



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

---

**Μελέτη αποτελεσματικότητας τεχνητού υγροβιότοπου με  
αλόφυτα για την απομάκρυνση Cd, Ni και Zn από αστικά  
λύματα**

**Ροζαλία Αγιουτάντη**

## **ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

Καθ. Καλογεράκης Νικόλαος (Επιβλέπων Καθηγητής)

Καθ. Γκίκας Πέτρος

Δρ. Μανουσάκη Ελένη

**Δεκέμβριος 2018**



*Στους γονείς μου Αικατερίνη και Ζαχαρία,  
που πάντα με στηρίζουν.*



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια, η εκτενής χρήση των βαρέων μετάλλων σε διάφορες δραστηριότητες συνεπάγεται την παρουσία τους σε σημαντικές ποσότητες στις Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων (ΕΕΥΑ) ή στο υδάτινο περιβάλλον. Συνεπώς η ρύπανση των υδάτινων αποδεκτών ή των νερών επαναχρησιμοποίησης λόγω της ανεπαρκούς επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων αποτελεί πλέον μείζον πρόβλημα. Η εφαρμογή των κατάλληλων συστημάτων και διεργασιών επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων και συγκεκριμένα των αστικών λυμάτων, κρίνεται απαραίτητη ώστε να μειωθεί το ρυπαντικό τους φορτίο.

Οι τεχνητοί υγροβιότοποι έχουν αποδειχθεί πολύ αποτελεσματική τεχνολογία για την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων. Είναι μηχανικά συστήματα, σχεδιασμένα και κατασκευασμένα σύμφωνα με τις λειτουργίες των φυσικών υγροβιότοπων, όπως την βλάστηση, το έδαφος και τους μικροβιακούς πληθυσμούς για την αντιμετώπιση των ρυπαντών στο νερό ή στις ροές αποβλήτων. Έχουν χαμηλό κόστος, χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις, είναι ιδιαίτερα απλοί στον χειρισμό και στην συντήρηση τους και ικανοί να πετύχουν απομάκρυνση πολλών διαφορετικών ρύπων.

Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης ερευνήθηκε η απόδοση ενός τεχνητού υγροβιότοπου οριζόντιας ροής για την απομάκρυνση των βαρέων μετάλλων Cd, Ni και Zn, από δευτερογενώς επεξεργασμένα λύματα, με την χρήση των αλόφυτων *Juncus acutus* L. Ο τεχνητός υγροβιότοπος ήταν εγκατεστημένος στον Βιολογικό Καθαρισμό των Χανίων, με λειτουργικό όγκο 57 λίτρων και υπόστρωμα από χαλίκι που κάλυπτε καλά τις ρίζες των φυτών.

Η εισροή που τροφοδοτούσε τον υγροβιότοπο αποτελούνταν από δύο παροχές, η πρώτη ήταν λύμα που αντλούνταν από την εκροή της δευτεροβάθμιας επεξεργασίας του Βιολογικού Καθαρισμού, ενώ η δεύτερη παροχή ήταν τεχνητά ρυπασμένη με ένα διάλυμα Cd, Ni και Zn. Η δεύτερη παροχή σχεδιάστηκε να συναντά την παροχή του λύματος και μαζί τροφοδοτούσαν τον υγροβιότοπο με παροχές από 2 έως 2.6 l/h. Οι παροχές αυτές οδηγούσαν σε υδραυλικό χρόνο παραμονής (HRT) 1 έως 1.2 μέρες. Η στάθμη του υγροβιότοπου παρέμενε πάντα σταθερή.

Δειγματοληψίες πραγματοποιούνταν από την εισροή και την εκροή του υγροβιότοπου κάθε 24 ώρες οι οποίες μετριούνταν για το pH, EC, ORP, DO, TDS και τις συγκεντρώσεις των Ni, Cd, Zn. Μια φορά την βδομάδα πραγματοποιούνταν μετρήσεις για ολικό φώσφορο και άζωτο, BOD, COD και TSS.

Τα αποτελέσματα μετά από επτάμηνη συνεχή λειτουργία του συστήματος, έδειξαν ότι ο τεχνητός υγροβιότοπος είναι σε θέση να επεξεργαστεί το ρυπασμένο νερό με βαρέα μέταλλα. Για το Cd σημειώθηκε απομάκρυνση 67-88%, για το Ni σημειώθηκε 23-50% απομάκρυνση και για το Zn 49-59%, με τις τιμές των συγκεντρώσεων τους στην εκροή να είναι κάτω από τα όρια για την επαναχρησιμοποίηση λυμάτων σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Ένωση. Ακόμα το σύστημα έδειξε ότι είναι ικανό να επιτύχει μείωση του ολικού N, ολικού P και των TSS.

## ABSTRACT

In recent years, the extensive use of heavy metals in numerous activities lead to the accumulation of significant concentrations of them in Wastewater Treatment Plants (WWTP) or in the aquatic environment. The pollution of the marine environment or the recycled water due to inadequate processing of waste water is a major environmental problem. The aptly processing of waste water, specifically municipal wastewater, with the use of efficient technologies is essential, so that the pollutant load will decrease.

Constructed Wetlands (CWs) are among the proven efficient technologies for wastewater treatment. They are mechanical systems, designed and constructed according to the functions of natural wetlands, like the vegetation, the substrate and the microbial activity for water and wastewater treatment. They are low cost, low-energy, easily operated and maintained, able to achieve multiple goals of contaminant removal and have a strong potential for application in developing countries, particularly by small rural communities.

The goal of this work is the remediation of secondary treated municipal wastewaters polluted with heavy metals by a halophyte-based constructed wetland with the specific aim to explore the performance of a *Juncus acutus* L. based CW mesocosm for the removal of Cd, Ni and Zn from secondary treated wastewater.

A horizontal subsurface flow (HSF) CW mesocosm (1x0.5x0.5m) of 57 L working volume with *Juncus acutus* L. plants is operated in the Wastewater Treatment Plant of the city of Chania in Greece. The influent CW wastewater consists of two fluxes: the 1st is wastewater directed from the outlet of the secondary treatment of the WWTP and the 2nd flux is artificially polluted water with Cd, Ni and Zn. The second flux is directed to meet the wastewater flux and together are pumped onto the gravel bed at fixed rates from 2 to 2.6 L/h; resulting at a 1-1.2-day hydraulic retention time (HRT). The CW water level remained always constant.

Samples are collected at the inlet and outlet every 24h and analyzed for pH, EC, ORP, DO, TDS and Cd, Ni and Zn concentrations. Once a week, the samples are analyzed also for total nitrogen, total phosphorus, COD, BOD and TSS.

The results of 7 months of continuous operation indicate that the system is able to treat heavy metal polluted wastewater as tertiary treatment. The removal capacities were 67-80% for Cd, 49-59% for Zn and 23-50% for Ni. Moreover, the system seems to achieve also reduction of total N, total P and TSS.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή Καλογεράκη Νικόλαο για την ανάθεση αυτού του θέματος, την βοήθεια που μου παρείχε καθώς και την έμπνευση που μου πρόσφερε.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω θερμά την Δρ. Μανουσάκη για την συνεχή της καθοδήγηση και επιστημονική βοήθεια καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Ευχαριστώ επίσης και τον καθηγητή Πέτρο Γκίκα για την συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή.

Τέλος, ευχαριστώ ακόμα την Maria-Liliana Saru για τις μετρήσεις των μετάλλων στο ICP-MS που πάντα πραγματοποιούσε με μεγάλη συνέπεια και τον Χριστοφιλόπουλο Σταύρο για την πολύτιμη καθοδήγηση και την απλόχερη βοήθεια του στις τεχνικές δυσκολίες που προέκυπταν σε όλη την διεξαγωγή του πειράματος.

# ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<b>1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	2
1.2 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΚΕΦΑΛΑΙΩΝ .....	2
<b>2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ .....</b>	<b>4</b>
2.1 ΒΑΡΕΑ ΜΕΤΑΛΛΑ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ .....	4
2.1.1 Πηγές και μορφές του καδμίου, του νικελίου και του ψευδάργυρου.....	5
2.1.2 Επιπτώσεις των υπό μελέτη βαρέων μετάλλων στην υγεία .....	7
2.1.3 Κάδμιο, νικέλιο και ψευδάργυρος στον ελληνικό χώρο .....	8
2.2 ΑΣΤΙΚΑ ΛΥΜΑΤΑ ΚΑΙ ΒΑΡΕΑ ΜΕΤΑΛΛΑ .....	10
2.2.1 Ορισμός των αστικών λυμάτων.....	10
2.2.2 Χαρακτηριστικά των αστικών λυμάτων.....	10
2.2.3 Ύπαρξη των βαρέων μετάλλων στα αστικά λύματα.....	13
2.2.4 Βαρέα μέταλλα στα ελληνικά αστικά λύματα.....	14
2.2.5 Απομάκρυνση των βαρέων μετάλλων με την τριτοβάθμια επεξεργασία.....	15
2.3 ΦΥΤΟΕΞΥΓΙΑΝΣΗ.....	19
2.3.1 Ορισμός και τεχνολογία της φυτοεξυγίανσης .....	19
2.3.2 Τεχνικές φυτοεξυγίανσης .....	21
2.3.3 Σχεδιασμός συστημάτων φυτοεξυγίανσης.....	25
2.3.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της φυτοεξυγίανσης.....	27
2.4 ΤΕΧΝΗΤΟΙ ΥΔΡΟΒΙΟΤΟΠΟΙ (CONSTRUCTED WETLANDS) .....	28
2.4.1 Τεχνητοί υδροβιότοποι ως οικοσυστήματα .....	28
2.4.2 Χαρακτηριστικά των τεχνητών υγροβιότοπων.....	29
2.4.3 Τύποι τεχνητών υγροβιότοπων .....	35
2.4.4 Μηχανισμοί απομάκρυνσης ρύπων των τεχνητών υγροβιότοπων.....	41
2.4.5 Μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα των τεχνητών υγροβιότοπων.....	44
2.5 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΥΠΟ ΕΞΕΤΑΣΗ ΦΥΤΟΥ .....	45
2.5.1 Αλόφυτα.....	45
2.5.2 <i>Juncus acutus</i> L.....	46
<b>3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ .....</b>	<b>48</b>
3.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΣΤΟΝ ΒΙΟΛΟΓΙΚΟ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟ .....	48

3.1.1 Γενική επισκόπηση των εγκαταστάσεων τροφοδοσίας του πειράματος.....	48
3.1.2 Σχεδιασμός και περιγραφή των πειραματικών εγκαταστάσεων .....	50
3.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ .....	53
3.2.1 Συλλογή και προετοιμασία των φυτών .....	53
3.2.2 Προστασία εργαζομένων .....	58
3.2.3 Δειγματοληψία.....	59
3.2.4 Μέτρηση pH, EC, TDS, DO και ORP .....	61
3.2.5 Προσδιορισμός συγκεντρώσεων Cd, Ni Zn .....	61
<b>4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ : ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....</b>	<b>64</b>
4.1 ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΤΩΝ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΑΠΟ ΤΟΝ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟ .....	64
<b>5 ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....</b>	<b>79</b>
5.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	79
5.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....	80
<b>6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>82</b>
6.1 ΔΙΕΘΝΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	82
6.2 ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	86

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1: ΚΥΡΙΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΑΣΤΙΚΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ.....	11
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.2: ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΑΠΟΡΡΙΨΕΙΣ ΑΠΟ ΑΡΙΘΜΟΥΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΑΣΤΙΚΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ.....	11
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.3: ΤΙΜΕΣ ΕΠΙΤΡΕΠΤΩΝ ΟΡΙΩΝ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΟΥΣ ΤΥΠΟΥΣ ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΩΝ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ.....	12
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.4: ΑΝΩΤΑΤΕΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΓΙΑ ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗ .....	14
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.5: ΌΡΙΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΣΕ ΥΔΑΤΙΝΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ.....	14
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.6: ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΕΠΙΤΡΕΠΟΜΕΝΕΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΚΑΙ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (ΔΑΣΕΝΑΚΗΣ, 2015) .....	15
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.7: ΕΠΙΤΡΕΠΟΜΕΝΕΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΣΤΟ ΠΟΣΙΜΟ ΝΕΡΟ (ΝΤΑΡΑΚΑΣ, 2010) .....	15
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.8: ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΦΥΤΟΕΞΥΓΙΑΝΣΗΣ .....	27
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.9: ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΥΔΡΟΒΙΟΤΟΠΩΝ (EPA-A HANDBOOK OF CONSTRUCTED WETLANDS, 2015, SWISS FEDERAL INSTITUTE OF AQUATIC SCIENCE AND TECHNOLOGY, 2018).....	44
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1: ΦΥΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΤΡΙΩΝ ΦΥΤΩΝ JUNCUS ACUTUS .....	53
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.2: ΜΕΣΗ ΠΑΡΟΧΗ ΤΟΥ ΛΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ Η ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ.....	55
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.3: ΜΕΣΗ ΠΑΡΟΧΗ ΤΩΝ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΚΑΙ Η ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ .....	55
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.4: ΜΕΣΗ ΠΑΡΟΧΗ ΤΟΥ ΛΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ Η ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ.....	57
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.5: ΜΕΣΗ ΠΑΡΟΧΗ ΤΩΝ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΚΑΙ Η ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ .....	57
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.6: ΤΕΛΙΚΕΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ ΤΟΥ Cd, Zn, Ni ΣΤΗΝ ΔΕΞΑΜΕΝΗ ΕΠΙΜΟΛΥΝΣΗΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΔΕΥΤΕΡΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΦΑΣΗ.....	58
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.7: ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΣΤΗΝ ΕΙΣΟΔΟ ΤΟΥ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΥ .....	58
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1: ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΣΤΗΝ ΔΕΞΑΜΕΝΗ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2018. *ΜΕ ΤΟΝ ΟΡΟ «ΠΡΟΣΘΗΚΗ» ΕΝΝΟΕΙΤΑΙ Η ΕΚ ΝΕΟΥ ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΣΤΗΝ ΔΕΞΑΜΕΝΗ .....	64
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.2: ΤΙΜΕΣ ΠΟΙΟΤΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΟΥ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ .....	65
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3: ΒΑΡΕΑ ΜΕΤΑΛΛΑ ΣΤΟ ΝΕΡΟ (ΟΑ: ΟΡΙΟ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ).....	66
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.4: ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΑΠΟ ΤΟΝ CW (N=67 ±SD) .....	67
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.5: ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΠΟΙΟΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΗΣ ΕΙΣΡΟΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΕΚΡΟΗΣ (N=67) ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΡΩΤΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΦΑΣΗ .....	70
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.6: ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΑΠΟ ΤΟΝ CW (N=42, ±SD) .....	72

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.7: ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΠΟΙΟΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ ΡΥΠΑΣΜΕΝΟΥ ΜΕ ΒΑΡΕΑ ΜΕΤΑΛΛΑ ΛΥΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΕΙΣΡΟΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΕΚΡΟΗΣ (N=42) .....	75
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.8: ΤΙΜΕΣ BOD <sub>5</sub> , COD, TN, TP, TSS ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗΣ ΤΟΥΣ ΣΤΟ ΡΥΠΑΣΜΕΝΟ ΜΕ ΜΕΤΑΛΛΑ ΛΥΜΑ (N=42).....	77

**NO TABLE OF FIGURES ENTRIES FOUND.**

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

ΕΙΚΟΝΑ 2.1: ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΠΟΥ ΕΜΠΛΕΚΟΝΤΑΙ ΣΤΗΝ ΤΕΧΝΙΚΗ ΤΗΣ ΦΥΤΟΑΠΟΡΡΥΠΑΝΣΗΣ .....	22
ΕΙΚΟΝΑ 2.2: ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΠΟΥ ΕΜΠΛΕΚΟΝΤΑΙ ΣΤΗΝ ΤΕΧΝΙΚΗ ΤΗΣ ΦΥΤΟΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	23
ΕΙΚΟΝΑ 2.3: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΦΥΤΟΕΞΥΓΙΑΝΣΗΣ (ΜΑΝΟΥΣΑΚΗ, 2008).....	24
ΕΙΚΟΝΑ 2.4: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΡΙΖΟΔΙΗΘΗΣΗΣ (CHATTERJEE, 2013).....	25
ΕΙΚΟΝΑ 2.5: ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΑΠΟ ΠΑΛΙΡΡΟΙΑΚΟ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟ ΣΤΗΝ ΑΜΕΡΙΚΗ .....	28
ΕΙΚΟΝΑ 2.6: ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΦΥΤΩΝ ΣΤΟΥΣ ΤΕΧΝΗΤΟΥΣ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΥΣ. ΠΡΩΤΑ ΑΝΑΠΑΡΙΣΤΑΝΤΑΙ ΤΑ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΦΥΤΑ (ΟΠΩΣ ΟΙ ΥΑΚΙΝΘΟΙ ΝΕΡΟΥ), ΥΠΟΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΒΛΑΣΤΗΣΗ ΚΑΙ ΦΥΤΑ ΠΟΥ ΑΝΥΨΩΝΟΝΤΑΙ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ (ΟΠΩΣ ΕΙΔΗ ΨΑΘΙΟΥ ΚΑΙ ΕΙΔΗ ΒΟΥΡΛΩΝ ΚΑΙ ΤΕΛΟΣ, ΥΠΟΣΤΡΩΜΑ.....	32
ΕΙΚΟΝΑ 2.7: ΤΑ ΦΛΑΜΙΝΓΚΟ ΣΠΑΝΙΑ ΕΜΦΑΝΙΖΟΝΤΑΙ ΣΤΗΝ ΦΛΟΡΙΝΤΑ (ΑΜΕΡΙΚΗ), ΑΛΛΑ ΤΟ ΜΑΙΟ ΤΟΥ 2014 ΕΝΑ ΚΟΠΑΔΙ ΑΠΟ 147 ΦΛΑΜΙΝΓΚΟ ΕΜΦΑΝΙΣΤΗΚΑΝ ΣΕ ΕΝΑ ΤΕΧΝΗΤΟ ΥΔΡΟΒΙΟΤΟΠΟ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΠΟΥ ΤΟ ΔΙΑΧΕΙΡΙΖΟΤΑΝ Η ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΝΕΡΟΥ ΤΗΣ ΝΟΤΙΑΣ ΦΛΟΡΙΝΤΑ, SOUTH FLORIDA WATER MANAGEMENT .....	33
ΕΙΚΟΝΑ 2.8: Ο ΤΕΧΝΗΤΟΣ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΣ ΕΠΙΤΥΓΧΑΝΕΙ ΝΑ ΣΥΝΔΥΑΣΕΙ ΤΗΝ ΕΞΥΓΙΑΝΣΗ ΝΕΡΟΥ ΜΕ ΕΝΑ ΠΑΝΕΜΟΡΦΟ ΤΟΠΙΟ. ΜΕΓΑΛΟΙ ΔΙΑΔΡΟΜΟΙ ΔΙΑΣΧΙΖΟΥΝ ΤΟΝ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟ ΚΑΙ ΕΙΣΧΩΡΟΥΝ ΣΤΟ ΝΕΡΟ, ΟΠΟΥ ΕΠΙΣΚΕΠΤΕΣ ΜΠΟΡΟΥΝ ΝΑ ΔΟΥΝ ΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΟΥ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΕΙΤΑΙ ΜΕΣΩ ΓΥΑΛΙΝΩΝ ΤΟΙΧΩΝ. ....	34
ΕΙΚΟΝΑ 2.9: ΤΕΧΝΗΤΟΣ ΥΔΡΟΒΙΟΤΟΠΟΣ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΡΟΗΣ (AVILA, 2013) .....	36
ΕΙΚΟΝΑ 2.10: ΤΕΧΝΗΤΟΣ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΡΟΗΣ .....	39
ΕΙΚΟΝΑ 2.11: ΤΕΧΝΗΤΟΣ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΡΟΗΣ .....	40
ΕΙΚΟΝΑ 2.12: ΟΙ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΙ ΤΥΠΟΙ ΥΔΡΟΒΙΟΤΟΠΩΝ ΚΑΙ ΟΙ ΡΟΕΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΟΝ ΚΑΘΕΝΑ (THOMAS, 2017). ....	41
ΕΙΚΟΝΑ 2.13: JUNCUS ACUTUS L.. (ΦΥΤΑ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Η ΕΡΕΥΝΑ ΣΤΗ ΛΕΣΒΟ ΒΟΤΑΝΙΚΗ-ΧΡΗΣΕΙΣ – ΤΟΞΙΚΟΤΗΤΑ) .....	46
ΕΙΚΟΝΑ 2.14: JUNCUS ACUTUS L. ΣΤΟΝ ΒΙΟΛΟΓΙΚΟ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟ ΤΩΝ ΧΑΝΙΩΝ ΣΤΑ ΤΕΛΗ ΤΟΥ ΠΑΡΟΝΤΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ. ....	47
ΕΙΚΟΝΑ 3.1: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΤΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΛΥΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΣΥΜΜΕΤΕΙΧΑΝ ΣΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ .....	48
ΕΙΚΟΝΑ 3.2: ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ: (1) ΣΩΛΗΝΑΣ ΤΗΣ ΥΠΟΒΡΥΧΙΑΣ ΑΝΤΛΙΑΣ ΠΟΥ ΤΡΟΦΟΔΟΤΕΙ ΜΕ ΛΥΜΑ ΤΗΝ ΔΕΞΑΜΕΝΗ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗΣ ΑΠΟ ΤΟ ΚΑΝΑΛΙ ΕΚΡΟΗΣ ΔΕΥΤΕΡΟΒΑΘΜΙΑΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ, (2) ΔΕΞΑΜΕΝΗ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗΣ, (3) ΔΕΞΑΜΕΝΗ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ, (4) ΚΟΥΤΙΑ ΠΟΥ ΠΕΡΙΕΧΟΥΝ ΤΙΣ ΑΝΤΛΙΕΣ, (5) ΣΩΛΗΝΑΚΙΑ ΠΟΥ ΜΕΤΑΦΕΡΟΥΝ ΤΟ ΛΥΜΑ ΚΑΙ ΤΟ ΔΙΑΛΥΜΑ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΣΤΟΝ ΤΕΧΝΗΤΟ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟ, (6) ΤΕΧΝΗΤΟΣ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΣ, (7) ΕΞΟΔΟΣ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΥ ΣΤΟ ΚΑΝΑΛΙ ΕΚΡΟΗΣ ΔΕΥΤΕΡΟΒΑΘΜΙΑΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ (8) ΑΣΦΑΛΕΙΟΚΙΒΩΤΙΟ .....	51

ΕΙΚΟΝΑ 3.3: Ο ΤΕΧΝΗΤΟΣ ΥΔΡΟΒΙΟΤΟΠΟΣ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΟΣ ΔΙΠΛΑ ΣΤΗΝ ΕΚΡΟΗ ΤΗΣ ΔΔΚ.....	51
ΕΙΚΟΝΑ 3.4: ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΡΟΗ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΟΥ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΥΔΡΟΒΙΟΤΟΠΟΥ .....	52
ΕΙΚΟΝΑ 3.5: ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΡΟΗ ΛΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΣΤΟΝ ΤΕΧΝΗΤΟ ΥΔΡΟΒΙΟΤΟΠΟ .....	53
ΕΙΚΟΝΑ 3.6: (1) Ο ΤΕΧΝΗΤΟΣ ΥΔΡΟΒΙΟΤΟΠΟΣ ΤΗΝ ΗΜΕΡΑ ΤΗΣ ΦΥΤΕΥΣΗΣ (ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2017), (2) Ο ΤΕΧΝΗΤΟΣ ΥΔΡΟΒΙΟΤΟΠΟΣ ΣΤΟ ΤΕΛΟΣ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ (ΜΑΪΟΣ 2018).....	54
ΕΙΚΟΝΑ 3.7: ΟΙ ΑΠΟΛΗΞΕΙΣ ΤΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ ΠΟΥ ΤΡΟΦΟΔΟΤΟΥΣΑΝ ΤΟΝ ΤΕΧΝΗΤΟ ΥΔΡΟΒΙΟΤΟΠΟ. ΤΟ ΜΑΥΡΟ ΣΩΛΗΝΑΚΙ ΤΡΟΦΟΔΟΤΟΥΣΕ ΜΕ ΛΥΜΑ ΚΑΙ ΤΟ ΑΣΠΡΟ ΜΕ ΤΟ ΔΙΑΛΥΜΑ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ.....	61
ΕΙΚΟΝΑ 4.1: ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΝΙ ΣΤΗΝ ΕΙΣΡΟΗ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΕΚΡΟΗ ΤΟΥ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΥΔΡΟΒΙΟΤΟΠΟΥ ΓΙΑ ΤΟ ΧΡΟΝΙΚΟ ΔΙΑΣΤΗΜΑ ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2017-ΜΑΡΤΙΟΣ 2018 (N=67) .....	68
ΕΙΚΟΝΑ 4.2: ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΖΝ ΣΤΗΝ ΕΙΣΡΟΗ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΕΚΡΟΗ ΤΟΥ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΥΔΡΟΒΙΟΤΟΠΟΥ ΓΙΑ ΤΟ ΧΡΟΝΙΚΟ ΔΙΑΣΤΗΜΑ ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2017-ΜΑΡΤΙΟΣ 2018 (N=67) .....	69
ΕΙΚΟΝΑ 4.3: ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ CD ΣΤΗΝ ΕΙΣΡΟΗ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΕΚΡΟΗ ΤΟΥ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΥΔΡΟΒΙΟΤΟΠΟΥ ΓΙΑ ΤΟ ΧΡΟΝΙΚΟ ΔΙΑΣΤΗΜΑ ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2017-ΜΑΡΤΙΟΣ 2018 (N=67) .....	70
ΕΙΚΟΝΑ 4.4: ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΝΙ ΣΤΗΝ ΕΙΣΡΟΗ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΕΚΡΟΗ ΤΟΥ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΥΔΡΟΒΙΟΤΟΠΟΥ ΓΙΑ ΤΟ ΧΡΟΝΙΚΟ ΔΙΑΣΤΗΜΑ ΑΠΡΙΛΙΟΥ-ΜΑΪΟΥ 2018 (N=42) .....	72
ΕΙΚΟΝΑ 4.5: ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΖΝ ΣΤΗΝ ΕΙΣΡΟΗ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΕΚΡΟΗ ΤΟΥ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΥΔΡΟΒΙΟΤΟΠΟΥ ΓΙΑ ΤΟ ΧΡΟΝΙΚΟ ΔΙΑΣΤΗΜΑ ΑΠΡΙΛΙΟΥ-ΜΑΪΟΥ 2018 (N=42) .....	73
ΕΙΚΟΝΑ 4.6: ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΝΙ ΣΤΗΝ ΕΙΣΡΟΗ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΕΚΡΟΗ ΤΟΥ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΥΔΡΟΒΙΟΤΟΠΟΥ ΓΙΑ ΤΟ ΧΡΟΝΙΚΟ ΔΙΑΣΤΗΜΑ ΑΠΡΙΛΙΟΥ-ΜΑΪΟΥ 2018 (N=42) .....	74



## 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ρύπανση του περιβάλλοντος που οφείλεται στην παρουσία των βαρέων μετάλλων αποτελεί πλέον ένα ανησυχητικό θέμα και απαιτεί άμεση αντιμετώπιση. Τα βαρέα μέταλλα είναι φυσικά στοιχεία που βρίσκονται στον φλοιό της Γης, τα οποία σε μικρές συγκεντρώσεις μπορεί να είναι τοξικά. Τα τελευταία χρόνια οι ποσότητες των βαρέων μετάλλων που υπάρχουν στο περιβάλλον έχουν αυξηθεί ανησυχητικά λόγω της ευρείας χρήσης τους στην βιομηχανία όπως επίσης και λόγω γεωργικών και αστικών δραστηριοτήτων. Μια σημαντική απόρροια αυτών των δραστηριοτήτων είναι η ρύπανση των υδάτινων αποδεκτών και των νερών ύδρευσης ή άρδευσης που πραγματοποιείται μέσω της απόρριψης και της διάθεσης μη επαρκώς επεξεργασμένων αστικών υγρών αποβλήτων επιβαρυνμένων με βαρέα μέταλλα. Καθώς τα βαρέα μέταλλα δεν μπορούν να αποδομηθούν, μπορούν να διατηρηθούν στο έδαφος ή στα ύδατα για πολλά χρόνια, αποτελώντας συνεχώς κίνδυνο για το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία.

Οι παραπάνω λόγοι δημιούργησαν την επιτακτική ανάγκη για την εφαρμογή διάφορων τεχνολογιών αποκατάστασης που στοχεύουν στην εξυγίανση των αστικών αποβλήτων, μέσω της απομάκρυνσης των βαρέων μετάλλων από αυτό ή μέσω της μείωσης των συγκεντρώσεων τους σε αποδεκτά επίπεδα. Κάποιες από τις συμβατικές τεχνολογίες εξυγίανσης των υγρών αποβλήτων που χρησιμοποιούνται είναι η μέθοδος της καθίζησης, οι στήλες ανταλλαγής ιόντων, η μέθοδος της προσρόφησης, η μέθοδος επεξεργασίας με μεμβράνες, η ηλεκτροδιάλυση, η τεχνολογία πλάσματος και άλλες. Οι τεχνολογίες αυτές δεν είναι ιδιαίτερα οικονομικές και ταυτόχρονα μπορεί να προκαλέσουν αρνητικές επιπτώσεις στο υδάτινο οικοσύστημα, συνεπώς δεν γίνονται εύκολα αποδεκτές από το ευρύ κοινό.

Εναλλακτικά, τις τελευταίες δεκαετίες η τεχνολογία της φυτοεξυγίανσης και των τεχνητών υδροβιότοπων έχουν γνωρίσει μεγάλη ανάπτυξη ως καινοτόμες και εναλλακτικές μέθοδοι εξυγίανσης νερού. Οι τεχνικές αυτές έχουν προσελκύσει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας και θεωρούνται ελπιδοφόρες μέθοδοι, καθώς αποτελούν χαμηλού κόστους και περιβαλλοντικά φιλικές τεχνολογίες και κατά συνέπεια εύκολα αποδεκτές από το ευρύ κοινό. Η φυτοεξυγίανση βασίζεται στην διαπίστωση ότι τα φυτά και οι μικροοργανισμοί που συμβιώνουν με αυτά έχουν την δυνατότητα να προσλαμβάνουν ή και να αποδομούν τοξικούς ρύπους από ρυπασμένα εδάφη, ύδατα και την ατμόσφαιρα. Οι τεχνητοί υδροβιότοποι έχουν βασιστεί στις λειτουργίες των φυσικών υδροβιότοπων όπως το είδος της βλάστησης, του εδάφους και των μικροοργανισμών που ζουν σε αυτά, ώστε να βελτιωθεί η ποιότητα του νερού και να πραγματοποιηθεί καθαρισμός των λυμάτων.

Μεγάλη σημασία στην επιτυχία των τεχνικών αυτών είναι η αναγνώριση των κατάλληλων φυτικών ειδών τα οποία μπορούν να αναπτύσσονται στα ρυπασμένα αστικά λύματα και να επιβιώσουν από τις τοξικές επιδράσεις των βαρέων μετάλλων. Με βάση αποτελέσματα μελετών, τα αλόφυτα παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον

στην απομάκρυνση και μείωση των βαρέων μετάλλων και θεωρούνται ιδανικοί υποψήφιοι για την αντοχή που δείχνουν στις διάφορες καταπονήσεις που υφίστανται.

### **1.1 Στόχοι της διπλωματικής εργασίας**

Ο στόχος της παρούσας διπλωματικής είναι η μελέτη της αποτελεσματικότητας τεχνητού υδροβιότοπου με την χρήση αλόφυτων γένους *Juncus acutus* L. στην απομάκρυνση των βαρέων μετάλλων κάδμιο, ψευδάργυρο, νικέλιο από αστικά λύματα.

Η σπουδαιότητα της μελέτης αυτής έγκειται στο ότι εξετάζεται η δυνατότητα εφαρμογής σημαντικά φιλικών προς το περιβάλλον τεχνολογιών για την εξυγίανση των ρυπασμένων αστικών λυμάτων ενώ η καινοτομία της βασίζεται στην συμβολή στην ανάπτυξη και βελτιστοποίηση αυτής της νέας ελπιδοφόρας βιολογικής μεθόδου αποκατάστασης για την επίλυση του προβλήματος της ρύπανσης από τοξικά μέταλλα στους αποδέκτες ή στα νερά επαναχρησιμοποίησης στον ελληνικό χώρο με την χρήση αλόφυτων.

Πρωταρχικός ειδικός στόχος στην διπλωματική εργασία είναι η διερεύνηση της δυνατότητας της τεχνολογίας των τεχνητών υδροβιότοπων να απομακρύνουν το κάδμιο, τον ψευδάργυρο και το νικέλιο από τα δευτερογενώς επεξεργασμένα αστικά λύματα. Δεύτερος ειδικός στόχος της διπλωματικής είναι ακόμα η δυνατότητα της περαιτέρω επεξεργασίας των θρεπτικών στοιχείων φωσφόρου και αζώτου όπως και των αιωρούμενων στερεών που υπάρχουν στα λύματα. Τρίτος ειδικός στόχος είναι η αξιολόγηση της αντοχής και της καταπόνησης των αλόφυτων *Juncus acutus* L. κατά την ανάπτυξη τους σε ρυπασμένο περιβάλλον με υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων. Ο απώτερος στόχος όμως αυτής της εργασίας είναι η συμβολή στην επιστημονική έρευνα που πραγματοποιείται για την αποκατάσταση ρυπασμένων με κάδμιο, ψευδάργυρο και νικέλιο αστικών λυμάτων, με σκοπό την μακροπρόθεσμη επίλυση του προβλήματος της ρύπανσης από τοξικά μέταλλα στον ελληνικό χώρο.

