB.



#### 4.4.2.3. ΝΙΤΡΙΚΟ ΆΖΩΤΟ NO<sub>3</sub>-N

**Πίνακας 4.10.** Αποτελέσματα μέσης τιμής και εύρους τιμών συγκέντρωσης NO<sub>3</sub>-N και μέσης τιμής και εύρους τιμών απομάκρυνσης.

NO <sub>3</sub> -N	Μέση τιμή Συγκέντρωσης (mg/l)	Εύρος Τιμών Συγκέντρωσης (mg/L)	Μέση Τιμή Απομάκρυνσης (%)	Εύρος Τιμών Απομάκρυνσης (%)
Εισροή	1034.56±196.83	832.40-1305.50	-	-
P	197.40±126.16	0.50-472.86	81.15±10.45	63.65-99.96
PB	50.12±31.83	14.82-111.86	95.24±3.00	86.81-98.33

Παρατηρώντας τον Πίνακα 4.10 καθώς και τα διαγράμματα 4.4 και 4.5, αναφορικά με τις συγκεντρώσεις εκροής και τις απομακρύνσεις των μονάδων P και PB, διαπιστώνεται ότι η μονάδα PB με μέση τιμή συγκέντρωσης 50.12±31.83 mg/L έχει κατά πολύ μικρότερη τιμή συγκέντρωσης εκροών συγκριτικά με τη μονάδα P, η οποία έχει μέση τιμή συγκέντρωσης εκροών 197.40±126.16mg/L. Επιπλέον, οι αντίστοιχες αποδόσεις απομάκρυνσης των μονάδων κυμαίνονται σε πολύ ικανοποιητικά επίπεδα, και μάλιστα η μονάδα PB αγγίζει μέσο ποσοστό απομάκρυνσης 95.24±3.00%. Για τη μονάδα P το αντίστοιχο μέσο ποσοστό απομάκρυνσης κυμαίνεται στο 81.15±10.45%. Τέλος, καθόλη τη διάρκεια του πειράματος τα ποσοστά απομάκρυνσης για τη μονάδα PB κυμαίνονταν σε πολύ υψηλά επίπεδα και μάλιστα άνω του 86.8%. Οι συνθήκες που επικρατούσαν του μήνες Μάιο, Ιούλιο και Αύγουστο φαίνεται να είναι αυτές με τις υψηλότερες αποδόσεις. Το μέγιστο ποσοστό απομάκρυνσης για τους μήνες αυτούς ήταν 98.3, 96.0 και 97.9% αντίστοιχα. Όσον αφορά τη μονάδα P, παρατηρήθηκε σημαντική αυξομειώση στις αποδόσεις απομάκρυνσης. Ομοίως με τη μονάδα PB, έτσι και η P, φάνηκε να έχει τα μεγαλύτερα ποσοστά απομάκρυνσης τους μήνες Μάιο, Ιούλιο και Αύγουστο με αντίστοιχα ποσοστά της τάξης του 89.5, 86.3 και 100.0%.

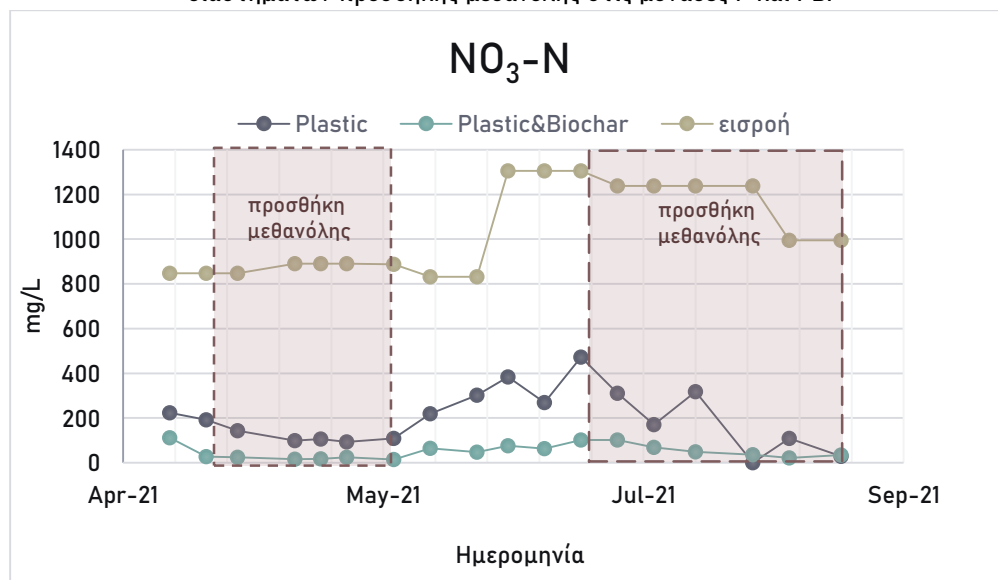
Κύριος μηχανισμός απομάκρυνσης NO<sub>3</sub>-N είναι η διαδικασία της απονιτροποίησης κατά την οποία προϋποτίθενται τρεις συνθήκες: Επαρκής πηγή άνθρακα, αναερόβιες συνθήκες και κατάλληλες θερμοκρασίες άνω των 15 °C.

Ως πηγή άνθρακα, η οποία δρά και ως περιοριστικός παράγοντας, αξιοποιούνται τα φυτικά κατάλοιπα και τα φυσικά οργανικά στοιχεία που περιέχονται στο σύστημα. Το βιοεξανθράκωμα, επίσης, συμβάλλει δραστηρικά στην ενίσχυση της πηγής άνθρακα, το οποίο περιέχεται στη μονάδα PB. Με βάση τα αποτελέσματα του πειράματος επιβεβαιώνεται ότι η απόδοση της μονάδας PB παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα και μάλιστα η απόδοση της μονάδας PB είναι κατά 14.0% μεγαλύτερη από αυτή της μονάδας P. Σύμφωνα με τους Zhang et al, (2021) η προσθήκη βιοεξανθρακώματος μπορεί να προωθήσει αποτελεσματικά την απομάκρυνση του αζώτου, αλλά διαφορετικές αναλογίες προσθήκης βιοεξανθρακώματος επηρεάζουν διαφορετικά τα εκάστοτε αποτελέσματα. Για παράδειγμα, η περίσσεια βιοεξανθρακώματος είναι πιθανό να αναστέλλει τη διαθεσιμότητα NO-N και έτσι τα αποτελέσματα είναι λιγότερο ενθαρρυντικά. Ένα άλλο παράδειγμα είναι ότι με την πάροδο του χρόνου, η ικανότητα παροχής βιοεξανθρακώματος μειώνεται και ο περιορισμός αυτής της πηγής άνθρακα περιορίζει με τη σειρά του και το φαινόμενο της απονιτροποίησης.

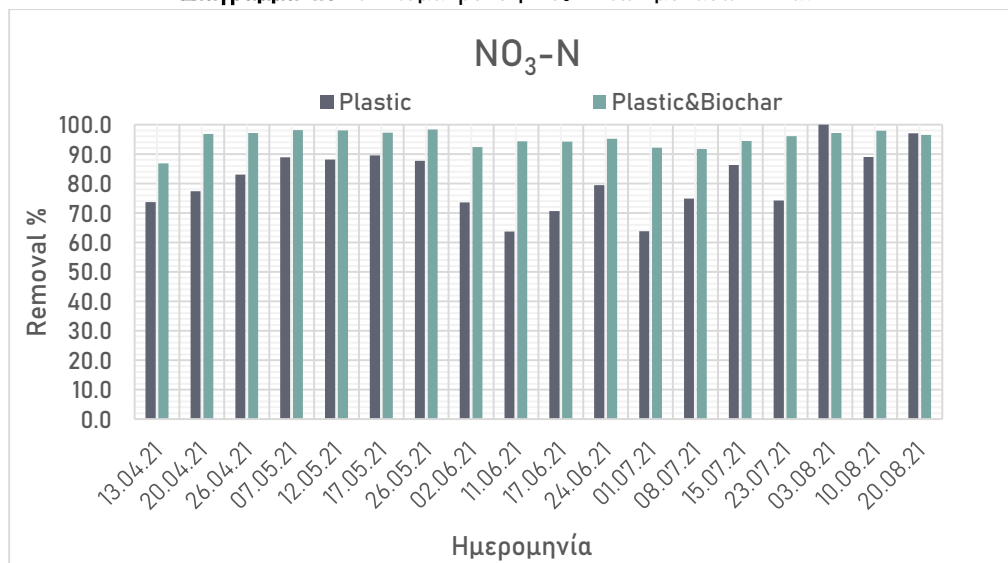
Αξίζει να σημειωθεί ότι τους μήνες κατά τους οποίους και οι δύο μονάδες είχαν τις υψηλότερες αποδόσεις, η φόρτιση συνοδευόταν με επιπλέον προσθήκη μεθανόλης ως πηγής άνθρακα, ούτως ώστε να ευνοηθεί η διαδικασία της απονιτροποίησης και να αυξηθούν τα ποσοστά απομάκρυνσης  $\text{NO}_3\text{-N}$ . Πιο συγκεκριμένα η εφαρμογή της διήρκεσε από τέλη Απριλίου με τέλη Μαΐου και από αρχές Ιουλίου έως το τέλος του πειράματος, τον Αύγουστο, ο πίνακας 3.2 περιέχει τις ακριβείς ημερομηνίες προσθήκης μεθανόλης στις μονάδες. Η ποσότητά της σταδιακά αυξανόταν, ανάλογα τις απαιτήσεις της κάθε μονάδας, όπου και διαπιστώθηκε η συνεισφορά της στη διαδικασία της απονιτροποίησης. Οι περίοδοι προσθήκης μεθανόλης φαίνονται και στο Διάγραμμα 4.4. Η μεθανόλη διαπιστώνεται ότι ευνόησε την διαδικασία της απονιτροποίησης. Πιο συγκεκριμένα η μεθανόλη αύξησε κατά πολύ την απόδοση της μονάδας P, σε ποσοστό 15.4% καθώς η απόδοσή της -χωρίς προσθήκη μεθανόλης- ήταν στο 71.4% και αυξήθηκε στο 87.1%- με προσθήκη μεθανόλης-. Η αντίστοιχη αύξηση για τη μονάδα PB ήταν κατά 3.5%. Ωστόσο, το ποσοστό της μονάδας PB ήταν εξ αρχής αρκετά υψηλό. Πιο συγκεκριμένα, η απόδοση της μονάδας PB -χωρίς προσθήκη μεθανόλης- ανερχόταν στο 93.1%, ενώ όταν προστέθηκε μεθανόλη αυξήθηκε στο 96.6%.

Χάρη στη φύση του τεχνητού υδροβιότοπου οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής, οι αναερόβιες συνθήκες είναι αυτονόητες. Σχετικά με τις θερμοκρασιακές συνθήκες που συμβάλλουν στη διαδικασία αφαίρεσης νιτρικού αζώτου, το εύρος θερμοκρασιών που επικρατούσε καθόλη τη διάρκεια του πειράματος ήταν και το πλέον ιδανικό, καθώς οι μέσες θερμοκρασίες κυμάνθηκαν από 16.7°C τον Απρίλιο έως 28.1°C τον Αύγουστο, βελτιώνοντας και υποβοηθώντας τη μικροβιακή δράση και την ανάπτυξη των φυτών, τα οποία με τη σειρά τους συνέβαλαν στην απομάκρυνση των νιτρικών. Επιπλέον, σύμφωνα με τους (Bakhshoodeh et al., 2020) το νιτρικό άζωτο απομακρύνεται και από την πρόσληψή του από τα φυτά. Ωστόσο, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η πρόσληψη των φυτών ως μηχανισμός απομάκρυνσης είναι αποτελεσματική μόνο στην περίπτωση που τα φυτά συγκομιστούν και δεν παραμένουν στο σύστημα μετά το πέρας της ζωής τους (σε περίπτωση λειτουργίας του υδροβιότοπου για πολλαπλά έτη). Διαφορετικά, το άζωτο επιστρέφει στο σύστημά κατά την αποσύνθεση των φυτών. Τέλος, σύμφωνα με τους (Liu et al., 2018) οι υψηλότερες αποδόσεις πρόσληψης νιτρικού αζώτου από το φυτό *Phragmites Australis* επιτυγχάνονται στα μέσα της θερινής περιόδου. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται και από το Διάγραμμα 4.3., στο οποίο διαπιστώνεται ότι μετά τον Ιούλιο και οι δυο μονάδες έχουν ποσοστό απόδοσης άνω του 74.2% το οποίο και σταδιακά αυξάνεται.

**Διάγραμμα 4.4.** Συγκέντρωση  $\text{NO}_3\text{-N}$  σε εισροή και εκροή των μονάδων P και PB, καθώς και οριοθέτηση των διαστημάτων προσθήκης μεθανόλης στις μονάδες P και PB.



**Διάγραμμα 4.5.** % Απομάκρυνση  $\text{NO}_3\text{-N}$  των μονάδων P και PB.





#### 4.4.2.4 ΝΙΤΡΩΔΕΣ ΆΖΩΤΟ NO<sub>2</sub>-N

**Πίνακας 4.11.** Αποτελέσματα μέσης τιμής και εύρους τιμών συγκέντρωσης NO<sub>2</sub>-N και μέσης τιμής και εύρους τιμών απομάκρυνσης.

NO <sub>2</sub> -N	Μέση τιμή Συγκέντρωσης (mg/l)	Εύρος Τιμών Συγκέντρωσης (mg/L)	Μέση Τιμή Απομάκρυνσης (%)	Εύρος Τιμών Απομάκρυνσης (%)
Εισροή	144.91±29.98	91.60-193.80	-	-
P	16.26±9.99	1.62-34.66	88.85±7.02	76.10-98.23
PB	6.99±6.18	0-16.23	95.01±4.75	86.71-100

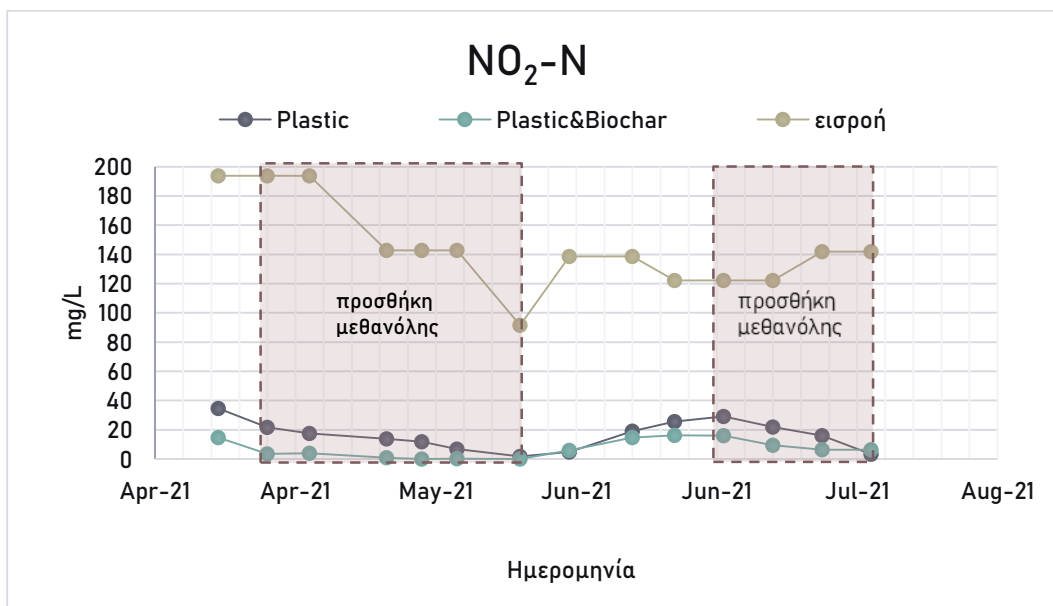
Από τον Πίνακα 4.11 καθώς και τα διαγράμματα 4.6 και 4.7, σχετικά με τις συγκεντρώσεις εκροής και τις απομακρύνσεις των μονάδων P και PB, συμπεραίνεται ότι η μονάδα PB με μέση τιμή συγκέντρωσης μόλις 6.99±6.18mg/L έχει σχεδόν τη μισή τιμή συγκέντρωσης εκροών συγκριτικά με τη μονάδα P, η οποία έχει μέση τιμή συγκέντρωσης εκροών 16.26±9.99mg/L. Επιπρόσθετα, αποδόσεις απομάκρυνσης των μονάδων κυμαίνονται σε πολύ ικανοποιητικά επίπεδα, και μάλιστα η μονάδα PB αγγίζει μέσο ποσοστό απομάκρυνσης 95.01±4.75%. Για τη μονάδα P το αντίστοιχο μέσο ποσοστό απομάκρυνσης κυμαίνεται στο 88.85±7.02%. Καθόλη τη διάρκεια του πειράματος τα ποσοστά απομάκρυνσης για τη μονάδα PB κυμαίνονταν σε πολύ υψηλά επίπεδα, με εξαίρεση τον Ιούνιο που παρατηρήθηκε μια σχετική πτώση στο ποσοστό στο 86.7%, ωστόσο αρκούντως ικανοποιητικό ποσοστό. Οι συνθήκες που επικρατούσαν του μήνες Απρίλιο, Μάιο και Ιούλιο φαίνεται να είναι αυτές με τις υψηλότερες αποδόσεις. Το μέγιστο ποσοστό απομάκρυνσης για τους μήνες αυτούς ήταν 98.2, 100,0 και 95.5% αντίστοιχα. Όσον αφορά τη μονάδα P, παρατηρήθηκαν όμοια σχετικά αποτελέσματα με αυτά της μονάδας PB. Η μονάδα P φάνηκε να έχει τα μεγαλύτερα ποσοστά απομάκρυνσης τους μήνες Απρίλιο, Ιούνιο και Ιούλιο με αντίστοιχα ποσοστά της τάξης του 98.2, 96.5 και 97.7%.

