



Πολυτεχνείο Κρήτης

Τμήμα Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών
Περιβάλλοντος

Διπλωματική Εργασία

*Επεξεργασία διασταλλάγματος από τον ΧΥΤΑ Χανίων σε
πilotικά συστήματα Τεχνητών Υγροβιότοπων οριζόντιας
υπόγειας ροής με χαλίκι και βιοεξανθράκωμα ως πληρωτικά
υλικά*

Μιλτιάδης Γιαλίδης

2015050056

Εξεταστική Επιτροπή:

- 1) Επίκουρος Καθηγητής Αλέξανδρος Στεφανάκης
- 2) Επίκουρος Καθηγητής Απόστολος Γιαννής
- 3) Αναπληρωτής Καθηγητής Νικόλαος Παρανυχιανάκης

Αναπληρωτής Καθηγητής Πέτρος Γκίκας

Χανιά, 2022

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

Περίληψη

Στη σημερινή εποχή, η προστασία του περιβάλλοντος αποτελεί έναν από τους βασικότερους στόχους κάθε κοινωνίας. Η σωστή επεξεργασία και η διαχείριση των αποβλήτων συμβάλλει σε μεγάλο βαθμό στην επίτευξη του προαναφερθέντος στόχου. Για να συμβεί όμως αυτό, πρέπει να υιοθετηθούν πρακτικές και μέθοδοι διαχείρισης αποβλήτων οι οποίες να βασίζονται στη βιώσιμη ανάπτυξη. Τα στραγγίσματα, τα οποία είναι και το αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας, είναι τα υγρά απόβλητα που παράγονται σε έναν χώρο υγειονομικής ταφής αποβλήτων (Χ.Υ.Τ.Α.) και είναι αρκετά ρυπογόνα και επικίνδυνα για το περιβάλλον. Επομένως, κρίνεται μείζονος σημασίας η διαχείρισή τους και ιδιαίτερα με μεθόδους φιλικές προς το περιβάλλον αλλά και οικονομικές ταυτόχρονα.

Οι τεχνητοί υδροβιότοποι αποτελούν μια αποτελεσματική και βιώσιμη τεχνολογία, η οποία μπορεί να αντικαταστήσει και/ή συνδυαστεί με τις συμβατικές φυσικοχημικές μεθόδους για την επεξεργασία στραγγισμάτων που προέρχονται από Χ.Υ.Τ.Α. Αυτό οφείλεται στις χαμηλές έως μηδενικές ενεργειακές απαιτήσεις, στο χαμηλό κόστος κατασκευής, ιδιαίτερα χαμηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης αλλά και στην αυτονομία και τον εύκολο χειρισμό τους σε σχέση με τις συμβατικές τεχνολογίες. Η παρούσα μελέτη στοχεύει στην αποτίμηση της επεξεργασίας στραγγίσματος με πιλοτικές μονάδες τεχνητών υδροβιότοπων, όπου χρησιμοποιείται ως βλάστηση το κοινό καλάμι (*Phragmites australis*) και πληρωτικά υλικά χαλίκι και βιοεξανθράκωμα προερχόμενο από κλαδέματα ελιάς.

Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε τεχνητός υδροβιότοπος οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής και το στράγγισμα που μελετήθηκε προήλθε από τη Μονάδα Επεξεργασίας Στραγγισμάτων του Χ.Υ.Τ.Υ. Χανίων, μετά το στάδιο της κροκίδωσης. Για το πείραμα χρησιμοποιήθηκαν δυο πιλοτικές μονάδες: η πρώτη πληρώθηκε με χαλίκι (G) και η δεύτερη με χαλίκι και βιοεξανθράκωμα (GB). Οι μονάδες αυτές τροφοδοτούνταν με διαστάλλαγμα καθημερινά και κάθε βδομάδα πραγματοποιούνταν δειγματοληψίες και φυσικοχημικές αναλύσεις. Στα δύο συστήματα μελετήθηκαν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της εισροής και της εκροής και υπολογίστηκαν οι απομακρύνσεις των ρύπων με γνώμονα φυσικοχημικές παραμέτρους pH και EC, τις βιολογικές και χημικές παραμέτρους COD, TSS, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, TP, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ και μετάλλων. Επιπλέον, κατά την διάρκεια του πειράματος γινόταν και ημερήσια καταγραφή των όγκων της εισροής και της εκροής, δεδομένα απαραίτητα για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής των δύο μονάδων.

Τα αποτελέσματα του πειράματος έδειξαν πως η μονάδα με το χαλίκι και το βιοεξανθράκωμα ήταν αρκετά αποδοτικότερη στην απομάκρυνση του ρυπαντικού φορτίου, υποδεικνύοντας ότι η χρήση βιοεξανθράκωματος αποτελεί σημείο αναφοράς της παρούσας εργασίας. Η αντικατάσταση, λοιπόν, ορισμένων συμβατικών διεργασιών του ΧΥΤΑ με συστήματα ΤΥ οριζόντιας υπό επιφανειακής ροής με πληρωτικά υλικά το χαλίκι και το βιοεξανθράκωμα αποτελεί μια βάσιμη και υποσχόμενη εναλλακτική λύση.

Abstract

Nowadays, the protection of the environment is one of the main issues for every society. The correct treatment and management of waste contributes the most to the achievement of this goal.

In order to reach this goal, it is necessary to adopt sustainable waste management procedures.

Leachate, which is the subject of this diploma thesis, is the sewage that comes out of the waste landfill and can pollute the environment dangerously. For this reason, it is of great importance that leachate be treated in an environmentally friendly and at the same time low-cost way.

The constructed wetlands are an effective and sustainable system that could replace and/or be combined with the existing traditional methods of waste landfill leachate treatment. And this is because the constructed wetland demands very low or even zero energy, low construction cost and easy autonomous operation compared to the traditional systems.

The aim of this diploma thesis is to evaluate the treatment of the landfill leachate in constructed wetlands pilot systems with plant species of common reed (*Phragmites australis*) and substrate of gravel and biochar produced from olive prunings.

The selected system was a horizontal sub-surface flow constructed wetland. The landfill leachate used in the constructed wetland was collected from the landfill of Chania after the flocculation.

Two constructed wetlands pilot systems were tested. The one was filled with gravel(G) and the other with gravel together with biochar (GB). There was a daily inflow supply of leachate and every week the physicochemical parameters of samples were analyzed. The inflow and outflow concentrations at the two constructed wetlands were examined and the removal of the polluting load was calculated in consideration with the physicochemical parameters pH and EC, the biological and chemical parameters COD, TSS, NH₄-N, NO₃-N, NO₂-N, TP, PO₄-P, as well as metals. BOD measurements were not performed due to its low level.

Futhermore, during the experiment procedure, a daily measurement of the inflow and the outflow concentrations was recorded, for the evaluation of the evapotranspiration in the two constructed wetlands.

After a five-month operation of the two wetlands and the analysis of the results, we concluded that the constructed wetland GB performed much better in the polluting load removal, showing that the use of the biochar plays a crucial role in the results of this diploma thesis.

The replacement of the certain traditional processes in the landfill with horizontal sub-surface (TY HF) flow constructed wetlands using gravel and biochar as substrate materials could be a sustainable and promising alternative solution.

Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα πολύ ευχαρίστως να εκφράσω τις ευχαριστίες μου ξεχωριστά στον κάθε άνθρωπο που συνέβαλε στην ολοκλήρωση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Αλέξανδρο Στεφανάκη ο οποίος μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ και να ερευνήσω ένα τόσο ενδιαφέρον αντικείμενο. Οι υποδείξεις και οι βοήθειες του, όπως και η καθοδήγηση του στην εκτέλεση του πειράματος ήταν άκρως σχολαστική. Είμαι ευγνώμων για την σχέση την οποία ανέπτυξα με τον συγκεκριμένο αξιοσέβαστο καθηγητή.

Επίσης θα ήθελα να δώσω τις ευχαριστίες μου στους καθηγητές κ. Απόστολο Γιαννή και κ. Νικόλαο Παρανυχιανάκη για την αξιολόγηση της παρούσας εργασίας. Θέλω να εκφράσω μια ιδιαίτερη μνεία στον κ. Απόστολο Γιαννή στον οποίο αρχικά απευθύνθηκα για την διεκπεραίωση της διπλωματικής μου εργασίας αλλά και ένα ευχαριστώ για την σχέση που αναπτύξαμε μέσα από συζητήσεις και τις ενδιαφέρουσες διαλέξεις του.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω την υπεύθυνη του Εργαστηρίου Τεχνολογίας και Περιβάλλοντος της Σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης κα. Ελισάβετ Κουκουράκη καθώς χωρίς εκείνη το αποτέλεσμα της παρούσας εργασίας δεν θα ήταν το ίδιο. Η κατανόηση και η άριστη συνεργασία όπως και οι συμβουλές της πάνω στο αντικείμενο ήταν ύψιστης σημασίας. Ακολουθώντας, στο ίδιο περιβάλλον θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Διδακτορικό φοιτητή και φίλο Παναγιώτη Ρεγκούζα για την καθοριστική του βοήθεια στο στήσιμο της πειραματικής διάταξης, για τις πειραματικές αναλύσεις του βιοεξανθρακώματος αλλά και για την προσφορά των γνώσεων του πάνω στο θέμα. Επίσης ευχαριστώ την κα. Maria – Liliana Saru για τις μετρήσεις των μετάλλων στο ICP – MS.

Θα ήταν μεγάλη παράλειψη να μην δώσω τις ευχαριστίες μου στην υπεύθυνη του Εργαστηρίου Χημικών Αναλύσεων του ΧΥΤΥ Χανίων, κα. Χριστίνα Τσαμουτσόγλου, η οποία ήταν άκρως πρόθυμη να μου προσφέρει τις γνώσεις και τις συμβουλές της όπου έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στην ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας.

Στη συνέχεια, ένα τεράστιο ευχαριστώ στον φίλο αλλά και συνάδελφό Στράτο Δημόπουλο για την αλληλοκατανόηση και την άριστη συνεργασία που είχαμε καθ'όλη την διάρκεια εκτέλεσης του συγκεκριμένου πειράματος.

Τέλος, να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου για την συμπαράσταση, την στήριξη και την κατανόηση που έδειξαν σε κάθε μου απόφαση. Χάρη σε εκείνους αυτά τα χρόνια των σπουδών μου ήταν ξεχωριστά και ανεκτίμητα.

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη	3
Abstract	4
Ευχαριστίες	5
Κατάλογος Διαγραμμάτων	9
Κατάλογος Εικόνων	10
Κεφάλαιο 1: Θεωρητικό Υπόβαθρο	11
1.1 Φυσικοί Υγροβιότοποι	11
1.2 Τεχνητοί Υγροβιότοποι	12
1.3 Είδη Τεχνητών Υγροβιότοπων	14
1.3.1 Τεχνητοί Υγροβιότοποι Επιφανειακής Ροής (Free Water Surface Constructed Wetlands - FWSCW)	14
1.3.2 Τεχνητοί Υγροβιότοποι Υπόγειας Οριζόντιας Ροής (Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands - HFCWs)	16
1.3.3 Τεχνητοί Υγροβιότοποι Κατακόρυφης Ροής (Vertical Flow Constructed Wetlands - VFCWs)	20
1.3.4 Υβριδικό Σύστημα Τεχνητού Υγροβιότοπου (Hybrid Constructed Wetlands)	23
1.3.5 Γαλλικό Σύστημα Κατακόρυφης Ροής (French Vertical Flow Constructed Wetlands)	24
1.3.6 Floating Treatment Wetlands (FTW)	25
1.4 Στράγγισμα από Χώρο Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων	26
1.5 Υλικά πλήρωσης υγροβιότοπου - Υπόστρωμα	30
1.5.1 Χαλίκι	30
1.5.2 Βιοεξανθράκωμα	31
1.6 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας	33
Κεφάλαιο 2: Πειραματικό μέρος	34
2.1 Στράγγισμα - ΧΥΤΑ Χανίων	34
2.2 Περιγραφή και λειτουργία των πιλοτικών συστημάτων	36
2.2.1 Περιγραφή και σχεδιασμός των πιλοτικών μονάδων	36
2.2.2 Λειτουργία συστημάτων	40
2.3 Πληρωτικά υλικά	41

2.3.1. Χαλίκι	41
2.3.2. Βιοεξανθράκωμα	41
2.3.3. Εξατμισοδιαπνοή.....	44
2.3.4. Μετεωρολογικά δεδομένα.....	44
2.4. Βλάστηση Πιλοτικών Μονάδων.....	44
2.5 Αναλυτικές Μέθοδοι Μετρήσεων	45
2.5.1. COD	45
2.5.2. BOD ₅	46
2.5.3. Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (TSS).....	46
2.5.4. pH	47
2.5.5. Αγωγιμότητα.....	47
2.5.6. Αμμωνιακό Άζωτο – NH ₄ -N	48
2.5.7. Νιτρώδες Άζωτο – NO ₂ -N.....	49
2.5.8. Νιτρικό Άζωτο – NO ₃ -N	49
2.5.9. Φωσφορικά - PO ₄ ⁻³	50
2.5.10. Ολικός Φώσφορος – TP	51
2.5.11. Βαρέα Μέταλλα	51
Κεφάλαιο 3: Αποτελέσματα και Συζήτηση	53
3.1 Χαρακτηρισμός στραγγισμάτων εισροής.....	53
3.2 Χαρακτηρισμός βιοεξανθρακώματος.....	56
3.3 Επίδραση της θερμοκρασίας στην απόδοση απομάκρυνσης των ρύπων	57
3.4 Επίδραση της εξατμισοδιαπνοής στην απομάκρυνση των ρύπων	58
3.5 Φυσικοχημικές παράμετροι.....	59
Κεφάλαιο 4: Συμπεράσματα.....	81
Κεφάλαιο 5: Βιβλιογραφία.....	82

Καταλογος Πινακων

Πίνακας 1: Τυπικές τιμές περιεχόμενου διασταλλάγματος από νέους και ώριμους Χ.Υ.Τ.Α. (Χαβάς, 2005)

Πίνακας 2: Χαρακτηρισμός στραγγισμάτων των δειγμάτων εισροής

Πίνακας 3: Χαρακτηρισμός στραγγισμάτων για τα Ολικά Μέταλλα

Πίνακας 4: Χαρακτηρισμός ανεπεξέργαστων στραγγισμάτων στον Χ.Υ.Τ.Α. Χανίων

Πίνακας 5: Χαρακτηρισμός στραγγισμάτων στον Χ.Υ.Τ.Α. μετά από διάφορα στάδια

Πίνακας 6: Χαρακτηρισμός Biochar

Πίνακας 7: Αποτελέσματα pH από τις πιλοτικές μονάδες

Πίνακας 8: Αποτελέσματα EC από τις πιλοτικές μονάδες

Πίνακας 9: Αποτελέσματα COD από τις πιλοτικές μονάδες

Πίνακας 10: Αποτελέσματα NO₃-N από τις πιλοτικές μονάδες

Πίνακας 11: Αποτελέσματα NH₄-N από τις πιλοτικές μονάδες

Πίνακας 12: Αποτελέσματα NO₂-N από τις πιλοτικές μονάδες

Πίνακας 13: Αποτελέσματα TSS από τις πιλοτικές μονάδες

Πίνακας 14: Αποτελέσματα TP και PO₄³⁻ από τις πιλοτικές μονάδες

Πίνακας 15: Αποτελέσματα Βαρέων Μετάλλων B, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Mo

Πίνακας 16: Αποτελέσματα Βαρέων Μετάλλων Mg, Al, K, Ca, Ni

Πίνακας 17: Αποτελέσματα απομακρύνσεων % Βαρέων Μετάλλων B, Mg, Al, K, Cr, Ni, Cu, Zn, Mo, Fe

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Διάγραμμα ET (L) - θερμοκρασίας (οC) συναρτήσει της ημερομηνίας.

Διάγραμμα 2: Διάγραμμα ET (mm) - θερμοκρασίας (οC) συναρτήσει της ημερομηνίας.

Διάγραμμα 3: Διάγραμμα τιμών του pH της εισροής και των εκροών των δυο μονάδων συναρτήσει της ημερομηνίας.

Διάγραμμα 4: Διάγραμμα των τιμών EC της εισροής και των εκροών των δυο μονάδων συναρτήσει της ημερομηνίας.

Διάγραμμα 5: Διάγραμμα διακυμάνσεων των συγκεντρώσεων του COD στην εισροή και τις εκροές των δύο πιλοτικών μονάδων.

Διάγραμμα 6: Διάγραμμα ποσοστιαίων απομακρύνσεων του COD στην εισροή και τις εκροές των δύο πιλοτικών μονάδων.

Διάγραμμα 7: Διάγραμμα διακυμάνσεων των συγκεντρώσεων του νιτρικού αζώτου στην εισροή και τις εκροές των δύο πιλοτικών μονάδων.

Διάγραμμα 8: Διάγραμμα ποσοστιαίων απομακρύνσεων του νιτρικού αζώτου στην εισροή και τις εκροές των δύο πιλοτικών μονάδων.

Διάγραμμα 9: Διάγραμμα διακυμάνσεων των συγκεντρώσεων του αμμωνιακού αζώτου στην εισροή και τις εκροές των δύο πιλοτικών μονάδων.

Διάγραμμα 10: Διάγραμμα ποσοστιαίων απομακρύνσεων του αμμωνιακού αζώτου στην εισροή και τις εκροές των δύο πιλοτικών μονάδων.

Διάγραμμα 11: Διάγραμμα διακυμάνσεων των συγκεντρώσεων του νιτρώδους αζώτου στην εισροή και τις εκροές των δύο πιλοτικών μονάδων.

Διάγραμμα 12: Διάγραμμα ποσοστιαίων απομακρύνσεων του νιτρώδους αζώτου στην εισροή και τις εκροές των δύο πιλοτικών μονάδων.

Διάγραμμα 13: Διάγραμμα διακυμάνσεων των συγκεντρώσεων των ολικών αιωρούμενων στερεών στην εισροή και τις εκροές των δύο πιλοτικών μονάδων.

Διάγραμμα 14: Διάγραμμα ποσοστιαίων απομακρύνσεων των TSS στην εισροή και τις εκροές των δύο πιλοτικών μονάδων.

Διάγραμμα 15: Διάγραμμα διακυμάνσεων των συγκεντρώσεων των βαρέων μετάλλων B, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn και Mo στην εισροή και τις εκροές των δυο πιλοτικών μονάδων.

Διάγραμμα 16: Διάγραμμα διακυμάνσεων των συγκεντρώσεων των βαρέων μετάλλων Mg, Al, K και Ca στην εισροή και τις εκροές των δυο πιλοτικών μονάδων.

Διάγραμμα 17: Διάγραμμα ποσοστιαίων απομάκρυνσεων των βαρέων μετάλλων B, Mg, Al, K, Cr, Ni, Cu, Zn, Mo και Fe στην εισροή και τις εκροές των δυο μονάδων

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Τεχνητός Υγροβιότοπος Επιφανειακής Ροής (Stefanakis et al., 2014)

Εικόνα 2: Τεχνητός Υγροβιότοπος Οριζόντιας Ροής (Dotro et al., 2017)

Εικόνα 3: Τεχνητός Υγροβιότοπος Κατακόρυφης Ροής (Maiga, 2017)

Εικόνα 4: Υβριδικό Σύστημα Τεχνητού Υγροβιότοπου (Parde et al., 2020)

Εικόνα 5: Γαλλικό Σύστημα Κατακόρυφης Ροής (Dotro et al., 2017)

Εικόνα 6: Floating Costructed Wetlands (Stefanakis et al., 2014)

Εικόνα 7: Biochar (Cooperman, 2015)

Εικόνα 8: Διάγραμμα ροής Χ.Υ.Τ.Α. Χανίων

Εικόνα 9: Εύκαμπτος σωλήνας εκροής

Εικόνα 10: Δύσκαμπτος σωλήνας εκροής

Εικόνα 11: Χοντρό χαλίκι

Εικόνα 12: Πρόσοψη διάταξης ανάποδου «Τ» της πιλοτικής μονάδας

Εικόνα 13: Ογκομετρικός κύλινδρος

Εικόνα 14: Δοχεία εκροής 10 L

Εικόνα 15: Χαλίκι

Εικόνα 16: Θερμοαντιδραστήρας

Εικόνα 17: Κιτ COD

Εικόνα 18: Κλίβανος μέτρησης BOD₅

Εικόνα 19: Ζυγαριά υψηλής ακρίβειας

Εικόνα 20: Πεχάμετρο

Εικόνα 21: Αγωγιμόμετρο

Εικόνα 22: Κιτ αμμωνιακού αζώτου

Εικόνα 23: Κιτ νιτρώδους αζώτου

Εικόνα 24: Κιτ νιτρικού αζώτου

Εικόνα 25: Φασματοφωτόμετρο UV-VIS

Εικόνα 26: Θερμαντήρας

Εικόνα 27: Συσκευή διήθησης

Κεφάλαιο 1: Θεωρητικό Υπόβαθρο

1.1 Φυσικοί Υγροβιότοποι

Σύμφωνα με την σύμβαση Ραμσάρ η οποία υπογράφηκε το 1975, οι υγροβιότοποι είναι φυσικές ή τεχνητές περιοχές οι οποίες αποτελούνται από έλη με ποώδη βλάστηση. Κατακλύζονται μονίμως ή προσωρινώς με νερό, το οποίο μπορεί να είναι είτε στάσιμο ή ρέον, είτε γλυκό ή αλμυρό. Οι φυσικοί υγροβιότοποι είναι τμήματα εδάφους τα οποία έχουν βυθιστεί από νερό συνήθως μικρού βάθους και αναπτύσσονται διάφορα είδη φυτών όπως καλάμια, είδη βούρλων και ψαθιού. Αποτελούν μεταβατικές περιοχές μεταξύ χερσαίων και υδρόβιων συστημάτων με χαρακτηριστικά τόσο του ξηρού όσο και του υγρού περιβάλλοντος. Τα χαρακτηριστικά τους επηρεάζονται από το κλίμα, την τροπογραφία, την σύσταση του νερού και την βλάστηση της γύρω περιοχής. Θεωρούνται δικαίως ένα πολύ σημαντικό κομμάτι της φύσης καθώς παρέχουν ένα περιβάλλον διαβίωσης διαφόρων ειδών χλωρίδας και πανίδας, ενώ παλιότερα καταστρέφονταν για την επέκταση αστικών και αγροτικών περιοχών (Παπαδοπούλου, 2013; Stefanakis et al., 2014).

Προσφέρουν πολύπλοκες οικοσυστημικές υπηρεσίες όπως ο καθαρισμός ρυπασμένων υδάτων, αποτροπή πλημμυρών, προστασία των ακτογραμμών και επαναφόρτιση των υπόγειων υδροφορέων. Οι περισσότεροι φυσικοί υγροβιότοποι είναι συστήματα επιφανειακής ροής που περιλαμβάνουν βαλτώδη βλάστηση. Τα φυτά που αναπτύσσονται στους φυσικούς υγροβιότοπους συμβάλλουν στην ανάπτυξη μικροοργανισμών οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα να απομακρύνουν ρυπογόνες ουσίες. Τα υπολείμματα της βλάστησης καθιζάνουν στον πυθμένα, καλύπτονται από άλλα υλικά και δημιουργούν ένα οργανικό υπόστρωμα τύρφης. Σε εκείνη την περιοχή επικρατούν αναερόβιες συνθήκες και κατακρατούνται τα μέταλλα. Ρυπογόνα συστατικά όπως το άζωτο και ο φώσφορος απορροφούνται από τα φυτά που τα χρησιμοποιούν για την ανάπτυξή τους και/ή οξειδώνονται από τους μικροοργανισμούς (Κολιολιου, 2016).

Οι φυσικοί υγροβιότοποι χωρίζονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες, τους παράκτιους και τους εσωτερικούς. Στη πρώτη κατηγορία ανήκουν τα ρηχά θαλασσινά νερά, τα δέλτα οι εκβολές των ποταμών, τα αλμυρά έλη, οι αμμονησίδες και οι παράκτιοι θαμνώνες, ενώ στη δεύτερη ανήκουν οι ποταμοί, τα ρυάκια, οι λίμνες, τα υγρά λιβάδια, οι καλαμώνες και τα παρόχθια ή παραποτάμια δάση (Κουτρακης, 1995).

Πιο συγκεκριμένα, οι φυσικοί υγροβιότοποι μπορούν να διαχωριστούν και με βάση τον τύπο του εδάφους. Υπάρχουν τέσσερις τύποι φυσικών υγροβιότοπων οι οποίοι χωρίζονται σε δυο κατηγορίες: Τους υγροβιότοπους ορυκτών εδαφών και εκείνους των οργανικών εδαφών. Τα έλη και οι βάλτοι ανήκουν στη πρώτη κατηγορία ενώ οι τυρφώνες στη δεύτερη. Όσον αφορά τα έλη, είναι ένα οικοσύστημα που χαρακτηρίζεται από ανεπαρκώς στραγγιζόμενα ορυκτά εδάφη και από την κυριαρχία των φυτών από χορτάρια. Τα φυτά που αναπτύσσονται επιβραδύνουν τη ροή του νερού και συμβάλλουν στην εναπόθεση ιζημάτων εμπλουτισμένων σε θρεπτικά συστατικά με αποτέλεσμα την ανάπτυξη του υγροβιότοπου. Τα έλη συνήθως βρίσκονται στις εκβολές ποταμών. Οι βάλτοι είναι οικοσυστήματα που

χαρακτηρίζονται από ορυκτά εδάφη και από πληθώρα σε δέντρα. Οι βάλτοι βρίσκονται παντού και πιο συχνά σε περιοχές με χαμηλή στάθμη δίπλα σε ποτάμια τα οποία τους τροφοδοτούν με νερό. Οι υδροβιότοποι οργανικού εδάφους είναι γνωστοί και ως τυρφώνες λόγω της ικανότητας τους να παράγουν τύρφη. Οι τυρφώνες είναι ένα υγρό οικοσύστημα το οποίο κυριαρχείται από βρύσες και ρείκια. Λαμβάνουν νερό αποκλειστικά από βροχοπτώσεις (Welsch et al., 1995).

Τα οφέλη των φυσικών υδροβιότοπων συνοψίζονται στον εμπλουτισμό των υπόγειων υδροφορέων, τον έλεγχο των πλημμυρών, την παγίδευση ιζημάτων και άλλων ουσιών, την απορρόφηση του διοξειδίου του άνθρακα και της ηλιακής ακτινοβολίας, και την αποθήκευση ή την απελευθερωσή θερμότητας (Stefanakis et al., 2014).

Δυστυχώς, οι περισσότεροι φυσικοί υδροβιότοποι έχουν υποβαθμιστεί λόγω ανθρωπογενών δραστηριοτήτων με κυριότερη την ανάπτυξη της γεωργίας. Η υποβάθμιση αυτή έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ικανότητας των υδροβιότοπων να κατακρατούν τον άνθρακα και τα θρεπτικά συστατικά, γεγονός που συχνά οδηγεί σε ευτροφισμό (Maziarz et al., 2019).

1.2 Τεχνητοί Υδροβιότοποι

Παρατηρώντας τις λειτουργίες και διεργασίες των φυσικών υδροβιότοπων, γεννήθηκε σταδιακά η ιδέα κατασκευής τεχνητών συστημάτων που θα επιτελούν παρόμοιες διεργασίες υπό ένα ελεγχόμενο περιβάλλον. Οι τεχνητοί υδροβιότοποι (ΤΥ) αποτελούν μια προσομοίωση των φυσικών, κατασκευάζονται από τον άνθρωπο και έχουν σκοπό την επεξεργασία ρύπων από αστικά υγρά απόβλητα, και διάφορες βιομηχανικές εκροές και αστικές/επιφανειακές απορροές (Stefanakis et al., 2014). Ένα πολύ σημαντικό στοιχείο των ΤΥ είναι το χαμηλό κόστος κατασκευής, λειτουργίας αλλά και συντήρησης. Η λειτουργία τους βασίζεται σε φυσικές διεργασίες με την εκμετάλλευση φυσικών συστατικών. Είναι αρκετά φιλικό προς το περιβάλλον καθώς οι ανάγκες των φυτών καλύπτονται είτε από το ίδιο απόβλητο είτε από άλλες ανανεώσιμες ενέργειες, όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια. Η εγκατάσταση είναι εύκολη στην κατασκευή καθώς δεν απαιτούνται υλικά όπως το σκυρόδεμα και το ατσάλι. Παρέχουν, δηλαδή, έναν οικολογικό τρόπο επεξεργασίας των αποβλήτων. Συμπληρωματικά, οι ΤΥ είναι αυτόνομοι, δεν απαιτείται εξειδικευμένο προσωπικό για την λειτουργία τους και ακόμα, προσαρμόζονται στις εκάστοτε συνθήκες εφόσον αντέχουν στις διακυμάνσεις υδραυλικού και ρυπαντικού φορτίου. Η μεγάλη διάρκεια ζωής τέτοιων συστημάτων επιφέρει την αύξηση της απόδοσής τους με τον χρόνο. Επιπλέον, πλεονεκτούν και όσον αφορά την αισθητική δεδομένου ότι απουσιάζουν οι δυσάρεστες οσμές και στις περισσότερες περιπτώσεις και τα έντομα. Τέλος, ο ευέλικτος και εύκολος σχεδιασμός τους, τα καθιστά ιδανικά για την εξυπηρέτηση μιας κατοικίας μέχρι και ολόκληρου χωριού ή πόλης (Chang et al., 2012; Stefanakis et al., 2014).

Ένας βασικός περιορισμός που έχουν οι ΤΥ είναι η σχετικά μεγάλη έκταση γης που απαιτείται για την εγκατάστασή τους σε σχέση με συμβατικές τεχνολογίες

επεξεργασίας. Αυτό παρουσιάζεται ιδιαίτερα ως πρόβλημα καθώς είναι είτε δύσκολο να βρεθεί επαρκής χώρος κατασκευής σε πυκνοκατοικημένες περιοχές όπως μεγάλες πόλεις, είτε το κόστος της γης σε τέτοιες περιοχές είναι υψηλό. Επίσης αξίζει να σημειωθεί ότι η απόδοση των ΤΥ επηρεάζεται μερικώς από τις κλιματικές συνθήκες. Για παράδειγμα το θερμό κλίμα ευνοεί την απόδοση τους. Παρ' όλα αυτά η μικρότερη απόδοση που παρουσιάζουν σε χαμηλές θερμοκρασίες μπορεί να αντισταθμιστεί με την αύξηση της επιφάνειας του συστήματος (Stefanakis et al., 2014)

Στους ΤΥ λαμβάνουν χώρα διάφορες φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες που απομακρύνουν τους ρύπους των λυμάτων. Στις φυσικές διεργασίες ανήκει η φίλτρανση/διήθηση όπου τα σωματίδια φιλτράρονται στους κόκκους του πληρωτικού υλικού και στις ρίζες των φυτών και στην καθίζηση κατά την οποία με τη βοήθεια της βαρύτητας, τα αιωρούμενα σωματίδια απομακρύνονται, η οργανική ύλη μειώνεται και τα κολοβακτηρίδια εξαλείφονται. Όσον αφορά τις χημικές διεργασίες, η προσρόφηση και η κατακρήμνιση στο υπόστρωμα και στις επιφάνειες των ριζωμάτων αποτελεί την πιο δραστική διαδικασία, καθώς φώσφορος και βαρέα μέταλλα απομακρύνονται με αυτόν τον τρόπο. Υποστρώματα τα οποία περιέχουν αργίλιο, σίδηρο, ασβέστιο και μαγνήσιο βελτιώνουν τις διεργασίες αυτές. Αξίζει να σημειωθεί ότι η χρήση ζεόλιθου ως υλικό πλήρωσης βελτιώνει σε σημαντικό βαθμό την προσροφητική ικανότητα του συστήματος (Stefanakis and Tsihrintzis, 2012a), καθώς προσελκύει το αμμωνιακό άζωτο και άλλα κατιόντα σε μια ηλεκτροστατική ανταλλαγή ιόντων. Σειρά έχουν οι βιολογικές διεργασίες, όπως κατά κύριο λόγο ο βακτηριακός μεταβολισμός κατά τον οποίο απομακρύνονται σημαντικοί ρύποι όπως το BOD και το άζωτο. Πιο συγκεκριμένα, οι μικροοργανισμοί οι οποίοι αναπτύσσονται στα διάφορα βιοφίλμ που υπάρχουν στο σύστημα, αποικοδομούν το οργανικό φορτίο και τα βακτήρια στις κατάλληλες συνθήκες μεταβολίζουν το ανόργανο άζωτο. Οι βιολογικές διεργασίες αποτελούν και τον κυριάρχο μηχανισμό απομάκρυνσης ρύπων στους ΤΥ. Τέλος, η ανάγκη των φυτών για προσρόφηση θρεπτικών με σκοπό την ανάπτυξή τους επίσης συμβάλλει στην απομάκρυνση ρύπων όπως το άζωτο και ο φώσφορος (Vymazal et al., 1998; Yalcuk et al., 2009; Parde et al., 2020).

Η συγκεκριμένη τεχνολογία επεξεργασίας ήρθε στο προσκήνιο πριν από περίπου σαράντα χρόνια, σε αντίθεση με τις συμβατικές μεθόδους οι οποίες χρησιμοποιούνται πάνω από ογδόντα χρόνια. Τα τελευταία είκοσι χρόνια, όμως, αναπτύσσεται ουσιαστικά η χρήση τους σε συνδυασμό με την αυξανόμενη ανάγκη για την προστασία του περιβάλλοντος αλλά και την οικονομία ενέργειας. Πέρα από τον οικολογικό τρόπο επεξεργασίας των αποβλήτων, τέτοια συστήματα έχουν τη δυνατότητα να λειτουργήσουν ως ένα φιλικό περιβάλλον για την άγρια ζωή αλλά και καθιστούν ένα τοπίο όμορφο αισθητικά για τις γύρω περιοχές.

Οι ΤΥ χωρίζονται με βάση τις λειτουργίες τους σε τρεις κατηγορίες. Η πρώτη αφορά τη δημιουργία οικότοπων για την άγρια φύση και για διάφορα οικολογικά οφέλη όπως η δημιουργία χώρων πρασίνου. Η δεύτερη κατηγορία αφορά συστήματα τα οποία αποσκοπούν στον έλεγχο πλημμυρών, δηλαδή λειτουργούν ως δέκτες απορροής πλημμυρών και γενικότερα νερών από βροχές και καταιγίδες, και η τελευταία κατηγορία αφορά συστήματα τα οποία αποσκοπούν στην επεξεργασία λυμάτων ποικίλης προέλευσης.

Μια ακόμη κατηγοριοποίηση στην οποία γίνεται αναφορά είναι με βάση την βλάστηση τους. Έτσι οι ΤΥ χωρίζονται σε αυτούς που περιέχουν αναδυόμενα μακρόφυτα και αυτούς με βυθισμένα μακρόφυτα. Παρ' όλα αυτά, τον τελευταίο καιρό ο διαχωρισμός των ΤΥ ο οποίος κυριαρχεί είναι με βάση την κατεύθυνση της ροής του νερού. Γενικότερα, οι δυο κατηγορίες στις οποίες γίνεται αναφορά είναι οι ΤΥ επιφανειακής ροής και οι ΤΥ υπόγειας ροής η οποία χωρίζεται περαιτέρω σε εκείνους με οριζόντια και κατακόρυφη ροή. Όταν παραπάνω από ένα είδη ΤΥ συνδυάζονται σε μια εγκατάσταση, τότε αυτή καλείται ως ένα υβριδικό σύστημα. Τέλος, οι επιπλέοντες ΤΥ είναι ένα τεχνητό σύστημα το οποίο αποτελείται από μια πλωτή δομή φυτεμένη με αναδυόμενα μακρόφυτα (Stefanakis, 2018; Stefanakis, 2019). Τα διάφορα είδη ΤΥ παρουσιάζονται στη συνέχεια με μεγαλύτερη λεπτομέρεια.