### **1.2 Διάρθρωση κεφαλαίων**

Στο πρώτο Κεφάλαιο γίνεται η εισαγωγή στο αντικείμενο μελέτης και διαμορφώνονται οι στόχοι της διπλωματικής. Στο δεύτερο κεφάλαιο πραγματοποιείται η βιβλιογραφική ανασκόπηση για τα αντικείμενα μελέτης της εργασίας, δηλαδή τα βαρέα μέταλλα στα λύματα, την τεχνολογία της φυτοεξυγίανση και τους τεχνητούς υδροβιότοπους. Στο τρίτο κεφάλαιο αναπτύσσεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την επίτευξη των στόχων, περιγράφεται ο τεχνητός υδροβιότοπος που εγκαταστάθηκε στον Βιολογικό Καθαρισμό των Χανίων, η τεχνητή επιμόλυνση των βαρέων μετάλλων, τα συστήματα παροχών και τροφοδοσίας του υδροβιότοπου με λύματα και βαρέα μέταλλα και οι δειγματοληψίες που πραγματοποιούνταν όλο το διάστημα που γινόταν το πείραμα. Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που προέκυψαν, παρουσιάζονται τα

διαγράμματα των συγκεντρώσεων των βαρέων μετάλλων στην είσοδο και την έξοδο του υδροβιότοπου και γίνονται παρατηρήσεις, συζήτηση και βιβλιογραφική υποστήριξη των αποτελεσμάτων. Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο συνοψίζονται τα βασικότερα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας και δίνονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

## 2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

### 2.1 Βαρέα μέταλλα στο περιβάλλον

Ο όρος «βαρέα μέταλλα» είναι ευρέως χρησιμοποιημένος και διαδεδομένος. Παρ' όλα αυτά, δεν υπάρχει συγκεκριμένος ορισμός βάσει κριτηρίων που να ορίζει τα μέταλλα ως βαρέα. Τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό τους συμπεριλαμβάνουν γενικά την πυκνότητα, τον ατομικό αριθμό, το ατομικό βάρος (μάζα), το ειδικό βάρος, με βάση την τοξικότητα και με βάση άλλες χημικές ιδιότητες. Πιο συγκεκριμένα, ως βαρέα μέταλλα ορίζονται τα στοιχεία εκείνα που:

- Είναι πολύ πιο πυκνά από τα άλλα μέταλλα, έχουν δηλαδή πυκνότητα μεγαλύτερη από  $5,0 \text{ g/cm}^3$  (Förstner and Wittman, 1983)
- Έχουν ατομικό αριθμό μεγαλύτερο του 20 και προσαρμόζονται μέχρι και το 92 (Raskin et al., 1994, Lasat, 2000).
- Έχουν ατομικό βάρος (ή ατομική μάζα) μεγαλύτερη του 20 που είναι η σχετική ατομική μάζα του Ca (Mason, 1991)
- Έχουν ειδικό βάρος μεγαλύτερο του σιδήρου
- Διαθέτουν μεταλλικές ιδιότητες (ολκιμότητα, αγωγιμότητα, σταθερότητα ως κατίον, ειδικότητα υποκατάστατη, κ.τ.λ.) (Μανουσάκη, 2008)
- Είναι τοξικά ή δηλητηριώδη σε χαμηλές συγκεντρώσεις (Alonso-Magdalena et al. 2018)

Συνεπώς, στον όρο «βαρέα μέταλλα» έχει δοθεί ένα πολύ ευρύ νοηματικό φάσμα. Παρά όμως τις αντιφάσεις ή τις διαφορές μεταξύ των ορισμών, αυτός είναι ο όρος που επικρατεί στην διεθνή βιβλιογραφία και για αυτό θα χρησιμοποιηθεί έτσι στα πλαίσια της παρούσας προπτυχιακής εργασίας (Arpenroth, 2010).

Τα βαρέα μέταλλα είναι φυσικά στοιχεία που υπάρχουν στην επιφάνεια της Γης. Τα πιο τοξικά μέταλλα που απαντώνται πιο συχνά ως ρύποι είναι το κάδμιο, ο μόλυβδος, το χρώμιο, ο χαλκός, το νικέλιο, ο ψευδάργυρος, το αρσενικό και ο υδράργυρος. Ωστόσο, κάποια από αυτά τα βαρέα μέταλλα, θεωρούνται ουσιώδη για την ανθρώπινη υγεία. Σε μικρές ποσότητες αποτελούν απαραίτητα ιχνοστοιχεία για τον ανθρώπινο οργανισμό και για την εύρυθμη λειτουργία του μεταβολισμού του, όπως για παράδειγμα ο χαλκός και ο ψευδάργυρος. Παρ' όλα η δραματική αύξηση των συγκεντρώσεων τους στο έδαφος και στο νερό, λόγω των έντονων ανθρωπογενών δραστηριοτήτων και της εντατικής βιομηχανοποίησης, τα καθιστά επικίνδυνα για την υγεία του ανθρώπου. Πέρα από την αύξηση των συγκεντρώσεων τους, τα βαρέα μέταλλα, σε αντίθεση με άλλες οργανικές ουσίες και ρύπους, θεωρούνται επικίνδυνα γιατί συσσωρεύονται στο περιβάλλον, χωρίς να αποδομούνται. Η συσσώρευση των μετάλλων παρατηρείται τόσο στο έδαφος όσο και στα υδάτινα οικοσυστήματα (Tchounwou et al., 2014, Jaishankar et al., 2014).

### 2.1.1 Πηγές και μορφές του καδμίου, του νικελίου και του ψευδάργυρου

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα μελετηθούν τα τοξικά βαρέα μέταλλα κάδμιο, νικέλιο και ψευδάργυρο.

Το **κάδμιο (Cd)** στην καθαρή του μορφή είναι ένα μαλακό μέταλλο με ασημί, άσπρες και μπλε αποχρώσεις. Έχει ατομικό αριθμό 48 και ατομικό βάρος 112,41. Είναι δισθενές μεταβατικό μέταλλο με χημικές ιδιότητες παρόμοιες με τον ψευδάργυρο. Καθώς σπανίως απαντάται στην καθαρή του μορφή, συνήθως συναντάται σαν ορυκτό σε συνδυασμό με άλλα στοιχεία που σχηματίζουν ενώσεις όπως οξείδια του καδμίου ( $\text{CdO}$ ), διχλωρίδια καδμίου ( $\text{CdCl}_2$ ) και θεικό ή θειούχο κάδμιο ( $\text{CdS}$ ) (Hooser, 2007), ή συνυπάρχει σε μικρές ποσότητες σε ορισμένα μεταλλεύματα του ψευδαργύρου. Έτσι, το περισσότερο κάδμιο εξάγεται κυρίως μέσω της παραγωγής ψευδαργύρου και άλλων μετάλλων. Όλα τα εδάφη και τα πετρώματα, όπως και τα λιπάσματα περιέχουν κάδμιο. Πιο συγκεκριμένα οι πηγές του καδμίου κατηγοριοποιούνται ως εξής:

1. **Φυσικές:** Οι μεγαλύτερες φυσικές πηγές καδμίου είναι η ηφαιστειακή δραστηριότητα και η αποσάθρωση πετρωμάτων που έχουν σαν αποτέλεσμα την μεταφορά καδμίου στην ατμόσφαιρα ή στα υδάτινα οικοσυστήματα. Ακολουθούν οι δασικές πυρκαγιές και τα θαλάσσια αεροζόλ (ICdA, 2018)
2. **Γεωργικές:** Το κάδμιο είναι ένα φυσικό στοιχείο που βρίσκεται χώμα καθώς και στα φωσφορικά λιπάσματα που χρησιμοποιούνται στις γεωργικές εργασίες. Εντοπίζεται ακόμα και στην ιλύ από λύματα, που χρησιμοποιείται και αυτή σε διάφορες καλλιέργειες (ICdA, 2018).
3. **Βιομηχανικές:** Κάδμιο ελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα μέσω των εξορύξεων και της επεξεργασίας των μεταλλευμάτων, καθώς και από την επεξεργασία πλαστικών, που χρησιμοποιείται σαν σταθεροποιητής. Ποσότητα του απελευθερώνεται ακόμα, από τις χρωστικές ουσίες που χρησιμοποιούνται στα μέταλλα, όπως και από την χρήση του σαν απορροφητικό νετρονίων σε πυρηνικούς αντιδραστήρες.
4. **Αστικές:** Ποσότητες καδμίου προκύπτουν μέσω αστικών διεργασιών, όπως είναι η αποτέφρωση των απορριμμάτων και τα στραγγίσματα που προκύπτουν από τα ΧΥΤΑ. Ακόμα μια πηγή τους είναι η καύση υδρογονανθράκων ή πετρελαίου, η εκπομπή των αεροζόλ από μέσα μεταφοράς καθώς και η χρήση μπαταριών που περιέχουν κάδμιο. Τέλος, συγκεντρώσεις καδμίου εισέρχονται στο περιβάλλον μέσω των λυμάτων.

Το **νικέλιο (Ni)** με ατομικό αριθμό 28 και ατομικό βάρος 58,69 είναι ένα λαμπερό όλκιμο μέταλλο με αργυρόλευκο χρώμα. Είναι μεταβατικό μέταλλο και αυτό του επιτρέπει να σχηματίζει πολλές διαφορετικές οξειδωτικές φάσεις. Το νικέλιο δεν βρίσκεται σε αυτοφυή μορφή στην φύση, αλλά απαντάται ως μεταλλικό μαζί με τον σίδηρο (Fe) στους μετεωρίτες ( $\text{NiFe}$ ). Η παραγωγή του νικελίου γίνεται μέσω διάφορων ορυκτών νικελίου, εκ των οποίων τα πιο σημαντικά είναι οι πεντλαδίτες, γαρνιερίτες, λειμωνίτες, κ.α. Οι κυριότερες πηγές προέλευσης του είναι (Chauhan, et al. 2008):

1. **Φυσικές:** Μεγάλα ποσοστά του νικελίου στην ατμόσφαιρα προκύπτουν από ηφαιστειακή δραστηριότητα, δασικές πυρκαγιές, σκόνη μετεωριτών και θαλάσσια αεροζόλ καθώς και από αποσπασμένα πετρώματα (Harasim, et al. 2015, Iyaka, 2011)
2. **Γεωργικές:** Από την χρήση φωσφορικών λιπασμάτων και εδαφοβελτιωτικών που περιέχουν νικέλιο, όπως επίσης και από λυματολάσπη.
3. **Βιομηχανικές:** Πηγή νικελίου από βιομηχανικές δραστηριότητες αποτελούν οι εξορύξεις του, καθώς και η χρήση του για την κατασκευή μπαταριών, σε επιμεταλλώσεις με ηλεκτροκόλληση, στις παραγωγές κραμάτων νικελίου και στην παραγωγή σιδηρονικελίου για την κατασκευή ανοξειδωτού χάλυβα.
4. **Αστικές:** Νικέλιο προκύπτει επίσης από αστικές χρήσεις όπως είναι η καύση υδρογονανθράκων, πετρελαίων και βενζίνης, για θέρμανση ή ηλεκτρική ενέργεια και η χρήση μπαταριών. Νικέλιο εντοπίζεται ακόμα και στα υγρά απόβλητα των βιολογικών καθαρισμών (Φραγκούλης, 2015).

Ο **ψευδάργυρος (Zn)** με ατομικό αριθμό 30 και ατομική μάζα 65,38 είναι ένα μεταβατικό μέταλλο, όπως και το κάδμιο και το νικέλιο. Είναι αργυρόχρωμος με μπλε αποχρώσεις. Ο ψευδάργυρος βρίσκεται στην φύση σαν ένωση με άλλα στοιχεία, σχηματίζοντας διάφορα ορυκτά. Το βασικό ορυκτό που χρησιμοποιείται για την παραγωγή του ψευδαργύρου είναι ο θειούχος ψευδάργυρος ή σφαλερίτης (ZnS). Πολλά άλλα ορυκτά όμως περιέχουν ψευδάργυρο σαν κύριο συστατικό, χωρίς να περιέχουν σουλφίδια. Οι πηγές του ψευδαργύρου είναι οι εξής:

1. **Φυσικές:** Ο ψευδάργυρος εισέρχεται στο περιβάλλον κυρίως από την φυσική αποσάθρωση των πετρωμάτων. Άλλα φυσικά φαινόμενα όπως είναι η ηφαιστειακή δραστηριότητα, δασικές πυρκαγιές, αμμοθύελλες και θαλάσσια αεροζόλ συμβάλλουν στην συνεχή ανακύκλωση του ψευδαργύρου στο περιβάλλον (International Zinc Association, 2014)
2. **Γεωργικές:** Είναι φυσικό στοιχείο του χώματος, καθώς και στοιχείο στα λιπάσματα (Lindsay, 1972)
3. **Βιομηχανικές:** Ψευδάργυρος απελευθερώνεται στο περιβάλλον μέσω των εξορύξεων και της επεξεργασίας του, από την γαλβάνιση σίδερων ή χάλυβα για την προστασία τους από την σκουριά, από χρωστικές ουσίες και την δημιουργία κραμάτων ψευδαργύρου (όπως το κράμα ορείχαλκου, όταν ενωθεί με χαλκό (Kropschot, et al. 2011).
4. **Αστικές:** Πολλά καλλυντικά, αλοιφές, κρέμες και αντηλιακά έχουν σαν βασικό στοιχείο τον ψευδάργυρο. Ακόμα ποσότητες ψευδαργύρου βρίσκονται στα αστικά απόβλητα και εισέρχονται μέσω αυτών στο περιβάλλον (Ναυτίλοι της HELMEPA, 2018).



βήχα και δύσπνοια. Σε ακραίες περιπτώσεις μπορεί να προκαλέσει πνευμονικό οίδημα, πνευμονία και θάνατο (Toxicology Department CRCE,PHE 2009).

Σε περίπτωση που υπάρξει δερματική έκθεση στο νικέλιο, μπορεί να προκληθεί μια δερματίτιδα γνωστή ως “nickel itch”. Τα συμπτώματα είναι συνήθως κάψιμο και φαγούρα που προκύπτει εφτά μέρες πριν την κονδυλώδη έκρηξη στον ιστό των δαχτύλων, των καρπών και των αντιβραχίων (Γκαύρου, 2016).

Το νικέλιο και κάποιες ενώσεις του έχουν καταγραφεί σαν σίγουρα ή πιθανά καρκινογόνα (Toxicology Department CRCE,PHE 2009).

- **Ψευδάργυρος**

Ο ψευδάργυρος είναι από τα πιο σημαντικά ιχνοστοιχεία όχι μόνο στον ανθρώπινο οργανισμό, αλλά σε όλους τους οργανισμούς. Είναι βασικό συστατικό σε περισσότερα από 300 ένζυμα και σε ακόμα μεγαλύτερο αριθμό σε πρωτεΐνες, που υπογραμμίζει τον επιτακτικό του ρόλο στην ανθρώπινη υγεία. Πάρα πολλές διεργασίες απαιτούν την διαθεσιμότητα του ψευδαργύρου στον οργανισμό. Πάραυτα η μακροχρόνια έκθεση σε υψηλές συγκεντρώσεις ψευδαργύρου έχει επιβλαβείς επιδράσεις, όπως η επίδραση του στην απορρόφηση του σιδήρου από τον ανθρώπινο οργανισμό. Συνεπώς τα περισσότερα προβλήματα που προκαλούνται στον οργανισμό από την έκθεση στον ψευδάργυρο, οφείλονται στην έλλειψη σιδήρου. Ακόμα, σε μεγάλες ποσότητες, ο ψευδάργυρος έχει τοξική δράση στο αίμα και στην καρδιά και μπορεί να προκαλέσει αιμολυτική αναιμία (Plum et al., 2010).

### **2.1.3 Κάδμιο, νικέλιο και ψευδάργυρος στον ελληνικό χώρο**

Δυστυχώς, δεν υπάρχουν ακόμα στην Ελλάδα επίσημες μελέτες ή στοιχεία με την καταγραφή και την αναγνώριση των ρυπασμένων περιοχών. Στα πλαίσια έρευνας όμως του ΕΦΕΤ, εκπονήθηκε από διεπιστημονική επιτροπή του Γεωπονικού και του Πανεπιστημίου Αθηνών μια καταγραφή περιοχών που εντοπίζονται βαρέα μέταλλα στα νερά ύδρευσης, άρδευσης και σε υπόγεια ύδατα και σε ορισμένες περιπτώσεις, σε υψηλές συγκεντρώσεις. Η έρευνα παραδόθηκε τον Σεπτέμβριο του 2009 στην πολιτική ηγεσία του υπουργείου Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων. Πιο συγκεκριμένα τα αποτελέσματα έδειξαν ότι (Βασιλειάδου και Ζαμπετάκης, 2010):

- Στο νερό ύδρευσης της Καλαμάτας ανιχνεύθηκε νικέλιο σε οριακές τιμές (20,00mg/l).
- Στη Λακωνία, στον δήμο Ασωπού εντοπίζεται συγκέντρωση μολύβδου τριπλάσια της οριακής τιμής του (30,00mg/l)
- Στο νερό της Χίου, οι αναλύσεις ανίχνευσαν οριακές (1,00 mg/l) πλην όμως υψηλές τιμές συγκέντρωσης σε υδράργυρο.
- Στα νερά ύδρευσης των δημοτικών διαμερισμάτων της Θήβας ανιχνεύθηκε εξασθενές χρώμιο από 3,00μg/l έως 2.80μg/l αλλά και υψηλές τιμές υδραργύρου.
- Στην Πάτρα (στο Ν. Σούλι) ανιχνεύθηκαν νικέλιο, ολικό χρώμιο, μόλυβδος και αρσενικό σε τιμές που κυμαίνονται εντός αποδεκτών ορίων.

- Τα ίδια βαρέα μέταλλα ανιχνεύθηκαν στα πόσιμα ύδατα Ορεστιάδας, Ν. Βύσσας και Άρδα, πάλι εντός ορίων. Στην Ορεστιάδα μάλιστα, το αρσενικό κυμαίνεται από 6,03μg/l έως 9,69μg/l. Αν και οι τιμές δεν ξεπερνούν τις παραμετρικές (10μg/l) χαρακτηρίζονται υψηλές.
- Στις λίμνες Μαραθώνα, Υλίκης, Μόρνου εντοπίζονται χαμηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων. Τα νερά κρίνονται κατάλληλα για ύδρευση και άρδευση.
- Στο νερό του νομού Έβρου βρέθηκαν σίδηρος και μαγγάνιο σε υψηλές συγκεντρώσεις, πάνω από τα επιτρεπτά όρια.
- Τα υπόγεια νερά στο Λαύριο είναι έντονα επιβαρυμένα σε μόλυβδο (83,30μg/l), νικέλιο (77mg/l), κάδμιο (28,30μg/l) και διάφορα άλλα στοιχεία των οποίων οι συγκεντρώσεις υπερβαίνουν κατά πολύ τα ανώτατα επιτρεπτά όρια. Οι ερευνητές τονίζουν ότι η χρήση των νερών αυτών είναι απαγορευτική τουλάχιστον για ανθρώπινη κατανάλωση.
- Τα υπόγεια ύδατα στα Μεσόγεια είναι ακατάλληλα για κατανάλωση. Κατά τόπους η επιβάρυνση είναι τόσο έντονη που κρίνονται ακατάλληλα και για άρδευση. Στην περιοχή μεταξύ Κορωπίου-Μαρκοπούλου-Παιανίας εντοπίζεται ολικό χρώμιο που κατά τόπους ξεπερνά τα 100μg/l (με όριο τα 50μg/l).
- Στον Ωρωπό και στα Οινόφυτα εκτός από το γνωστό πρόβλημα με το εξασθενές χρώμιο που εντοπίζεται σε τιμές μέχρι και 80μg/l όλα τα τοξικά βαρέα μέταλλα υπερβαίνουν τα όρια.
- Στον υδροφόρος ορίζοντα της Πτολεμαΐδας παρατηρούνται υψηλές συγκεντρώσεις αρσενικού (20,00μg/l), υδραργύρου (5,00μg/l), μολύβδου (20,00μg/l) και καδμίου (5,00μg/l).
- Εκτεταμένη ρύπανση χαρακτηρίζει τους υδροφορείς στο Αλιβέρι και τη Μεγαλόπολη.
- Έντονη είναι η τοξικότητα σε υπόγεια ύδατα της Ορεστιάδας, της Κομοτηνής, της Ξάνθης και του Πύργου Ηλείας, όπου ανιχνεύεται κοκτέιλ μεταλλικών ιχνοστοιχείων. Ειδικότερα στον Πύργο το νερό περιέχει μαγγάνιο 50 φορές πάνω από το όριο και σίδηρο σχεδόν τριπλάσιο του επιτρεπτού. Τα υπόγεια ύδατα είναι ακατάλληλα για ανθρώπινη χρήση και κατά περίπτωση ακατάλληλα για άρδευση.
- Ο Ασωπός χρήζει περίπτωση ιδιαίτερης σημασίας, καθώς όλα τα μεταλλικά ιχνοστοιχεία υπερβαίνουν τα όρια. Το χρώμιο κυμαίνεται στα 65μg/l, το εξασθενές χρώμιο μέχρι και τα 148μg/l, ο μόλυβδος 20 φορές πάνω, και το κάδμιο 12πλάσιο του επιτρεπτού.
- Ο Πηνειός παρουσιάζει υψηλές συγκεντρώσεις σε νικέλιο και χρώμιο.
- Ο Έβρος εμφανίζει τη μεγαλύτερη τιμή όσον αφορά τον υδράργυρο. Λιγότερο επιβαρυμένοι είναι ο Βοιωτικός, Κηφισός και Αλφειός.

Τέλος, όλα τα λιμναία συστήματα της Βόρειας Ελλάδας εμφανίζουν επιβαρύνσεις σε αρσενικό, μόλυβδο και νικέλιο. Ακολουθούν συγκεκριμένα παραδείγματα περιοχών:

- Η μέση τιμή του υδραργύρου, στη λίμνη Πετρών νομού Φλώρινας, φτάνει τα 112μg/l, ενώ το όριο του είναι μόλις 1μg/l. Η λίμνη δέχεται τα απόβλητα των εργοστασίων της Πτολεμαΐδας.
- Οι λίμνες Δοϊράνη και Κορώνεια παρουσιάζουν και αυτές υψηλές τιμές αρσενικού.

## **2.2 Αστικά λύματα και βαρέα μέταλλα**

### **2.2.1 Ορισμός των αστικών λυμάτων**

Τα υγρά απόβλητα που συλλέγονται με το δίκτυο αποχέτευσης μιας πόλης προέρχονται από οικιακά συγκροτήματα, από γραφεία και κτήρια που στεγάζουν διάφορες υπηρεσίες, από βιοτεχνικές και εμπορικές δραστηριότητες, σχολεία, ξενοδοχεία και πιθανόν από βιομηχανικές μονάδες. Επίσης το σύστημα αποχέτευσης της πόλης παραλαμβάνει τα όμβρια ύδατα, δηλαδή τα νερά της βροχής μαζί με τα προϊόντα έκπλυσης των δρόμων και δέχεται εισροές από επιφανειακά νερά και υπόγεια (υδροφόρος ορίζοντας) (Τσώνης, 2004).

Το αποχετευτικό δίκτυο ενδέχεται να καταλήγει σε διαφορετικό κεντρικό συλλεκτήριο αγωγό για τα υγρά βιομηχανικά απόβλητα και σε διαφορετικό αγωγό για τα υπόλοιπα επί μέρους ρεύματα που αθροίζονται στο συνολικό υγρό ρεύμα, το οποίο ορίζεται ως αστικά λύματα. Εάν όμως δεν υπάρχει διαχωρισμός των υγρών ρευμάτων και όλα καταλήγουν στον κεντρικό αγωγό και ταυτόχρονα το ποσοστό των υγρών βιομηχανικών αποβλήτων είναι μεγάλο, τότε η ροή αυτή ονομάζεται ως υγρά αστικά απόβλητα (Τσώνης, 2004).

Τα βιομηχανικά απόβλητα ενδέχεται να υποβάλλονται σε κατάλληλη προεπεξεργασία και μετά να εισέρχονται στο αποχετευτικό δίκτυο της πόλης ή να απαιτείται η πλήρης επεξεργασία τους προκειμένου να επιτραπεί η διάθεση τους στο δίκτυο (Τσώνης, 2004).

### **2.2.2 Χαρακτηριστικά των αστικών λυμάτων**

Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των αστικών λυμάτων διακρίνονται σε *φυσικά, χημικά/βιοχημικά* και *микροβιολογικά* όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.1 (Τσώνης, 2004, Λέκκα, 2013). Η κατανόηση της φύσης των υγρών αποβλήτων είναι απαραίτητη για τον σχεδιασμό και την παρακολούθηση των λειτουργιών των διαδικασιών συλλογής, επεξεργασίας και επαναχρησιμοποίησης τους.

Ακόμα, τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των λυμάτων πρέπει να είναι γνωστά γενικότερα για την διαχείριση της περιβαλλοντικής ποιότητας μέσω της αξιολόγησης των επιπτώσεων τους μετά την διάθεση τους στους αποδέκτες (Πανακούλια, 2009, Τσώνης, 2004). Στον Πίνακα 2.2 παρουσιάζονται οι επιτρεπόμενες τιμές των ποιοτικών χαρακτηριστικών στα επεξεργασμένα αστικά λύματα στην Ελλάδα σύμφωνα με την ΚΥΑ-5673-97.

Πίνακας 2.1: Κύρια χαρακτηριστικά των αστικών λυμάτων

Κατηγορία	Παράμετρος
<b>Φυσικά</b>	Ολικά διαλυμένα στερεά (TDS)
	Ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS)
	Θολότητα
	Χρώμα
	Οσμή
	Θερμοκρασία
<b>Χημικά/Βιοχημικά</b>	Υδατάνθρακες
	Πρωτεΐνες
	Οργανικά συστατικά (N και P)
	Λίπη και έλαια
	Ιχνοστοιχεία
	Βαρέα μέταλλα
	Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD)
	Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο 5 ημερών (BOD <sub>5</sub> )
	Ολικός οργανικός άνθρακας (TOC)
<b>Μικροβιολογικά</b>	Βακτήρια
	Ιοί
	Πρωτόζωα
	Μύκητες
	Κολοβακτηρίδια

Πίνακας 2.2: Απαιτήσεις για απορρίψεις από αριθμούς επεξεργασίας αστικών λυμάτων

Παράμετροι	Συγκέντρωση
<b>Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD<sub>5</sub>)</b>	25 mg/l O <sub>2</sub>
<b>Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD)</b>	125 mg/l O <sub>2</sub>
<b>Ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS)</b>	35 mg/l
<b>Ολικός φώσφορος (TP)*</b>	15 mg/l N (1,000-100,000 ισοδύναμο πληθυσμό)
	ή 10 mg/l N (άνω των 100,000 ισοδ.

Παράμετροι	Συγκέντρωση
	πληθυσμό)
Ολικό άζωτο (TN)*	2 mg/l P (1,000-100,000 ισοδ. πλ.)
	ή
	1 mg/l P (άνω των 100,000 ισοδ. πλ.)

\*Απαιτήσεις για διάθεση λυμάτων σε ευαίσθητες περιοχές όπου παρουσιάζεται ευτροφισμός.

Στον Πίνακα 2.3 παρουσιάζονται τα όρια για μικροβιολογικές και συμβατικές παραμέτρους καθώς για περιορισμένη και απεριόριστη άρδευση, βιομηχανική χρήση νερού ψύξης μιας χρήσης, την αστική χρήση, περιαστικό πράσινο και εμπλουτισμό υπόγειου υδροφορέα, που δεν χρησιμοποιείται για πόση και με διήθηση διαμέσου κατάλληλου εδαφικού στρώματος σύμφωνα με ΚΥΑ 5673/400/5.3.97 (ΦΕΚ 192/Β/14.3.97).

Πίνακας 2.3: Τιμές επιτρεπτών ορίων για διάφορους τύπους επαναχρησιμοποίησης των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων

Τύπος επαναχρησιμοποίησης	BOD <sub>5</sub> (mg/l)	SS (mg/l)	Escherichia coli (EC/100 ml)	Θολότητα (NTU)
<b>-Περιορισμένη άρδευση</b>				
-Βιομηχανική χρήση (νερό ψύξης μιας χρήσης)	25 (για ευαίσθητους αποδέκτες)	35 (για ευαίσθητους αποδέκτες)	≤ 200	—
<b>-Απεριόριστη άρδευση</b>				
-Βιομηχανική χρήση πλην νερού μιας χρήσης	≤ 10 για το 80% των δειγμάτων	≤ 10 για το 80% των δειγμάτων	διάμεση τιμή	

Τύπος επαναχρησιμοποίησης	BOD <sub>5</sub> (mg/l)	SS (mg/l)	Escherichia coli (EC/100 ml)	Θολότητα (NTU)
<b>-Αστική χρήση</b>				
<b>-Εμπλουτισμός υπόγειων υδροφορέων</b>	≤ 10 για το 80% των δειγμάτων	≤ 2 για το 80% των δειγμάτων	≤ 2 για το 80% των δειγμάτων	≤ 2 διάμεση τιμή
<b>-Περιαστικό πράσινο</b>			και ≤ 20 για το 95 % των δειγμάτων	

### 2.2.3 Ύπαρξη των βαρέων μετάλλων στα αστικά λύματα

Η ρύπανση των υδάτινων αποδεκτών λόγω της απόρριψης μη επαρκώς επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων επιβαρυνμένων με βαρέα μέταλλα αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα περιβαλλοντικά προβλήματα. Η εκτενής χρήση των βαρέων μετάλλων σε διαφορετικές δραστηριότητες συνεπάγεται την παρουσία των μετάλλων σε σημαντικές συγκεντρώσεις στις Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων (ΕΕΥΑ) ή στο υδάτινο περιβάλλον (Κάτσου, 2011). Η προέλευση τους μπορεί να είναι αστικής (οικιακά λύματα και απόβλητα, φαρμακευτικές ουσίες, αστικά νοσοκομειακά απόβλητα, αγωγοί νερού, απορρίμματα οδοντιατρικών κλπ.), βιομηχανικής (σταθεροποιητές, κατεργασία μετάλλων, βιομηχανία χρωμάτων, τυπογραφικές δραστηριότητες κλπ.) ή αγροτικής (φωσφορικά λιπάσματα κλπ.) προέλευσης. Τα βαρέα μέταλλα μπορεί επίσης να προέλθουν στα αστικά λύματα από διάφορες διαδικασίες καύσης και απορροές των δρόμων (Σωτηρόπουλος, 2011). Ακόμα, στα απόβλητα των αποχετεύσεων περιέχονται μέταλλα από μεταβολικά απόβλητα, διαβρώσεις των υδροσωλήνων και καταναλωτικά προϊόντα (Μωραΐτη, 2011).

Ο Pb, Cu, Zn, Ni, Cr και Cd αποτελούν συνήθη βαρέα μέταλλα που συναντώνται στις εκροές διαφόρων βιομηχανικών αλλά και αστικών δραστηριοτήτων (Σωτηρόπουλος, 2011, Κάτσου, 2011, Wilderer and Kolb, 1997) με το Cd και τον Pb να αποτελούν δύο από τα πιο τοξικά βαρέα μέταλλα. Η ύπαρξη των βαρέων μετάλλων στις Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων (ΕΕΥΑ) θέτει δύο βασικά ζητήματα προς διερεύνηση: (1) την τοξικότητα των βαρέων μετάλλων στους μικροοργανισμούς της ενεργού υλύος, (2) την δυνατότητα μείωσης της βιοδιαθεσιμότητας τους κατά την επεξεργασία. Η απόδοση της διεργασίας καθορίζει το βαθμό απομάκρυνσης των βαρέων μετάλλων (Κάτσου, 2011).

Στις περισσότερες αναπτυγμένες χώρες έχουν τεθεί αυστηρά περιβαλλοντικά όρια όσον αφορά την απόρριψη υγρών αποβλήτων που προέρχονται από βιομηχανικές και μη δραστηριότητες. Τα όρια μπορεί να διαφοροποιούνται ανάλογα με τη χώρα, την περιοχή και το βιομηχανικό κλάδο (US EPA, 2007). Στον Πίνακα 2.4 παρουσιάζονται οι

προτεινόμενες μέγιστες συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων στα νερά άρδευσης (Ayers and Westcot, 1985, NAS, 1972).

Πίνακας 2.4: Ανώτατες συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων για επαναχρησιμοποίηση

Στοιχείο	Προτεινόμενη μέγιστη συγκέντρωση (mg/l)
Κάδμιο (Cd)	0,010
Χρώμιο (Cr)	0,10
Χαλκός (Cu)	0,20
Μόλυβδος (Pb)	5,00
Νικέλιο (Ni)	0,20
Ψευδάργυρος (Zn)	2,0

#### 2.2.4 Βαρέα μέταλλα στα ελληνικά αστικά λύματα

Συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων εντοπίζονται και στα ελληνικά αστικά λύματα, από πλήθος διαφορετικών πηγών, που έχουν προαναφερθεί στις παραπάνω ενότητες. Ο καθορισμός των μέτρων και των ανώτατων επιτρεπτών ορίων διάθεσης λυμάτων σε αποδέκτες διαφοροποιούνται σε κάθε Νομό και δραστηριότητα, ανάλογα με τον αποδέκτη, το είδος των αποβλήτων, τον παραγόμενο όγκο, τον βαθμό επεξεργασίας κλπ, σύμφωνα με τις οικίες Νομαρχιακές Αποφάσεις. Ειδικοί όροι επιβάλλονται από τα αρμόδια Υπουργεία (ΥΠΕΧΩΔΕ) για ορισμένες δραστηριότητες.

Στο πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Οδηγίας για τη Θαλάσσια Στρατηγική (Marine Strategy Directive) προβλέπονται μεταξύ άλλων και όρια συγκεντρώσεων ρύπων για τον ορισμό της Καλής Περιβαλλοντικής Κατάστασης (Good Environmental Status) των θαλάσσιων περιοχών. Στον Πίνακα 2.5 παρουσιάζονται τα προτεινόμενα από ελληνικής πλευράς όρια σχετικά με τη συγκέντρωση των μετάλλων στα νερά.

Πίνακας 2.5: Όρια συγκεντρώσεων βαρέων μετάλλων σε υδάτινο περιβάλλον

Στοιχεία	Όριο ΚΠΚ (μg/l)	Τιμή αναφοράς (μg/l)
Cu	10	0,5
Zn	100	1
Cd	1	0,1
Hg	1	0,1
Pb	10	0,5

Στον Πίνακα 2.6 παρουσιάζονται οι ανώτατες επιτρεπόμενες συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων για την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων και στον Πίνακα 2.7 οι επιτρεπόμενες συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων στο πόσιμο νερό.

Πίνακας 2.6: Μέγιστες επιτρεπόμενες συγκεντρώσεις μετάλλων και στοιχείων (Δασενάκης, 2015)

Στοιχεία	Μέγιστη συγκέντρωση (mg/l)
Κάδμιο (Cd)	0,010
Χρώμιο (Cr)	0,10
Χαλκός (Cu)	0,20
Μόλυβδος (Pb)	5,00
Νικέλιο (Ni)	0,20
Ψευδάργυρος (Zn)	2,0

Πίνακας 2.7: Επιτρεπόμενες συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων στο πόσιμο νερό (Νταράκας, 2010)

Στοιχεία	Όρια πόσιμου νερού (mg/l)
Κάδμιο (Cd)	0,003
Χρώμιο <sup>6+</sup> (Cr <sup>3+</sup> )	0,05
Χρώμιο <sup>3+</sup> (Cr <sup>3+</sup> )	-
Χαλκός (Cu)	2,0
Μόλυβδος (Pb)	0,01
Νικέλιο (Ni)	0,02
Ψευδάργυρος (Zn)	3,0

#### 2.2.5 Απομάκρυνση των βαρέων μετάλλων με την τριτοβάθμια επεξεργασία

Σύμφωνα με την Υπουργική Απόφαση οικ. 5673/400/1997, στο άρθρο 2, προβλέπεται η κατάλληλη επεξεργασία ή η επεξεργασία των αστικών λυμάτων με μέθοδο ή και σύστημα διάθεσης που επιτρέπει στον υδάτινο αποδέκτη να ανταποκρίνεται στους σχετικούς ποιοτικούς στόχους με βάση την καθοριζόμενη χρήση και τις συναφείς διατάξεις της παρούσας απόφασης καθώς και άλλων διατάξεων της κείμενης νομοθεσίας.