Η συγκέντρωση του νιτρώδους αζώτου NO<sub>2</sub>-N σχετίζεται άμεσα με τις τιμές των συγκεντρώσεων του νιτρικού αζώτου NO<sub>3</sub>-N και τα ποσοστά απονιτροποίησης που επιτεύχθηκαν για τις μονάδες P και PB. Ουσιαστικά αποτελεί ένα ενδιάμεσο στάδιο της απονιτροποίησης και αντιπροσωπεύει μια παραπάνω ένδειξη ότι το άζωτο απομακρύνεται από το σύστημα. Αυτό επιβεβαιώνεται και από το γεγονός ότι του μήνες στους οποίους προστίθεται επιπλέον ποσότητα μεθανόλης, τα ποσοστά απομάκρυνσης είναι συγκριτικά καλύτερα, σε σχέση με το διάστημα κατά το οποίο η μεθανόλη δεν χρησιμοποιείται και τα ποσοστά απομάκρυνσης πέφτουν. Πιο συγκεκριμένα, η μεθανόλη ευνοεί τη διαδικασία για τη μονάδα P σε ποσοστό 8.9% ενώ το αντίστοιχο ποσοστό για τη μονάδα PB ανέρχεται στο 6.7%. Αντίστοιχα, η απόδοση της P χωρίς προσθήκη μεθανόλης κυμαινόταν στο 84.4% ενώ με προσθήκη μεθανόλης το ποσοστό άγγιξε το 93.3%. Επιπλέον, η απόδοση της μονάδας PB χωρίς προσθήκη μεθανόλης ήταν στο 91.7% ενώ το αντίστοιχο ποσοστό με προσθήκη μεθανόλης αυξάνεται στο 98.4%. Ακόμη, παρατηρείται ότι η απόδοση της μονάδας PB είναι καθόλη τη διάρκεια τους πειράματος ιδανικότερη με ποσοστό 6.1%, καθώς στη μονάδα περιέχεται πέραν της προσθήκης μεθανόλης, η επιπλέον πηγή άνθρακα που ενδεχομένως προέρχεται από την ύπαρξη του βιοεξανθρακώματος. Σε αντίθεση με τη μονάδα P, στην οποία η απόδοση παρουσιάζει καθοδική πορεία το διάστημα του Ιουνίου κατά το οποίο δεν υπάρχει διαθέσιμη η μεθανόλη στο σύστημα, άρα δεν υπάρχει κάποια πηγή άνθρακα προς αξιοποίηση.

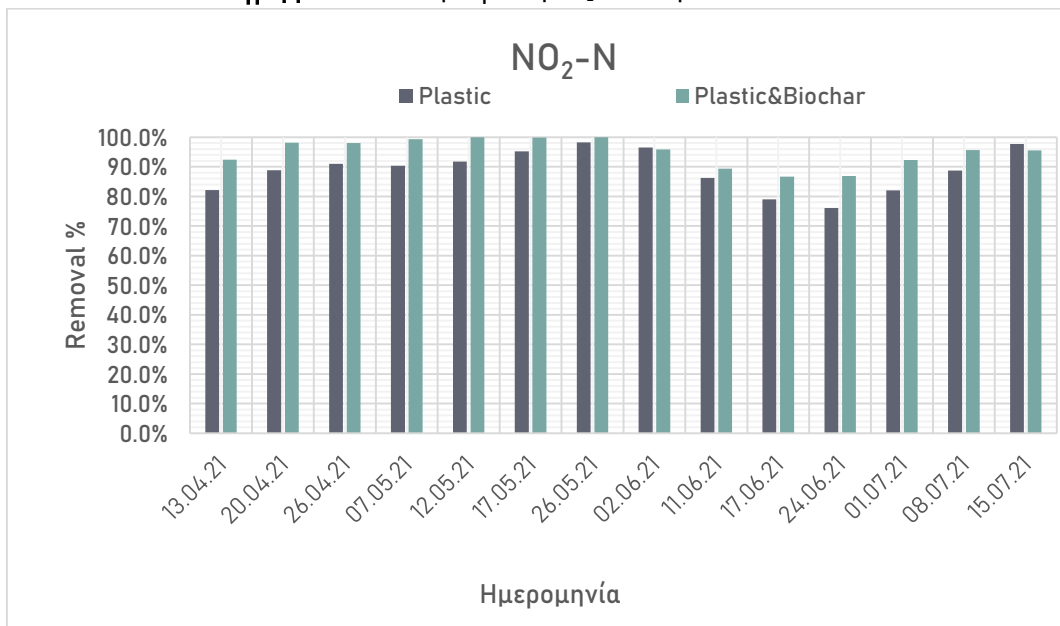
Επίσης και στο στάδιο αυτό, οι βέλτιστες θερμοκρασίες για να απομακρύνουν οι μικροοργανισμοί, που βρίσκονται εντός των τεχνητών υγροβιότοπων, το άζωτο είναι θερμοκρασίες άνω των 15°C, γεγονός που

επιβεβαιώνεται και από τις μέσες θερμοκρασίες των μηνών που διεξήχθη το πείραμα, οι οποίες ήταν άνω των 16.7°C.

**Διάγραμμα 4.6.** Συγκέντρωση  $\text{NO}_2\text{-N}$  σε εισροή και εκροή των μονάδων P και PB.



**Διάγραμμα 4.7.** % Απομάκρυνση  $\text{NO}_2\text{-N}$  των μονάδων P και PB.



#### 4.4.2.5 ΑΜΜΩΝΙΑΚΟ ΆΖΩΤΟ NH<sub>4</sub>-N

**Πίνακας 4.12.** Αποτελέσματα μέσης τιμής και εύρους τιμών συγκέντρωσης NH<sub>4</sub>-N και μέσης τιμής και εύρους τιμών απομάκρυνσης.

NH <sub>4</sub> -N	Μέση τιμή Συγκέντρωσης (mg/l)	Εύρος Τιμών Συγκέντρωσης (mg/L)	Μέση Τιμή Απομάκρυνσης (%)	Εύρος Τιμών Απομάκρυνσης (%)
Εισροή	131.48±34.01	82.00-188.70	-	-
P	35.58±10.03	18.45-49.61	71.26±12.35	40.37-84.69
PB	24.37±7.37	10.61-36.87	79.95±9.43	59.63-91.20

Παρατηρώντας τον Πίνακα 4.12 καθώς και τα διαγράμματα 4.8 και 4.9, αναφορικά με τις συγκεντρώσεις εκροής και τις απομακρύνσεις των μονάδων P και PB, διαπιστώνεται ότι η μονάδα PB με μέση τιμή συγκέντρωσης 24.37±7.37mg/L έχει μικρότερη τιμή συγκέντρωσης εκροών συγκριτικά με τη μονάδα P, η οποία έχει μέση τιμή συγκέντρωσης εκροών 35.58±10.03mg/L. Επιπλέον, οι αντίστοιχες αποδόσεις απομάκρυνσης των μονάδων κυμαίνονται σε ικανοποιητικά επίπεδα. Η μονάδα PB αγγίζει μέσο ποσοστό απομάκρυνσης 79.95±9.43%. Για τη μονάδα P το αντίστοιχο μέσο ποσοστό απομάκρυνσης κυμαίνεται στο 71.26±12.35%. Η μονάδα PB παρουσιάζει μεγαλύτερη απόδοση από τη μονάδα P σε ποσοστό 8.6%, γεγονός που είναι πιθανό να οφείλεται και στην περισσότερη φυτική βιομάζα που περιέχει η μονάδα PB σε σχέση με τη μονάδα P. Τους μήνες Απρίλιο, Μάιο και Ιούνιο παρατηρείται ότι επικρατούσαν οι πιο ιδανικές συνθήκες, με τις υψηλότερες αποδόσεις και για τις δύο μονάδες. Η μονάδα PB παρουσιάζει για αυτούς τους μήνες αποδόσεις της τάξης του 81.4% για τον Απρίλιο, 91.2% για το Μάιο και 89.1% για τον Ιούνιο. Οι αποδόσεις για τη μονάδα P, για τους ίδιους μήνες, αγγίζουν ποσοστά της τάξης του 78.6, 88.6 και 80.0% αντίστοιχα. Τέλος, επικρατεί μια αξιοσημείωτη μείωση τον Αύγουστο, με το ποσοστό της μονάδας PB να πέφτει στο 59.6% και της μονάδας P στο 40.4%.

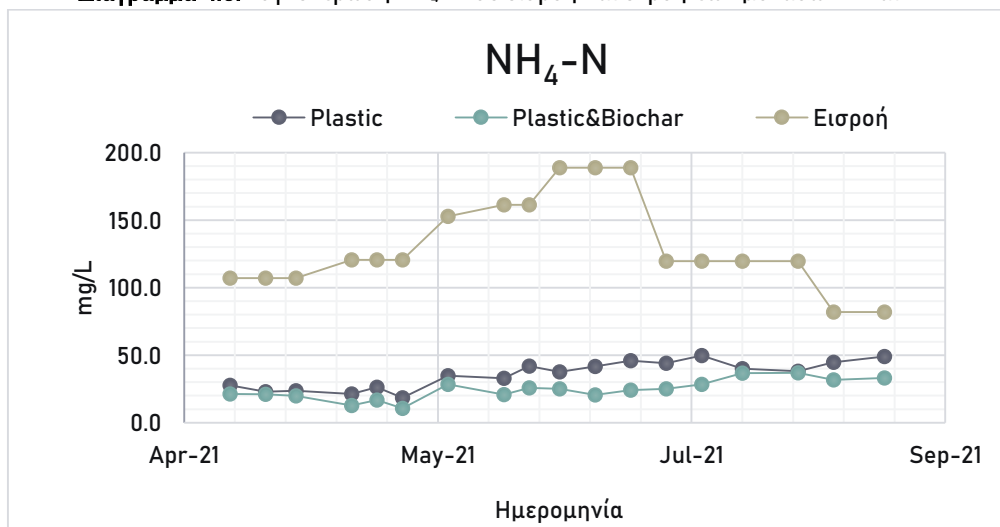
Σύμφωνα με τους (Al-Omari & Fayyad, 2003; Dong & Sun, 2007; Vymazal, 2002) απομάκρυνση της αμμωνίας σε τεχνητούς υδροβιότοπους πραγματοποιείται μέσω διαφορετικών μηχανισμών: με εξάτμιση (σε FWS CWS), με νιτροποίηση (υπό αερόβιες συνθήκες), με προσρόφηση (πολύ περιορισμένη), με πρόσληψη από φυτά και άλλους ζωντανούς οργανισμούς και με αναπνοή (υπό αναερόβιες συνθήκες). Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η αμμωνιοποίηση των οργανικών που περιέχουν άζωτο αυξάνει τη συγκέντρωση αμμωνίας. Σχετικά με τη διαδικασία της νιτροποίησης, η οποία λαμβάνει χώρα σε αερόβιες συνθήκες ή σε συνθήκες με ελάχιστο διαλυμένο οξυγόνο. Στους τεχνητούς υδροβιότοπους οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής, οι συνθήκες επαρκούς ποσότητας οξυγόνου για τη διαδικασία της νιτροποίησης περιορίζονται στα ανώτερα στρώματα και κοντά στην επιφάνεια των μονάδων, αλλά και σε περιοχές γύρω από τα ριζώματα του φυτού.

Η νιτροποίηση εξαρτάται από τη μεταβολή της θερμοκρασίας και τις συνθήκες τοπικού κλίματος που επικρατούν. Η βέλτιστη θερμοκρασία είναι αυτή των 15°C και άνω, όπου και επιτυγχάνεται η μεγαλύτερη μικροβιακή δραστηριότητα. Επιπλέον, σε θερμοκρασίες άνω των 15°C πραγματοποιείται και η ανάπτυξη των φυτών, τα οποία παρέχουν το απαραίτητο διαλυμένο οξυγόνο για τη νιτροποίηση. Τέλος, η νιτροποίηση διευκολύνεται από εξειδικευμένα αυτότροφα βακτήρια.

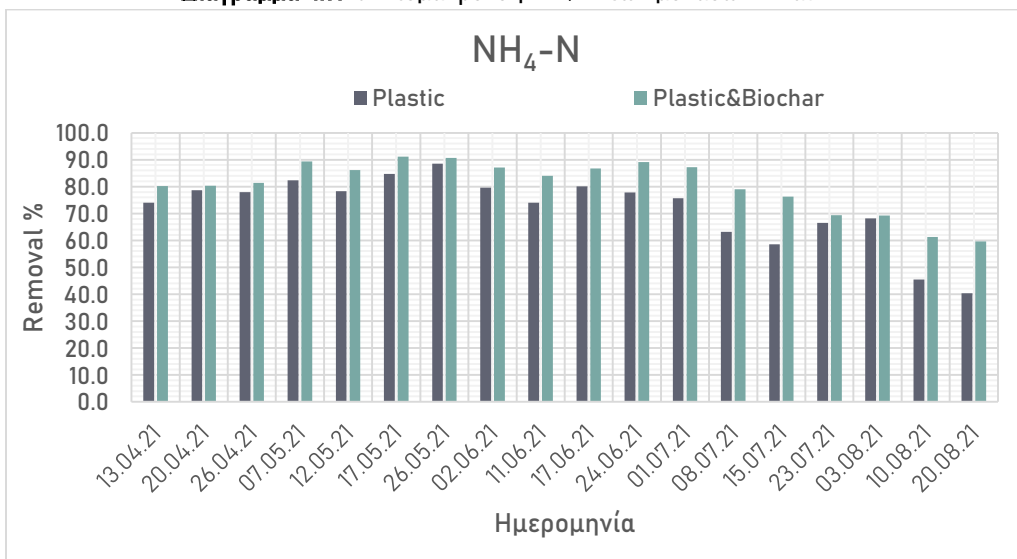
Οι αποδόσεις απομάκρυνσης του αμμωνιακού αζώτου NH<sub>4</sub>-N είναι σε ικανοποιητικά επίπεδα και σύμφωνα με τους (Zhang et al., 2021) είναι ενδεικτικό ότι η νιτροποίηση του συστήματος ήταν ως ένα επίπεδο σχετικά πλήρης και το NH-N μετατράπηκε σε NO-N. Το διαλυμένο οξυγόνο που παρεχόταν στο

στις μονάδες ήταν επαρκές για τη νιτροποίηση και την αερόβια αποικοδόμηση της οργανικής ύλης. Συνεπώς, πιθανή πτώση της απόδοσης των μονάδων P και PB τον τελευταίο μήνα του πειράματος, τον Αύγουστο, να συνεπαγεται με μη επαρκή ποσότητα παρεχόμενου οξυγόνου εντός των μονάδων. Επιπλέον, από το διάγραμμα 4.8, παρατηρείται ότι τον Αύγουστο μειώνεται και η συγκέντρωση εισροής των μονάδων, επομένως σαφώς πέφτουν και τα ποσοστά απομάκρυνσης. Η μονάδα P είχε χαμηλότερη αποτελεσματικότητα αφαίρεσης αμμωνιακού αζώτου, γεγονός που αποδίδεται στην απουσία προσρόφησης από το βιοεξανθράκωμα, κάτι που έχει διαπιστωθεί και από άλλους μελετητές σε αντίστοιχα πειράματα. Ωστόσο, ο πρωταρχικός παράγοντας που επηρεάζει τη διεργασία της νιτροποίησης είναι η παρεχόμενη ποσότητα οξυγόνου, παρά το ποσοστό του βιοεξανθρακώματος στις μονάδες (Liu et al., 2016).

**Διάγραμμα 4.8.** Συγκέντρωση  $\text{NH}_4\text{-N}$  σε εισροή και εκροή των μονάδων P και PB.



**Διάγραμμα 4.9.** % Απομάκρυνση  $\text{NH}_4\text{-N}$  των μονάδων P και PB.



#### 4.4.2.6 ΦΩΣΦΟΡΙΚΑ $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$

Οι μετρήσεις που έλαβαν χώρα στην αρχή του πειράματος είχαν ως αποτέλεσμα πολύ χαμηλές τιμές συγκέντρωσης στην εισροή (μεση τιμή 0,75 mg.L) και κατά συνέπεια μηδενικές συγκεντρώσεις εκροής (κάτω του ορίου μέτρησης). Για το λόγο αυτό ο φώσφορος σε μορφή φωσφορικών  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  δεν μετριοιούνταν σε εβδομαδιαία βάση. Ανά τακτά χρονικά διαστήματα γινόταν η μέτρησή και επιβεβαιωνόταν το γεγονός ότι η συγκέντρωσή τους βρισκόταν κάτω του ανιχνεύσιμου ορίου.

Έχει αναφερθεί από τους (Drizo et al., 2000) ότι ο φώσφορος απομακρύνεται από τους τεχνητούς υγροβιότοπους κυρίως μέσω χημικών φυσικοχημικών οδών όπως η προσρόφηση και η κατακρίμνηση με το Al, το Fe, το Ca και το Mg να είναι οι πιο σημαντικές διεργασίες. Σύμφωνα με τους (Akratos et al., 2007) η απομάκρυνση του φωσφόρου σε τεχνητούς υγροβιότοπους είναι αποτέλεσμα της αφαίρεσής του μέσω βακτηρίων, της πρόσληψής του από τα φυτά, της προσρόφησης του από τα πορώδη μέσα και της κατακρήμνισης, όπου ο φώσφορος αντιδρά με τα πορώδη μέσα και με μέταλλα όπως το οξυϋδροξείδιο του σιδήρου και το ανθρακικό. Η απομάκρυνση των βακτηρίων και η πρόσληψη των φυτών είναι υπεύθυνες για την απομάκρυνση του P- και  $\text{PO}_4^{3-}$ , ενώ η καθίζηση και η προσρόφηση είναι υπεύθυνες για την απομάκρυνση όλων των μορφών φωσφόρου. Πιστεύεται γενικά ότι η προσρόφηση και η ανταλλαγή ιόντων είναι δύο κυρίαρχα μοτίβα απομάκρυνσης του φωσφόρου (Baddam et al., 2016).

Ο σωματιδιακός φώσφορος μπορεί επίσης να αφαιρεθεί μέσω διήθησης από τα πορώδη μέσα των τεχνητών υγροβιότοπων. Οι μηχανισμοί απομάκρυνσης με προσρόφηση και διήθηση έχουν περιορισμένη χωρητικότητα και μπορούν να εξαντληθούν καθώς τα πορώδη μέσα των τεχνητών υγροβιότοπων ενδέχεται να κορεσθούν με προσροφημένο ή φιλτραρισμένο φώσφορο (Kadlec and Wallace, 2008; Hayder et al., 2019). Σε περίπτωση που επιτευχθεί αυτό το όριο κορεσμού, το σύστημα του τεχνητού υγροβιότοπου θα επιστρέψει σε συγκεντρώσεις εκροών φωσφόρου κοντά στις τιμές εισροής. Η απελευθέρωση φωσφόρου από τα ιζήματα μπορεί επίσης να συμβεί υπό αναερόβιες συνθήκες, ένα φαινόμενο γνωστό στους φυσικούς υγροβιότοπους (Bakhshoodeh et al., 2020). Τέλος, τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του υποστρώματος καθορίζουν την ικανότητα προσρόφησης, και επομένως, τη διατήρηση του φωσφόρου (Stefanakis et al., 2014).

#### 4.4.2.7 ΟΛΙΚΑ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΤΕΡΕΑ TSS

**Πίνακας 4.13.** Αποτελέσματα μέσης τιμής και εύρους τιμών συγκέντρωσης TSS και μέσης τιμής και εύρους τιμών απομάκρυνσης.