1.3 Είδη Τεχνητών Υγροβιότοπων

1.3.1 Τεχνητοί Υγροβιότοποι Επιφανειακής Ροής (Free Water Surface Constructed Wetlands - FWSCW)

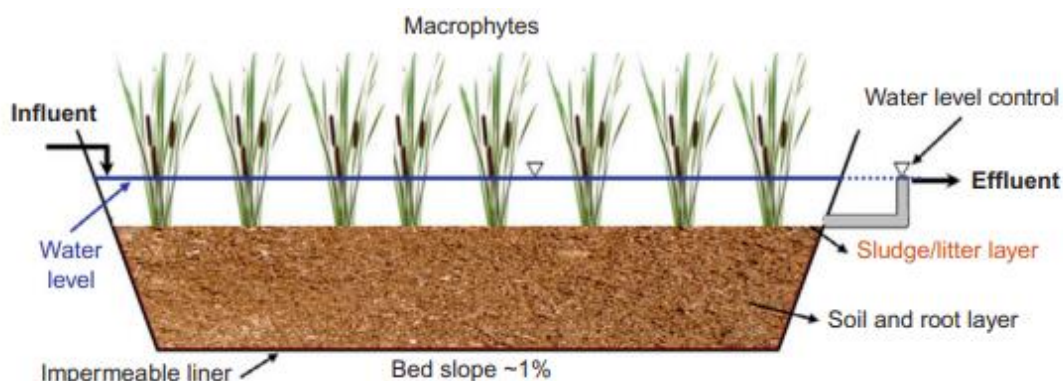
Οι ΤΥ επιφανειακής ροής (ΤΥΕΡ) είναι από τους πρώτους ΤΥ που δημιουργήθηκαν και αποτελούν την πιο κοντινή απομίμηση ενός φυσικού υγροβιότοπου. Χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία αστικών λυμάτων και κατά βάση είναι μεγάλοι σε έκταση. Εκτός από την επεξεργασία αστικών λυμάτων, συνήθως χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία αστικών όμβριων υδάτων, απορροές γεωργικών προϊόντων, ροές που περιέχουν μέταλλα καθώς και σε βιομηχανικές εκροές και απόβλητα (Stefanakis et al., 2018; Stefanakis, 2020). Επιπρόσθετα, τέτοια συστήματα βρίσκουν καλύτερη εφαρμογή σε ροή με υψηλή ένταση αλλά με χαμηλό ρυπαντικό φορτίο. Η επιφάνεια του νερού είναι ορατή και βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια του υποστρώματος, γεγονός το οποίο εμπεριέχει ένα ρίσκο για το προσωπικό και τους επισκέπτες που πιθανόν να έρθουν σε επαφή με το νερό. Επιπρόσθετα, η ελεύθερη επιφάνεια του νερού πιθανόν να απελευθερώνει δυσάρεστες οσμές και να ευνοεί τη συσσώρευση κουνουπιών εφόσον δεν έχει γίνει σωστός υδραυλικός σχεδιασμός (Dotro et al., 2017).

Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα εύρος φυτών με πιο συνηθισμένα τα κοινά καλάμια, διάφορα είδη βούρλων, οι σύφες και διάφορα είδη ψαθών. Ο πυθμένας των λεκανών καλύπτεται με γεωμεμβράνες ή κάποια αργιλική στρώση με μικρή διαπερατότητα στο νερό ενισχύοντας τη στεγανότητα του συστήματος και εμποδίζοντας το λύμα να διαφύγει στο έδαφος. Το νερό ρέει οριζόντια, κατά μήκος του υγροβιότοπου και διαπερνά τα φυτά και τις ρίζες τους, καθιστώντας ικανή την απομάκρυνση ρύπων μέσω φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών. Τα πιο ογκώδη και τα περισσότερα αιωρούμενα σωματίδια καθιζάνουν και φιλτράρονται κοντά στο σημείο εισόδου, ενώ τα μικρότερα καθιζάνουν μετά την επαφή τους με τα φυτά του υγροβιότοπου. Η βλάστηση παίζει σημαντικό ρόλο καθώς εμποδίζει την επαναιώρηση των ιζημάτων από τον πυθμένα στο λύμα και μειώνει την ταχύτητα του ανέμου ενισχύοντας την καθίζηση των στερεών. Παράλληλα, η επιφάνεια των ριζωμάτων αξιοποιείται ως οικότοπος για τους μικροοργανισμούς. Το απαραίτητο οξυγόνο για τις βιοχημικές διεργασίες παρέχεται με διάχυση από τον ατμοσφαιρικό

αέρα και μέσω της φωτοσύνθεσης των φυτών. Στη περίπτωση όμως που η επιφάνεια του υδροβιότοπου καλύπτεται ολόκληρη από φυτά, η ηλιακή ακτινοβολία εμποδίζεται, επικρατούν αναερόβιες συνθήκες και η φωτοσύνθεση διαδραματίζει τον κυρίαρχο ρόλο στην παροχή οξυγόνου. Οι χαμηλές θερμοκρασίες τη χειμερινή εποχή ενισχύουν τη διαλυτότητα του οξυγόνου αλλά επιβραδύνουν τις μικροβιακές δραστηριότητες (Vymazal., 2008; Vymazal, 2013; Stefanakis et al., 2014).

Οι υδροβιότοποι επιφανειακής ροής αποδίδουν αρκετά καλά στην απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών, BOD και αζώτου, αλλά υστερούν στην απομάκρυνση φωσφόρου. Τα καθιζάνοντα στερεά απομακρύνονται με διήθηση υπό συνθήκες ηρεμίας. Η αφαίρεση της οργανικής ύλης γίνεται μέσω της αποσύνθεσής της από μικροοργανισμούς και εξαρτάται από την ισορροπία του άνθρακα και του οξυγόνου που βρίσκεται στο σύστημα. Όσον αφορά το άζωτο, αφαιρείται με τις διαδικασίες της νιτροποίησης στις αερόβιες περιοχές και απονιτροποίησης στις αναερόβιες. Ειδικότερα, η αμμωνία οξειδώνεται σε νιτρικό άλας στις αερόβιες ζώνες και το νιτρικό άλας μετατρέπεται σε ελεύθερο άζωτο ή οξείδιο του αζώτου στις αναερόβιες ζώνες. Η φωτοσυνθετική ικανότητα των φυτών ενισχύει την διεργασία της απονιτροποίησης καθώς τα φυτά λειτουργούν ως μια πηγή άνθρακα. Στα συγκεκριμένα συστήματα, το αμμωνιακό άζωτο αφαιρείται και μέσω της πτητικοποίησης καθώς η επιφάνεια του νερού είναι εκτεθειμένη στην ατμόσφαιρα. Ο φώσφορος απομακρύνεται με τις διεργασίες της προσρόφησης και καθίζησης. Επιπρόσθετα, σε χαμηλούς ρυθμούς φόρτισης του συστήματος, τα φυτά προσλαμβάνουν τα θρεπτικά (N, P) με σκοπό να καλύψουν τις ανάγκες τους και να αναπτυχθούν. Αξίζει να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη διεργασία διαδραματίζει σημαντικότερο ρόλο στα συγκεκριμένα συστήματα σε σύγκριση με τα υπόλοιπα. Τέλος, οι βασικές διεργασίες απομάκρυνσης των μετάλλων είναι η καθίζηση και η απορρόφησή τους από τα φυτά (Vymazal et al., 1998; A. El-Sheikh et al., 2010; Vymazal, 2013; Bakhshoodeh et al., 2020).

Οι συγκεκριμένοι ΤΥ χρησιμοποιήθηκαν αρχικά για την πρωτοβάθμια και δευτεροβάθμια επεξεργασία αστικών λυμάτων αλλά χρησιμοποιούνται και για την επεξεργασία νερού το οποίο περιέχει υδρογονάνθρακες πετρελαίου (Stefanakis et al., 2018). Τέλος, λόγω της ραγδαίας ανάπτυξης των υπόλοιπων συστημάτων ΤΥ, οι συγκεκριμένοι υγροβιότοποι απαντώνται συνήθως ως περιβαλλοντικές εφαρμογές. Για παράδειγμα συμβάλλουν στην αποκατάσταση του περιβάλλοντος, λειτουργούν ως οικοσύστημα, είναι ανθεκτικοί στις πλημμύρες, ενώ πολύ χρησιμοποιούνται σαν τελευταίο στάδιο επεξεργασίας με χαμηλά επίπεδα ρύπων και επιλέγονται για τον

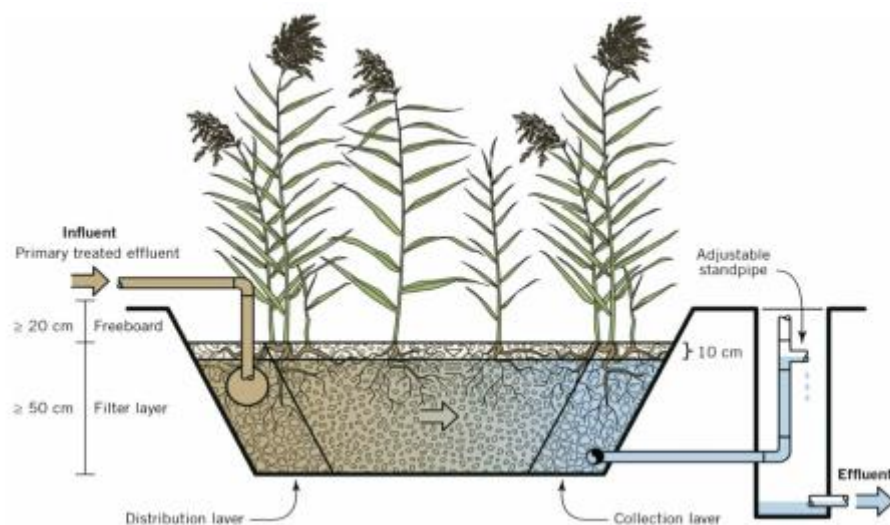


έλεγχου διάβρωσης των ακτών(Vymazal, 2008).

Εικόνα 1: Σχεδιαστική αναπαράσταση ενός Τεχνητού Υγροβιότοπου Επιφανειακής Ροής (Stefanakis et al., 2014)

1.3.2 Τεχνητοί Υγροβιότοποι Υπόγειας Οριζόντιας Ροής (HorizontalSubsurfaceFlowConstructedWetlands - HFCWs)

Οι υγροβιότοποι οριζόντιας ροής αναπτύχθηκαν το 1970 και εφαρμόστηκαν για πρώτη φορά το 1974 στη Γερμανία. Χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία οικιακών και αστικών λυμάτων, αλλά και βιομηχανικών και γεωργικών υγρών αποβλήτων. Στους συγκεκριμένους υγροβιότοπους, το υγρό ρέει διαγράφοντας μια οριζόντια διαδρομή. Το λύμα εισέρχεται στο σύστημα και ρέει με αργό ρυθμό μέσα από το πορώδες μέσο μέχρι να φτάσει στη ζώνη εκροής όπου και απομακρύνεται. Κατά την πορεία αυτή, το νερό έρχεται σε επαφή με ένα σύστημα αερόβιων και αναερόβιων περιοχών. Είναι πολύ σημαντικό ό,τι το νερό δεν έρχεται σε επαφή με την ατμόσφαιρα με αποτέλεσμα να μην δημιουργούνται κίνδυνοι για την υγεία των ανθρώπων και των ζώων (Vymazal et al., 1998; Vymazal, 2008; Dotro et al., 2017). Στη συνέχεια ακολουθεί μια εικόνα αναπαριστώντας το συγκεκριμένο σύστημα ΤΥ.



Εικόνα 2: Τεχνητός Υγροβιότοπος Οριζόντιας Υπόγειας Ροής (Dotro et al., 2017)

Η επιλογή του υποστρώματος είναι μια βασική παράμετρος για το σχεδιασμό του συστήματος καθώς είναι υπεύθυνο για την ανάπτυξη του βιοφίλμ και εάν απαιτείται μπορεί να αντιδράσει με συγκεκριμένους ρύπους όπως ο φώσφορος και τα μέταλλα. Πιο συγκεκριμένα, το βιοφίλμ δημιουργείται πάνω σε ένα υδάτινο στρώμα που συνδέεται με τις ρίζες των φυτών στο οποίο αποικίζουν κοινότητες βακτηρίων, μυκήτων, πρωτοζώων και φυκών. Τα βιοφίλμ, λοιπόν, ενισχύουν σε σημαντικό βαθμό την απομάκρυνση μολυσματικών ουσιών παρέχοντας βιολογικά ενεργές επιφάνειες για τη βιοχημική επεξεργασία τους. Επιπλέον, το υπόστρωμα το οποίο είναι συνήθως χαλίκι, υποστηρίζει την ανάπτυξη των φυτών. Οι ρίζες των φυτών του υγροβιότοπου, συνήθως καλαμιών, προκαλούν τις αερόβιες συνθήκες καθώς έχουν τη δυνατότητα να μεταφέρουν οξυγόνο από τα φύλλα, μέσω των ριζωμάτων στις ρίζες (Gomes et al., 2018).

Το κοινό καλάμι το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως όπως και στην συγκεκριμένη μελέτη, αναπτύσσεται σε εύκρατα κλίματα και σε τροπικές περιοχές. Επίσης, μπορεί να αναπτυχθεί ακόμα και σε αλατούχο νερό και μπορεί να φτάσει έως και οχτώ μέτρα ύψος. Το συγκεκριμένο είδος φυτού, αναπτύσσεται με πολύ γρήγορο ρυθμό, το σύστημα των ριζών είναι εκτεταμένο, μπορεί να διεισδύσει με ευκολία σε βάθος 0,6 έως 1 m και μπορεί να αντέξει τιμές pH από 4,8 έως 8,2. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε ζεστά ή ξηρά κλίματα, ίσως χρειαστεί να μειώσουμε την βλάστηση σε τακτική βάση. Στο εκτεταμένο σύστημα ριζών αναπτύσσονται μικροοργανισμοί οι οποίοι βοηθούν σε αυτήν την μεταφορά οξυγόνου και στην καλύτερη αποδόμηση των ρύπων. Το οξυγόνο που απαιτείται περα από τις ρίζες των φυτών συμπληρώνεται από την ατμόσφαιρα με διάχυση. Πιο συγκεκριμένα όμως, οι αναερόβιες συνθήκες παίζουν σημαντικότερο ρόλο από τις αερόβιες καθώς το υπόστρωμα φίλτρασης είναι συνεχώς κορεσμένο και το οξυγόνο που απελευθερώνουν οι ρίζες για τις αερόβιες συνθήκες δεν φτάνει στα επιθυμητά επίπεδα (Vymazal et al., 1998; Dotro et al., 2017; Bakhshoodeh et al., 2020; Sharma et al., 2021).

Οι συγκεκριμένοι υγροβιότοποι είναι αρκετά αποδοτικοί στην απομάκρυνση του οργανικού φορτίου (BOD, COD) και TSS. Αντιθέτως, μειονεκτούν σε ένα βαθμό στην απομάκρυνση αμμωνιακού αζώτου λόγω της έλειψης οξυγόνου και κατ' επέκταση των αερόβιων συνθηκών, βασική προϋπόθεση της νιτροποίησης. Ο βασικός λόγος έλειψης οξυγόνου είναι αποτέλεσμα της συνεχούς τροφοδότησης της μονάδας με λύμα, περιορίζοντας τις αερόβιες ζώνες μόνο γύρω από τα ριζώματα. Μηχανισμοί απομάκρυνσης αιωρούμενων σωματιδίων είναι η διήθηση και η καθίζηση με την βοήθεια της βαρύτητας και η απορρόφηση πάνω σε βιοφίλμ που αναπτύσσεται στις ρίζες των φυτών. Το BOD απομακρύνεται με διήθηση, αποδόμηση από αερόβιους και αναερόβιους μικροοργανισμούς και καθίζηση. Η απόδοση της απομάκρυνσης επηρεάζεται αμέσως από τα φυτά καθώς αυξάνουν τη συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου ενώ η ανάπτυξη των ριζών τους αυξάνει την επιφάνεια που προορίζεται για την ανάπτυξη βιοφίλμ. Αντιθέτως, η θερμοκρασία δεν επηρεάζει την απόδοση της απομάκρυνση του BOD και του COD καθώς τα αερόβια και αναερόβια βακτήρια μπορούν να λειτουργήσουν σε θερμοκρασίες μέχρι και 5°C.

Το άζωτο αφαιρείται κυρίως μέσω της νιτροποίησης και της απονιτροποίησης. Ωστόσο, οι TY οριζόντιας ροής δεν είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικοί στην απομάκρυνση αμμωνίας καθώς υπάρχει έλλειψη οξυγόνου στο στρώμα φίλτρανσης. Αρχικά, η αμμωνία απομακρύνεται στο πρώτο στάδιο της νιτροποίησης. Στο συγκεκριμένο στάδιο, το αμμωνιακό άζωτο οξειδώνεται σε νιτρώδη με την βοήθεια αυστηρά χημειολιθοτροφικών βακτηρίων στις αερόβιες ζώνες του συστήματος. Τα βακτήρια αυτά βασίζονται αποκλειστικά στην οξείδωση της αμμωνίας ως πηγή ενέργειας για την ανάπτυξή τους (Schulze-Nobre et al., 2017). Ακολουθεί το δεύτερο στάδιο της νιτροποίησης, κατά το οποίο το νιτρώδες άζωτο μετατρέπεται σε νιτρικό. Τα νιτροποιητικά βακτήρια που διεκπεραιώνουν την διεργασία αυτή χρησιμοποιούν ως πηγή ενέργειας όχι μόνο νιτρώδη αλλά και οργανικές ενώσεις. Μετά τη νιτροποίηση ακολουθεί η απονιτροποίηση κατά την οποία, στις αναερόβιες ζώνες, το νιτρικό άζωτο με την βοήθεια χημειοτετερότροφων βακτηρίων μετατρέπεται σε αέριο άζωτο. Τα βακτήρια αυτά λαμβάνουν ενέργεια από χημικές αντιδράσεις και ως πηγή άνθρακα χρησιμοποιούν οργανικές ενώσεις (Ramirez et al., 2019).

Αξίζει να σημειωθεί ότι, οι εισροές με πολύ υψηλό οργανικό φορτίο, μειώνουν την απόδοση της νιτροποίησης καθώς το διαθέσιμο οξυγόνο προτιμάται να χρησιμοποιηθεί πλήρως για την οξείδωση της οργανικής ύλης. Από την άλλη, οι αναερόβιες συνθήκες που επικρατούν ενισχύουν την απονιτροποίηση δεδομένου ότι υπάρχει επαρκή ποσότητα νιτρικών και άνθρακα. Άλλο ένα στοιχείο που ενισχύει την απονιτροποίηση είναι οι αναερόβιες θέσεις που παρέχει το βιοφίλμ. Στο συγκεκριμένο σημείο, η προσθήκη μιας στρώσης βιοεξανθρακώματος, για το οποίο θα αναφερθούμε παρακάτω, θα διευκολύνει την δημιουργία τέτοιων συνθηκών. Ωστόσο, η απομάκρυνση του αζώτου μέσω της πτητικοποίησης δεν είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική καθώς στα συγκεκριμένα συστήματα η ελεύθερη επιφάνεια δεν είναι εκτεθειμένη στην ατμόσφαιρα.

Ο φώσφορος δεν απομακρύνεται σε αρκετά καλό βαθμό και εξαρτάται από το χρησιμοποιούμενο υπόστρωμα. Για να βελτιωθεί η απομάκρυνση του φωσφόρου ενδείκνυται η επιλογή υλικών υψηλής προσρόφησης, τα οποία όμως σπάνια απαντώνται σε τέτοια συστήματα. Τέτοια υλικά περιλαμβάνουν στην επιφάνεια τους σίδηρο, υδροξείδιο αλουμινίου ή ασβεστώδη υλικά. Τον τελευταίο καιρό για τον

συγκεκριμένο σκοπό, χρησιμοποιείται ιπτάμενη τέφρα, σκωρία χάλυβα, θρυμματισμένο σκυρόδεμα, ωχρά σιδήρου και επεξεργασμένα ροκανίδια. Επιπλέον, ένα μέρος των θρεπτικών, όπως το άζωτο και ο φώσφορος, αφομοιώνονται από τα φυτά με σκοπό να καλύψουν τις ανάγκες τους. Είναι κατανοητό, ότι η συγκεκριμένη διεργασία λαμβάνει χώρα τις περιόδους ανάπτυξης των φυτών, ενώ αντιθέτως τον χειμώνα η απορρόφηση είναι σχεδόν αμελητέα. Εξαιτίας της μόνιμα κορεσμένης κλίνης, η διεργασία αυτή είναι αρκετά αποδοτικότερη απ'ότι στα συστήματα κατακόρυφης ροής, καθώς το λύμα βρίσκεται σε συνεχή επαφή με το υπόστρωμα. Αξίζει να σημειωθεί, ότι τα περιεχόμενα θρεπτικά συστατικά αφαιρούνται εξ' ολοκλήρου από το σύστημα μέσω της συλλογής της παραγόμενης βιομάζας. Σε περίπτωση που τα φυτά δεν απομακρυνθούν, τα θρεπτικά συστατικά θα απελευθερωθούν πίσω στο σύστημα μετά το πέρας της περιόδου ανάπτυξης των φυτών. Αυτός είναι και ο λόγος ο οποίος η θερμοκρασία διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην απόδοση απομάκρυνσης του αζώτου και του φωσφόρου.

Όσον αφορά την απομάκρυνση μετάλλων επιτυγχάνεται με κατακρήμνιση και προσρόφηση. Απορροφούνται και αφομοιώνονται από τα φυτά, καθώς και παγιδεύονται στο βιοφίλμ. Η πιο αποτελεσματική φυσική διεργασία για την απομάκρυνση των μετάλλων είναι η καθίζηση με την μορφή σουλφιδίων. Προτιμάται ένα λεπτόκοκκο ίζημα το οποίο συσσωρεύει ευκολότερα τα μέταλλα σε σύγκριση με ένα χονδροειδές φίλτρο. Η απόδοση στην απομάκρυνση των μετάλλων χρήζει ιδιαίτερης προσοχής καθώς πολλά από αυτά είναι τοξικά προς το περιβάλλον. Κατά κύριο λόγο, ο υδράργυρος, ο μόλυβδος, το κάδμιο και το αρσενικό. Τα στερεά απομακρύνονται με καθίζηση και διήθηση και το μεγαλύτερο μέρος τους φιλτράρεται πολύ κοντά στην είσοδο του συστήματος.

Τέλος, οι παθογόνοι μικροοργανισμοί απομακρύνονται με διήθηση και καθίζηση καθώς τα βακτήρια αφομοιώνονται από τους κόκκους του πληρωτικού υλικού ή πεθαίνουν με φυσικό τρόπο λόγω του μεγάλου χρονικού διαστήματος που παραμένει το λύμα μέσα στο σύστημα (Vymazal, 1998; Akrotos et al., 2007; Vymazal, 2007; Vymazal, 2008; Cortes-Esquivel et al., 2012; Κολιολιου, 2016; Zhang et al., 2016; Bakhshoodeh et al., 2020; Sharma et al., 2021).

Τα συστήματα κατασκευάζονται με λεκάνες στις οποίες έχει γίνει στεγανοποίηση με μια αργιλική στρώση, με συνθετικό υλικό (γεωμεμβράνη) ή με άοπλο σκυρόδεμα ώστε να αποτραπεί η διαρροή στο υπέδαφος, προστατεύοντας του υπόγειους υδροφορείς. Η λεκάνη γεμίζει με το κατάλληλο πορώδες υλικό στο οποίο αναπτύσσονται τα φυτά. Για δευτεροβάθμια επεξεργασία αστικών λυμάτων, το βάθος του χαλικιού είναι περίπου 0,5 έως 0,7m και η στάθμη του νερού περιπου 5 έως 10cm κάτω από την επιφάνεια του συστήματος. Επιπλέον, συνήθως δίνεται μια κλίση 1% στη βάση της κλίνης προκειμένου να διευκολυνθεί η αποστράγγιση. Τα συστήματα οριζόντιας ροής απαιτούν μικρότερο χώρο από εκείνα της επιφανειακής ροής και ελαχιστοποιούνται οι οχλήσεις όσον αφορά τις μυρωδιές, πετυχαίνοντας παράλληλα τον καλύτερο έλεγχο των κουνουπιών (Stefanakis et al., 2014).

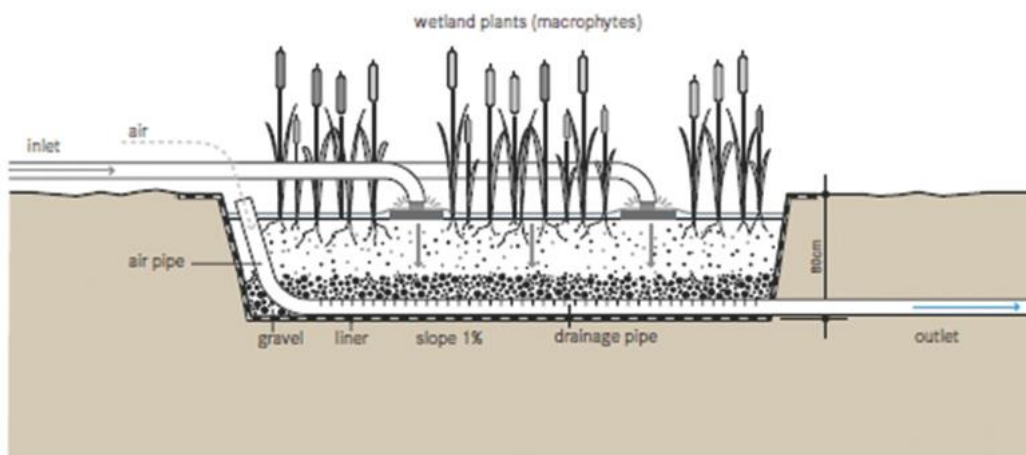
Συμπληρωματικά, οι ΤΥ οριζόντιας υπόγειας ροής, έχουν χαμηλό κόστος κατασκευής, λειτουργίας και συντήρησης, καταναλώνουν ελάχιστη ενέργεια, δεν απαιτούν μηχανικό ή ηλεκτρικό εξοπλισμό, έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και είναι πολύ ευέλικτοι όσον αφορά την επέκτασή τους.

Δεδομένου ότι τα συστήματα οριζόντιας ροής δεν χρησιμοποιούν μηχανικό εξοπλισμό και τα πορώδη μέσα είναι κορεσμένα με νερό, είναι λιγότερο πιθανό να αποτύχουν συγκριτικά με άλλα συστήματα. Κατά τη λειτουργία αυτών των συστημάτων, όμως, πρέπει να δωθεί η απαραίτητη προσοχή στο πρόβλημα της έμφραξης. Αυτό συμβαίνει όταν κορεστούν οι πόροι του πληρωτικού υλικού με στερεά αντί για λύματα. Ο κύριος παράγοντας που προκαλεί έμφραξη είναι η υπερβολική φόρτιση του συστήματος με στερεά σε συνδυασμό με τον κακό σχεδιασμό του. Για να ελαχιστοποιήσουμε τις πιθανότητες έμφραξης και να αυξήσουμε την διάρκεια ζωής του συστήματος θα πρέπει να επιλέξουμε τόσο το κατάλληλο πληρωτικό μέσο όσο και τα κατάλληλα υδραυλικά και οργανικά φορτία. Τέλος, σε περίπτωση που φράξει το σύστημα ή ο βαθμός απομάκρυνσης των ρύπων δεν είναι ικανοποιητικός, θα πρέπει να το ανακαινίσουμε. Η ανακαίνιση περιλαμβάνει την πλήρη αφαίρεση του πληρωτικού υλικού, το οποίο είτε απορρίπτεται εκτός του χώρου είτε καθαρίζεται και επιστρέφει στο σύστημα (Dotro et al., 2017; Marzo et al., 2020).

1.3.3 Τεχνητοί Υδροβιότοποι Κατακόρυφης Ροής (VerticalFlowConstructedWetlands - VFCWs)

Οι ΤΥ κατακόρυφης ροής πρωτοεμφανίστηκαν πριν από 25 χρόνια στην Ολλανδία. Έχουν χρησιμοποιηθεί για την επεξεργασία οικιακών και αστικών υγρών αποβλήτων, στραγγισμάτων από Χώρο Υγειονομικής Ταφής και αποβλήτων από αγροβιομηχανίες. Αποτελούνται από πολλά στρώματα χαλικιού και άμμου με αυξανόμενη διαβάθμιση από πάνω προς τα κάτω. Συνήθως το ανώτερο στρώμα είναι ένα στρώμα άμμου στο οποίο αναπτύσσεται και η βλάστηση του συστήματος. Όπως και στους υπόλοιπους τύπους υδροβιότοπων, τα κοινά καλάμια και τα φυτά τύφα αποτελούν την συνηθέστερη βλάστηση.

Στο ανώτερο στρώμα, πέρα από τη δυνατότητα βλάστησης, συγκρατούνται και τα στερεά. Η βλάστηση αναπτύσσει βαθιές ρίζες οι οποίες διαπερνούν τα πορώδη μέσα, βοηθάνε στη διατήρηση των υδραυλικών ιδιοτήτων και αυξάνουν τον χρόνο επαφής του λύματος με το υπόστρωμα και τις ρίζες. Επιπρόσθετα, η βλάστηση μεταφέρει μια μικρή ποσότητα οξυγόνου στη ριζική ζώνη με σκοπό να επιτραπεί στα αερόβια βακτήρια να αποικίσουν στη περιοχή και να απομακρύνουν τα οργανικά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, τα θρεπτικά συστατικά και το οργανικό υλικό να απορροφούνται και να αποικοδομούνται από τα πλησίον μικρόβια. Ένα ακόμη πλεονέκτημα του εκτεταμένου ριζικού συστήματος είναι η ανάπτυξη ενός στρώματος βιοφίλμ το οποίο ενεργοποιεί μικροβιακές διεργασίες για την απομάκρυνση διαφόρων ρύπων



Εικόνα3: Τεχνητός Υγροβιότοπος Κατακόρυφης Ροής(Maiga, 2017)

Ωστόσο, χρειάζεται προσοχή καθώς σε υψηλούς ρυθμούς ροής το βιοφίλμ συμβάλει στη διαδικασία της έμφραξης. Οι συγκεκριμένοι ΤΥ, κατακλύζονται κατακόρυφα με μια μεγάλη ποσότητα λύματος, ανα διαστήματα, πλημμυρίζοντας την επιφάνεια τους. Στη συνέχεια περνάνε από το υπόστρωμα όπου και διυλίζονται και φτάνουν σε ένα δίκτυο αποστράγγισης που βρίσκεται στη βάση της κλίνης όπου και απομακρύνονται. Ο πυθμένας καλύπτεται από γεωμεμβράνη ή κατασκευάζεται από σκυρόδεμα με σκοπό την αποφυγή της διαρροής στο υπέδαφος. Επιπλέον, δίνεται μια κλίση στον πυθμένα 1-2% για την καλύτερη διανομή του λύματος. Επιπρόσθετα, προσθέτονται ορισμένοι κάθετοι σωλήνες αερισμού οι οποίοι συνδέουν το κάτω μέρος της κλίνης με τους αγωγούς εκροής με σκοπό τον καλύτερο αερισμό του πυθμένα. Οι στρώσεις των διαβαθμισμένων υλικών αποστραγγίζουν και επιτρέπουν στο νερό και τον αέρα να εισέλθουν στους πόρους. Ετσι, όταν το λύμα εισέλθει στον υγροβιότοπο, παγιδεύει τον αέρα στους πόρους και επιτρέπει στο οξυγόνο να απελευθερωθεί μέσω των πορώδων μέσων. Αυτή η διαδικασία είναι υπεύθυνη για την πολύ ικανοποιητική οξυγόνωση του υποστρώματος, ενισχύοντας την διαδικασία της νιτροποίησης. Η βασική λειτουργία, λοιπόν, των φυτών στους συγκεκριμένους υγροβιότοπους είναι η διατήρηση της διαπερατότητας στο φίλτρο και η παροχή ενός οικοτόπου για τους μικροοργανισμούς. Αυτό συμβαίνει γιατί η παροχή του οξυγόνου από τον αέρα συνδράμει περισσότερο στην οξυγόνωση του υποστρώματος φίλτρανσης από ότι του οξυγόνου από τα φυτά (Vymazal et al., 1998; Stefanakis et al., 2014; Dotro et al., 2017; Stefanakis, 2020).

Οι ΤΥ κατακόρυφης ροής είναι γνωστοί στη χρήση τους για την απομάκρυνση οργανικής ύλης, αζώτου, TSS και κολοβακτηριδίων. Η σωματιδιακή οργανική ύλη απομακρύνεται με καθίζηση και φυσική διήθηση. Η διαλυτή οργανική ύλη αποσυντίθενται αερόβια και αναερόβια. Η αερόβια αποικοδόμηση της διαλυτής οργανικής ύλης επιτυγχάνεται μέσω μοριοτροφικών και χημειοτροφικών μικροοργανισμών και λαμβάνει χώρα στην επιφάνεια του βιοφίλμ που αναπτύσσεται στις ρίζες και στην επιφάνεια των κόκκων του υποστρώματος. Όσον αφορά την αναερόβια αποικοδόμηση λαμβάνει χώρα υπο συνθήκες απουσίας οξυγόνου, ωστόσο είναι πιο αργή από την αερόβια. Αξίζει να σημειωθεί ότι η βιοαποικοδόμηση

της οργανικής ύλης επηρεάζεται από τον υδραυλικό χρόνο παραμονής του λύματος και από την θερμοκρασία, καθώς σε υψηλές θερμοκρασίες η μικροβιακή δραστηριότητα και κατ' επέκταση η απόδοση απομάκρυνσης αυξάνεται κατά 2 έως 13%. Επιπλέον, το μεγαλύτερο ποσοστό των οργανικών ουσιών απομακρύνεται στα πρώτα 10 με 20 cm του συστήματος καθώς στο ανώτερο στρώμα κυριαρχούν οι αερόβιες συνθήκες και ο αριθμός των μικροβίων είναι αρκετά μεγάλος. Η απομάκρυνση του αζώτου γίνεται μέσω της νιτροποίησης και της απονιτροποίησης. Η νιτροποίηση ίσως αποτελεί την πιο σημαντική διεργασία απομάκρυνσης στα συγκεκριμένα συστήματα κατά την οποία, κάτω από αερόβιες συνθήκες, το αμμωνιακό άζωτο μετατρέπεται σε νιτρώδη και στη συνέχεια σε νιτρικά. Στη συνέχεια λαμβάνει χώρα η απονιτροποίηση κατά την οποία υπό συνθήκες απουσίας οξυγόνου και ύπαρξης επαρκούς ποσότητας άνθρακα, τα νιτρικά μετατρέπονται σε στοιχειακό άζωτο. Η αύξηση της θερμοκρασίας δεν επηρεάζει την απομάκρυνση του αζώτου σε σημαντικό βαθμό καθώς αυξάνει την απόδοση της κατά μόνο 3 έως 10% (Zahui et al., 2021).

Ακολούθως, ο φώσφορος απομακρύνεται μέσω της προσρόφησης του στο υπόστρωμα. Για αυτόν τον λόγο τα υποστρώματα διαδραματίζουν αρκετά σημαντικό ρόλο. Ωστόσο, για να βελτιωθεί η συγκριτικά χαμηλή απομάκρυνση σε φώσφορο, χρησιμοποιούνται υποστρώματα με μεγάλη ικανότητα προσρόφησης και με μεγάλο περιεχόμενο σε ασβέστιο, σίδηρο και αργίλιο. Πέρα από το υπόστρωμα, μια ακόμη σημαντική παράμετρος που επηρεάζει την απομάκρυνση του φωσφόρου είναι ο χρόνος παραμονής των λυμάτων. Είναι κατανοητό, ότι αυξάνοντας τον χρόνο παραμονής, αυξάνεται και ο χρόνος επαφής των λύματων και κατ'επέκταση του φωσφόρου με το υπόστρωμα.

Επιπλέον, τα φυτά έχουν την δυνατότητα να αφομοιώσουν ένα μέρος των θρεπτικών με σκοπό να αναπτυχθούν. Η διεργασία αυτή, όμως, στα συστήματα κατακόρυφης ροής αντιπροσωπεύει ένα πολύ μικρό μέρος των θρεπτικών της εισροής και λαμβάνεται ως δευτερεύον μηχανισμός απομάκρυνσης ρύπων. Αξίζει να σημειωθεί ότι η αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει την απόδοση απομάκρυνσης του φωσφόρου κατά 15% καθώς η διεργασία της απορρόφησης αποτελεί μια ενδόθερμη αντίδραση. Τα στερεά και οι παθογόνοι μικροοργανισμοί απομακρύνονται με φυσική διήθηση και καθίζηση. Πιο συγκεκριμένα, τα στερεά παγιδεύονται στους πόρους του υποστρώματος και στην επιφάνεια των κόκκων του πορώδους, ταυχτόχρονα όμως αποτελούν και τη βασική παράμετρο έμφραξης του υποστρώματος. Αυτό αποφεύγεται εάν τηρηθούν οι περίοδοι ανάπαυσης μεταξύ των εισροών, οι οποίες παράλληλα επιτρέπουν τον αερισμό της κλίνης και την οξείδωση των συσσωρευμένων οργανικών στερεών.

Όσον αφορά τους παθογόνους μικροοργανισμούς, είτε συσσωρεύονται στους κόκκους του πληρωτικού υλικού και καθιζάνουν, είτε προσκολλούνται στις επιφάνειες των ριζωμάτων και στο βιοφίλμ που έχει δημιουργηθεί, είτε πεθαίνουν με φυσικό τρόπο. Η απομάκρυνση μετάλλων επιτυγχάνεται κυρίως με κατακρήμνιση και προσρόφηση. Τα διαλυμένα μέταλλα συνδέονται με οργανικές ουσίες που βρίσκονται στις ρίζες των φυτών ή φιλτράρονται στους κόκκους του πληρωτικού υλικού. Συμπληρωματικά, η αρνητικά φορτισμένη επιφάνεια του υλικού προσρόφησης προσελκύει το θετικό φορτίο των βαρέων μετάλλων με αποτέλεσμα την σύνδεση τους με αιωρούμενα σωματίδια και την επ'ακόλουθη καθίζηση τους στο υπόστρωμα.