Κατάλληλη επεξεργασία προβλέπεται κατά το τελευταίο στάδιο της επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων που ονομάζεται τριτοβάθμια επεξεργασία ή αλλιώς χημική επεξεργασία όπου γίνεται ο χημικός καθαρισμός. Το στάδιο αυτό μπορεί να περιλαμβάνει πολλά επιμέρους στάδια, όπως η απομάκρυνση βαρέων μετάλλων, θρεπτικών συστατικών και τελικό ραφινάρισμα των ήδη επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων.

Ανάλογα με τις συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων που παρατηρούνται αυξάνονται οι απαιτήσεις για την ανάπτυξη και εφαρμογή κατάλληλων συστημάτων επεξεργασίας

προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το ρυπαντικό φορτίο των υγρών αποβλήτων σε επιτρεπτά επίπεδα πριν την απόρριψή τους. Ωστόσο, η επιλογή του κατάλληλου συστήματος επεξεργασίας πρέπει να λαμβάνει υπόψη την προέλευση και την αρχική σύσταση των υγρών αποβλήτων, την ισχύουσα νομοθεσία που καθορίζει τα επιθυμητά χαρακτηριστικά της επεξεργασμένης εκροής και το κόστος της επεξεργασίας. Ο σχεδιασμός και η εφαρμογή του κατάλληλου συστήματος προϋποθέτει την διεξαγωγή εργαστηριακών – πιλοτικών δοκιμών. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου επεξεργασίας για την απομάκρυνση βαρέων μετάλλων από τα υγρά απόβλητα αποτελεί ζήτημα βαρύνουσας σημασίας. Μια μέθοδος μπορεί να χαρακτηριστεί ως κατάλληλη όταν χαρακτηρίζεται από υψηλή απόδοση, είναι περιβαλλοντικά φιλική και οικονομικά βιώσιμη (Κάτσου, 2011, Αναστασίου, 2011).

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες φυσικοχημικές μέθοδοι απομάκρυνσης των βαρέων μετάλλων όπως και κάποια άλλα εναλλακτικά συστήματα επεξεργασίας (αερόβια, αναερόβια, αερόβια-αναερόβια) που είναι πιο φιλικά στο περιβάλλον και με χαμηλότερο κόστος λειτουργίας και συντήρησης:

## **1. Φυσικοχημικές τεχνικές καθαρισμού**

### **• Καθίζηση**

Είναι μια φυσική διεργασία και αποτελεί το πρώτο στάδιο στην απομάκρυνση των αιωρούμενων σωματιδίων από το νερό. Η ευρεία χρήση της οφείλεται στην απλότητα της μεθόδου και στη μικρή κατανάλωση ενέργειας (Αναστασίου, 2011)

### **• Ιζηματοποίηση**

Είναι μια φυσικοχημική διεργασία αδιαλυτοποίησης ορισμένων ανεπιθύμητων συστατικών του νερού με σχηματισμό αδιάλυτων ενώσεων, λόγω αλλαγής της διαλυτότητάς τους. Η ιζηματοποίηση συνδυάζεται με τις διεργασίες της κροκίδωσης και της συσσωμάτωσης, με στόχο την απομάκρυνση του σχηματιζόμενου ιζήματος (Τσώνης, 2004).

### **• Προσρόφηση**

Είναι μια αποτελεσματική μέθοδος. Το πιο συνηθισμένο υλικό προσρόφησης είναι ο ενεργός άνθρακας, ο οποίος κατά την επεξεργασία του νερού χρησιμοποιείται σαν διυλιστήριο ή αναμιγνύεται απ' ευθείας με το νερό στο θάλαμο ανάμιξης. Ο ενεργός άνθρακας μπορεί να απομακρύνει αποτελεσματικά τα διαλυμένα οργανικά συστατικά ακόμα και όταν αυτά βρίσκονται στα απόβλητα σε χαμηλές συγκεντρώσεις (Τσώνης, 2004, Metcalf and Eddy, 2006).

### **• Ιοντοεναλλαγή**

Βασίζεται στην ικανότητα κάποιων υλικών, ορυκτών ή συνθετικών να δεσμεύουν εκλεκτικά διάφορα ιόντα. Κατά την διεργασία της ιοντοεναλλαγής επιτυγχάνεται μεταφορά ιόντων από ένα αδιάλυτο στερεό σε μια υγρή φάση και αντίστροφα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα ιοντοεναλλαγής αποτελεί ο απιονισμός και η αποσκλήρυνση του νερού (Μήτρακας, 2011, Metcalf and Eddy, 2006)

### • Μέθοδος επεξεργασίας με μεμβράνες

Είναι η βάση για μια διεργασία διαχωρισμού. Με τις μεμβράνες διαχωρίζονται τα στερεά συστατικά που περιέχονται στο υπό επεξεργασία υγρό απόβλητο και το επιθυμητό διήθημα είναι το νερό. Το μειονέκτημα των μεμβρανών είναι ότι λόγω της λειτουργίας τους σε υψηλή πίεση και σε έντονα εχθρικό περιβάλλον καταστρέφονται. Έτσι η μέθοδος αποδεικνύεται αντιοικονομική αν δεν συνοδεύεται από ανάκτηση μετάλλου. Επίσης η διεργασία της ηλεκτρόλυσης τελείται μέσα σ' ένα ηλεκτρολυτικό κελί εφοδιασμένο με μεμβράνη εναλλαγής κατιόντων (Κάτσου, 2011, Βασιλικιώτης, 1990)

### • Ηλεκτροδιάλυση

Χρησιμοποιείται ευρέως στην αφαλάτωση για την παραγωγή πόσιμου νερού και την επεξεργασία λουτρών επιμετάλλωσης, αλλά επειδή παρουσιάζει τα ίδια προβλήματα με την διεργασία των μεμβρανών δεν έχει προς το παρόν άλλη εφαρμογή (Αναστασίου, 2011, Metcalf and Eddy, 2006).

### • Εξατμιστική ανάκτηση

Έχει ευρεία εφαρμογή σε βιομηχανική κλίμακα και χρησιμοποιείται για τη συμπύκνωση διαλυμάτων με στόχο την ανάκτηση πολύτιμων συστατικών ή την άμεση ανακύκλωσή τους (Metcalf and Eddy, 2006, Δεληγιάννης, 1990).

### • Χημική αναγωγή

Χρησιμοποιείται στη μετατροπή ιόντων σε στοιχειακά μέταλλα, δηλαδή στη μετατροπή ιόντων εξασθενούς χρωμίου σε ιόντα τρισθενούς, και στην μετατροπή τοξικών μορφών σε λιγότερο τοξικές ή ευκολότερα αντιμετωπίσιμες για παράδειγμα στην απομάκρυνση υδραργύρου από τα απόβλητα μονάδας χλωραλκάλειας (Metcalf and Eddy, 2006, Τσώνης, 2004).

### • Τεχνολογία πλάσματος

Αποτελεί την πλέον πρόσφατη μέθοδο απομάκρυνσης βαρέων μετάλλων από τα υγρά απόβλητα. Με την Τεχνολογία Πλάσματος μετατρέπονται τα απόβλητα σε δύο προϊόντα, απομακρύνεται η πίσσα και η στάχτη και παράγεται υψηλής ποιότητας καθαρό και πλούσιο σε υδρογόνο βιοαέριο καθώς και ένα υαλώδες εμπορεύσιμο προϊόν με Ευρωπαϊκή έγκριση (Αναστασίου, 2011).

## 2. Αερόβια συστήματα επεξεργασίας βαρέων μετάλλων

### • Ενεργός ιλύς

Παράγει δραστική λάσπη από μικροοργανισμούς και έχει την ικανότητα της αερόβιας σταθεροποιήσεως των αποβλήτων. Για τη σωστή λειτουργία αυτού του βιολογικού συστήματος απαιτείται η ύπαρξη θρεπτικών συστατικών σε σωστές αναλογίες. Το μειονέκτημά της είναι ότι η ύπαρξη διαφόρων χημικών με τοξική επίδραση στους μικροοργανισμούς επηρεάζει αρνητικά την αύξηση τους προκαλώντας έτσι

παρεμποδίσεις στην λειτουργία του συστήματος (Αναστασίου, 2011, Μήτρακας, 2011).

#### •Βιολογικός αντιδραστήρας με φυτά καθαρισμού

Αποτελεί μια νέα βιολογική μέθοδο επεξεργασίας, αρκετά αποδοτικότερη και οικονομική εναλλακτική, η οποία αντικαθιστά τη μέθοδο της ενεργού ιλύος. Σ' αυτή την εγκατάσταση επεξεργάζονται λύματα και υγρά απόβλητα σε όλη την χρονική περίοδο, ακόμη και στις πιο δυσμενείς καιρικές συνθήκες του χειμώνα με τη βοήθεια μικροοργανισμών στο χώρο των ριζωμάτων των φυτών (Αναστασίου, 2011).

#### •Βιόφιλτρο

Είναι μια ετερογενής βιολογική διεργασία που έχει ως στόχο την απομάκρυνση των οργανικών ουσιών από τα λύματα με τις διαδικασίες οξείδωσης και σύνθεσης. Το βασικό πλεονέκτημα των βιόφιλτρων είναι η απλότητα, η ευκολία και η χαμηλή δαπάνη λειτουργίας που τα καθιστά κατάλληλα για επεξεργασία λυμάτων απομακρυσμένων ή μικρών πόλεων. Ωστόσο η μη ελεγχόμενη ανάπτυξη βιομάζας είναι δυνατό να παρουσιάσει προβλήματα που οφείλονται στη δυσκολία προσαρμογής της σε τυχόν μεταβολές των συνθηκών λειτουργίας (Αναστασίου, 2011).

#### •Εγκαταστάσεις με βιοδίσκους

Χρησιμοποιούνται για τα αστικά απόβλητα κυρίως των μικρών οικισμών, με προβλήματα χώρου και πρόσβασης. Σ' αυτές τις εγκαταστάσεις το λειτουργικό κόστος είναι αισθητά μικρότερο, απουσιάζει σημαντικά ο θόρυβος και επειδή δεν υπάρχουν μηχανικά μέρη που να υφίστανται ιδιαίτερη καταπόνηση, οι απαιτήσεις σε ανταλλακτικά είναι μικρές (Αναστασίου, 2011).

#### •Δεξαμενές δευτεροβάθμιας καθίζησης

Αποτελούν αναπόσπαστο τμήμα όλων των συστημάτων αερόβιας επεξεργασίας. Ο βαθμός απόδοσης τους είναι ικανοποιητικός όταν η επανακυκλοφορία της ιλύος είναι μικρότερη του 50% της παροχής λυμάτων, σε αντίθετη περίπτωση η ηρεμία στις δεξαμενές καθίζησης διαταράσσεται και η απόδοση των δεξαμενών ελαττώνεται (Αναστασίου, 2011).

#### •Συστήματα SBR

Χρησιμοποιούνται σαν παραλλαγή της μεθόδου ενεργού ιλύος για την επεξεργασία αστικών λυμάτων αλλά και βιομηχανικών αποβλήτων και καταλαμβάνουν σχετικά μικρό χώρο, γεγονός που τα καθιστά χρήσιμα για τις περιοχές όπου η διαθέσιμη γη είναι περιορισμένη (Αναστασίου, 2011).

#### •Τεχνητοί υγροβιότοποι

Στο σύστημα αυτό τα απόβλητα υφίστανται προοδευτική επεξεργασία από τους μικροοργανισμούς που συντηρούνται γύρω από τις ρίζες των φυτών και από τα φυτά. Έχει το μικρότερο κόστος λειτουργίας από τις υπόλοιπες μεθόδους, απαιτεί μικρή

συντήρηση αλλά στη χώρα μας υπάρχει έλλειψη εμπειρίας για την κατασκευή τέτοιων εγκαταστάσεων (Μανουσάκη, 2008).

### **3. Αναερόβια συστήματα επεξεργασίας**

#### **• Αντιδραστήρας UASB**

Έχει τη δυνατότητα διαχείρισης ποικίλων βιομηχανικών και οικιακών αποβλήτων και χρησιμοποιείται σε παγκόσμια κλίμακα. Χρησιμοποιείται για την επεξεργασία βαρέων και οργανικών αποβλήτων λόγω της υψηλής συγκέντρωσης βιομάζας που διαθέτει και λόγω της πλούσιας μικροβιακής πυκνότητας (Metcalf and Eddy, 2006).

#### **• Αναερόβια δεξαμενή καθίζησης**

Αποτελεί μια ιδιαίτερη και δοκιμασμένη λύση σε παγκόσμιο επίπεδο, είναι αντίστοιχη με μια δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης. Θεωρείται από τα πιο φθηνά και αξιόπιστα συστήματα απομάκρυνσης BOD<sub>5</sub> με τις λιγότερες ανάγκες για συντήρηση (Metcalf and Eddy, 2006).

### **4. Αερόβια-αναερόβια συστήματα επεξεργασίας**

#### **• Δεξαμενές οξείδωσης – σταθεροποίησης**

Είναι μονάδες βιολογικής επεξεργασίας, που λειτουργούν κάτω από φυσικές ή τεχνητές συνθήκες αερισμού ή και αναερόβια. Έχουν μικρά έξοδα λειτουργίας, απλή λειτουργία και δυνατότητα ρύθμισης της απορροής. Ωστόσο, καταλαμβάνουν μεγάλη έκταση, υπάρχει πιθανότητα δυσοσμιών και δυσχέρεια επεξεργασίας ορισμένων βιομηχανικών αποβλήτων (Metcalf and Eddy, 2006).

#### **• Δεξαμενές Imhoff**

Χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία αποβλήτων από κατοικίες και άλλες κτιριακές εγκαταστάσεις που εξυπηρετούνται από συμβατικούς βαρυτικούς υπονόμους ή υπονόμους υπό πίεση. Είχαν ευρεία χρήση πριν τη διάδοση των χωριστών θερμαινόμενων δεξαμενών αποδόμησης. Χρησιμοποιούνται περιστασιακά και σήμερα περιστασιακά, διότι είναι απλές στη χρήση τους και δε χρειάζονται εξειδικευμένο προσωπικό για την εύρυθμη λειτουργία τους (Metcalf and Eddy, 2006).

Από τα προαναφερόμενα προκύπτει ότι υπάρχουν πλήθος φυσικοχημικών και βιοτεχνολογικών μεθόδων απομάκρυνσης των βαρέων μετάλλων από τα υγρά απόβλητα και τους ρυπασμένους υδάτινους αποδέκτες. Από τις δύο βασικές κατηγορίες μεθόδων (φυσικοχημικών και βιοτεχνολογικών) οι πιο οικονομικές και φιλικές προς το περιβάλλον αναδεικνύονται οι βιοτεχνολογικές οι οποίες εξελίσσονται διαρκώς (Αναστασίου, 2011).

## **2.3 Φυτοεξυγίανση**

### **2.3.1 Ορισμός και τεχνολογία της φυτοεξυγίανσης**

Η τεχνολογία της φυτοεξυγίανσης παρουσιάζει έντονο ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια, ως μια σημαντική εναλλακτική μέθοδος εξυγίανσης ρυπασμένων εδαφών και

υδάτων. Η υπηρεσία προστασίας του περιβάλλοντος των ΗΠΑ (EPA) κατατάσσει την φυτοεξυγίανση στις επανομαζόμενες πρωτότυπες τεχνολογίες επεξεργασίας (Innovative treatment technologies).

Πιο συγκεκριμένα, **ο όρος φυτοεξυγίανση** αναφέρεται σε κάθε σύστημα ή διαδικασία στην οποία χρησιμοποιούνται φυτά (φυσικά ή και γενετικά τροποποιημένα) και οι σχετιζόμενοι με αυτά μικροοργανισμοί για την εξυγίανση ρυπασμένων εδαφών, υλικών καθιζήσεων και υδάτων (επιφανειακών ή υπόγειων) ή του αέρα, μέσω της απομάκρυνσης, διάσπασης, σταθεροποίησης και μείωσης των ρυπαντών (Γαλανάκη, 2011, Ζαμπετάκης και λοιποί, 2005).

Παρόλο που η εφαρμογή της φυτοεξυγίανσης είναι σχετικά πρόσφατη, η ιδέα για την εφαρμογή της είχε συλληφθεί πριν από αρκετούς αιώνες. Στην βιβλιογραφία αναφέρεται ότι το πρώτο σύστημα επεξεργασίας αστικών λυμάτων που είχε βασιστεί στην χρήση φυτών λειτούργησε στην Γερμανία, στις αρχές του 17<sup>ου</sup> αιώνα (Περράκη, 2009).

Από τότε μέχρι σήμερα έχει επιτευχθεί αξιόλογη ανάπτυξη στην εφαρμογή διάφορων τεχνικών ακόμα και σε επίπεδο εμπορικής κλίμακας για την δευτερογενή και τριτογενή επεξεργασία αστικών υδατικών αποβλήτων με την χρήση φυτών. Οι τεχνικές αυτές περιλαμβάνουν την χρήση υδρόβιων και υδροχαρών φυτών για την δημιουργία φυσικών συστημάτων επεξεργασίας, όπως και τεχνητών υγροβιότοπων (constructed wetlands) και δεξαμενών σταθεροποίησης. Τα τελευταία χρόνια η έννοια των φυσικών συστημάτων επεξεργασίας έχει επεκταθεί πέρα από την χρησιμοποίηση τους στην επεξεργασία των υγρών αποβλήτων, όπως η χρήση τους στην εξυγίανση αβαθών υδροφορέων με στόχο την ρύπανση που προκαλείται από τα εντομοκτόνα και ανόργανα στοιχεία, όπως το άζωτο και ο φώσφορος (Ζαμπετάκης και λοιποί, 2005).

Μεγάλη ερευνητική δραστηριότητα παρουσιάζει και η δυνατότητα εξυγίανσης της ατμόσφαιρας με τη χρήση φυτών. Τα φύλλα των φυτών καλύπτονται με κηρώδεις ουσίες, στόχος των οποίων είναι η υδατική οικονομία εντός του φυτικού σώματος. Οι ουσίες αυτές ευνοούν την προσρόφηση λιποφιλικών πτητικών οργανικών ουσιών, όπως για παράδειγμα οι αρωματικοί υδρογονάνθρακες. Με την διαδικασία αυτή τα φυτά συμβάλουν στον περιορισμό της συγκέντρωσης επικίνδυνων ρυπαντών στην ατμόσφαιρα (Ζαμπετάκης και λοιποί, 2005).

Η εξυγίανση ρυπασμένων εδαφών, χωρίς τη μεσολάβηση της υδατικής βάσης, με τη χρήση φυτών δεν έχει επαρκώς μελετηθεί τόσο σε εργαστηριακά πειράματα όσο και σε πειράματα πεδίου. Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως σε δύο λόγους: (1) δεν έχουν θεσπιστεί οριακές συγκεντρώσεις τοξικότητας των διαφόρων ρυπαντών για το έδαφος από τους περιβαλλοντικούς οργανισμούς, σε αντίθεση με το νερό και (2) εξαιτίας της πολυπλοκότητας που παρουσιάζει το εδαφικό σύστημα απαιτούνται εξαιρετικά δύσκολες αναλυτικές τεχνικές για την εξυγίανση του (Ζαμπετάκης και λοιποί, 2005).

Η τεχνολογία της φυτοεξυγίανσης έχει αποδειχθεί, κυρίως μέσω εργαστηριακών πειραμάτων, ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αντιμετώπιση τόσο οργανικών (πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs), χλωριωμένων διαλυτών, εντομοκτόνα, φυτοφαρμάκων), όσο και ανόργανων ρυπαντών (βαρέα μέταλλα). Παρά το γεγονός ότι στην παρούσα φάση η τεχνολογία της φυτοεξυγίανσης δεν εφαρμόζεται σε ευρεία κλίμακα, οι ερευνητές θεωρούν ότι πρόκειται για μια τεχνολογία εξυγίανσης με μεγάλο εύρος εφαρμογής και εξέλιξης (Γαλανάκη 2011).

### **2.3.2 Τεχνικές φυτοεξυγίανσης**

Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται στην τεχνολογία της φυτοεξυγίανσης μπορούν να καταταχθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες: (Ζαμπετάκης και λοιποί, 2005, Περάκη, 2009):

#### **1. Φυτοαπορρύπανση (Phytodecontamination)**

Οι μηχανισμοί που περιλαμβάνει η φυτοαπορρύπανση μειώνουν την συγκέντρωση του ρυπαντή σε αξιόλογα επίπεδα, στο σύστημα που μελετάται (έδαφος, νερό και ατμόσφαιρα). Οι μηχανισμοί που εμπλέκονται στην διαδικασία της φυτοαπορρύπανσης αναλύονται σύντομα παρακάτω και φαίνονται στην Εικόνα 2.2 (Μανουσάκη, 2008).

##### **• Φυτοσυσσώρευση (Phytoextraction or Phytoaccumulation)**

Η φυτοσυσσώρευση αναφέρεται στην πρόσληψη μετάλλων και την μεταφορά τους στα υπέργεια τμήματα του φυτού. Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται στις περιπτώσεις που αφορούν ρυπασμένα εδάφη με βαρέα μέταλλα. Βασίζεται στην ικανότητα κάποιων φυτών να συσσωρεύουν συγκεντρώσεις μετάλλων στην βιομάζα τους, έως και 100 φορές περισσότερο σε σχέση με άλλα φυτά.

##### **• Φυτοαποδόμηση (Phytodegradation):**

Η φυτοαποδόμηση περιλαμβάνει διεργασίες που οδηγούν στην διάσπαση/αποδόμηση του ρυπαντή. Η διαδικασία της διάσπασης του ρυπαντή δύναται να πραγματοποιηθεί είτε εντός του φυτού, μέσω μεταβολικών διεργασιών, είτε εξωτερικά στην περιοχή της ρίζας μέσω της παραγωγής ενζύμων. Μετά την διάσπαση του ρυπαντή ακολουθεί η ενσωμάτωση του στους φυτικούς ιστούς. Σε κάποιες περιπτώσεις τα τελικά προϊόντα της διάσπασης απελευθερώνονται στο περιβάλλον, γεγονός που εξαρτάται από το είδος του φυτού και του ρυπαντή. Ο μηχανισμός της φυτοαποδόμησης εφαρμόζεται σε ρυπασμένα εδάφη και υπόγεια ή και επιφανειακά ύδατα.

##### **• Φυτοεξάτμιση (Phytovolatilization):**

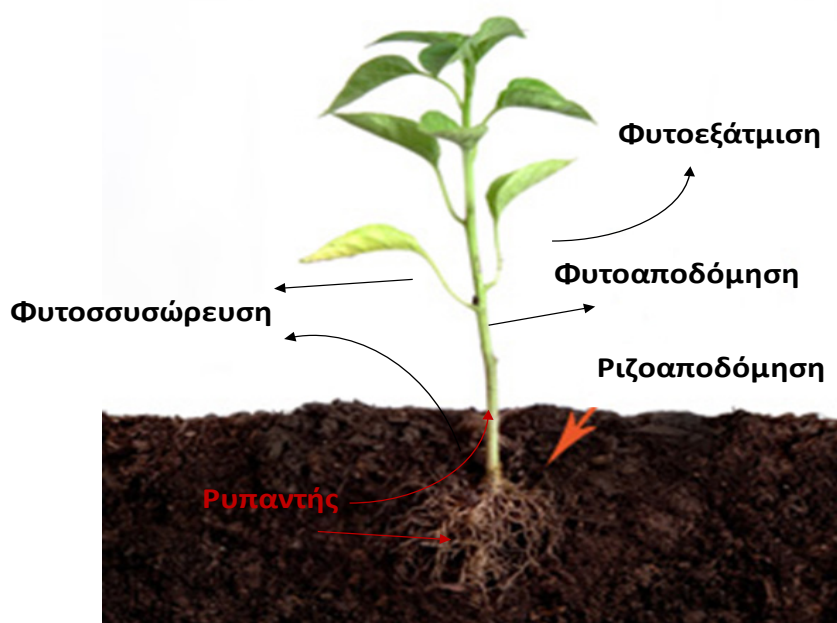
Κατά την διαδικασία της φυτοεξάτμισης, μέταλλα και οργανικές ουσίες προσλαμβάνονται από τα φυτά, μετατρέποντας τα σε πτητικές ουσίες και απελευθερώνοντας τα στην ατμόσφαιρα. Μέσω αυτού του μηχανισμού πραγματοποιείται η εξυγίανση ρυπασμένων εδαφών και υπόγειων υδάτων, χωρίς να απαιτείται η συγκομιδή του φυτικού υλικού.

• **Ριζοαποδόμηση ή Ενισχυμένη βιοαποδόμηση στην ριζόσφαιρα (Rhizodegradation or Enhanced rhizosphere biodegradation):**

Η ριζοαποδόμηση αναφέρεται στην διάσπαση οργανικών ρυπαντών στο έδαφος, μέσω μικροβιακών πληθυσμών που αναπτύσσονται στην περιοχή του ριζικού συστήματος, την ριζόσφαιρα. Οι μικροοργανισμοί (μύκητες, βακτήρια) διασπούν ή μετασχηματίζουν τις οργανικές ουσίες και τις χρησιμοποιούν ως θρεπτικό υπόστρωμα για την ανάπτυξη τους. Τα φυτά συμβάλλουν στην διαδικασία της εξυγίανσης καθώς μέσω των ριζών εκκρίνονται ουσίες και μεταφέρεται οξυγόνο και νερό, που είναι απαραίτητα στοιχεία για την ανάπτυξη των μικροοργανισμών.

• **Ριζοδιήθηση (Rhizofiltration):**

Η ριζοδιήθηση περιλαμβάνει την ρόφηση των ρυπαντών που βρίσκονται σε υδατικά διαλύματα, στις φυτικές ρίζες για συγκράτηση ή και απομάκρυνση.



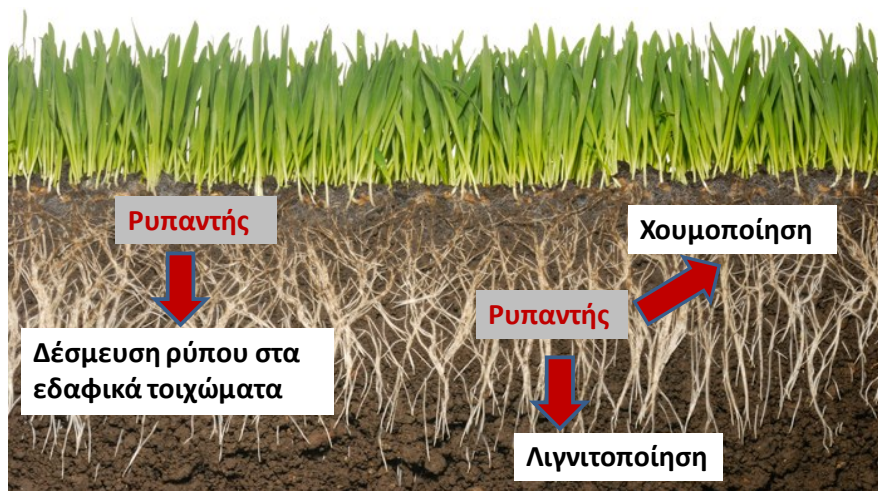
Εικόνα 2.1: Μηχανισμοί που εμπλέκονται στην τεχνική της φυτοαπορρύπανσης

## 2. Φυτοσταθεροποίηση (Phytostabilization)

Η φυτοσταθεροποίηση (Εικόνα 2.3) περιλαμβάνει μηχανισμούς συσσώρευσης και κατακρήμνισης των ρυπαντών ώστε να μειωθεί η κινητικότητα τους στο έδαφος. Έτσι δύναται να αποφευχθεί η μόλυνση του υδροφόρου ορίζοντα, η είσοδος τους στην τροφική αλυσίδα ή ακόμη και η διασπορά τους με τον άνεμο.

Η φυτοσταθεροποίηση βασίζεται στην ικανότητα των φυτών να εκκρίνουν ουσίες, μέσω των ριζών τους, οι οποίες ευνοούν μηχανισμούς όπως η *χουμοποίηση* (*humification*), δηλαδή η δέσμευση του ρυπαντή στα χουμικά συστατικά του εδάφους, η *λιγνιτοποίηση* (*lignification*) δηλαδή η δέσμευση στα κυτταρικά τοιχώματα

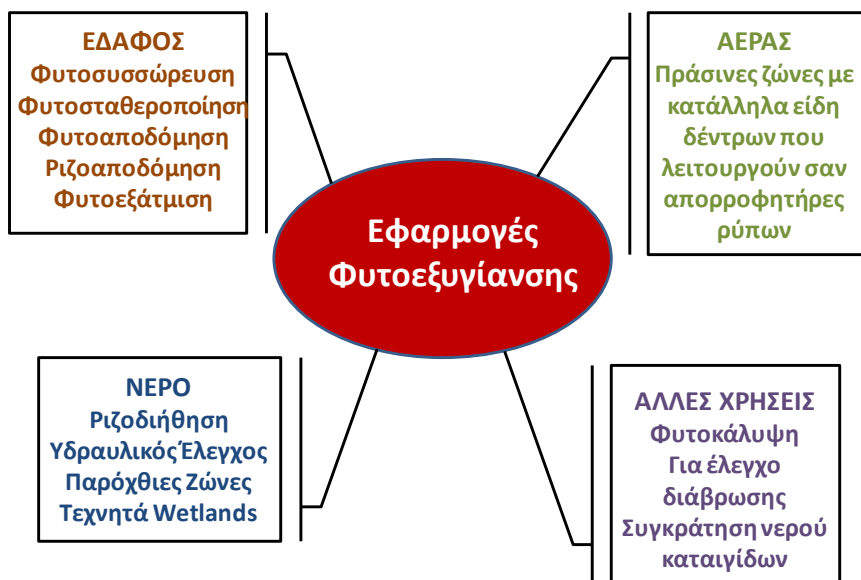
των ριζών και η δέσμευση στα εδαφικά σωματίδια (*soil sequestration*) (Ζαμπετάκης, 2005).



Εικόνα 2.2: Μηχανισμοί που εμπλέκονται στην τεχνική της φυτοσταθεροποίησης

Πέραν των παραπάνω τεχνικών όπως παρουσιάζονται και στο Σχήμα 2.4, η φυτοεξυγίανση βρίσκει εφαρμογή και σε άλλες περιπτώσεις, όπως την (i) φυτοκάλυψη (*vegetation caps*) δηλαδή χρήση φυτών για επικάλυψη του εδάφους σε χώρους ταφής απορριμμάτων, τους (ii) τεχνητούς υγροβιότοπους (*constructed wetlands*), δηλαδή την χρήση φυτών ως μέρος ενός τεχνητού οικοσυστήματος για την απομάκρυνση ρύπων από υδατικές εκροές απόβλητων, τις (iii) παρόχθιες ζώνες (*riparian corridors*), όπου εφαρμόζεται σε υπόγεια και επιφανειακά νερά για την καταστροφή υδατοδιαλυτών οργανικών και ανόργανων ουσιών όπως και για (iv) υδραυλικό έλεγχο (*hydraulic control*) όπου γίνεται έλεγχος της ροής των υπόγειων υδάτων μέσω της πρόσληψης νερού από τα φυτά (Μανουσάκη, 2008).

Έχουν αναπτυχθεί λοιπόν πολλές διαφορετικές στρατηγικές για την φυτοεξυγίανση των ρυπασμένων νερών. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας θα μελετηθεί η εφαρμογή της ριζοδιήθησης μέσω εφαρμογής της σε σύστημα τεχνητών υδροβιότοπων για την απομάκρυνση των βαρέων μετάλλων από τα ύδατα.

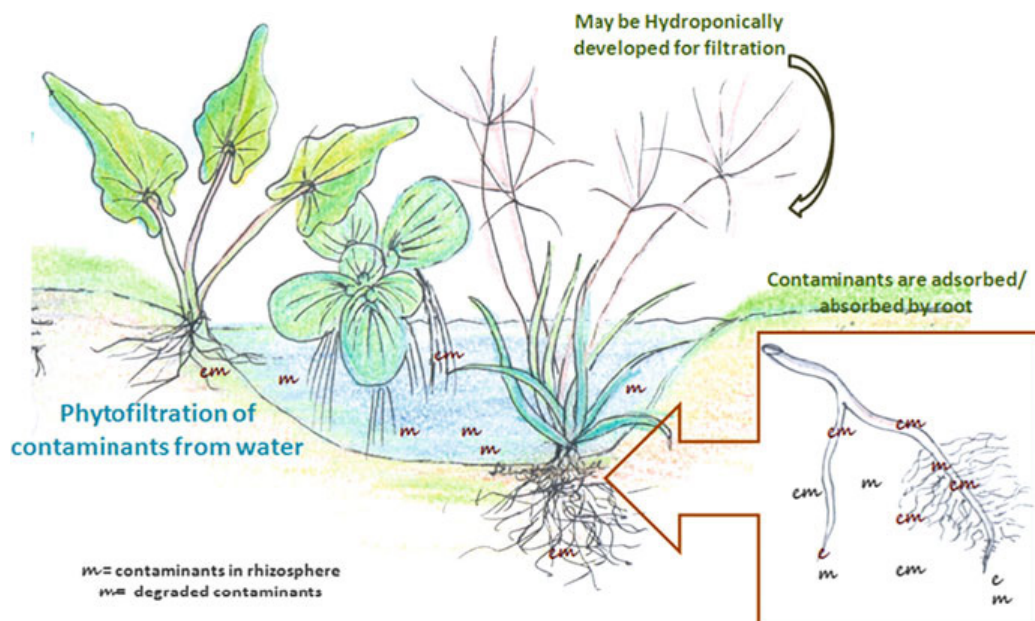


Εικόνα 2.3: Εφαρμογές Φυτοεξυγίανσης (Μανουσάκη, 2008)

Η ριζοδιήθηση (rhizofiltration) αποτελεί μια τεχνική της φυτοεξυγίανσης, κατά την οποία χρησιμοποιούνται φυτά για την απορρόφηση, συγκέντρωση και απομάκρυνση ρυπαντών, όπως βαρέα μέταλλα, ραδιενεργές ουσίες και θρεπτικά συστατικά από ρυπασμένα ύδατα. Η τεχνική είναι αντίστοιχη με την τεχνική της φυτοσυσσώρευσης με την διαφορά ότι τα φυτά χρησιμοποιούνται κυρίως σε ρυπασμένα ύδατα αντί σε χώμα. Τα φυτά που χρησιμοποιούνται στην ριζοδιήθηση πρέπει να έχουν ανεπτυγμένο και ισχυρό ριζικό σύστημα. Η ανάπτυξη τους γίνεται σε θερμοκήπια εντός υδατικών διαλυμάτων, σύμφωνα με την μέθοδο της υδροπονίας (Χρηστος, 2009).