TSS	Μέση τιμή Συγκέντρωσης (mg/l)	Εύρος Τιμών Συγκέντρωσης (mg/L)	Μέση Τιμή Απομάκρυνσης (%)	Εύρος Τιμών Απομάκρυνσης (%)
Εισροή	197.63±87.06	73.00-283.00	-	-
P	22.11±11.06	4.00-51.00	87.05±8.57	61.64-96.11
PB	23.83±9.36	4.00-39.00	86.61±5.41	76.71-96.04

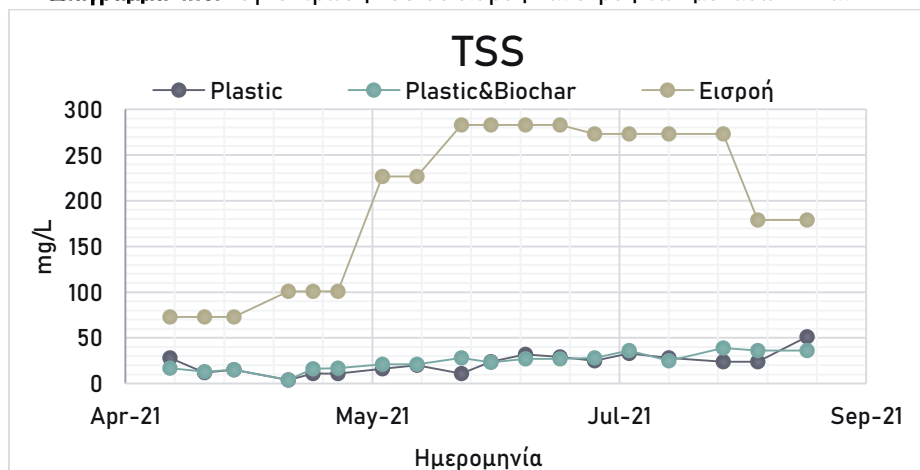
Με βάση τον Πίνακα 4.13 καθώς και τα διαγράμματα 4.10 και 4.11, αναφορικά με τις συγκεντρώσεις εκροής και τις απομακρύνσεις των μονάδων P και PB, διαπιστώνεται ότι η μονάδα PB με μέση τιμή συγκέντρωσης  $23.83 \pm 9.36 \text{ mg/L}$  έχει σχεδόν όμοια τιμή συγκέντρωσης εκροών με τη μονάδα P, η οποία έχει μέση τιμή συγκέντρωσης εκροών  $22.11 \pm 11.06 \text{ mg/L}$ . Επιπλέον, οι αντίστοιχες αποδόσεις απομάκρυνσης των μονάδων κυμαίνονται σε αρκετά ικανοποιητικά επίπεδα. Η μονάδα PB αγγίζει μέσο ποσοστό απομάκρυνσης  $86.61 \pm 5.41\%$ . Το αντίστοιχο μέσο ποσοστό απομάκρυνσης για την μονάδα P είναι ελάχιστο καλύτερο και κυμαίνεται στο  $87.05 \pm 8.57\%$ . Τους μήνες Μάιο και Ιούλιο παρατηρείται ότι επικρατούσαν οι πιο ιδανικές συνθήκες για τη μονάδα PB, η οποία παρουσιάζει για αυτούς τους μήνες αποδόσεις της τάξης του 96.0% για το Μάιο και 90.8% για τον Ιούλιο. Οι αποδόσεις για τη μονάδα P διαπιστώνεται ότι παραμένουν υψηλές για τους μήνες Μάιο, Ιούνιο, Ιούλιο και Αύγουστο, με ποσοστά της τάξης του 96.0, 91.5, 90.8 και 91.2% αντίστοιχα. Επίσης, επικρατεί μια χαρακτηριστική αυξομείωση τον Ιούνιο, με το ποσοστό της μονάδας PB να πέφτει στο 57.1% και έπειτα να ανεβαίνει στο 91.9%. Τέλος στο διάγραμμα 4.10 παρατηρείται ότι η συγκέντρωση εισροής αυξάνει αλλά η απόδοση απομάκρυνσης και των δύο μονάδων παραμένει σταθερά υψηλή.

Η απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών σύμφωνα με τους (Vymazal and Kröpfelová, 2008) είναι κατά κύριο λόγο αρκετά υψηλή σε όλους τους τύπους τεχνητών υγροβιότοπων. Στους τεχνητούς υγροβιότοπους υποεπιφανειακής ροής, ο κύριος μηχανισμός απομάκρυνσης είναι η διήθηση καθώς το νερό περνά μέσα από τα πορώδη υλικά. Η αφαίρεση συνήθως αυξάνεται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας καθώς το υλικό διήθησης φράζει επειδή η κλίση διήθησης γίνεται πιο πυκνή. Η απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών είναι η υψηλότερη στην αρχή της κλίσης διήθησης, καθώς τα περισσότερα αιωρούμενα στερεά συγκρατούνται στα πρώτα μέτρα της κλίσης. Επίσης τα αιωρούμενα σωματίδια φιλτράρονται και από την πυκνή βλάστηση και μέσω καθίζησης των σωματιδίων. Ακόμη, χάρη στη βλάστηση του υγροβιότοπου μειώνεται η ανάμιξη της στήλης νερού και επομένως η επαναιώρηση των σωματιδίων.

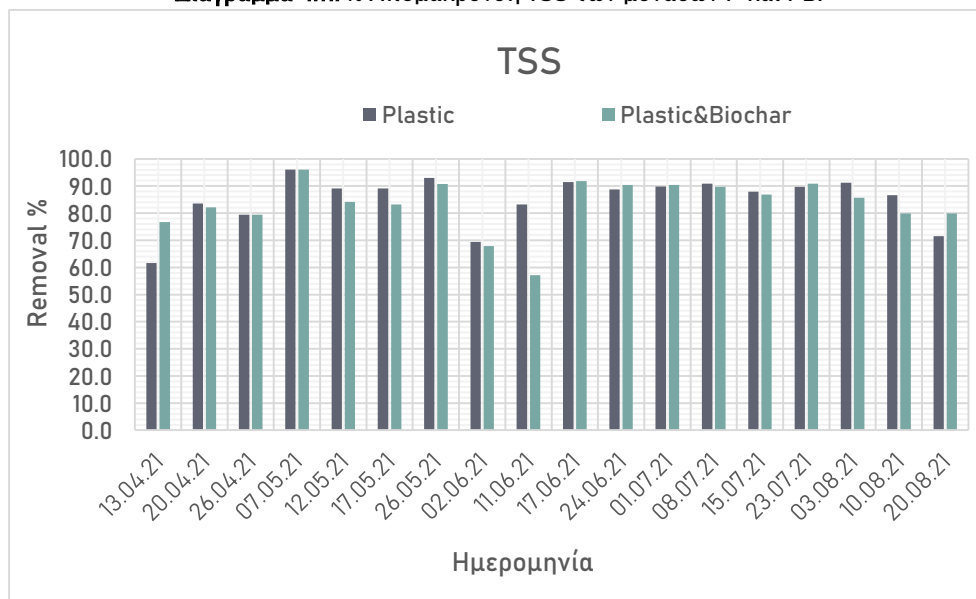
Επιπλέον, σύμφωνα με την (Αγιουτάντη, 2018) πέραν της διήθησης, ένας άλλος τρόπος απομάκρυνσης των ολικών αιωρούμενων στερεών είναι με την προσρόφησή τους πάνω στο βιοφίλμ που έχει αναπτυχθεί στο υπόστρωμα και στην επιφάνεια των ριζών. Ενώ ακόμη τα αιωρούμενα στερεά απομακρύνονται και από τις μονάδες και μέσω μικροβιακής δραστηριότητας, ιζηματοποίησης και κατακρήμνισης. Τέλος, η εκροή του υγροβιότοπου περιλαμβάνει τα στερεά που προκύπτουν εντός της μονάδας και σπανιότερα περιλαμβάνει σωματίδια της εισροής τα οποία δεν δύναται να απομακρυνθούν αλλιώς. Συνεπώς, οι συγκεντρώσεις των αιωρούμενων στερεών σωματιδίων στην εκροή των μονάδων κυμαίνονται κοντά σε

ελάχιστες συγκεντρώσεις, ωστόσο δεν είναι μηδενικές αυτές οι συγκεντρώσεις (Water Environment Federation, 2001).

**Διάγραμμα 4.10.** Συγκέντρωση TSS σε εισροή και εκροή των μονάδων P και PB.



**Διάγραμμα 4.11.** % Απομάκρυνση TSS των μονάδων P και PB.



#### 4.4.2.8 pH

Η μέτρηση των τιμών του pH γίνεται με σκοπό τη διαπίστωση της οξύτητας ή της αλκαλικότητας ενός υδάτινου συστήματος. Κατά τους (Metcalf & Eddy, 2006) το επιτρεπτό εύρος pH για επεξεργασμένα υγρά απόβλητα, τα οποία διατίθενται στο περιβάλλον, κυμαίνεται από 6.5 έως 8.5, εύρος κατάλληλο για τη διατήρηση των περισσότερων μικροοργανισμών. Παρακάτω παρουσιάζεται ο Πίνακας 4.14 με τη μέση τιμή και το εύρος τιμών του pH του initial και των εκροών των μονάδων P και PB.

**Πίνακας 4.14.** Αποτελέσματα μέσης τιμής και εύρους τιμών συγκέντρωσης pH.

pH	Μέση τιμή	Εύρος Τιμών
Εισροή	6.28±0.28	6.06-7.02
P	7.90±0.36	6.80-8.37
PB	7.91±0.29	7.01-8.22

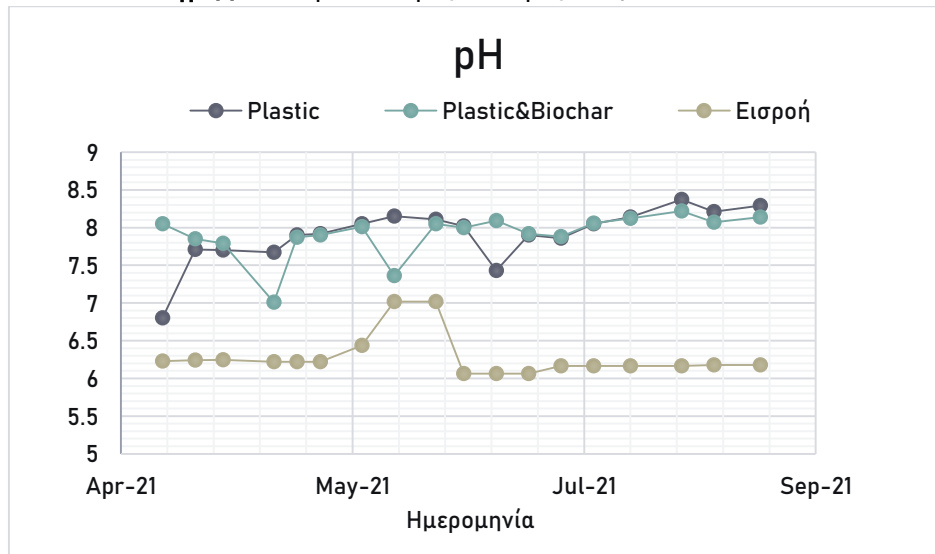
Από τον Πίνακα 4.14 και από το Διάγραμμα 4.12, παρατηρείται ότι οι τιμές του pH για τις μονάδες P και PB είναι πρακτικά ίδιες με pH ελαφρώς αλκαλικό. Για τη μονάδα P το pH ισούται με 7.90±0.36 και για τη μονάδα PB το pH ισούται με 7.91±0.29. Συγκριτικά με το pH της εισροής, το οποίο είναι 6.28±0.28, διαπιστώνεται ότι και στις δυο μονάδες έχει αυξηθεί.

Στους τεχνητούς υδροβιότοπους υποεπιφανειακής οριζόντιας ροής είναι χαρακτηριστικό ότι κυριαρχούν οι αναερόβιες συνθήκες, με τις οποίες ευνοείται η διαδικασία της απονιτροποίησης. Τα βακτήρια που είναι υπεύθυνα για την απονιτροποίηση λειτουργούν καλύτερα σε ελαφρώς βασικό pH μεταξύ 6 έως 9. Επομένως, τα ιόντα που απελευθερώνονται από την απονιτροποίηση αυξάνουν το pH των μονάδων. (Στεφανάκης, 2011).

Η αλκαλικότητα των υγρών αποβλήτων οφείλεται στην παρουσία υδροξειδίων [OH], ανθρακικών ιόντων [CO<sub>3</sub><sup>-2</sup>] και όξινων ανθρακικών ιόντων [HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>] στοιχείων όπως το ασβέστιο, το μαγνήσιο, το νάτριο και το κάλιο. Είναι πιθανόν επίσης να οφείλεται στην ύπαρξη αμμωνίας. Η αλκαλικότητα στα υγρά απόβλητα συνεισφέρει στην αντίσταση ενάντια στις αλλαγές του pH που μπορεί να προκληθούν από την ύπαρξη οξέων (Metcalf & Eddy, 2006).



**Διάγραμμα 4.12.** pH σε εισροή και εκροή των μονάδων P και PB.



#### 4.4.2.9 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ EC

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του νερού αποτελεί ένα μέτρο της ικανότητας ενός διαλύματος να άγει ηλεκτρικό ρεύμα. Επειδή το ηλεκτρικό ρεύμα μεταφέρεται με τα ιόντα του διαλύματος, η αγωγιμότητα αυξάνει όσο η συγκέντρωση των ιόντων αυξάνεται. Ως αποτέλεσμα η μετρηθείσα τιμή αγωγιμότητας χρησιμοποιείται ως αντιπροσωπευτικό μέτρο της συγκέντρωσης των ολικών διαλυμένων στερεών σε ένα δείγμα (Metcalf & Eddy, 2006). Παρακάτω παρουσιάζεται ο Πίνακας 4.15 με τη μέση τιμή και το εύρος τιμών της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του initial και των εκροών των μονάδων P και PB.

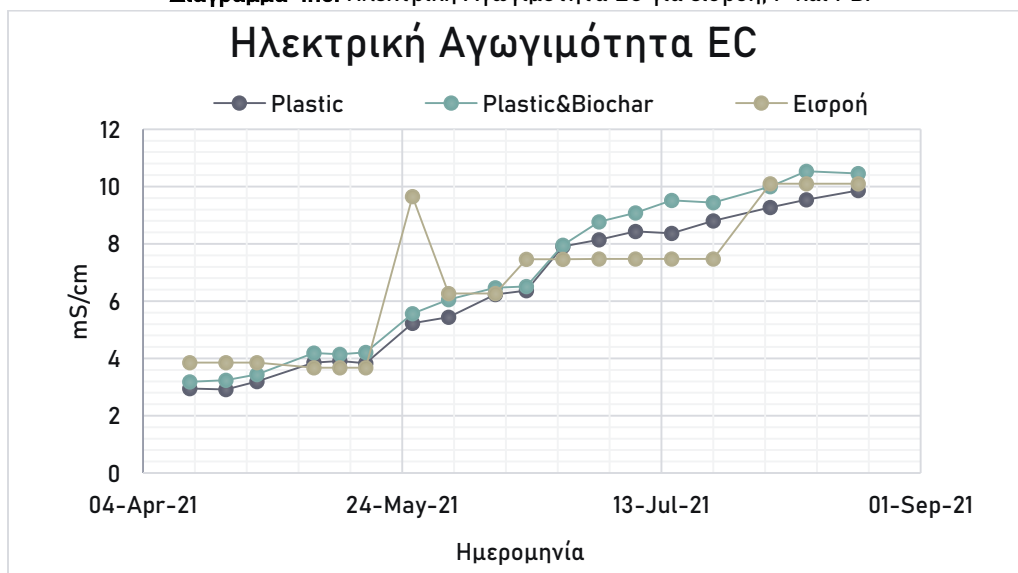
**Πίνακας 4.15.** Μέση τιμή και εύρος τιμών ηλεκτρικής αγωγιμότητας EC για το initial και τις εκροές των P και PB.

EC	Μέση τιμή (mS/cm)	Εύρος Τιμών (mS/cm)
Εισροή	6.66±2.41	3.68-10.10
P	6.35±2.49	2.92-9.86
PB	6.82±2.68	3.18-10.53

Από τις τιμές του παραπάνω Πίνακα 4.15 αλλά και από το διάγραμμα 4.13 που ακολουθεί, διαπιστώνεται ότι οι τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, κατά βάση, σταδιακά αυξάνονταν με την πάροδο του χρόνου σε συνδυασμό κίολας με τις αναλογίες αραιώσης στην εισροή των μονάδων. Πιο αναλυτικά οι τιμές τόσο για το initial, όσο και για τις εκροές των μονάδων P και PB παρουσιάζουν παρόμοια ανοδική συμπεριφορά. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα των εκροών των λυμάτων των τεχνητών υδροβιότοπων σχετίζεται με τη συγκέντρωση ρύπων που μπορεί να αντανάκλα η έμφραξη της μονάδας. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση της σταθερότητας των υλικών του υποστρώματος και των ιδιοτήτων που έχουν αυτά ως προσροφητές (Wang et al., 2021).

Διαπιστώνεται ότι η μέση τιμή ηλεκτρικής αγωγιμότητας της μονάδας P ισούται με  $6.35 \pm 2.49$  mS/cm και είναι ελαφρώς μειωμένη συγκριτικά με την τιμή της εισροής, που ισούται με  $6.66 \pm 2.41$  mS/cm. Το γεγονός αυτό πιθανώς να οφείλεται στην αύξηση απόδοσης απομάκρυνσης αζώτου από το σύστημα του τεχνητού υδροβιότοπου (Ακράτος, 2006). Από την άλλη, παρατηρείται ότι η μέση τιμή της μονάδας PB είναι  $6.82 \pm 2.68$  mS/cm, σύμφωνα με τους (Kadlec and Wallace, 2009) το γεγονός αυτό μπορεί να εξηγήσει πιθανώς στο βιοεξανθράκωμα που περιέχεται ως πληρωτικό μέσο και ενδεχομένως να επηρεάζει ελαφρώς τα αποτελέσματα των τιμών. Όμως ως επί το πλείστον τόσο οι τιμές εισροής όσο και εκροής φαίνεται να έχουν παρόμοιες συμπεριφορές καθόλη τη διάρκεια του πειράματος και οι διακυμάνσεις μεταξύ των τιμών των δυο μονάδων P και PB είναι πολύ μικρές. Συμπεραίνεται ότι το πλαστικό ως υλικό υποστρώματος είναι τελείως αδρανές και δεν επιδρά στις τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας ενώ ακόμη η αύξηση στις τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας πιθανώς να οφείλεται και στην εξάτμιση του όγκου νερού των μονάδων, που εντείνεται όσο περνάνε οι μήνες και αυξάνεται η θερμοκρασία, και συνεπώς στη συμπύκνωση του νερού μέσα στις μονάδες.