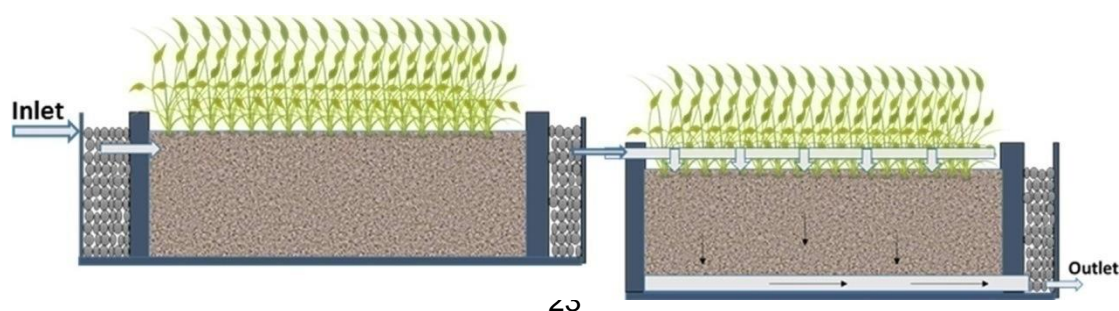
Επιπλέον, Το χρησιμοποιούμενο φίλτρο χρήζει ιδιαίτερης σημασίας, καθώς όσο πιο λεπτό υλικό είναι, τόσο ο χρόνος κατακράτησης των λυμάτων αυξάνεται προκαλώντας καλύτερη απόδοση απομάκρυνσης των ρύπων. Βέβαια, το υδραυλικό φορτίο δεν μπορεί να είναι πολύ μεγάλο διότι το νερό αργεί να διεισδύσει και μπορεί να φράξει το σύστημα (Ακρατος, 2006; Stefanakis et al., 2014; Σοφianos, 2016).

Αξίζει να σημειωθεί ότι τον χειμώνα, οι διαδικασίες αποδόμησης γίνονται με πιο αργό ρυθμό, περιορίζοντας την ποσότητα οργανικής ύλης που μπορεί να αντέξει το σύστημα χωρίς να φράξει. Οι ΤΥ κατακόρυφης ροής χρειάζονται λιγότερο χώρο από τους οριζόντιους αλλά απαιτούν συστηματικότερη συντήρηση και περισσότερη προσοχή λόγω της χρήσης αντλιών, χρονομέτρων και διάφορων ηλεκτρικών και μηχανικών συσκευών. Τέλος, τα συγκεκριμένα συστήματα εκτός από την δευτεροβάθμια και τριτοβάθμια επεξεργασία αστικών λυμάτων, χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία λυμάτων ελαιοτριβείου, γαλακτοκομικής φάρμας και φαρμας ζώων (Vyzamal, 2008; Stefanakis et al., 2011; Stefanakis et. al, 2014).

1.3.4 Υβριδικό Σύστημα Τεχνητού Υγροβιότοπου (HybridConstructedWetlands)

Διάφοροι τύποι ΤΥ μπορούν να συνδυαστούν με σκοπό την επίτευξη υψηλότερης απομάκρυνσης ρύπων. Η ιδέα βασίζεται στην εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων του κάθε τύπου. Οι πιο συνήθεις υβριδικοί ΤΥ αποτελούνται από συστήματα οριζόντιας και κατακόρυφης ροής τοποθετημένα σε διαφορετικά στάδια σε σειρά με τέτοιο τρόπο ώστε να αλληλοσυμπληρώνονται οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο κάθε σύστημα. Στο πρώτο στάδιο του υβριδικού συστήματος τοποθετούνται συνήθως παράλληλες κλίνες κατακόρυφης ροής και στη συνέχεια δύο ή τρεις κλίνες οριζόντιας ροής. Βέβαια, υπάρχουν και άλλοι συνδυασμοί υβριδικών συστημάτων (Gholipour and Stefanakis, 2021; Šereš et al., 2021). Οι υβριδικοί ΤΥ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επεξεργασία βιομηχανικών λυμάτων με υψηλό οργανικό φορτίο και στραγγισμάτων από ΧΥΤΑ. Στα μέσα του 1990, παρουσιάστηκε ένας άλλος τύπος υβριδικού συστήματος.

Αρχικά, μια μεγάλη κλίνη οριζόντιας ροής τοποθετείται πρώτη με σκοπό την απομάκρυνση οργανικών και αιωρούμενων στερεών καθώς και την δυνατότητα της για απονιτροποίηση. Ακολουθεί μια μικρότερη κλίνη κατακόρυφης ροής για την περαιτέρω απομάκρυνση οργανικών και αιωρούμενων και για την νιτροποίηση αμμωνίας σε νιτρικό άλας. Σε περίπτωση όμως, που θέλουμε να απομακρύνουμε το νιτρικό άλας, θα πρέπει να ανακυκλοφορήσουμε τα λύματα πίσω στο πρώτο μέρος του συστήματος, στη λιγότερο αερόβια οριζόντια κλίνη, όπου πραγματοποιείται η απονιτροποίηση με την ακατέργαστη τροφή ως πηγή άνθρακα (Vymazal, 2008; Rizzo et al., 2020).

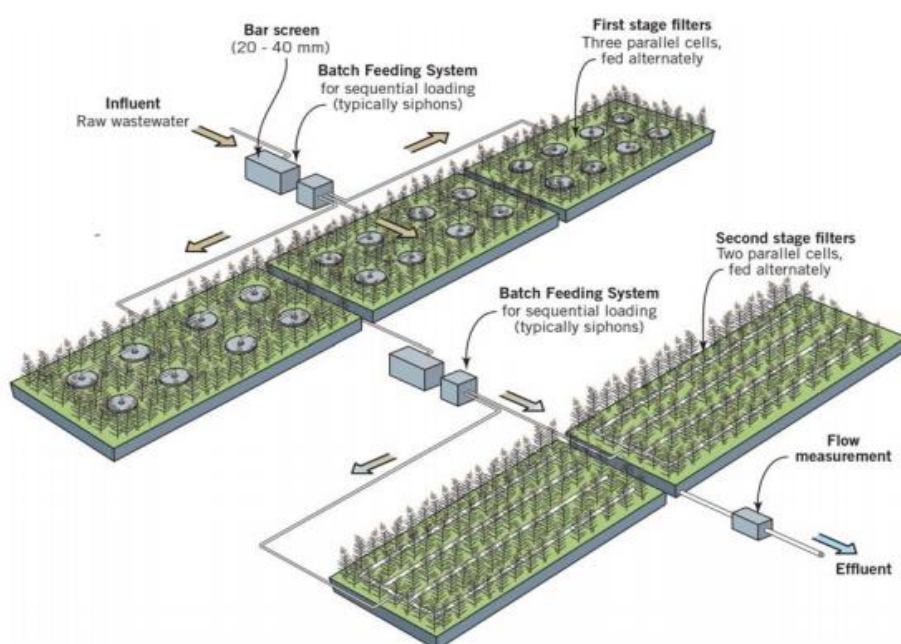


Εικόνα 4: Υβριδικό Σύστημα Τεχνητού Υγροβιότοπου (Parde et al., 2020)

Γενικότερα, στις κλίνες κατακόρυφης ροής επικρατούν αερόβιες συνθήκες και αποδίδουν καλά στη νιτροποίηση και στην απομάκρυνση BOD. Από την άλλη οι κλίνες οριζόντιας ροής αποδίδουν στην απονιτροποίηση και την απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών. Κανένα από τα δυο συστήματα δεν είναι πολύ αποτελεσματικό στην απομάκρυνση φωσφόρου, για αυτό και χρησιμοποιείται ένα υλικό στο οποίο θα συνδεθεί χημικά ο φώσφορος. Πρόσφατα, υβριδικοί ΤΥ απαρτίζονται από περισσότερους τύπους υγροβιότοπων και αρκετά συχνά εμπεριέχονται και συστήματα ελεύθερης επιφάνειας. Η λειτουργία των υβριδικών συστημάτων είναι πολυπλοκότερη και για αυτό είναι ακριβότερα από τα υπόλοιπα συστήματα (Vymazal et al., 1998; Stefanakis et al., 2014).

1.3.5 Γαλλικό Σύστημα Κατακόρυφης Ροής (French Vertical Flow Constructed Wetlands)

Ο συγκεκριμένος τύπος ΤΥ κατασκευάζεται από δύο στάδια κατακόρυφης ροής, με τρεις και δύο κλίνες αντίστοιχα. Στο πρώτο στάδιο υπάρχει μερική απομάκρυνση οργανικής ύλης ενώ στο δεύτερο γίνεται η τελική αφαίρεση της οργανικής ύλης. Έχει παρόμοιες ιδιότητες απομάκρυνσης ρύπων όπως το σύστημα κατακόρυφης ροής αλλά είναι οικονομικότερο όσον αφορά την κατασκευή του καθώς δεν απαιτεί μεγάλο χώρο. Ένα μεγάλο πλεονέκτημα του Γαλλικού συστήματος είναι ότι μπορεί να δεχτεί ακατέργαστα λύματα στο πρώτο στάδιο και εξοικονομεί την απαιτούμενη προσπάθεια και κόστος για τη διαχείριση της πρωτοβάθμιας λάσπης (Yadav et. al, 2018; Al-Wahaibi et al., 2021).



Εικόνα 5: Γαλλικό Σύστημα Κατακόρυφης Ροής (Daltro et al., 2017)

Επιπρόσθετα, καθώς το λύμα δεν περνάει από στάδιο πρωτοβάθμιας καθίζησης, τα στερεά που περιέχονται στα επεξεργασμένα λύματα διατηρούνται στην επιφάνεια του συστήματος του πρώτου σταδίου και σχηματίζουν ένα οργανικό στρώμα το οποίο βοηθάει στην επεξεργασία. Το στρώμα αυτό βελτιώνει την κατανομή του νερού και ενισχύει την απομάκρυνση της αμμωνίας και του ολικού αζώτου. Από την άλλη μεριά, αν το στρώμα δεν είναι σώστα κατανομημένο, λειτουργεί ως ένα στρώμα χαμηλής διαπερατότητας και μπορεί να φράξει την επιφάνεια. Για αυτό το λόγο κρίνεται μείζονος σημασίας η σωστή διαχείριση του στρώματος. Επιπλέον, τα φυτά διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο καθώς διατηρούν την ικανότητα διήθησης του φίλτρου και κατ' επέκταση τον αερισμό του.

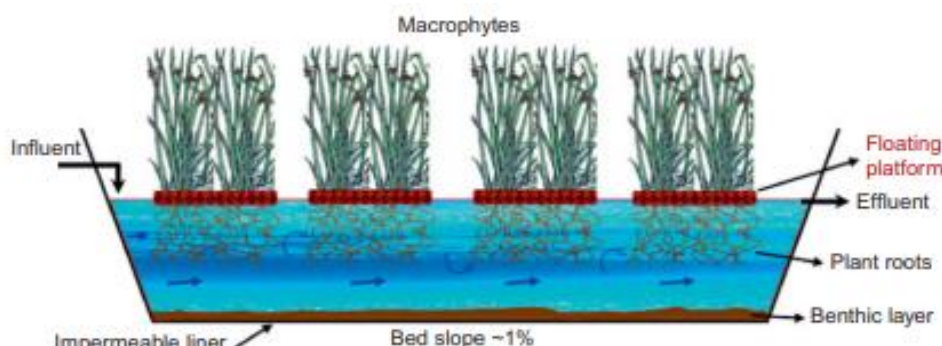
Ένα μέρος του στρώματος περιλαμβάνει τη λάσπη που υπάρχει στην άνω επιφάνεια και σχηματίζεται από βιοαποικοδομήσιμα υλικά που προέρχονται από την υδρόλυση και ανοργανοποιούνται με την πάροδο του χρόνου από χουμικές και φουλβικές ουσίες. Η βιοαποικοδόμηση συμβαίνει λόγω των βιοχημικών διεργασιών μεταξύ φυτών και μικροοργανισμών. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα υδραυλικά και οργανικά φορτία πρέπει να ελέγχονται με προσοχή ώστε να ανοργανοποιείται το στρώμα και να αποφεύγεται η περίσσεια επιφανειακών υδατών και ως εκ τούτου η δυσκολία μεταφοράς οξυγόνου. Μετα το κατακόρυφο πέρας της επιφάνειας λαμβάνει χώρα η αερόβια αποικοδόμηση των διαλυτών ρύπων, αμμωνίας και BOD₅, μέσα στα ακόρεστα ποδώδη μέσα. Τέλος, το κλίμα διαδραματίζει σημαντικό ρόλο καθώς οι υψηλές θερμοκρασίες ευνοούν την αποδόμηση της οργανικής ύλης ενώ οι χαμηλές δυσκολεύουν την βιολογική αποδόμηση (Stefanakis et al., 2014; Trein et. al, 2020).).

1.3.6 Floating Treatment Wetlands (FTW)

Οι συγκεκριμένοι τύποι ΤΥ αποτελούν μια νέα εξέλιξη στον τομέα των τεχνητών συστημάτων. Οι FTW είναι μια τεχνολογία κατά την οποία τα φυτά αναπτύσσονται πάνω σε μια σχεδία που επιπλέει στο νερό, επεκτείνοντας τις ρίζες τους μέσα στην υδάτινη στήλη. Η απομάκρυνση των ρύπων λαμβάνει χώρα μετά από φυσικοχημικές και βιολογικές διεργασίες. Η επιφάνεια η οποία επιτρέπει την ανάπτυξη των φυτών είναι συνήθως από πλαστικό καθιστώντας την ανθεκτική στις διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες. Αξίζει να σημειωθεί, ότι οι πιθανές διαφορετικές στάθμες του νερού δεν επηρεάζουν το σύστημα καθώς η σχεδία προσαρμόζεται στις αλλαγές της στάθμης και συνεχίζει να επιπλέει. Όπως και στα προηγούμενα συστήματα, τα φυτά και τα ριζώματά τους παίζουν καθοριστικό ρόλο στην απόδοση του συστήματος. Οι ρίζες δημιουργούν τις κατάλληλες συνθήκες για να δημιουργηθεί βιοφίλμ και λειτουργούν ως φυσικό φίλτρο. Το βιοφίλμ παρέχει μια βιολογικά μεγάλη επιφάνεια με αποτέλεσμα την δημιουργία κατάλληλου περιβάλλοντος για φυσικές και βιοχημικές διεργασίες. Τα φυτά με την σειρά τους προσλαμβάνουν θρεπτικά συστατικά, όπως το άζωτο και ο φώσφορος και βαρέα μέταλλα, δημιουργώντας

συνθήκες βιολογικής αποικοδόμησης των οργανικών. Πιο συγκεκριμένα, οι μικροοργανισμοί μετατρέπουν τα θρεπτικά συστατικά σε απλούστερες μορφές ώστε να προσληφθούν από τα φυτά. Όλες αυτές οι διεργασίες έχουν ως αποτέλεσμα την αποικοδόμηση οργανικών ρύπων, τη διήθηση αιωρούμενων στερεών και την πρόσληψη θρεπτικών και μετάλλων (Stefanakis et al., 2014; Dotro et al., 2017).

Τα σωματίδια παγιδεύονται στο δίκτυο των ριζών και η οργανική ύλη αποικοδομείται κάτω από αερόβιες συνθήκες. Επιπρόσθετα, στα συγκεκριμένα συστήματα, οι αερόβιες συνθήκες επικρατούν έναντι των αναερόβιων. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο υπάρχει μειωμένη απομάκρυνση του ολικού αζώτου. Πιο συγκεκριμένα, οι αερόβιες συνθήκες θα επιτρέψουν την αποτελεσματική νιτροποίηση μετατρέποντας το αμμωνιακό άζωτο σε νιτρικό. Οι ανεπαρκείς, όμως, αναερόβιες συνθήκες θα επιτρέψουν την απονιτροποίηση μόνο εάν υπάρχει επαρκής ποσότητα οργανικών με σκοπό την τελική μετατροπή σε αεριο άζωτο. Η απομάκρυνση του φωσφόρου επιτυγχάνεται μέσω της ρόφησης του σε βιοφίλμ ή μέσω της πρόσληψης του από τα φυτά. Τα μέταλλα παγιδεύονται στο βιοφίλμ, δεσμεύονται κυρίως από σωματίδια αργίλου καθώς και απορροφούνται από τα φυτά. Τα συστήματα FTW αποτελούν μια αρκετά ελκυστική λύση ιδιαίτερα για την επεξεργασία ρύπων από αστικά όμβρια ύδατα καθώς είναι οικονομικά και δεν απαιτούν επιπλέον έκταση γής για τον σχεδιασμό τους. Τέλος, έχουν εφαρμοστεί και σε άλλους τομείς όπως για την επεξεργασία οικιακών, γεωργικών και δημοτικών λυμάτων και για την επεξεργασία νερού από ποταμό, λίμνη και ευτροφικό νερό (Gaballah et al., 2021; Sharma et al., 2021).



Εικόνα 6. Floating Costructed Wetlands (Stefanakis et al., 2014).

1.4 Στράγγισμα από Χώρο Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων

Το στράγγισμα είναι ένα ρυπασμένο υγρό προϊόν το οποίο προκύπτει κυρίως από την αποσύνθεση αστικών στερεών αποβλήτων τα οποία έχουν υποστεί μια σειρά από διεργασίες στον χώρο του Χ.Υ.Τ.Α. Το στράγγισμα από τους ΧΥΤΑ χαρακτηρίζεται από υψηλή συγκέντρωση οργανικών και ανόργανων ρύπων, είναι ιδιαίτερα τοξικό προς το περιβάλλον και επικίνδυνο για την υγεία των υδάτων, κυρίως των υδροφορέων και των επιφανειακών νερών. Αποτελεί το διηθημένο και

αποστραγγισμένο νερό των αποβλήτων και ένα υγρό που περιέχει αιωρούμενα στερεά, διαλυμένα συστατικά των αποβλήτων και προϊόντα αποικοδόμησης τους από μικροοργανισμούς. Επίσης, είναι αποτέλεσμα βιοχημικών διεργασιών στα κύτταρα των αποβλήτων και της έμφυτης περιεκτικότητας τους σε νερό. Ειδικότερα, η σύστασή τους εξαρτάται στο μεγαλύτερο βαθμό από τη σύσταση των στερεών αποβλήτων, από το στάδιο της βιοαποικοδόμησης στο οποίο φτάνουν τα απόβλητα, και τέλος από το αν λαμβάνει χώρα και η επεξεργασία βιομηχανικών αποβλήτων. Περαιτέρω, το ποσοστό των στραγγισμάτων που παράγεται εξαρτάται από παράγοντες όπως το ποσοστό της βροχόπτωσης το οποίο διηθείται στα απόβλητα, την απορροφητική τους ικανότητα, το βάρος τους, τα υπόγεια ύδατα που εισέρχονται στα απόβλητα, την υγρασία που περιέχουν και το βαθμό συμπίεσης των αποβλήτων. Επιπλέον, η ηλικία ενός ΧΥΤΑ είναι ένας σημαντικός παράγοντας στην παραγωγή στραγγισμάτων καθώς όσο ωριμάζει ένας ΧΥΤΑ και δέχεται ολο και μεγαλύτερες εκτάσεις απορριμάτων τόσο αυξάνεται και η ποσότητα των αποβλήτων που έρχονται σε επαφή με τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα στραγγίσματα έχουν αρκετά έντονη οσμή λόγω των οργανικών οξέων. Το κλίμα διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην παραγωγή στραγγίσματος καθώς επηρεάζει τις απώλειες λόγω εξάτμισης (Χαβάς, 2005; Renou et al., 2007; Lavrova et al., 2009; Stefanakis et al., 2014; Headley et al., 2019).

Επιπλέον, η συγκέντρωση των συστατικών των στραγγισμάτων μειώνεται όσο η ηλικία του ΧΥΤΑ αυξάνεται. Πιο συγκεκριμένα, σε νέους ΧΥΤΑ το στράγγισμα χαρακτηρίζεται από χαμηλά επίπεδα pH (<6,5), υψηλές συγκεντρώσεις πτητικών οξέων και μεγάλες ποσότητες εύκολα βιοαποικοδομήσιμης οργανικής ύλης. Οι συνθετες οργανικές ενώσεις ζυμώνονται αναερόβια και παράγουν ελεύθερα πτητικά λιπαρά οξέα, αμινοξέα και αέρια όπως το υδρογόνο και το διοξείδιο του άνθρακα. Η υψηλή συγκέντρωση των πτητικών λιπαρών οξέων είναι μείζονος σημασίας καθώς οδηγεί το pH σε χαμηλές τιμές. Ακολούθως, οι χαμηλές τιμές του pH, οδηγούν στη μεγαλύτερη διαλυτότητα των μετάλλων. Σε ώριμους ΧΥΤΑ, το pH και η παραγωγή μεθανίου βρίσκεται σε υψηλά επίπεδα και οι χουμικές και φουλβικές ουσίες κυριαρχούν στην σύσταση της οργανικής ύλης. Τα πτητικά λιπαρά οξέα βρίσκονται σε χαμηλά επίπεδα καθώς μετατρέπονται σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα. Οι χαμηλές συγκεντρώσεις των πτητικών λιπαρών οξέων οδηγούν σε αύξηση του pH, η οποία οδηγεί στη χαμηλή συγκέντρωση των μεταλλικών ιόντων λόγω της μειωμένης διαλυτότητας τους. Επίσης, οι χουμικές ουσίες είναι υπεύθυνες για το σκούρο χρώμα του στραγγίσματος. Τέλος, η ισχύς των στραγγισμάτων μειώνεται με την πάροδο του χρόνου λόγω της βιολογικής διάσπασης των οργανικών ενώσεων και της ιζηματοποίησης των βαρέων μετάλλων (Renou et al., 2007; Naveen et al., 2014; Bakhshoodeh et al., 2020; Mojiry et al., 2021).

Στην παρούσα μελέτη, το σύστημα διαχείρισης των στραγγισμάτων είναι ένας ΤΥ οριζόντιας υπόγειας ροής με χαλίκι ως πληρωτικό υλικό. Οι ΤΥ αποτελούν μια αξιόπιστη λύση για την επεξεργασία στραγγισμάτων από ΧΥΤΑ εξαιτίας της υψηλής απόδοσής τους και του χαμηλού κόστους λειτουργίας και συντήρησης. Η επεξεργασία των στραγγισμάτων είναι απαραίτητη προκειμένου να καθαριστούν σε τέτοιο βαθμό ώστε να διατεθούν σε υδάτινους ή εδαφικούς αποδέκτες. Ο βαθμός καθαρισμού εξαρτάται από ορισμένα όρια τα οποία έχουν τεθεί για το pH, την συγκέντρωση οργανικών συστατικών, την αμμωνία και το ολικό άζωτο, τα

αιωρούμενα στερεά και την περιεκτικότητα σε μέταλλα. Αξίζει να σημειωθεί, ότι οι οργανικές ενώσεις, η αμμωνία και τα βαρέα μέταλλα έχουν τοξική επίδραση στους υδρόβιους οργανισμούς (Lavrova et al., 2009; Μαγγου, 2013; Headley et al, 2019).

Το στραγγίσμα από τους ΧΥΤΑ περιέχει μεγάλες ποσότητες βιοαποικοδομήσιμου και δύσκολα βιοαποικοδομήσιμου οργανικού υλικού, χουμικά συστατικά, αμμωνία, άζωτο, φώσφορο, βαρέα μέταλλα και χλωριωμένα οργανικά ή ανόργανα άλατα. Ο λόγος BOD₅/COD υποδεικνύει το ποσοστό της βιοαποικοδομής οργανικής ύλης και για νέους ΧΥΤΑ είναι υψηλό περιπτώ στο 0,8 ενώ για ώριμους πέφτει στο 0,1 έως 0,3, καθώς τα εύκολα βιοαποικοδομήσιμα οργανικά έχουν καταναλωθεί. Οι οργανικές ουσίες αποτελούν το βασικό κριτήριο αξιολόγησης της ποιότητας του στραγγίσματος. Έτσι, προτεραιότητα και μεγαλύτερη προσοχή δίνεται στις συγκεντρώσεις του COD, BOD₅ και TOC. Το στραγγίσμα που παράγεται στην όξινη φάση έχει υψηλές συγκεντρώσεις COD, BOD₅ και TOC και χαμηλό pH. Αντιθέτως, το στραγγίσμα που παράγεται κατά την φάση της μεθανογένεσης έχει χαμηλές συγκεντρώσεις του COD, BOD₅ και TOC και υψηλό pH.

Τα στραγγίσματα συγκεντρώνονται στη βάση του ΧΥΤΑ. Εάν δεν είναι μονωμένος ο πυθμένας, όμως, κινούνται προς τα κάτω και μπορούν να ρυπάνουν τα υπόγεια ύδατα. Αν το επιτρέπει η μορφολογία του εδάφους, τα διασταλλάγματα μπορεί να ακολουθήσουν και πλευρική κίνηση. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι ΧΥΤΑ συνεχίζουν να παράγουν στραγγίσματα για πολλά χρόνια μετά την αναστολή της λειτουργίας τους. Ένας ακόμη λόγος λοιπόν επιλογής ενός ΤΥ ως σύστημα επεξεργασίας των στραγγισμάτων είναι η αυτονομία και η αξιοπιστία που προσδίδουν με την πάροδο του χρόνου. Σε κάθε ΧΥΤΑ στις μέρες μας είναι εγκατεστημένα συστήματα συλλογής και επεξεργασίας στραγγισμάτων αποφεύγοντας το φιλτράρισμά τους στο υπέδαφος. Όπως προαναφέρθηκε, η ηλικία του Χ.Υ.Τ.Α. αποτελεί σημαντικό παράγοντα στα πιθανά διαφορετικά χαρακτηριστικά των στραγγισμάτων. Έτσι, λοιπόν, παρακάτω παρουσιάζεται ένας πίνακας με τις τυπικές τιμές των χαρακτηριστικών των στραγγισμάτων για νέους και ώριμους Χ.Υ.Τ.Α. (Renou et al., 2007; Bakhshoodeh et al., 2020).

Πίνακας 1. Τυπικές τιμές διασταλλάγματος από νέους και ώριμους Χ.Υ.Τ.Α. (Χαβάς, 2005)

Συστατικά	Νέοι ΧΥΤΑ (< 2ετών)			Ωριμοί ΧΥΤΑ (>10ετών)
	Μονάδα	Διακύμανση	Τυπική Τιμή	Διακύμανση
BOD₅	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
Αλκαλικότητα σαν CaCO_3	mg/L	1000 - 10000	3000	200 - 1000
pH	-	4,5 – 7,5	6	6,6 – 7,5
Ολική σκληρότητα σαν CaCO_3	mg/L	300 - 10000	3500	200 – 500
Cu	mg/L	200 - 3000	1000	100 – 400
Mg	mg/L	50 - 1500	250	50 – 200
K	mg/L	200 - 1000	300	50 – 400
Na	mg/L	200 - 2500	500	100 – 200
Cl	mg/L	200-3000	500	100-400
Θειικά άλατα	mg/L	50-1000	300	20-50
Ολικός Σίδηρος	mg/L	50-1200	60	20-200

Οι πιο συνήθεις ΤΥ που χρησιμοποιείται για την επεξεργασία διασταλλάγματος από ΧΥΤΑ είναι ο ΤΥ κατακόρυφης ροής. Πετυχαίνει πολύ καλή απομάκρυνση οργανικής ύλης η οποία μπορεί να φτάσει έως και 90% και εξίσου καλή απομάκρυνση στερεών. Ο τομέας απόδοσης στον οποίο υστερεί είναι εκείνος της απομάκρυνσης του αζώτου, ρύπος ο οποίος χαρακτηρίζει σε μεγάλο βαθμό την σύσταση των στραγγισμάτων. Γι' αυτόν το λόγο, λοιπόν, αρκετές φορές χρησιμοποιούνται υβριδικά συστήματα τα οποία περιλαμβάνουν συστήματα οριζόντιας ροής, εκμεταλλεύοντας τις δυνατότητες τους στην απομάκρυνση αζώτου και βαρέων μετάλλων (Stefanakis et al., 2014).

1.5 Υλικά πλήρωσης υδροβιότοπου - Υπόστρωμα

Το υλικό πλήρωσης αποτελεί μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους όσον αφορά τον σχεδιασμό ενός τεχνητού υδροβιότοπου καθώς επιτρέπει στα φυτά να αναπτυχθούν και να αναπτύξουν τις ρίζες τους, κρατά σταθερό το σύστημα, καθορίζει την υδραυλική αγωγιμότητα που θα έχει το σύστημα, επιτρέπει την δημιουργία βιοφίλμ και βοηθάει στην απομάκρυνση ορισμένων ρύπων μέσω διαφόρων διεργασιών (Stefanakis et al., 2014).

Από την άλλη, το πληρωτικό υλικό είναι η βασική αιτία πιθανής έμφραξης του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, τα λεπτόκοκκα υλικά είναι πιο πιθανό να φράξουν το σύστημα εξαιτίας της χαμηλής υδραυλικής τους αγωγιμότητας, αλλά βελτιώνουν τη διεργασία της προσρόφησης καθώς διαθέτουν μεγάλη διαθέσιμη επιφάνεια. Από την άλλη, όσο πιο χονδρόκοκκο είναι το υλικό πλήρωσης, τόσο μεγαλύτερες είναι και οι συγκεντρώσεις των ρύπων. Αυτό συμβαίνει γιατί, το χονδρόκοκκο χαλίκι ως υλικό πλήρωσης επιφέρει αύξηση στις ταχύτητες ροής και ως εκ τούτου μειωμένη αποτελεσματικότητα στην αφαίρεση των ρυπογόνων ουσιών.

Τα πληρωτικά υλικά που χρησιμοποιούνται στα συστήματα ΤΥ απαντώνται σε φυσικά υλικά (π.χ. πετρώματα), συνθετικά υλικά (π.χ. ζεόλιθος) και βιομηχανικά υποπροϊόντα. Το πιο σύνηθες πλέον χρησιμοποιούμενο υλικό στον σχεδιασμό ΤΥ αλλά και αυτό που επιλέχθηκε για την συγκεκριμένη μελέτη είναι το χαλίκι. Σύμφωνα με μελέτες, το χαλίκι χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες, το λεπτό χαλίκι (6-16mm), το μεσαίο χαλίκι (24-32 mm) και χοντρό χαλίκι (60-130mm). Στο κυρίως σώμα της μονάδας έχει μέγεθος 5 έως 10mm. Η χρήση χονδρόκοκκου χαλικιού σε αυτές τις ζώνες αποσκοπεί στην αποτροπή έμφραξης και στην καλύτερη κατανομή του λύματος (Stefanakis et al., 2014; Marzo et al., 2019; Stefanakis, 2019)..

1.5.1 Χαλίκι

Ανήκει στην κατηγορία των αδρανών υλικών τα οποία είναι όλα τα κοκκώδη ανόργανα υλικά που προέρχονται από φυσική κατάτμηση ή τεχνητή θραύση των φυσικών πετρωμάτων και των βιομηχανικών αποβλήτων. Επιπλέον, τα αδρανή υλικά δεν αντιδρούν χημικά μεταξύ τους και διατηρούν τις φυσικές τους ιδιότητες λόγω της γεωμετρίας των κόκκων τους και του βάρους τους. Πιο συγκεκριμένα, το χαλίκι είναι είτε φυσικής είτε τεχνητής προέλευσης. Όσον αφορά τα χαλίκια φυσικής προέλευσης, λαμβάνονται από τις φυσικές αποθέσεις των τεμαχισμένων πετρωμάτων και έχοντας υποστεί μόνο την επεξεργασία θραύσης, πλυσίματος και διαλογής. Μπορούν να συλλεχθούν από τις όχθες ποταμών, λιμνών και θαλασσών και από ορυχεία. Το χαλίκι που χρησιμοποιείται στη συγκεκριμένη μελέτη είναι ασβεστολιθικό υλικό και προέρχεται σε λατομείο με την σύνθλιψη ασβεστολιθικών πετρωμάτων. Σύμφωνα με έρευνες, το χαλίκι δεν περιέχει επικίνδυνα στοιχεία όπως βαρέα μέταλλα,

πολυαρωματικού άνθρακες ή άλλες επιβλαβείς ουσίες (Αντωνόπουλος, 2011; Αναγνωστοπούλου, 2012; Κοτρόζος, 2015).

Το χρησιμοποιούμενο πληρωτικό υλικό έχει σημαντική επίδραση στην απομάκρυνση ρύπων. Οσον αφορά την επίδραση του χαλικιού στην απομάκρυνση φωσφόρου είναι περιορισμένη καθώς δεν περιέχονται επαρκείς ποσότητες σιδήρου, αργιλίου ή ασβεστίου με αποτέλεσμα τη δυσκολία καθίζησης ή προσρόφησης του φωσφόρου. Από την άλλη, η επιφάνεια του χαλικιού καθίστα ικανή την ανάπτυξη βιοφιλμ, ενισχύοντας έτσι την απομάκρυνση της οργανικής ύλης και θρεπτικών συστατικών, κυρίως του αμμωνιακού αζώτου (Vymazal, 2008; Stefanakis et al., 2014; Lin et al., 2015).

1.5.2 Βιοεξανθράκωμα

Το βιοεξανθράκωμα είναι ένα οργανικό υλικό πλούσιο σε άνθρακα και παράγεται μέσω της πυρόλυσης της βιομάζας με απουσία οξυγόνου. Ο βασικός λόγος επιλογής του βιοεξανθρακώματος είναι ότι αποτελεί ένα μέσο δέσμευσης του άνθρακα αλλά και βελτιώνει τις λειτουργίες του εδάφους. Η δομική και χημική σύνθεση του εξαρτάται από την πρώτη ύλη που χρησιμοποιήθηκε και την θερμοκρασία που επιτεύχθηκε κατά την πυρόλυση. Κατά τη διαδικασία της πυρόλυσης, ένα σημαντικό μέρος της βιομάζας μετατρέπεται σε πτητικές ενώσεις, δημιουργώντας διάκενα και ρωγμές με αποτέλεσμα την αύξηση του πορώδους. Εν συνεχεία, το πορώδες επηρεάζει άμεσα εδαφικές παραμέτρους όπως η κατακράτηση θρεπτικών συστατικών και νερού. Σύμφωνα με μελέτες, το πορώδες του βιοεξανθρακώματος χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες, το μικροπορώδες (<2nm), το μεσοπορώδες (2-50 nm) και το μακροπορώδες (>50 nm). Η βιομάζα που χρησιμοποιείται συνήθως για την παραγωγή του βιοεξανθρακώματος είναι το ξύλο. Στη συγκεκριμένη μελέτη, χρησιμοποιήσαμε ροκανίδια από ελιές οι οποίες βρίσκονται στον χώρο του Πολυτεχνείου (Verheijen et al., 2010; Πελλερα, 2011; Ρεγκούζας, 2015).

Μελέτες έχουν δείξει ότι το βιοεξανθράκωμα ενισχύει τη γονιμότητα και βελτιώνει την ποιότητα του εδάφους αυξάνοντας το pH, την ικανότητα συγκράτησης της υγρασίας και προσελκύει μικρόβια και μύκητες διατηρώντας με αυτόν τον τρόπο επαρκής θρεπτικά συστατικά στο έδαφος. Επίσης, έχει τη δυνατότητα να δεσμεύει άνθρακα από την ατμόσφαιρα και να τον μεταφέρει στο έδαφος. Λόγω της μεγάλης επιφάνειας και του μεγάλου πορώδους, το βιοεξανθράκωμα έχει μεγάλη ικανότητα απορρόφησης και προσρόφησης θρεπτικών συστατικών, όπως το άζωτο και ο φώσφορος. Επίσης έχει την ικανότητα να προστατεύει τις καλλιέργειες από διάφορες ασθένειες. Η πολύ καλή σταθερότητα που παρουσιάζει, το καθιστά κατάλληλο για αγρονομική χρήση (Ρεγκούζας, 2015; Kasak et al., 2018).