Το ρυπασμένο νερό είτε συλλέγεται από μια ρυπασμένη περιοχή και τροφοδοτεί τα φυτά ή τα φυτά φυτεύονται στην ρυπασμένη τοποθεσία και αντλούν με τις ρίζες τους το νερό και τους διαλυμένους ρύπους. Όταν τα φυτά συσσωρεύσουν τους ρύπους στις ρίζες των φυτών, τότε αυτά συλλέγονται και ακολουθεί περαιτέρω ειδική επεξεργασία τους (Γκαύρου, 2016, USEPA, 1998)

Ο ρύπος μπορεί να ακολουθήσει διάφορες πορείες, συνήθως παραμένει είτε πάνω στην ρίζα, είτε μέσα στην ρίζα, είτε απορροφάται και μεταφέρεται σε άλλα τμήματα του φυτού, όπως το κοτσάνι ή τα φύλλα. Κατά την απορρόφηση των ρύπων στους ιστούς μπορεί να προκύψει και η εξάτμιση τους από τα φυτά. Για την ριζοδιήθηση είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούνται φυτά των οποίων οι ρίζες έχουν μεγαλύτερη ινώδη επιφάνεια. Το είδος του κάθε ρύπου που κατακρατείται εξαρτάται από την φύση του, τη συγκέντρωση του καθώς και το είδος του φυτού (Γουδέλη, 2017, Dushenkov et al., 1995)



Εικόνα 2.4: Σχηματική απεικόνιση της ριζοδιήθησης (Chatterjee, 2013)

Η τεχνική της ριζοδιήθησης βρίσκεται αυτή τη στιγμή σε επίπεδο πιλοτικής κλίμακας. Η εφαρμογή της εξετάζεται για την εξυγίανση επιφανειακών και υπόγειων υδάτων, υγρά απόβλητα, απόβλητα ορυχείων, γεωργικές απορροές και νερουλές ιλύς. Είναι εφαρμόσιμη και για την κατεργασία μεγάλων όγκων νερού με χαμηλές συγκεντρώσεις ρύπων (της τάξης των ppb). Θεωρείται ως ιδανική μέθοδος απομάκρυνσης του Pb, Cd, Cu, Ni, Zn, Cr, μέταλλα τα οποία κυρίως διατηρούνται στις ρίζες των φυτών. Ωστόσο, στο παρελθόν έχει χρησιμοποιηθεί για την απομάκρυνση ραδιενεργών στοιχείων από υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα κατά τη διάρκεια έρευνας στο Chernobyl της Ουκρανίας, με την χρήση του φυτού ηλίανθου (Δεινάκη, 2010, Lee and Yang, 2010).

Η ριζοδιήθηση είναι επίσης αποτελεσματική σε περιπτώσεις κατασκευής τεχνητών υδροβιότοπων που το σύνολο του νερού είναι σε συνεχή σε επαφή με το ριζικό σύστημα (υδροπονία) (Γκαύρου, 2016).

### 2.3.3 Σχεδιασμός συστημάτων φυτοεξυγίανσης

Ο σχεδιασμός των συστημάτων της φυτοεξυγίανσης ποικίλει ανάλογα με:

- το είδος του ρυπαντή
- το επιθυμητό επίπεδο μείωσης της συγκέντρωσης του
- τις επικρατούσες περιβαλλοντικές συνθήκες
- από τα φυτά που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν.

Για την εφαρμογή της τεχνολογίας της φυτοεξυγίανσης πραγματοποιούνται προκαταρκτικές εργαστηριακές έρευνες. Στόχος των ερευνών αυτών είναι η απόφαση της χρήσης ή μη των βιολογικών διαδικασιών της φυτοεξυγίανσης, μέσω μιας σειράς ερωτήσεων σχετικά με την βιοαποικοδόμηση των ρυπαντών, το ποσοστό βιοδιαθεσιμότητας τους στο έδαφος και στο υπόγειο νερό και τέλος τον καθορισμό των βέλτιστων συνθηκών για την ανάπτυξη των φυτών.

Παρόλο που οι παράμετροι σχεδιασμού διαφέρουν σε κάθε τεχνική, είναι δυνατόν να προσδιοριστούν κοινοί παράμετροι σχεδιασμού για όλες τις εφαρμογές της τεχνολογίας της φυτοεξυγίανσης. Οι παράμετροι αυτοί είναι (Ζαμπετάκης και λοιποί, 2005, Χρήστος, 2009, Γκαύρου, 2016, Τρουλινός και Σωμαράκη, 2009):

### **1. Προσδιορισμός του επιπέδου της ρύπανσης**

Κατά το σχεδιασμό του συστήματος της φυτοεξυγίανσης, πρέπει να προσδιοριστεί το είδος και η συγκέντρωση των ρυπαντών καθώς και το βάθος στο οποίο εκτείνεται η ρύπανση. Στην περίπτωση οργανικών ρυπαντών θα πρέπει να υπάρχουν στοιχεία για τη δομή τους, τη λιποφιλικότητα τους ( $\log K_{ow}$ ) καθώς και για τις ιδιότητες προσρόφησης τους.

### **2. Επιλογή του φυτικού υλικού**

Τα φυτά τα οποία πρόκειται να χρησιμοποιηθούν επιλέγονται με βάση τον επιθυμητό μηχανισμό της φυτοεξυγίανσης και το είδος του ρυπαντή. Στην περίπτωση του φυτομετασχηματισμού οργανικών ρυπαντών και της φυτοεξαγωγής βαρέων μετάλλων τα φυτά πρέπει να παρουσιάζουν γρήγορο ρυθμό ανάπτυξης, υψηλούς ρυθμούς εξατμισοδιαπνοής, αρκετά βαθύ ριζικό σύστημα (για την περίπτωση υπογείων υδάτων) και να μετατρέπουν το ρυπαντή σε μη τοξικά παράγωγα.

### **3. Έλεγχος της δυνατότητας χρησιμοποίησης των επιλεγμένων φυτών (Treatability tests)**

Στο στάδιο αυτό πραγματοποιείται έλεγχος της τοξικότητας των ρυπαντών καθώς και προϊόντων που προκύπτουν από την εφαρμογή της φυτοεξυγίανσης. Σε εργαστηριακά πειράματα εφαρμόζονται διαφορετικές συγκεντρώσεις του ρυπαντή στα προτεινόμενα φυτικά είδη και μελετώνται τα παραγόμενα προϊόντα του μεταβολισμού.

### **4. Συντήρηση του συστήματος της φυτοεξυγίανσης**

Η συντήρηση του συστήματος της φυτοεξυγίανσης περιλαμβάνει την άρδευση των φυτών, προσθήκη κατάλληλων λιπασμάτων για τη γρήγορη ανάπτυξη τους και σε ορισμένες περιπτώσεις την αντιμετώπιση βιολογικών εχθρών των φυτών.

### **5. Συγκομιδή του φυτικού υλικού**

Όταν τα φυτά συσσωρεύσουν τον ρυπαντή πρέπει να πραγματοποιηθεί η συγκομιδή και η απομάκρυνση τους από την περιοχή. Η περαιτέρω επεξεργασία του φυτικού υλικού εξαρτάται από τη φύση των παραγόμενων προϊόντων μεταβολισμού καθώς και από την συγκέντρωσή τους στα φυτικά κύτταρα. Στην περίπτωση οργανικών ρυπαντών που διασπώνται σε μη τοξικές ουσίες δεν είναι απαραίτητη η περαιτέρω επεξεργασία του φυτικού υλικού. Στην περίπτωση που πραγματοποιείται σημαντική συσσώρευση στην περιοχή της ρίζας, τότε είναι απαραίτητη η περαιτέρω επεξεργασία των φυτικών ιστών. Η πιο συνηθισμένη διαδικασία επεξεργασίας του φυτικού υλικού είναι η ελεγχόμενη καύση (controlled incineration). Άλλες μέθοδοι που εφαρμόζονται είναι η κομποστοποίηση (composting) καθώς και διάθεση σε χωματερές (landfilling).

### 2.3.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της φυτοεξυγίανσης

Τα συστήματα φυτοεξυγίανσης παρουσιάζουν διάφορα πλεονεκτήματα όπως και μειονεκτήματα κατά την εφαρμογή τους. Παρακάτω παρουσιάζεται ο Πίνακας 2.8 όπου παρατίθενται κάποια από τα μειονεκτήματα και τα πλεονεκτήματα που εμφανίζονται κατά την εφαρμογή της τεχνολογίας αυτής (Δανιηλίδου, 2010, Γκαύρου, 2016):

Πίνακας 2.8: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της φυτοεξυγίανσης

Πλεονεκτήματα φυτοεξυγίανσης	Μειονεκτήματα φυτοεξυγίανσης
-Παράγονται λιγότερα δευτερογενή απόβλητα από ότι σε άλλες τεχνολογίες	-Αργοί ρυθμοί φυτοεξυγίανσης, που απαιτούν συνεχόμενες περιόδους καλλιέργειας των φυτών μέχρι να εξυγιανθεί τελείως το περιβάλλον από τους ρύπους
-Εφαρμόζεται επί τόπου (in situ) και δεν είναι αναγκαία μία εκσκαφή ή άντληση. Έτσι δεν διαταράσσεται το φυσικό τοπίο της ρυπασμένης περιοχής	-Φέρνει αποτελέσματα όταν το βάθος της μόλυνσης δεν ξεπερνά το 1m στο έδαφος και τα 3m στον υδροφόρο ορίζοντα
-Είναι οικονομικά αποδοτική, ιδιαίτερα για μεγάλους όγκους χώματος ή νερού, που είναι ρυπασμένα με μικρές ποσότητες τοξικών ρυπαντών	-Οι κλιματικές ή υδρολογικές συνθήκες τις περιοχής μπορεί να μην επιτρέπουν την καλλιέργεια και ανάπτυξη των κατάλληλων φυτών
-Επιτυγχάνεται η επιθυμητή συγκέντρωση τοξικών ουσιών σε πολύ μικρούς όγκους	-Πρόβλημα με την εναπόθεση των ρυπασμένων φυτών μετά την συγκομιδή τους
-Είναι μια περιβαλλοντικά φιλική τεχνολογία	-Πολύ μεγάλες συγκεντρώσεις των ρυπαντών μπορούν να σκοτώσουν τα φυτά που χρησιμοποιούνται
-Είναι κοινωνικά αποδεκτή	-Απαιτεί μεγάλες εκτάσεις γης για την εξυγίανση
-Έχει μακροχρόνια εφαρμογή	-Το κόστος της μπορεί να αυξηθεί λόγω της ανάγκης ειδικής επεξεργασίας και διάθεσης των χρησιμοποιούμενων φυτών
-Είναι αποτελεσματική στην αντιμετώπιση μεγάλης ποικιλίας ρύπων	-Δυνατότητα μετάδοσης τοξικών ουσιών στην τροφική αλυσίδα μετά από πιθανή κατανάλωση των φυτών από τα ζώα

## 2.4 Τεχνητοί υδροβιότοποι (Constructed wetlands)

### 2.4.1 Τεχνητοί υδροβιότοποι ως οικοσυστήματα

Οι τεχνητοί υδροβιότοποι είναι μια νέα, αναπτυσσόμενη τεχνολογία για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων, που αποτελείται από ένα πολύπλοκο αλλά ενοποιημένο σύστημα νερού, φυτών, ζώων, μικροοργανισμών και του περιβάλλοντος. Χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία ενός μεγάλου φάσματος αποβλήτων, όπως αστικά απόβλητα, αποστραγγίσεις ορυχείων, αστικές απορροές, κτηνοτροφικά απόβλητα, σηπτικές δεξαμενές που έχουν αστοχήσει, αγροτικές απορροές και διάφορα βιομηχανικά απόβλητα (EPA, 1993).

Η δημιουργία και η απόδοση των υδροβιότοπων πρέπει να πραγματοποιείται μέσω οικολογικά υγιών τρόπων. Έτσι για μια επιτυχημένη κατασκευή ενός τεχνητού υδροβιότοπου είναι σημαντικό να κατανοηθεί πως οι φυσικοί υδροβιότοποι είναι δομημένοι και πως συμβάλλουν στην αποκατάσταση του περιβάλλοντος (Kennedy, 2002).

Οι υδροβιότοποι είναι μεταβατικές περιοχές μεταξύ ξηράς και νερού. Τα όρια μεταξύ υδροβιότοπων και ορεινών περιοχών ή βαθέων υδάτων είναι αρκετά ασαφή. Έτσι ο ορισμός του υδροβιότοπου περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα από υγρά οικοσυστήματα, όπως βάλτους, έλη, υγρά λιβάδια, παλιρροιακούς υδροβιότοπους, πλημμυρικές περιοχές και παραποτάμιοι υδροβιότοποι (Kennedy, 2002, Carter, 1996).



Εικόνα 2.5: Φωτογραφία από παλιρροιακό υδροβιότοπο στην Αμερική

Όλοι οι υδροβιότοποι, φυσικοί ή τεχνητοί, γλυκού ή αλμυρού νερού, έχουν ένα κοινό χαρακτηριστικό, την συνεχόμενη ή περιοδική παρουσία επιφανειακού ή κοντά στην επιφάνεια νερού. Η υδρολογία των υδροβιότοπων χαρακτηρίζεται από μικρές παροχές και ρηχά νερά ή κορεσμένα υποστρώματα. Οι μικρές παροχές και τα ρηχά νερά επιτρέπουν την δημιουργία καθιζήσεων καθώς το νερό διασχίζει τον

υδροβιότοπο. Οι μικρές παροχές παρέχουν επίσης παρατεταμένες επαφής μεταξύ του νερού και τις επιφάνειες στο εσωτερικό του υδροβιότοπου. Η πολύπλοκη μάζα οργανικής και ανόργανης ύλης και διάφορες αντιδράσεις που γίνονται μεταξύ αερίων δημιουργούν μια ευρεία κοινότητα μικροοργανισμών που αποδομούν ή μετατρέπουν πολλές διαφορετικές ουσίες (Bassi et al., 2014).

Ακόμα οι περισσότεροι υδροβιότοποι αποτελούν ιδανικό περιβάλλον για την ανάπτυξη αγγειόσπερμων φυτών, προσαρμοσμένα στις κορεσμένες συνθήκες που επικρατούν. Αυτού του τύπου η βλάστηση επιβραδύνει την ροή του νερού, δημιουργεί μικρόκοσμους στις στήλες νερού και παρέχει τροφή στην κοινότητα των μικροοργανισμών. Τα φυτά αυτά συνεχίζουν να αποτελούν θρεπτικών στοιχείων για τους μικροοργανισμούς ακόμα και όταν πεθάνουν (EPA-A handbook on constructed wetlands, 2015, National Park Service, 2015).

Οι υδροβιότοποι παρέχουν πολλές σημαντικές λειτουργίες στο περιβάλλον. Κάτω από τις κατάλληλες συνθήκες οι υδροβιότοποι μπορούν να (Bassi et al., 2014, EPA, 2018):

- ✓ βελτιώσουν την ποιότητα του νερού
- ✓ αποθηκεύσουν νερού μετά από πλημμύρες
- ✓ επηρεάσουν την συχνότητα βροχόπτωσης της περιοχής
- ✓ ανακυκλώσουν διάφορα στοιχεία και ύλη
- ✓ αποτελέσουν ενδιαίτημα για άγρια ζωή και για ψάρια
- ✓ αποτελέσουν χώρους αναψυχής και φυσικής ομορφιάς.

#### **2.4.2 Χαρακτηριστικά των τεχνητών υδροβιότοπων**

Οι τεχνητοί υδροβιότοποι αποτελούνται από κατάλληλα σχεδιασμένες λεκάνες στην επιφάνεια της γης ή δεξαμενές, που περιέχουν νερό, υπόστρωμα και συνηθέστερα, αγγειακά φυτά. Αυτά είναι τα βασικά δομικά στοιχεία που θα απαιτήσει η κατασκευή ενός τεχνητού υδροβιότοπου. Τα άλλα σημαντικά χαρακτηριστικά ενός υδροβιότοπου, όπως είναι οι μικροβιακές κοινότητες ή υδρόβιοι οργανισμοί αναπτύσσονται φυσικά με την ανάπτυξη του ίδιου του υδροβιότοπου (EPA, 2018).

##### **1. Νερό**

Στους τεχνητούς υδροβιότοπους το νερό εισέρχεται από την μια μεριά της δεξαμενής, ρέει πάνω από την επιφάνεια ή διαμέσου του υποστρώματος και βγαίνει από την έξοδο που έχει κατασκευαστεί, ανάλογα με το μέγεθος του υδροβιότοπου. Σε κάποιους η έξοδος είναι ένα κανάλι, σε άλλους καθορίζεται από μια θύρα ενώ σε άλλους από κάποιο σωλήνα. Η υδρολογία είναι ο σημαντικότερος σχεδιαστικός παράγοντας στην κατασκευή των τεχνητών υδροβιότοπων. Συνδέει όλες τις υπόλοιπες παραμέτρους και είναι συνήθως ο βασικότερος παράγοντας που καθορίζει την επιτυχημένη ή αποτυχημένη λειτουργία του. Παρόλο που η υδρολογία σε έναν τεχνητό υδροβιότοπο δεν διαφέρει πάρα πολύ από την υδρολογία των επιφανειακών ή των υποεπιφανειακών νερών, έχει κάποιες διαφορές που είναι σημαντικές για την εύρυθμη λειτουργία του (Barbier, 2011, Carter, 1996, Wu et al., 2015):

- Μικρές αλλαγές στην υδρολογία μπορεί να έχουν πολύ μεγάλες επιπτώσεις στην αποτελεσματικότητα του υδροβιότοπου
- Εξαιτίας της μεγάλης υδάτινης επιφάνειας και του ρηχού βυθού, το σύστημα του υδροβιότοπου αλληλεπιδρά έντονα με την ατμόσφαιρα μέσω της βροχόπτωσης και της εξατμισοδιαπνοής.
- Η πυκνότητα της βλάστησης επηρεάζει σημαντικά την υδρολογία του, πρώτον γιατί εμποδίζει την ροή του νερού στον υδροβιότοπο καθώς το νερό θα περάσει μέσω του δικτύου του φυτού και δεύτερον γιατί περιορίζει την έκθεση του από τον αέρα και τον ήλιο.

## **2. Υποστρώματα, ιζήματα και φυτικά απορρίμματα**

Τα υποστρώματα που χρησιμοποιούνται κατά την κατασκευή ενός τεχνητού υδροβιότοπου περιλαμβάνουν χώμα, άμμο, χαλίκι, πέτρες και οργανική ύλη σαν κομπόστ. Επίσης, τα ιζήματα και τα φυτικά απορρίμματα συσσωρεύονται στον υδροβιότοπο λόγω των χαμηλών ταχυτήτων των υδάτων και την υψηλή παραγωγικότητα των υδροβιότοπων. Το είδος του υποστρώματος, τα ιζήματα που παράγονται καθώς και τα φυτικά απορρίμματα που προκύπτουν είναι απαραίτητα για αρκετούς λόγους (EPA, 2017, Wu et al., 2014, Wu et al., 2015):

- Συντηρούν πολλούς από τους οργανισμούς του υδροβιότοπου
- Η διαπερατότητα του υποστρώματος επηρεάζει την ροή του νερού διαμέσου του υδροβιότοπου
- Πολλές χημικές, βιολογικές και μικροβιακές δραστηριότητες λαμβάνουν στο υπόστρωμα
- Το υπόστρωμα κατακρατεί πολλούς ρύπους
- Η συσσώρευση των φυτικών απορριμμάτων αυξάνει την ποσότητα οργανικής ύλης που υπάρχει στον υδροβιότοπο. Η οργανική ύλη παρέχει δυνατότητα για στοιχειακές ανταλλαγές και μικροβιακή ανάπτυξη και είναι πηγή άνθρακα, της βασικότερης δηλαδή πηγής ενέργειας που τροφοδοτεί τις πιο σημαντικές βιολογικές αντιδράσεις στους υδροβιότοπους.

Τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά του χώματος και των άλλων υποστρωμάτων αλλοιώνονται με την ύπαρξη του νερού. Σε ένα κορεσμένο υπόστρωμα το νερό αντικαθιστά τον αέρα στους πόρους του και μικροβιακοί μεταβολισμοί καταναλώνουν το διαθέσιμο οξυγόνο. Καθώς το οξυγόνο καταναλώνεται πιο γρήγορα από ότι αντικαθίσταται μέσω της διάχυσης από την ατμόσφαιρα, στο υπόστρωμα αναπτύσσονται ανοξικές συνθήκες. Τέτοιου τύπου περιβάλλον είναι απαραίτητο για την απομάκρυνση ρύπων και συγκεκριμένα βαρέων μετάλλων (EPA-A handbook on constructed wetlands, 2015).

## **3. Βλάστηση**

Η ύπαρξη τόσο των αγγειακών φυτών και μακρόφυτων όσο και των μη αγγειακών (άλγη) είναι απαραίτητη και σημαντική στους τεχνητούς υδροβιότοπους. Η

φωτοσύνθεση που πραγματοποιείται από τα άλγη αυξάνει τα ποσοστά του διαλυμένου οξυγόνου στο νερό, που στην πορεία επηρεάζει τα θρεπτικά στοιχεία και τις διάφορες αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα. Τα αγγειακά φυτά και τα μακρόφυτα συμβάλλουν στην εξυγίανση των λυμάτων με πολλούς τρόπους (Vymazal, 2011, EPA, 2015, Sandoval-Herazo et al., 2018, Wu et al., 2015):

Σταθεροποιούν το υπόστρωμα και περιορίζουν την διοχετευμένη ροή.

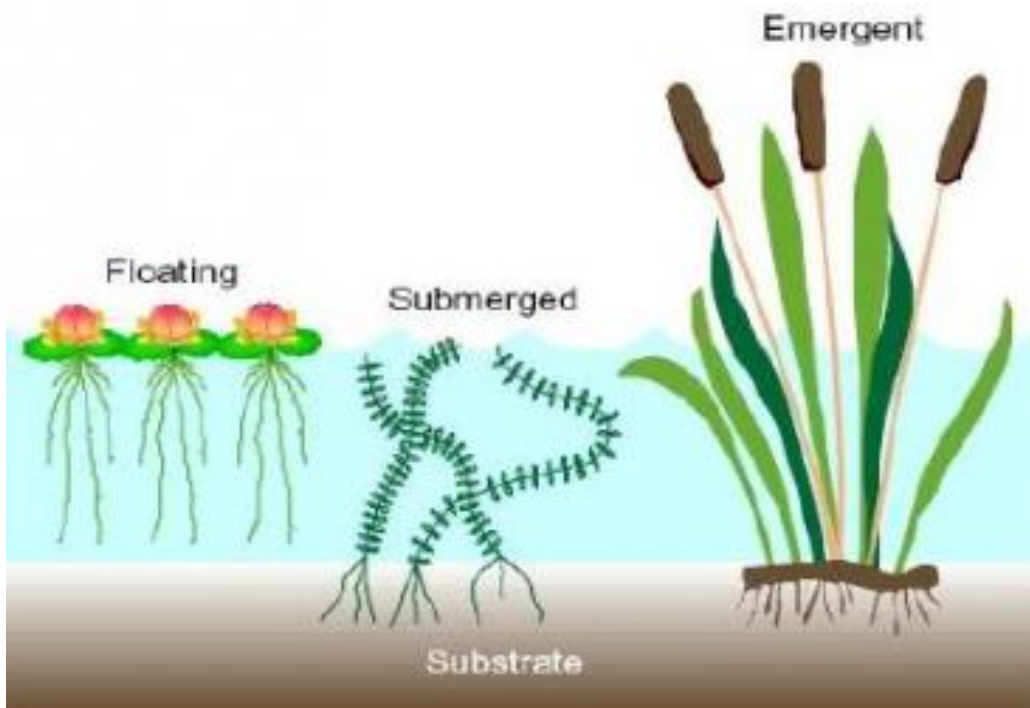
- Μειώνουν τις υδάτινες ταχύτητες, επιτρέποντας έτσι στα διάφορα σωματίδια να καθιζάνουν.
- Απορροφούν άνθρακα και θρεπτικά στοιχεία τα οποία διαχέουν μέσω τους φυτικούς ιστούς τους.
- Μεταφέρουν αέρια μεταξύ της ατμόσφαιρας και του υποστρώματος.
- Η διαφυγή οξυγόνου από τα υποεπιφανειακά φυτά δημιουργεί οξυγονωμένο περιβάλλον για τις μικροβιακές κοινότητες στο εσωτερικό του υποστρώματος.
- Το κοτσάνι καθώς και το ριζικό σύστημα των φυτών αποτελούν χώρους για ανάπτυξη μικροβιακής κοινότητας.
- Δημιουργούν φυτικά απορρίμματα, όταν πεθαίνουν και αποσυντίθενται, που αποτελούν ιδανικές πηγές τροφής των μικροοργανισμών.

Στους τεχνητούς υγροβιότοπους συνήθως φυτεύονται μη ξυλώδη φυτά τα οποία αναπτύσσουν το ριζικό τους σύστημα κάτω από την επιφάνεια, στο υπόστρωμα, με το κοτσάνι τους και τα φύλλα τους να εξέχουν από το νερό. Συνηθισμένα είδη βλάστησης αποτελούν τα νεροκάλαμα, τα βούρλα και τα ψαθί (Γκαύρου, 2016).

#### **4. Μικροοργανισμοί**

Ένα ακόμα βασικό χαρακτηριστικό των υγροβιότοπων είναι ότι η λειτουργία τους ρυθμίζεται σε πολύ μεγάλο βαθμό από μικροοργανισμούς και την μεταβολική τους δραστηριότητα. Οι μικροοργανισμοί περιλαμβάνουν βακτήρια, μύκητες, πρωτόζωα και άλγη. Η μικροβιακή δραστηριότητα (Bodelier et al., 2013, Weber, 2016):

- Μετατρέπει ένα μεγάλο αριθμό οργανικών και ανόργανων ουσιών σε αβλαβής και αδιάλυτες ουσίες.
- Μεταβάλλει τις αναγωγικές/οξειδωτικές συνθήκες που επικρατούν στο υπόστρωμα και έτσι επηρεάζει τις ικανότητες επεξεργασίας του υγροβιότοπου.
- Σχετίζεται με την ανακύκλωση των θρεπτικών ουσιών.



Εικόνα 2.6: Κατηγορίες φυτών στους τεχνητούς υγροβιότοπους. Πρώτα αναπαρίστανται τα αιωρούμενα φυτά (όπως οι υάκινθοι νερού), υποεπιφανειακή βλάστηση και φυτά που ανυψώνονται πάνω από την επιφάνεια του νερού (όπως είδη ψαθιού και είδη θούρλων και τέλος, υπόστρωμα

Κάποιες μικροβιακές δραστηριότητες είναι αερόβιες, δηλαδή απαιτούν οξυγόνο για να πραγματοποιηθούν ενώ άλλες είναι αναερόβιες, δηλαδή λαμβάνουν χώρα σε ανοξικές συνθήκες. Πολλά είδη βακτηρίων είναι δυνητικά αναερόβια, δηλαδή είναι ικανά να λειτουργήσουν κάτω από αερόβιες και αναερόβιες συνθήκες, όταν υπάρχει συνεχής αλλαγή περιβαλλοντικών συνθηκών (Weber, 2016).

Οι μικροβιακοί πληθυσμοί προσαρμόζονται στις αλλαγές που προκύπτουν λόγω νερού. Πληθυσμοί μικροβίων μπορούν να αναπτυχθούν πολύ γρήγορα όταν εκτίθενται στα κατάλληλα θρεπτικά υλικά. Όταν οι περιβαλλοντικές συνθήκες δεν είναι πλέον κατάλληλες, πολλοί μικροοργανισμοί γίνονται αδρανείς και μπορούν να παραμείνουν αδρανείς για χρόνια (EPA, 2015).

Η μικροβιακή κοινότητα ενός τεχνητού υγροβιότοπου μπορεί να επηρεαστεί από τοξικές ουσίες, όπως εντομοκτόνα ή βαρέα μέταλλα. Είναι λοιπόν σημαντικό οι συγκεντρώσεις τέτοιων ουσιών που εισέρχονται στον υγροβιότοπο να είναι ελεγχόμενες, ώστε να μην είναι καταστροφικές για τους μικροοργανισμούς (EPA, 2015).

## 5. Πανίδα

Οι τεχνητοί υγροβιότοποι παρέχουν ενδιαίτημα σε μια μεγάλη ποικιλία ασπόνδυλων και σπονδυλωτών ζώων. Τα ασπόνδυλα ζώα, όπως είναι τα έντομα και τα σκουλήκια συμβάλλουν στην διαδικασία επεξεργασίας των λυμάτων θρυμματίζοντας απόβλητα και καταναλώνοντας οργανική μάζα. Οι προνύμφες πολλών εντόμων είναι υδρόβιες

και καταναλώνουν σημαντικές ποσότητες υλικών σε αυτό το στάδιο της ανάπτυξης του, που μπορεί να διαρκεί και χρόνια. Τα ασπόνδυλα επίσης παίζουν ισχυρούς οικολογικούς ρόλους, για παράδειγμα η λιβελούλα τρέφεται με τις προνύμφες κουνουπιών.

Παρόλο που τα ασπόνδυλα είναι τα πιο σημαντικά ζώα όσον αφορά την εξυγίανση του νερού, οι τεχνητοί υδροβιότοποι ελκύουν μεγάλη ποικιλία αμφιβίων, ερπετών, πουλιών και θηλαστικών (EPA, 2015, Worrall et al., 1997).

## **6. Τοπία και αισθητική**

Παρόλο που ο πρωταρχικός σκοπός των τεχνητών υδροβιότοπων είναι η επεξεργασία των αποβλήτων, αυξάνουν σημαντικά την αισθητική και την ομορφιά του τοπίου στην περιοχή που κατασκευάστηκαν. Όπως οι φυσικοί υδροβιότοποι, έτσι και οι τεχνητοί προσφέρουν μια πολύ όμορφη και υγιή περιβαλλοντική εικόνα. Η πολυπλοκότητα του σχήματος, του χρώματος, του μεγέθους και της βλάστησης προσθέτουν ποιοτική ποικιλία σε ένα οικοσύστημα. Οι τεχνητοί υδροβιότοποι μπορούν να κατασκευαστούν με τέτοια σχήματα που να ακολουθούν τις φυσικές ισοψείς της περιοχής, ενώ άλλοι υδροβιότοποι μοιάζουν πανομοιότυποι με τους φυσικούς (Campbell and Ogden, 1999).



*Εικόνα 2.7: Τα φλαμίνγκο σπάνια εμφανίζονται στην Φλόριντα (Αμερική), αλλά το Μάιο του 2014 ένα κοπάδι από 147 φλαμίνγκο εμφανίστηκαν σε ένα τεχνητό υδροβιότοπο της περιοχής που το διαχειριζόταν η διεύθυνση νερού της νότιας Φλόριντα, South Florida Water Management*



*Εικόνα 2.8: Ο τεχνητός υγροβιότοπος επιτυγχάνει να συνδυάσει την εξυγίανση νερού με ένα πανέμορφο τοπίο. Μεγάλοι διάδρομοι διασχίζουν τον υγροβιότοπο και εισχωρούν στο νερό, όπου επισκέπτες μπορούν να δουν την επεξεργασία που πραγματοποιείται μέσω γυάλινων τοίχων.*

Οι υγροβιότοποι για την εξυγίανση νερού χρησιμοποιούνται συνήθως σαν μια ειδική επεξεργασία, μετά από την δευτεροβάθμια ή την τριτοβάθμια επεξεργασία σε μια ΕΕΛ. Οι μηχανισμοί που διαθέτουν για την βελτίωση της ποιότητας του νερού είναι πολυάριθμοι και συνήθως συσχετισμένοι. Οι πιο αποτελεσματικοί υγροβιότοποι στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων είναι αυτοί που εφαρμόζουν αυτούς τους μηχανισμούς. Αυτοί οι μηχανισμοί περιλαμβάνουν (Polprasert, 2004, EPA, 2015, Wu et al., 2015):

- Την καθίζηση των αιωρούμενων σωματιδίων.
- Την διήθηση και χημική κατακρήμνιση, μέσω της επαφής του νερού με το υπόστρωμα, τα ιζήματα και τα φυτικά απορρίμματα.
- Χημικές αντιδράσεις.
- Τις διεργασίες της προσρόφησης και της ιοντοεναλλαγής στις επιφάνειες των φυτών, στο υπόστρωμα, στα ιζήματα και στα φυτικά απορρίμματα.
- Την διάσπαση και μετατροπή των ρύπων από τους μικροοργανισμούς και τα φυτά.
- Την πρόσληψη και μετατροπή των θρεπτικών στοιχείων από τους μικροοργανισμούς και τα φυτά.
- Την καταστροφή των παθογόνων μικροοργανισμών, λόγω φυσικών αιτιών ή λόγω κατανάλωσης τους από άλλους μικροοργανισμούς.

### 2.4.3 Τύποι τεχνητών υδροβιότοπων

Για την επεξεργασία των ρυπασμένων υδάτων έχουν αναπτυχθεί και εφαρμοστεί δύο τύποι τεχνητών υδροβιότοπων:

#### 1. Τεχνητοί υδροβιότοποι επιφανειακής ροής (Free water surface systems-FWS)

Όπως ορίζει και ο τίτλος τους, οι υδροβιότοποι επιφανειακής ροής έχουν ως χαρακτηριστικό την κυρίως κίνηση του νερού πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, σε ύψος που καθορίζεται από τις λειτουργικές ανάγκες του συστήματος. Σε τέτοιους τύπους υδροβιότοπων η βλάστηση έχει ρίζες στο υπόστρωμα και το φυτό αναπτύσσεται πάνω από την επιφάνεια του νερού. Ακόμα, η ποσότητα του νερού που διέρχεται μέσα από το υπόστρωμα είναι περιορισμένη. Περιορισμένο είναι επίσης και το ποσοστό του συνολικού καθαρισμού του νερού που οφείλεται στην παρουσία και τα χαρακτηριστικά του υποστρώματος (EPA-A handbook of constructed wetlands, 2015, Μανιός, 2009, Vymazal, 2008).

#### Χαρακτηριστικά κατασκευής των FWS υδροβιότοπων

Τα βάθη του νερού στα συστήματα FWS είναι σχετικά μικρά (μεταξύ 0,2 έως 0,6 μέτρα). Ο πυθμένας του υδροβιότοπου μπορεί να είναι διαπερατός, επιτρέποντας εν μέρη τη στράγγιση του ύδατος. Σε αυτό το σύστημα, τα υγρά απόβλητα περνούν πάνω από το υπόστρωμα υποστήριξης, μεταξύ των μίσχων των φυτών και διαμέσου οποιουδήποτε αποσαθρωμένου υλικού της επιφάνειας συναντήσουν. Το φως του ήλιου διαπερνά το στρώμα του νερού μέχρι το κατώτατο σημείο, μέσω μιας ρηχής λεκάνης, έτσι ώστε μπορεί να προκαλέσει μια αύξηση της ταχύτητας της ανάπτυξης άλγερων και ενεργού αντίδρασης φωτοσύνθεσης (Γκαύρου, 2016, Vymazal, 2008)

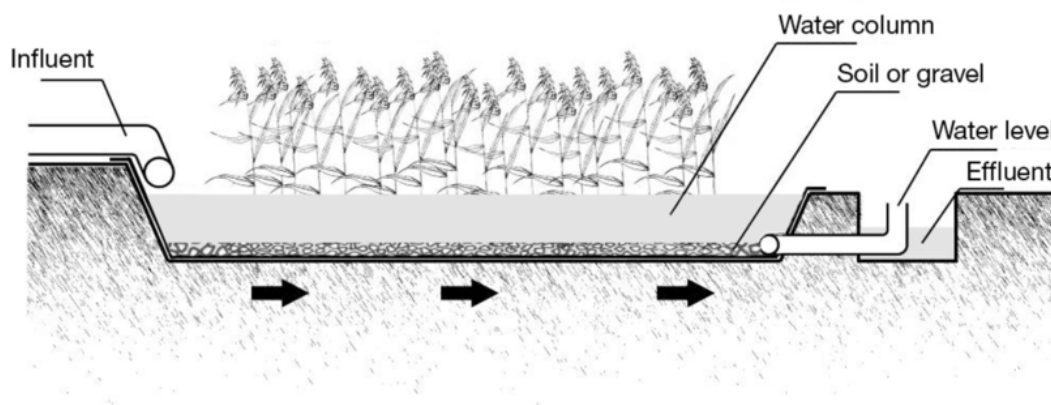
Σε αυτούς τους υδροβιότοπους η στρώση κοντά στην επιφάνεια είναι αερόβια ενώ στο υπόστρωμα και στα πιο βαθιά νερά οι συνθήκες είναι συνήθως αναερόβιες. Για αυτό και η κύρια πηγή οξυγόνου είναι η ελεύθερη επιφάνεια του, αλλά η ύπαρξη βιολογικής βλάστησης παρεμποδίζει τον επιφανειακό επαναερισμό, που είναι δυνατό να διενεργείται με τον άνεμο. Γι' αυτό θα πρέπει να εφαρμόζονται μικρά οργανικά φορτία, καθώς η ύπαρξη τους επιδρά ανασταλτικά στην ανάπτυξη αλγών (Wu et al., 2015).