**Διάγραμμα 4.13.** Ηλεκτρική Αγωγιμότητα EC για εισροή, P και PB.



#### 4.4.2.10 ΜΕΤΑΛΛΑ ΚΑΙ ΜΕΤΑΛΛΟΕΙΔΗ

Ίχνη πολλών μετάλλων, όπως το κάδμιο (Cd), το χρώμιο (Cr), ο χαλκός (Cu), ο σίδηρος (Fe), ο μόλυβδος (Pb), το μαγγάνιο (Mn), ο υδράργυρος (Hg), το νικέλιο (Ni) και ο ψευδάργυρος (Zn) αποτελούν σημαντικά συστατικά στα περισσότερα νερά, ενώ σύμφωνα με τους (Metcalf & Eddy, 2006) πολλά από αυτά μπορούν να χαρακτηριστούν και ως ρύποι προτεραιότητας. Ωστόσο, η ύπαρξή τους είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη της ζωής του πλανήτη, ενώ η απουσία επαρκών ποσοτήτων αυτών θα μπορούσε να περιορίσει την ανάπτυξη φυτών. Παρόλα αυτά, οι μεγάλες συγκεντρώσεις των μετάλλων αυτών κατά κανόνα έχουν αρνητική επίδραση και λειτουργούν ως δείκτης τοξικότητας των νερών. Ακολουθεί ο Πίνακας 4.16 στον οποίο παρουσιάζονται οι μέσες τιμές και τα εύρη τιμών για μέταλλα σε εισροή, P, PB.

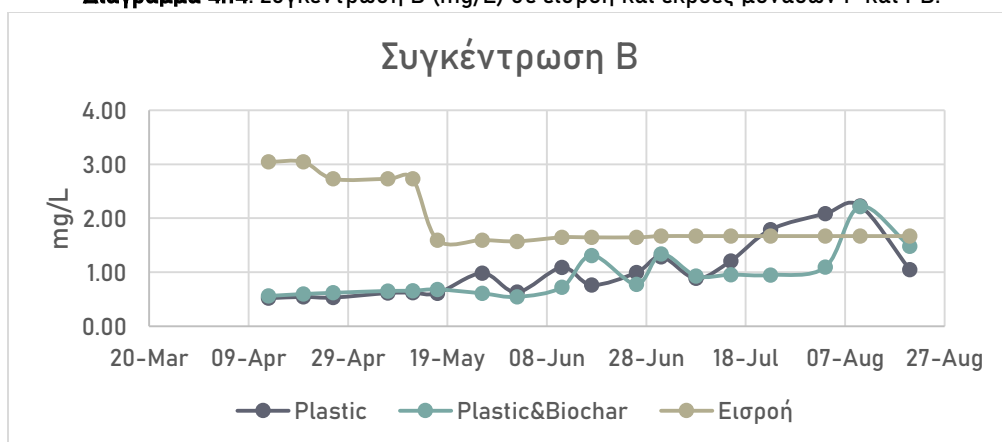
**Πίνακας 4.16.** Μέση τιμή συγκέντρωσης (mg/L) και εύρος τιμών συγκέντρωσης (mg/L) για μέταλλα και μεταλλοειδή σε εισροή, P, PB.

Παράμετρος	Εισροή		P		PB	
	Μέση Τιμή (mg/L)	Εύρος Τιμών (mg/L)	Μέση Τιμή (mg/L)	Εύρος Τιμών (mg/L)	Μέση Τιμή (mg/L)	Εύρος Τιμών (mg/L)
B	2.04±0.66	1.57-3.04	1.03±0.53	0.52-2.23	0.90±0.43	0.55-2.22
Mg	37.13±13.29	25.11-57.33	31.11±13.21	16.30-56.65	30.5±12.01	18.9-64.62
K	662.65± 486.85	271.79-1379.33	356.97±131.17	191.63-710.64	425.53±148.58	261-690.90
Ca	458.00± 207.96	173.0-641.31	201.97±53.63	137.80-290.36	195.72±57.60	137.9-334.66
Cr	0.19±0.10	0.11-0.32	0.03±0.01	0.02-0.05	0.03±0.01	0.02-0.05
Mn	0.08±0.05	0.02-0.15	0.01±0.01	0.002-0.02	0.02±0.02	0.001-0.01
Fe	2.18±2.94	0.63-8.13	0.19±0.09	0.07-0.4	0.22±0.08	0.12-0.41
Co	0.03±0.01	0.03-0.04	0.01±0.004	0.007-0.02	0.01±0.004	0.007-0.02
Ni	0.17±0.01	0.17-0.18	0.01±0.006	0.006-0.02	0.02±0.03	0.006-0.05
Cu	0.52± 0.47	0.19-0.85	0.04±0.02	0.02-0.06	0.04±0.03	0.004-0.10
Zn	0.70±0.63	0.15-1.61	0.23±0.1	0.07-0.43	0.25±0.09	0.15-0.46
As	-	-	-	-	-	-
Mo	0.11±0.08	0.06-0.20	0.04±0.04	0.004-0.14	0.04±0.04	0.003-0.13
Cd	-	-	-	-	-	-
Hg	0.02±0.01	0.01-0.04	0.063±0.081	0.002-0.18	0.04±0.04	0.001-0.102
Pb	0.02	-	0.06	-	0.03±0.03	0.01-0.05

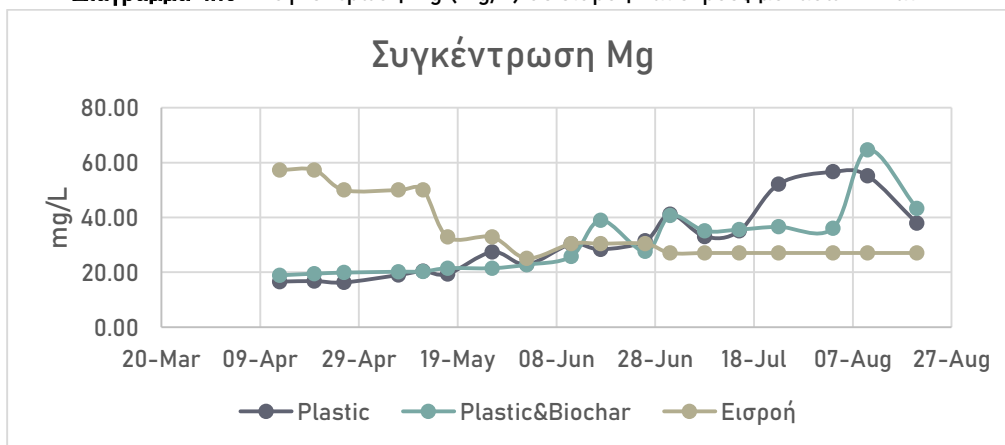
Από τον Πίνακα 4.16 καθώς και τα Διαγράμματα 4.14 έως 4.20 είναι εμφανές ότι η πλειοψηφία των στοιχείων που αναλύθηκαν έχει πολύ χαμηλότερες τιμές συγκέντρωσης εκροής συγκριτικά με τις αντίστοιχες τιμές εισροής, τόσο για τη μονάδα P όσο και για τη μονάδα PB. Επίσης, διαπιστώνεται ότι οι τιμές συγκέντρωσης εκροών και για τις δύο μονάδες είναι παρόμοιες, γεγονός που αποδίδεται στο ότι το βιοεξανθράκωμα έχει πολύ μικρή ειδική επιφάνεια και δεν είναι ικανό να προσροφήσει σε μεγάλο βαθμό τα διάφορα μέταλλα και μεταλλοειδή. Οι μεγαλύτερες τιμές συγκέντρωσης εκροών εντοπίζονται στα στοιχεία B, Mg, K, Ca, Cr, Fe και Zn. Τα υπόλοιπα στοιχεία του Πίνακα 4.16, όπως το Co, Ni, Cu, As, Mo, Cd, Hg και το Pb, χαρακτηρίζονται από ελάχιστες έως και μη ανιχνεύσιμες τιμές συγκεντρώσεων για τις εκροές των μονάδων P και PB. Σχετικά με τα στοιχεία που εντοπίζονται οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις παρατηρείται στην πλειοψηφία μια ελάχιστη αύξηση κατά βάση γύρω στα τέλη Ιουλίου με αρχές Αυγούστου, ωστόσο αυτή η αύξηση είναι παροδική και μετά μειώνεται. Πιο αναλυτικά, οι μεγαλύτερες τιμές εντοπίστηκαν για το στοιχείο B στη μονάδα P με συγκέντρωση 2.23mg/L και στη μονάδα PB με

συγκέντρωση 2.22mg/L, τον Αύγουστο. Παρόμοια αποτελέσματα προκύπτουν για το Mg, όπου στη μονάδα P η μέγιστη συγκέντρωση ανέρχεται στα 56.65mg/L και στη μονάδα PB στα 64.62mg/L. Το K έχει μέγιστη συγκέντρωση στη μονάδα P με τιμή 710.64mg/L τον Αύγουστο και στη μονάδα PB με τιμή 690.90mg/L τον Ιούλιο. Αναφορικά με το Ca, η μέγιστη τιμή στη μονάδα P εντοπίζεται τον Μάιο με τιμή 290.36mg/L και τον Αύγουστο με τιμή 322.26mg/L στη μονάδα PB. Το Cr έχει αυξάνεται εξίσου ελάχιστα τέλη Ιουλίου με αρχές Αυγούστου, στη μονάδα P με τιμή 0.045mg/L και στη μονάδα PB με τιμή 0.047mg/L. Το Μάιο η συγκέντρωση του Fe στη μονάδα P είναι η μέγιστη με τιμή 0.396mg/L, ενώ αντίστοιχα τον Ιούλιο εντοπίζεται η μέγιστη συγκέντρωση στη μονάδα PB με τιμή 0.405mg/L. Τέλος, το Zn εντοπίζεται σε υψηλές συγκεντρώσεις τον Μάιο στη μονάδα P με τιμή 0.43mg/L και στη μονάδα PB τον Απρίλιο με τιμή 0.46mg/L. Ωστόσο, ακόμα και οι μέγιστες τιμές στις συγκεντρώσεις σε αρκετά από τα στοιχεία που αναλύθηκαν εντοπίζονται σε χαμηλά ποσοστά συγκριτικά με τα επιτρεπτά όρια εκροής δευτεροβάθμιας επεξεργασίας λυμάτων (Πίνακας 4.14). Παρακάτω παρουσιάζονται τα Διαγράμματα 4.14-4.20 με τις συγκεντρώσεις σε mg/L σε εισροή και εκροές των μονάδων P και PB, για τα στοιχεία B, Mg, K, Ca, Cr, Fe και Zn.

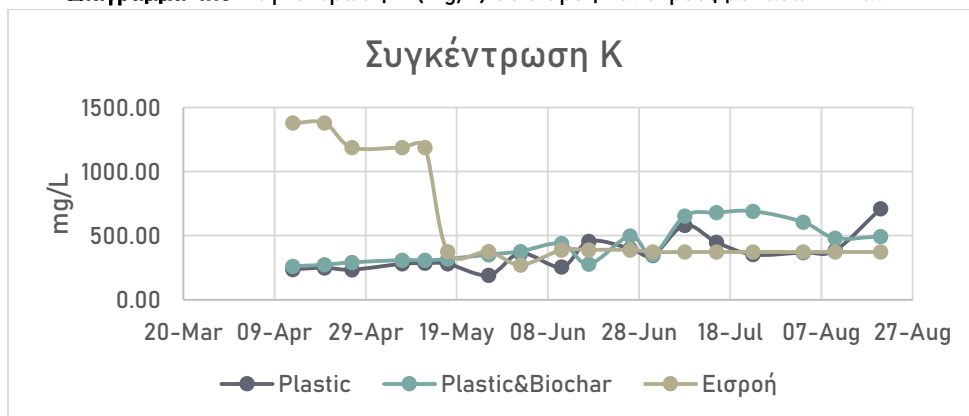
**Διάγραμμα 4.14.** Συγκέντρωση B (mg/L) σε εισροή και εκροές μονάδων P και PB.



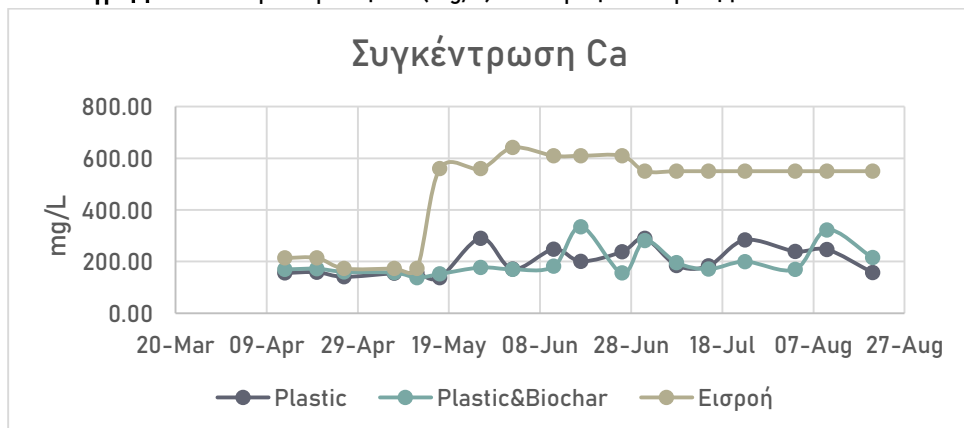
**Διάγραμμα 4.15.** Συγκέντρωση Mg (mg/L) σε εισροή και εκροές μονάδων P και PB.



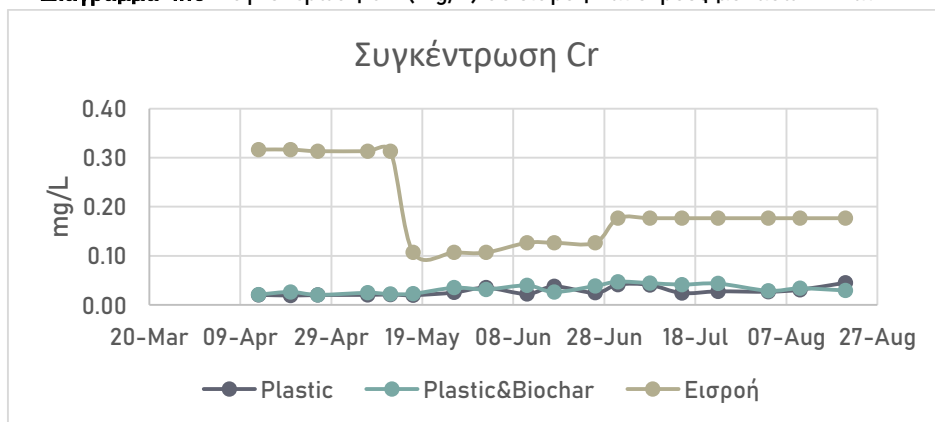
**Διάγραμμα 4.16.** Συγκέντρωση K (mg/L) σε εισροή και εκροές μονάδων Ρ και ΡΒ.



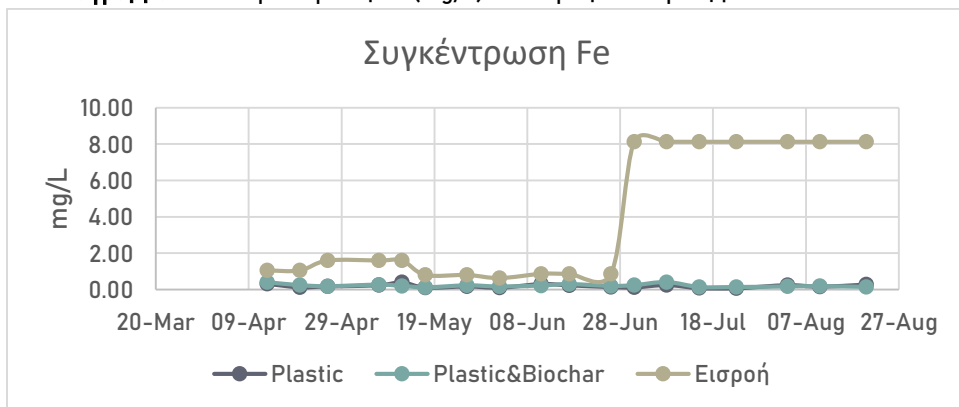
**Διάγραμμα 4.17.** Συγκέντρωση Ca (mg/L) σε εισροή και εκροές μονάδων Ρ και ΡΒ.



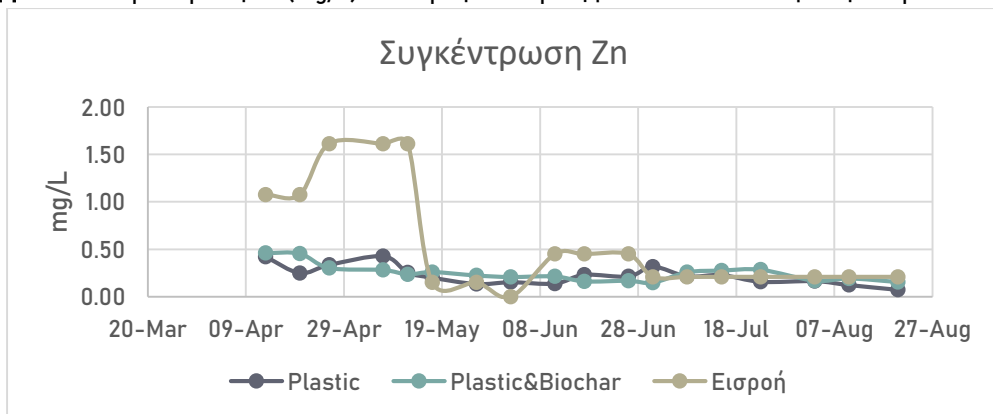
**Διάγραμμα 4.18** Συγκέντρωση Cr (mg/L) σε εισροή και εκροές μονάδων Ρ και ΡΒ.



**Διάγραμμα 4.19** Συγκέντρωση Fe (mg/L) σε εισροή και εκροές μονάδων P και PB.



**Διάγραμμα 4.20** Συγκέντρωση Zn (mg/L) σε εισροή και εκροές μονάδων P και PB με την πάροδο του χρόνου.



Οι κυριότεροι τοξικοί ρύποι θεωρούνται τα μέταλλα όπως As, Cd, Cr, Pb, Hg. Όλοι οι ζωντανοί μικροοργανισμοί απαιτούν ποσότητες αυτών των στοιχείων για να αναπτυχθούν, ωστόσο τα ίδια μέταλλα μπορεί να είναι τοξικά σε μεγάλες συγκεντρώσεις. Ακολουθεί ο Πίνακας 4.17 με αυτούς τους ρύπους και την αρνητική επίπτωση που πιθανό να προκαλέσουν στο περιβάλλον τους και κυρίως στον άνθρωπο, αν βρεθούν σε μεγάλη συγκέντρωση.