Πιο συγκεκριμένα, το βιοεξανθράκωμα που προέρχεται από ξύλο ή ξυλώδη φυτά έχει εξαιρετικά πορώδη δομή, χαμηλή περιεκτικότητα σε τέφρα και είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό στην προσρόφηση βαρέων μετάλλων στα υδάτινα συστήματα. Η χρήση του βιοεξανθρακώματος στο έδαφος πέρα από την ικανότητα του να δεσμεύει άνθρακα, συμβάλλει στην ακινητοποίηση οργανικών και ανόργανων ρύπων στο έδαφος. Έχει εκτιμηθεί ότι το βιοεξανθράκωμα που προκύπτει από την πυρόλυση

έχει δυο φορές μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε άνθρακα από την αρχική βιομάζα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η περιεκτικότητα σε άνθρακα του βιοεξανθρακώματος που χρησιμοποιήθηκε στο συγκεκριμένο πείραμα φτάνει το εντυπωσιακό 90%. Επίσης, σε υψηλές θερμοκρασίες απελευθερώνονται πτητικές ενώσεις με αποτέλεσμα να μειώνεται το στερεό κλάσμα και κατ'επέκταση η απόδοση της πυρόλυσης. Αντίθετα, η πυρόλυση σε χαμηλές θερμοκρασίες παράγει ένα βιοεξανθράκωμα με υψηλότερη αντοχή και αποδοτικότερο ως υπόστρωμα στους ΤΥ. Παρ'όλα αυτά σύμφωνα με τους Liu et al, (2014), η ελεγχόμενη αύξηση της θερμοκρασίας της πυρόλυσης μπορεί να βοηθήσει στην βελτίωση των φυσικοχημικών ιδιοτήτων του προϊόντος.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο χρόνος παραμονής του άνθρακα στο βιοεξανθράκωμα είναι χιλιάδες χρόνια, μειώνοντας έτσι τις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Ειδικότερα, η πορώδης δομή του λειτουργεί ως χώρος προστασίας του οργανικού υλικού και κατ' επέκταση ως ένα περιβάλλον ανάπτυξης μικροοργανισμών. Οι οργανικοί ρύποι δεσμεύονται στο βιοεξανθράκωμα μέσω της πλήρωσης τους στους πόρους του και μέσω υδροφοβικών και ηλεκτροστατικών αλληλεπιδράσεων. Σχετικά με τους ανόργανους ρύπους, όπως τα μέταλλα, προσροφώνται στην επιφάνεια του βιοεξανθρακώματος, μειώνοντας τη διαθεσιμότητα τους. Η διαδικασία αυτή της δέσμευσης των μετάλλων, αφορά την αντικατάσταση ιόντων που βρίσκονται ήδη στην επιφάνεια του βιοεξανθρακώματος με τα ιόντα των μετάλλων και στις ηλεκτροστατικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ της αρνητικά φορτισμένης επιφάνειας του βιοεξανθρακώματος και των κατιόντων των μετάλλων.

Επιπρόσθετα, ένα ακόμη κυρίαρχο όφελος του βιοεξανθρακώματος είναι ότι ο άνθρακας που παρέχει, βοηθά στη σύνθεση και την ανάπτυξη ενζύμων απονιτροποίησης, ενισχύοντας την ίδια τη διεργασία με σκοπό την αποδοτικότερη απομάκρυνση του ολικού αζώτου. Παράλληλα, το μεγάλο πορώδες του βιοεξανθρακώματος, παρέχει μεγάλη επιφάνεια και αναερόβιες συνθήκες για το μικροβιακό σχηματισμό βιοφίλμ το οποίο είναι επίσης υπεύθυνο για σημαντικές μειώσεις του αζώτου. Εν συνεχεία μελέτες έχουν δείξει ότι, το βιοεξανθράκωμα είναι ικανό να απορροφά και την αμμωνία. Αυτό συμβαίνει καθώς μέσα στο πόρους δημιουργούνται μικροί χώροι κα κατάλληλες συνθήκες για την ανάπτυξη μικροβιακών κοινοτήτων όπως οξειδωτικά βακτήρια αμμωνίας. Επιπλέον, μελέτες έχουν δείξει ότι το βιοεξανθράκωμα βοηθάει στην προώθηση της αμμωνίας ως θρεπτικό στα φυτά. Τέλος, το βιοεξανθράκωμα ενισχύει και την απομάκρυνση του φωσφόρου, καθώς η στρώση του συγκεκριμένου υλικού προσελκύει με ηλεκτροστατικό τρόπο τα ιόντα φωσφόρου και αυξάνει τον χρόνο επαφής του (Lavrova et al., 2009; Gupta, 2015; Ρεγκουζάς, 2017; Kasak, 2018)

Όπως είναι κατανοητό, η χρήση του βιοεξανθρακώματος σε ΤΥ μπορεί να προσφέρει μια οικονομικά αποδοτικότερη επεξεργασία λυμάτων με χαμηλό ενεργειακό αποτύπωμα.



Εικόνα 7: Biochar (Cooperman, 2015)

1.6 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάδειξη μιας εναλλακτικής μεθόδου επεξεργασίας στραγγίσματος από Χ.Υ.Τ.Α. Το περιβάλλον στις μέρες μας επιβαρύνεται από διάφορους τομείς. Ένας από αυτούς είναι η επεξεργασία και διάθεση του στραγγίσματος στους Χ.Υ.Τ.Α. μέσω των συμβατικών μεθόδων. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο η υιοθέτηση εναλλακτικών βιώσιμων πρακτικών είναι μείζονος σημασίας. Η επεξεργασία και διαχείριση των στραγγισμάτων με συστήματα ΤΥ υπόγειας οριζόντιας ροής αποτελεί μια λύση η οποία όχι μόνο είναι φιλική προς το περιβάλλον αλλά συμφέρει και οικονομικά.

Οι πιλοτικές μονάδες οι οποίες ήταν ο βασικός κορμός του πειράματος είχαν ως πληρωτικό υλικό το χαλίκι, ενώ στη μια από τις δύο μελετήθηκε η παρουσία μιας στρώσης βιοεξανθρακώματος στο σύστημα. Η προώθηση του καινοτόμου αυτού υλικού ως πληρωτικού υλικού στα συστήματα ΤΥ αποτελεί τον δευτερεύοντα στόχο του πειράματος. Για την εκτίμηση της απόδοσης κάθε πιλοτικής μονάδας και της επίδρασης των διαφορετικών χαρακτηριστικών τους, όπως η παρουσία του βιοεξανθρακώματος, μια σειρά από φυσικές, χημικές και βιολογικές παραμέτρους μετριούνταν στα στραγγισμάτα και στις εκροές των μονάδων.

Κεφάλαιο 2: Πειραματικό μέρος

2.1 Στράγγισμα - ΧΥΤΑ Χανίων

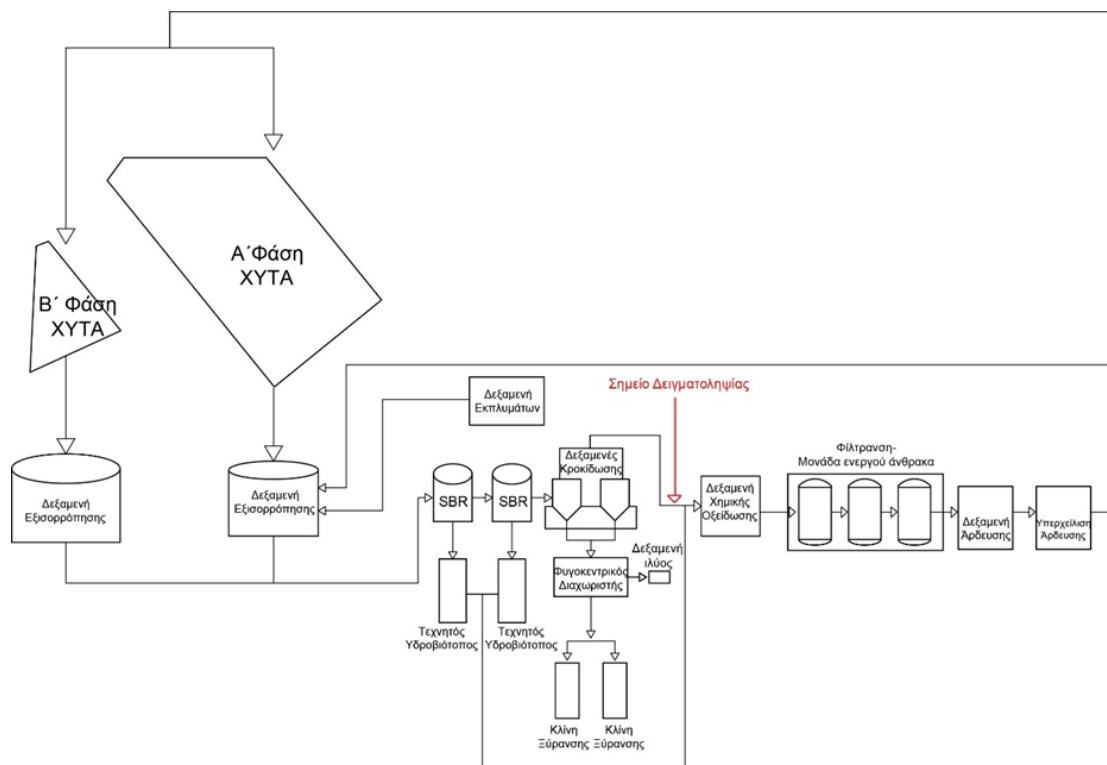
Στη παρούσα μελέτη, τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν στραγγίσματα από την Εγκατάσταση Επεξεργασίας Στραγγισμάτων στον χώρο του Χ.Υ.Τ.Υ. ο οποίος εδρεύει στη περιοχή του Μουζουρά του νομού Χανίων υπο τη βοήθεια της Διαδημοτικής Επιχείρησης Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων (ΔΕΔΙΣΑ). Η ΔΕΔΙΣΑ εξυπηρετεί όλη την Περιφερειακή Ενότητα των Χανίων. Όλα τα δείγματα συλλέχθηκαν στο στάδιο μετά τη διεργασία της κροκίδωσης. Τα στραγγίσματα προέρχονται από τις βροχοπτώσεις στην επιφάνεια του ΧΥΤΑ, από την υπόγεια και επιφανειακή ροή του νερού, από την υγρασία που περιέχεται στα απορρίματα και από την βιολογική αποικοδόμηση. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος του Τμήματος Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης και αφορούσαν διάφορες αναλυτικές μεθόδους για τον χαρακτηρισμό των δειγμάτων.

Ο Χ.Υ.Τ.Υ. βρίσκεται στη περιοχή Κορακιά του Δήμου Ακρωτηρίου Χανίων, νότια του Κουρουπητού, με συνολική έκταση 235,5 στρέμματα. Από τη συνολική αυτή έκταση, ο χώρος που διατίθεται για Υγειονομική Ταφή είναι 130 στρέμματα. Η μονάδα Επεξεργασίας Στραγγισμάτων του Χ.Υ.Τ.Υ. επεξεργάζεται ετησίως 12.500 m³ στραγγισμάτων.

Στάδια επεξεργασίας διαστασταλάγματος

Το διαστάλαγμα που χρησιμοποιείται ως δείγμα λαμβάνεται μετά το στάδιο της κροκίδωσης στη Μονάδα Επεξεργασίας Στραγγισμάτων του Χ.Υ.Τ.Υ. Χανίων. Η μονάδα αυτή είναι εξαιρετικά σημαντική σε μια εγκατάσταση Ολοκληρωμένης Διαχείρισης Απορριμάτων καθώς τα στραγγίσματα είναι ιδιαίτερα επικίνδυνα για το περιβάλλον αν δε γίνει σωστή διαχείριση. Η Εικόνα 8 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής της Εγκατάστασης Επεξεργασίας Στραγγισμάτων, η οποία θα περιγραφεί εν συντομία πιο κάτω.

Αρχικά, το προς επεξεργασία υγρό αποτελείται από το στράγγισμα που προέρχεται από το Χ.Υ.Τ.Υ. και απο λύματα προερχόμενα από τις καθημερινές χρήσεις των χώρων υγιεινής και του προσωπικού, λύματα από τις πλύσεις των δαπέδων και των μηχανημάτων, από το τμήμα υποδοχής των απορριμάτων και από την μονάδα κομποστοποίησης. Η Μονάδα Επεξεργασίας Στραγγισμάτων δέχεται καθημερινά 70 m³. Τα στραγγίσματα από τον Χ.Υ.Τ.Υ. μεταβαίνουν στα αντλιοστάσια ανύψωσης των στραγγισμάτων, ενώ τα υπόλοιπα λύματα μεταφέρονται στο αντλιοστάσιο εκπλυμάτων μέσω ενός δικτύου σωληνώσεων. Η διαδικασία έως ότου συλλεχθεί το δείγμα για το πείραμα ξεκινάει με την ανάμειξη των στραγγισμάτων και των λυμάτων στη δεξαμενή εξισορρόπησης. Τα στραγγίσματα οδηγούνται στη δεξαμενή μέσω αντλιών και τα λύματα μέσω υποβρύχιων αντλιών. Υπάρχουν δύο δεξαμενές εξισορρόπησης με χωρητικότητα 1.080 m³ και 1.155 m³. Στις δεξαμενές αυτές, πέρα από την ομογενοποίηση των λυμάτων και των ρευμάτων των στραγγισμάτων, λαμβάνει χώρα και η εξισορρόπηση της ροής.



Εικόνα 8. Διάγραμμα ροής Χ.Υ.Τ.Α. Χανίων.

Στη συνέχεια, το περιεχόμενο της δεξαμενής, αντλείται με σταθερή παροχή προς δύο δεξαμενές βιολογικής επεξεργασίας (sequencing batch reactor - SBR) με χωρητικότητα 570 m³ η καθεμία. Οι δεξαμενές αυτές είναι αντιδραστήρες διαδοχικών φορτίσεων διαλείποντος έργου, πλήρους αναμείξεως και λειτουργούν παράλληλα. Αξίζει να σημειωθεί, ότι οι δεξαμενές αυτές καλύπτουν όλα τα στάδια μιας συμβατικής βιολογικής επεξεργασίας: τον αερισμό, την ανάμειξη, την καθίζηση και την απομάκρυνση της ιλύος. Πιο συγκεκριμένα, οι συγκεκριμένες δεξαμενές περιέχουν μετρητές pH, μετρητές αιωρούμενων στερεών, μετρητές διαλυμένου οξυγόνου, μετρητές στάθμης και τρεις αεριστήρες για τον αερισμό των στραγγισμάτων.

Έπειτα, γίνεται άντληση των επεξεργασμένων στραγγισμάτων προς τις δεξαμενές κροκίδωσης, στις οποίες προστίθενται αντιδραστήρια με στόχο την αποσταθεροποίηση των κολλοειδών σωματιδίων και τη δημιουργία κροκίδων. Ακολουθεί καθίζηση με την οποία απομακρύνονται τα αιωρούμενα και τα κολλοειδή σωματίδια. Η κροκίδωση, στην εκροή της οποίας λήφθηκαν τα δείγματα για το παρόν πείραμα, αποσκοπεί στην απομάκρυνση του οργανικού φορτίου, των αιωρούμενων σωματιδίων, των βαρέων μετάλλων, της θολερότητας και του χρώματος. Μετα την κροκίδωση τα στραγγίσματα πηγαίνουν για χημική οξείδωση. Η συγκεκριμένη διάταξη αποσκοπεί, με τη βοήθεια οξειδωτικών και με τη ρύθμιση του pH, στην απομάκρυνση θειικών, θειώδων, βακτηρίων και άλλων παθογόνων μικροοργανισμών. Στη συνέχεια τα στραγγίσματα οδηγούνται στη μονάδα φίλτρων ενεργού άνθρακα μέσω αντλιών ξηρού τύπου. Στη μονάδα αυτή επιτυγχάνεται η απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών χάρη στο φίλτρο άμμου-ανθρακίτη το οποίο

διαθέτει αλλά και πραγματοποιείται τριτοβάθμια επεξεργασία με την βοήθεια των δύο φίλτρων ενεργού άνθρακα παράλληλης λειτουργίας.

Τελικά, τα επεξεργασμένα στραγγίσματα καταλήγουν στη δεξαμενή αποθήκευσης και μέσω αντλίων οδηγούνται προς το δίκτυο άρδευσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε περίπτωση που δεν υπάρχει δίκτυο άρδευσης, τα στραγγίσματα υπερχειλίζουν από τη δεξαμενή άρδευσης προς την δεξαμενή επανακυκλοφορίας και με τη βοήθεια αντλιών επανακυκλοφορούν στον Χ.Υ.Τ.Υ.

Όσον αφορά την ιλύ που προκύπτει από την κροκίδωση, αφυδατώνεται με φυγοκεντρικό διαχωριστήρα. Η ιλύς που δημιουργείται στις δεξαμενές SBR, οδηγείται στη δεξαμενή αποθήκευσης και πάχυνσης. Ύστερα η παχυμένη ιλύς τροφοδοτείται στον Χ.Υ.Τ.Υ.

2.2. Περιγραφή και λειτουργία των πιλοτικών συστημάτων

2.2.1. Περιγραφή και σχεδιασμός των πιλοτικών μονάδων

Οι δύο πιλοτικές μονάδες ΤΥ οριζόντιας υπόγειας ροής κατασκευάστηκαν στον εξωτερικό χώρο του Εργαστηρίου Τεχνολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος του Τμήματος Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης με σκοπό την επεξεργασία διασταλλάγματος από τον Χ.Υ.Τ.Α. Χανίων.

Οι πιλοτικές μονάδες που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα ήταν πλαστικές δεξαμενές σε σχήμα τραπέζιου με διαστάσεις 93x47x52 cm και συνολικό όγκο 220 L. Τα πληρωτικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για το σχεδιασμό των πιλοτικών μονάδων είναι το χαλίκι και το βιοεξανθράκωμα. Πιο συγκεκριμένα, και οι δύο πιλοτικές μονάδες περιέχουν ένα στρώμα από χαλίκι βάθους 50 cm ενώ στη μια από τις δύο προστέθηκε στο μέσον της, σε βάθος 25 cm, μια στρώση βιοεξανθρακώματος σε ποσότητα περίπου 10% της συνολικής χωρητικότητας της πιλοτικής μονάδας. Το σύστημα με το χαλίκι χαρακτηρίζεται ως G ενώ το σύστημα με το χαλίκι και το βιοεξανθράκωμα ως GB.

Αρχικά, για το σύστημα αποστράγγισης και εκροής της κάθε πιλοτικής μονάδας χρησιμοποιήθηκε ένας ελαστικός και ένας δύσκαμπτος σωλήνας τύπου PVC. Αρχικά, κόπηκε ένα μέρος του δύσκαμπτου και του ελαστικού σωλήνα και συνδέθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να σχηματιστεί μια διάταξη ανάποδου «Τ» η οποία τοποθετήθηκε στον πυθμένα της μονάδας. Τη βάση της διάταξης αποτελεί ο δύσκαμπτος σωλήνας ενώ το υπολοιπο κομμάτι μέχρι και την εκροή του συστήματος αναλαμβάνει ο εύκαμπτος σωλήνας. Αξίζει να σημειωθεί ότι δημιουργήθηκαν κατά μήκος του σκληρού σωλήνα μικρές και ισαπέχουσες τρύπες με σκοπό την διευκόλυνση της ροής του λύματος από τον πυθμένα προς την εκροή του συστήματος. Η ολοκληρωμένη, αυτή, διάταξη ανάποδου «Τ» που βρίσκεται στον πυθμένα καλύφθηκε με χοντρό χαλίκι έτσι ώστε να παραμείνει σταθερή στη θέση της και να αποφευχθεί οποιαδήποτε πιθανότητα έμφραξης, εξαιτίας των στερεών, κόντα στο σημείο εκροής. Ύστερα, αφού εξακριβώθηκε ότι η διάταξη των δυο σωληνώσεων ήταν σταθερή, ανοίχτηκε μια τρύπα στο σημείο εκροής, ακριβώς ίδιας διαμέτρου με

την διάμετρο του ελαστικού σωλήνα, με σκοπό να περάσει από αυτήν και να καταλήξει στο δοχείο συλλογής της εκροής.

Στη συνέχεια, οι μονάδες πληρώθηκαν με τα αντίστοιχα υλικά πλήρωσης και ακολούθησε η φύτευση των καλαμιών (*Phragmites Australis*) στην επιφάνεια της κάθε μονάδας. Πιο συγκεκριμένα, στην πιλοτική μονάδα G πληρώθηκε εξ' ολοκλήρου με καθαρό χαλίκι ενώ η GB αποτελούνταν από ένα στρώμα χαλικιού, μια στρώση βιοεξανθράκωμα περίπου 20 L και ένα ακόμα στρώμα χαλικιού από πάνω. Μετά την πλήρωση, οι μονάδες συμπληρώθηκαν με νερό του οποίου η στάθμη παρέμεινε 2-3 cm κατω από την επιφάνεια του χαλικιού. Ύστερα, πραγματοποιήθηκε η φύτευση των καλαμιών σε συγκεκριμένη απόσταση μεταξύ τους ώστε να καλύπτουν κατά μήκος όλη την επιφάνεια του συστήματος. Μετά την μεταφύτεψη των καλαμιών στις μονάδες, ακολουθεί μια περίοδος δύο μηνών (μέσα Σεπτέμβρη – μέσα Νοέμβρη) κατά την οποία δόθηκε χρόνος στα φυτά να προσαρμοστούν και να αναπτύξουν τις ρίζες τους, με συστηματικό πότισμα 1 L στραγγίσματος αραιωμένο με 1 L νερό ανα 3 με 4 μέρες. Μετα τους δύο αυτούς μήνες ξεκίνησε η λειτουργία του συστήματος η οποία αναλύεται διεξοδικά παρακάτω.



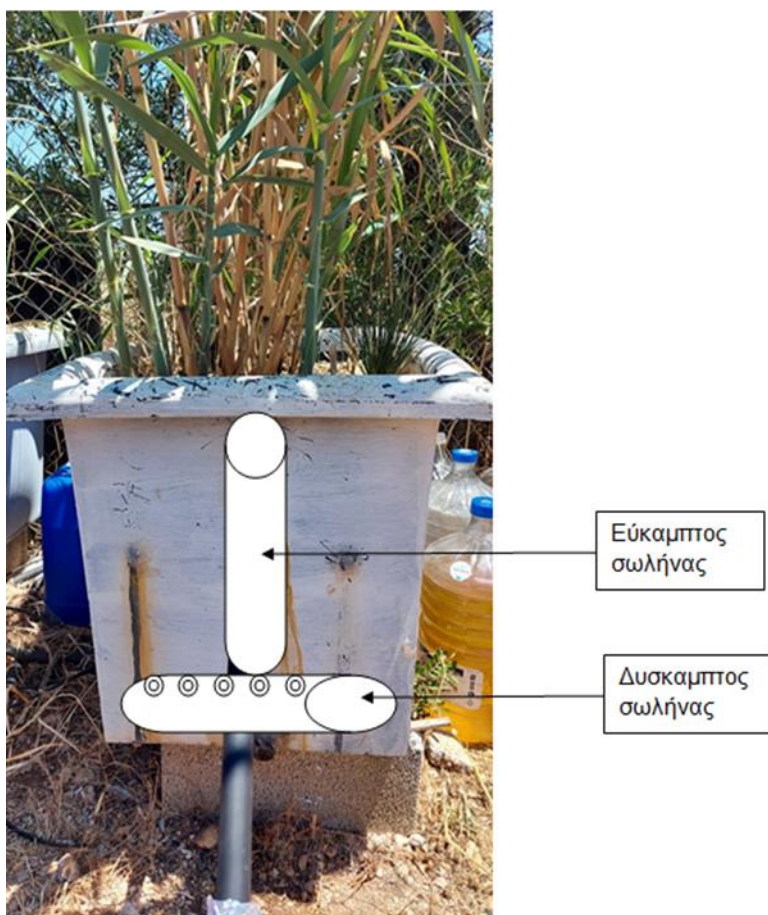
Εικόνα 9. Εύκαμπτος σωλήνας εκροής.



Εικόνα 10. Δύσκαμπτος σωλήνας εκροής.



Εικόνα 11: Χοντρό χαλίκι



Εικόνα 12: Πρόσοψη διάταξης ανάποδου «Τ» της πιλοτικής μονάδας



Εικόνα 13: Ογκομετρικός κύλινδρος



Εικόνα 13: Δοχεία εκροής 20 L

2.2.2. Λειτουργία συστημάτων

Μετα την κατασκευή των πιλοτικών μονάδων, ακολουθεί η λειτουργία τους για την οποία βασική προϋπόθεση είναι η τροφοδοσία των συστημάτων. Η ποσότητα του διασταλάγματος που χρησιμοποιήθηκε συλλεγόταν από τον Χ.Υ.Τ.Α. Χανίων και μεταφερόταν στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος του. Η τροφοδοσία των πιλοτικών μονάδων ήταν κλιμακωτή. Στους δύο πρώτους μήνες, μέχρι τα μέσα Νοέμβρη, οι οποίοι όπως προαναφέρθηκε ήταν μήνες προσαρμογής, η τροφοδοσία γινόταν 2-3 φορές την εβδομάδα με 1 L στραγγίσματος και 1 L νερού. Κατά το στάδιο της προσαρμογής δεν πραγματοποιούνταν δειγματοληψίες.

Στη συνέχεια, ξεκίνησε η λειτουργία των μονάδων η οποία διήρκεσε 5 μήνες, από τέλη Νοέμβρη έως αρχές Απριλίου. Η τροφοδοσία γινόταν κάθε μέρα με 1.5 L νερό και 0.5 L στράγγισμα. Η συγκεκριμένη αραίωση είναι απαραίτητη ώστε να κρατηθεί η αγωγιμότητα της εισροής σε χαμηλά επίπεδα. Ένας ακόμη λόγος που πραγματοποιείται αραίωση είναι το χαμηλό pH του διασταλλάγματος το οποίο είναι πιο όξινο από αυτό που μπορούν να αντέξουν οι ρίζες των φυτών. Κατά το στάδιο λειτουργίας, ξεκίνησαν οι δειγματοληψίες σε εβδομαδιαία βάση. Στο σύνολο πραγματοποιήθηκαν 15 δειγματοληψίες. Ως δείγματα συλλέγονταν η εισροή και οι εκροές των δυο πιλοτικών μονάδων και γίνονταν η φυσικοχημική τους ανάλυση αμέσως μετά στο εργαστήριο. Τέλος, στη φάση λειτουργίας, γίνονταν καθημερινή καταγραφή του όγκου της εισροής και της εκροής των μονάδων. Η εισροή ήταν σταθερή στα 2 L ενώ η εκροή μετρώνταν στα δοχεία συλλογής.

	Χρονολογία	Περιγραφή
Στάδιοπροετοιμασίας	Αύγουστος – Σεπτέμβριος 2020	Καθαρισμός μονάδων και πληρωτικού υλικού, κατασκευή συστήματος αποστράγγισης, πλήρωση μονάδων με τα πληρωτικά υλικά
Φύτευση	10 Σεπτεμβρίου 2020	Φύτευση καλαμιών
Στάδιοπροσαρμογής	10 Σεπτεμβρίου – 15 Νοεμβρίου 2020	Προσαρμογή και ανάπτυξη των φυτών, τροφοδοσία μονάδων με ελαφρύ λύμα
Στάδιολειτουργίας	17 Νοεμβρίου – 7 Απριλίου 2021	Καθημερινή τροφοδοσία μονάδων με διαστάγμα, δειγματοληψίες, καταγραφή όγκων εισροής και εκροής, χημικές αναλύσεις

2.3 Πληρωτικά υλικά

2.3.1. Χαλίκι

Το βασικό πληρωτικό υλικό και στα δύο συστήματα ήταν το χαλίκι προερχόμενο από ασβεστολιθικό υλικό μεγέθους 5-10 mm. Οι λόγοι για τους οποίους χρησιμοποιήθηκε το συγκεκριμένο υλικό ως υλικό πλήρωσης είναι το σχετικά υψηλό του πορώδες, στο γεγονός πως είναι αδρανές υλικό και δεν απελευθερώνει διαλυτά συστατικά όταν έρχεται σε επάφη με το λύμα, στα υψηλά ρυπαντικά και υδραυλικά φορτία τα οποία μπορεί να αντέξει και στο χαμηλό του κόστος.



Εικόνα 15: Χαλίκι

2.3.2. Βιοεξανθράκωμα

Για την παραγωγή του βιοεξανθρακώματος, αρχικά γίνεται η επεξεργασία της πρώτης ύλης και στη συνέχεια λαμβάνει χώρα η διαδικασία της πυρόλυσης στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Ως πρώτη ύλη, χρησιμοποιήθηκαν και επεξεργάστηκαν κλαδέματα ελιάς. Αρχικά, με τη βοήθεια εργαλείων, κόπηκαν κλαδέματα ελιάς, αφαιρέθηκαν τα φύλλα τους και έγινε ο τεμαχισμός τους σε κομμάτια περίπου 4-5 cm. Τα κομμάτια της βιομάζας που χρησιμοποιήθηκαν, επιλέχθηκαν έτσι ώστε να ταιριάζουν με το μέγεθος του χαλικιού. Μετά τον τεμαχισμό, η βιομάζα τοποθετήθηκε σε φούρνο ξήρανσης, για 3 μέρες στους 70°C, με σκοπό τη μείωση της υγρασίας.

Η επιλογή της ελιάς ως βιομάζα για την παραγωγή του βιοεξανθρακώματος δεν ήταν τυχαία. Αρχικά, είναι ένα πράσινο απόβλητο το οποίο παράγεται σε μεγάλη ποσότητα στη περιοχή των Χανίων, και γενικά στην Κρήτη, οπότε όχι μόνο είναι εύκολο να βρεθεί αλλά δεν διαταράσσει και κανένα οικοσύστημα. Επιπρόσθετα, τα κλαδέματα της ελιάς είναι εύκολο να κοπούν στο επιθυμητό μέγεθος ανάλογα με το

χρησιμοποιούμενο πληρωτικό υλικό. Επίσης, προωθείται έτσι η κυκλική οικονομία καθώς τα κλαδέματα ελιάς τα οποία βρίσκονται σε μεγάλες ποσότητες μπορούν να αξιοποιηθούν ως βιοεξανθράκωμα. Τέλος, όντας ξυλώδης βιομάζα, εξυπηρετεί τη βιώσιμη διαχείριση των πόρων καθώς δημιουργείται και ανανεώνεται φυσικά.

Όσον αφορά την διαδικασία της πυρόλυσης, ξεκινάει με την τοποθέτηση της βιομάζας σε μεταλλικές κάψες χωρητικότητας 50g οι οποίες βρίσκονται μέσα σε ένα φούρνο πυρόλυσης της εταιρίας LinnHighTherm. Η πυρόλυση για την παραγωγή του συγκεκριμένου βιοεξανθρακώματος, πραγματοποιήθηκε στους 400°C με ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας 6°C/min. Η διάρκεια της πυρόλυσης ανέρχεται στη 1 h από τη στιγμή που φτάσει την επιθυμητή θερμοκρασία. Με σκοπό την αποφυγή της συσσώρευσης οξυγόνου, παρέχεται καθαρό άζωτο με ρυθμό 200 ml/min. Μολις ολοκληρωθεί η διαδικασία της πυρόλυσης, το βιοεξανθράκωμα αφήνεται σε ξηραντήρα μέχρι να φτάσει σε θερμοκρασία δωματίου και στη συνέχεια αποθηκεύεται σε αεροστεγή δοχεία έως ότου να χρησιμοποιηθεί ως υλικό πλήρωσης.

Χαρακτηριστικά του βιοεξανθρακώματος

➤ Απόδοση πυρόλυσης

Για τον προσδιορισμό της απόδοσης της πυρόλυσης ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία. Αρχικά, μετρήθηκε το βάρος της μεταλλικής κάψας και στη συνέχεια μετρήθηκε μαζί με την βιομάζα. Αφού τοποθετήθηκε στον φούρνο πυρόλυσης και ολοκληρώθηκε η διαδικασία, μετρήθηκε το βάρος της μεταλλικής κάψας μαζί με το βιοεξανθράκωμα. Ο τύπος, λοιπόν, που χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση της απόδοσης απαντάται στο πηλίκο της ποσότητας του βιοεξανθρακώματος που παράχθηκε προς το αρχικό βάρος της βιομάζας επί τοις εκατό (Ρεγκούζας, 2017).

➤ pH και EC

Για τον προσδιορισμό του pH και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία. Σε κωνικές φιάλες, παρασκευάστηκαν διαλύματα βιοεξανθρακώματος με απιονισμένο νερό σε αναλογία 1:10 w/v και αφέθηκαν σε τράπεζα ανακίνησης για 24 ώρες στις 60 rpm. Στη συνέχεια για την μέτρηση του pH χρησιμοποιήθηκε το όργανο CRISONmicropH 2202 και για την αγωγιμότητα το CRISONmicroCM 2202 (Ρεγκούζας, 2017).

➤ Σημείο μηδενικού φορτίου (pH_{PZC})

Σημείο μηδενικού φορτίου είναι η τιμή του pH στην οποία η επιφάνεια εμφανίζει συνολικό μηδενικό φορτίο. Για τον προσδιορισμό του pH_{PZC}, αρχικά παρασκευάζεται διάλυμα CaCl₂ 0.005 M το οποίο τίθεται σε βρασμό ώστε να απαλλαγεί από το CO₂. Στη συνέχεια ρυθμίζεται το pH καθορισμένου όγκου του διαλύματος σε τιμές μεταξύ 2 και 12 με την προσθήκη HCl 0.5 M ή NaOH 0.5 M. Έπειτα, τοποθετούνται 20 mL του κάθε ρυθμισμένου διαλύματος και 0.06 g βιοεξανθρακώματος σε γυάλινα φιαλίδια και αναδεύονται για 24 ώρες στις 150 rpm. Μετά το πέρας του 24ώρου μετρείται το pH σε κάθε φιαλίδιο και κατασκευάζεται το διάγραμμα του τελικού pH σε συνάρτηση με

το αρχικό. Το σημείο μηδενικού φορτίου pH_{PZC} βρίσκεται στο σημείο όπου η καμπύλη τέμνει την ευθεία $pH_{final}=pH_{initial}$ (Μουργελά, 2018).

➤ Τέφρα

Αρχικά, το ποσοστό της τέφρας υποδηλώνει τα ανόργανα συστατικά της βιομάζας όπως το ασβέστιο και το μαγνήσιο. Οι πρώτες ύλες που προέρχονται από ξυλώδη υλικά, όπως και στο συγκεκριμένο πείραμα, δύναται να παράγουν βιοεξανθράκωμα με αρκετά χαμηλή περιεκτικότητα σε τέφρα. Η διαδικασία για τον προσδιορισμό της τέφρας ξεκινάει ζυγίζοντας το καθαρό βάρος των μεταλλικών καψών και στη συνέχεια ζυγίζοντας τις ποσότητες του δείγματος ξεχωριστά και τοποθετημένες στις κάψες. Έπειτα, τοποθετήθηκαν σε κλίβανο και αφέθηκαν για 6 ώρες στους 750°C μετρώντας από την στιγμή που η θερμοκρασία είχε φτάσει στα επιθυμητά επίπεδα. Μετά την ολοκλήρωση της καύσης, τα δείγματα ξεκουράστηκαν μέχρι να φτάσουν σε θερμοκρασία δωματίου και στη συνέχεια μετρήθηκε το βάρος του υπολείμματος που είχε μείνει μαζί με την κάψα. Τέλος, ο τύπος που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της τέφρας είναι ο ακόλουθος (Πεγκούζας, 2017):

$$Ash (\%) = \frac{W_{\text{τελικό}} - W_{\text{κάψας}}}{W_{\text{δείγματος}}}$$

➤ Ειδική επιφάνεια (S_{BET})

Ο προσδιορισμός της ειδικής επιφάνειας εξαρτάται από την πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται και από την διαδικασία της πυρόλυσης που πραγματοποιείται. Η Ειδική επιφάνεια μπορεί να φτάσει από εκατοντάδες έως χιλιάδες τετραγωνικά μέτρα ανά γραμμάριο βιοεξανθράκωματος. Η μέτρηση της πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Κεραμικών και Υάλου στη Σχολή των Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης. Χρησιμοποιήθηκε το όργανο NOVA 2200 ThermoScientific Surfergassorption analyzer και βασίστηκε στη μέθοδο Brunauer-Emmet-Teller (Πεγκούζας, 2017; Πολίτη, 2018).

➤ Φαινομενική πυκνότητα (Bulk density)

Ως φαινομενική πυκνότητα ορίζεται ο συνολικός όγκος των στερεών τεμαχιδίων και του πορώδους. Πιο αναλυτικά, εκφράζεται ως το πηλίκο καθορισμένης μάζας ξηρού εδάφους προς τον συνολικό της όγκο μαζί με τους πόρους. Για τον προσδιορισμό της φαινομενικής πυκνότητας διαιρείται το βάρος ξηρού δείγματος σε g με γνωστό όγκο κυλίνδρου δειγματοληψίας σε mL (Πολίτη, 2018).

➤ Στοιχειακή ανάλυση

Με τον όρο στοιχειακή ανάλυση νοείται ο προσδιορισμός των βασικών χημικών στοιχείων όπως ο άνθρακας, το άζωτο, το υδρογόνο και το θείο από τα οποία αποτελείται το βιοεξανθράκωμα. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Ανάλυσης Ρευστών και Πυρήνων Υπόγειων Ταμιευτήρων με την βοήθεια του στοιχειακού αναλυτή EuroVector Elemental Analysis CHNS-O (Πεγκούζας, 2017).

2.3.3. Εξατμισοδιαπνοή

Για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής απαιτούνται οι όγκοι της εισροής και της εκροής μετρημένοι σε L, η ημερήσια βροχόπτωση σε mm και οι διαστάσεις των πιλοτικών μονάδων. Ο τύπος που χρησιμοποιήθηκε ήταν $ET = (V_{\text{εισόδου}} + V_{\text{βροχ}}) - V_{\text{εξόδου}}$, όπου ET η τελική εξατμισοδιαπνοή, $V_{\text{εισόδου}}$ ο ημερήσιος όγκος τροφοδοσίας του δείγματος εισροής, $V_{\text{βροχ}}$ ο όγκος βροχόπτωσης και $V_{\text{εξόδου}}$ ο ημερήσιος όγκος εκροής των μονάδων.