Η απομάκρυνση στερεών σε αιώρηση οφείλεται κυρίως στο μηχανισμό της καθίζησης και διενεργείται, κυρίως, σε μικρές αποστάσεις από το σημείο εισροής του αποβλήτου στο σύστημα. Η απομάκρυνση του αζώτου οφείλεται, κυρίως, στις διεργασίες νιτροποίησης - απονιτροποίησης και λιγότερο στην πρόσληψή του από τα φυτά και γι' αυτό εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ταχύτητα εφαρμογής του οργανικού φορτίου και το χρόνο συγκράτησης. Ακόμη και όταν τα φυτά που χρησιμοποιούνται συγκομίζονται περιοδικά, η απομάκρυνση του αζώτου η οφειλόμενη στην πρόσληψή του από τα φυτά, αντιπροσωπεύει ένα ποσοστό 10-15% της συνολικής απομάκρυνσής του. Τέλος, η απομάκρυνση του φωσφόρου σε τέτοια συστήματα είναι περιορισμένη, εξαιτίας της περιορισμένης επαφής του αποβλήτου με το έδαφος (Σοφιανός, 2016, Vymazal, 2008).

## Εφαρμογές των FWS υδροβιότοπων

Τα συστήματα FWS αποτελούν την πλέον κοινή επιλογή φυσικών συστημάτων στη Βόρεια Αμερική. Στις Η.Π.Α. τα δύο τρίτα των τεχνητών υδροβιότοπων είναι FWS. Από την άλλη στο σχεδιαστικό manual της Seven Trent Water plc και το Water Research Council γίνεται ελάχιστη αναφορά στα συστήματα αυτά. Αυτό είναι χαρακτηριστικό της σχεδόν ανύπαρκτης παρουσίας των συστημάτων αυτών στη Μεγάλη Βρετανία. Αντίθετα μια σειρά από δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά αναφέρουν εκτεταμένη χρήση των συστημάτων αυτών στη Βόρεια Ευρώπη και κυρίως σε περιοχές με σκληρό χειμώνα όπως Σουηδία και Νορβηγία (Μανιός, 2009).

Πλεονεκτούν στο χαμηλό κόστος κατασκευής όπως επίσης και στην ευκολία κατασκευής, συντήρησης και λειτουργίας τους, αλλά έχουν γενικά μια χαμηλότερη απόδοση απομάκρυνσης ρύπων, έναντι των συστημάτων SSF. Έχει υπάρξει μια πρόσφατη προσπάθεια να αναπτυχθεί μια ζώνη ανοικτού-ύδατος, χωρίς βλάστηση, για να βελτιωθεί η απόδοση της απομάκρυνσης αζώτου, να προωθηθεί η καλύτερη ροή της εισροής, και να παρασχεθούν ευκολότερα προσεγγίσιμοι βιότοποι άγριας φύσης (Γκαύρου, 2016).



Εικόνα 2.9: Τεχνητός υδροβιότοπος ελεύθερης ροής (Avila, 2013)

## 2. Τεχνητοί υδροβιότοποι υποεπιφανειακής (ή υπόγειας) ροής (Subsurface flow systems-SF)

Τα συστήματα αυτά έχουν ως κύριο χαρακτηριστικό την κίνηση του νερού (ροή) κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Τα συστήματα υποεπιφανειακής ροής σχεδιάζονται με σκοπό την επίτευξη δευτεροβάθμιας ή προωθημένης επεξεργασίας. Αυτά τα συστήματα καλούνται επίσης συστήματα «ριζόσφαιρας» ή «φίλτρων εδάφους-καλαμιών» και αναπτύσσονται μέσα σε κανάλια ή τάφρους με σχετικά στεγανούς πορώδεις πυθμένες που περιέχουν άμμο ή άλλα γήινα μέσα υποστήριξης της αναπτυσσόμενης (επιφανειακά) φυτικής βλάστησης (Σοφιανός, 2016, Vymazal, 2008).

## **Χαρακτηριστικά κατασκευής των SF υδροβιότοπων**

Τα συστήματα SF αποτελούνται χαρακτηριστικά από μια τάφρο ή μια κλίνη, που σφραγίζεται από μια στεγανή μεμβράνη για να εμποδιστεί η διαρροή και υπόστρωμα που είναι κορεσμένο με νερό που βοηθά την ανάπτυξη των φυτών. Στα συστήματα αυτά η επιφάνεια του νερού διατηρείται ακριβώς κάτω από την επιφάνεια του εδάφους ή του χρησιμοποιούμενου μέσου. Η επεξεργασία του υγρού αποβλήτου οφείλεται σε φυσικές και βιοχημικές αποκρίσεις του μέσου, καθώς επίσης στην επαφή του με το ριζικό σύστημα των φυτών. Τα επίπεδα απομάκρυνσης των ρυπαντών είναι ισοδύναμα των συστημάτων FWS και παρουσιάζουν μειωμένα προβλήματα, σχετικά με την ανάπτυξη κουνουπιών και δυσάρεστων οσμών. Για την κατασκευή των υποστρωμάτων χρησιμοποιείται κυρίως έδαφος, άμμος και διάφορα άλλα χονδρόκοκκα ή ακόμη και πλαστικά ή άλλα αδρανή υλικά αλλά για λόγους διατήρησης της υδραυλικής αγωγιμότητας σε ικανοποιητικά επίπεδα, με τη μεγαλύτερη δυνατότητα αυτοκαθαρισμού του φίλτρου (αυτόν τον ρόλο παίζει το υπόστρωμα), τα χαλίκια προτιμώνται (Σοφιανός, 2016). Στην πλευρά της εισόδου των λυμάτων υπάρχει διάτρητος πλαστικός σωλήνα με οπές 5 με 20mm ανά 2 με 3 μέτρα. Η κλίνη στα πρώτα 1 -2 μέτρα της πλευράς εισόδου πληρούται με κροκαλοπαγή πετρώματα διαμέτρου 50 -200mm, για να επιτυγχάνεται η σχεδόν άμεση ομοιόμορφη εισαγωγή των εισερχόμενων υγρών αποβλήτων στην κυρίως κλίνη. Η κίνηση της ροής αυτής υποβοηθείται λόγω της ύπαρξης κλίσης 0,5 – 1% (Γκαύρου, 2016, Wu et al., 2015, Vymazal, 2008).

Η απομάκρυνση BOD και στερεών συστατικών σε αιώρηση διενεργείται με διήθηση, καθίζηση και αποδόμηση από αερόβιους και αναερόβιους μικροοργανισμούς. Η απομάκρυνση του αζώτου σε τέτοια συστήματα, διενεργείται με τους μηχανισμούς νιτροποίησης και απονιτροποίησης. Η απομάκρυνση του φωσφόρου εξαρτάται, κυρίως, από το χρησιμοποιούμενο υπόστρωμα. Η απομάκρυνση μετάλλων ποικίλλει και επιτυγχάνεται, κυρίως, με κατακρήμνιση και προσρόφησή τους. Τέλος η απομάκρυνση των παθογόνων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη δομή του υποστρώματος και την ταχύτητα ροής (Σοφιανός, 2016).

Τα συστήματα SF υποδιαιρούνται σε δύο υποκατηγορίες συστημάτων, με βάση την ροή των αποβλήτων:

### **1. Τεχνητοί υδροβιότοποι κατακόρυφης υπόγειας ροής (Vertical flow subsurface constructed wetlands-VF)**

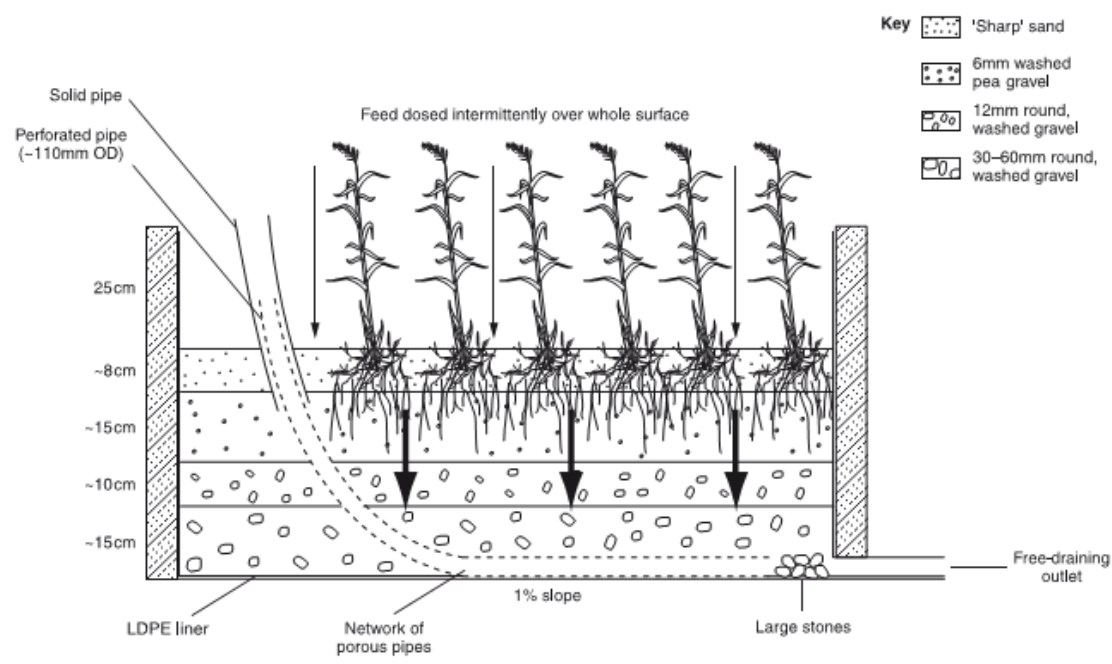
Τα συστήματα αυτά χαρακτηρίζονται από την κατακόρυφη ροή λυμάτων μέσα από τις εδαφικές στρώσεις των λεκανών τους. Η λειτουργία τέτοιων υδροβιότοπων προσομοιάζεται αρκετά με το περιοδικό πότισμα μιας γλάστρας στην οποία το νερό αρχικά πλημμυρίζει τη λεκάνη και στην συνέχεια αφήνεται να στραγγίσει. Η αρχή της μεθόδου στηρίζεται στο συνδυασμό των δράσεων του εδάφους, των ριζών και των μικροοργανισμών. Οι λεκάνες στα συστήματα αυτά κατασκευάζονται με ένα βάθος περίπου 0,90 έως 1,20 μέτρα, με μια μέση κλίση πυθμένα περίπου 1%. Ο πυθμένας

και τα πρηνή τους καλύπτονται από γεωμεμβράνη ή κατασκευάζονται από σκυρόδεμα. Στη συνέχεια, γίνεται πλήρωση των λεκανών με αδρανή υλικά συνολικού βάθους μέχρι ενός μέτρου, φθίνουσας κοκκομετρίας από τον πυθμένα προς την επιφάνεια (Korkusuz et al., 2004).

Το επιφανειακό στρώμα της λεκάνης, βάθους 10 έως 30 εκατοστά, καλύπτεται με άμμο, μέσα στην οποία φυτεύονται και αναπτύσσονται είδη καλαμιών. Για τη λειτουργία αυτού του συστήματος οι λεκάνες κατακλύζονται περιοδικά με μεγάλες παροχές λυμάτων και η ροή γίνεται κατά την κατακόρυφη διεύθυνση Korkusuz et al., 2004).

Ακόμα και αν οι κατακόρυφης ροής τεχνητοί υδροβιότοποι χρησιμοποιούνται κυρίως για την απομάκρυνση COD, TSS και κολοβακτηριδίων, υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον στην χρήση τους. Για τέτοιες διαδικασίες, τα υποστρώματα (κορεσμένα μέσα των τεχνητών υδροβιότοπων) θεωρούνται επίσης πολύ σημαντικά. Με σκοπό τη βελτίωση κατακράτησης φωσφόρου, υποστρώματα με μεγαλύτερη ικανότητα προσρόφησης φωσφόρου, μεγαλύτερο περιεχόμενο σε ασβέστιο, σίδηρο και αργίλιο, μεγαλύτερη επιφάνεια σωματιδίων και κατάλληλη υδραυλική αγωγιμότητα χρησιμοποιούνται ευρέως. Για το λόγο αυτό, οι ερευνητές υδροβιότοπων έχουν ξεκινήσει να χρησιμοποιούν βιομηχανικά παραπροϊόντα, όπως μικρού βάρους τσιμεντολάσπη (LWA, LECA κτλ.) και απορρίμματα από βιομηχανίες, όπως και φυσικά υλικά με υψηλή ικανότητα προσρόφησης (Σοφιανός, 2016, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, 2018)).

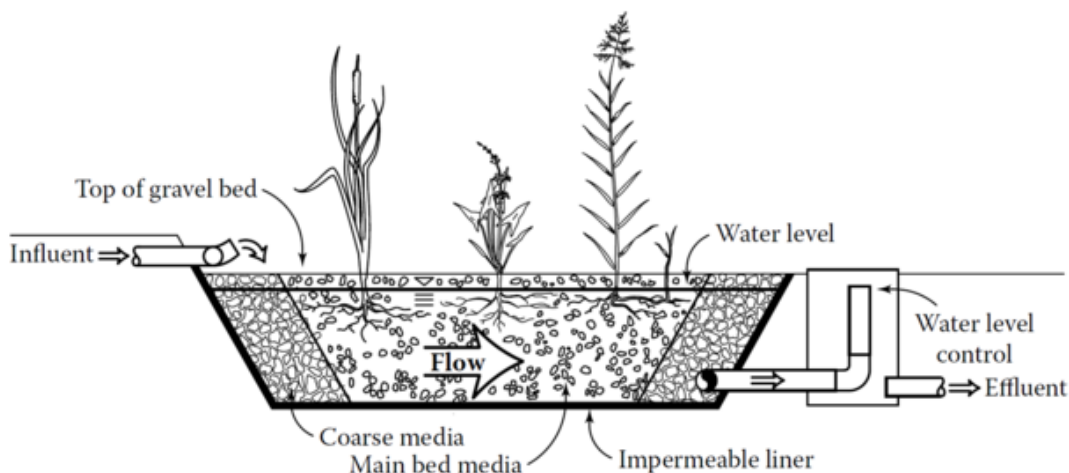
Τα πλεονεκτήματα αυτού του είδους τεχνητού υδροβιότοπου έναντι των υπολοίπων είναι η απαίτηση μικρότερης έκτασης για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων και η διατήρηση αερόβιων συνθηκών επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων, εξαιτίας της περιοδικής ανάπαυσης και ως εκ τούτου και περιοδικής ξήρανσης κάθε λεκάνης. Αυτό το πλεονέκτημα των υδροβιότοπων με περιοδική κατάκλιση αποδίδεται, κυρίως, στις συνθήκες ακόρεστης ροής και επιπρόσθετα στο μεγαλύτερο πάχος της εδαφικής στρώσης των λεκανών, με το οποίο επιτυγχάνεται ένα επιπρόσθετο φιλτράρισμα των υγρών αποβλήτων (Σοφιανός, 2016, Korkusuz et al., 2004, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology et al., 2018))



Εικόνα 2.10: Τεχνητός υγροβιότοπος υπόγειας κατακόρυφης ροής

## 2. Τεχνητοί υγροβιότοποι οριζόντιας υπόγειας ροής (Horizontal flow subsurface constructed wetlands – HF)

Σε έναν οριζόντιο υγροβιότοπο HF, ισχύει ότι και σε έναν VF, με την διαφορά ότι τα πρωτοβάθμια επεξεργασμένα υγρά απόβλητα διατρέχουν οριζόντια κατά μήκος την κλίση του υγροβιότοπου που αποτελείται από ρίζες, χαλίκια ή/και άμμο. Η απομάκρυνση των ρυπαντών γίνεται μέσω προσρόφησης στο υλικό πλήρωσης (π.χ χαλίκι, άμμος), διήθησης, καθίζησης και αποικοδόμησης. Η σύνθετη μήτρα αυτή φιλοξενεί και στρώματα προσκολλημένων μικροοργανισμών. Αυτήν την περίοδο, μερικοί ερευνητές αναπτύσσουν νέα συστήματα τεχνητών υγροβιότοπων, που εφαρμόζουν χαρακτηριστικά γνωρίσματα διαφορετικών τύπων υγροβιότοπων προκειμένου να επιτευχθεί η υψηλότερη απόδοση στην αφαίρεση ρύπων, π.χ. με εφαρμογή ενός είδους παλιρροιακής ροής ή με τη χρησιμοποίηση ενός τροποποιημένου υγροβιότοπου που εξοπλίζεται με υποβρύχια αντλία αερισμού για να ενισχυθεί η μικροβιακή αποσύνθεση της οργανικής ουσίας (Γκαύρου, 2016, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology et al., 2018).



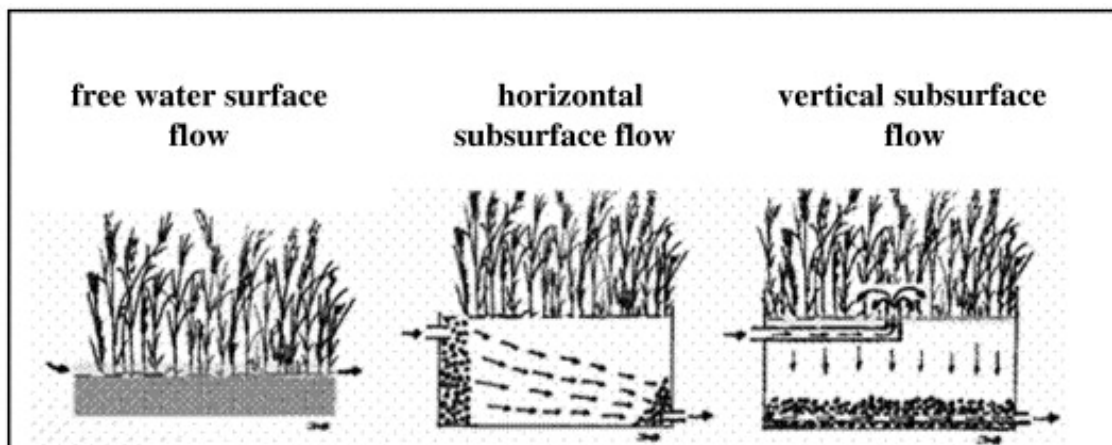
Εικόνα 2.11: Τεχνητός υγροβιότοπος υπόγειας οριζόντιας ροής

#### Εφαρμογές των SF υδροβιότοπων

Μαζί με τα συστήματα FWS τα συστήματα SF αποτελούν την πλέον κοινή επιλογή φυσικών συστημάτων κυρίως στην Ευρώπη. Χρησιμοποιούνται ακόμα και στην Νότια Αφρική (Μανιός, 2009).

Τα πλεονεκτήματα που έχουν καταγραφεί για τους SF υγροβιότοπους είναι η μεγαλύτερη αντοχή στο κρύο, ελαχιστοποίηση των ζιζανίων και των κουνουπιών όπως και των προβλημάτων δυσσομίας και πιθανότατα μεγαλύτερη ικανότητα απορρόφηση ανά μονάδα μέτρησης γης σε σχέση με τους FWS. Το μειονέκτημα τους είναι ότι είναι ακριβότερα να κατασκευαστούν, να συντηρηθούν και να επισκευαστούν σε σχέση με τους FWS. Λόγω του κόστους τους οι SF υγροβιότοποι εφαρμόζονται σε νερά με πολύ μικρές παροχές (EPA – A handbook on Constructed Wetlands, 2015, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology et al., 2018).

Η επιλογή του πιο κατάλληλου τύπου υγροβιότοπου εξαρτάται από τους στόχους σε ρύπους, το διαθέσιμο έδαφος, και το αποδεκτό επίπεδο συντήρησης και διαχείρισης. Τα πλεονεκτήματα όπως και τα μειονεκτήματα μιας τέτοιας εγκατάστασης επεξεργασία υγρών αποβλήτων συνοψίζονται σε επόμενο υποκεφάλαιο, παρόλα αυτά η επιλογή μεταξύ των διαφορετικών τύπων υγροβιότοπων έγκειται στις ανάγκες κάθε πειράματος και περιβαλλοντικού προβλήματος (Γκαύρου, 2016).



Εικόνα 2.12: Οι διαφορετικοί τύποι υδροβιότοπων και οι ροές του νερού στον καθένα (Thomas, 2017).

#### 2.4.4 Μηχανισμοί απομάκρυνσης ρύπων των τεχνητών υγροβιότοπων

##### 2.4.4.1 Μηχανισμοί απομάκρυνσης οργανικών ρύπων

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο υποκεφάλαιο, οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά την επεξεργασία του αποβλήτου στους τεχνητούς υγροβιότοπους είναι όμοιες με αυτές που συμβαίνουν στα φυσικά οικοσυστήματα. Η αποδόμηση της οργανικής ύλης μπορεί να προκύψει είτε μέσω αερόβιων είτε μέσω αναερόβιων διεργασιών. Η ισορροπία μεταξύ των διεργασιών αυτών εξαρτάται από το οργανικό φορτίο καθώς και από την παροχή οξυγόνου.

Το οργανικό φορτίο προέρχεται κυρίως από την εισροή του αποβλήτου. Η παροχή του οξυγόνου γίνεται μέσω της ελεύθερης επιφάνειας του νερού και των αλγών που είναι προσκολλημένα στην επιφάνεια των αναδυόμενων φυτών. Σαν συνέπεια των παραπάνω, οι διεργασίες στη στήλη του νερού είναι αερόβιες κατά τη διάρκεια της μέρας, ενώ γίνονται αναερόβιες τη νύχτα. Η παροχή οξυγόνου στα ιζήματα του υγροβιότοπου είναι αρκετά χαμηλή και έτσι οι διεργασίες εκεί είναι κυρίως αναερόβιες. Παρόλα αυτά από τις ρίζες των φυτών διαρρέεται κάποια ποσότητα οξυγόνου. Στα σημεία που η πυκνότητα των ριζών είναι υψηλή η διαρροή αυτή συνεισφέρει στην παροχή οξυγόνου και στα επιφανειακά στρώματα εδάφους. Σε σύγκριση όμως με το BOD του αποβλήτου η ροή οξυγόνου από τις ρίζες είναι μικρή και δεν είναι ο κύριος μηχανισμός αποδόμησης των φορτίων του άνθρακα. Η παραγωγή οξυγόνου από τη φυτική ριζόσφαιρα μπορεί να είναι ιδιαίτερα σημαντική σε άλλες διεργασίες όπως αυτή της νιτροποίησης (Σωτηροπούλου, 2010).

Πολλοί από τους μηχανισμούς επεξεργασίας είναι τουλάχιστον μερικώς διαδοχικοί. Για παράδειγμα σε απλές μικροβιακές καλλιέργειες, το μεγαλύτερο μέρος του BOD αποδομείται πριν ξεκινήσει η νιτροποίηση. Ένα από τα πλεονεκτήματα ενός πιο περίπλοκου συστήματος επεξεργασίας, όπως το σύστημα ενός τεχνητού υγροβιότοπου, είναι, ως ένα σημείο, ότι αυτοί οι διαδοχικοί μηχανισμοί απομάκρυνσης μπορούν να συμπιεστούν στο χώρο και στο χρόνο (Σοφιανός, 2016).

#### 2.4.4.2 Μηχανισμοί απομάκρυνσης βαρέων μετάλλων

Η απομάκρυνση των ανόργανων στοιχείων, κυρίως των μετάλλων, διενεργείται με πρόσφυση (ένας όρος που περιλαμβάνει προσρόφηση και χημική κατακρήμνιση) και σε μικρότερο βαθμό με πρόσληψή του από τις ρίζες των φυτών. Η συγκέντρωση των βαρέων μετάλλων που απομακρύνεται από τους τεχνητούς υδροβιότοπους καθορίζεται από την αλληλεπίδραση των παραπάνω διεργασιών. Παρόλα αυτά είναι δύσκολο να απεικονίσουμε τι συμβαίνει στην πραγματικότητα ή ποιές αντιδράσεις λαμβάνουν μέρος στον υδροβιότοπο (Dunbabin and Bowmer, 1992; Matagi et al., 1998). Το σύνολο των διεργασιών εξαρτώνται η μία από την άλλη, καθιστώντας έτσι την όλη διαδικασία των μηχανισμών αφαίρεσης των βαρέων μετάλλων αρκετά περίπλοκη. Όμως, ο βαθμός στον οποίο αυτές οι αντιδράσεις συμβαίνουν, εξαρτάται από την σύνθεση του υποστρώματος, το pH των ιζημάτων, την φύση του λύματος και το είδος των φυτών. Παρακάτω θα ακολουθήσει περαιτέρω ανάλυση αυτών των διαδικασιών (Sheoran, 2005).

##### Διεργασίες απομάκρυνσης

Η πιο σημαντική διαδικασία απομάκρυνσης μετάλλων στον υδροβιότοπο είναι η **προσρόφηση**, η οποία οδηγεί σε βραχυπρόθεσμη κατακράτηση ή μακροχρόνια ακινητοποίηση των διάφορων μετάλλων. Η προσρόφηση είναι η μεταφορά των μετάλλων από το νερό στο υπόστρωμα (χώμα, χαλίκι, άμμος, κα.) του υδροβιότοπου, δηλαδή από την φάση του διαλύματος στην στερεά φάση. Η προσρόφηση στην πραγματικότητα περιγράφει μια ομάδα διεργασιών, η οποία περιλαμβάνει αντιδράσεις απορρόφησης και καθίζησης (Sheoran, 2005).

Η **ιοντοανταλλαγή** αποτελεί ένα είδος προσρόφησης που προκαλείται από το εκάστοτε προσροφητικό υλικό όπως το έδαφος και οφείλεται στη συγγένεια που μπορεί να παρουσιάζει με τον υφιστάμενο ρύπο. Σε μία αντίδραση ιονταλλαγής, θετικά φορτισμένα μεταλλικά ιόντα δεσμεύονται σε αρνητικά φορτισμένα και χωροθετημένα στην επιφάνεια του υλικού προσρόφησης. Πολλά συστατικά των λυμάτων υπάρχουν ως κατιόντα, συμπεριλαμβανομένων των περισσότερων μετάλλων όπως **Cu**, **Zn**, **Pb**, **Ni** και **Cd**. Σε γενικές γραμμές, ο μόλυβδος και ο χαλκός τείνουν να προσροφούνται πιο έντονα, και ο *ψευδάργυρος*, το *νικέλιο* και το *κάδμιο* συνήθως ελαφρά. Ο βαθμός προσρόφησης των ιόντων εξαρτάται άμεσα από το εύρος της υπάρχουσας επιφάνειας ιοντοανταλλαγής, που εκφράζεται γενικότερα μέσω του όρου «δυναμικό ιοντοανταλλαγής» (Cation Exchange Capacity – CEC).

Η προσρόφηση των μετάλλων στην επιφάνεια της βλάστησης είναι μια διαδικασία η οποία μπορεί να είναι σημαντική σε φυτά που έχουν μεγάλη επιφάνεια στον χώρο σε σχέση με τον όγκο. Το δυναμικό ιοντοανταλλαγής επηρεάζεται από την επιφάνεια της βλάστησης που διατίθενται για την μετατόπιση των κατιόντων από τα πιο ισχυρά μεταλλικά ιόντα στα λύματα (Vymazal et al., 1998, Μπαρώτα, 2015).

Η **καθίζηση** είναι μια φυσική διαδικασία που επέρχεται μετά από άλλους μηχανισμούς για να μετατρέψει το σύνολο των βαρέων μετάλλων σε αρκετά μεγάλα

σωματίδια ώστε να βυθιστούν (Walker and Hurl, 2002). Με αυτόν τον τρόπο, τα βαρέα μέταλλα απομακρύνονται από τα λύματα και παγιδεύονται στα ιζήματα του υγροβιότοπου, προστατεύοντας έτσι τους οργανισμούς που βρίσκονται και στην επιφάνεια και στο κατώτερο μέρος των υδάτων, δηλαδή το υδάτινο οικοσύστημα (Sheoran, 2005).

Η **κατακρήμνιση** έχει αναγνωριστεί ως αρχική διαδικασία στην απομάκρυνση των βαρέων μετάλλων από τα λύματα σε φυσικούς και τεχνητούς υγροβιότοπους. Δεν αποτελεί μια απλή και άμεση φυσική αντίδραση. Άλλες χημικές διεργασίες, όπως καθίζηση και καταβύθιση πρέπει να λάβουν χώρα αρχικά (Γκαύρου, 2016).

Μέταλλα σε αδιάλυτη μορφή μπορούν να επαναδιαλυτοποιηθούν ανάλογα με το pH και το δυναμικό οξειδοαναγωγής του συστήματος. Τα χημικά δεσμευμένα μέταλλα που παραμένουν στα ιζήματα δεν είναι βιοδιαθέσιμα, οπότε με αυτό τον τρόπο απομακρύνονται από το σύστημα. Πιθανή αναταραχή και επαναιώριση των ιζημάτων θα έχει ως αποτέλεσμα την επιστροφή των μετάλλων στην υδατική φάση. Σε υγροβιότοπους που μελετήθηκαν αναφέρεται ότι καταγράφηκαν **αντιδράσεις διαλυτοποίησης** και καταβύθισης για την απομάκρυνση μετάλλων όπως Fe, Cu, Zn, Mn και Al (Qasaimeh, 2015).

Όσον αφορά στην **φυτοαπορρόφηση**, τα μέταλλα προσλαμβάνονται από το ριζικό σύστημα και στη συνέχεια διανέμονται στο σώμα του φυτού. Ο βαθμός της πρόσληψης των μετάλλων εξαρτάται από το είδος των μετάλλων και των φυτών. Ο Gesberg et al. (1984) βρήκε ότι η πρόσληψη των μετάλλων από τα φυτά είναι μικρή σε συστήματα υποεπιφανειακής ροής, ενώ άλλοι ισχυρίζονται ότι μέταλλα μπορούν να βρεθούν στις ρίζες των φυτών εξαιτίας της χημικής κατακρήμνισης και της προσρόφησης. Σε κάποια συστήματα στην Βόρεια Αμερική, έχει παρατηρηθεί ότι ο βαθμός συσσώρευσης των βαρέων μετάλλων όπως *κάδμιο*, *χαλκός*, *μόλυβδος*, *νικέλιο* και *ψευδάργυρος* είναι μεταβλητός σε σχέση με το χρόνο, καθώς, η συσσώρευσή τους στα φυτικά κατάλοιπα ήταν μεγαλύτερη στο τέλος της περιόδου ανάπτυξης (περίοδος γήρανσης) σε σχέση με την περίοδο έντονης ανάπτυξης. Επίσης, μέταλλα όπως το *κάδμιο*, το *χρώμιο*, ο *χαλκός*, ο *μόλυβδος*, ο *υδράργυρος* το *νικέλιο* και ο *ψευδάργυρος* απομονώνονται στον πυθμένα του υγροβιότοπου ή/και στην χλωρίδα και πανίδα του συστήματος (Mitsch και Gosselink, 1993).

Ως τώρα δεν υπάρχουν επαρκή μακροχρόνια στοιχεία για τεχνητούς υγροβιότοπους μεγάλης κλίμακας, που να παρέχουν μια αξιόπιστη εκτίμηση για την απόδοση της απομάκρυνσης των μετάλλων από τα απόβλητα. Εντούτοις, σε συστήματα υποεπιφανειακής ροής και σε συστήματα επιφανειακής ροής πλήρως καλυμμένα με βλάστηση, οι αναερόβιες συνθήκες συντελούν στην κατακράτηση των περισσότερων μετάλλων με την καθίζηση των ολικών αιωρούμενων στερεών και την μείωση της επαναιώρισης (Στεφανόπουλος, 2006).

## 2.4.5 Μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα των τεχνητών υδροβιότοπων

Παρακάτω παρουσιάζεται ο Πίνακας 2.9 με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των τεχνητών υδροβιότοπων.

Πίνακας 2.9: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κατασκευής τεχνητών υδροβιότοπων (EPA-A Handbook of Constructed Wetlands, 2015, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, 2018)

Πλεονεκτήματα τεχνητών υδροβιότοπων	Μειονεκτήματα τεχνητών υδροβιότοπων
Έχουν χαμηλό κόστος κατασκευής σε σχέση με άλλες μεθόδους	Χρειάζονται μεγάλες εκτάσεις γης σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους. Οι υδροβιότοποι είναι λοιπόν σχετικά οικονομικοί σε σχέση με άλλες μεθόδους όταν υπάρχει διαθέσιμη γη.
Τα έξοδα συντήρησης και λειτουργίας είναι χαμηλά	Οι αποδόσεις τους μπορεί να είναι λιγότερο σταθερές σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους, γιατί επηρεάζονται από τις εναλλασσόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες (βροχοπτώση, ξηρασία). Ενώ η μέση ετήσια απόδοση μπορεί να είναι αποδεκτή, σε περιπτώσεις που απαιτούν αυστηρά στάνταρ εξυγίανσης σε συνεχή βάση.
Η συντήρηση και η λειτουργία τους απαιτεί μόνο περιοδική και όχι συνεχή εργασία (δεν απαιτείται παρουσία μόνιμου προσωπικού)	Τα βιολογικά συστατικά είναι ευαίσθητα σε τοξικά στοιχεία
Μπορούν να διαχειριστούν αυξομειώσεις της ροής του νερού	Μεγάλες ποσότητες ρύπων ή μεγάλα κύματα νερού μπορεί να μειώσουν την αποτελεσματικότητα του υδροβιότοπου
Διευκολύνουν την ανακύκλωση και την επαναχρησιμοποίηση του νερού	Μπορεί να αποτελέσει εστία γέννησης κουνουπιών
Υψηλή απομάκρυνση BOD <sub>5</sub> και στερεών, ήπια απομάκρυνση παθογόνων μικροοργανισμών	Είναι μια πρόσφατα ανεπτυγμένη μέθοδος, οπότε δεν υπάρχουν ολοκληρωμένες ενδείξεις για την ιδανική κατασκευή ενός υδροβιότοπου ή στην μακροχρόνια αποτελεσματικότητά του.
Δεν απαιτούνται χημικά κατά την λειτουργία του	Οι υδροβιότοποι μπορούν να ανακάμψουν από μια πτώση της στάθμης λόγω ξηρασίας, αλλά δεν αντέχουν ολική ξήρανση, οπότε απαιτούν πάντα μια ποσότητα νερού για να επιβιώσουν.
Προσφέρουν ενδιαίτημα σε πολλά ζώα και αισθητική στο περιβάλλον	
Είναι κοινωνικά αποδεκτοί λόγω	

## περιβαλλοντικής προσέγγισης

Δεν παρατηρούνται δυσάρεστες οσμές αν  
έχουν σχεδιαστεί και συντηρηθεί σωστά

## 2.5 Χαρακτηριστικά του υπό εξέταση φυτού

### 2.5.1 Αλόφυτα

Τα αλόφυτα ή αλόφιλα είναι φυτά των οποίων η ανάπτυξη δεν παρεμποδίζεται αλλά αντίθετα ευνοείται κάτω από συνθήκες υψηλής εδαφικής αλατότητας. Είναι επομένως κατάλληλα για παραθαλάσσιους κήπους και πάρκα, για δενδροστοιχίες κοντά στη θάλασσα και για φυτεύσεις σε εδάφη τα οποία αρδεύονται με νερό υψηλής περιεκτικότητας σε άλατα (Manousaki and Kalogerakis, 2011).