**Πίνακας 4.17** Ρύποι προτεραιότητας και η επίπτωσή τους, σύμφωνα με τους (Metcalf & Eddy, 2006).

Όνομα	Σύμβολο	Επίπτωση
Αρσενικό	As	Καρκινογόνο και μεταλλαξιογόνο. Σε μακροχρόνια βάση μπορεί να προκαλέσει κάματο ή απώλεια ενέργειας.
Κάδμιο	Cd	Εύφλεκτο σε μορφή σκόνης. Τοξικό κατά την εισπνοής σκόνης ή καπνού. Καρκινογόνο. Τα διαλυτά συστατικά του καδμίου είναι εξαιρετικά τοξικά. Σε μακροχρόνια βάση δημιουργεί βλάβες σε ζωτικά όργανα του ανθρώπου.
Χρώμιο	Cr	Οι ενώσεις του εξασθενούς χρωμίου δημιουργούν καρκινογένεση. Επίσης είναι διαβρωτικές. Σε μακροχρόνια βάση δημιουργεί δερματικές παθήσεις και βλάβες των νεφρών.
Μόλυβδος	Pb	Τοξικό κατά την εισπνοή καπνού ή ατμών. Σε μακροχρόνια βάση προκαλεί βλάβες στον εγκέφαλο και στους νεφρούς. Γενετικές δυσμορφίες.

**Πίνακας 4.18.** Τυπικά όρια εκρών τοξικών συστατικών που συναντώνται σε δευτεροβάθμιες εκροές σύμφωνα με τους (Metcalf & Eddy, 2006).

Συστατικό	Συγκέντρωση (mg/L)
Αρσενικό	0.002
Κάδμιο	0.0011
Χρώμιο	0.011
Υδράργυρος	0.0021

Στους τεχνητούς υγροβιότοπους, η απομάκρυνση των μετάλλων και των μεταλλοειδών επιτυγχάνεται μέσω διεργασιών προσρόφησης και δέσμευσης, δηλαδή στα πορώδη μέσα των φίλτρων, στη βλάστηση και στο νερό. Τα διαλυμένα μέταλλα έχουν την ικανότητα να συνδέονται με τις οργανικές ουσίες που εντοπίζονται στα ριζώματα των φυτών και στους πόρους των μέσων εντός των τεχνητών υγροβιότοπων (Stefanakis et al., 2014).

Όπως προαναφέρθηκε, ένας σημαντικός παράγοντας υπεύθυνος για τη μείωση της τοξικότητας των μετάλλων θεωρείται η συμπλοκοποίηση των μετάλλων με οργανικές ουσίες. Οργανικές ενώσεις όπως τα χουμικά οξέα που περιέχουν καρβοξυλικές και φαινολικές ομάδες προκαλούν αυτές τις αλληλεπιδράσεις και καταλήγουν στο σχηματισμό σταθερών μεταλλικών συμπλεγμάτων (Sheoran and Sheoran, 2006). Το διαστάλαγμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πηγή οργανικού φορτίου. Ωστόσο, πιθανή βιολογική αποσύνθεση οργανικού φορτίου μπορεί να οδηγήσει σε εκρόφιση μετάλλων. Επιπλέον, τα βαρέα μέταλλα καθιζάνουν ως αδιάλυτα άλατα, π.χ. ανθρακικά, διττανθρακικά, σουλφίδια και υδροξείδια, ανάλογα με τη διαλυτότητα και τη συγκέντρωση των μεταλλικών ιόντων και το pH των λυμάτων (Stefanakis et al., 2014). Τα άλατα που σχηματίζονται είναι αδιάλυτα και μετά την κατακρήμνιση στερεώνονται εντός του υποστρώματος. Αυτά τα αδιάλυτα άλατα σχηματίζονται από την οξείδωση και την υδρόλυση του Fe, του Al και του Mn, τα οποία αντιπροσωπεύουν τις κύριες διαδικασίες απομάκρυνσης αυτών των μετάλλων. Μεταξύ αυτών, το Al και το Mn εξαρτώνται λιγότερο από το pH (Sheoran and Sheoran, 2006). Η δέσμευση μετάλλων με οξείδια Fe και Mn δεν είναι ένας μακροπρόθεσμος μηχανισμός αφαίρεσης, καθώς αυτά τα οξείδια εξαρτώνται πολύ από τις παραλλαγές του διαλυμένου οξυγόνου και μπορεί να επιστρέψουν πίσω στο σύστημα. Επιπλέον, υπό αναερόβιες συνθήκες και την παρουσία επαρκούς πηγής άνθρακα, το θειϊκό ανάγεται από βακτήρια που μειώνουν τα θειϊκά σε σουλφίδια, τα οποία καθιζάνουν ως στερεά θειούχου μετάλλου (Stefanakis et al., 2014).

Γενικά, οι τεχνητοί υγροβιότοποι λειτουργούν ως ενεργά φίλτρα για τα βαρέα μέταλλα. Χάρη στο εκτεταμένο ριζικό σύστημα και καθώς το λύμα διέρχεται μέσα από τους πόρους των φίλτρων, τα βαρέα μέταλλα παγιδεύονται και έτσι κατακρατούνται εντός του συστήματος του τεχνητού υγροβιότοπου. Η αποτελεσματικότητα του φιλτραρίσματος μπορεί να επηρεαστεί από την ταχύτητα ροής του νερού, την ταχύτητα καθίζησης σωματιδίων, τον όγκο των πόρων των μέσων του υποστρώματος και το μήκος του υγροβιότοπου (Sheoran and Sheoran, 2006). Τέλος, μια άλλη φυσική διαδικασία για την αφαίρεση βαρέων είναι η καθίζηση.

Πολλά συστατικά των λυμάτων υπάρχουν ως κατιόντα, συμπεριλαμβανομένων των περισσότερων από τα ιχνοστοιχεία όπως Cu, Zn, Pb, Ni και Cd. Η ικανότητα για κατακράτηση κατιόντων, εκφρασμένη ως ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων γενικά αυξάνεται σε ορισμένα υποστρώματα σε περιπτώσεις αυξανόμενης περιεκτικότητας σε άργιλο και οργανική ύλη (Sheoran and Sheoran, 2006). Η απομάκρυνση του Fe εξαρτάται από το pH, το δυναμικό οξειδωσης-μείωσης και την παρουσία διαφόρων ανιόντων. Η απομάκρυνση του Al και του Mn διέπεται καθαρά από το pH. Τα βακτήρια παίζουν σημαντικό ρόλο στην οξείδωση του Mn. Τέλος, οι μικροοργανισμοί παρέχουν μια μετρήσιμη ποσότητα πρόσληψης και αποθήκευσης βαρέων μετάλλων. Χάρη στις μεταβολικές τους διεργασίες επιτυγχάνεται η απομάκρυνση των βαρέων μετάλλων. Η μείωση των μετάλλων σε μη κινητές μορφές λόγω της μικροβιακής δραστηριότητας σε υγροβιότοπους έχει αναφερθεί από τον (Sobolewski, 1999). Μέταλλα όπως το Cr ακινητοποιούνται όταν μειώνονται μέσω διεργασιών που καταλύονται βιολογικά από μικροοργανισμούς (Fude et al., 1994). Τα βακτήρια που μειώνουν το Se παίζουν επίσης σημαντικό ρόλο στη μείωσή του.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

## 5.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την παρούσα διπλωματική εργασία μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα σχετικά με τη λειτουργία και την περαιτέρω βελτιστοποίηση των συστημάτων τεχνητών υγροβιότοπων οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής, τα οποία συνοψίζονται ως ακολούθως:

1. Η προσθήκη βιοεξανθρακώματος διαπιστώνεται ότι αυξάνει την απόδοση του τεχνητού υγροβιότοπου καθώς η παρουσία του συμβάλλει σημαντικά στην απομάκρυνση ρύπων (πχ. άζωτο). Χαρακτηριστικά, διαπιστώθηκε ότι η χρήση βιοεξανθρακώματος συνεισφέρει παραπάνω κατά 14.0% για απομάκρυνση  $\text{NO}_3\text{-N}$ , 6.1% για απομάκρυνση  $\text{NO}_2\text{-N}$  και 8.6% για απομάκρυνση  $\text{NH}_4\text{-N}$ . Το γεγονός αυτό εξηγείται καθώς το βιοεξανθράκωμα επιταχύνει τη διεργασία της απονιτροποίησης ενώ επιπρόσθετα αυξάνει τη φυτική βιομάζα εντός του υγροβιότοπου και τέλος αποτελεί ελκυστική περιοχή για ανάπτυξη μικροβιακού βιοφίλμ.
2. Η χρήση ανακυκλωμένου πλαστικού HDPE ως υλικό υποστρώματος του υγροβιότοπου αποτελεί μια αξιόπιστη εναλλακτική λύση, η οποία παρέχει αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα σε σύγκριση με τα έως τώρα ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά υποστρώματος (πχ. χώμα ή χαλίκι). Επιπλέον, το HDPE λειτουργεί και αυτό ως περιοχή προσκόλλησης και ανάπτυξης μικροβιακού βιοφίλμ.
3. Το HDPE είναι πιο ελαφρύ υλικό συγκριτικά με άλλα υλικά υποστρώματος, η μεταφορά του κρίνεται ως χαμηλότερου κόστους και παράλληλα ενισχύεται το μοντέλο της κυκλικής οικονομίας και της επέκτασης του χρόνου ζωής των υλικών, όσο το δυνατό, περισσότερο. Τέλος, χάρη στο 95% του πορώδους του αποφεύγεται το λεγόμενο “bed clogging”, δηλαδή ο κορεσμός του υποστρώματος και επίσης μπορεί εύκολα να καθαριστεί και να επανατοποθετηθεί στον υγροβιότοπο.
4. Οι αναερόβιες συνθήκες που επικρατούν στους τεχνητούς υγροβιότοπους οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής προσφέρουν τις ιδανικές συνθήκες για να επιτευχθεί, σε υψηλά ποσοστά, η διεργασία της απονιτροποίησης και άρα να απομακρυνθεί το άζωτο από το σύστημα του τεχνητού υγροβιότοπου.
5. Η προσθήκη μεθανόλης ενισχύει, κατά πολύ, τη διαδικασία της απονιτροποίησης, παρέχοντας μια επιπλέον πηγή άνθρακα στο σύστημα του υγροβιότοπου ενώ δεν εντοπίζεται κάποια παρεμποδιστική δράση ή αρνητική επίπτωση της χρήσης της στο σύστημα του υγροβιότοπου. Χαρακτηριστικά η μεθανόλη αυξάνει την απόδοση κατά 15.4% στη μονάδα P για την απομάκρυνση  $\text{NO}_3\text{-N}$  και κατά 8.9% για απομάκρυνση  $\text{NO}_2\text{-N}$ .
6. Η εξατμισοδιαπνοή αποτελεί κύριο μηχανισμό απομάκρυνσης νερού από τον τεχνητό υγροβιότοπο. Επιπλέον, οι απώλειες νερού σχετίζονται με τον όγκο που εισέρχεται στη μονάδα, με τη θερμοκρασία, με τη βροχόπτωση και με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η απομάκρυνση όγκου και οι ανάγκες της φυτικής βιομάζας για νερό διαπιστώνεται ότι επηρεάζονται από την ύπαρξη βιοεξανθρακώματος στο σύστημα.
7. Η θερμοκρασία και το κλίμα της περιοχής ευνοούν τις διαδικασίες απομάκρυνσης ρύπων και οδηγούν σε υψηλότερες αποδόσεις. Αυτό επιτυγχάνεται ιδανικά τέλος άνοιξης με αρχές καλοκαιριού, όπου επικρατούν και υψηλές θερμοκρασίες. Κύρια συμβολή της θερμοκρασίας εντοπίζεται στην απομάκρυνση όλων των μορφών αζώτου (νιτρικό άζωτο, νιτρώδες άζωτο,

αμμωνιακό άζωτο) από το σύστημα. Σε αυτές τις διεργασίες συμβάλλουν επίσης και πολλοί μικροοργανισμοί, οι οποίοι δρουν βέλτιστα σε θερμοκρασίες άνω των 15°C.

8. Η απομάκρυνση της οργανικής ύλης (BOD<sub>5</sub> και COD) καθορίζεται σημαντικά από τη δράση αερόβιων και αναερόβιων μικροοργανισμών, ενώ λιγότερο σημαντική κρίνεται η επίδραση της θερμοκρασίας στην αφαίρεση της από το σύστημα του υγροβιότοπου. Η έκταση της αποικοδόμησης και της μετατροπής οργανικής ύλης καθορίζεται επίσης και από την παροχή οξυγόνου, η οποία μπορεί να επηρεαστεί από τη μέθοδο λειτουργίας, τον υδραυλικό χρόνο παραμονής και το είδος του εδαφικού υλικού. Προσθήκη βιοεξανθρακώματος ευνοεί τις συνθήκες για ανάπτυξη αερόβιων και αναερόβιων μικροοργανισμών, υπεύθυνων για την απομάκρυνση του οργανικής ύλης.
9. Τέλος, τα τυπικά νομοθετικά όρια εκροών διαπιστώνεται ότι ικανοποιούνται για τα περισσότερα στοιχεία ως προς τη συγκέντρωση των μετάλλων και μεταλλοειδών.

Συνοψίζοντας, μπορεί κανείς να διαπιστώσει τη σημασία των τεχνητών υγροβιότοπων ως ένα φιλικό προς το περιβάλλον σύστημα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, κατανοώντας τους περίπλοκους φυσικοχημικούς μηχανισμούς, οι οποίοι λαμβάνουν χώρα ταυτόχρονα εντός των υγροβιότοπων. Έχοντας υπόψη τη χρησιμότητά τους για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων, έγινε μια προσπάθεια βελτιστοποίησης ορισμένων παραμέτρων με σκοπό την αύξηση της απόδοσής τους αναφορικά με την απομάκρυνση ρύπων, την αξιοποίηση ανακυκλώσιμων υλικών, ενισχύοντας έτσι το μοντελο της κυκλικής οικονομίας, με ταυτόχρονη τη μείωση της χωρικής έκτασης του υγροβιότοπου αλλά και τη μείωση του επενδυτικού κόστους. Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν συμπεραίνεται ότι το παρόν πείραμα επιφέρει αξιόλογα αποτελέσματα και μπορεί να ενταχθεί ως σύστημα φυσικού καθαρισμού λυμάτων, ή ως ένα σύστημα επιπλέον καθαρισμού στα ήδη αξιοποιήσιμα συστήματα της μονάδας του Χ.Υ.Τ.Α. Χανίων. Ωστόσο, πάντα θα υπάρχει περιθώριο βελτιστοποίησης της διαδικασίας. Ακολουθούν ορισμένες προτάσεις, οι οποίες αποσκοπούν σε περαιτέρω βελτιστοποίηση των τεχνητών υγροβιότοπων ούτως ώστε να επιτευχθεί υψηλότερο ποσοστό απόδοσης σε μελλοντικές εφαρμογές ενός τέτοιου συστήματος.

## 5.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Οι προτάσεις για περαιτέρω βελτιστοποίηση των παραμέτρων των τεχνητών υγροβιότοπων συνοψίζονται ως εξής:

- Εναλλακτικές πηγές άνθρακα αντί μεθανόλης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν όπως αστικό λύμα, φρουκτόζη, γλυκόζη, μείγματα αμύλου καλαμποκιού/ πολυκαπρολακτόνης (SPCL) για βιολογική απονιτροποίηση.
- Ως στερεά πηγή άνθρακα πέραν του βιοεξανθρακώματος, το οποίο μπορεί να προστεθεί σε μεγαλύτερη ποσότητα, μπορούν επίσης να προστεθούν διάφορα συνθετικά πολυμερή (πολυκαπρολακτόνη και πολυυδροξυαλκανοϊκά) ή φυσικά υλικά (άχυρο σίτου, βαμβάκι, φλοιοί πεύκου ή καρυδιάς). Επιλέγεται στερεά μορφή γιατί έχει παρατηρηθεί ότι οι υγρές πηγές άνθρακα είναι συχνά δύσκολες στη μεταφορά, δαπανηρές, είναι εύκολο να αποσυντεθούν αερόβια και μπορούν να ελεγχθούν με δυσκολία αφού προστεθούν σε υγροτόπους σε αντίθεση με τις στερεές μορφές οι οποίες παρέχουν άνθρακα και έχουν χαμηλότερο κόστος.
- Δημιουργία υβριδικού συστήματος τεχνητών υγροβιότοπων, δηλαδή πολλαπλοί τεχνητοί υγροβιότοποι για βέλτιστο αποτέλεσμα, αφού τα μειονεκτήματα του ενός συστήματος, καλύπτονται από τα πλεονεκτήματα του άλλου.

# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

## ΕΛΛΗΝΙΚΗ

- Αγγελάκης, Α.Ν. και Τσομπάνογλου, Γ. (1995). Υγρά Απόβλητα: Φυσικά Συστήματα Επεξεργασίας και Ανάκτηση, Επεξεργασία και Διάθεση Εκροών. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης.
- Αγγελάκης, Α.Ν. (1994). Φυσικά Συστήματα Επεξεργασίας Αστικών Υγρών Αποβλήτων. Τεχνικά Χρονικά, 14 (4): 125-140.
- Αγιουτάντη Ροζαλία, " Μελέτη αποτελεσματικότητας τεχνητού υδροβιότοπου με αλόφυτα για την απομάκρυνση Cd, Ni και Zn από αστικά λύματα", Διπλωματική Εργασία για το προπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης, (Χανιά 2018).
- Ακράτος Σ. Χρήστος, -«ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΩΝ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΙΛΟΤΙΚΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ», διδακτορική διατριβή για το πρόγραμμα σπουδών του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης, (Ξάνθη 2006).
- Ανδρεαδάκης, Α., Παρπαίρης, Α., Σουφλής, Ι. και Σουφλής, Κ. Διαχείριση στερεών αποβλήτων, ειδικά έργα, ασφάλεια, Πάτρα: Τμήμα εκδόσεων Ελληνικού Ανοικτού Πανεπιστημίου, 2000.
- Βιδάλη Ελένη, Μεταπτυχιακή Διατριβή "Ποιοτική και ποσοτική εκτίμηση των στραγγισμάτων από τα απορρίματα του ΧΥΤΑ Άνω Λιοσίων", Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα 2011.
- Βουδούρης, Κ.Σ. (2009) Υδρογεωλογία Περιβάλλοντος: Υπόγεια Νερά και Περιβάλλον, Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα.
- Γιαννής Απόστολος, "Αστικά Στερεά Απόβλητα", Σημειώσεις Μαθήματος Σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος Πολυτεχνείου Κρήτης, Χανιά 2020.
- Δ. Βάμβουκα. (2009). Βιομάζα, βιοενέργεια & περιβάλλον. Εκδόσεις Τζιόλα. Αθήνα, Ελλάδα.
- Εφημερίς της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας, Τεύχος Δεύτερο, Αρ. Φύλλου 1572, 16 Δεκεμβρίου 2002.
- Ζαγγανά Ελένη, Τμήμα Γεωλογίας του Πανεπιστημίου Πατρών,. «Διάθεση στερεών και υγρών αποβλήτων στο γεωλογικό περιβάλλον, ΧΥΤΑ - Χώροι Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων & Στεγανοποίηση ΧΥΤΑ ». Έκδοση: 1.0. Πάτρα 2015.
- Ζουραράκη Ε., 2002, «Σχεδιασμός και Λειτουργία Τεχνητών Υδροβιοτόπων Επεξεργασίας Λυμάτων», Μεταπτυχιακή Διατριβή, Εκδόσεις Δημοκριτείου Πανεπιστημίου Θράκης.
- Καραμούζης Δ., 2003, Φυσικά Συστήματα Επεξεργασίας Λυμάτων (Τεύχος 1: Τεχνητοί Υγρότοποι), Εκδόσεις Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.
- Κασινού, Δ. (2006) Εισαγωγή στη μηχανική περιβάλλοντος, Διδακτικές Σημειώσεις Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Κύπρου, Λευκωσία.
- Κουλούδης Ιορδάνης, Ερευνητική Εργασία 'ΧΥΤΑ. Η ελληνική και διεθνής πρακτική', Τμήμα Μηχανικών Χωροταξίας και Ανάπτυξης Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, Βέροια 2012.
- Νταράκας Ε. (2011) Στοιχεία χημείας περιβάλλοντος, Διδακτικές Σημειώσεις Π.Μ.Σ. Προστασία Περιβάλλοντος και Βιώσιμη Ανάπτυξη, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.
- Ντζαμίλης Π. & Χάβας Γ. ,Ποιοτική και Ποσοτική Ανάλυση αστικών Απορριμμάτων της Περιφέρειας Κρήτης, Μεταπτυχιακή Διατριβή. Τμήμα Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος. Πολυτεχνείο Κρήτης, 2004.
- Παναγιωτακόπουλος, Δ.Χ., Βιώσιμη διαχείριση αστικών στερεών αποβλήτων, Α' Έκδοση, Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Ζυγός, 2002.