2.3.4. Μετεωρολογικά δεδομένα

Τα μετεωρολογικά δεδομένα που χρειάστηκαν για την συγκεκριμένη μελέτη αντλήθηκαν από το www.meteo.gr. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε ο μετεωρολογικός σταθμός του Πολυτεχνείου Κρήτης ο οποίος βρίσκεται στην Πολυτεχνειούπολη σε υψόμετρο 137 m με ύψος αισθητήρων θερμ/υγρ στα 1.8, ύψος ανεμόμετρου στα 5 m και έχοντας στη διάθεση του αισθητήρες ηλιακής ακτινοβολίας. Για το χρονικό διάστημα 29 Ιανουαρίου 2021 έως 7 Απριλίου 2021, η μέση βροχόπτωση ήταν 2.3 mm με μέγιστη τιμή τα 36.8 mm και ελάχιστη τα 0 mm. Για το ίδιο χρονικό διάστημα, η μέση θερμοκρασία του αέρα ήταν 13.3 °C, με μέγιστη τιμή 20.8 °C και ελάχιστη 4.6 °C.

2.4. Βλάστηση Πιλοτικών Μονάδων

Η σωστή λειτουργία αυτών των συστημάτων βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στη σωστή ανάπτυξη και διαχείριση της βλάστησης. Η βλάστηση που χρησιμοποιήθηκε ήταν το κοινό καλάμι *Phragmites Australis*. Το συγκεκριμένο είδος φυτού βρίσκεται σε μεγάλες ποσότητες στη Κρήτη και έχει την ικανότητα να αναπτυχθεί σε εύκρατα αλλά και τροπικά κλίματα. Βασικά πλεονεκτήματα του συγκεκριμένου καλαμιού είναι ότι μπορεί να αναπτυχθεί σε ένα μεγάλο εύρος pH από 4.8 έως 8.2 και έχει καλή αντοχή στις αναερόβιες συνθήκες και στις υψηλές συγκεντρώσεις αλάτων. Επίσης, παρουσιάζει πολύ γρήγορη ανάπτυξη με αρκετά βαθύ ριζικό σύστημα καθιστώντας την μεταφορά οξυγόνου στο υπόστρωμα πολύ αποτελεσματική. Το συγκεκριμένο προτέρημα είναι αρκετά σημαντικό για συστήματα τεχνητών υδροβιότοπων με φτωχό αερισμό καθώς ενισχύουν τις αδύναμες αερόβιες συνθήκες. Οι ρίζες αναπτύσσονται κάθετα σε μεγάλο βάθος από 0.6-1.0 m ενώ το ύψος του φυτού μπορεί να φτάσει τα 4 m. Τα καλάμια, με την χρήση εργαλίων, κόπηκαν και συλλέχθηκαν από ένα υδατόρευμα στη περιοχή του Πλατανιά του νομού Χανίων. Προτιμήθηκαν καλάμια με νεαρά βλαστάρια και μακρές ρίζες. Στη συνέχεια μεταφυτεύτηκαν σε γλάστρες με

νερό και διατηρήθηκαν στον εξωτερικό χώρο του εργαστηρίου μέχρι να φυτευτούν στις πιλοτικές μονάδες (Stefanakis et al., 2014; Bakhshoodeh et al., 2020).

2.5 Αναλυτικές Μέθοδοι Μετρήσεων

2.5.1. COD

Για την μέτρηση του COD χρησιμοποιήθηκαν έτοιμα αντιδραστήρια της εταιρίας Merck με εύρος 25-1500 ppm. Αρχικά γινόταν η κατάλληλη αραίωση στα δείγματα εισροών καθώς η περιεκτικότητά τους σε οργανική είναι πολύ υψηλή και οι μετρήσεις θα έβγαιναν εκτός καμπύλης βαθμονόμησης. Η αραίωση που γινόταν ήταν 1/5, δηλαδή 1 ml δείγματος και 4 ml απιονισμένου νερού. Στις εκροές δεν γινόταν καθόλου αραίωση. Η διαδικασία ξεκινάει με την τοποθέτηση 2 ml δείγματος, με την χρήση πιπέτας, στις φιάλες των αντιδραστηρίων και τοποθετούνταν για χώνευση στον θερμοαντιδραστήρα της εταιρίας Merck μοντέλο Thermoreaktor TR200 για 2 ώρες στο 148°C. Τα φιαλίδια αυτά περιέχουν τα απαραίτητα αντιδραστήρια και διχρωμικό κάλιο ($K_2Cr_2O_7$). Μόλις περάσουν 2 ώρες, τα φιαλίδια ανακινήθηκαν και αφέθηκαν για περίπου 10 λεπτά μέχρι να κρυώσουν και να μετρηθούν. Η μέτρηση είναι φωτομετρική σε φασματοφωτόμετρο ορατού-υπεριώδους SHIMADZU μοντέλο UV-1202 UV-VIS Spectrophotometer στα 610 nm. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι πριν την μέτρηση, το φασματοφωτόμετρο μηδενίζεται με την βοήθεια ενός τυφλού διαλύματος απιονισμένου νερού. Κλείνοντας, ο τελικός υπολογισμός του COD γίνεται μέσω της καμπύλης βαθμονόμησης οι οποίες προκύπτουν από την μέτρηση των πρότυπων διαλυμάτων.



Εικόνα 16: Θερμοαντιδραστήρας



Εικόνα 17: Κιτ COD

2.5.2. BOD₅

Η μέτρηση του BOD₅ πραγματοποιείται μανομετρικά με την βοήθεια ενός μετρητή πτώσης πίεσης της εταιρίας Oxitop. Αρχικά, τοποθετηθηκαν 157 ml δείγματος σε μια σκουρόχρωμη φιάλη μαζί με έναν μαγνήτη ανάδευσης. Στη συνέχεια, τοποθετείται ένα ελαστικό πώμα στο οποίο προστέθηκαν 6 σταγόνες KOH ώστε να συγκρατηθεί το CO₂. Έπειτα, η φιάλη σφραγίζεται με το μανόμετρο και τοποθετείται σε έναν σκοτεινό κλίβανο. Όταν ο μαγνήτης ξεκινήσει να περιστρέφεται στο κέντρο του πυθμένα, τότε μηδενίζουμε το μανόμετρο και αφήνουμε την φιάλη σε σταθερή θερμοκρασία υπο ανάδευση στους 20°C για 5 ημέρες. Τέλος, μετά το πέρας των 5 ημερών καταγράφεται η μέτρηση του BOD₅. Το αποτέλεσμα του μετρητή πολλαπλασιάζεται με έναν συντελεστή ο οποίος δίνεται από την εταιρία σύμφωνα με τον όγκο του δείγματος. Σύμφωνα με την εταιρία AQUALYTIC, για 157 ml που χρησιμοποιήθηκαν ο συντελεστής για την υπολογισμό του BOD είναι 10.



Εικόνα 18: Κλίβανος μέτρησης BOD₅

2.5.3. Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (TSS)

Τα ολικά αιωρούμενα στερεά μετρώνται με διήθηση υπο κενό, συνήθως 75 ml δείγματος, σε υαλόφιλτρα τύπου GF/C της εταιρίας GEHealthcareLifeSciencesWhatman. Αρχικά, το υαλόφιλτρο τοποθετημένο σε αλουμινόχαρτο και ζυγίζεται σε ζυγαριά υψηλής ακρίβειας της εταιρίας SHIMADZU μοντέλο LIBRORAE-220. Έπειτα, αναδεύουμε καλά το δείγμα ώστε να μην υπάρχουν καθιζάνοντα στερεά και συγκεκριμένος όγκος δείγματος διηθείται με την βοήθεια μιας συσκευής διήθησης υπο κενό με αποτέλεσμα τα στερεά να κατακρατούνται στο φίλτρο. Αφού ολοκληρωθεί η διήθηση, το υαλόφιλτρο με τα στερεά αφαιρείται προσεκτικά και τοποθετείται ξανά στο αλουμινόχαρτο. Έπειτα, το φίλτρο τοποθετείται στο φούρνο της εταιρίας Termax για ξύρανση στους 105°C για 20 λεπτά. Μετά το πέρας των 20 λεπτών, το φίλτρο μαζί με το αλουμινόχαρτο ξανά

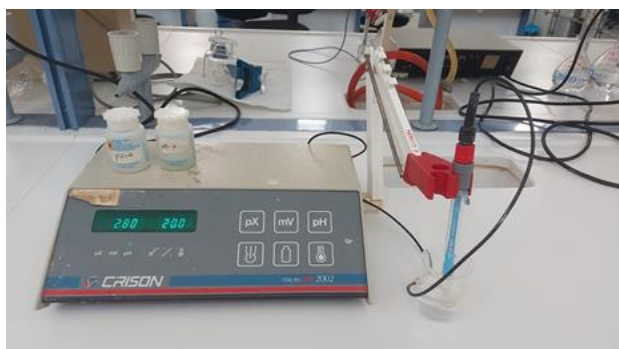
ζυγίζεται στη ζυγαριά και η διαφορά του βάρους μαζί με την διαίρεση του όγκου του δείγματος δίνει την συγκέντρωση των στερεών σε mg/L.



Εικόνα 19: Ζυγαριά υψηλής ακρίβειας

2.5.4. pH

Η μέτρηση του γίνεται με την βοήθεια ενός πεχαμέτρου της εταιρίας CRISON μοντέλο microPH 2002 στο οποίο χρειάζεται να γίνει βαθμονόμηση κάθε φορά που τίθεται σε λειτουργία. Η βαθμονόμηση γίνεται με δύο ρυθμιστικά διαλύματα στις τιμές 4 και 7 του pH. Ετσι λοιπόν, τοποθετείται το ηλεκτρόδιο στο δείγμα και εμφανίζεται η τιμή του pH στην οθόνη. Ενδιάμεσα των διαφόρων μετρήσεων, το ηλεκτρόδιο ξεπλένεται με απιονισμένο νερό και το σκουπίζεται επιφανειακά με προσοχή. Κλείνοντας είναι πολύ σημαντικό, το ηλεκτρόδιο να μην αφήνεται εκτεθειμένο στην ατμόσφαιρα διότι ξεραίνεται.



Εικόνα 20: Πεχάμετρο

2.5.5. Αγωγιμότητα

Η αγωγιμότητα μετριέται με την βοήθεια του αγωγιμόμετρου της εταιρίας CRISON μοντέλο microCM 2202 και τοποθετώντας το ηλεκτρόδιο στο δείγμα, εμφανίζεται η τιμή της αγωγιμότητας σε S/cm. Μετά την μέτρηση, το ηλεκτρόδιο ξεπλένεται με

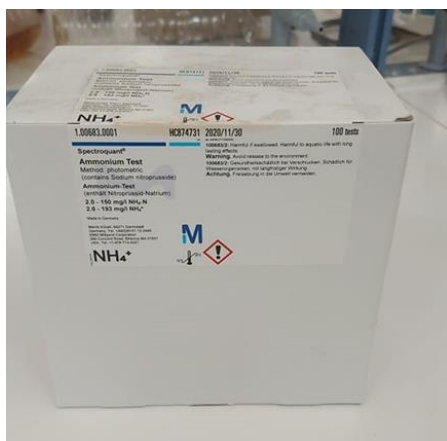
απιονισμένο νερό. Όπως και με το ηλεκτρόδιο του πεχαμέτρου έτσι και σε αυτή την περίπτωση δεν πρέπει να αφήνεται εκτεθειμένο στην ατμόσφαιρα.



Εικόνα 21: Αγωγιμόμετρο

2.5.6. Αμμωνιακό Άζωτο – $\text{NH}_4\text{-N}$

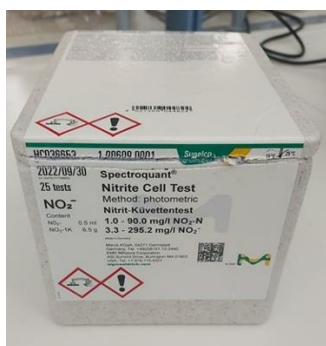
Για την διεκπεραίωση της μέτρησης του αμμωνιακού αζώτου χρησιμοποιήθηκαν σετ της εταιρίας Merck. Η διαδικασία ξεκινάει με αραίωση από 1:2 έως την συνηθέστερη τιμή του 1:10 στα δείγματα εισροής εξαιτίας της μεγάλης περιεκτικότητας τους σε αμμωνία. Στις εκροές δεν γίνεται καμία αραίωση. Αρχικά, τοποθετούνται 0.10 ml από το διηθημένο δείγμα, σε φίλτρο 0,45 μm της εταιρίας Whatman, και στη συνέχεια 5 ml από το αντιδραστήριο $\text{NH}_4\text{-1}$ και 1 κουταλιά από το αντιδραστήριο $\text{NH}_4\text{-2}$. Ακολουθεί καλή ανάδευση και αναμονή 15 λεπτών ώστε να γίνει η αντίδραση. Η μέτρηση είναι φωτομετρική και λαμβάνει χώρα στο φασματοφωτόμετρο ορατού υπεριώδους της εταιρίας SHIMADZU μοντέλο UV-1202 UV-VISPECTOPHOTOMETER στα 690 nm. Πριν την μέτρηση πρέπει να μηδενιστεί το φασματοφωτόμετρο με την βοήθεια ενός τυφλού διαλύματος απιονισμένου νερού και αντιδραστηρίων διπλάσιων ποσοτήτων καθώς το συγκεκριμένο φασματοφωτόμετρο δέχεται δύο κυψελίδες. Τέλος σύμφωνα με την καμπύλη βαθμονόμησης, η οποία προκύπτει από την μέτρηση πρότυπων διαλυμάτων, καταγράφεται η συγκέντρωση του αμμωνιακού αζώτου.



Εικόνα 22: Κιτ αμμωνιακού αζώτου

2.5.7. Νιτρώδες Άζωτο – $\text{NO}_2\text{-N}$

Για τη συγκεκριμένη μέτρηση χρησιμοποιούνται αντιδραστήρια της εταιρίας Merck. Αρχικά, γίνεται αραίωση από 1:2 έως 1:20 στα δείγματα της εισροής, ενώ στις εκροές δεν γίνεται καμία αραίωση. Η διαδικασία ξεκινάει προσθέτοντας στα φιαλίδια που περιέχονται στο κιτ, 2 κουταλιές $\text{NO}_2 - 1\text{K}$ και 8 ml διηθημένου, σε φίλτρο 0,45 μm της εταιρίας Whatman, δείγματος. Ακολουθεί καλή ανακίνηση και ξεκούραση για 20 λεπτά μέχρι να αντιδράσει. Η μέτρηση γίνεται με τη βοήθεια φασματοφωτόμετρου ορατού υπεριώδους της εταιρίας SHIMADZU μοντέλο UV-1202 UV-VISSPECTOPHOTOMETER στα 605 nm. Προηγείται μηδενισμός του οργάνου με τυφλό διάλυμα απιονισμένου νερού και του αντιδραστηρίου. Τέλος, με βάση την καμπύλη βαθμονόμησης υπολογίζεται η συγκέντρωση του νιτρώδους αζώτου.



Εικόνα 23: Κιτ νιτρώδους αζώτου

2.5.8. Νιτρικό Άζωτο – $\text{NO}_3\text{-N}$

Για τη συγκεκριμένη μέτρηση χρησιμοποιήθηκαν αντιδραστήρια τα οποία περιέχονται στο σετ της εταιρίας Merck. Η διαδικασία ξεκινάει με την αραίωση των δειγμάτων. Όσον αφορά τις εισροές, η αραίωση που γίνεται είναι κατά κύριο λόγο 1:10 αλλά μπορεί να φτάσει έως και 1:30. Στις εκροές γίνεται μια αραίωση 1:3. Αρχικά, στα φιαλίδια του σετ τοποθετούνται 1 ml διηθημένου δείγματος, σε φίλτρο 0.45 μm της εταιρίας Whatman και 1 ml από το αντιδραστήριο $\text{NO}_3\text{-1K}$. Ακολουθεί καλή ανάδευση και αναμονή για 10 λεπτά έως ότου να γίνει η αντίδραση. Έπειτα, με τη βοήθεια ενός φασματοφωτόμετρου ορατού υπεριώδους της εταιρίας SHIMADZU μοντέλο UV-1202 UV-VISSPECTOPHOTOMETER, γίνεται η μέτρηση στα 525 nm. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι ο μηδενισμός του οργάνου με τυφλό διάλυμα απιονισμένου νερού και αντιδραστηρίου. Τέλος, σύμφωνα με την καμπύλη βαθμονόμησης, καταγράφεται η συγκέντρωση του νιτρικού αζώτου κάθε δείγματος.



Εικόνα 24: Κιτ νιτρικού αζώτου

2.5.9. Φωσφορικά - PO_4^{3-}

Αρχικά, για την μέτρηση των φωσφορικών είναι απαραίτητη η παρασκευή ενός διαλύματος το οποίο αποτελείται από 50 ml $5\text{NH}_2\text{SO}_4$, 5 ml potassiumantimonyltartrate, 15 ml διαλύματος ammoniummolybdate (20g $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ σε 500 ml νερού) και 30 ml διαλύματος ascorbicacid (1,76 g ascorbic σε 100 ml νερού) το οποίο παρασκευάζεται κάθε φορά που χρησιμοποιείται. Η διαδικασία μέτρησης των φωσφορικών είναι βασισμένη στη μέθοδο 4500-PE (AscorbicAcidMethod) από το StandardMethods και ξεκινάει με την διήθηση σε φίλτρο 0.45 nm του διαλύματος στο οποίο έχει προηγηθεί χώνευση. Στη συνέχεια, σε 50 ml διηθημένου δείγματος προστίθεται μια σταγόνα φαινολοφθαλείνης και αν πάρει ένα ελαφρώς κόκκινο χρώμα αποχρωματίζεται με H_2SO_4 . Έπειτα, όταν το pH του διαλύματος φτάσει στο 6.5-7.5 (ουδέτερη περιοχή), συμπληρώνεται με 8 ml του παραπάνω σύνθετου διαλύματος φωσφόρου. Το δείγμα αφήνεται να αντιδράσει για περίπου 10 λεπτά και παίρνει ένα μπλέ χρώμα. Η μέτρηση γίνεται με φασματοφωτόμετρο ορατού υπεριώδους εταιρίας SHIMADZU μοντέλο UV-1202 UV-VISSSpectrophotometer στα 880 nm. Τέλος, με την βοήθεια της καμπύλης βαθμονόμησης μετράται η συγκέντρωση των φωσφορικών.



Εικόνα 25: Φασματοφωτόμετρο UV-VIS

2.5.10. Ολικός Φώσφορος – TP

Στα δείγματα εισροής, πέρα από τα φωσφορικά, έγινε και μέτρηση του ολικού φωσφόρου για την οποία πρέπει να προηγηθεί η διαδικασία της χώνευσης του δείγματος με σκοπό την μετατροπή όλων των μορφών φωσφόρου σε φωσφορικά. Για τα δείγματα αυτά έγινε αραιώση 1:2. Αρχικά, σε ένα ποτήρι ζέσεως προσθέτονται 25 ml δείγματος, 1 ml πυκνό θειικό (H_2SO_4) και 5 ml νιτρικό (HNO_3). Στη συνέχεια, το δείγμα βράζει στον θερμαντήρα της εταιρίας VELPSCIENTIFICA σε συνθήκες ήπιου βρασμού μέχρι να μείνει περίπου 1 ml στο ποτήρι. Μετά το πέρας της χώνευσης, το δείγμα αφήνεται να κρυώσει και προσθέτονται περίπου 10 ml απιονισμένου νερού. Στη συνέχεια ακολουθεί η ρύθμιση του pH. Η διαδικασία ξεκινάει προσθέτοντας 1 σταγόνα δείκτη φαινολοφθαλείνης και ύστερα σταγόνες NaOH ώστε να εξουδετερωθεί μέχρι να πάρει ρόζ χρώμα. Όταν το pH φτάσει στην ουδέτερη περιοχή σύμφωνα με την προαναφερθείσα διαδικασία, γίνεται διήθηση του δείγματος με φίλτρο 0.45 μm . Το διηθημένο δείγμα προστίθεται σε ογκομετρική φιάλη των 50 ml και συμπληρώνεται με απιονισμένο νερό μέχρι την χαραγή. Πρέπει να αναφερθεί ότι η τιμή της συγκέντρωσης πολλαπλασιάζεται με 2 διότι χρησιμοποιήθηκαν 25 ml δείγματος για χώνευση.



Εικόνα 26: Θερμαντήρας

2.5.11. Βαρέα Μέταλλα

Η μέτρηση των βαρέων μετάλλων γίνεται σύμφωνα με τη μέθοδο ICP-MS και πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Υδρογεωχημικής Μηχανικής και Αποκατάστασης Εδαφών του Πολυτεχνείου Κρήτης. Για την συγκεκριμένη μέτρηση απαιτείται η οξίνιση των δειγμάτων και πραγματοποιήθηκε για όλα τα δείγματα εισροής και εκροής. Η συγκεκριμένη διαδικασία ξεκινάει με την προσθήκη σε ένα σκούρο φιαλίδιο 10 ml διηθημένου, με φίλτρο 0.45 μm της εταιρίας Whatman, δείγματος και 0.1 mL HNO_3 . Τα φιαλίδια παραμένουν στο ψυγείο έως ότου πραγματοποιήθηκε η μέτρηση.

Για την μέτρηση των ολικών μετάλλων απαιτείται να προηγηθεί χώνευση. Η διαδικασία ξεκινάει με την προσθήκη σε ένα ποτήρι ζέσεως, 50 ml δείγματος, 5

mHCl και 1 mHNO_3 . Έπειτα το δείγμα βράζει ήπια στον απαγωγό μέχρι να απομείνουν περίπου 15 ml .



Εικόνα 27: Συσκευή διήθησης

Κεφάλαιο 3: Αποτελέσματα και Συζήτηση

Στη συγκεκριμένη ενότητα αναλύονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά εκτέλεση του πειράματος και παρουσιάζονται οι αντίστοιχοι πίνακες και διαγράμματα. Επιπλέον, παρουσιάζεται ο χαρακτηρισμός του διασταλλάγματος της εισροής, του βιοεξανθρακώματος που χρησιμοποιήθηκε και των αποτελεσμάτων της εξατμισοδιαπνοής. Βασικό κομμάτι του κεφαλαίου αποτελούν τα αποτελέσματα των μετρήσεων των διαφόρων παραμέτρων της εκροής των δυο μονάδων και η σύγκρισή τους.

3.1 Χαρακτηρισμός στραγγισμάτων εισροής

Πίνακας 2: Χαρακτηρισμός στραγγισμάτων εισροής ως προς το οργανικό φορτίο, τα θρεπτικά και τις φυσικοχημικές παραμέτρους

	COD (mg/L)	NH ₄ -N (mg/L)	NO ₃ -N (mg/L)	NO ₂ -N (mg/L)	pH	EC (mS/cm)	TSS (mg/L)	TP (mg/L)	PO ₄ ³ -P (mg/L)	BOD ₅ (mg/L)
Μέση τιμή	3066	263	1937	391	3,87	13,96	148	~1,6	~0,4	277
Μέγιστη τιμή	3568	428	3391	842	4,3	21	214	3,12	1,26	3568
Ελάχιστη τιμή	2752	37	1021	90	3,45	7,72	73	<0,2	<0,1	2752
Τυπική απόκλιση	273,4	162,3	711,6	342,3	0,23	3,97	54,9	1,04	0,5	273,4

Πίνακας 3: Χαρακτηρισμός στραγγισμάτων εισροής ως προς τα Ολικά Μέταλλα

ppm	B	Mg	Al	K	Ca	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Mo	Hg	Pb	Na
Μέση Τιμή	8,84	172,2	789,8	3887	203,2	0,9	0,42	4,9	0,54	0,63	4,77	0,14	0,05	2,09	4218
Μέγιστη Τιμή	9,41	183	873,9	4283	240	1,02	0,48	9,89	0,82	0,94	7,05	0,17	-	-	-
Ελάχιστη Τιμή	8,14	157	719,9	3342	154	0,8	0,32	2,87	0,21	0,29	2,19	0,06	-	-	-
Τυπική Απόκλιση	0,60	11,81	65,9	449,1	37,3	0,09	0,07	3,34	0,26	0,28	2,18	0,05	-	-	

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του ανεπεξέργαστου στραγγίσματος το οποίο δέχεται η Μονάδα Επεξεργασίας Στραγγισμάτων του Χ.Υ.Τ.Υ. (Kirmizakis et al., 2014).

Πίνακας 4: Χαρακτηρισμός ανεπεξέργαστων στραγγισμάτων στον Χ.Υ.Τ.Α. Χανίων

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή
pH	8,1	TP(mg/L)	24,8
EC(mS/cm)	22,5	BOD(mg/L)	1334,4
DO(mg/L)	3,4	COD(mg/L)	12360
TSS(mg/L)	447,5	TOC(mg/L)	698,3
NO₃-N(mg/L)	16,76	HCO₃(mg/L)	10676,7
NO₂-N(mg/L)	0,5	SO₄²(mg/L)	8,5
NH₄-N(mg/L)	2786,5	Cl(mg/L)	2079,1
PO₄-P(mg/L)	20,3	Na(mg/L)	1644

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του στραγγίσματος που παράγεται στον Χ.Υ.Τ.Υ. Χανίων μετά από τρία διαφορετικά στάδια (Papastavrou et al., 2009).

Πίνακας 5: Χαρακτηρισμός στραγγισμάτων στον Χ.Υ.Τ.Α. μετά από διάφορα στάδια

Παράμετρος	Δ.Ε.	SBR + CW	Κροκίδωση με 3mMalum
pH	7,8-8,2	7,4-8,1	4,6
BOD(mg/L)	450-720	~40	Δεν καθορίστηκε
COD(mg/L)	4500-8800	<1000	500
TSS(mg/L)	50-300	<75	5
TN(mg/L)	1500-2300	<350	290
TP(mg/L)	~25	<4	<0,5
Χρώμα(TCU)	7200-9200	<2000	300
EC_{50, 15min}(%)	6-14	Μη τοξικό	Μη τοξικό
Fe	8.5-13.5	<1,5	<0,25
Ni	~0,8	<0,2	0,1
Cr	0,7-1,2	<0,4	<0,25
Cu	0,05	<0,2	0,02
Pb	0,7-1,1	<0,1	0,04

Όσον αφορά το οργανικό φορτίο, είναι φανερό πως σταδιακά μειώνεται μετά τη βιολογική επεξεργασία που λαμβάνει χώρα στις SBR. Στις δεξαμενές SBR, η βιολογική επεξεργασία γίνεται με αερισμό με αποτέλεσμα να επικρατούν αερόβιες συνθήκες. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο κατά τη βιολογική αυτή επεξεργασία ενισχύεται η διαδικασία της νιτροποίησης. Έτσι εξηγούνται οι χαμηλές συγκεντρώσεις του NH₄-N και NO₂-N αλλά και η υψηλή συγκέντρωση NO₃-N που παρουσιάζονται

στον Πίνακα 5. Όσον αφορά τα TSS, το pH και την αγωγιμότητα, παρατηρείται μια πτώση μετά την κροκίδωση με κροκιδωτικό $Al_2(SO_4)_3$. Η βιολογική επεξεργασία μαζί με την κροκίδωση επιφέρουν σημαντική μείωση του TP και των PO_4^{3-} καθώς ο φώσφορος απορροφάται στην παραγόμενη λάσπη. Άλλο ένα πλεονέκτημα των συνδυασμένων δυο αυτών διεργασιών είναι η σημαντική μείωση των βαρέων μετάλλων (π.χ. Fe με συγκέντρωση 4,9 ppm και με όριο 0.1-664 ppm), ενώ από την άλλη παρατηρείται υψηλή συγκέντρωση των ανόργανων στοιχείων (π.χ. Na με συγκέντρωση 4218 ppm και με όριο 12-3000 ppm) καθώς σύμφωνα με τον Ehrig (1983) αυτό οφείλεται στο στάδιο της μεθανογένεσης το οποίο χαρακτηρίζεται από υψηλές συγκεντρώσεις Ca, Mg, Na και NH_4 . Η αυξημένη συγκέντρωση του Al που παρατηρείται μετά το στάδιο της κροκίδωσης οφείλεται στο θειικό αργύλιο που χρησιμοποιείται ως κροκιδωτικό.

3.2 Χαρακτηρισμός βιοεξανθρακώματος

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται ο χαρακτηρισμός του βιοεξανθρακώματος που χρησιμοποιήθηκε ως πληρωτικό υλικό στο πείραμα μας. Για το συγκεκριμένο υλικό πραγματοποιήθηκαν φυσικοχημικές αναλύσεις στο εργαστήριο Τεχνολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Πίνακας 6: Χαρακτηρισμός βιοεξανθρακώματος.

Παράμετρος	Τιμή
Απόδοση (%)	61,3
pH	9
pH _{PZC}	11,2
EC (μS/cm)	226
Τέφρα (%)	4,1
Ειδική επιφάνεια S_{BET} (m ² /g)	0,3
Φαινόμενη πυκνότητα (kg/m ³)	3,1
C (%)	89,1
N (%)	0,2
H (%)	3,4
S (%)	0

Το βιοεξανθράκωμα που χρησιμοποιήθηκε στο συγκεκριμένο πείραμα χαρακτηρίζεται από ένα πολύ καλό ποσοστό άνθρακα και ένα πολύ καλό ποσοστό τέφρας που δείχνει την απουσία ανόργανων στοιχείων με αποτέλεσμα την καλή αφομοίωση του άνθρακα στο εσωτερικό του βιοεξανθρακώματος. Επίσης, η μικρή ειδική επιφάνεια βρίσκεται σε συμφωνία με την επιφάνεια του χαλικιού και συμβάλλει στη διέλευση του λύματος και στη μείωση των πιθανοτήτων έμφραξης του συστήματος. Τέλος, η τιμή pH_{PZC} είναι τέτοια ώστε να χαρακτηρίζεται από εξαιρετική προσροφητική ικανότητα στα ανιόντα του όξινου στραγγίσματος.

Οι Albuquerque et al.(2013) παρασκεύασαν βιοεξανθράκωμα από ελιά στους 300-450 °C με απόδοση πυρόλυσης 60%. Παρατήρησαν pH 11, EC 1500 $\mu S/cm$ και φαινόμενη πυκνότητα 660 kg/m^3 . Οι Sanchez-Garcia et al. (2019) παρασκεύασαν βιοεξανθράκωμα από κλαδέματα ελιάς στους 400°C με απόδοση πυρόλυσης 31%. Παρατήρησαν pH 9,9, EC 590 $\mu S/cm$, ειδική επιφάνεια 50,4 m^2/cm και φαινόμενη πυκνότητα 458 kg/m^3 . Όσον αφορά τη στοιχειακή ανάλυση, οι Sanchez-Garcia et al.(2019) παρατήρησαν ποσοστό C 77,41%, H 3,38% και N 0,84%. Συγκρίνοντας με την παραπάνω βιβλιογραφία, η απόδοση της πυρόλυσης του βιοεξανθρακώματος που χρησιμοποιήθηκε στο συγκεκριμένο πείραμα ήταν αρκετά καλή, το pH είναι αλκαλικό συμφωνώντας με τη βιβλιογραφία, η EC είναι αρκετά χαμηλότερη και η ειδική επιφάνεια με την φαινομενική πυκνότητα είναι εξαιρετικά χαμηλότερη συγκριτικά με την παραπάνω βιβλιογραφία. Όσον αφορά τη στοιχειακή ανάλυση, οι τιμές του χρησιμοποιούμενου βιοεξανθρακώματος είναι πολύ κοντά σε εκείνες της παραπάνω βιβλιογραφίας, δίνοντας έμφαση στο ποσοστό του άνθρακα που ανέρχεται στο επαρκές 61,3%.

3.3 Επίδραση της θερμοκρασίας στην απόδοση απομάκρυνσης των ρύπων

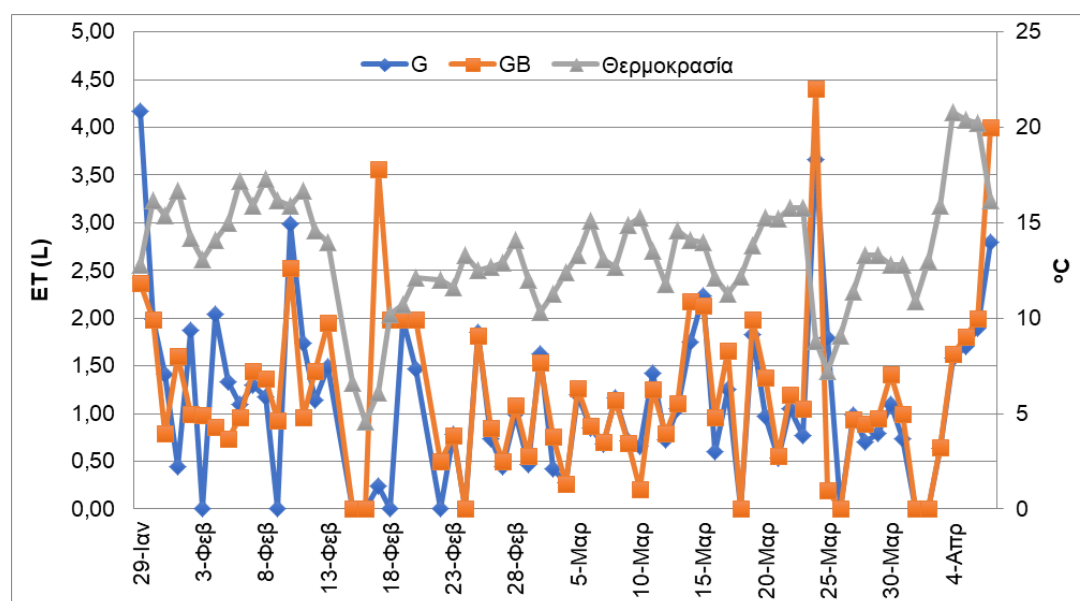
Το συγκεκριμένο πείραμα διεξήχθη σε περιοχή με εύκρατο μεσογειακό κλίμα και έτσι οι θερμοκρασίες ήταν καθ'όλη την διάρκεια πάνω από 0°C. Πιο συγκεκριμένα, η θερμοκρασία κατά το χρονικό διάστημα εκτέλεσης του πειράματος κυμάνθηκε από 0-21°C με ελάχιστη τους 4,6°C και μέγιστη τους 20,8°C. Είναι αρκετά σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη ο παράγοντας της θερμοκρασίας καθώς από εκείνη επηρεάζεται η μικροβιακή δραστηριότητα και η κατάλληλη ανάπτυξη των φυτών και επομένως η απόδοση απομάκρυνσης των ρύπων. Πιο αναλυτικά, σε χαμηλές θερμοκρασίες τα βακτήρια αδυνατούν να απομακρύνουν σε υψηλούς ρυθμούς ρύπους όπως το άζωτο και την αμμωνία και η ανάπτυξη της βλάστησης επιβραδύνεται. Όσον αφορά το οργανικό φορτίο, η θερμοκρασία δεν διαδραματίζει τόσο σημαντικό ρόλο στην απομάκρυνση του. Αυτό συμβαίνει γιατί οι αερόβιοι και αναερόβιοι μικροοργανισμοί, οι οποίοι ευθύνονται για την αποικοδόμηση του, λειτουργούν αποτελεσματικά ακόμα και σε χαμηλές θερμοκρασίες.