Είναι φυτά που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς αναπτύσσονται φυσικά σε περιβάλλον που χαρακτηρίζεται από πληθώρα τοξικών ιόντων, κυρίως νάτριο και χλώριο. Πολλές έρευνες έχουν δείξει ότι αυτά τα φυτά μπορούν επίσης να αντέξουν την ύπαρξη βαρέων μετάλλων. Οι έρευνες αυτές έχουν βασιστεί στο εύρημα ότι η ανοχή τους στο αλάτι και στα βαρέα μέταλλα, οφείλεται μερικώς σε κοινούς φυσιολογικούς μηχανισμούς έναντι των αβιοτικών καταπονήσεων. Ακόμα έχει φανεί ότι τα φυτά που έχουν αντοχή στο αλάτι είναι ικανά να συσσωρεύσουν και βαρέα μέταλλα. Συνεπώς, έχει δηλωθεί ότι για τα αλόφυτα είναι φυσικά πιο εύκολο να ανταπεξέλθουν σε περιβαλλοντικό στρες, συμπεριλαμβανομένου τα βαρέα μέταλλα, σε σχέση με φυτά που είναι ευαίσθητα στο αλάτι και επιλέγονται συνήθως σε διαδικασίες φυτοσυσσώρευσης. Έτσι τα δυνητικά αλόφυτα είναι ιδανικοί υποψήφιοι για φυτοσυσσώρευση ή φυτοσταθεροποίηση εδαφών που είναι ρυπασμένα με βαρέα μέταλλα και επιπλέον για εδάφη ρυπασμένα με βαρέα μέταλλα που έχουν επηρεαστεί από αλατότητα (Manousaki and Kalogerakis, 2011).

Κάποια αλόφυτα χρησιμοποιούν μεθόδους απέκκρισης προκειμένου να απομακρύνουν το πλεόνασμα των ιόντων άλατος από τους ευαίσθητους ιστούς τους και σε ορισμένες περιπτώσεις αυτές οι αδενικές δομές δεν είναι πάντα εξειδικευμένες στο  $\text{Na}^+$  και στο  $\text{Cl}^-$  και άλλα τοξικά στοιχεία όπως στο κάδμιο, στον ψευδάργυρος, στο μόλυβδος ή στον χαλκό συσσωρεύονται και απεκκρίνονται από αδένες άλατος ή τριχίδια στην επιφάνεια των φύλλων - μια πρωτοποριακή μέθοδος φυτοεξυγίανσης που ονομάζεται φυτοαπέκκριση (Manousaki and Kalogerakis, 2011).

Τέλος, η χρήση αλόφυτων έχει επίσης προταθεί για αφαλάτωση εδάφους, μέσω της συσσώρευσης αλατιού στους φυτικούς ιστούς ή μέσω της διάλυσης του εδαφικού ασβεστίτη στην ριζόσφαιρα, για να παραχθεί  $\text{Ca}^{2+}$  το οποίο μπορεί να αντικατασταθεί με  $\text{Na}^+$  σε ανταλλαγές κατιόντων (Manousaki and Kalogerakis, 2011).

Τα γνήσια αλόφυτα, δηλαδή τα φυτά που αναπτύσσονται μόνο σε αλατούχα εδάφη ανήκουν κυρίως στις οικογένειες Aizoaceae, Caryophyllaceae, Frankeniaceae,

Gramineae, Juncaceae, Plumbaginaceae, Portulacaceae, Rhizophoraceae, Tamaricaceae και Zygophyllaceae. Ορισμένα αλόφυτα προτιμούν ξηρά αλατούχα εδάφη και ονομάζονται ξηροαλόφυτα (π.χ. *Atriplex confertifolia* L.), ενώ άλλα προτιμούν υγρά εδάφη με υφάλμυρο νερό (π.χ. *Suaeda* sp.). Αλόφυτα θεωρούνται η αλιμιά (*Atriplex halimus* L.), το αλμυρίκι (*Tamarix* sp.), το βούρλο (*Juncus acutus* L.), ο ελαίαγνος (*Elaeagnus angustifolia* L.), η στατική (*Statice* sp.), το λιμόνιο (*Limonium* sp.) κ.α. (Γκαύρου, 2016)

### 2.5.2 *Juncus acutus* L.

Το φυτό βούρλο, του οποίου η επιστημονική ονομασία είναι *Juncus acutus* L., ανήκει στην οικογένεια Juncaceae, στην οποία ανήκουν 400 περίπου είδη ταξινομημένα σε 8 γένη (*Andesia*, *Distichia*, *Juncus*, *Lisula*, *Marsippospermum*, *Oxychloe*, *Prionium*, *Rostkonia*). Η οικογένεια αυτή εξαπλώνεται κυρίως στις εύκρατες και τις ψυχρές έως πολύ ψυχρές κλιματικές ζώνες και μόνο σε μεγάλα υψόμετρα ορισμένων βουνών της τροπικής ζώνης (Brown and Brooks, 2002).

Τα βούρλα συγκαταλέγονται στο γένος *Juncus* αυτής της οικογένειας, η πλειονότητα των οποίων απαρτίζεται από μια πυκνή ομάδα ανθοφόρων στελεχών, χωρίς γόνατα και φύλλα, τα οποία μερικές φορές ξεπερνούν και το ύψος του ενός μέτρου. Το βούρλο ευδοκμεί σε αλμυρά έλη και συμβάλλει στη μείωση της διάβρωσης του εδάφους. Ακόμα, διακρίνεται για την ανθεκτικότητα του στις περιβαλλοντικές πιέσεις, όπως αλατότητα, ξηρασία, υψηλές ή χαμηλές θερμοκρασίες και μπορεί να αναπτυχθεί σε ρυπασμένες περιοχές (Brown and Brooks, 2002)



Εικόνα 2.13: *Juncus acutus* L.. (Φυτά της Ελλάδας Η έρευνα στη Λέσβο Βοτανική-Χρήσεις – Τοξικότητα)



Εικόνα 2.14: *Juncus acutus* L. στον Βιολογικό Καθαρισμό των Χανίων στα τέλη του παρόντος πειράματος.

### 3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Στο κεφάλαιο περιγράφονται σε συντομία οι εγκαταστάσεις και οι διαδικασίες επεξεργασίας λυμάτων στον Βιολογικό Καθαρισμό των Χανίων, καθώς και οι πειραματικές διατάξεις και τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσα διπλωματικής.

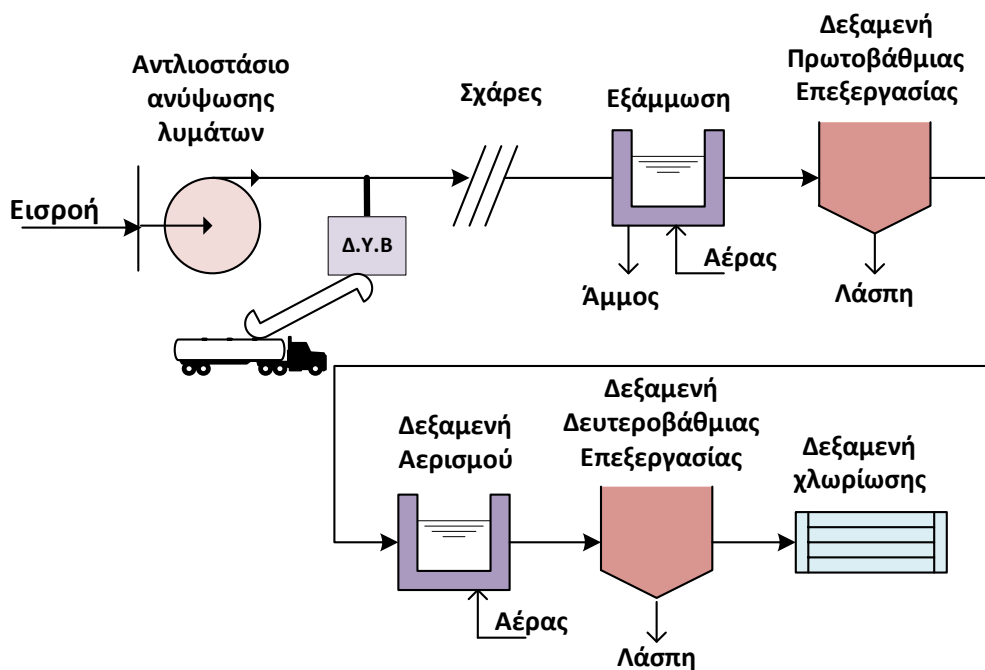
#### 3.1 Πειραματική διάταξη στον Βιολογικό Καθαρισμό

##### 3.1.1 Γενική επισκόπηση των εγκαταστάσεων τροφοδοσίας του πειράματος

Μια εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων περιέχει τα εξής βασικά τμήματα:

- Διατάξεις προ-επεξεργασίας για την απομάκρυνση των μεγάλων στερεών (εσχάρωση, εξάμμωση)
- Πρωτοβάθμια επεξεργασία για την απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών
- Δευτεροβάθμια επεξεργασία για την απομάκρυνση του οργανικού φορτίου
- Τριτοβάθμια και προχωρημένη επεξεργασία για την περαιτέρω μείωση των ρύπων
- Επεξεργασία της λάσπης
- Απολύμανση των επεξεργασμένων λυμάτων

Ακολουθεί ένα σχηματικό διάγραμμα ροής μόνο των εγκαταστάσεων που συμμετείχαν στην εκπόνηση του πειράματος (Εικόνα 3.1) καθώς και λίγα λόγια για το κάθε τμήμα του.



Εικόνα 3.1: Διάγραμμα ροής των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων που συμμετείχαν στο πείραμα

- **Αντλιοστάσιο εισόδου εγκατάστασης**

Το αντλιοστάσιο εισόδου κατασκευάζεται για την αρχική ανύψωση του συνόλου των λυμάτων και στραγγισμάτων στο φρεάτιο εισόδου και προεπεξεργασίας. Τα λύματα αρχικά περνούν μέσω δύο χονδρόκοκκων εσχάρων και στην συνέχεια και έπειτα ανυψώνονται μέσω τεσσάρων αντλιών (τύπου Αρχιμήδη).

- **Εγκατάσταση υποδοχής βοθρολυμάτων**

Η εγκατάσταση υποδοχής βοθρολυμάτων δέχεται μέσω τριών στεγανών υποδοχών τα βοθρολύματα των κατοίκων που δεν είναι συνδεδεμένοι με το δίκτυο αποχέτευσης της πόλης, όπως και τα βοθρολύματα όλου του νομού Χανίων, τα οποία στην συνέχεια οδηγούνται στις δεξαμενές βοθρολυμάτων. Πριν τα βοθρολύματα φτάσουν στις δεξαμενές περνούν μέσω συγκρότημα προεπεξεργασίας (εσχαρισμός, εξάμμωση).

- **Εσχάρωση**

Η εσχάρωση είναι η πρώτη φυσική διαδικασία που πραγματοποιείται στον βιολογικό καθαρισμό. Αποτελείται από ομοιόμορφες μηχανικές σχάρες οι οποίες είναι τοποθετημένες κάθετα στο κανάλι εισροής των αποβλήτων ώστε να εμποδίζονται τα ογκώδη στερεά αντικείμενα που έχουν οδηγηθεί στο βιολογικό καθαρισμό.

- **Εξάμμωση**

Η διαδικασία της εξάμμωσης περιλαμβάνει και τις διαδικασίες του προαερισμού και της λιποσυλλογής όπου τα λύματα διατηρούνται αιωρούμενα μέσω διαχυτών αέρος και έπειτα ακολουθεί η συλλογή της άμμου, των χαλικιών, των αμμοχάλικων, της τέφρας και γενικότερα των βαριών στερεών που βρίσκονται στον πυθμένα της δεξαμενής, όταν αυτά έχουν μεγαλύτερη ταχύτητα καθίζησης ή μεγαλύτερη πυκνότητα από των πτητικών στερεών των υγρών αποβλήτων. Ολοκληρώνοντας την διαδικασία τα υπολείμματα αυτά αφαιρούνται μέσω υποβρύχιων αντλιών και τα λίπη και έλαια συγκεντρώνονται στην επιφάνεια από όπου και ένας αυτόματος σαρωτής τα οδηγεί στην είσοδο της εγκατάστασης.

- **Πρωτοβάθμια καθίζηση**

Η πρωτοβάθμια καθίζηση απομακρύνει ένα ποσοστό μέχρι και 70% των αιωρούμενων οργανικών και ανόργανων στερεών τα οποία συλλέγονται σε ειδικά κατασκευασμένους κώνους. Η απομάκρυνση αυτών συντελεί στην μείωση του ρυπαντικού φορτίου που προορίζεται για τα επόμενα στάδια της επεξεργασίας. Τα καθιζάνοντα στερεά που προκύπτουν αποτελούν την πρωτοβάθμια ιλύ (λάσπη), η οποία οδηγείται στην πάχυνση και το υπερκείμενο υγρό αποτελεί την πρωτοβάθμια επεξεργασμένη εκροή η οποία οδηγείται στην περαιτέρω επεξεργασία.

- **Δεξαμενή αερισμού**

Μέσα στην δεξαμενή αερισμού ουσιαστικά επιτυγχάνεται η απομάκρυνση οργανικού άνθρακα και αζώτου από τα λύματα. Αρχικά παρέχεται οξυγόνο στους

μικροοργανισμούς, όπου μεταφέρεται έτσι το σύστημα από την αέρια στην υγρή φάση ώστε να οξειδώσουν τον οργανικό άνθρακα σε διοξείδιο του άνθρακα μέσω της διαδικασίας της αναπνοής ενώ ταυτόχρονα τα αμμωνιακά μετατρέπονται σε νιτρώδη και έπειτα σε νιτρικά. Εάν υπάρχει ανοξικό τμήμα στη δεξαμενή, δηλαδή πραγματοποιείται η διεργασία της απονιτροποίησης, η συγκέντρωση του οξυγόνου γίνεται μηδενική και τα νιτρικά μετατρέπονται σε αέριο άζωτο και απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα.

- **Δευτεροβάθμια καθίζηση**

Η δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης (ΔΔΚ) επιτυγχάνει την απομάκρυνση των υπολειπόμενων αιωρούμενων στερεών δημιουργώντας μια ιλύ η οποία καθιζάνει και έχει περιεκτικότητα σε στερεά 0,5 έως 2%.

- **Απολύμανση με χλωρίωση**

Τα απόβλητα (υπερκείμενα από τη ΔΔΚ) υφίστανται τη διεργασία της απολύμανσης με υποχλωριώδες νάτριο για την εξόντωση των παθογόνων μικροοργανισμών σε επιμήκεις δεξαμενές και έπειτα διοχετεύονται μέσω αγωγού στον αποδέκτη με στόχο την άρδευση.

Το συγκεκριμένο πείραμα τροφοδοτείται από την **εκροή της δευτεροβάθμιας επεξεργασίας**, πριν η εκροή αυτή οδηγηθεί στην δεξαμενή χλωρίωσης της εγκατάστασης.

### **3.1.2 Σχεδιασμός και περιγραφή των πειραματικών εγκαταστάσεων**

Για τις ανάγκες του παρόντος πειράματος κατασκευάστηκε τεχνητός υγροβιότοπος που να μπορεί να τροφοδοτείται από την εκροή της δευτεροβάθμιας δεξαμενής καθώς και από πρόσθετη εξωτερική δεξαμενή. Στην παρούσα ενότητα περιγράφεται η πειραματική διάταξη και στην επόμενη ενότητα θα περιγραφεί ο τρόπος χρήσης της για την διεξαγωγή των πειραμάτων. Ένα σχηματικό διάγραμμα του τεχνητού υγροβιότοπου παρουσιάζεται στη Εικόνα 3.2 και Εικόνα 3.3.



Εικόνα 3.2: Φωτογραφία της πειραματικής εγκατάστασης: (1) σωλήνας της υποβρύχιας αντλίας που τροφοδοτεί με λύμα την δεξαμενή εξισορρόπησης από το κανάλι εκροής δευτεροβάθμιας επεξεργασίας, (2) δεξαμενή εξισορρόπησης, (3) δεξαμενή βαρέων μετάλλων, (4) Κουτιά που περιέχουν τις αντλίες, (5) σωληνάκια που μεταφέρουν το λύμα και το διάλυμα βαρέων μετάλλων στον τεχνητό υγροβιότοπο, (6) τεχνητός υγροβιότοπος, (7) έξοδος τεχνητού υγροβιότοπου στο κανάλι εκροής δευτεροβάθμιας επεξεργασίας (8) ασφαλειοκιβώτιο



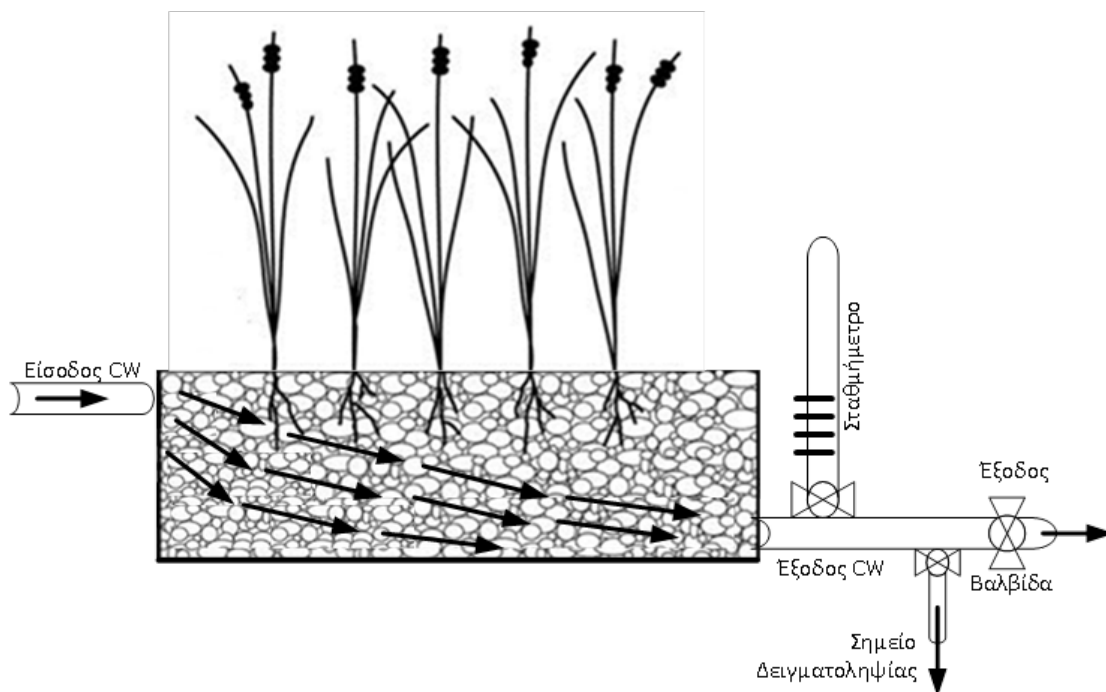
Εικόνα 3.3: Ο τεχνητός υδροβιότοπος εγκατεστημένος δίπλα στην εκροή της ΔΔΚ

Για την τροφοδοσία του τεχνητού υδροβιότοπου με το λύμα, χρησιμοποιήθηκε αντλία περισταλτικού τύπου μεταβαλλόμενης παροχής. Η αντλία συνδεόταν με μια

δεξαμενή εξισορρόπησης, κατασκευασμένη από πολυαιθυλένιο με χωρητικότητα 200 λίτρων, η οποία αντλούσε λύμα μέσω μιας ηλεκτρικής υποβρύχιας αντλίας από το κανάλι εκροής της δευτεροβάθμιας επεξεργασίας λυμάτων.

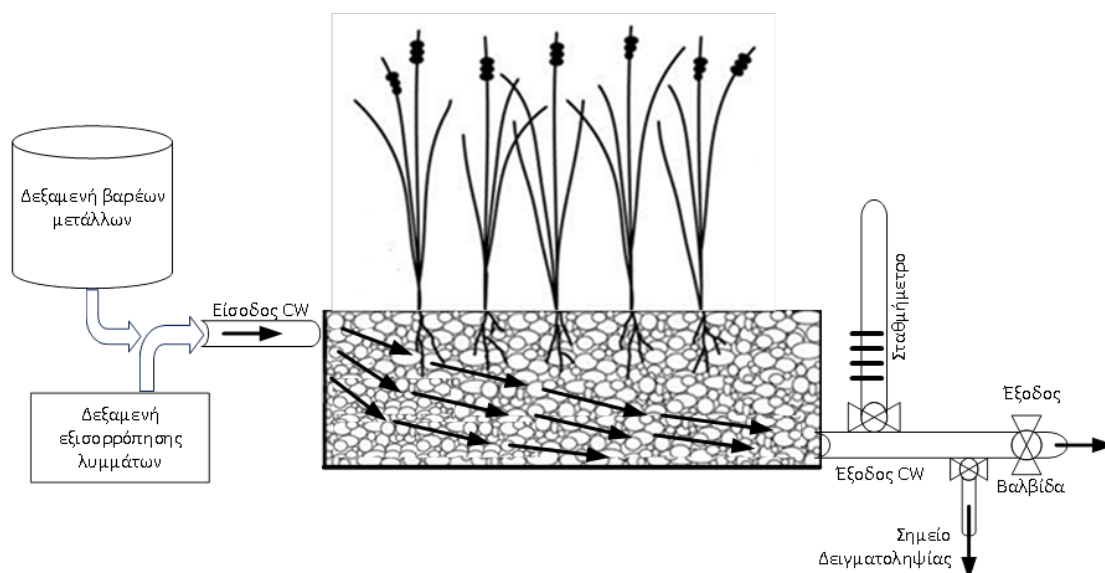
Η χρήση δεξαμενής εξισορρόπησης εξασφαλίζει εξισορροπημένη ροή την αντιμετώπιση πιθανών προβλημάτων λειτουργίας που προκαλούνται από διακυμάνσεις της παροχής από την εκροή της δευτεροβάθμιας επεξεργασίας. Επίσης η δεξαμενή εξισορρόπησης συμβάλει στην καθίζηση των αιωρούμενων σωματιδίων του λύματος, ώστε αυτά να μην εισέρχονται στην παροχή του λύματος που καταλήγει στον τεχνητό υδροβιότοπο. Ένα ηλεκτρικό φλοτέρ ενσωματωμένο στην δεξαμενή εξισορρόπησης ήταν υπεύθυνο για την διατήρηση της στάθμης του λύματος σε καθορισμένο επίπεδο.

Η ροή του λύματος προς τον τεχνητό υδροβιότοπο φαίνεται στη Εικόνα 3.4.



Εικόνα 3.4: Οριζόντια ροή κάτω από την επιφάνεια του τεχνητού υδροβιότοπου

Ο τεχνητός υδροβιότοπος πέρα από το λύμα, τροφοδοτούνταν και με διάλυμα βαρέων μετάλλων κατάλληλης συγκέντρωσης ανάλογα με τις ανάγκες του πειράματος (Εικόνα 3.5)-από μια δεξαμενή κατασκευασμένη από πολυαιθυλένιο με χωρητικότητα 100 λίτρων. Μέσα στην δεξαμενή αυτή υπήρχε ένας ηλεκτρικός αναδευτήρας, ο οποίος βοηθούσε στην ομογενοποίηση του διαλύματος, καθώς και μια ακόμα περισταλτική αντλία, η οποία αντλούσε το διάλυμα και τροφοδοτούσε τον υδροβιότοπο. Στο άκρο της αντλίας που βρισκόταν μέσα στην δεξαμενή υπήρχε φίλτρο που εμποδίζει σωματίδια, όπως σκόνη και σκουπίδια, να εισέλθουν στην παροχή. Για να επιτυγχάνεται η βέλτιστη λειτουργία του, το φίλτρο αυτό καθαριζόταν χειρωνακτικά μια φορά κάθε δύο εβδομάδες.



Εικόνα 3.5: Οριζόντια ροή λύματος και βαρέων μετάλλων στον τεχνητό υδροβιότοπο

## 3.2 Πειραματική διαδικασία

### 3.2.1 Συλλογή και προετοιμασία των φυτών

Για τις ανάγκες του συστήματος πραγματοποιήθηκε συλλογή τριών φυτών *Juncus actus* L. από τις όχθες του ποταμού Μορώνη, που βρίσκεται σε κοντινή απόσταση από την παραλία της Σούδας (Χανιά, Κρήτη) όπου και εκβάλλει. Τα φυτά συλλέχθηκαν τέλη Ιουλίου και μεταφυτεύθηκαν την ίδια περίοδο. Για όλα τα φυτά (Α,Β,Γ, Πίνακας 3.1) ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία μεταφοράς και μεταφύτευσης. Πιο συγκεκριμένα, τα φυτά συλλέχθηκαν με προσοχή ολόκληρα με το ριζικό τους σύστημα, πλύθηκαν για απομάκρυνση χώματος και μεταφέρθηκαν στην Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων Χανίων, όπου τοποθετήθηκαν στον τεχνητό υδροβιότοπο.

Ο τεχνητός υδροβιότοπος πληρώθηκε με χαλίκι μεσαίου μεγέθους (16-32mm) μέχρι συγκεκριμένο ύψος. Πριν την τοποθέτηση των φυτών στον τεχνητό υδροβιότοπο μετρήθηκε το μέγιστο μήκος και η μέγιστη διάμετρος λαιμού τους (Πίνακας 3.1).

Πίνακας 3.1: Φυσικά χαρακτηριστικά των τριών φυτών *Juncus acutus*

Παράμετρος	Φυτό Α	Φυτό Β	Φυτό Γ
Μέγιστο μήκος (cm)	72	98	87
Μέγιστη διάμετρος λαιμού (cm)	29.5	40.5	27.5

Μετά το πέρας των μετρήσεων τα φυτά τοποθετήθηκαν μέσα στο σύστημα. Συμπληρώθηκε ακόμα κάποια ποσότητα χαλικιού μετά την φύτευση τους μέχρι να καλυφθούν καλά οι ρίζες τους. Ως περίοδος προσαρμογής των φυτών (από την φύτευση έως την έναρξη του πειράματος) ορίστηκαν οι τρεις εβδομάδες κατά τις οποίες ο τεχν. υδροβιότοπος τροφοδοτούνταν μόνο με λύμα.



Εικόνα 3.6: (1) Ο τεχνητός υγροβιότοπος την ημέρα της φύτευσης (Αύγουστος 2017), (2) Ο τεχνητός υδροβιότοπος στο τέλος του πειράματος (Μάιος 2018).

Μετά από το διάστημα προσαρμογής των φυτών, εκτιμήθηκε ο λειτουργικός (αρχικός) όγκος της δεξαμενής στα 67,15 λίτρα. Για τον ορθό υπολογισμό του λειτουργικού όγκου αρχικά τοποθετήθηκε στην δεξαμενή ένα αλφαδολάστιχο, που χρησιμοποιήθηκε σαν σταθμοδείκτης. Ο σταθμοδείκτης ήταν βαθμονομημένος ανά 10 λίτρα και τοποθετημένος πάνω στον σωλήνα της εκροής, με μια βάνα στην βάση του. Στη συνέχεια προστέθηκε νερό βρύσης στην δεξαμενή σε στάδια. Στα πρώτα στάδια προστέθηκαν ποσότητες των 10 λίτρα μέχρις ότου συμπληρώθηκαν 50 λίτρα. Έπειτα προστέθηκαν σταδιακά ποσότητες των 5 λίτρων με συνεχή παρατήρηση της στάθμης της δεξαμενής και μέχρι τον συνολικό όγκο των 65 λίτρων. Στην συνέχεια συμπληρώθηκε νερό στην δεξαμενή μέχρι που παρατηρήθηκε υπερχειλίση από την έξοδο της δεξαμενής στην δεξαμενή της δευτεροβάθμιας επεξεργασίας. Προέκυψε έτσι σύμφωνα με τον σταθμοδείκτη ότι ο λειτουργικός όγκος είναι τα 67,15 λίτρα. Πέρα από τον υπολογισμό του λειτουργικού όγκου, ο σταθμοδείκτης είναι ο τρόπος για να ελέγχεται ότι η στάθμη του νερού παραμένει σταθερή σε όλη την διάρκεια του πειράματος, καθώς με το άνοιγμα της βάνας του, ο σταθμοδείκτης γέμιζε νερό και προσδιοριζόταν ο όγκος του νερού που είχε η δεξαμενή.

Η εκπόνηση της πρώτης φάσης του πειράματος ξεκίνησε στα τέλη Αυγούστου 2017 και συνεχίστηκε μέχρι τέλη Μαρτίου 2018, με μια ενδιάμεση διακοπή διάρκειας 3 μηνών. Ακολουθήθηκε μια πειραματική διαδικασία κατά την οποία προέκυψε πρόβλημα ιζηματοποίησης στην δεξαμενή των βαρέων μετάλλων με αποτέλεσμα να επηρεάσει τις συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων στην είσοδο του υγροβιότοπου. Οι μετρήσεις που προέκυπταν δεν ήταν μεν οι επιθυμητές, παρόλα αυτά φάνηκε ότι

το σύστημα του τεχνητού υδροβιότοπου είχε δυνατότητα απομάκρυνσης των υπό εξέταση βαρέων μετάλλων. Από τα μέσα Απριλίου 2018 έως το τέλος Μαΐου 2018 τροποποιήθηκε η αρχική διαδικασία. Με την τροποποίηση της το πρόβλημα της ιζηματοποίησης αντιμετωπίστηκε και αυτό είχε σαν αποτέλεσμα οι συγκεντρώσεις των υπό εξέταση βαρέων μετάλλων στην είσοδο του τεχνητού υδροβιότοπου να είναι στα επιθυμητά επίπεδα. Στην συνέχεια περιγράφεται η πρώτη πειραματική φάση, καθώς και οι τροποποιήσεις που οδήγησαν στην δεύτερη πειραματική φάση.

### 3.2.1.1 Πρώτη πειραματική φάση

Στους Πίνακες 3.2 και 3.3 παρατίθενται η μέση παροχή του λύματος και η μέση παροχή των βαρέων μετάλλων που τροφοδοτούσαν τον τεχνητό υδροβιότοπο, κατά την πρώτη πειραματική φάση. Για τις ανάγκες του πειράματος είχε επιλεγεί χαμηλός αριθμός των στροφών των αντλιών (10 έως 12% της δυναμικότητας της αντλίας), ώστε να επιτευχθεί χαμηλός ρυθμός παροχής των ρευστών. Παρόλο που η ρύθμιση αυτή παρέμεινε σταθερή για όλο το διάστημα της πρώτης φάσης παρατηρούνταν αυξομειώσεις στην παροχή των δύο ρευστών σε κάθε μέτρηση. Σαν συνέπεια αυτού, γινόταν καταγραφή των παροχών σχεδόν καθημερινά ώστε να είναι δυνατός ο υπολογισμός της μέσης συνολικής παροχής.

Πίνακας 3.2: Μέση παροχή του λύματος και η τυπική απόκλιση των τιμών

Μέση παροχή λύματος Α' φάσης (l/h)	Τυπική απόκλιση Α' φάσης
2,08	0,15

Πίνακας 3.3: Μέση παροχή των βαρέων μετάλλων και η τυπική απόκλιση των τιμών

Μέση παροχή βαρέων μετάλλων Α' φάσης (l/h)	Τυπική απόκλιση Α' φάσης
0,47	0,039

Ακόμα ο χρόνος παραμονής ( $\tau$ ) και των δύο παροχών στον υδροβιότοπο εκτιμήθηκε στις  $\tau = 1,13$  days.

Η συνεχής λειτουργία του υδροβιότοπου κατά την πρώτη πειραματική φάση διήρκεσε 5 μήνες, καθώς προέκυψε μια βλάβη στην αντλία των βαρέων μετάλλων. Η επισκευή της αντλίας χρειάστηκε 3 μήνες και έτσι η λειτουργία του συστήματος έπρεπε να τερματιστεί μέχρι την επιδιόρθωσή της.

Κάθε έξι ημέρες γινόταν πλήρωση της δεξαμενής των βαρέων μετάλλων με 60 λίτρα διαλύματος Cd, Ni και Zn κατάλληλης συγκέντρωσης. Ο ρυθμός κατανάλωσης του διαλύματος βαρέων μετάλλων ήταν της τάξεως των 10 λίτρων ανά μέρα, συνεπώς για αυτό επιλέχθηκε η πλήρωση της δεξαμενής να γίνεται ανά έξι μέρες, ώστε η στάθμη της δεξαμενής να μην πέφτει κάτω από τα 20 λίτρα, μεταξύ διαδοχικών πληρώσεων. Το διάλυμα στην δεξαμενή αποτελείτο από 59,9 λίτρα **νερού ύδρευσης**, αρχικά με

χρήση του δικτύου του πόσιμου νερού στον Βιολογικό Καθαρισμό και στην πορεία από το Πολυτεχνείο (από το ίδιο δίκτυο), με την μεταφορά του να γίνεται μέσα σε πλαστικά μπιτόνια, και από 100ml πυκνού διαλύματος βαρέων μετάλλων, από διάλυμα-υψηλής συγκέντρωσης καδμίου, νικελίου και ψευδαργύρου (πυκνό διάλυμα βαρέων μετάλλων). Για την μεταφορά του διαλύματος χρησιμοποιούταν γυάλινο μπουκάλι χωρητικότητας 100ml. Το μπουκάλι τοποθετούνταν στην συνέχεια σε ισοθερμικό δοχείο φελιζόλ για την ασφαλή μεταφορά του στον Βιολογικό

Με την πάροδο του χρόνου παρατηρήθηκε στον πάτο της δεξαμενής βαρέων μετάλλων να δημιουργείται ένα ίζημα βαρέων μετάλλων, το οποίο επιβεβαιώθηκε και από τα αποτελέσματα των μετρήσεων, το οποίο είχε ως συνέπεια να μην επιτυγχάνονται οι επιθυμητές συγκεντρώσεις Cd, Ni και Zn στην είσοδο του CW. Για την αντιμετώπιση της δημιουργίας του ιζήματος, ταυτόχρονα με μετρήσεις των χαρακτηριστικών του διαλύματος στην δεξαμενή, του πυκνού διαλύματος και του νερού παροχής, έγιναν διάφορες τροποποιήσεις όπως παρατίθενται με την παρακάτω σειρά, τα αποτελέσματα των οποίων θα αναλυθούν εκτενέστερα στο επόμενο κεφάλαιο:

1. Αντικατάσταση της αρχικής δεξαμενής βαρέων μετάλλων με καινούργια.
2. Τοποθέτηση μόνιμου ηλεκτρικού αναδευτήρα μέσα στην δεξαμενή, για την διαρκή ανάδευση του διαλύματος
3. Εκκένωση και καθαρισμός της καινούργιας δεξαμενής από το υπάρχον ίζημα με την χρήση ηλεκτρικής αντλίας και αντίσταση του νερού ύδρευσης που χρησιμοποιούνταν.
4. Αντικατάσταση του άλατος του ψευδάργυρου όπου χρησιμοποιούνταν για την παρασκευή του πυκνού διαλύματος από άλλο.
5. Αντικατάσταση του νερού ύδρευσης για την παρασκευή του διαλύματος βαρέων μετάλλων μέσα στην δεξαμενή με απιονισμένο νερό

Η τελευταία αναφερομένη τροποποίηση δηλαδή η χρήση απιονισμένο νερού για την παρασκευή του διαλύματος βαρέων μετάλλων ήταν επιτυχής (και αποτελεί την δεύτερη πειραματική φάση). Όλες οι προηγούμενες δεν είχαν το επιθυμητό αποτέλεσμα και η ιζηματοποίηση του διαλύματος των βαρέων μετάλλων πάντα συνέβαινε, με αποτέλεσμα οι συγκεντρώσεις των μετάλλων στην είσοδο να μην είναι σταθερές και οι επιθυμητές. Πάραυτα, τα αποτελέσματα που προέκυπταν από την πρώτη πειραματική φάση και ενώ οι συγκεντρώσεις των μετάλλων στην είσοδο του συστήματος ήταν πολύ χαμηλότερες από τις επιθυμητές, έδειξαν ότι το σύστημα του τεχνητού υγροβιότοπου είχε δυνατότητα απομάκρυνσης των υπό εξέταση βαρέων μετάλλων.