- Παπαγιάννης Περικλής, Ερευνητική Εργασία, Μέθοδοι διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων και εντοπισμός τους στον Ευρωπαϊκό Χώρο, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Μηχανικών Χωροταξίας και Ανάπτυξης, Φεβρουάριος 2015.
- Παπασταύρου Χρυστάλλα, 2007, 'Χαρακτηρισμός και Επεξεργασία Στραγγισμάτων του ΧΥΤΑ Χανίων', Διπλωματική Εργασία, σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Παρανυχιανάκης Ν., Σημειώσεις Μαθήματος " Αποκεντρωμένα Συστήματα Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων", Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος Πολυτεχνείου Κρήτης, Χανιά 2021.
- Ρεγκούζας Παναγιώτης, 'Παραγωγή βιοεξανθρακώματος από το οργανικό κλάσμα των απορριμμάτων και παραγωγή για αγρονομικές εφαρμογές', Διπλωματική εργασία, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά 2015.
- Ρεγκούζας Παναγιώτης, 'Προσρόφηση ενδοκρινικών διαταρακών σε βιοεξανθράκωμα από λυματολάσπη', Μεταπτυχιακή Διατριβή, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά 2017.
- Σιούτη Π. Γλυκερία , 'Εγχειρίδιο Δικαίου Περιβάλλοντος', Γ έκδοση, Εκδόσεις Σάκκουλα, 2018.
- Στεφανάκης Αλέξανδρος, 2011 'ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΩΝ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΡΟΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΣΤΙΚΩΝ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΚΑΙ ΛΑΣΠΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΙΛΟΤΙΚΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ', Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη.
- Στούπας Χριστόφορος, Διπλωματική Εργασία "Επεξεργασία διασταλαγμάτων ΧΥΤΑ με βιολογικές και χημικές μεθόδους: Μελέτη περίπτωσης ΧΥΤΑ Μαυροράχης", Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας Ελληνικού Ανοικτού Πανεπιστημίου, Πάτρα 2020.
- Φάττα, Δ. (2005) Διαχείριση στερεών και επικίνδυνων αποβλήτων, Εργαστήριο Μηχανικής Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Κύπρου.
- Φραντζής Ι. & Συνεργάτες ΕΠΕ, (2016). Τοπικό σχέδιο διαχείρισης αποβλήτων Δήμου Ηρακλείου.
- Χιονίδης, Θ. Ενέργεια από απόβλητα: Διαχείριση απορριμμάτων περιφέρειας Κρήτης με θερμική και/η μηχανική – βιολογική επεξεργασία, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τμήμα Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2007.

- A.R. Esfahani, L. Zhai, S. A H M, Removing heavy metals from landfill leachate using electrospun polyelectrolyte fiber mat-laminated ultrafiltration membrane ,J. Environ. Chem. Eng., 9 (2021), p. 105355.
- Abdelhakeem, S. G., Aboulroos, S. A., & Kamel, M. M. (2016). Performance of a vertical subsurface flow constructed wetland under different operational conditions. *Journal of Advanced Research*, 7(5), 803-814.
- Ahmad, M., Rajapaksha, A. U., Lim, J. E., Zhang, M., Bolan, N., Mohan, D., Vithanage, M., Lee, S.S. & Ok, Y. S. (2014). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review. *Chemosphere*, 99, 19-33.
- Akinbile, C. O., Yusoff, M. S., & Zuki, A. A. (2012). Landfill leachate treatment using sub-surface flow constructed wetland by *Cyperus haspan*. *Waste management*, 32(7), 1387-1393.
- Akrotos, C. S., & Tsihrintzis, V. A. (2007). Effect of temperature, HRT, vegetation and porous media on removal efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological engineering*, 29(2), 173-191.
- Al-Omari, A., & Fayyad, M. (2003). Treatment of domestic wastewater by subsurface flow constructed wetlands in Jordan. *Desalination*, 155(1), 27-39.
- Andrio, D., Asmura, J., Yenie, E., & Putri, K. (2019). Enhancing BOD5/COD ratio co-substrate tofu wastewater and cow dung during ozone pretreatment. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 276, p. 06027). EDP Sciences.
- Artiola, J. F., Rasmussen, C., & Freitas, R. (2012). Effects of a biochar-amended alkaline soil on the growth of romaine lettuce and bermudagrass. *Soil Science*, 177(9), 561-570.
- Ayaz, S.C. and Akca, L., 2001, 'Treatment of wastewater by Natural Systems', *Environmental International*, Vol. 26, pp. 189-195.
- B. Bhalla, M.S. Saini, M.K. Jha, Characterization of leachate from municipal solid waste (MSW) landfilling sites of Ludhiana, India: a comparative study, *Int. J. Eng. Res. Appl.*, 2 (2012), pp. 732-745
- Baddam, R., Reddy, G. B., Raczowski, C., & Cyrus, J. S. (2016). Activity of soil enzymes in constructed wetlands treated with swine wastewater. *Ecological engineering*, 91, 24-30.
- Bakhshoodeh, R., Alavi, N., Oldham, C., Santos, R. M., Babaei, A. A., Vymazal, J., & Paydary, P. (2020). Constructed wetlands for landfill leachate treatment: A review. *Ecological Engineering*, 146, 105725.
- Bandala, E. R., Liu, A., Wijesiri, B., Zeidman, A. B., & Goonetilleke, A. (2021). Emerging materials and technologies for landfill leachate treatment: A critical review. *Environmental Pollution*, 118133.
- Barley, R. W., Hutton, C., Brown, M. M. E., Cusworth, J. E., & Hamilton, T. J. (2005). Trends in biomass and metal sequestration associated with reeds and algae at Wheal Jane Bioremediation pilot passive treatment plant. *Science of the total environment*, 345(1-3), 279-286.
- Bassi, N., Kumar, M.D., Sharma, A., Pardha-Saradhi, P., 2014. Status of wetlands in India: A review of extent, ecosystem benefits, threats and management strategies, *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Volume 2, Pages 1-19.

- Batty, L. C., & Younger, P. L. (2007). The effect of pH on plant litter decomposition and metal cycling in wetland mesocosms supplied with mine drainage. *Chemosphere*, 66(1), 158-164.
- Biederman, L. A., & Harpole, W. S. (2013). Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis. *GCB bioenergy*, 5(2), 202-214.
- Boateng, A. A., Garcia-Perez, M., Mašek, O., Brown, R., & del Campo, B. (2015). Biochar production technology. *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation*. Routledge, London, 63-87
- Brassard, P., Godbout, S., & Raghavan, V. (2016). Soil biochar amendment as a climate change mitigation tool: Key parameters and mechanisms involved. *Journal of Environmental Management*, 181, 484-497.
- Březinová, T. D., & Vymazal, J. (2022). Distribution of heavy metals in *Phragmites australis* growing in constructed treatment wetlands and comparison with natural unpolluted sites. *Ecological Engineering*, 175, 106505.
- Bulc, T. G. (2006). Long term performance of a constructed wetland for landfill leachate treatment. *Ecological engineering*, 26(4), 365-374.
- Cayuela, M. L., Sánchez-Monedero, M. A., Roig, A., Hanley, K., Enders, A., & Lehmann, J. (2013). Biochar and denitrification in soils: when, how much and why does biochar reduce N<sub>2</sub>O emissions?. *Scientific reports*, 3(1), 1-7.
- Chand, N., Kumar, K., & Suthar, S. (2021). "Cattle dung biochar-packed vertical flow constructed wetland for nutrient removal": Effect of intermittent aeration and wastewater COD/N loads on the removal process. *Journal of Water Process Engineering*, 43, 102215.
- Chand, N., Kumar, K., & Suthar, S. (2022). Enhanced wastewater nutrients removal in vertical subsurface flow constructed wetland: Effect of biochar addition and tidal flow operation. *Chemosphere*, 286, 131742.
- Chand, N., Suthar, S., Kumar, K., & Tyagi, V. K. (2021). Enhanced removal of nutrients and coliforms from domestic wastewater in cattle dung biochar-packed *Colocasia esculenta*-based vertical subsurface flow constructed wetland. *Journal of Water Process Engineering*, 41, 101994.
- Christensen, T. H., Kjeldsen, P., Bjerg, P. L., Jensen, D. L., Christensen, J. B., Baun, A., ... & Heron, G. (2001). Biogeochemistry of landfill leachate plumes. *Applied geochemistry*, 16(7-8), 659-718.
- Christensen, T.H. and Kjeldsen, P., Landfill emissions and environmental impact: An introduction. in *SARDINIA '95, Fifth International Landfill Symposium, Proceedings, Volume III*, Christensen, T.H., Cossu, R., and Stegmann, R., Eds., CISA, Cagliari, Italy, 1995, 3.
- Christofilopoulos, S., Syranidou, E., Gkavrou, G., Manousaki, E., Kalogerakis, N., 2016. The role of halophyte *Juncus acutus* L. in the remediation of mixed contamination in a hydroponic greenhouse experiment, *Society of Chemical Industry*, 91: 1665-1674.
- Coleman J., Hench K., Garbutt K., Sexstone A., Bissonnette G. and Skousen J., 2001. Treatment of domestic wastewater by three plant species in constructed wetlands. *Water Air Soil Pollut.* 128, 283-295.

- Dan, A., Oka, M., Fujii, Y., Soda, S., Ishigaki, T., Machimura, T., & Ike, M. (2017). Removal of heavy metals from synthetic landfill leachate in lab-scale vertical flow constructed wetlands. *Science of the Total Environment*, 584, 742-750.
- Den Boer, E., Jędrzak, A., Kowalski, Z., Kulczycka, J., & Szpadt, R. (2010). A review of municipal solid waste composition and quantities in Poland. *Waste Management*, 30(3), 369- 377.
- Ding, Y., Liu, Y. X., Wu, W. X., Shi, D. Z., Yang, M., & Zhong, Z. K. (2010). Evaluation of biochar effects on nitrogen retention and leaching in multi-layered soil columns. *Water, Air, & Soil Pollution*, 213(1), 47-55.
- Dong, Z., & Sun, T. (2007). A potential new process for improving nitrogen removal in constructed wetlands—promoting coexistence of partial-nitrification and ANAMMOX. *Ecological engineering*, 31(2), 69-78.
- Drizo, A., Frost, C. A., Grace, J., & Smith, K. A. (1999). Physico-chemical screening of phosphate-removing substrates for use in constructed wetland systems. *Water Research*, 33(17), 3595-3602.
- Drizo, A., Frost, C. A., Grace, J., & Smith, K. A. (2000). Phosphate and ammonium distribution in a pilot-scale constructed wetland with horizontal subsurface flow using shale as a substrate. *Water Research*, 34(9), 2483-2490.
- Elias, T. S., & Dykeman, P. A. (2009). *Edible wild plants: a North American field guide to over 200 natural foods*. Sterling Publishing Company, Inc..
- EPA, 1995. *A Handbook of Constructed Wetlands – Volume 1: General Considerations*, USEPA-Region III with USDA, NRCS.
- Farquhar, G. J., & Rovers, F. A. (1973). Gas production during refuse decomposition. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2(4), 483-495.
- Fude, L., Harris, B., Urrutia, M. M., & Beveridge, T. J. (1994). Reduction of Cr (VI) by a consortium of sulfate-reducing bacteria (SRB III). *Applied and Environmental Microbiology*, 60(5), 1525-1531.
- Gao, J., Oloibiri, V., Chys, M., Audenaert, W., Decostere, B., He, Y., Van Langenhove, H., Demeestere, K., Van Hulle, S.W.H., 2015. The present status of landfill leachate treatment and its development trend from a technological point of view. *Rev. Environ. Sci. Bio/Technol.* 14 (1), 93-122
- Gharbi, F., Rejeb, S., Ghorbal, M. H., & Morel, J. L. (2005). Plant response to copper toxicity as affected by plant species and soil type. *Journal of plant nutrition*, 28(3), 379-392.
- H. Ates, M.E. Argun, Fate of PAHs under subcritical and supercritical conditions in landfill leachate: removal or formation?, *Chem. Eng. J.*, 414 (2021), p. 128762.
- H. Robinson, The composition of leachates from very large landfills: an international review *Commun. Waste Resour. Manag.*, 8 (2007), pp. 19-32
- Haberl, R., Perfeler, R. and Mayer, H., 1995, 'Constructed Wetlands in Europe', *Water Science and Technology*, Vol. 32, pp.305-15.
- Hammer, D.A., «Designing constructed wetlands systems to treat agricultural nonpoint source pollution», *Ecological Engineering*, Vol. 1, (1989).
- Hayder, A., Vanderburgt, S., Santos, R. M., & Chiang, Y. W. (2019). Phosphorous runoff risk assessment and its potential management using wollastonite according to geochemical modeling. *Open Agriculture*, 4(1), 787-794.
- He, S., Ding, L., Wang, X., Pan, Y., Hu, H., Li, K., & Ren, H. (2018). Biochar carrier application for nitrogen removal of domestic WWTPs in winter: challenges and opportunities. *Applied microbiology and biotechnology*, 102(22), 9411-9418.
- Inyang, M., & Dickenson, E. (2015). The potential role of biochar in the removal of organic and microbial contaminants from potable and reuse water: a review. *Chemosphere*, 134, 232-240.
- Kadlec R. and Knight R., 1996. *Treatment Wetlands*, CRC Press, New York.



- Kadlec, R. H., & Wallace, S. (2008). Treatment wetlands. CRC press.
- Kadlec, R.H., Wallace, S.D., 2009. Treatment Wetlands, second ed. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Khajuria, A., Yamamoto, Y., & Morioka, T. (2010). Estimation of municipal solid waste generation and landfill area in Asian developing countries.
- Khan, S., Ahmad, I., Shah, M. T., Rehman, S., & Khaliq, A. (2009). Use of constructed wetland for the removal of heavy metals from industrial wastewater. *Journal of environmental management*, 90(11), 3451-3457.
- Kusch P., Wiebner A., Kappelmeyer U., Weibbrodt E., Kastner M. and Stottmeister U., 2003, Annual cycle of nitrogen removal by a pilot-scale subsurface horizontal flow in a constructed wetland under moderate climate, *Water Research*, 37: 4236-4242.
- Lehmann, J. & Joseph, S. (2009). Biochar for Environmental Management: An Introduction. Biochar for Environmental Management-Science and Technology, UK, Earthscan.
- Li, J., Fan, J., Liu, D., Hu, Z., & Zhang, J. (2019). Enhanced nitrogen removal in biochar-added surface flow constructed wetlands: dealing with seasonal variation in the north China. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(4), 3675-3684.
- Liu, H., Hu, Z., Zhang, J., Ngo, H. H., Guo, W., Liang, S. & Wu, H. (2016). Optimizations on supply and distribution of dissolved oxygen in constructed wetlands: a review. *Bioresource Technology*, 214, 797-805.
- Liu, X., Zhang, Y., Li, X., Fu, C., Shi, T., & Yan, P. (2018). Effects of influent nitrogen loads on nitrogen and COD removal in horizontal subsurface flow constructed wetlands during different growth periods of *Phragmites australis*. *Science of the Total Environment*, 635, 1360-1366.
- Lo, I. M. C. (1996). Characteristics and treatment of leachates from domestic landfills. *Environment International*, 22(4), 433-442.
- Luis, A., Lorena, E. G. A., Amaya, L., & Iñaki, T. (2021). Unplanted wetland-type filter for co-treatment of landfill leachate and septic tank wastewater: Analysing gravel replacement by plastic and passive (filling-emptied) aeration effects at pilot scale. *Journal of Environmental Management*, 294, 112940.
- M. Michailides, P. Panagopoulos, C.S. Akratos, A.G. Tekerlekopoulou, D.V. Vayenas, A full-scale system for aerobic biological treatment of olive mill wastewater, *J. Chem. Technol. Biot.*, 86 (2011), pp. 888-892.
- M. Ye, M.M. Sun, X. Chen, Y.F. Feng, J.Z. Wan, K. Liu, D. Tian, M.Q. Liu, A.P. Schwab, X. Jiang, Feasibility of sulfate-calcined eggshells for removing pathogenic bacteria and antibiotic resistance genes from landfill leachates, *Waste Manag.*, 63 (2017), pp. 275-283.
- M.C. Lu, Y.Y. Chen, M.R. Chiou, H.J. Fan, Occurrence and treatment efficiency of pharmaceuticals in landfill leachates, *Waste Manag.*, 55 (2016), pp. 257-264
- Maddison, M., Soosaar, K., Lohmus, K., & MANDER, Ü. (2005). Cattail population in wastewater treatment wetlands in Estonia: Biomass production, retention of nutrients, and heavy metals in phytomass. *Journal of Environmental Science and Health*, 40(6-7), 1157-1166.
- Metcalf & Eddy, Inc. 2006. Μηχανική υγρών αποβλήτων, Επεξεργασία και επαναχρησιμοποίηση, 4η έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, ISBN 960-418-108-4.
- Metcalf and Eddy, Inc. (1991). "Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse", 3rd Ed., McGraw-Hill. Inc. New York, NY, Ch. 13.