3.4 Επίδραση της εξατμισοδιαπνοής στην απομάκρυνση των ρύπων

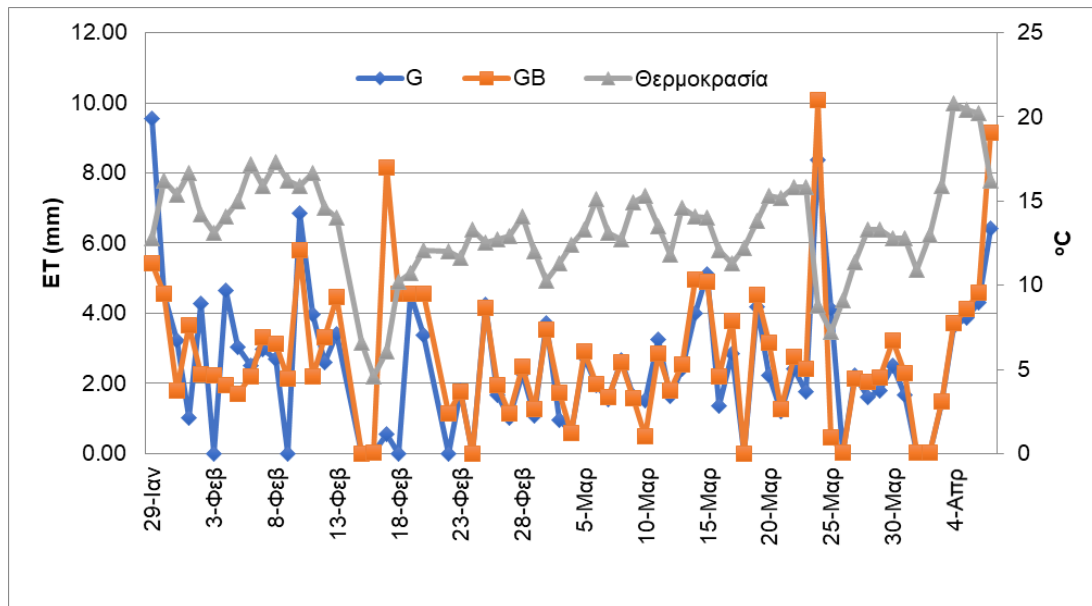
Εξατμισοδιαπνοή (ET) είναι οι απώλειες του νερού στην ατμόσφαιρα από το νερό, το έδαφος και τα φυτά. Όταν η εξατμισοδιαπνοή είναι υψηλή, οι εκροές είναι μειωμένες και επομένως αυξάνεται ο υδραυλικός χρόνος παραμονής με αποτέλεσμα την αύξηση των συγκεντρώσεων των δύσκολα αποικοδομήσιμων ρύπων. Επιπρόσθετα, όταν το ποσοστό του νερού βρίσκεται σε υψηλά επίπεδα όπως στις πιλοτικές μονάδες μικρής κλίμακας που χρησιμοποιήθηκαν στο συγκεκριμένο πείραμα, το ποσοστό της εξατμισοδιαπνοής είναι αντίστοιχα υψηλό. Σημαντικό ρόλο στην ποσότητα του νερού που απομακρύνεται μέσω της εξατμισοδιαπνοής διαδραματίζει και η θερμοκρασία καθώς τον χειμώνα όπου οι θερμοκρασίες είναι χαμηλότερες και οι ανάγκες των φυτών μικρότερες, μειώνεται και το ποσοστό της εξατμισοδιαπνοής. Από την άλλη, το καλοκαίρι όπου επικρατούν υψηλές θερμοκρασίες και ημέρες με έντονη ηλιακή ακτινοβολία και τα φυτά αναπτύσσονται με έντονους ρυθμούς, οι ρυθμοί της εξατμισοδιαπνοής αυξάνονται και παρατηρείται μείωση της στάθμης του νερού, συμπίκνωση του λύματος και αντίστοιχα αυξημένες συγκεντρώσεις των ρύπων στο λύμα.

Η μέση τιμή της εξατμισοδιαπνοής για την μονάδα G ήταν 1,15 L ή 2,63 mm και για την μονάδα GB ήταν 1,34 L ή 3,06 mm. Πιο αναλυτικά, η μέγιστη τιμή ET για την μονάδα G έφτασε τα 4,17 L ή 9,54 mm και για την μονάδα GB τα 5,08 L ή 11,63 mm. Η ελάχιστη τιμή για την μονάδα G ήταν 0.00 όπως και για την GB. Οι λεπτομέρειες για την μέτρηση της εξατμισοδιαπνοής παρουσιάζονται στο Παράρτημα Ι.

Παρακάτω παρουσιάζονται δυο διαγράμματα ET, το ένα εκφρασμένο σε L και το άλλο σε mm, των δύο μονάδων συναρτήσει της θερμοκρασίας.



Διάγραμμα1: Διάγραμμα ET (L) –θερμοκρασίας(°C) συναρτήσει της ημερομηνίας



Διάγραμμα 2: Διάγραμμα ET (mm) –θερμοκρασίας(°C) συναρτήσει τ ης ημερομηνίας

Όπως παρατηρούμε, τα διαγράμματα επαληθεύουν ορισμένα στοιχεία που προαναφέρθηκαν. Όπως για παράδειγμα ότι η ET επηρεάζεται άμεσα από την θερμοκρασία. Σύμφωνα με τα διαγράμματα, όταν η θερμοκρασία αυξάνεται, αυξάνεται ανάλογα και η ET ενώ ανάλογα μειώνεται και στην αντίθετη περίπτωση. Τέλος, η μονάδα με το βιοεξανθράκωμα εμφανίζει ελαφρώς μεγαλύτερες τιμές ET κατά μέσο όρο από τη μονάδα χωρίς το βιοεξανθράκωμα. Αυτό συμβαίνει κατά πάσα πιθανότητα γιατί το βιοεξανθράκωμα ενισχύει την ανάπτυξη των φυτών με αποτέλεσμα να αυξάνεται η συνολική φυτική μάζα απαιτώντας μεγαλύτερη ποσότητα νερού.

3.5 Φυσικοχημικές παράμετροι

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των διαφόρων παραμέτρων όπως του pH, της αγωγιμότητας, του COD, του NH₄-N, του NO₂-N, του NO₃-N, των TSS, του BOD, του TP και PO₄³⁻ και των βαρεών μετάλλων.

Οι μετρήσεις του pH και της αγωγιμότητας ξεκίνησαν στα μέσα Σεπτεμβρίου όντας δυο από τις βασικότερες παραμέτρους των συστημάτων. Όσον αφορά την τιμή του pH που επικράτει στο εσωτερικό των μονάδων, χρήζει ιδιαίτερης προσοχής καθώς επηρεάζει την απόδοση της νιτροποίησης και της απονιτροποίησης. Η αγωγιμότητα από την άλλη, πρέπει να ελέγχεται διότι η υψηλή αγωγιμότητα επιφέρει φαινόμενα φυτοτοξικότητας με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η ανάπτυξη των φυτών. Οι

μετρήσεις ξεκίνησαν στις 17 Νοεμβρίου 2020 και ολοκληρώθηκαν την 7 Απριλίου 2021. Οι μετρήσεις του BOD δεν πραγματοποιούνταν τακτικά στις εκροές των συστημάτων καθώς το BOD εισροής κυμαινόταν σε πολύ χαμηλά επίπεδα (69,3 mg/L) με αποτέλεσμα την μείωση σε τιμές <10 mg/L στην εκροή. Αυτό οφείλεται στην βιοαποικοδόμηση της οργανικής ύλης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι εξαιτίας του υψηλού ρυπαντικού φορτίου που είχε το στράγγισμα εισροής (π.χ. το COD 3066 mg/L και η EC 13,96 mS/cm), ήταν απαραίτητη η τροφοδοσία του στις μονάδες αρχικά με μια αραιώση ¼. Η συγκεκριμένη αραιώση είναι πολύ σημαντική έτσι ώστε τα φυτά να μπορέσουν να αναπτυχθούν.

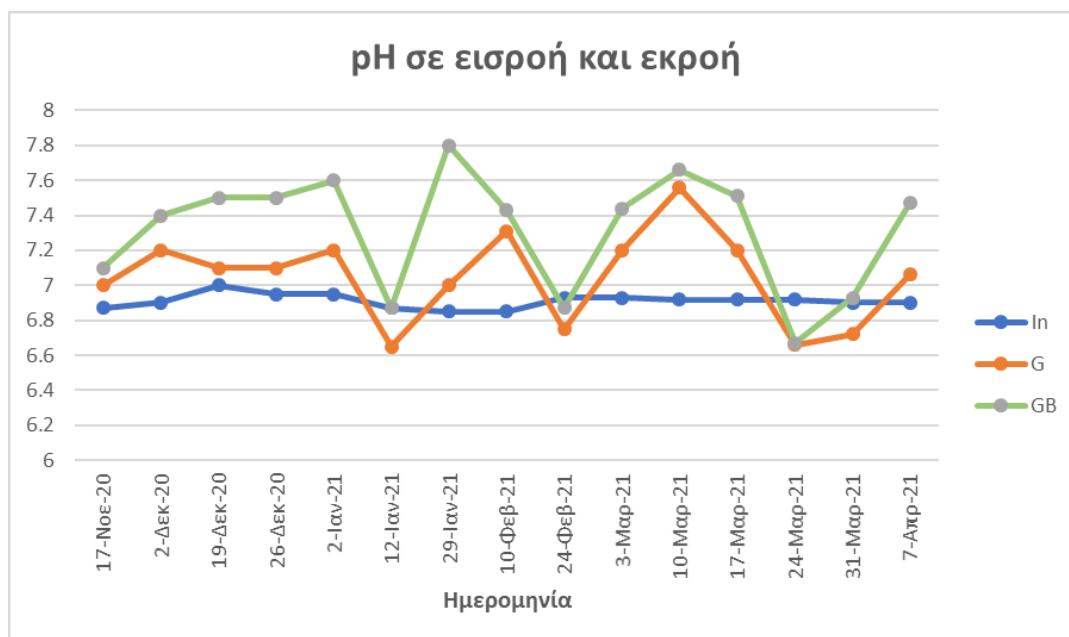
pH

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα δεδομένα των μετρήσεων του pH της εισροής και των εκροών των δύο μονάδων.

Πίνακας 7: Αποτελέσματα pH από τις πιλοτικές μονάδες

Παράμετρος		Εισροή	G	GB
pH	Μέση τιμή	6,91	7,05	7,32
	Μέγιστη τιμή	7	7,56	7,8
	Ελάχιστη τιμή	6.85	6,65	6,67
	Τυπική απόκλιση	0,04	0,26	0,34

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται οι διακυμάνσεις του pH στην εισροή και τις εκροές των δυο πιλοτικών μονάδων.



Διάγραμμα 3: Διάγραμμα τιμών του pH της εισροής και των εκροών των δυο μονάδων συναρτήσει της ημερομηνίας.

Με βάση το παραπάνω διάγραμμα, παρατηρείται μια μικρή διακύμανση του pH μεταξύ της εισροής και της εκροής. Σύμφωνα με τους Gupta et al. (2015) η συγκεκριμένη μεταβολή οφείλεται στην αποικοδόμηση της οργανικής ύλης στην οποία ευθύνονται οι υψηλές συγκεντρώσεις ανθρακικών, διττανθρακικών και θειικών αλάτων και αμμωνίας. Επίσης η μονάδα με το βιοεξανθράκωμα φαίνεται να παρουσιάζει λίγο υψηλότερες τιμές pH σε σχέση με την μονάδα χωρίς. Η αμελητέα αύξηση του pH στη μονάδα με το βιοεξανθράκωμα οφείλεται στην υψηλή αλκαλικότητα του βιοεξανθρακώματος καθώς και του $pH_{PZC}=11,2$ (Gupta et al., 2015).

Σύμφωνα με τους Gupta et al. (2015), μια πιλοτική μονάδα ΤΥ οριζόντιας υπόγειας ροής με πληρωτικό υλικό χαλίκι, φυτικό είδος κάννα και λύμα εισροής συνθετικό οικιακό λύμα με pH 7,3, το pH της εκροής της είναι 6,9 χωρίς την παρουσία βιοεξανθρακώματος. Δυο ακόμα συστήματα τα οποία μελετήθηκαν από τους ίδιους με την προσθήκη βιοεξανθρακώματος σε αναλογία 133,17kg χαλίκι, 33,15kg βιοεξανθράκωμα και 149,7kg χαλίκι και 16,5kg βιοεξανθράκωμα έδωσαν εκροές με pH 8,0 και 7,7 αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, οι Παραεναγγέλου et al., (2016) σε τρεις πιλοτικές μονάδες οριζόντιας ροής με χαλίκι ως πληρωτικό υλικό και αστικό λύμα με διαφορετικό φυτό ως βλάστηση στη καθεμία, παρατήρησαν επίσης μια αμελητέα διαφορά στο pH μεταξύ της εισροής και της εκροής $pH_{\text{εισροής}}=7,5$ και $pH_{\text{εκροής}}=6,9-7,8$.

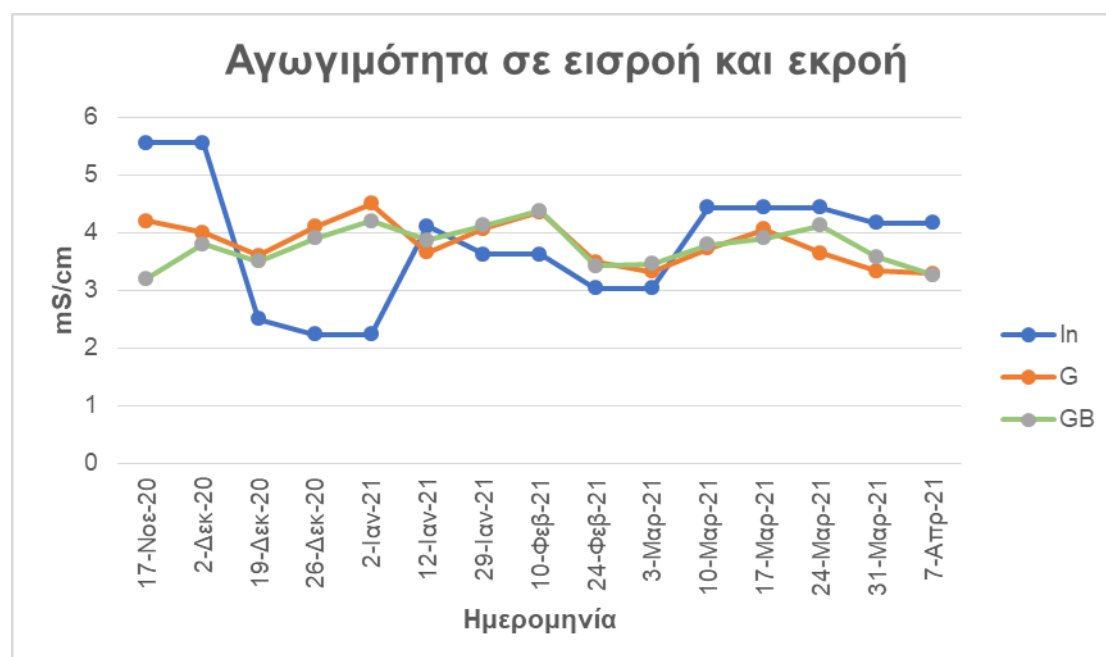
Αγωγιμότητα

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα δεδομένα των μετρήσεων της αγωγιμότητας της εισροής και των εκροών των δύο μονάδων.

Πίνακας 8: Αποτελέσματα EC από τις πιλοτικές μονάδες

Παράμετρος		Εισροή	G	GB
EC(mS/cm)	Μέση τιμή	3,80	3,82	3,76
	Μέγιστη τιμή	5,55	4,5	4,37
	Ελάχιστη τιμή	2,23	3,28	3,2
	Τυπική απόκλιση	1,05	0,39	0,35

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται οι διακυμάνσεις της αγωγιμότητας στην εισροή και τις εκροές των δυο πιλοτικών μονάδων.



Διάγραμμα 4: Διάγραμμα των τιμών EC της εισροής και των εκροών των δυο μονάδων συναρτήσει της ημερομηνίας.

Αρχικά πρέπει να αναφερθεί ότι τα δεδομένα των τιμών της αγωγιμότητας της εισροής συμπεριλαμβάνουν την αραιώση με νερό η οποία ήταν απαραίτητη καθώς το στράγγισμα εισροής είχε αρχική αγωγιμότητα που ξεπερνούσε τα 20 mS/cm. Μια τέτοια τιμή είναι πολύ πιθανό να προκαλέσει φαινόμενα φυτοτοξικότητας κατά την περίοδο ανάπτυξης των φυτών και εμποδισμού της σωστής ανάπτυξης τους.

Με βάση τους Wang et al. (2021) η μεταβολή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας μεταξύ της εισροής και της εκροής οφείλεται στη διαλυτότητα υλικού πλήρωσης όταν εκείνο

αλληλεπιδρά με το λύμα και την απελευθέρωση αλάτων. Η σταθερότητα που παρατηρείται στην αγωγιμότητα στις εκροές των δύο μονάδων οφείλεται στην περίοδο προσαρμογής των φυτών. Ειδικότερα, στην περίοδο ανάπτυξης τους τα φυτά έχουν μεγαλύτερες ανάγκες σε άλατα τα οποία απορροφούν από το λύμα. Οι παραπάνω παρατηρήσεις συμφωνούν και με τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου πειράματος καθώς οι τιμές της εισροής και των δύο εκροών βρίσκονται εξαιρετικά κοντά. Όπως παρατηρείται, τους δύο πρώτους μήνες λειτουργίας υπάρχουν σχετικές διακυμάνσεις των τιμών. Οι τιμές της αγωγιμότητας εισροής είναι ελαφρώς μικρότερες από εκείνες των εκροών, δεδομένου ότι και το χαλίκι ήταν ακόμη φρέσκο και ακόρεστο. Στη συνέχεια, καθώς ξεκινά η ανάπτυξη των φυτών και συνεπώς οι ανάγκες τους σε μικροστοιχεία είναι μεγαλύτερες, η αγωγιμότητα θα έπρεπε να παρουσιάσει μια μείωση. Όμως ταυτόχρονα παρατηρείται και αύξηση των τιμών εισροής, αλλά σταθερές λίγο πολύ τιμές εκροής.

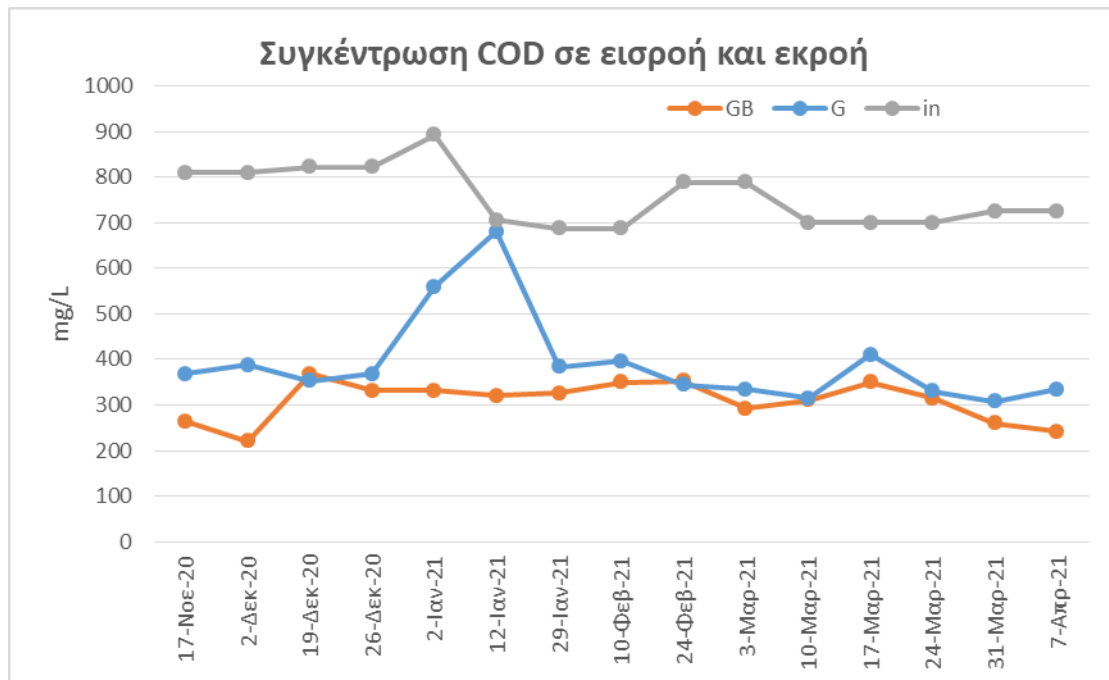
Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD)

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα δεδομένα των μετρήσεων για το COD της εισροής και των εκροών των δύο μονάδων.

Πίνακας 9: Αποτελέσματα COD από τις πιλοτικές μονάδες

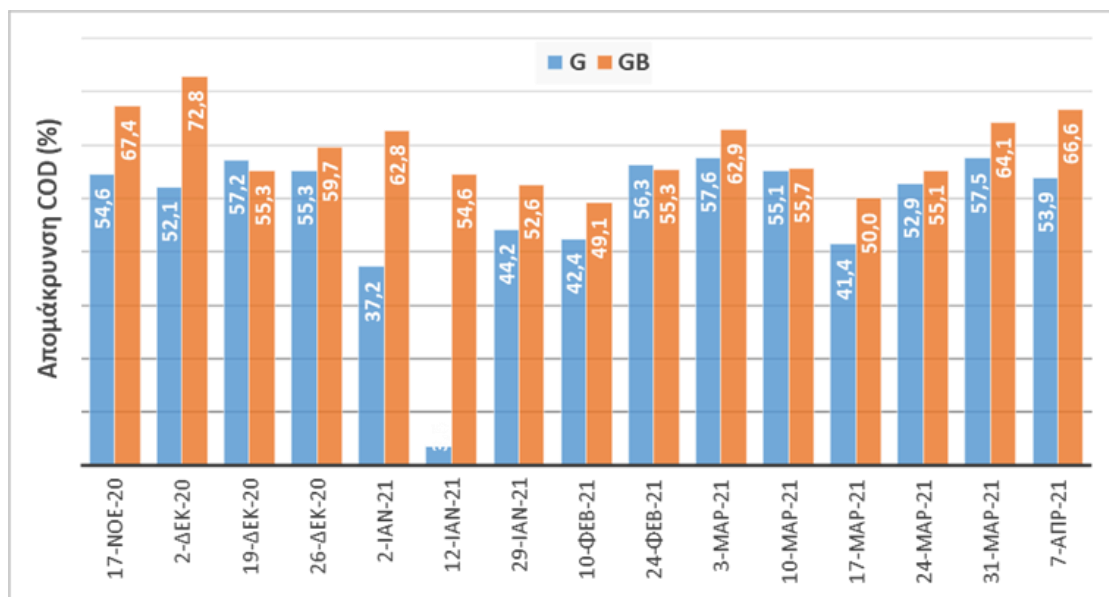
COD (mg/)	Εισροή	G	GB	G(%)	GB (%)
Μέση τιμή	757,7	391,3	308,8	48,1	58,9
Μέγιστη τιμή	892	680	368	57,6	72,8
Ελάχιστη τιμή	688	308	220	3,5	49,1
Τυπική απόκλιση	64,6	100,1	44,2	14	6,9

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται οι διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων του COD της εισροής και των εκροών των δυο μονάδων.



Διάγραμμα 5: Διάγραμμα διακυμάνσεων των συγκεντρώσεων του COD στην εισροή και τις εκροές των δύο πιλοτικών μονάδων.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται οι ποσοστιαίες απομακρύνσεις των συγκεντρώσεων του COD στις δύο πιλοτικές μονάδες σε συνάρτηση με τον χρόνο.



Διάγραμμα 6: Διάγραμμα ποσοστιαίων απομακρύνσεων του COD στην εισροή και τις εκροές των δύο πιλοτικών μονάδων.

Σύμφωνα με τα παραπάνω διαγράμματα, παρατηρείται ότι οι δυο μονάδες είναι αρκετά αποδοτικές στην απομάκρυνση του COD και με σχετικά σταθερές απομακρύνσεις. Όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα, η μονάδα που περιέχει

βιοεξανθράκωμα απομακρύνει σε καλύτερο βαθμό το COD από τημονάδα χωρίς βιοεξανθράκωμα.

Σύμφωνα με τους Bakhshoodeh et al., (2020), για επεξεργασία διασταλλάγματος από Χ.Υ.Τ.Α. η απόδοση απομάκρυνσης του COD κυμαίνεται στο $60 \pm 17\%$. Η σημαντική, αυτή, πτώση της συγκέντρωσης της οργανικής ύλης στις εκροές των μονάδων οφείλεται στις φυσικές και βιολογικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό του συστήματος. Στις φυσικές περιλαμβάνονται η καθίζηση και η διήθηση. Όσον αφορά την καθίζηση, η οργανική ύλη καθιζάνει και απομακρύνεται ενώ η διήθηση αφορά την κατακράτηση των οργανικών από τους κόκκους του πληρωτικού υλικού και από τα ριζώματα των φυτών. Στις βιολογικές διεργασίες, ο βακτηριακός μεταβολισμός διαδραματίζει ίσως τον σημαντικότερο ρόλο στην απομάκρυνση του COD.

Πιο αναλυτικά, δημιουργούνται διάφορα βιοφίλμ στο εσωτερικό της μονάδας τόσο πάνω στην επιφάνεια των κόκκων του πληρωτικού υλικού όσο και στα ανεπτυγμένα ριζώματα των φυτών. Πάνω σε αυτά, αναπτύσσονται μικροοργανισμοί οι οποίοι αποικοδομούν το οργανικό φορτίο. Σημαντικός παράγοντας για την αποτελεσματική αποικοδόμηση είναι η σωστή ισορροπία άνθρακα και οξυγόνου καθώς ο άνθρακας αποτελεί τροφή για τους μικροοργανισμούς και το οξυγόνο είναι απαραίτητο για τη δημιουργία αερόβιων συνθηκών. Σύμφωνα με τους Deng et al. (2021) μια πιλοτική μονάδα οριζόντιας ροής με χαλίκι ως πληρωτικό υλικό και συνθετικό οικιακό λύμα παρουσιάζει 83,3% απομάκρυνση COD για το σύστημα χωρίς βιοεξανθράκωμα και 89,9% για το σύστημα με βιοεξανθράκωμα από καλάμι. Με βάση τους Gupta et al. (2015) μια πιλοτική μονάδα οριζόντιας ροής με χαλίκι ως πληρωτικό υλικό, βλάστηση φυτού είδος κάννα και συνθετικό οικιακό λύμα παρουσιάζει 81,5% απομάκρυνση COD για το σύστημα χωρίς βιοεξανθράκωμα και 91,3% για το σύστημα με βιοεξανθράκωμα από βελανιδιά.

Επαληθεύεται, λοιπόν, ότι το βιοεξανθράκωμα συμβάλει στην αποικοδόμηση της οργανικής ύλης. Ο συγκεκριμένος τύπος τεχνητού υγροβιότοπου είναι αρκετά αποδοτικός στην απομάκρυνση της οργανικής ύλης καθώς τα επίπεδα του οξυγόνου στο εσωτερικό του συστήματος επαρκούν και θα καταναλωθούν κατά προτίμηση για την απομάκρυνση του οργανικού φορτίου. Αυτό οφείλεται τόσο στο οξυγόνο το οποίο διαχέεται στο σύστημα από την ατμόσφαιρα όσο και από τις ρίζες των φυτών οι οποίες μεταφέρουν το οξυγόνο στο εσωτερικό του συστήματος (Papaevangelou et al., 2016; Stefanakis et al., 2014).

Στο διάγραμμα 3 παρατηρείται μια σταθεροποίηση μετά τις 29 Ιανουαρίου η οποία οφείλεται στη σταδιακή ανάπτυξη των φυτών αλλά και στις σχετικά υψηλότερες θερμοκρασίες που σταδιακά επικρατούν. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η μονάδα με το βιοεξανθράκωμα παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα στην απομάκρυνση του COD καθώς το βιοεξανθράκωμα λειτουργεί ως πηγή άνθρακα την οποία εκμεταλλεύονται οι μικροοργανισμοί για την βιοαποικοδόμηση. Επιπρόσθετα, η πορώδης δομή του επιτρέπει την δημιουργία ενός περιβάλλοντος ανάπτυξης μικροοργανισμών και κατ' επέκταση βιοφίλμ (Yalcuk et al., 2009; Gupta, 2015). Τέλος, η οργανική ύλη δεσμεύεται στους πόρους του βιοεξανθράκωματος μέσω της πλήρωσής της και μέσω υδροφοβικών και ηλεκτροστατικών αλληλεπιδράσεων (Ρεγκουζας, 2017). Αυτοί είναι και οι λόγοι για τους οποίους η ποσοστιαία

απομάκρυνση του COD στη μονάδα με το βιοεξανθράκωμα είναι κατά μέσο όρο 10 μονάδες υψηλότερη. Η μέση απομάκρυνση του COD στη μονάδα με πληρωτικό υλικό μόνο το χαλίκι ήταν 48,1% ενώ στη μονάδα με το χαλίκι και το βιοεξανθράκωμα ήταν 58,9% (Vymazal et al., 1998; Vymazal, 2008)

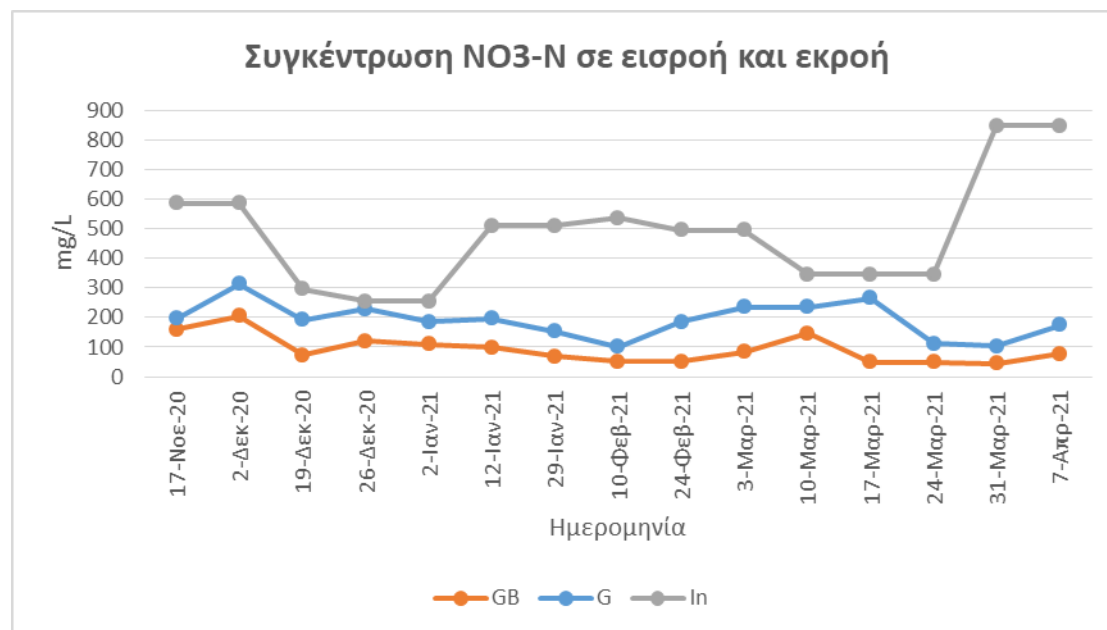
Νιτρικό άζωτο (NO₃-N)

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα δεδομένα των μετρήσεων του νιτρικού αζώτου της εισροής και των εκροών των δύο μονάδων.

Πίνακας 10: Αποτελέσματα NO₃-N από τις πιλοτικές μονάδες

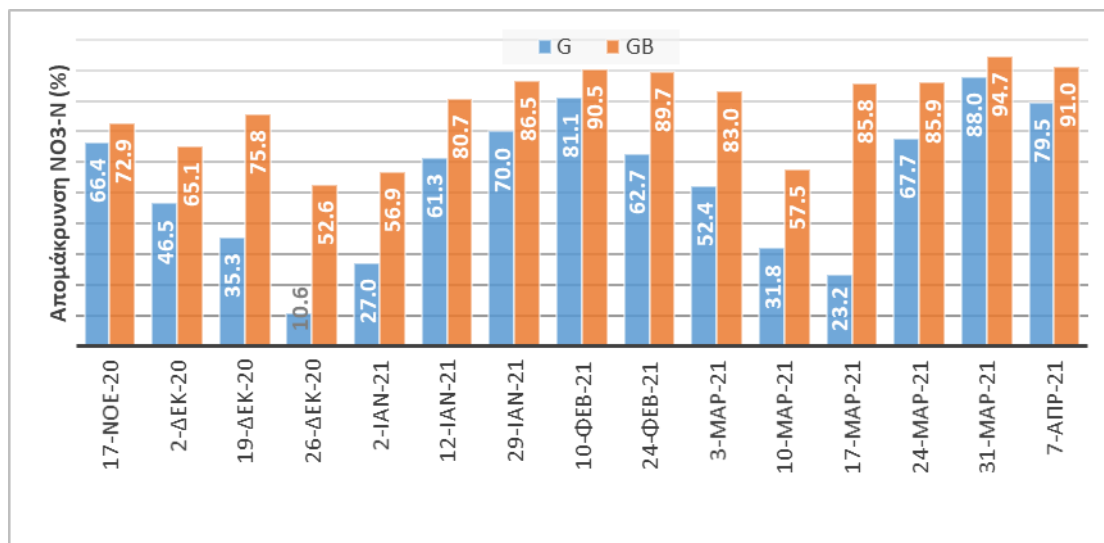
Παράμετρος		Εισροή	G	GB	G (%)	GB (%)
NO₃-N (mg/L)	Μέση τιμή	484,1	192	92,4	53,6	77,9
	Μέγιστη τιμή	848	313,96	204,9	88	94,7
	Ελάχιστη τιμή	255,3	101,06	45,06	10,6	52,6
	Τυπική απόκλιση	186,6	59,9	47,8	23,5	13,8

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται οι διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων του νιτρικού αζώτου στην εισροή και τις εκροές των δυο πιλοτικών μονάδων.



Διάγραμμα 7: Διάγραμμα διακυμάνσεων των συγκεντρώσεων του νιτρικού αζώτου στην εισροή και τις εκροές των δύο πιλοτικών μονάδων.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται οι ποσοστιαίες απομακρύνσεις των συγκεντρώσεων του νιτρικού αζώτου στις δυο πιλοτικές μονάδες σε συνάρτηση με τον χρόνο.



Διάγραμμα 8: Διάγραμμα ποσοστιαίων απομακρύνσεων του νιτρικού αζώτου στην εισροή και τις εκροές των δύο πιλοτικών μονάδων.

Τα αποτελέσματα και τα διαγράμματα δείχνουν ότι τα συγκεκριμένα συστήματα είναι αρκετά αποδοτικά στην απομάκρυνση του νιτρικού αζώτου και ιδίως η μονάδα με το βιοεξανθράκωμα. Ο βασικός μηχανισμός απομάκρυνσης του αυτού του ρύπου είναι η απονιτροποίηση. Ειδικότερα, στις αναερόβιες ζώνες της μονάδας, τα βακτήρια της απονιτροποίησης, με τις κατάλληλες ποσότητες νιτρικών και άνθρακα, μετατρέπουν το νιτρικό άζωτο σε αέριο άζωτο. Η πηγή ενέργειας αυτών των βακτηρίων προέρχεται από τις χημικές αντιδράσεις και για πηγή άνθρακα αξιοποιούν τις οργανικές ενώσεις. Η συγκεκριμένη διεργασία κλείνει και τον βιολογικό κύκλο απομάκρυνσης του αζώτου. Αυτός είναι και ο βασικός λόγος που επιλέχθηκε αυτός ο τύπος ΤΥ στο πείραμα καθώς παρέχει τις κατάλληλες αναερόβιες συνθήκες για την επεξεργασία ενός αποβλήτου με υψηλή περιεκτικότητα σε νιτρικά.

Το νιτρικό άζωτο είναι από τους ρύπους του οποίου η απομάκρυνση επωφελείται σε μεγάλο βαθμό από την προσθήκη μιας στρώσης βιοεξανθρακώματος. Αυτό συμβαίνει καθώς, ως πλούσια πηγή άνθρακα, παρέχει την επαρκή ποσότητα άνθρακα στα βακτήρια απονιτροποίησης τα οποία μαζί τα θρεπτικά αναπτύσσονται και πραγματοποιούν τη διεργασία της απονιτροποίησης σε υψηλή απόδοση. Ένα ακόμη στοιχείο του βιοεξανθρακώματος το οποίο ενισχύει την διεργασία αυτή, είναι το μεγάλο πορώδες του. Όπως έχει αναφερθεί, η απονιτροποίηση λαμβάνει χώρα κάτω από αναερόβιες συνθήκες. Έτσι λοιπόν, το μεγάλο πορώδες του βιοεξανθρακώματος παρέχει αυτές τις συνθήκες και ταυτόχρονα δίνεται η δυνατότητα ανάπτυξης βιοφίλμ, στοιχείο πολύ σημαντικό για την απομάκρυνση του αζώτου. Αυτοί είναι και οι λόγοι για τους οποίους η μέση απομάκρυνση του ρύπου στη

μονάδα με το χαλίκι ήταν 53,6%, ενώ στη μονάδα με το χαλίκι και το βιοεξανθράκωμα ήταν 77.9% (Vymazal, 2007; Yalcuk et al., 2009; Lavrova et al., 2009; Liu et al., 2011; Gupta, 2015; Κολιολιου, 2016; Bakhshoodeh et al., 2020).

Με βάση την μελέτη των Gupta et al. (2015), ένα σύστημα πιλοτικής μονάδα ΤΥ οριζόντιας υπόγειας ροής με πληρωτικό υλικό χαλίκι, βλάστηση κάννα και εισροή συνθετικό οικιακό λύμα παρουσιάζει απομάκρυνση νιτρικού αζώτου 82.8% χωρίς την προσθήκη βιοεξανθρακώματος. Επίσης, οι Gupta et al. (2015) μελέτησαν δυο ακόμα μονάδες με την παρουσία βιοεξανθρακώματος από βελανιδιά, η μία έχοντας αναλογία 133.17kg χαλίκι και 33.15kg βιοεξανθράκωμα και η άλλη 149.7kg χαλίκι και 16.5kg βιοεξανθράκωμα. Η πρώτη παρουσίασε απομάκρυνση του νιτρικού αζώτου 92.08% και η δεύτερη 89.6%. Είναι φανερό, λοιπόν, ότι το βιοεξανθράκωμα ενισχύει σε σημαντικό βαθμό την απομάκρυνση του συγκεκριμένου ρύπου στα συγκεκριμένα συστήματα.