### **3.2.1.2 Δεύτερη πειραματική φάση**

Στους Πίνακες 3.4 και 3.5 παρατίθενται η μέση παροχή του λύματος και η μέση παροχή των βαρέων μετάλλων που τροφοδοτούσαν τον τεχνητό υγροβιότοπο κατά την δεύτερη πειραματική φάση. Όπως προαναφέρθηκε, για τις στροφές των αντλιών

είχε επιλεχθεί χαμηλός αριθμός (10 έως 12% της δυναμικότητας της αντλίας), για να επιτευχθεί χαμηλός ρυθμός παροχής των ρευστών ώστε να επιτυγχάνεται χρόνος παραμονής στην υδροβιότοπο περίπου 1 ημέρας. Αντίστοιχα με την πρώτη φάση όμως, παρατηρούνταν αυξομειώσεις στην παροχή των δύο ρευστών σε κάθε μέτρηση τους, παρόλο που οι ρυθμίσεις παρέμειναν σταθερές. Σαν συνέπεια αυτού, γινόταν καταγραφή των παροχών σχεδόν καθημερινά ώστε να είναι δυνατός ο υπολογισμός της μέσης συνολικής παροχής. Στην δεύτερη πειραματική φάση παρατηρήθηκε μεγαλύτερη απόκλιση των παροχών του λύματος από ότι στην πρώτη.

Πίνακας 3.4: Μέση παροχή του λύματος και η τυπική απόκλιση των τιμών

Μέση παροχή λύματος Β' φάσης (l/h)	Τυπική απόκλιση Β' φάσης
1,96	0,52

Πίνακας 3.5: Μέση παροχή των βαρέων μετάλλων και η τυπική απόκλιση των τιμών

Μέση παροχή βαρέων μετάλλων Β' φάσης(l/h)	Τυπική απόκλιση Β' φάσης
0,40	0,046

Αντίστοιχα, ο χρόνος παραμονής ( $\tau$ ) και των δύο παροχών στον υδροβιότοπο εκτιμήθηκε στις  $\tau = 1,13$  days.

Όπως στην πρώτη πειραματική φάση, έτσι και στην δεύτερη, η δεξαμενή επιμόλυνσης πληρωνόταν με 60 λίτρα υδατικού διαλύματος περίπου κάθε 6 μέρες έτσι ώστε η στάθμη της δεξαμενής να μην πέφτει κάτω από τα 20 λίτρα, μεταξύ διαδοχικών πληρώσεων. Το διάλυμα αποτελείτο από 59,9 λίτρα **απιονισμένου νερού** και 100ml πυκνού διαλύματος βαρέων μετάλλων.

Με την τροποποίηση αυτή, **δεν παρατηρήθηκε ιζηματοποίηση** στο πάτο της δεξαμενής βαρέων μετάλλων με αποτέλεσμα οι συγκεντρώσεις των υπό εξέταση βαρέων μετάλλων στην είσοδο του τεχνητού υδροβιότοπου να είναι στα επιθυμητά επίπεδα.

### 3.2.1.3 Υδατικό διάλυμα βαρέων μετάλλων και οι συγκεντρώσεις τους στην δεξαμενή και τον υδροβιότοπο

Κατά την διάρκεια της πρώτης πειραματικής φάσης, αρχικά, το πυκνό διάλυμα βαρέων μετάλλων παρασκευάστηκε ως υδατικό διάλυμα  $\text{CdN}_2\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  και  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ .

Στην πορεία της πρώτης πειραματικής φάσης, μια τροποποίηση που έγινε για την αντιμετώπιση του προβλήματος της ιζηματοποίησης ήταν η αλλαγή η αντικατάσταση του άλατος του ψευδαργύρου σε  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ . Η παρασκευή του πυκνού διαλύματος συνεχίστηκε με τα ίδια άλατα και στην δεύτερη πειραματική φάση.

Δεδομένου ότι η παροχή των βαρέων μετάλλων θα αναμιγνυόταν με την παροχή του λύματος στην είσοδο του υδροβιότοπου, οι συγκεντρώσεις των μετάλλων στην δεξαμενή υπολογιζόντουσαν κατά τέτοιο τρόπο ώστε να λαμβάνεται υπόψη η αραίωση που επέρχεται από την παροχή του λύματος για να προκύπτουν οι επιθυμητές συγκεντρώσεις Cd, Ni και Zn στην εισροή στον υδροβιότοπο. Στον Πίνακα 3.6 παρατίθενται ενδεικτικά οι μέσες μετρούμενες συγκεντρώσεις Cd, Ni και Zn μέσα στην δεξαμενή βαρέων μετάλλων, κατά την εκπόνηση της δεύτερης πειραματικής φάσης.

*Πίνακας 3.6: Τελικές συγκεντρώσεις του Cd, Zn, Ni στην δεξαμενή επιμόλυνσης κατά την δεύτερη πειραματική φάση*

Τελική συγκέντρωση Cd (μg/l)	Τελική συγκέντρωση Zn (mg/l)	Τελική συγκέντρωση Ni (μg/l)
115,22	22,89	2289,74

Η πειραματική διαδικασία σχεδιάστηκε έτσι ώστε οι συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων στην είσοδο του τεχνητού υδροβιότοπου να είναι τέτοιες ώστε να προσομοιωθούν οι συγκεντρώσεις από επιβαρυμένα με βαρέα μέταλλα αστικά λύματα. Συνεπώς οι συγκεντρώσεις των μετάλλων στην είσοδο του τεχνητού υδροβιότοπου επιλέχθηκαν να είναι οι διπλάσιες των ορίων που θέτει το ΦΕΚ 354B/8.3.11 για την επαναχρησιμοποίηση των υγρών αποβλήτων, όπως έχει αναφερθεί και στο Κεφάλαιο 2. Κατά αυτόν τον τρόπο η επιτυχημένη απομάκρυνση τους θα επιβεβαιώνει και την απομάκρυνση των χαμηλότερων συγκεντρώσεων. Στον Πίνακα 3.7 παρουσιάζονται οι επιθυμητές συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων:

*Πίνακας 3.7: Συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων στην είσοδο του τεχνητού υδροβιότοπου*

Βαρέα μέταλλα	Επιθυμητή συγκέντρωση (μg/L)
Cd	20
Zn	4000
Ni	400

### 3.2.2 Προστασία εργαζομένων

Οι εργαζόμενοι που βρίσκονταν στον πειραματικό χώρο έπρεπε να φοράνε κλειστά παπούτσια και μακρύ παντελόνι. Πριν από κάθε δειγματοληψία οι εργαζόμενοι έπρεπε να πάρουν συγκεκριμένα μέτρα ατομικής προστασίας όσον αφορά την ενδυμασία τους. Τα επιπλέον μέτρα παρουσιάζονται στην συνέχεια:

- Χρήση γαντιών τύπου latex μίας χρήσης

- Χρήση ολόσωμης φόρμας τύπου 3M χημικής προστασίας. Η στολή αυτή χρησιμοποιούνταν καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος. Η ένδυση και απόδυση γινόταν με την χρήση των γαντιών latex.
- Χρήση πλαστικών επιμανικών μιας χρήσης, τα οποία συγκρατούνταν με την χρήση χαρτοταινίας πάνω στα γάντια τύπου latex ώστε να καλύπτου τυχόν κενά μεταξύ γαντιών και στολής και να εξασφαλίζουν την πλήρη προστασία του εργαζομένου.
- Χρήση γαντιών κουζίνας (πολλαπλών χρήσεων) επιπλέον των προηγούμενων μέτρων προστασίας

Μετά το πέρας κάθε δειγματοληψίας τα γάντια κουζίνας ξεπλένονταν με νερό βρύσης και η απόδυση γινόταν με αντίστροφη διαδικασία από αυτή που αναφέρθηκε. Τα επιμανίκια και τα γάντια μιας χρήσης απορρίπτονταν σε κάδους που διέθετε ο Βιολογικός Καθαρισμός.

Ακόμα, η διαδικασία της πλήρωσης της δεξαμενής των βαρέων μετάλλων απαιτούσε τα κατάλληλα μέσα ατομικής προστασίας που προαναφέρθηκαν καθώς και μεγάλη προσοχή κατά την πλήρωση ώστε να αποφευχθεί τυχόν επαφή με το διάλυμα μέσω σταγονιδίων. Κατά την πλήρωση της δεξαμενής λαμβάνονταν όλα τα απαραίτητα μέτρα ώστε να μην συμβεί ρύπανση στον περιβάλλοντα χώρο.

Τέλος, κατά την εργασία στο εργαστήριο οι εργαζόμενοι έπρεπε επίσης να πάρουν συγκεκριμένα μέτρα ατομικής προστασίας όσον αφορά την ενδυμασία τους. Όπως και στον Βιολογικό Καθαρισμό τα μέτρα αυτά προϋπόθεταν την ένδυση με μακριά παντελόνια και κλειστά παπούτσια, όπως επίσης και την χρήση διπλών γαντιών μιας χρήσης τύπου latex, επιμανίκια και εργαστηριακές ρόμπες.

### **3.2.3 Δειγματοληψία**

Με την έναρξη του πειράματος, πραγματοποιούνταν σχεδόν καθημερινά δειγματοληψίες υγρών δειγμάτων από την είσοδο και την έξοδο του τεχνητού υγροβιότοπου, καθώς και από την δεξαμενή επιμόλυνσης για μετρήσεις των χαρακτηριστικών των δειγμάτων pH, EC, ORP, DO και TDS εντός της ίδιας ημέρας και προετοιμασίας των δειγμάτων για μέτρηση των συγκεντρώσεων Cd, Ni και Zn. Οι δειγματοληψίες γινόντουσαν μέσα σε ένα συγκεκριμένο χρονικό εύρος, κατά τις 12.00-13.00 το μεσημέρι, για όλες τις μέρες αντίστοιχα.

Για τις καθημερινές δειγματοληψίες χρησιμοποιούνταν πλαστικά φιαλίδια δειγματοληψίας των 50ml τα οποία μεταφέρονταν μέσα σε ισοθερμικά δοχεία φελιζόλ ώστε να εξασφαλιστεί η ακεραιότητα του δείγματος όπως και η υγιεινή και ασφάλεια των εργαζομένων.

Αρχικά γινόταν η δειγματοληψία από την δεξαμενή βαρέων μετάλλων. Για την πρόσληψη του δείγματος χρησιμοποιούνταν:

- Ένα πουάρ Filler από συνθετικό καουτσούκ, χωρητικότητας περίπου 60ml με 3 βαλβίδες που ελέγχονταν με το χέρι.

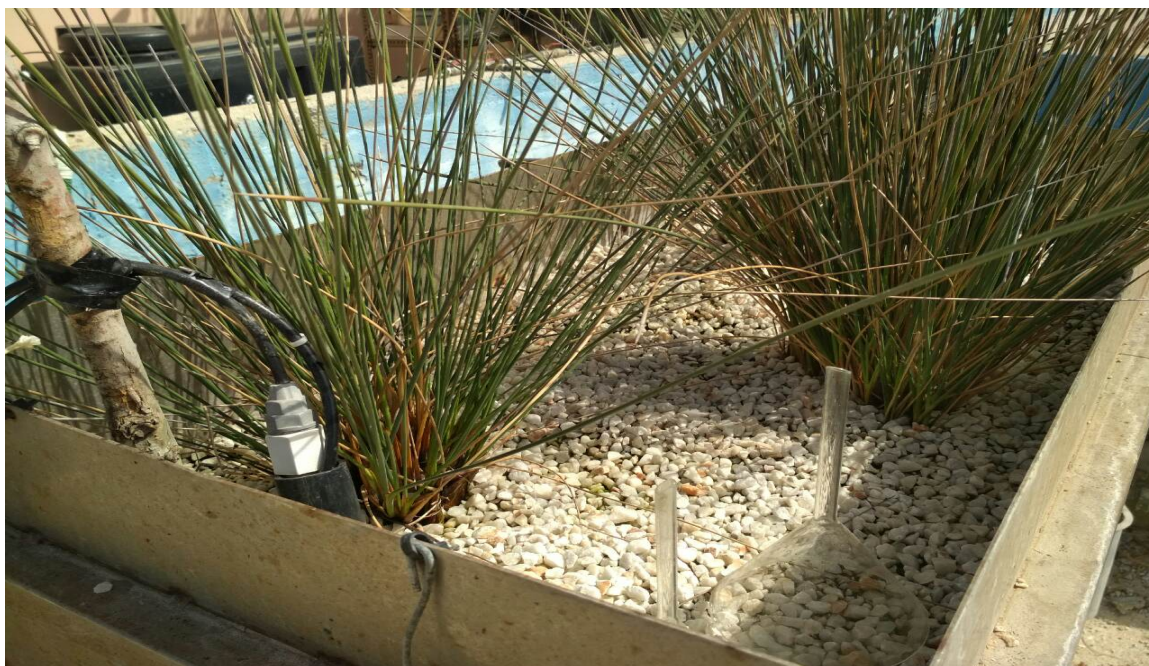
- Ένα πλαστικό σιφώνιο των 25ml πολλαπλών χρήσεων
- Ένας σωλήνας τύπου falcon των 50ml

Πριν από την δειγματοληψία, σημειωνόταν πάντα η ημερομηνία και το είδος του δείγματος πάνω στο σωλήνα falcon. Με την κατάλληλη ενδυμασία που αναφέρθηκε προηγουμένως, ο εργαζόμενος χρησιμοποιούσε το σιφώνιο με το πουάρ για να μετρήσει περίπου 25ml δείγματος από την δεξαμενή βαρέων μετάλλων και στην συνέχεια να τα αποθηκεύσει στον σωλήνα δειγματοληψίας. Μετά την φύλαξη του δείγματος στο ισοθερμικό κουτί φελιζόλ, ο εργαζόμενος ξέπλενε το σιφώνι με νερό βρύσης και τέλος αποθήκευε τα εργαλεία για την επόμενη χρήση τους.

Για την δειγματοληψία από τον τεχνητό υγροβιότοπο χρησιμοποιούνταν δύο φιαλίδια των 50ml. Ένα φιαλίδιο χρησιμοποιούνταν για το δείγμα της εισροής στον υγροβιότοπο και ένας για την εκροή του. Πριν από την δειγματοληψία πάντα σημειωνόταν πάνω στα φιαλίδια η ημερομηνία καθώς και το είδος του δείγματος.

Για το δείγμα της εισροής, τοποθετούνταν μέσα στα φιαλίδια και οι δύο απολήξεις των σωλήνων των παροχών του λύματος και των βαρέων μετάλλων, μέχρι το φιαλίδιο να πληρωθεί με περίπου 35ml. Στην Εικόνα 3.6 φαίνεται το σημείο της δειγματοληψίας. Για το δείγμα της εκροής, αρχικά με κλείσιμο της βάνας σταματούσε η παροχή στην έξοδο που κατέληγε στην δεξαμενή της δευτεροβάθμιας, ώστε η παροχή της εκροής να εξέρχεται μόνο από την έξοδο που προοριζόταν για την δειγματοληψία. Κλεινόταν επίσης και η βάνα του σταθμοδείκτη. Στην συνέχεια, για τρεις επαναλήψεις, το φιαλίδιο πληρωνόταν με δείγμα και έπειτα απορριπτόταν στην δεξαμενή της δευτεροβάθμιας εκροής, ώστε το δείγμα που θα λαμβανόταν να μην περιλάμβανε λιμνάζοντα νερά από τους σωλήνες. Στο τέλος της δειγματοληψίας πάντα ανοιγόταν όλες οι βάνες που κλείστηκαν προηγουμένως.

Πέρα από τις καθημερινές δειγματοληψίες και κατά την δεύτερη πειραματική φάση (Μάρτιος 2018 – Μάιος 2018), πραγματοποιούνταν επιπλέον μία φορά την εβδομάδα δειγματοληψίες, από την είσοδο και την έξοδο του υγροβιότοπου, σε γυάλινα μπουκάλια δειγματοληψίας χωρητικότητας 1 λίτρου, και μεταφέρονταν στο εργαστήριο για μετρήσεις μέσα στην ίδια ημέρα του COD, BOD, TSS, ολικό N και ολικό P των δειγμάτων.



*Εικόνα 3.7: Οι απολήξεις των σωλήνων που τροφοδοτούσαν τον τεχνητό υγροβιότοπο. Το μαύρο σωληνάκι τροφοδοτούσε με λύμα και το άσπρο με το διάλυμα βαρέων μετάλλων*

### **3.2.4 Μέτρηση pH, EC, TDS, DO και ORP**

Για τις καθημερινές μετρήσεις των δειγμάτων χρησιμοποιούνταν το φορητό πολύμετρο δύο καναλιών Hach® HQ40D field case. Με το φορητό πολύμετρο γινόντουσαν οι μετρήσεις pH, ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC), ολικά διαλυμένα στερεά (TDS), διαλυμένο οξυγόνο (DO) και δυναμικό οξειδοαναγωγής (ORP). Όταν το υγρό του δείγματος έφτανε σε θερμοκρασία δωματίου γινόντουσαν οι μετρήσεις τοποθετώντας το κατάλληλο ηλεκτρόδιο κάθε φορά μέσα στο φιαλίδιο. Έπειτα η μέτρηση σημειωνόταν, καθώς και η ημερομηνία που πραγματοποιήθηκε.

### **3.2.5 Προσδιορισμός συγκεντρώσεων Cd, Ni Zn**

Μετά την ολοκλήρωση των παραπάνω μετρήσεων με μια σύριγγα λαμβάνονταν μια ποσότητα περίπου 20ml δείγματος. Στην σύριγγα εφαρμοζόταν ένας πλαστικός αποδέκτης διήθησης με φίλτρο διήθησης 0,45μm Whatman και διηθούνται 10ml δείγματος μέσα σε δεύτερο πλαστικό φιαλίδιο χωρητικότητας 15ml. Η ανάλυση αυτή του δείγματος έπρεπε να γίνεται το συντομότερο δυνατόν μετά από την δειγματοληψία. Σε περιπτώσεις που η ανάλυση δεν γινόταν άμεσα, το δείγμα φυλασσόταν στο ψυγείο στους 4°C με μέγιστο περιθώριο τις δύο ημέρες.

Το διηθημένο δείγμα παρέμενε στην συντήρηση του ψυγείου στους 4°C έως την μέτρηση της ολικής συγκέντρωσης των μετάλλων, καδμίου, νικελίου και ψευδάργυρου, με χρήση φασματομετρίας μάζας με επαγωγικά συζευγμένο πλάσμα (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, ICP-MS, Agilent Technologies, 7500 series CX coupled by Autosampler ASX-500 series, Japan) σύμφωνα με την μέθοδο 6020A EPA (EPA, 1998.).

### 3.2.5.1 Προσδιορισμός των αιωρούμενων στερεών (TSS)

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό των αιωρούμενων στερεών ήταν με διήθηση υπό κενό με χωνί Buchner και ξήρανση στους 103-105°C για μια ώρα. Η διαδικασία ήταν η εξής (Εργαστηριακές Σημειώσεις Ελέγχου Ρύπανσης Νερών, 2018)

1. Καταγραφή του βάρους των φίλτρων που θα χρησιμοποιούνταν στην διήθηση. Τα φίλτρα που χρησιμοποιούνταν ήταν φίλτρα υάλου Whatman 0,45.
2. Τοποθετείται το ζυγισμένο φίλτρο στην συσκευή διήθησης και εφαρμόζεται το κενό.
3. Αναδεύεται καλά το δείγμα που θα διηθηθεί και λαμβάνονται 500ml από αυτό.
4. Αδειάζεται το δείγμα στο χωνί Buchner.
5. Όταν ολοκληρωθεί η διήθηση, αφαιρείται το φίλτρο από την συσκευή και τοποθετείται στο φούρνο για μια τουλάχιστον ώρα στους 103-105°C.
6. Μετά το τέλος της ώρας, το φίλτρο ζυγίζεται και καταγράφεται το τελικό βάρος..
7. Η εξίσωση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των συνολικών αιωρούμενων στερεών (TSS) (mg/l):

$$TSS = \frac{(A - B)}{C} * 10^6 \text{ mg/l}$$

όπου:

A = βάρος του φίλτρου με τα στερεά (g)

B = βάρος του φίλτρου (g)

C = όγκος του διηθούμενου δείγματος (mL)

Άρα αφού C=500mL η σχέση γίνεται:

$$TSS = \frac{(A - B)}{C} * 2000 \text{ mg/l}$$

### 3.2.5.2 Προσδιορισμός του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (COD)

Για τον προσδιορισμό του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (COD) ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία που συμπεριλαμβάνει φιαλίδια κιτ με όλα τα απαραίτητα αντιδραστήρια (εύρους μέτρησης 0-150 mg O<sub>2</sub>/l). Για την μέθοδο αυτή απαιτείται η κατασκευή τυφλού διαλύματος (Εργαστηριακές Σημειώσεις Ελέγχου Ρύπανσης Νερών, 2018):

Αρχικά γινόταν καλή ανακίνηση του φιαλιδίου με το αντιδραστήριο για να διαλυθεί το ίζημα στον πυθμένα.

1. Με αυτόματη πιπέτα μάρκας Eppendorf γινόταν προσθήκη 2 ml δείγματος στο φιαλίδιο που περιείχε τα αντιδραστήρια, δηλαδή το οξειδωτικό μέσο (διχρωμικό κάλιο K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>) και τον καταλύτη.
2. Ακολουθούσε ανακίνηση του φιαλιδίου και τοποθέτηση του στον θερμοαντιδραστήρα για οξείδωση στους 150°C για 120 λεπτά.

3. Μετά το πέρας των 2 ωρών το δείγμα έπρεπε να κρυώσει σε θερμοκρασία δωματίου για 30 λεπτά.
4. Τέλος, με χαρτί καθαριζόταν το εξωτερικό του φιαλιδίου και μετριοταν το COD στο φορητό φασματοφωτόμετρο HACH με την μέθοδο 430 COD LR. (Πρώτα μετριοταν το τυφλό που είχε φτιαχτεί με 2ml απιονισμένου νερού).

### **3.2.5.3 Προσδιορισμός του βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου (BOD)**

Για τον προσδιορισμό του βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνου (BOD) αρχικά απαιτούνταν η επιλογή όγκου δείγματος με βάση την αναμενόμενη τιμή BOD. Η κλίμακα μέτρησης του πειράματος αυτού ήταν 0-40 mg O<sub>2</sub>, έτσι ο όγκος δείγματος που επιλέχθηκε ήταν 432 ml (Εργαστηριακές Σημειώσεις Ελέγχου Ρύπανσης Νερών, 2018):

Τα υλικά και σκεύη που χρησιμοποιούνταν στην διαδικασία ήταν:

- Σύστημα μέτρησης Oxi Top (μανόμετρο)
- Μπουκάλια μέτρησης καφέ χρώματος
- Μαγνητικός αναδευτήρας
- Λαιμός από καουτσούκ
- Καυστικό νάτριο (NaOH)

Η διαδικασία προσδιορισμού είναι ως εξής:

1. Μέτρηση των 432 ml του δείγματος και τα τοποθέτηση στο μπουκάλι μέτρησης BOD καφέ χρώματος.
2. Προσθήκη του μαγνητικού αναδευτήρα στο μπουκάλι.
3. Τοποθέτηση δύο ταμπλετών καυστικού νατρίου στην θήκη από καουτσούκ με μια λαβίδα.
4. Εισαγωγή της θήκης από καουτσούκ στο λαιμό του μπουκαλιού.
5. Τοποθέτηση του Oxi Top πάνω στο μπουκάλι με το δείγμα. Στην συνέχεια κλείνεται σφιχτά και το Oxi Top μηδενίζεται και έτσι σβήνονται οι παλιές μετρήσεις.
6. Στην συνέχεια το μπουκάλι μέτρησης τοποθετείται στον θάλαμο επώασης ο οποίος έχει ρυθμιστεί στους 20°C για 5 μέρες.
7. Οι 5 τιμές που λαμβάνονται αντιστοιχούν στις 5 ημέρες της μέτρησης και είναι σε mg O<sub>2</sub>/l. Πολλαπλασιάζοντας τις μετρήσεις με τον κατάλληλο συντελεστή, ανάλογα με τον όγκο του δείγματος που στην περίπτωση αυτή είναι το 1 υπολογίζονται τα αποτελέσματα των 5 ημερών. Το BOD<sub>5</sub> είναι το BOD της 5<sup>ης</sup> μέρας.

### **3.2.5.4 Προσδιορισμός του ολικού φωσφόρου (TP) και του ολικού αζώτου (TN)**

Για τις μετρήσεις του ολικού φώσφορου χρησιμοποιούνταν το εργαστηριακό κιτ LCK 349 – PO<sub>4</sub>-P/PO<sub>4</sub>/P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ενώ για τις μετρήσεις του ολικού αζώτου χρησιμοποιούνταν το εργαστηριακό κιτ LCK 238 5-40 LATON. Και τα δυο κιτ ήταν της εταιρίας HACH LANGE.

## 4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ : ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

### 4.1 Απομάκρυνση των βαρέων μετάλλων από τον υδροβιότοπο

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η συνολική διάρκεια του πειράματος ήταν 7 μήνες. Το πείραμα ξεκίνησε τέλη Αυγούστου, 2017 και το σύστημα λειτουργούσε συνεχόμενα μέχρι τέλη Νοεμβρίου, 2017. Λόγω βλάβης που προέκυψε στην αντλία τα τέλη του Νοεμβρίου, η λειτουργία του συστήματος διακόπηκε μέχρι την αντικατάσταση της αντλίας και ξεκίνησε ξανά τέλη Φεβρουαρίου, 2018 όπου και λειτούργησε συνεχόμενα μέχρι το πέρας του πειράματος. Κατά τους πρώτους 5 μήνες λειτουργίας του τεχνητού υδροβιοτόπου (CW) προέκυψε πρόβλημα ιζηματοποίησης και καθίζησης των υπό εξέταση βαρέων μετάλλων στην δεξαμενή τους πριν την είσοδο στον υδροβιότοπο. Παρόλο που το συγκεκριμένο γεγονός δεν δημιουργούσε άμεσο πρόβλημα στον CW όπως για παράδειγμα είσοδο ιζημάτων στον CW, είχε όμως ως συνέπεια να μην επιτυγχάνονται οι επιθυμητές συγκεντρώσεις καδμίου, νικελίου και ψευδάργυρου στην εισροή του υδροβιοτόπου. Για το λόγο αυτό, από τον Οκτώβριο 2017 πραγματοποιήθηκαν διάφορες τροποποιήσεις στο σύστημα για την εξάλειψη του προβλήματος, γεγονός που επιτεύχθηκε τον Μάρτιο 2018 με αντικατάσταση του νερού ύδρευσης που χρησιμοποιούνταν για την παρασκευή του διαλύματος βαρέων μετάλλων με απιονισμένο νερό. Για λόγους ευκολότερης κατανόησης λοιπόν, η παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων χωρίζεται σε δυο πειραματικές φάσεις. Στην πρώτη πειραματική φάση από τον Αύγουστο 2017 έως τον Μάρτιο 2018 και στην δεύτερη πειραματική φάση από τον Απρίλιο 2018 έως και τον Μάιο 2018.

#### 1. Πρώτη πειραματική φάση

Μετρήσεις που επαναλαμβάνονταν (σε όλη την διάρκεια λειτουργίας του CW) σε δείγματα από την δεξαμενή βαρέων μετάλλων για την κατανόηση του προβλήματος ιζηματοποίησης έδειχναν μια σταδιακή μείωση των συγκεντρώσεων των διαλυμένων μετάλλων με το χρόνο παραμονής του διαλύματος στην δεξαμενή. Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι συγκεντρώσεις των μετάλλων στην δεξαμενή κατά τον μήνα Μάρτιο 2018 και στον Πίνακα 4.2 οι αντίστοιχες τιμές των ποιοτικών χαρακτηριστικών του διαλύματος την περίοδο αυτή.

*Πίνακας 4.1: Συγκεντρώσεις των μετάλλων στην δεξαμενή, Μάρτιος 2018. \*Με τον όρο «προσθήκη» εννοείται η εκ νέου προσθήκη διαλύματος βαρέων μετάλλων στην δεξαμενή*

Ημερομηνία	Ni (μg/l)	Zn (μg/l)	Cd (μg/l)
28/02/2018 (προσθήκη*)	1460	7749	67,26
1/3/2018	1324	4824	44,28
2/3/2018	1143	3293	38,31
3/3/2018	887,2	1175	23,78

Ημερομηνία	Ni (μg/l)	Zn (μg/l)	Cd (μg/l)
4/3/2018	637,9	391,3	12,84
5/3/2018	463,3	791,8	13,2
6/3/2018 (προσθήκη*)	1368,25	7210,98	63,03
7/3/2018	1402,84	4449,08	65,77
8/3/2018	1309,79	3619,57	60,60
14/3/2018 (προσθήκη*)	1907,43	9628,55	85,97
15/3/2018	1940,83	10663,61	95,28
16/3/2018	1734,54	8429,78	79,11
17/3/2018 (πριν την προσθήκη*)	1844,21	6042,82	72,20
17/3/2018 (προσθήκη*)	2101,87	9802,53	87,19
19/3/2018	1975,43	8238,30	87,07
20/3/2018	1921,75	8036,39	86,74
21/3/2018	1697,48	5584,65	73,13

Από τον Πίνακα 4.1, είναι εύκολο να παρατηρηθεί πως μεταβάλλονται οι συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων. Την πρώτη μέρα λάμβανε χώρα η προσθήκη διαλύματος μετάλλων και οι συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων είναι υψηλές. Στις επόμενες μέρες φαίνεται η σταδιακή μείωση των συγκεντρώσεων μέχρι την επόμενη προσθήκη διαλύματος στις 6/3/2018. Αντίστοιχα, μετά την την εκ νέου προσθήκη παρατηρούνται ξανά οι αυξημένες συγκεντρώσεις, οι οποίες στην συνέχεια έχουν φθίνουσα πορεία και το γεγονός επαναλαμβάνεται αντίστοιχα καθ' όλη την διάρκεια της πρώτης πειραματικής φάσης.

Πίνακας 4.2: Τιμές ποιοτικών χαρακτηριστικών του διαλύματος βαρέων μετάλλων

Παράμετρος	Mean	standard deviation
pH	7,16	0,16
EC (μS/cm)	349,71	47,71
TDS (mg/l)	167,53	22,69
ORP (mV)	195,50	20,68
DO (mg/l)	8,94	0,46

- Έλεγχος αρχικά του νερού ύδρευσης του Βιολογικού Καθαρισμού και στην συνέχεια του νερού ύδρευσης του Πολυτεχνείου

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις των συγκεντρώσεων διαφόρων στοιχείων και των δύο νερών με την χρήση ICP-MS, όπως επίσης και μετρήσεις των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών τους, που όμως δεν έδωσαν καμία πληροφορία ή διαφοροποίηση η οποία να δικαιολογεί την δημιουργία του ιζήματος. Παρακάτω παρατίθεται ο Πίνακας 4.3 με τις συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων στα νερά ύδρευσης:

Πίνακας 4.3: Βαρέα μέταλλα στο νερό (ΟΑ: όριο ανίχνευσης)

Βαρέα μέταλλα	Νερό ύδρευσης Βιολογικού	Νερό ύδρευσης Πολυτεχνείου
Ni	<ΟΑ	<ΟΑ
Zn	18,79 mg/l	<ΟΑ
Cd	<ΟΑ	<ΟΑ
Cu	<ΟΑ	<ΟΑ

- Αντικατάσταση της αρχικής δεξαμενής των βαρέων μετάλλων

Μετά από δύο μήνες λειτουργίας του συστήματος, τον Οκτώβριο 2017, πραγματοποιήθηκε αντικατάσταση της δεξαμενής των βαρέων μετάλλων. Η καινούργια δεξαμενή ξεπλύθηκε με νερό βρύσης δύο φορές μέχρι να πληρωθεί ξανά με το διάλυμα των βαρέων μετάλλων και νερό ύδρευσης του Βιολογικού. Παρόλα αυτά αυτή η τροποποίηση δεν επέφερε λύση στο πρόβλημα της ιζηματοποίησης και εκ νέου παρουσία ιζήματος παρατηρήθηκε μετά από 10 ημέρες λειτουργίας του συστήματος.

- Χρήση ηλεκτρικού αναδευτήρα

Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε εγκατάσταση ηλεκτρικού αναδευτήρα εντός της δεξαμενής των βαρέων μετάλλων, με την προοπτική ότι μέσω της ανάδευσης θα επέρχονταν επαναδιαλυτοποίηση του πιθανά σχηματισμού ιζήματος. Ούτε αυτή η τροποποίηση βοήθησε στην αντιμετώπιση του ιζήματος.

- Αλλαγή των αλάτων στο διάλυμα βαρέων μετάλλων

Η επόμενη τροποποίηση που έγινε ήταν η αντικατάσταση των αλάτων των βαρέων μετάλλων με ανάλογα και συγκεκριμένα του άλατος του ψευδαργύρου, καθώς είχε παρατηρηθεί ότι αυτό το μέταλλο παρουσίαζε την μεγαλύτερη καθίζηση. Όπως προαναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 3, αρχικά χρησιμοποιούνταν το άλας  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$  στο πυκνό διάλυμα βαρέων μετάλλων και το οποίο αντικαταστάθηκε από το  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ . Ούτε όμως με αυτή την αλλαγή παρατηρήθηκε βελτίωση στο πρόβλημα.