- Mohan, D., Sarswat, A., Ok, Y. S., & Pittman, C. U. (2014). Organic and inorganic contaminants removal from water with biochar, a renewable, low cost and sustainable adsorbent—a critical review. *Bioresource technology*, 160, 191–202.
- Nikolaou, I.E., Jones, N., Stefanakis, A.I., 2021. Circular Economy and Sustainability: the Past, the Present and the Future Directions. *Circular Economy and Sustainability* 1, 1–20, <https://doi.org/10.1007/s43615-021-00030-3>.
- O.M. Rodríguez-Narvaez, A. Goonetilleke, L. Perez, E.R. Bandala, Engineered technologies for the separation and degradation of microplastics in water: a review, *Chem. Eng. J.*, 414 (2021), p. 128692.
- Peter Kjeldsen , Morton A. Barlaz , Alix P. Rooker , Anders Baun , Anna Ledin & Thomas H. Christensen, Present and Long-Term Composition of MSW Landfill Leachate: A Review, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, Published online: 03 Jun 2010.
- Peverly, J. H., Surface, J. M., & Wang, T. (1995). Growth and trace metal absorption by *Phragmites australis* in wetlands constructed for landfill leachate treatment. *Ecological Engineering*, 5(1), 21–35.
- Ramsar, 2010. The Ramsar Manual, Ramsar and Its Mission, Brief History. [http://www.ramsar.org/cda/en/ramsar\\_march11/main/ramsar/1%5E25044\\_4000\\_0](http://www.ramsar.org/cda/en/ramsar_march11/main/ramsar/1%5E25044_4000_0). Last accessed September 15, 2012.
- Reddy, K. R., Kadlec, R. H., Flaig, E., & Gale, P. M. (1999). Phosphorus retention in streams and wetlands: a review. *Critical reviews in environmental science and technology*, 29(1), 83–146.
- Reed S.C., Crites R.W., Middlebrooks, (1995) *Natural Systems for Waste Management and Treatment*, 2nd Edition, McGraw-Hill.
- Renou, S., Givaudan, J.G., Poulain, S., Dirassouyan, F., Moulin, P., (2008). Landfill leachate treatment: review and opportunity. *J. Hazard. Mater.* 150 (3),p. 468–493
- Saeed, T., & Sun, G. (2012). A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media. *Journal of environmental management*, 112, 429–448.
- Saeed, T., Miah, M. J., Majed, N., Alam, M. K., & Khan, T. (2021). Effect of effluent recirculation on nutrients and organics removal performance of hybrid constructed wetlands: Landfill leachate treatment. *Journal of Cleaner Production*, 282 doi:10.1016/j.jclepro.2020.125427
- Sheoran, A. S., & Sheoran, V. (2006). Heavy metal removal mechanism of acid mine drainage in wetlands: a critical review. *Minerals engineering*, 19(2), 105–116.
- Shutes R.B.E., 2001. Artificial wetlands and water quality improvement. *Environ. Int.* 26, 441–447.
- Smith, R.D. and Schroeder, E.D. (1985). Field studies of the overland flow process for the treatment of raw and primary treated municipal wastewater. *J. of MPCF.* 57(5): 785–794.
- Sobolewski, A. (1999). A review of processes responsible for metal removal in wetlands treating contaminated mine drainage. *International Journal of Phytoremediation*, 1(1), 19–51.
- Stefanakis, A., Akratos, C. S., & Tsihrintzis, V. A. (2014). Vertical flow constructed wetlands: eco-engineering systems for wastewater and sludge treatment. *Newnes*.
- Stefanakis, A.I. and Tsihrintzis, V.A., 2012. Effects of loading, resting period, temperature, porous media, vegetation and aeration on performance of pilot-scale Vertical Flow Constructed Wetlands. *Chemical Engineering Journal* 181–182, 416–430.

- Stefanakis, A.I., 2018. *Constructed Wetlands for industrial wastewater treatment*, first ed. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK.
- Stefanakis, A.I., 2019. The Role of Constructed Wetlands as Green Infrastructure for Sustainable Urban Water Management. *Sustainability* 11 (24), 6981, <https://doi.org/10.3390/su11246981>.
- Stefanakis, A.I., 2020. *Constructed Wetlands for Sustainable Wastewater Treatment in Hot and Arid Climates: Opportunities, Challenges and Case Studies in the Middle East*. *Water* 12 (6), 1665, <https://doi.org/10.3390/w12061665>.
- Stefanakis, A.I., and Akrotos C.S., 2016. Removal of pathogenic bacteria in Constructed Wetlands: mechanisms and efficiency, in: Ansari, A.A., Gill, S.S., Gill, R., Lanza, G., Newman, L. (Eds.), *Phytoremediation*, Vol. 4, Springer International Publishing, Switzerland, pp. 327–346
- T.I. Tatoulis, A.G. Tekerlekopoulou, C.S. Akrotos, S. Pavlou, D.V. Vayenas, Aerobic biological treatment of second cheese whey in suspended and attached growth reactors, *J. Chem. Technol. Biot.*, 90 (2015), pp. 2040–2049.
- Tanner, C. C. (1996). Plants for constructed wetland treatment systems—a comparison of the growth and nutrient uptake of eight emergent species. *Ecological engineering*, 7(1), 59–83.
- Tatoulis, T., Akrotos, C. S., Tekerlekopoulou, A. G., Vayenas, D. V., & Stefanakis, A. I. (2017). A novel horizontal subsurface flow constructed wetland: Reducing area requirements and clogging risk. *Chemosphere*, 186, 257–268.
- Tatoulis, T., Akrotos, C.S., Tekerlekopoulou, A.G., Vayenas, D.V., Stefanakis, A.I., 2017. A novel horizontal subsurface flow Constructed Wetland: reducing area requirements and clogging risk. *Chemosphere* 186, 257–268.
- Tchobanoglous, G. (1993). *Integrated solid waste management engineering principles and management issues* (No. 628 T3).
- Tchobanoglous, G., Kreith, F., (2002), *Handbook of Solid Waste Management*. 2nd Edition, McGraw Hill Handbooks. New York.
- Torres Gil, L. K., Saba, M., & Eljaiek-Urzola, M. (2020). Horizontal subsurface-flow-constructed wetlands with tropical vegetation for the treatment of landfill leachate: Case study in cartagena, colombia. *Journal of Environmental Engineering (United States)*, 146(10) doi:10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001798
- V. Boonyaroj, C. Chiemchaisri, W. Chiemchaisri, Enhanced biodegradation of phenolic compounds in landfill leachate by enriched nitrifying membrane bioreactor sludge, *Y. K.J. Hazard Mater.*, 323 (2017), pp. 311–318.
- V. Vilar, E. Rocha, F. Mota, A. Fonseca, I. Saraiva, R. Boaventura, Treatment of a sanitary landfill leachate using combined solar photo-Fenton and biological immobilized biomass reactor at a pilot scale, *Water Research*, 45 (8) (2011), pp. 2647–2658
- Von Felde, K., & Kunst, S. (1997). N- and COD-removal in vertical-flow systems. *Water Science and Technology*, 35(5), 79–85.
- Vymazal J., 1998, *Czech constructed wetlands database*, Ecology and use of wetlands: Prague, Czech Republic.
- Vymazal J., 1999, Nitrogen removal in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow – can we determine the key process? In: Vymazal J. (Ed.), *Nutrient Cycling and Retention in Natural and Constructed Wetlands*, Backhuys Publishers, Leiden, pp.1 –17.
- Vymazal, J. (2002). The use of sub-surface constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic: 10 years experience. *Ecological Engineering*, 18(5), 633–646.
- Vymazal, J., & Březinová, T. (2015). Heavy metals in plants in constructed and natural wetlands: concentration, accumulation and seasonality. *Water Science and Technology*, 71(2), 268–276.

- Vymazal, J., & Kröpfelová, L. (2008). Wastewater treatment in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow (Vol. 14). Springer science & business media.
- W. Gwenzi, N. Chaukura, C. Noubactep, F.N. Mukome, Biochar-based water treatment systems as a potential low-cost and sustainable technology for clean water provision, *J. Environ. Manag.*, 197 (2017), pp. 732-749
- Wang, H., Sun, J., Xu, J., & Sheng, L. (2021). Study on clogging mechanisms of constructed wetlands from the perspective of wastewater electrical conductivity change under different substrate conditions. *Journal of Environmental Management*, 292, 112813.
- Water Environment Federation (2001), "Natural Systems for Wastewater Treatment", Manual Of Practice No. FD-16, Alexandria-USA
- Willumsen H. (2001), Energy Recovery from Landfill Gas in Denmark and Worldwide LG Consultant.
- Yalcuk, A., & Ugurlu, A. (2009). Comparison of horizontal and vertical constructed wetland systems for landfill leachate treatment. *Bioresource technology*, 100(9), 2521-2526.
- Yang L., Chang H.T. and Huang M.N.L., 2001, Nutrient removal in gravel and soil based wetland microcosms with and without vegetation, *Ecological Engineering*, 18: 91-105.
- Yang, C., Fu, T., Wang, H., Chen, R., Wang, B., He, T., Pi,Y., Zhou, J., Liang, T. & Chen, M. (2021). Removal of organic pollutants by effluent recirculation constructed wetlands system treating landfill leachate. *Environmental Technology & Innovation*, 24, 101843.
- Z. Dabaghian, M. Peyravi, M. Jahanshahi, A.S. Rad, Potential of advanced nano-structured membranes for landfill leachate treatment: a review, *Chembioeng Rev.*, 5 (2018), pp. 119-138
- Z. Wang, C.J. Banks, Occurrence of banned and commonly used pesticide residues in concentrated leachate: implications for ecological risk assessment, *Sci. Total Environ.*, 27 (2007), pp. 359-366.
- Zazo, J. A., Paull, J. S., & Jaffe, P. R. (2008). Influence of plants on the reduction of hexavalent chromium in wetland sediments. *Environmental Pollution*, 156(1), 29-35.
- Zhang, Y., Li, M., Dong, L., Han, C., Li, M., & Wu, H. (2021). Effects of biochar dosage on treatment performance, enzyme activity and microbial community in aerated constructed wetlands for treating low C/N domestic sewage. *Environmental Technology & Innovation*, 24, 101919.
- Zhou X., Jia L.X., Liang C.L., Simultaneous enhancement of nitrogen removal and nitrous oxide reduction by a saturated biochar-based intermittent aeration vertical flow constructed wetland: Effects of influent strength, *Chem. Eng. J.*, 334 (2018), pp. 1842-1850.
- Zhou X., Liang C.L., Jia L.X., Feng L.K., Wang R.G., Wu H.M., An innovative biochar-amended substrate vertical flow constructed wetland for low c/n wastewater treatment: Impact of influent strengths, *Bioresour. Technol.*, 247 (2018), pp. 844-850.

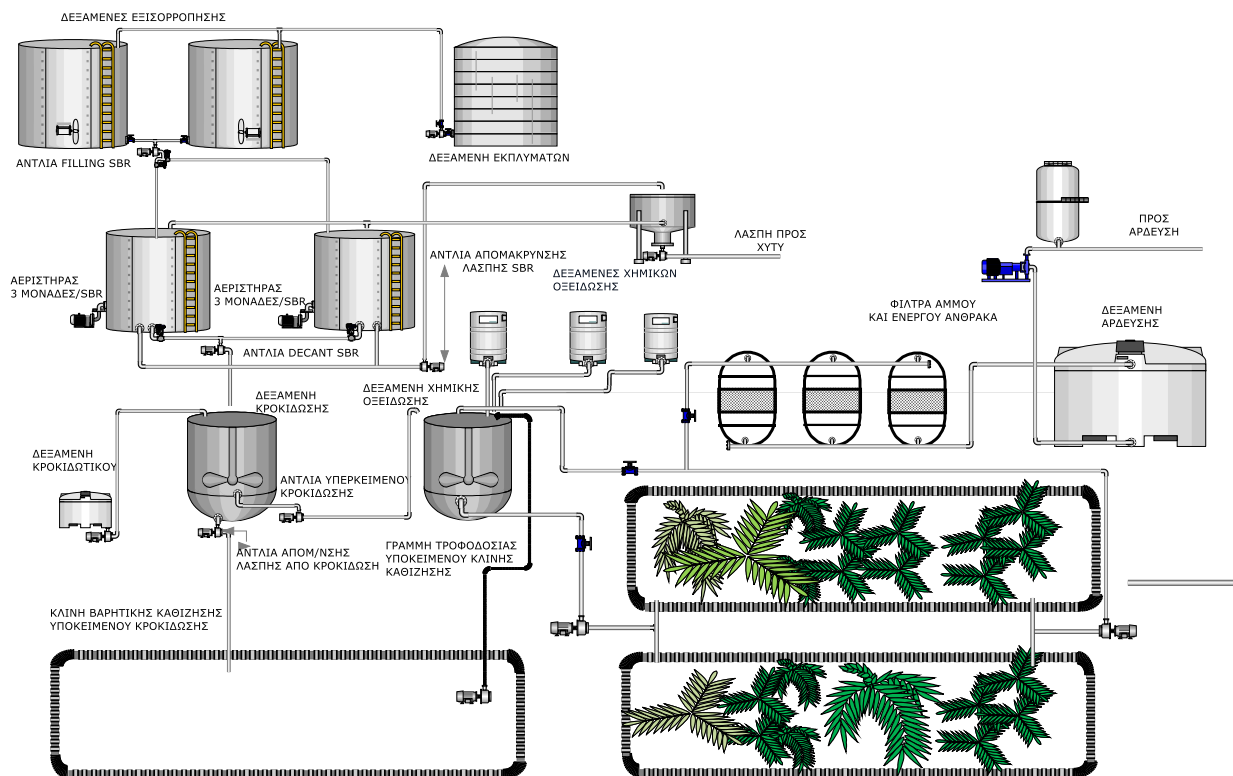
## ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ

- <http://ikee.lib.auth.gr/>
- <http://meteosearch.meteo.gr/stationInfo.asp>
- <http://www.eedsa.gr>
- <https://animals.sandiegozoo.org/habitats/wetlands>
- <https://eur-lex.europa.eu/>
- <https://globalprojectengineering.ch/constructed-wetlands-unlocking-water-treatment-technology-at-shell/>
- <https://reader.elsevier.com/>
- <https://sites.google.com/site/civilsorras/physika-systemata/edaphika-systemata>
- <https://sswm.info/es/taxonomy/term/3933/horizontal-subsurface-flow-constructed-wetland>
- <https://www.dedisa.gr/>
- <https://www.edsna.gr/>
- <https://www.elinyae.gr/>
- <https://www.e-nomothesia.gr/>
- [https://www.europarl.europa.eu/\(Η διαχείριση των αποβλήτων στις χώρες της ΕΕ.\)](https://www.europarl.europa.eu/(Η διαχείριση των αποβλήτων στις χώρες της ΕΕ.))
- <https://www.hel-x.eu/en/areas-of-application/>
- <https://www.hel-x.eu/en/technical-details/>
- [https://www.researchgate.net/figure/Free-Water-Surface-Constructed-Wetland\\_fig4\\_286417697](https://www.researchgate.net/figure/Free-Water-Surface-Constructed-Wetland_fig4_286417697)
- [https://www.researchgate.net/figure/Scanning-electron-microscopy-SEM-pictures-of-biochars-made-of-tomato-plant-wood\\_fig3\\_257304681](https://www.researchgate.net/figure/Scanning-electron-microscopy-SEM-pictures-of-biochars-made-of-tomato-plant-wood_fig3_257304681)
- <https://ypen.gov.gr>

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

- Διάγραμμα ροής Δ.Ε.ΔΙ.Σ.Α.(www.dedisa.gr):



- Μετεωρολογικά Στοιχεία για μήνες Απρίλιο έως Αύγουστο, (<http://meteosearch.meteo.gr/>)

ΗΜΕΡΑ	ΜΕΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (°C)	ΜΕΓΙΣΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ (mm)	ΜΕΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΕΜΟΥ (km/h)	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΕΜΟΥ (km/h)	ΕΠΙΚΡΑΤΟΥΣΑ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΑΝΕΜΟΥ
ΑΠΡΙΛΙΟΣ						
1	10.9	14.4	3.4	15.1	49.9	NNW
2	13	19.3	0.2	10.8	38.6	W
3	15.9	22.1	0	7.8	30.6	SW
4	20.8	28.3	0	10.7	56.3	SW
5	20.4	25.1	0	4.1	24.1	SW
6	20.2	27.6	0	17.5	69.2	W
7	16.2	20.4	0	15.9	48.3	W
8	15.3	20.5	0.4	19.1	46.7	W
9	11.2	14.6	0	11.1	32.2	NE

10	11.4	16.3	0	7.2	29	NE
11	12	18.1	0	4.9	24.1	ESE
12	13.6	19.5	0	4.6	22.5	SE
13	15.1	22.6	0	3.4	19.3	SW
14	16.7	23.2	0	3.6	20.9	SSE
15	15	20	0	4.4	19.3	N
16	15.7	20.9	0	9.7	35.4	E
17	17	29.9	0	7.4	49.9	W
18	21.9	27.7	0	8.3	56.3	SW
19	16	20.8	0.6	13	45.1	W
20	15.2	19.7	0	15.8	45.1	WSW
21	15.2	19.8	0	13.7	33.8	WNW
22	16.6	23.4	0	8.1	25.7	SW
23	17.4	24.3	0	5.5	25.7	ESE
24	16.5	20.4	0	10.9	43.5	ESE
25	15.3	18.9	0	9.7	32.2	N
26	15.4	20.3	0	4.8	20.9	NNW
27	16.8	23.8	0	4.5	19.3	SE
28	22.6	30.6	0	9.1	51.5	SE
29	26.4	31.2	0	7.2	30.6	SE
30	24.2	30.8	0	5.2	19.3	SE
<b>ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ</b>	16.7	31.2	0.153	9.1	69.2	SW
<b>ΜΑΙΟΣ</b>						
1	23.5	30.7	0	3.6	17.7	SSW
2	27.8	37.4	0	4.4	17.7	SSE
3	26.4	34.7	5.2	4.3	20.9	SW
4	22.1	27.4	0	5.3	19.3	WNW
5	21.4	27.8	0	5.1	32.2	W
6	21.6	25.4	0	8.4	30.6	WSW
7	21.9	29.1	0	7.6	24.1	ESE
8	20.2	25.8	0	8	27.4	W
9	19.8	25.6	0	7	32.2	ENE
10	17.3	22.6	0	5	24.1	N
11	17.2	22.3	0	5.3	25.7	NNW
12	19.2	25.9	0	4.9	29	NNW
13	19.8	25	0	16.7	38.6	W
14	20.2	25.6	0	14.2	40.2	W
15	20.5	27.6	0	5.3	32.2	NW
16	19.4	24.1	0	16.6	43.5	WSW
17	21	26.6	0	14.3	38.6	W
18	24.6	31.1	0	14.5	43.5	W