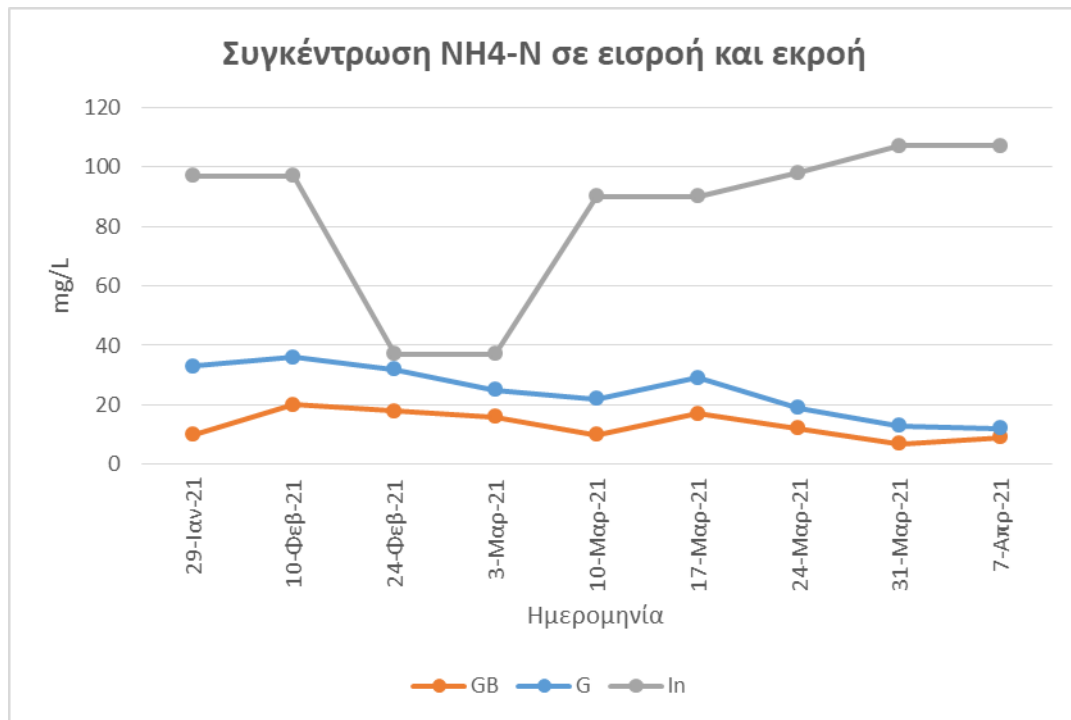
Αμμωνιακό άζωτο (NH₄-N)

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα δεδομένα των μετρήσεων για το αμμωνιακό άζωτο της εισροής και των εκροών των δύο μονάδων.

Πίνακας 11: Αποτελέσματα NH₄-N από τις πιλοτικές μονάδες

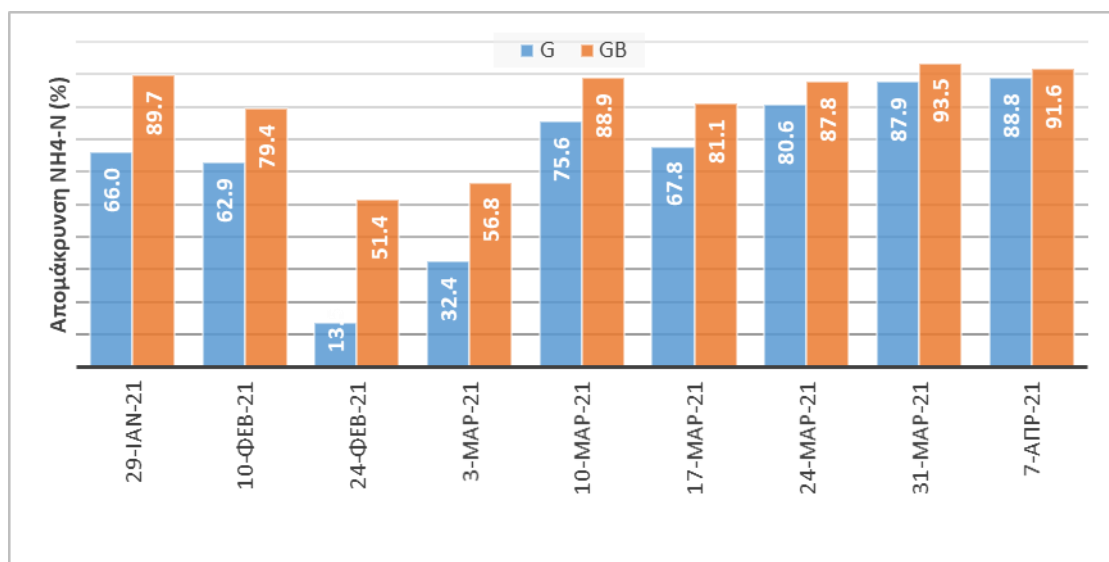
Παράμετρος		Εισροή	G	GB	G (%)	GB (%)
NH₄-N (mg/L)	Μέση τιμή	84,4	24,6	13,2	63,9	80
	Μέγιστη τιμή	107	36	20	88,8	93,5
	Ελάχιστη τιμή	37	12	7	13,5	51,4
	Τυπική απόκλιση	27,6	8,7	4,6	25,5	15,5

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται οι διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων του αμμωνιακού αζώτου στην εισροή και τις εκροές των δυο πιλοτικών μονάδων.



Διάγραμμα 9: Διάγραμμα διακυμάνσεων των συγκεντρώσεων του αμμωνιακού αζώτου στην εισροή και τις εκροές των δύο πιλοτικών μονάδων.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται οι ποσοστιαίες απομακρύνσεις των συγκεντρώσεων του αμμωνιακού αζώτου στις δυο πιλοτικές μονάδες σε συνάρτηση με τον χρόνο.



Διάγραμμα 10: Διάγραμμα ποσοστιαίων απομακρύνσεων του αμμωνιακού αζώτου στην εισροή και τις εκροές των δύο πιλοτικών μονάδων.

Παρατηρώντας τα διαγράμματα, φαίνεται ότι τα συστήματα δρουν αποτελεσματικά όσον αφορά την απομάκρυνση του αμμωνιακού αζώτου. Όπως και στη περίπτωση του COD, η μονάδα με το βιοεξανθράκωμα παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα σε σύγκριση με τη μονάδα χωρίς βιοεξανθράκωμα.

Ωστόσο, εξαιτίας της σχετικά χαμηλής ποσότητας οξυγόνου στο στρώμα φίλτρανσης και του υψηλού φορτίου αμμωνιακού αζώτου, η απομάκρυνση της αμμωνίας δεν είναι ολοκληρωτική σε σχέση άλλα συστήματα διαφορετικού τύπου τεχνητού υγροβιότοπου. Αυτό συμβαίνει γιατί το υπόστρωμα φίλτρανσης είναι διαρκώς κορεσμένο και το οξυγόνο που απελευθερώνουν οι ρίζες είναι περιορισμένο. Παρ' όλα αυτά, ενώ στο συγκεκριμένο πείραμα δεν χρησιμοποιείται ο τύπος τεχνητού υγροβιότοπου για αερόβια επεξεργασία, παρατηρείται μια αρκετά καλή απομάκρυνση του ρύπου στις εκροές των μονάδων. Ο βασικός μηχανισμός απομάκρυνσης του αμμωνιακού αζώτου είναι η νιτροποίηση. Πιο αναλυτικά, πρόκειται για μια βιολογική διεργασία κατά την οποία, με την βοήθεια βακτηρίων, αυστηρά στις αερόβιες ζώνες της μονάδας, το αμμωνιακό άζωτο μετατρέπεται σε νιτρικά. Τα νιτροποιητικά αυτά βακτήρια βασίζονται εξ' ολοκλήρου στην οξειδωση της αμμωνίας για ως πηγή ενέργειας για την ανάπτυξή τους.

Ένας ακόμη μηχανισμός απομάκρυνσης του αμμωνιακού αζώτου είναι η απορρόφηση των θρεπτικών από τα φυτά με σκοπό την ανάπτυξή τους. Αυτό πραγματοποιείται, όμως, μόνο αν συλληχθεί η παραγόμενη βιομάζα μόλις τελειώσει η περίοδος ανάπτυξης των φυτών. Τέλος, μια ακόμα διεργασία που συμβάλλει στην απομάκρυνση του αμμωνιακού αζώτου στο συγκεκριμένο πείραμα είναι η προσρόφηση του αμμωνίου με την βοήθεια των θετικά φορτισμένων ιόντων του, στους κόκκους του υποστρώματος. Και οι δύο αυτοί μηχανισμοί όμως έχουν περιορισμένη έκταση στο τρέχον πείραμα.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω το σύστημα με βιοεξανθράκωμα παρουσιάζει βελτιωμένη απόδοση. Αυτό συμβαίνει καθώς οι πόροι του βιοεξανθρακώματος παρέχουν κατάλληλες συνθήκες για την ανάπτυξη βακτηριακών κοινοτήτων με απώτερο σκοπό να απομακρύνουν το αμμωνιακό άζωτο (Deng et al., 2021). Επίσης, η παρουσία του βιοεξανθρακώματος ενισχύει την ανάπτυξη των φυτών, τα οποία έτσι δημιουργούν ένα πιο εκτεταμένο ριζικό σύστημα ενώ απορροφούν μεγαλύτερες ποσότητες αζώτου για να καλύψουν τις ανάγκες τους (Deng et al., 2021, Kasak et al., 2018). Στο συγκεκριμένο σημείο, πρέπει να αναφερθεί ότι η μεγάλη περιεκτικότητα του βιοεξανθρακώματος σε άνθρακα (69.1%) λειτουργεί ως τροφή για τους μικροοργανισμούς του δημιουργούμενου βιοφίλμ (Gupta et al., 2015). Η μέση απομάκρυνση του αμμωνιακού αζώτου στη μονάδα με πληρωτικό υλικό το χαλίκι ήταν 63,9% ενώ στη μονάδα με το χαλίκι και το βιοεξανθράκωμα ήταν 80%.

Σύμφωνα με τους Gupta et al. (2015) μια πιλοτική μονάδα ΤΥ οριζόντιας υπόγειας ροής με πληρωτικό υλικό χαλίκι, με βλάστηση φυτούκάννα και εισροή συνθετικό οικιακό λύμα παρουσιάζει απομάκρυνση του αμμωνιακού αζώτου 50% χωρίς βιοεξανθράκωμα και 58.3% για τη μονάδα με βιοεξανθράκωμα προερχόμενο από βελανιδιά. Επίσης, με βάση τους Deng et al. (2019), πιλοτικές μονάδες ΤΥ υπόγειας ροής με πληρωτικό υλικό χαλίκι, βλάστηση φυτού *Acorus calamus* και εισροή συνθετικό οικιακό λύμα, παρουσιάζει απομάκρυνση του αμμωνιακού αζώτου 47.4% χωρίς βιοεξανθράκωμα και 49.7% για τη μονάδα με βιοεξανθράκωμα προερχόμενο

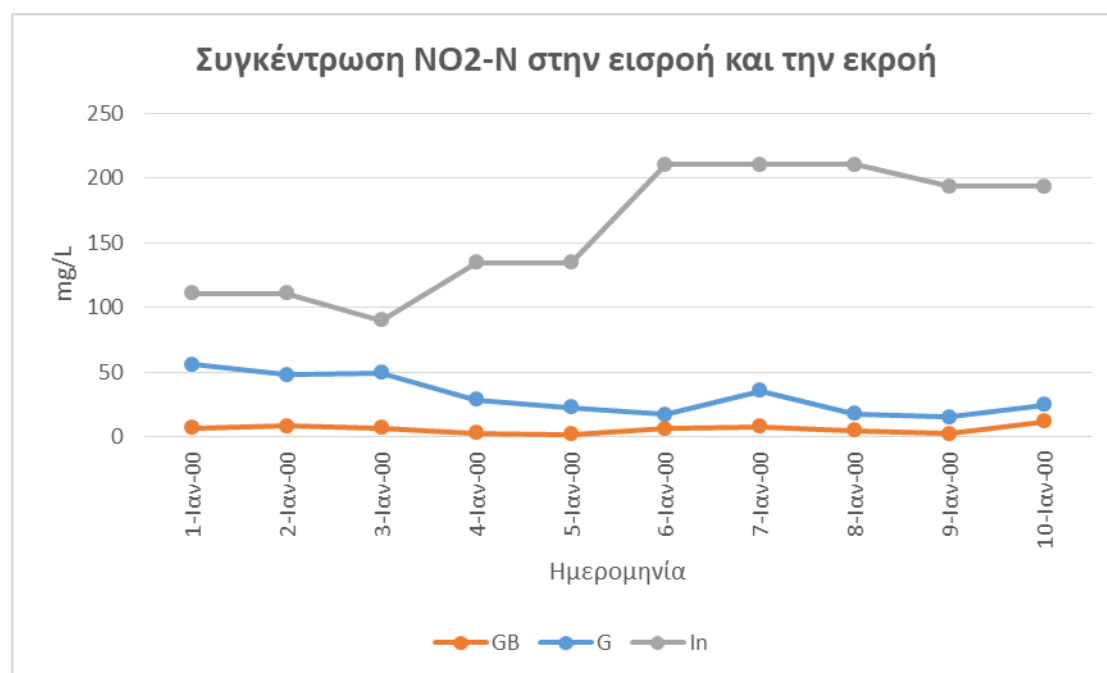
από καλάμι άχυρου. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με το τρέχον πείραμα, παρατηρούμε ότι η απομάκρυνση του αμμωνιακού αζώτου που παρουσίασαν τα συστήματα μας ήταν πολύ καλή.

Νιτρώδες άζωτο (NO₂-N)

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα δεδομένα των μετρήσεων για το νιτρώδες άζωτο της εισροής και των εκροών των δύο μονάδων.

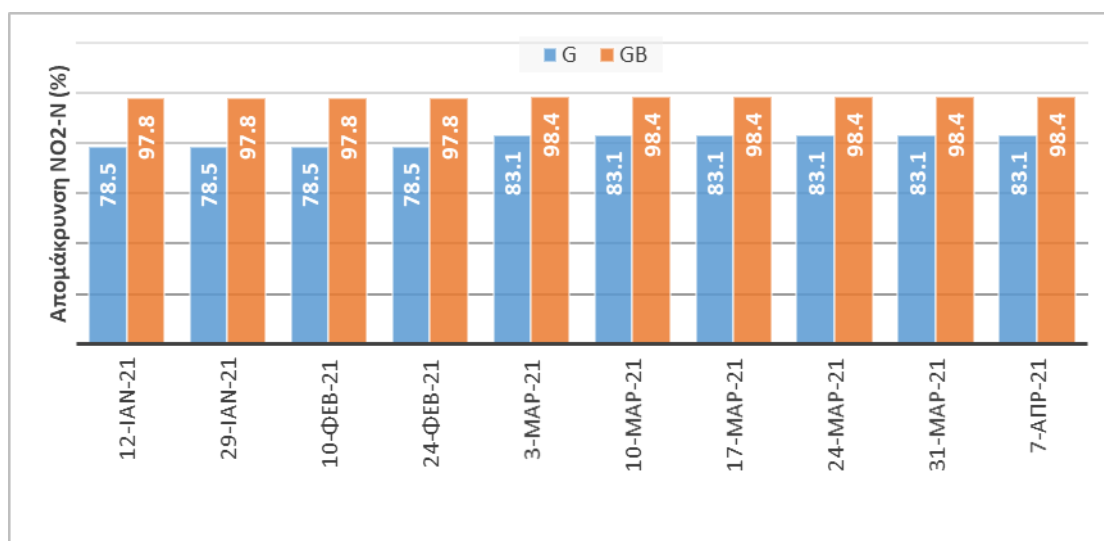
Πίνακας 12: Αποτελέσματα NO₂-N από τις πιλοτικές μονάδες

Παράμετρος		Εισροή	G	GB	G (%)	GB (%)
NO₂-N (mg/L)	Μέση τιμή	160,1	31,7	6,3	81,3	98,2
	Μέγιστη τιμή	210,6	56,2	12,1	83,1	98,4
	Ελάχιστη τιμή	90,1	15,4	2,1	78,5	97,8
	Τυπική απόκλιση	48,2	15	3,1	2,4	0,3



Διάγραμμα 11: Διάγραμμα διακυμάνσεων των συγκεντρώσεων του νιτρώδες αζώτου στην εισροή και τις εκροές των δύο πιλοτικών μονάδων.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται οι διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων του νιτρώδες αζώτου στην εισροή και τις εκροές των δυο πιλοτικών μονάδων.



Διάγραμμα12: Διάγραμμα ποσοστιαίων απομακρύνσεων του νιτρώδους αζώτουστην εισροή και τις εκροές των δύο πιλοτικών μονάδων.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται οι ποσοστιαίες απομακρύνσεις των συγκεντρώσεων του νιτρώδους αζώτου στις δυο πιλοτικές μονάδες σε συνάρτηση με τον χρόνο.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, παρατηρείται ότι η απομάκρυνση του νιτρώδους αζώτου είναι πολύ αποτελεσματική, ακόμη περισσότερο στη μονάδα με το βιοεξανθράκωμα. Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, ο βασικός μηχανισμός απομάκρυνσης του αζώτου στους ΤΥ οριζόντιας υπόγειας ροής είναι η νιτροποίηση και η απονιτροποίηση. Ο συγκεκριμένος τύπος αζώτου απομακρύνεται στο ενδιάμεσο στάδιο της απονιτροποίησης με την βοήθεια χημειολιθοτροφικών βακτηρίων που όμως χρησιμοποιούν ως τροφή όχι μόνο νιτρώδη αλλά και οργανικές ενώσεις.Αυτός είναι και ο λόγος ο οποίος η μονάδα με το βιοεξανθράκωμα προσίδει καλύτερα αποτελέσματα ως οργανική ένωση. Επιπρόσθετα το βιοεξανθράκωμα δημιουργεί συνθήκες περιβάλλοντος οι οποίες ευνοούν την ανάπτυξη των μικροβίων υπεύθυνα για την αποικοδόμηση του $\text{NO}_2\text{-N}$.Η πολύ αποτελεσματική απομάκρυνση του νιτρώδους αζώτου επαληθεύει ότι το συγκεκριμένο σύστημα ΤΥ ενδείκνυται για αναερόβια επεξεργασία, βασική προϋπόθεση της απονιτροποίησης. Η μέση απομάκρυνση του νιτρώδους αζώτου στη μονάδα με το χαλίκι ήταν 81,3% ενώ στη μονάδα με το βιοεξανθράκωμα 98,2% (Vymazal, 2007).

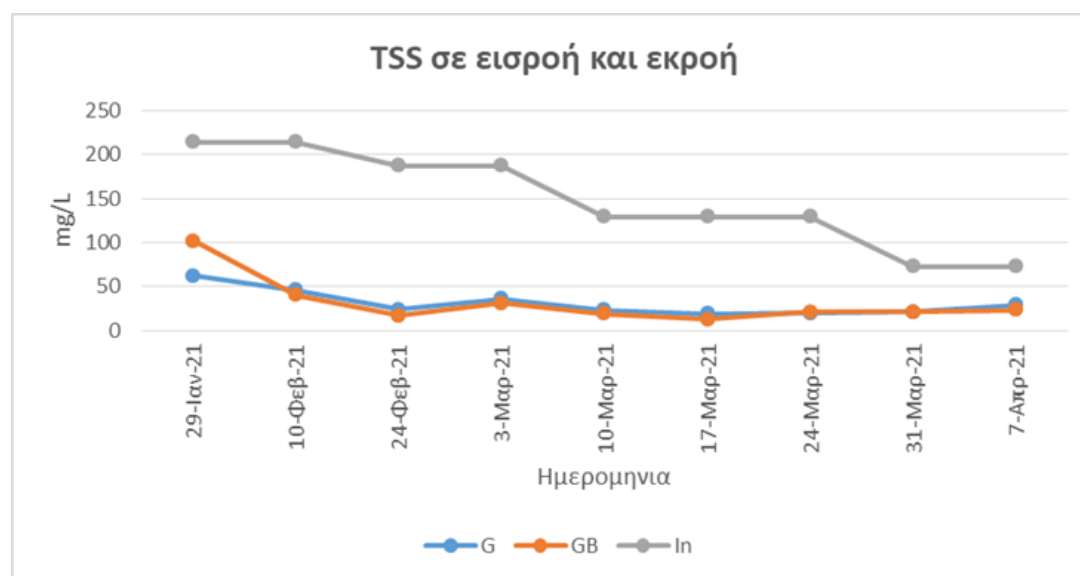
Ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS)

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα δεδομένα των μετρήσεων για τα ολικά αιωρούμενα στερεά της εισροής και των εκροών των δύο μονάδων.

Πίνακας 13: Αποτελέσματα TSS από τις πιλοτικές μονάδες

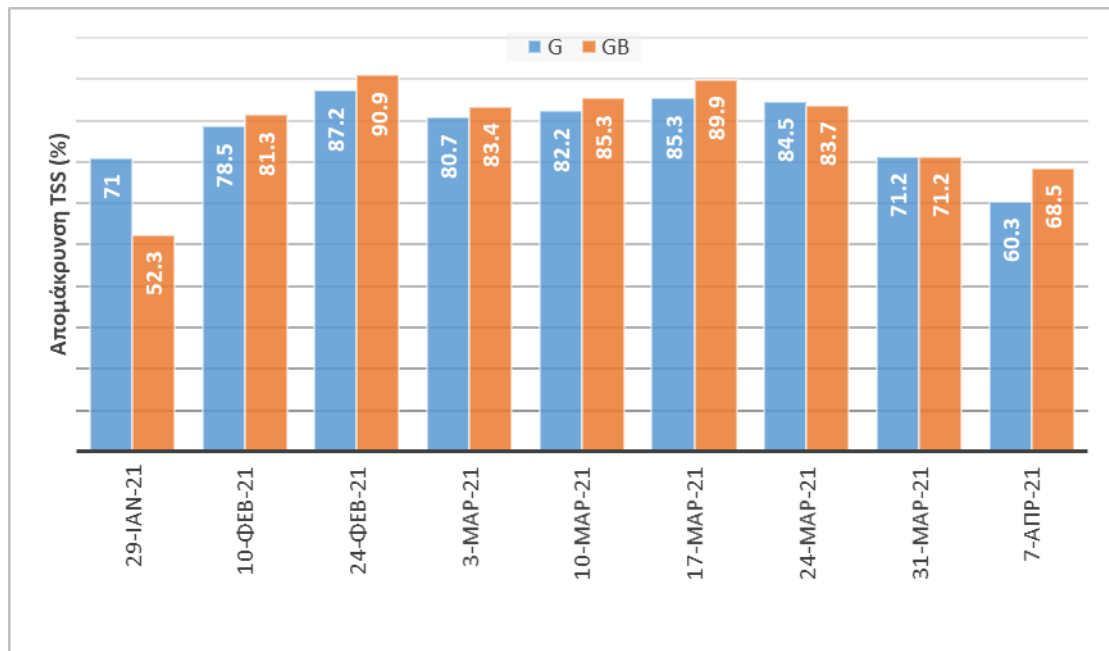
Παράμετρος		Εισροή	G	GB	G (%)	GB (%)
TSS (mg/L)	Μέση τιμή	148,3	31,1	31,9	77,9	78,5
	Μέγιστη τιμή	214	62	102	87,2	90,9
	Ελάχιστη τιμή	73	19	13	60,3	52,3
	Τυπική απόκλιση	54,9	14,5	27,5	8,8	12,4

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται οι διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων των ολικών αιωρούμενων στερεών στην εισροή και τις εκροές των δύο πιλοτικών μονάδων.



Διάγραμμα 13: Διάγραμμα διακυμάνσεων των συγκεντρώσεων των ολικών αιωρούμενων στερεών στην εισροή και τις εκροές των δύο πιλοτικών μονάδων.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται οι ποσοστιαίες απομακρύνσεις των συγκεντρώσεων των ολικών αιωρούμενων στερεών στις δύο πιλοτικές μονάδες σε συνάρτηση με τον χρόνο.



Διάγραμμα 14: Διάγραμμα ποσοστιαίων απομακρύνσεων των TSS στην εισροή και τις εκροές των δύο πιλοτικών μονάδων.

Σύμφωνα με τον Bakhshoodeh et al. (2020), η απομάκρυνση των TSS σε στράγγισμα από Χ.Υ.Τ.Α. κυμαίνεται στο $69.3 \pm 17\%$. Η απομάκρυνση των ολικών αιωρούμενων στερεών βρίσκεται σε αρκετά υψηλά επίπεδα στα συστήματα του συγκεκριμένου πειράματος. Οι κύριοι μηχανισμοί απομάκρυνσης είναι αποτέλεσμα φυσικών διεργασιών όπως η καθίζηση και η διήθηση. Όσον αφορά την καθίζηση, τα αιωρούμενα στερεά με την βοήθεια της βαρύτητας καθιζάνουν και απομακρύνονται, ενώ η διήθηση αφορά τη φίλτρωση των στερεών στους κόκκους του υποστρώματος και στα ριζώματα των φυτών. Ένας ακόμη μηχανισμός απομάκρυνσης είναι η απορρόφηση των σωματιδίων πάνω στα βιοφίλμ που αναπτύσσονται κατά μήκος του συστήματος. Τέτοιες περιοχές είναι τα ριζώματα των φυτών, η επιφάνεια του πληρωτικού υλικού αλλά και η επιφάνεια του βιοεξανθράκωματος γεγονός το οποίο εξηγεί και την καλύτερη απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών στη μονάδα με το βιοεξανθράκωμα. Ένα ακόμη πλεονέκτημα της μονάδας με το βιοεξανθράκωμα είναι οι διαθέσιμοι πόροι της επιφάνειας του οι οποίοι επιφέρουν την παγίδευση των αιωρούμενων σωματιδίων.

Παρόλα αυτά, μελέτες έχουν δείξει ότι τα πλεονεκτήματα που προσφέρει το βιοεξανθράκωμα δεν έχουν τόσο μεγάλη επίδραση στην απομάκρυνση των TSS. Το ίδιο παρατηρείται και στο διάγραμμα 11 όπου η διαφορά στην απομάκρυνση των δύο μονάδων είναι πολύ μικρή. Η μέση απομάκρυνση των TSS στη μονάδα με πληρωτικό υλικό μόνο το χαλίκι ήταν 77,9% ενώ στη μονάδα με το χαλίκι και το βιοεξανθράκωμα ήταν 78,5% (Vymazal et al., 1998; Bakhshoodeh et al., 2020).

Ολικός φώσφορος – Φωσφορικά (TP – PO₄³⁻P)

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα δεδομένα των μετρήσεων για τον ολικό φώσφορο και τα φωσφορικά της εισροής και των εκροών των δύο μονάδων

Πίνακας 14: Αποτελέσματα TP και PO₄³⁻ από τις πιλοτικές μονάδες

Παράμετρος		Εισροή	G	GB	G(%)	GB(%)
TP (mg/L)	Μέση Τιμή	0.5	0.0	0	89.9	92.9
	Μέγιστη τιμή	1.779	0.129	0.098	100	100
	Ελάχιστη Τιμή	0.362	0.0	0.0	71.97	78.71
	Τυπική απόκλιση	0.2	0.1	0.1	15.6	12.3
PO ₄ ³⁻ P (mg/L)	Μέση Τιμή	0.7	0.0	0.3	97.4	97.4
	Μέγιστη τιμή	1.258	0.0	0.0	100	100
	Ελάχιστη Τιμή	0.19	0.0	0.0	89.6	89.6
	Τυπική απόκλιση	0.6	0.1	0.6	5.2	5.2

Σύμφωνα με τους Gupta et al. (2015) μια πιλοτική μονάδα ΤΥ οριζόντιας υπόγειας ροής με πληρωτικό υλικό χαλίκι, βλάστηση κάννα και λύμα εισροής συνθετικό οικιακό λύμα παρουσιάζει απομάκρυνση ολικού φωσφορου 58.4% και φωσφορικών 56.5% χωρίς την παρουσία βιοεξανθράκωμα. Οι ίδιοι μελέτησαν δυο ακόμα συστήματα με την προσθήκη βιοεξανθράκωματος σε αναλογία 133.17kg χαλίκι, 33.15kg βιοεξανθράκωμα και 149.7kg χαλίκι, 16.5kg βιοεξανθράκωμα. Όσον αφορά την πρώτη, το ποσοστό απομάκρυνσης του ολικού φωσφόρου ήταν 70.1% και φωσφορικών 67.5% και για την δεύτερη 62.3% και 60.8% αντίστοιχα. Συγκρίνοντας, οι απομακρύνσεις του ολικού φωσφόρου και των φωσφορικών του συγκεκριμένου πειράματος είναι εξαιρετικές. Η μονάδα χωρίς το βιοεξανθράκωμα παρουσίασε απομάκρυνση TP και PO₄³⁻ 89.9% και 97.4% αντίστοιχα. Η μονάδα με το βιοεξανθράκωμα παρουσίασε απομάκρυνση TP και PO₄³⁻ 92.9% και 97.4% αντίστοιχα.

Οι βασικοί μηχανισμοί απομάκρυνσης του φωσφόρου είναι η βιολογική αποικοδόμηση, η καθίζηση και η προσρόφηση. Οι βιολογικές διεργασίες δεν διαδραματίζουν τόσο σημαντικό ρόλο στην απομάκρυνση του φωσφόρου, θετώντας τις χημικές διεργασίες όπως την προσρόφηση του φωσφόρου στην επιφάνεια του χαλικιού αλλά και στο βιοφίλμ που δημιουργείται κυρίως διεργασίες. Επιπλέον, ο φώσφορος δύναται να αφομοιώνεται από τα φυτά ως πηγή θρεπτικών για την ανάπτυξή τους, με βασική προϋπόθεση να αφαιρεθεί η βιομάζα μετά το πέρας της περιόδου ανάπτυξης τους.

Πρέπει να σημειωθεί πως ύστερα από τις πρώτες δειγματοληψίες παρατηρήθηκε η σταθερά αρκετά χαμηλή (<1 mg/L) συγκέντρωση φωσφόρου στο διαστάλαγμα και η

σχεδόν πλήρης απομάκρυνση τόσο του ολικού φωσφόρου όσο και των φωσφορικών. Για το λόγο, δεν συνεχίστηκε η ανάλυση του φωσφόρου στις εκροές των μονάδων στις επόμενες δειγματοληψίες.

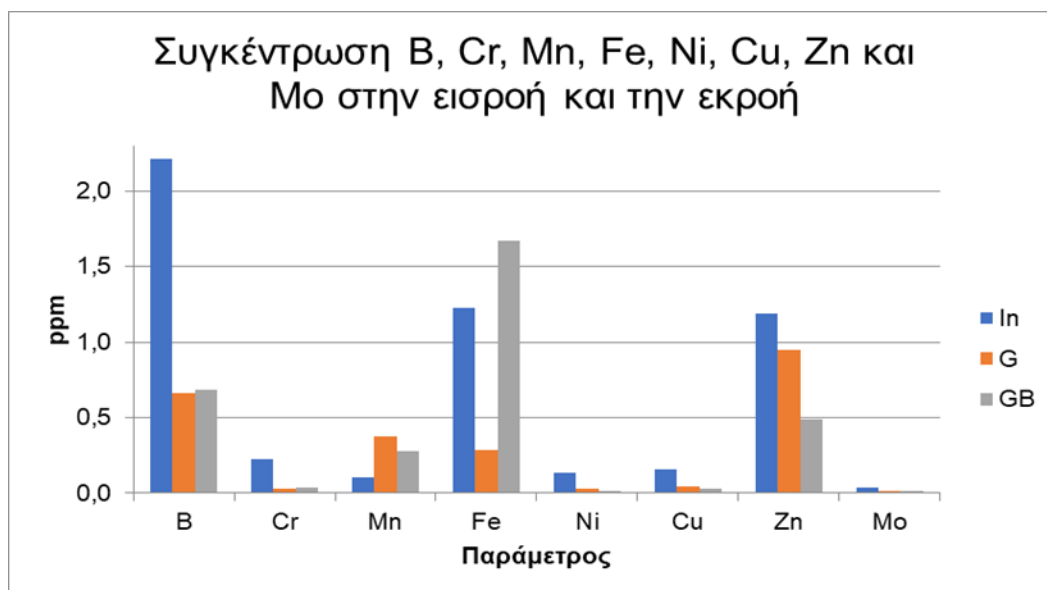
Βαρέα Μέταλλα και Μεταλλοειδή

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα δεδομένα των μετρήσεων για τα βαρέα μέταλλα και μεταλλοειδή B, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Mo της εισροής και των εκροών των δύο μονάδων

Πίνακας 15: Αποτελέσματα Βαρέων Μετάλλων και μεταλλοειδών B, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Mo

		B (ppm)	Cr (ppm)	Mn (ppm)	Fe (ppm)	Ni (ppm)	Cu (ppm)	Zn (ppm)	Mo (ppm)
IN	Μέση τιμή	2.22	0.227	0.111	1.0	0.143	0.17	1.24	0.037
	Μέγιστη τιμή	2.35	0.256	0.119	2.5	0.206	0.234	1.76	0.042
	Ελάχιστη τιμή	2.03	0.201	0.079	0.7	0.053	0.072	0.55	0.016
	Τυπική απόκλιση	0.12	0.021	0.012	0.5	0.046	0.054	0.41	0.008
G	Μέση τιμή	0.663	0.032	0.377	0.284	0.028	0.043	0.95	0.015
	Μέγιστη τιμή	0.791	0.056	0.503	0.425	0.088	0.131	1.442	0.053
	Ελάχιστη τιμή	0.566	0.02	0.209	0.206	0.01	0.023	0.589	0.004
	Τυπική απόκλιση	0.078	0.013	0.08	0.074	0.023	0.033	0.257	0.016
GB	Μέση τιμή	0.687	0.035	0.279	1.669	0.018	0.033	0.486	0.011
	Μέγιστη τιμή	0.798	0.061	0.430	7.886	0.042	0.065	0.868	0.037
	Ελάχιστη τιμή	0.631	0.021	0.149	0.178	0.009	0.019	0.188	0.003
	Τυπική απόκλιση	0.055	0.014	0.083	2.504	0.009	0.017	0.222	0.012

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται οι διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων των Βαρέων Μετάλλων και μεταλλοειδών B,Cr, Mn,Fe, Ni,Cu,Zn,Mo της εισροής και των εκροών των δυο μονάδων.



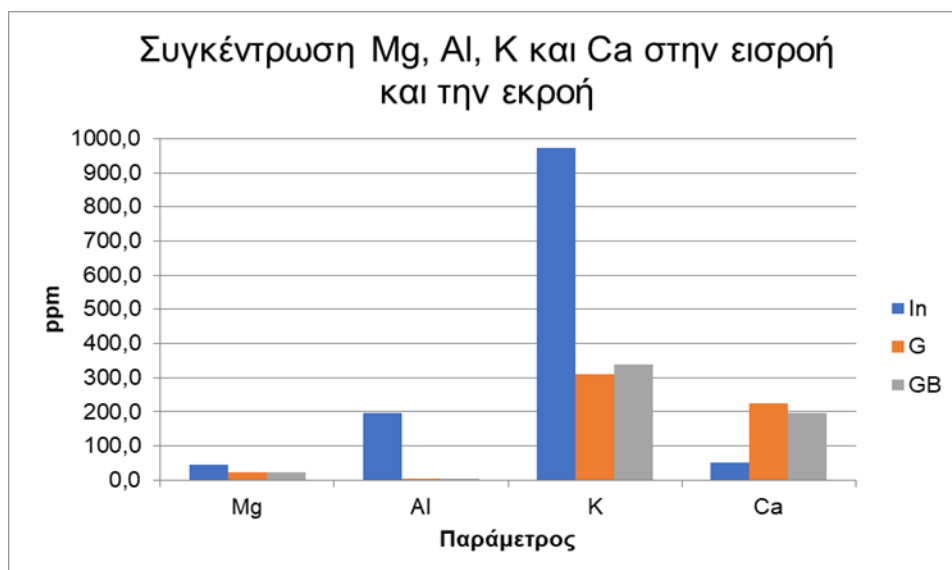
Διάγραμμα 15: Διάγραμμα διακυμάνσεων των συγκεντρώσεων των βαρέων μετάλλων και μεταλλοειδών B, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn και Mo στην εισροή και τις εκροές των δυο πιλοτικών μονάδων.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα δεδομένα των μετρήσεων για τα βαρέα μέταλλα και μεταλλοειδή Mg, Al, K, Ca και Ni της εισροής και των εκροών των δύο μονάδων.

Πίνακας 16: Αποτελέσματα Βαρέων Μετάλλων και μεταλλοειδών Mg, Al, K, Ca, Ni

		Mg (ppm)	Al (ppm)	K (ppm)	Ca (ppm)
IN	Μέση τιμή	43,1	197,5	971,9	50,8
	Μέγιστη τιμή	45,75	218,48	1070,75	60
	Ελάχιστη τιμή	39,25	179,98	835,5	38,5
	Τυπική απόκλιση	3	16,5	112,3	9,3
G	Μέση τιμή	22.39	1,46	310.65	224.29
	Μέγιστη τιμή	30.4	7.763	411.1	269.5
	Ελάχιστη τιμή	18.4	0.104	259.5	179.2
	Τυπική απόκλιση	3.28	2.313	43.646	27.41
GB	Μέση τιμή	23.49	2.778	337.18	196.85
	Μέγιστη τιμή	26.9	12.44	429.9	235.3
	Ελάχιστη τιμή	20	0.219	275.8	166.1
	Τυπική απόκλιση	2.126	4.337	42.286	22.941

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται οι διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων των Βαρέων Μετάλλων και μεταλλοειδών Mg, Al, K και Ca της εισροής και των εκροών των δυο μονάδων.



Διάγραμμα 16: Διάγραμμα διακυμάνσεων των συγκεντρώσεων των βαρέων μετάλλων και μεταλλοειδών Mg, Al, K και Ca στην εισροή και τις εκροές των δυο πιλοτικών μονάδων.

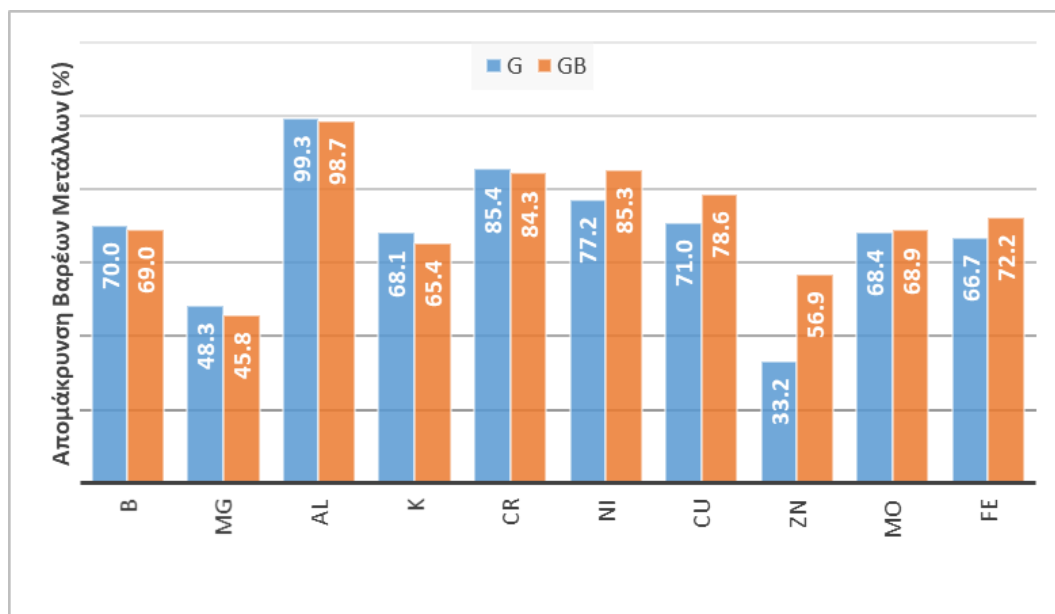
Όσον αφορά τα βαρέα μέταλλα και μεταλλοειδή ακολουθούν ορισμένες παρατηρήσεις. Αρχικά, το Ca βρίσκεται σε πολύ υψηλές συγκεντρώσεις στις εκροές, δεδομένου πως το χαλίκι που χρησιμοποιήθηκε ως πληρωτικό υλικό είναι ασβεστολιθικής σύστασης με αποτέλεσμα όταν έρχεται σε επαφή με το λύμα να απελευθερώνει ασβέστιο. Επιπλέον, η αραίωση που έγινε στο διαστάλλαγμα συνέβαλε πιθανόν σε αυτό, καθώς το νερό βρύσης που χρησιμοποιήθηκε για την αραίωση του διασταλλάγματος είχε αρκετά υψηλή συγκέντρωση Ca (Ca 30 mg/L, K 0.35 mg/L, Na 6.5 mg/L και Mg 10 mg/L) (Γκιουμές, 2014). Εν συνεχεία, παρατηρήθηκαν υψηλές συγκεντρώσεις Fe στις εκροές των μονάδων. Στις αναερόβιες συνθήκες που επικρατούν στα συστήματα οριζόντιας υπόγειας ροής, το Fe^{3+} απελευθερώνει Fe^{2+} στο σύστημα με αποτέλεσμα κατακράτηση του Fe στο εσωτερικό της μονάδας. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα μόνο η μονάδα με το βιοεξανθρακωμα παρουσιάζει αυξημένη συγκέντρωση Fe. Αυτό συμβαίνει καθώς οι οργανικές ενώσεις βοηθούν στην μετατροπή του Fe^{3+} σε Fe^{2+} όπου αυτό το ιόν, σε αντίθεση με τα υπόλοιπα μέταλλα, σχηματίζει ασταθή και διάλυμα σουλφίδια με αποτέλεσμα να αδυνατούν να μην απομακρύνονται από το σύστημα. Παρομοίως, το μαγγάνιο παρουσιάζει αυξημένη συγκέντρωση και στις δυο εκροές. Όπως και με τον σίδηρο, κάτω από αναερόβιες συνθήκες το Mn^{3+} μετατρέπεται σε Mn^{2+} του οποίου τα σουλφίδια είναι το ίδιο διαλυτά (Kröpfelová et al., 2009).

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι ποσοστιαίες απομακρύνσεις των συγκεντρώσεων των βαρέων μετάλλων και μεταλλοειδών B, Mg, Al, K, Cr, Ni, Cu, Mo, Zn και Fe στις δυο πιλοτικές μονάδες.

Πίνακας 17: Αποτελέσματα απομακρύνσεων (%) Βαρέων Μετάλλων B, Mg, Al, K, Cr, Ni, Cu, Zn, Mo, Fe

	(%)	B	Mg	Al	K	Cr	Ni	Cu	Mo	Zn	Fe
G	Μέση τιμή	70	48.3	99.3	68.1	85.4	77.2	71	68.4	33.2	66.7
	Μέγιστη τιμή	75.9	59.8	99.9	75.8	92	94.1	90.1	89.4	54.9	90.7
	Ελάχιστη τιμή	63	28	96.1	55.5	73.8	27.1	5.7	14.6	12.1	54.5
	Τυπική απόκλιση	4.6	8.6	1.2	6.3	6.9	20	25.2	27.2	13.5	10.6
GB	Μέση τιμή	69	45.8	98.7	65.4	84.3	85.3	78.6	68.9	56.9	72.2
	Μέγιστη τιμή	73.2	56.3	99.9	74.2	90.7	95.5	90.6	92.1	79.1	87.7
	Ελάχιστη τιμή	62.6	36.3	93.8	53.5	71.4	64.8	53.4	12.7	9.4	58
	Τυπική απόκλιση	3.1	6.1	2.1	6.4	7.5	9.5	11.7	30	25.8	9.8

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται οι ποσοστιαίες απομακρύνσεις των Βαρέων Μετάλλων και μεταλλοειδών B, Mg, Al, K, Cr, Ni, Cu, Zn, Mo και Fe στις δυο πιλοτικές μονάδες.



Διάγραμμα 17: Διάγραμμα ποσοστιαίων απομάκρυνσεων των βαρέων μετάλλων και μεταλλοειδών B, Mg, Al, K, Cr, Ni, Cu, Zn, Mo και Fe στην εισροή και τις εκροές των δυο μονάδων.

Με βάση τους Vymazal & Kröpfelová (2008), συστήματα ΤΥ οριζόντιας υπόγειας ροής παρουσιάζουν τα παρακάτω αποτελέσματα για τον μέσο όρο της απομάκρυνσης ορισμένων βαρέων μετάλλων. Το ποσοστό απομάκρυνσης του Al βασίστηκε σε 6 μελέτες και ήταν 73.5%, του Cr βασίστηκε σε 4 μελέτες και ήταν 69.6%, του Cu βασίστηκε σε 6 μελέτες και ήταν 81.0%, του Fe βασίστηκε σε 4 μελέτες και ήταν

53.41%, του Mn βασίστηκε σε 2 μελέτες και ήταν 76.52%, του Ni βασίστηκε σε 5 μελέτες και ήταν 74.7% και του Zn βασίστηκε σε 9 μελέτες και ήταν 80.0%. Συγκρίνοντας, συμπεραίνουμε ότι οι απομάκρυνσεις των μετάλλων που πραγματοποιήθηκαν στο συγκεκριμένο πείραμα είναι αρκετά ικανοποιητικές και υψηλότερες από τις απομακρύνσεις της βιβλιογραφίας, εκτός από του Cu και του Zn.

Σύμφωνα με τους Bakhshoodeh et al. (2020), συστήματα ΤΥ οριζόντιας υπόγειας ροής με λύμα εισροής στράγγισμα από χωματερή παρουσιάζουν τα παρακάτω αποτελέσματα για ορισμένα βαρέα μέταλλα. Το ποσοστό απομάκρυνσης του Cr βασίστηκε σε 5 μελέτες και ήταν $31.6 \pm 21\%$, του Cu βασίστηκε σε 4 μελέτες και ήταν $13.9 \pm 7\%$, του Ni βασίστηκε σε 6 μελέτες και ήταν $31.6 \pm 21\%$, του Pb βασίστηκε σε 5 μελέτες και ήταν $38.1 \pm 40\%$, του Zn βασίστηκε σε 6 μελέτες και ήταν $42.7 \pm 30\%$, του Fe βασίστηκε σε 5 μελέτες και ήταν $56.7 \pm 26\%$ και του Mn βασίστηκε σε 7 μελέτες και ήταν $49.0 \pm 32\%$. Συγκρίνοντας συμπεραίνουμε ότι οι απομακρύνσεις των μετάλλων του συγκεκριμένου πειράματος είναι αρκετά καλύτερες από εκείνες της βιβλιογραφίας.

Σύμφωνα με τους Vymazal & Šveha et al (2012), ένα σύστημα ΤΥ οριζόντιας υπόγειας ροής με πληρωτικό υλικό χαλίκι, βλάστηση *Salix viminalis* και αστικό λύμα εισροής παρουσιάζει ποσοστά απομακρύνσεων για το Mg 69%, για το K 43% και για το Ca 56%.

Με βάση τους Kröpfelová et al. (2009), δύο συστήματα ΤΥ οριζόντιας υπόγειας ροής με πληρωτικό υλικό χαλίκι, αστικό λύμα εισροής και βλάστηση *Phragmites Phalaris* το ένα σύστημα και *Phragmites* το άλλο, παρουσίασαν τις ακόλουθες απομακρύνσεις βαρέων μετάλλων: Al 91.2% και 80.2%, Zn 86% και 58.3%, Cu 84% και 41.7%, Pb 78% και 25.7%, Cr 67.6% και 27.1%, Mo 62.8% και 32.5%, Fe 55.6% και -358%, Ni 46% και -12%, Hg 38.9% και 47.4%, B 21.8% και 1.8%, Mn -21.9% και -25.5%.

Όσον αφορά την επίδραση του βιοεξανθρακώματος, έχει αποδειχθεί ότι είναι αρκετά αποτελεσματικό στην απομάκρυνση των βαρέων μετάλλων. Οι βασικοί τρόποι με τους οποίους επιδρά είναι η καθίζηση, η ηλεκτροστατική έλξη και η ανταλλαγή ιόντων. Όσον αφορά τις φυσικές διεργασίες, το βιοεξανθράκωμα αυξάνει τον αριθμό των αβιοτικών χώρων στους οποίους πραγματοποιείται η καθίζηση. Όσον αφορά τις χημικές διεργασίες, τα μέταλλα απομακρύνονται πρώτον με την αντικατάσταση των ιόντων που βρίσκονται ήδη στην επιφάνεια του βιοεξανθρακώματος με τα ιόντα των μετάλλων και δεύτερον μέσω των ηλεκτροστατικών αλληλεπιδράσεων μεταξύ της αρνητικά φορτισμένης επιφάνειας του βιοεξανθρακώματος και των κατιόντων των μετάλλων.

Κεφάλαιο 4: Συμπεράσματα

Αρχικά, ένας από τους βασικούς στόχους της συγκεκριμένης μελέτης είναι η εκτίμηση στη διαφορά της απόδοσης που επιφέρει το βιοεξανθράκωμα στα χρησιμοποιούμενα συστήματα. Συγκρίνοντας, λοιπόν, τα αποτελέσματα παρατηρούμε ότι η πιλοτική μονάδα με το βιοεξανθράκωμα παρουσιάζει καλύτερα ποσοστά απομάκρυνσης των ρύπων σε σχέση με εκείνη χωρίς το βιοεξανθράκωμα.

Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά το COD η μονάδα GB παρουσιάζει απομάκρυνση 58.9% ενώ η μονάδα G 48.1%. Για το $\text{NH}_4\text{-N}$ η μονάδα GB παρουσιάζει απομάκρυνση 80% ενώ η μονάδα G 63.9%. Για το $\text{NO}_2\text{-N}$ η μονάδα GB παρουσιάζει απομάκρυνση 98.2% ενώ η μονάδα G 81.3%. Για το $\text{NO}_3\text{-N}$ η μονάδα GB παρουσιάζει απομάκρυνση 77.9% ενώ η μονάδα G 53.6%. Για τα TSS η μονάδα GB παρουσιάζει απομάκρυνση 78.5% ενώ η μονάδα G 77.9%.

Επιπλέον, η πιλοτική μονάδα με το βιοεξανθράκωμα παρουσιάζει μεγαλύτερη εξατμισοδιαπνοή σε σύγκριση με εκείνη χωρίς το βιοεξανθράκωμα, εξαιτίας της συμβολής του βιοεξανθρακώματος στην καλύτερη ανάπτυξη της βλάστησης. Συμπεραίνουμε, λοιπόν, ότι το βιοεξανθράκωμα ενισχύει σε πολύ μεγάλο βαθμό την απόδοση απομάκρυνσης του ρυπαντικού φορτίου στα συγκεκριμένα συστήματα ΤΥ.

Το βιοεξανθράκωμα που χρησιμοποιήθηκε παρήχθη από κλαδέματα ελιάς. Ο λόγος για τον οποίο αυτό είναι πολύ σημαντικό αφορά το σεβασμό προς την βιωσιμότητα, την προστασία της βιοποικιλότητας και την κυκλική οικονομία. Καθώς γίνεται λόγος για ξυλώδη βιομάζα, αυτή ανανεώνεται φυσικά, και μιας οι ελίες από τις οποίες προέρχεται βρίσκονται στον Νομό Χανίων, δεν επηρεάζονται οικοσυστήματα άλλων περιοχών.

Όσον αφορά το βασικό υλικό πλήρωσης, το χαλίκι, είναι ευρέως διαδεδομένο για την χρήση στα συστήματα Τεχνητών Υγροβιότοπων, καθώς πρόκειται για ένα αδρανές υλικό το οποίο δεν αλληλεπιδρά με το διερχόμενο λύμα, αναπτύσσει ικανοποιητικά στρώματα βιοφίλμ στην επιφάνεια του και έχει σχετικά υψηλό πορώδες. Επομένως, η καινοτομία στο συγκεκριμένο σημείο αφορά τον συνδυασμό του χαλικιού με το βιοεξανθράκωμα και την απόδοση που μπορεί να επιφέρει το αποτέλεσμα αυτό.

Ο στόχος της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η εύρεση ενός εναλλακτικού τρόπου επεξεργασίας στραγγισμάτων από Χ.Υ.Τ.Α. Οι σημερινές μέθοδοι επεξεργασίας στραγγισμάτων δεν επιβαρύνουν μόνο το περιβάλλον αλλά και την οικονομία με τα μεγάλα ποσά ενέργειας που απαιτούνται για την λειτουργία των συμβατικών μονάδων επεξεργασίας. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο χρήζει ιδιαίτερης σημασίας η αντικατάσταση αυτών των μεθόδων με μεθόδους πιο οικολογικές και οικονομικές, προάγοντας την βιώσιμη ανάπτυξη. Το συγκεκριμένο ζήτημα, απασχολεί όλο και περισσότερο την επιστήμη καθώς η επεξεργασία και η διαχείριση των στραγγισμάτων που προέρχονται από Χ.Υ.Τ.Α. αποτελεί μείζον περιβαλλοντικό ζήτημα.

Η μέθοδος επεξεργασίας στραγγισμάτων που μελετήθηκε στο συγκεκριμένο πείραμα ήταν σύστημα τεχνητών υδροβιότοπων υπόγειας οριζόντιας ροής με πληρωτικό υλικό χαλίκι και βιοεξανθράκωμα από κλαδέματα ελιάς. Η συγκεκριμένη μελέτη έδειξε ότι τα οικολογικά αυτά συστήματα αποδίδουν σε πολύ καλό βαθμό στην απομάκρυνση του ρυπαντικού φορτίου των στραγγισμάτων. Συνολικά, με τα μέχρι στιγμής δεδομένα, κρίνεται επιτυχής η έκβαση του πειράματος. Η συνέχιση των δειγματοληψιών και χημικών αναλύσεων και κατά τους θερμούς μήνες θα δώσει μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα ως προς την καταλληλότητα αυτού του συστήματος να αντικαταστήσει μερικά στάδια των διεργασιών επεξεργασίας στραγγισμάτων του Χ.Υ.Τ.Α., οι οποίες λειτουργούν με συμβατικές μεθόδους.

Κεφάλαιο 5: Βιβλιογραφία

1. Ρεγκούζας, Π. (2017). Προσρόφηση ενδοκρινικών διαταρακτών σε βιοεξανθράκωμα από λυματολάσπη. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης: Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος. <https://doi.org/10.26233/heallink.tuc.67513>.
2. Ρεγκούζας, Π. (2015). ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΒΙΟ-ΕΞΑΝΘΡΑΚΩΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΤΟ ΟΡΓΑΝΙΚΟ ΚΛΑΣΜΑ ΤΩΝ ΑΠΟΡΡΙΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΓΙΑ ΑΓΡΟΝΟΜΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ. Χανιά, Πολυτεχνείο Κρήτης: Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος.
3. Μουργελά, Ρ.-Ν. (2018). Προσρόφηση (II) σε βιοεξανθράκωματα (biochars) διαφορετικών ειδών βιομάζας. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης. doi:10.26233/HEALLINK.TUC.78765.
4. Γκιουμέζ, Ι. (2014). ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΥΔΡΕΥΣΗΣ ΔΗΜΟΥ ΧΑΝΙΩΝ (ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ, ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΤΟΜΕΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ & ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ. Ανακτήθηκε από <https://aquaphor.online/filtra-nerou-aquaphor/Gkioumesloannis2014.pdf>.
5. Ε.Μ.Α.Κ., (n.d.). Ανακτήθηκε από: <https://www.dedisa.gr/e-m-a-k/>
6. Μονάδα επεξεργασίας στραγγισμάτων, (n.d.). Ανακτήθηκε από: <https://www.dedisa.gr/monada-epeksergasias-stragismatwn/>.
7. Χάβας, Γ. (2005). Συστήματα ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων. Από Τσαγκαράκης, Κ. (Ed.), ΒΙΟΕΞΥΓΙΑΝΣΗ ΧΩΡΩΝ ΔΙΑΘΕΣΗΣ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ (σ. 1–30). Ρέθυμνο, Ελλάδα Πανεπιστήμιο Κρήτης: ΤΕΕ/ΤΑΚ.
8. Κολιόλιου, Ν. (2016). ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΥΔΡΟΒΙΟΤΟΠΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΣΤΟΝ ΟΙΚΙΣΜΟ ΚΑΝΑΚΙΑ ΣΑΛΑΜΙΝΑΣ. Αθήνα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο: Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών.
9. Αντωνόπουλος, Α. (2011). ΑΔΡΑΝΗ ΥΛΙΚΑ. Αθήνα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο: Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών.

10. Κοτρόζος, Δ. (2015). Πειραματικές Διαδικασίες Ελέγχου και Μέθοδοι Αξιολόγησης Καταλληλότητας Αδρανών Υλικών. Αθήνα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο: Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών.
11. Αναγνωστοπούλου, Σ. (2012). ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΡΟΛΟΥ ΤΩΝ ΑΔΡΑΝΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ. Αθήνα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο: Σχολή Χημικών Μηχανικών.
12. Μάγγου, Β. (2013). Χαρακτηρισμός των στραγγισμάτων του ΧΥΤΑ της Αιγείρας στο Δήμο Αιγιαλείας και προτάσεις για την απορρύπανσή τους. Πάτρα, Πανεπιστήμιο Πατρών.
13. Πολίτη, Π.-Ε. (2018). Χρήση παραπροϊόντων αγροτοβιομηχανιών για την παραγωγή εμπορικών προϊόντων. Πάτρα, Πανεπιστήμιο Πατρών.
14. Πελλέρα, Φ.-Μ. (2011). ΧΡΗΣΗ ΒΙΟ-ΕΞΑΝΘΡΑΚΩΜΑΤΟΣ (BIOCHAR) ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΡΥΠΑΣΜΕΝΩΝ ΜΕ ΜΕΤΑΛΛΑ ΕΔΑΦΩΝ. Χανιά, Πολυτεχνείο Κρήτης: Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος.
15. Σοφιανός, Σ. (2016). ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΛΥΜΑΤΩΝ ΥΨΗΛΗΣ ΑΛΑΤΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΥΣ. Χανιά, Πολυτεχνείο Κρήτης: Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος.
16. Παπαδοπούλου, Α. (2013). Τεχνητοί Αστικοί και Κολυμβητικοί Υγρότοποι. Θεσσαλονίκη, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης: Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών – Γεωπονική Σχολή.
17. Κουτράκης, Μ. (1995). Ελληνικοί Υγρότοποι. Θεσσαλονίκη, Ελληνικό Κέντρο Βιότοπων – Υγρότοπων.
18. Ακράτος, Χ. (2006). ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΩΝ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΙΛΟΤΙΚΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ. Ξάνθη, Πολυτεχνική Σχολή Ξάνθης: Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος.
19. 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.
20. Albuquerque, A., Oliveira, J., Semitela, S., & Amaral, L. (2009). Influence of bed media characteristics on ammonia and nitrate removal in shallow horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Bioresource Technology*, 100(24), 6269–6277.
21. Alburquerque, J. A., Salazar, P., Barrón, V., Torrent, J., del Campillo, M. del C., Gallardo, A., & Villar, R. (2013). Enhanced wheat yield by biochar addition under different mineral fertilization levels. *Agronomy for Sustainable Development*, 33(3), 475–484.
22. Al-Wahaibi, B., Jafary, T., Al-Mamun, A., Baawain, M.S., Aghbashio, M., Tabatabaei, M., Stefanakis, A.I., 2021. Operational modifications of a full-scale experimental vertical flow constructed wetland with effluent recirculation to optimize total nitrogen removal. *Journal of Cleaner Production* 296, 126558, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126558>.

23. 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), 105725.
24. Białowiec, A., Davies, L., Albuquerque, A., & Randerson, P. F. (2012). The influence of plants on nitrogen removal from landfill leachate in discontinuous batch shallow constructed wetland with recirculating subsurface horizontal flow. *Ecological Engineering*, 40, 44–52.
25. Chang, J.-J., Wu, S.-Q., Dai, Y.-R., Liang, W., & Wu, Z.-B. (2012). Treatment performance of integrated vertical-flow constructed wetland plots for domestic wastewater. *Ecological Engineering*, 44, 152–159.
26. Cortes-Esquivel, J. A., Giacomán-Vallejos, G., Barceló-Quintal, I. D., Méndez-Novelo, R., & Ponce-Caballero, M. C. (2012). Heavy metals removal from swine wastewater using constructed wetlands with horizontal sub-surface flow. *Journal of Environmental Protection*, 03(08), 871–877.
27. Deng, C., Huang, L., Liang, Y., Xiang, H., Jiang, J., Wang, Q., ... Chen, Y. (2019). Response of microbes to biochar strengthen nitrogen removal in subsurface flow constructed wetlands: Microbial community structure and metabolite characteristics. *The Science of the Total Environment*, 694(133687), 133687.
28. Deng, S., Chen, J., & Chang, J. (2021). Application of biochar as an innovative substrate in constructed wetlands/biofilters for wastewater treatment: Performance and ecological benefits. *Journal of Cleaner Production*, 293(126156), 126156.
29. Dotro, G., Langergraber, G., Molle, P., Nivala, J., Puigagut, J., Stein, O., & von Sperling, M. (2017). Treatment Wetlands. *Water Intelligence Online*, 16, 9781780408774.
30. Ehrig, H. (1983). Quality and quantity of sanitary landfill leachate. *Waste Management & Research: The Journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA*, 1(1), 53–68.
31. El-Sheikh, M. A., Saleh, H. I., El-Quosy, D. E., & Mahmoud, A. A. (2010). Improving water quality in polluted drains with free water surface constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 36(10), 1478–1484.
32. Gaballah, M.S., Ismail, K., Aboagye, D., Ismail, M.M., Sobhi, M., Stefanakis, A.I., 2021. Effect of design and operational parameters on nutrients and heavy metals removal in pilot Floating Treatment Wetlands with Eichhornia Crassipes treating polluted lake water. *Environmental Science and Pollution Research*, <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12442-7>.
33. Gholipour, A., Stefanakis, A.I., 2021. A full-scale anaerobic baffled reactor and hybrid constructed wetland for university dormitory wastewater treatment and reuse in an arid and warm climate. *Ecological Engineering* 170, 106360.
34. Gomes, A.C., Silva, L., Albuquerque, A., Simões, R., Stefanakis, A.I., 2018. Investigation of lab-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands treating industrial cork boiling wastewater. *Chemosphere* 207, 430-439.

35. Gupta, P., Ann, T.-W., & Lee, S.-M. (2015). Use of biochar to enhance constructed wetland performance in wastewater reclamation. *Environmental Engineering Research*, 21(1), 36–44.
36. Headley., T. & Esser., D. (2019). LANDFILL LEACHATE TREATMENT. In Langergraber, G., Dotro, G., Nivala, J., Rizzo, A., & Stein, O. R. (Ed.), *Wetland Tgechnology: Practical Information on the Design and Application of Treatment Wetlands* (pp. 48–53). London, England: IWA Publishing.
37. Jeffery, S., Verheijen, F. G. A., van der Velde, M., & Bastos, A. C. (2011). A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 144(1), 175–187.
38. Kasak, K., Truu, J., Ostonen, I., Sarjas, J., Oopkaup, K., Paiste, P., ... Truu, M. (2018). Biochar enhances plant growth and nutrient removal in horizontal subsurface flow constructed wetlands. *The Science of the Total Environment*, 639, 67–74.
39. Kirmizakis, P., Tsamoutsoglou, C., Kayan, B., & Kalderis, D. (2014). Subcritical water treatment of landfill leachate: application of response surface methodology. *Journal of Environmental Management*, 146, 9–15.
40. Kröpfelová, L., Vymazal, J., Svehla, J., & Stíchová, J. (2009). Removal of trace elements in three horizontal sub-surface flow constructed wetlands in the Czech Republic. *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)*, 157(4), 1186–1194.
41. Langergraber, Günter, Dotro, G., Nivala, J., Rizzo, A., & Stein, O. R. (2019). *Wetland technology: Practical information on the design and application of treatment wetlands* (Guenter Langergraber, G. Dotro, J. Nivala, O. Stein, & A. Rizzo, Eds.). doi:10.2166/9781789060171
42. Lavrova, S., & Koumanova, B. (2010). Influence of recirculation in a lab-scale vertical flow constructed wetland on the treatment efficiency of landfill leachate. *Bioresource Technology*, 101(6), 1756–1761.
43. Lin, J. L., Tu, Y. T., Chiang, P. C., Chen, S. H., & Kao, C. M. (2015). Using aerated gravel-packed contact bed and constructed wetland system for polluted river water purification: A case study in Taiwan. *Journal of Hydrology*, 525, 400–408.
44. Liu, S., Yan, B., & Wang, L. (2011). The layer effect in nutrient removal by two indigenous plant species in horizontal flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 37(12), 2101–2104.
45. Madera-Parra, C. A., & Ríos, D. A. (2017). Constructed wetlands for landfill leachate treatment. In *Sustainable Heavy Metal Remediation* (pp. 121–163). Cham: Springer International Publishing.
46. Maiga, Y., von Sperling, M., & Mihelcic, J. R. (2019). Constructed Wetlands. In J. R. Mihelcic & M. E. Verbyla (Eds.), *Water and Sanitation for the 21st Century: Health and Microbiological Aspects of Excreta and Wastewater Management (Global Water Pathogen Project)*. Michigan State University.

47. Marzo, A., Cirelli, G. L., Milani, M., Dotro, G., Vymazal, J. (2019). HF WETLANDS. In Langergraber, G., Dotro, G., Nivala, J., Rizzo, A., & Stein, O. R. (Ed.), *Wetland Technology: Practical Information on the Design and Application of Treatment Wetlands* (pp. 95–96). London, England: IWA Publishing.
48. Maziarz, J., Vourlitis, G. L., & Kristan, W. (2019). Carbon and nitrogen storage of constructed and natural freshwater wetlands in southern California. *Ecological Engineering: X*, 2(100008), 100008.
49. Mojiri, A., Zhou, J. L., Ratnaweera, H., Ohashi, A., Ozaki, N., Kindaichi, T., & Asakura, H. (2021). Treatment of landfill leachate with different techniques: an overview. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 11(1), 66–96.
50. Naveen, B. P., Sivapullaiah, P. V., & Sitharam, T. G. (2014). *Characteristics of a municipal solid waste landfill leachate*. Unpublished.
51. Papaevangelou, V., Gikas, G. D., & Tsihrintzis, V. A. (2016). Effect of operational and design parameters on performance of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands treating university campus wastewater. *Environmental Science and Pollution Research International*, 23(19), 19504–19519. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7162-7>.
52. Papastavrou, C., Mantzavinos, D., & Diamadopoulos, E. (2009). A comparative treatment of stabilized landfill leachate: coagulation and activated carbon adsorption vs. electrochemical oxidation. *Environmental Technology*, 30(14), 1547–1553.
53. Parde, D., Patwa, A., Shukla, A., Vijay, R., Killedar, D. J., & Kumar, R. (2021). A review of constructed wetland on type, treatment and technology of wastewater. *Environmental Technology & Innovation*, 21(101261), 101261.
54. Polgar, G., & Jaafar, Z. (2017). *Endangered forested wetlands of Sundaland: Ecology, connectivity, conservation* (1st ed.). Basel, Switzerland: Springer International Publishing.
55. Ramírez S., Torrealba G., Lameda-Cuicas E., Molina-Quintero L., Stefanakis A.I., Pire-Sierra M.C., 2019. Investigation of pilot-scale Constructed Wetlands treating simulated pre-treated tannery wastewater under tropical climate. *Chemosphere* 234, 496-504
56. Renou, S., Givaudan, J. G., Poulain, S., Dirassouyan, F., & Moulin, P. (2008). Landfill leachate treatment: Review and opportunity. *Journal of Hazardous Materials*, 150(3), 468–493.
57. Rizzo, A., Tondera, K., Pálffy, T. G., Dittmer, U., Meyer, D., Schreiber, C., ... Masi, F. (2020). Constructed wetlands for combined sewer overflow treatment: A state-of-the-art review. *The Science of the Total Environment*, 727(138618), 138618.
58. Sánchez-García, M., Cayuela, M. L., Rasse, D. P., & Sánchez-Monedero, M. A. (2019). Biochars from Mediterranean agroindustry residues: Physicochemical properties relevant for C sequestration and soil water retention. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7(5), 4724–4733.

59. Samecka-Cymerman, A., Stepień, D., & Kempers, A. J. (2004). Efficiency in removing pollutants by constructed wetland purification systems in Poland. *Journal of Toxicology and Environmental Health. Part A*, 67(4), 265–275.
60. Schultze-Nobre, L., Wiessner, A., Bartsch, C., Paschke, H., Stefanakis, A.I., Aylward, L.A., Kusch, P., 2017. Removal of dimethylphenols and ammonium in laboratory-scale horizontal subsurface flow Constructed Wetlands. *Engineering in Life Sciences* 17 (12), 1224-1233.
61. Šereš, M., Innemanová, P., Hnátková, T., Rozkošný, M., Stefanakis, A.I., Semerád, J., Cajthaml, T., 2021. Evaluation of Hybrid Constructed Wetland Performance and Reuse of Treated Wastewater in Agricultural Irrigation. *Water* 13(9), 1165, <https://doi.org/10.3390/w13091165>.
62. Sharma, R., Vymazal, J., & Malaviya, P. (2021). Application of floating treatment wetlands for stormwater runoff: A critical review of the recent developments with emphasis on heavy metals and nutrient removal. *The Science of the Total Environment*, 777(146044), 146044.
63. Stefanakis, A.I., Prigent, S., Breuer, R., 2018. Integrated produced water management in a desert oilfield using wetland technology and innovative reuse practices, in: Stefanakis, A.I. (ed.), *Constructed Wetlands for industrial wastewater treatment*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK, pp. 25-42.
64. Stefanakis, A. (2019). The role of constructed wetlands as green infrastructure for sustainable urban water management. *Sustainability*, 11(24), 6981.
65. Stefanakis, A., Akrotos, C. S., & Tsihrintzis, V. A. (2014). *Vertical flow constructed wetlands: Eco-engineering systems for wastewater and sludge treatment*. Philadelphia, PA: Elsevier Science Publishing.
66. Stefanakis, A. I. (Ed.). (2018). *Constructed wetlands for industrial wastewater treatment*. Nashville, TN: John Wiley & Sons.
67. Stefanakis, A. I. (2020). Constructed Wetlands: Description and benefits of an Eco-tech water treatment system. In *Waste Management* (pp. 503–525). IGI Global.
68. 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>.
69. Stefanakis, A. I., Akrotos, C. S., Gikas, G. D., & Tsihrintzis, V. A. (2009). Effluent quality improvement of two pilot-scale, horizontal subsurface flow constructed wetlands using natural zeolite (clinoptilolite). *Microporous and Mesoporous Materials: The Official Journal of the International Zeolite Association*, 124(1–3), 131–143.
70. Stefanakis, A. I., & Tsihrintzis, V. A. (2012a). Effects of loading, resting period, temperature, porous media, vegetation and aeration on performance of pilot-scale vertical flow constructed wetlands. *Chemical Engineering Journal (Lausanne, Switzerland: 1996)*, 181–182, 416–430.

71. Stefanakis, A.I. and Tsihrintzis, V.A., 2012a. Use of zeolite and bauxite as filter media treating the effluent of Vertical Flow Constructed Wetlands. *Microporous and Mesoporous Materials* 155, 106-116
72. Stefanakis, A.I. and Tsihrintzis, V.A., 2012b. 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.
73. Stefanakis, A. I., & Tsihrintzis, V. A. (2012b). Use of zeolite and bauxite as filter media treating the effluent of Vertical Flow Constructed Wetlands. *Microporous and Mesoporous Materials: The Official Journal of the International Zeolite Association*, 155, 106–116.
74. Trein, C. M., Banc, C., Maciejewski, K., de Moraes Motta, A., Gourdon, R., Molle, Gautier, M., von Sperling, M. (2020). French vertical flow treatment wetlands in a subtropical climate: Characterization of the organic deposit layer and comparison with systems in France. *The Science of the Total Environment*, 742(140608), 140608.
75. Verheijen, Frank & Jeffery, Simon & Bastos, Ana & Velde, Marijn & Diafas, Iason. (2010). Biochar Application to Soils – A Critical Scientific Review of Effects on Soil Properties, Processes and Functions.
76. Vymazal, J. (2007). Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *The Science of the Total Environment*, 380(1–3), 48–65.
77. Vymazal, J. (2008). Constructed wetlands for wastewater treatment: A review. *Water (Basel)*.
78. Vymazal, J. (2013). Emergent plants used in free water surface constructed wetlands: A review. *Ecological Engineering*, 61, 582–592.
79. Vymazal, J., & Březinová, T. (2016). Accumulation of heavy metals in aboveground biomass of *Phragmites australis* in horizontal flow constructed wetlands for wastewater treatment: A review. *Chemical Engineering Journal (Lausanne, Switzerland: 1996)*, 290, 232–242.
80. Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P. F., Haberl, R., Perfler, R., Laber, J. (1998). Removal mechanisms and types of constructed wetlands. *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Europe*.
81. Vymazal, Jan, & Šveha, J. (2012). Removal of alkali metals and their sequestration in plants in constructed wetlands treating municipal sewage. *Hydrobiologia*, 692(1), 131–143.
82. 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), 112813.
83. Yadav, A., Chazarenc, F., & Mutnuri, S. (2018). Development of the “French system” vertical flow constructed wetland to treat raw domestic wastewater in India. *Ecological Engineering*, 113, 88–93.

84. Yalcuk, A., & Ugurlu, A. (2009). Comparison of horizontal and vertical constructed wetland systems for landfill leachate treatment. *Bioresource Technology*, 100(9), 2521–2526.
85. Zahui, F.M., Quattara, J.M.P., Kamagate, M., Coulibaly, L., Stefanakis, A.I., 2021. Effect of Plant Species on the Performance and Bacteria Density Profile in Vertical Flow Constructed Wetlands for Domestic Wastewater Treatment in a Tropical Climate. *Water* 13(24), 3485; <https://doi.org/10.3390/w13243485>.
86. Zhang, S., Xiao, R., Liu, F., Zhou, J., Li, H., & Wu, J. (2016). Effect of vegetation on nitrogen removal and ammonia volatilization from wetland microcosms. *Ecological Engineering*, 97, 363–369.