19	22.3	26.8	0	10.7	33.8	WSW
20	22.7	30.5	0	16.7	43.5	W
21	19.2	23.6	0	14.2	53.1	W
22	19.9	26.7	0	6.8	32.2	ESE
23	20.4	26.1	0	3.3	17.7	NNW
24	24.1	34.2	0	5.4	25.7	SE
25	23.6	30.1	0	3.3	17.7	NW
26	24.1	31.5	0	3.7	20.9	NNW
27	23.6	28.9	0	13.8	40.2	W
28	23.4	29.3	0	15.9	43.5	W
29	22.5	28.3	0	8.8	29	E
30	20.2	25.8	1.2	7.2	32.2	ESE
31	22	27.3	0	14.1	45.1	SW
ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	21.7	37.4	0.206	8.9	53.1	W
ΙΟΥΝΙΟΣ						
1	20.5	24.6	0	13.5	33.8	WSW
2	20.1	25.6	0	9.5	29	SW
3	20.7	27.9	0	6.2	32.2	ESE
4	20.8	27	0	5.3	24.1	N
5	20.9	26.4	0	4.3	22.5	NNW
6	22.2	27.3	0	5.7	20.9	SW
7	25.9	30.9	0	10.9	30.6	WSW
8	26	32.3	0	9	27.4	SW
9	22.1	26.7	0	7.2	22.5	SW
10	22.1	27.3	0	6.8	22.5	NNW
11	22.5	27.9	0	6	22.5	SW
12	23	28.9	0	5.7	20.9	NNW
13	22.5	27.1	0	8.1	24.1	SW
14	22.4	27.9	0	8.9	29	WSW
15	19.8	25.7	2.6	6.9	33.8	NNW
16	21	27.6	0	11.5	29	SW
17	22.4	27.9	0	6.9	24.1	SW
18	22.3	27.9	0	4.6	22.5	NNW
19	24.6	31.8	0	5.1	20.9	N
20	24.8	30.3	0	3.7	17.7	NW
21	26.1	33.2	0	3.7	17.7	WNW
22	28.2	32.5	0	6.5	20.9	SW
23	29.4	35.4	0	5	24.1	NNW
24	28.3	35.2	0	4.4	19.3	NNW
25	29.6	37.3	0	4.2	22.5	SW
26	31.1	38.8	0	4.3	20.9	NNW

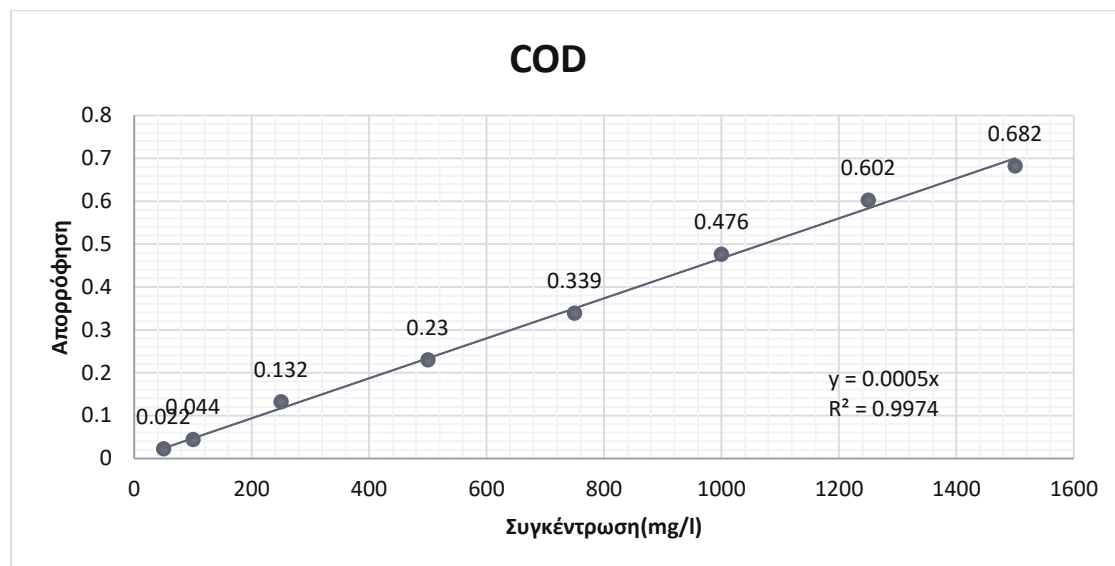


27	29.5	34.8	0	4.1	20.9	NNW
28	28.3	33.9	0	4	19.3	W
29	28.6	34.3	0	5.2	20.9	W
30	29.3	35.9	0	4.1	20.9	WSW
ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	24.5	38.8	0.087	6.4	33.8	SW
ΙΟΥΛΙΟΣ						
1	33	43.2	0	6.4	25.7	W
2	30.8	37.3	0	16.8	54.7	W
3	27.4	33.1	0	12.1	38.6	WSW
4	26.8	33.7	0	4.5	30.6	NNW
5	27.5	33.8	0	9.5	32.2	W
6	27.9	35.1	0	7.4	30.6	SW
7	27.7	33.5	0	3.8	24.1	N
8	27.5	32.8	0	4.9	22.5	SW
9	26.3	30.3	0	6.1	25.7	NNW
10	26.7	31.2	0	8.1	29	NNW
11	26.8	31.5	0	4.2	30.6	NW
12	27.5	32.8	0	5.2	22.5	SW
13	28.1	33.7	0	5.4	24.1	SW
14	28.1	32.7	0	6	25.7	SW
15	28.3	33	0	5.6	22.5	SW
16	28.9	35.9	0	6.8	30.6	WSW
17	27.4	31.9	0	16.5	41.8	W
18	26.6	31.7	0	14.2	40.2	W
19	26.7	32.8	0	6.4	22.5	ESE
20	26.2	31.8	0	6.5	29	WNW
21	27	32.2	0	9	25.7	NW
22	27.1	31.9	0	5.5	25.7	N
23	26	30.7	0	7.2	27.4	NNW
24	25.7	30.4	0	8.6	27.4	NNW
25	25.7	30.1	0	10.7	33.8	NNW
26	25.7	31.3	0	7.1	25.7	N
27	26.6	32.8	0	4.8	22.5	N
28	27.3	32.2	0	4.4	22.5	NNW
29	29.4	35.4	0	3.7	20.9	N
30	30.5	36.2	0	4.6	20.9	WNW
31	32.2	39.3	0	4.5	17.7	SW
ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	27.7	43.2	0	7.3	54.7	SW
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ						
1	30.2	35.8	0	4.4	20.9	NNW

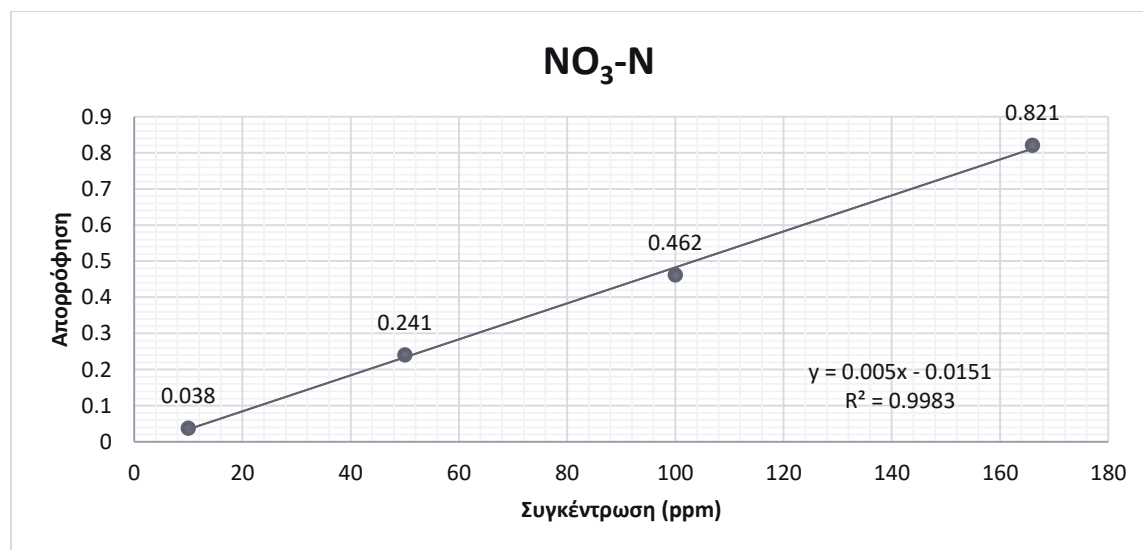
2	31.2	38.5	0	4.8	17.7	SW
3	34.5	41.6	0	4.2	20.9	N
4	32.7	39.2	0	3.3	19.3	N
5	32.7	39.2	0	3.7	20.9	SW
6	32.1	38.4	0	17.5	54.7	W
7	28.2	33.5	0	9.2	41.8	SW
8	27.7	34.3	0	5.3	32.2	N
9	28	34.3	0	4.4	24.1	NNW
10	29.4	35.3	0	4	20.9	SW
11	30.6	38.3	0	3.5	24.1	SW
12	28.4	33.7	0	7.3	32.2	NNW
13	27.7	33.5	0	5.2	37	N
14	26.4	31.4	0	6	37	N
15	25.5	30.4	0	6.5	27.4	N
16	25.1	30.7	0	5.9	24.1	WNW
17	26.5	31.2	0	8.5	24.1	SW
18	28.2	35.3	0	9	27.4	WSW
19	27.2	35.3	0	5.6	32.2	SW
20	26.6	32.7	0.2	5.5	27.4	N
21	25.9	31.3	0	4.6	22.5	WNW
22	26.2	31.7	0	5.4	29	NNW
23	25.5	30.5	0	6.1	24.1	NNW
24	25.1	30.2	0	5.3	22.5	N
25	25.3	31.9	0	3.9	20.9	NNW
26	27.6	34.7	0	6.5	25.7	SW
27	29.1	34.6	0	12.4	30.6	SW
28	27.5	33.3	0	13	33.8	WSW
29	27.2	31.9	0	16.9	45.1	W
30	27.7	33.8	0	13.2	35.4	WSW
31	26.3	30.7	0	10.6	25.7	SW
<b>ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ</b>	<b>28.1</b>	<b>41.6</b>	<b>0.03</b>	<b>7.2</b>	<b>54.7</b>	<b>SW</b>

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

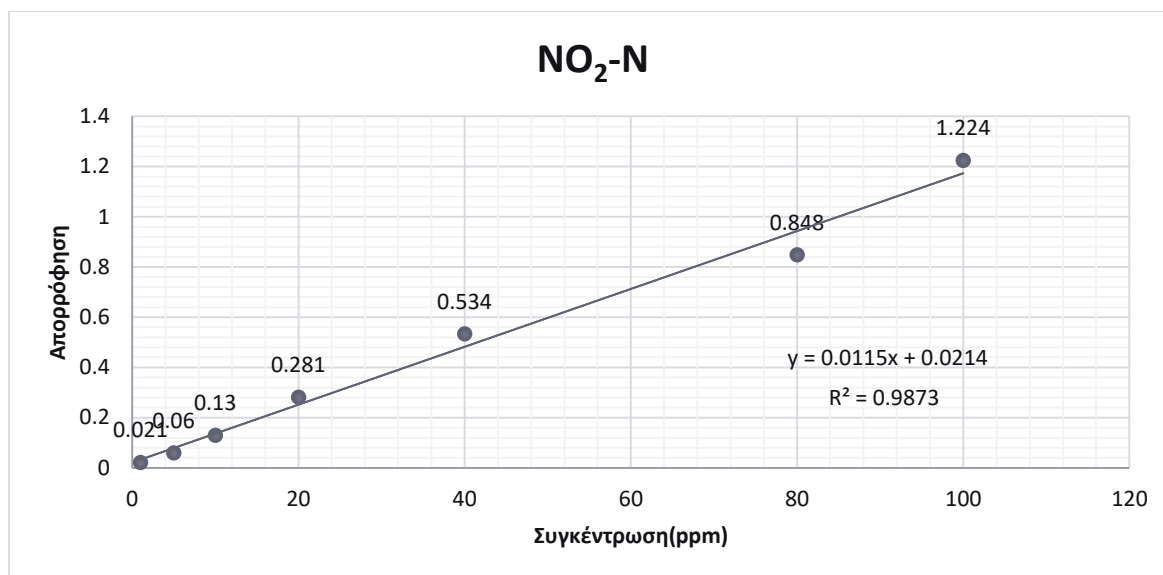
### 1. Καμπύλη Βαθμονόμησης Χημικά Απαιτούμενου Οξυγόνου COD



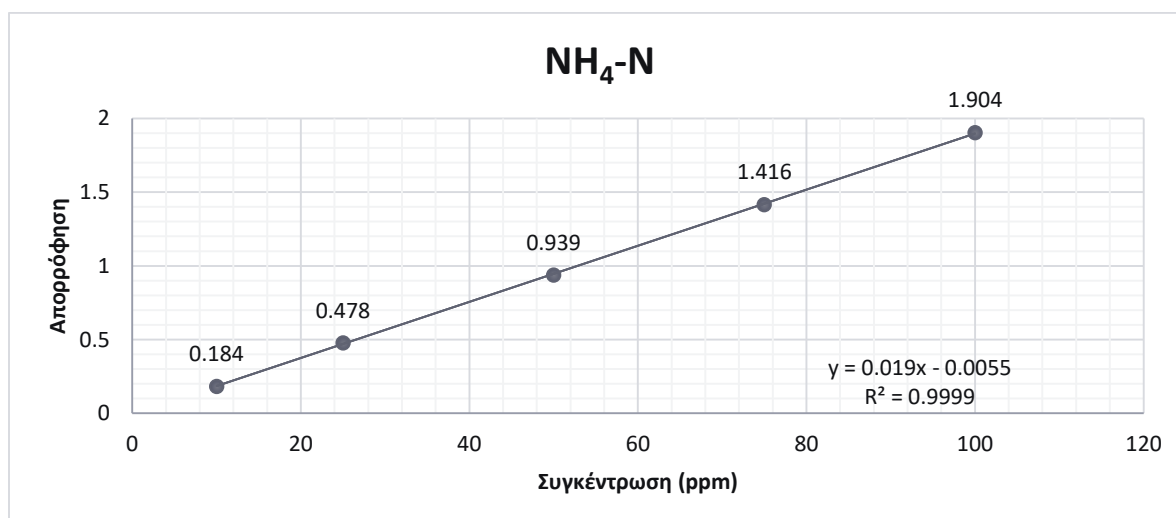
### 2. Καμπύλη Βαθμονόμησης Νιτρικού Αζώτου NO<sub>3</sub>-N



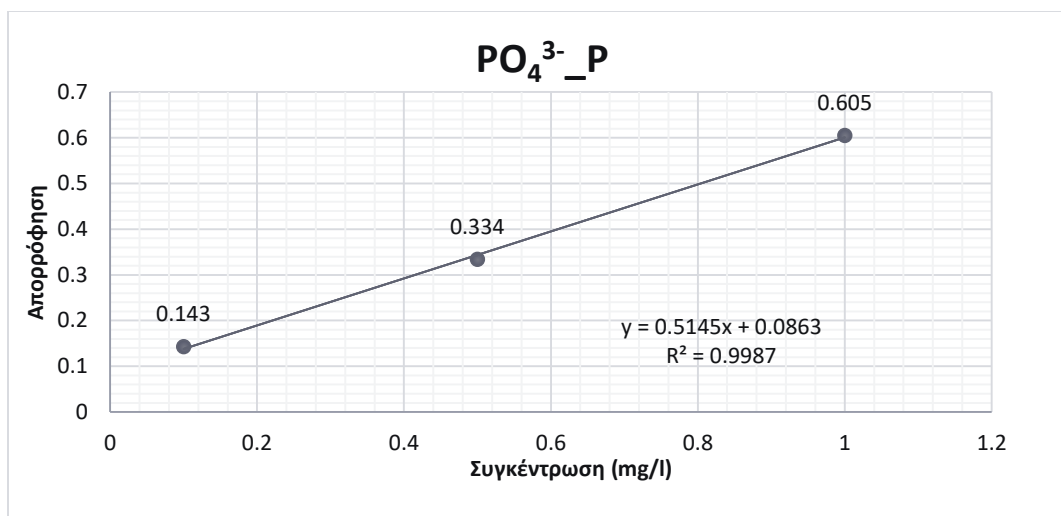
### 3. Καμπύλη Βαθμονόμησης Νιτρώδους Αζώτου NO<sub>2</sub>-N



#### 4. Καμπύλη Βαθμονόμησης Αμμωνιακού Αζώτου NH<sub>4</sub>-N

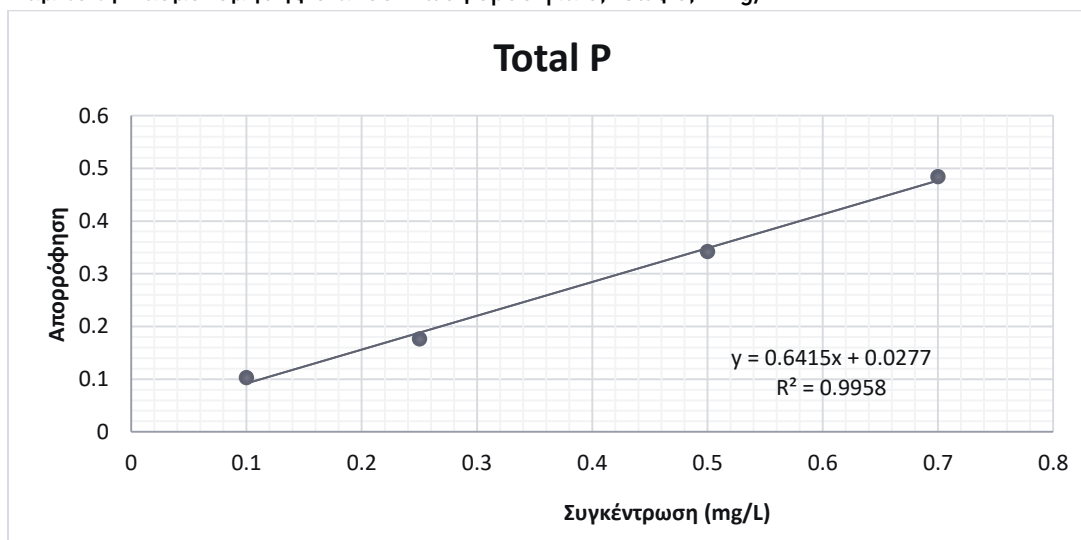


#### 5. Καμπύλη Βαθμονόμησης Φωσφορικών PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>



- Καμπύλες Βαθμονόμησης Ολικού Φωσφόρου

1. Καμπύλη Βαθμονόμησης Ολικού Φωσφόρου για 0,1 έως 0,7 mg/L.



2. Καμπύλη Βαθμονόμησης Ολικού Φωσφόρου για 1 έως 10 mg/L.