- Καθαρισμός δεξαμενής από το υπάρχον ίζημα και αντικατάστασή του νερού ύδρευσης

Τον Φεβρουάριο 2018, πραγματοποιήθηκε αντικαταστεί του νερού ύδρευσης που λαμβανόταν από τις εγκαταστάσεις του Βιολογικού Καθαρισμού Λυμάτων με νερό από τις παροχές ύδρευσης των εγκαταστάσεων του Πολυτεχνείου Κρήτης. Πραγματοποιήθηκε καθαρισμός της δεξαμενής από το υπάρχον ίζημα και το νερό με την χρήση ηλεκτρικής αντλίας και πληρώθηκε ξανά με διάλυμα μετάλλων που είχε παρασκευαστεί με νερό ύδρευσης από το Πολυτεχνείο. Όμως ούτε αυτή η προσπάθεια είχε το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Παρόλα αυτά, εξετάζοντας συνολικά τα αποτελέσματα της πρώτης πειραματικής φάσης, και κυρίως την απόδοση του συστήματος για την απομάκρυνση των βαρέων μετάλλων από το λύμα και παρόλες τις χαμηλές συγκεντρώσεις Cd, Ni και Zn στην είσοδο του CW, σημειώθηκε αξιόλογη απόδοση του συστήματος με μέση απομάκρυνση καδμίου 88%, νικελίου 50% και ψευδαργύρου 49% (Πίνακας 4.4). Επίσης να σημειωθεί ότι οι συγκεντρώσεις των μετάλλων στην εκροή ήταν όλες κάτω από τα όρια της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων (ΦΕΚ 354B/8.3.2011).

Πίνακας 4.4: Απομάκρυνση βαρέων μετάλλων από τον CW ( $n=67 \pm sd$ )

Μέταλλο	Μέση εισόδου (μg/l)	Μέση συγκέντρωση εξόδου (μg/l)	Απομάκρυνση (%)
<b>Cd</b>	8,85 ± 7,76	1,68 ± 2,94	88 ± 18
<b>Ni</b>	199,76 ± 121,83	111,74 ± 89,87	50 ± 26
<b>Zn</b>	606,24 ± 438,38	303,99 ± 237,96	49 ± 24

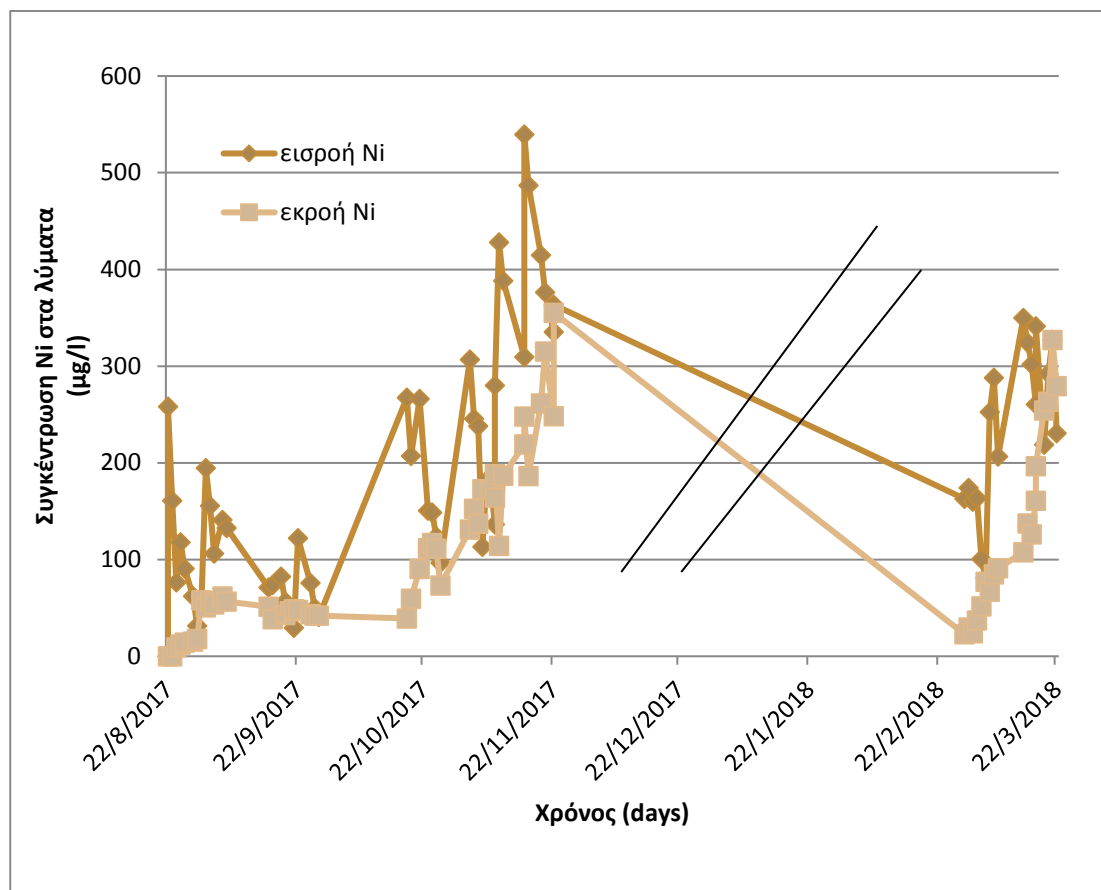
Στα διαγράμματα των συγκεντρώσεων των βαρέων μετάλλων στα λύματα για το διάστημα της πρώτης πειραματικής φάσης που ακολουθούν φαίνεται η πορεία των συγκεντρώσεων των βαρέων μετάλλων στην είσοδο και την έξοδο του υδροβιότοπου.

Οι κορυφές που παρατηρούνται στα Διαγράμματα (4.1, 4.2, 4.3) οφείλονται συνήθως στις ημέρες που γινόταν η νέα επιμόλυνση στην δεξαμενή βαρέων μετάλλων, οπότε τότε σημειωνόντουσαν και οι υψηλότερες τιμές στην εισροή, μέχρι να λάβει χώρα η ιζηματοποίηση και οι συγκεντρώσεις να αρχίσουν να πέφτουν ξανά.

Για το χρονικό διάστημα των τριών μηνών (20/11/2017-28/02/2018) η λειτουργία του υδροβιότοπου είχε σταματήσει λόγω αστοχίας του εξοπλισμού. Στα διαγράμματα η περίοδος αυτή έχει αναπαρασταθεί με δύο παράλληλες ευθείες, που εκφράζουν την διακοπή της λειτουργίας.

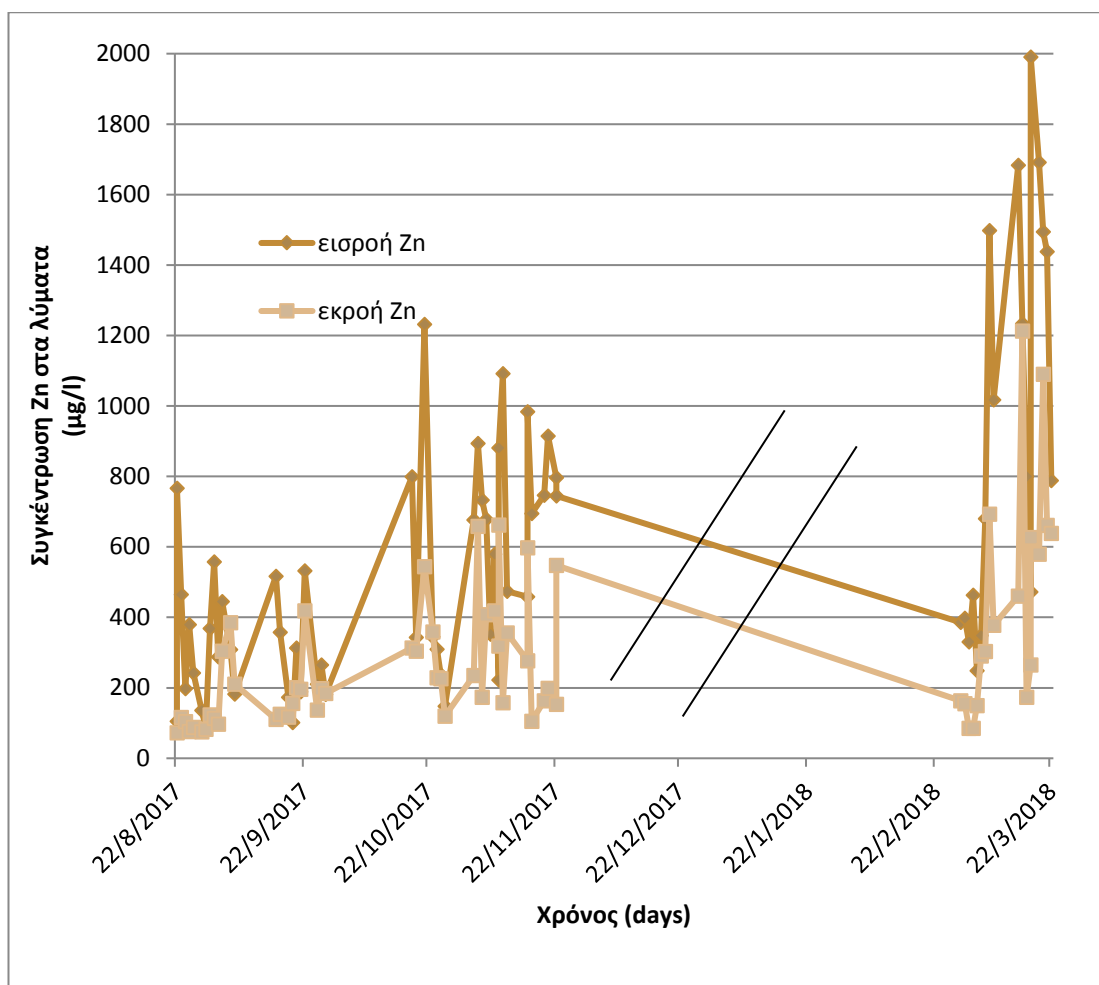
Όπως προαναφέρθηκε, η μέση απομάκρυνση που σημειώθηκε για το νικέλιο ήταν 50%. Παρόλο που οι συγκεντρώσεις του νικελίου ήταν χαμηλότερες από τις επιθυμητές, η απομάκρυνση του ήταν ικανοποιητική καθώς οι τιμές των συγκεντρώσεων στην εκροή ήταν εντός ασφαλών ορίων. Σε αντίστοιχη έρευνα που

πραγματοποιήθηκε για την απομάκρυνση και την συσσώρευση Cu, Ni και Zn σε οριζόντιας υπόγειας ροής τεχνητών υδροβιότοπων με συμβολή βλάστησης από τους Galletti et al. (2010), σημειώθηκε απομάκρυνση 25-35% για το νικέλιο, τιμές παραπλήσιες στις παρούσες.



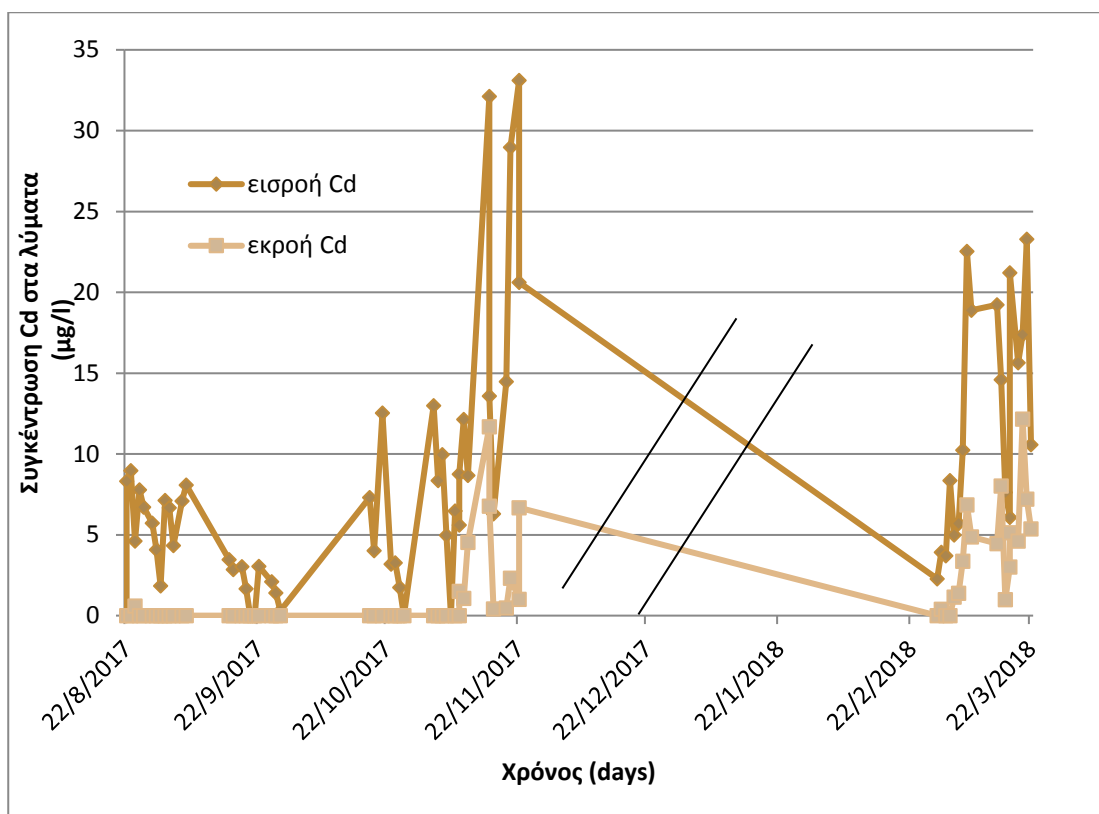
Εικόνα 4.1: Συγκέντρωση Ni στην εισροή και στην εκροή του τεχνητού υδροβιότοπου για το χρονικό διάστημα Αύγουστος 2017-Μάρτιος 2018 (n=67)

Ο ψευδάργυρος έκανε την μεγαλύτερη καθίζηση και από τα τρία μέταλλα. Αυτό μπορεί να διαπιστωθεί και από το Διάγραμμα 4.2, καθώς ενώ η επιθυμητή συγκέντρωση του ψευδαργύρου στην είσοδο ήταν 4000 ppb φαίνεται ότι η μέγιστη συγκέντρωση που είχε μετρηθεί στην είσοδο ήταν 1231,50 ppb που αποτελεί όμως μια εξαίρεση στις κατά τα άλλα χαμηλές μετρήσεις. Παρόλα αυτά η μέση απομάκρυνση του ψευδαργύρου ήταν 49%. Η απομάκρυνση αυτή ήταν εξίσου ικανοποιητική με του νικελίου και επιβεβαιώνει την δυνατότητα του συστήματος να επιτύχει ικανοποιητικές αποδόσεις απομάκρυνσης του μετάλλου. Σε αντίστοιχη έρευνα που πραγματοποιήθηκε για την απομάκρυνση και την συσσώρευση Cu, Ni και Zn σε οριζόντιας υπόγειας ροής τεχνητών υδροβιότοπων με συμβολή βλάστησης από τους Galletti et al. (2010), σημειώθηκε απομάκρυνση 25-35% για τον ψευδάργυρο.



Εικόνα 4.2: Συγκέντρωση Zn στην εισροή και στην εκροή του τεχνητού υγροβιότοπου για το χρονικό διάστημα Αύγουστος 2017-Μάρτιος 2018 (n=67)

Για το κάδμιο, οι συγκεντρώσεις της εκροής ήταν κάτω από το όριο ανίχνευσης του οργάνου, για αυτό σημειώθηκε και μεγαλύτερο ποσοστό μέσης απομάκρυνσης για το κάδμιο. Η υψηλή απομάκρυνση αυτή ίσως ευθύνεται σε κάποιο ποσοστό στις πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις που εισερχόντουσαν στον υγροβιότοπο, πολύ κάτω από το επιθυμητό όριο. Από την άλλη, ακόμα και αν οι συγκεντρώσεις ήταν πολύ χαμηλές, η επιτυχία απομάκρυνσης τους επιβεβαιώνει την επιτυχημένη απόδοση του υγροβιότοπου στην απομάκρυνση του καδμίου. Σε αντίστοιχη έρευνα, (Sheoran and Sheoran, 2006) για την απομάκρυνση βαρέων μετάλλων από αστικά λύματα με χρήση τεχνολογίας τεχνητού υγροβιότοπου σημειώθηκε απομάκρυνση 75-99% για το κάδμιο.



Εικόνα 4.3: Συγκέντρωση Cd στην εισροή και στην εκροή του τεχνητού υδροβιότοπου για το χρονικό διάστημα Αύγουστος 2017-Μάρτιος 2018 (n=67)

Πέρα από τις συγκεντρώσεις των μετάλλων, μετρήθηκαν για όλο το διάστημα της πρώτης πειραματικής φάσης τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του λύματος. Οι φυσικοχημικές παράμετροι του ρευστού, όπως το pH και το δυναμικό οξειδοαναγωγής ORP έχουν δειχθεί ότι επηρεάζουν διάφορες φυσικές και χημικές διεργασίες όπως είναι η προσρόφηση, τους μικροοργανισμούς, τα φυτά και την βιοαποδόμηση των οργανικών και ανόργανων ουσιών (Christofiloropoulos, 2017). Συνεπώς αποτελούν σημαντικές μετρήσεις την κατανόηση και αξιολόγηση της λειτουργίας του υδροβιότοπου και του πειράματος εν γένει.

Στον Πίνακα 4.5 παρουσιάζονται οι ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές (με τις τυπικές αποκλίσεις τους) των ποιοτικών χαρακτηριστικών της εισροής και της εκροής των λυμάτων της πρώτης πειραματικής φάσης. Οι τιμές αυτές προέκυψαν από 67 δείγματα.

Πίνακας 4.5: Τιμές των ποιοτικών παραμέτρων της εισροής και της εκροής (n=67) κατά την πρώτη πειραματική φάση

Παράμετρος	Εισροή λυμάτων			
	Μέση τιμή	s.d	Μέγιστη	Ελάχιστη
pH	7,27	0,15	7,61	6,99
EC (μS/cm)	938,18	173,78	1406,00	113,00

Παράμετρος	Εισροή λυμάτων			
<b>TDS (mg/l)</b>	471,45	73,26	700,00	378,00
<b>ORP (mV)</b>	179,33	35,70	266,70	45,00
<b>DO (mg/l)</b>	7,81	1,00	9,54	5,83
	Εκροή λυμάτων			
	Μέση τιμή	s.d	Μέγιστη	Ελάχιστη
<b>pH</b>	7,24	0,11	7,53	7,06
<b>EC (μS/cm)</b>	1024,00	180,71	1862	820,00
<b>TDS (mg/l)</b>	502,14	92,66	936,00	407,00
<b>ORP (mV)</b>	177,48	31,15	210,50	40,70
<b>DO (mg/l)</b>	7,83	1,10	9,48	4,57

Παρατηρώντας τον Πίνακα 4.5 φαίνεται ότι η μέση τιμή του pH είναι μικρότερη στην έξοδο σε σχέση με την είσοδο, κάτι που φαίνεται και από τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές. Αντίστοιχη μείωση παρατηρείται και σε παρόμοιες μελέτες για το συγκεκριμένο αλόφυτο σε αντίστοιχα πειράματα σε τεχνητούς υδροβιοτόπους (Dimitroula, et al., 2015), (Christofilopoulos, 2017) και πιθανή εξήγηση αποτελεί η έκκριση οργανικών οξέων από την ρίζα του φυτού *J. acutus* L.

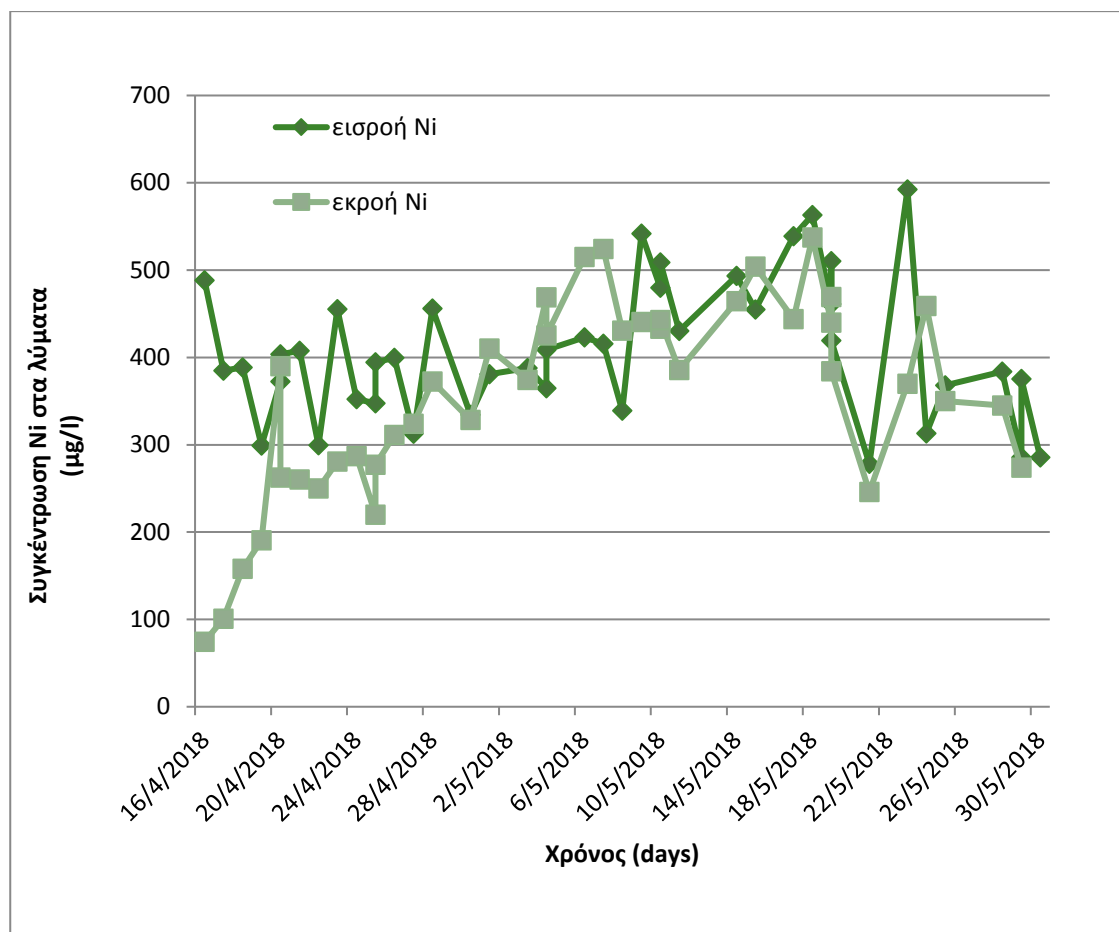
Για την παράμετρο ηλεκτρικής αγωγιμότητας παρατηρείται ότι είναι πιο αυξημένη στην εκροή σε σχέση με την εισροή. Παρόμοια αποτελέσματα μετρήσεων σημειώθηκαν στην εργασία του Christofilopoulos (2017), όπου σε ανάλογων διαστάσεων κατασκευής οριζόντιας ροής τεχνητού υδροβιότοπου, με το ίδιο φυτό, για απομάκρυνση οργανικών ρυπαντών. Οι μετρήσεις αυτές μπορεί να οφείλονται σε εξατμισοδιαπνοή. Αντίστοιχη συμπεριφορά παρατηρείται και για τα ολικά διαλυμένα στερεά.

Οι τιμές του δυναμικού οξειδοαναγωγής και του διαλυμένου οξυγόνου του λύματος παρατηρούνται σχετικά ευεπηρεάστες από το σύστημα.

## 2. Δεύτερη πειραματική φάση

Η δεύτερη πειραματική φάση διήρκησε από τα μέσα Απριλίου 2018 μέχρι και το τέλος Μαΐου 2018. Όπως προαναφέρθηκε, η φάση αυτή αντιστοιχεί στα αποτελέσματα που λήφθηκαν από την λειτουργία του τεχνητού υδροβιοτόπου μετά την αντιμετώπιση του προβλήματος της ιζηματοποίησης των μετάλλων στην δεξαμενή τους και πριν την είσοδο στον CW, η οποία έγινε με χρήση απιονισμένου νερού έναντι νερού ύδρευσης με συνέπεια οι συγκεντρώσεις των υπό εξέταση βαρέων μετάλλων στην είσοδο του CW να μετρούνται κοντά στις επιθυμητές. Να αναφερθεί ότι πάντα υπήρξε μια απόκλιση από τις απολύτως ορισμένες συγκεντρώσεις εισόδου (20 μg/l Cd, 400μg/l Ni

και 4mg/l Zn) λόγω μεταβολών στις παροχές του συστήματος που οφείλονταν στα κατασκευαστικά όρια των αντλιών.



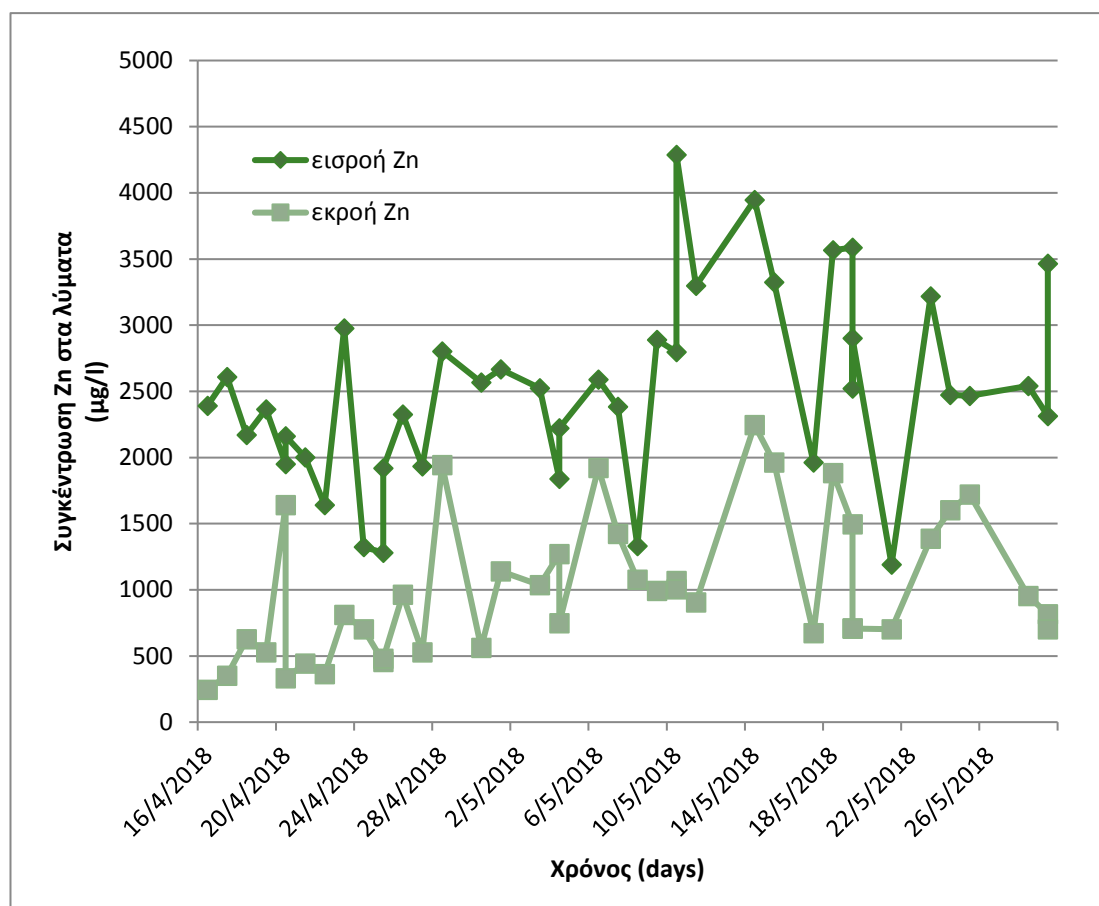
Εικόνα 4.4: Συγκέντρωση Ni στην εισροή και στην εκροή του τεχνητού υγροβιότοπου για το χρονικό διάστημα Απριλίου-Μαΐου 2018 (n=42)

Όπως παρατηρείται στο Διάγραμμα 4.4 οι συγκεντρώσεις του νικελίου στην είσοδο του υγροβιότοπου είναι πιο αυξημένες και πιο σταθερές σε σχέση με τα αποτελέσματα του Διαγράμματος 4.1, με μέσο όρο μετρήσεων τα 402 μg/l (Πίνακας 4.6). Για το νικέλιο σημειώθηκε μέση απομάκρυνση 23,36%. Η μέση απομάκρυνση του νικελίου που επιτεύχθηκε την περίοδο αυτή είναι αρκετά χαμηλότερη από την μέση απομάκρυνση του κατά την πρώτη πειραματική φάση.

Πίνακας 4.6: Απομάκρυνση βαρέων μετάλλων από τον CW (n=42,  $\pm sd$ )

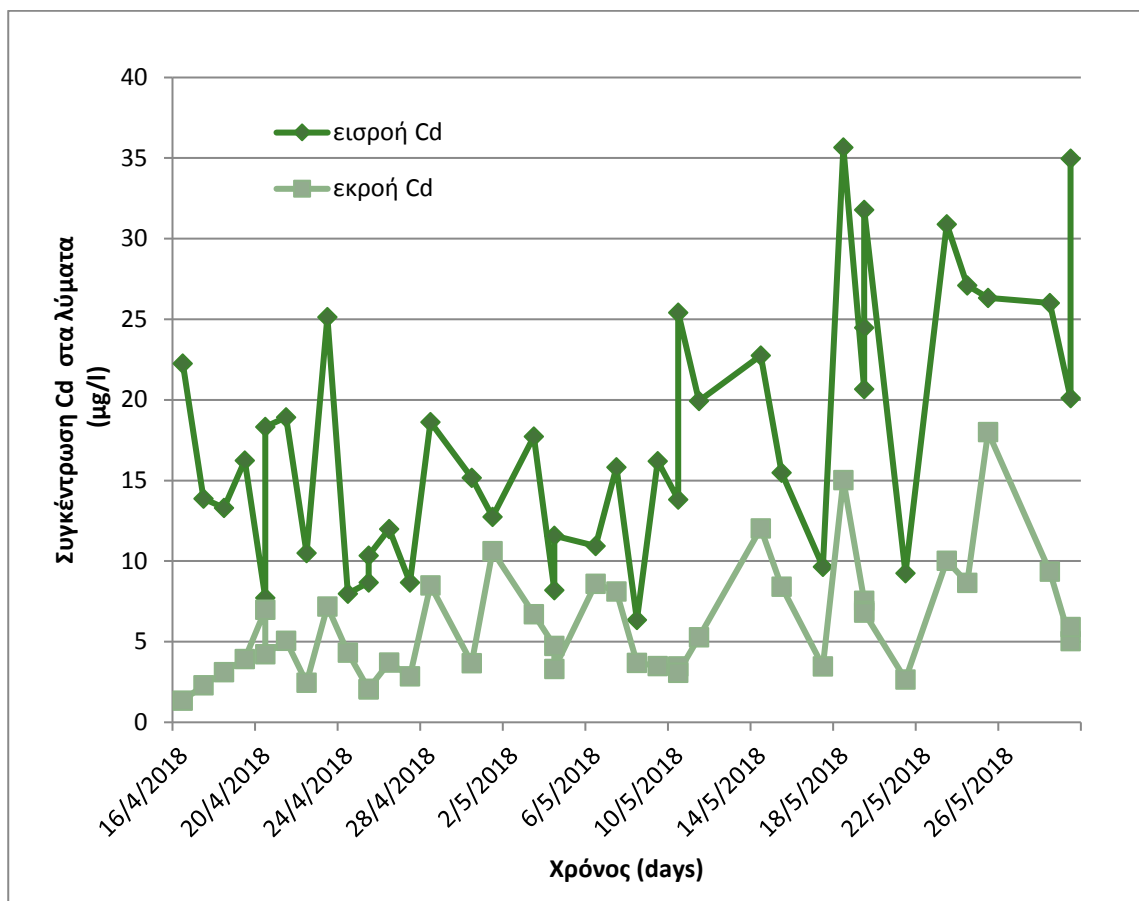
Μέταλλο	Επιθυμητή συγκέντρωση εισόδου (μg/l)	Μέση συγκέντρωση εισόδου (μg/l)	Μέση συγκέντρωση εξόδου (μg/l)	Απομάκρυνση (%)
Cd	20	17,33 $\pm$ 7,98	5,90 $\pm$ 3,59	63,39 $\pm$ 19,17
Ni	400	402 $\pm$ 91,60	364,94 $\pm$ 131,44	23,36 $\pm$ 20,58
Zn	4000	2457,70 $\pm$ 766,68	996,35 $\pm$ 523,15	59,24 $\pm$ 19,51

Από το Διάγραμμα φαίνεται ότι η καμπύλη της εκροής σε ορισμένα σημεία ταυτίζεται ή και ξεπερνάει την καμπύλη της εκροής προς το τέλος της πειραματικής περιόδου, δηλαδή μετριέται υψηλή συγκέντρωση νικελίου στο ρεύμα εξόδου του CW που δείχνει αδυναμία του συστήματος για απομάκρυνση του συγκεκριμένου μετάλλου. Η αυξημένη ποσότητα νικελίου στην έξοδο μπορεί να οφείλεται στην μειωμένη ικανότητα των φυτών να απορροφήσουν και να απομακρύνουν τους ρύπους, λόγω μεγάλης συσσώρευσης και κορεσμού του στις ρίζες τους. Από έρευνα για την απορρόφηση, την μεταφορά και την αποβολή των μετάλλων από φυτά που χρησιμοποιούνται σε τεχνητούς υδροβιότοπους (Weis and Weis, 2003) έχει σημειωθεί ότι είναι σημαντικό να είναι γνωστή η διαδικασία και η επεξεργασία της πρόσληψης των μετάλλων από τα φυτά, καθώς αυτή μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στον χρόνο παραμονής των μετάλλων στον υδροβιότοπο και την πιθανή απελευθέρωση των μετάλλων ξανά στο σύστημα. Αυτές οι πληροφορίες είναι απαραίτητες ώστε να επιβεβαιωθεί η λειτουργία του υδροβιότοπου ως συστήματα εξυγίανσης και όχι ως πηγή περαιτέρω μόλυνσης. Από έρευνα που πραγματοποιήθηκε από τους MacFarlane et al. (2003), βγήκε το συμπέρασμα ότι ενώ τα φυτά στους υδροβιότοπους μπορούν πράγματι να ακινητοποιήσουν ή να απορροφήσουν τα μέταλλα, πολλά από αυτά έχουν μικρό χρόνο ζωής, μπορεί η ικανότητα τους να απομακρύνουν τα μέταλλα να διαρκεί για μικρό χρονικό διάστημα.



Εικόνα 4.5: Συγκέντρωση Zn στην εισροή και στην εκροή του τεχνητού υδροβιότοπου για το χρονικό διάστημα Απριλίου-Μαΐου 2018 (n=42)

Στο Διάγραμμα 4.5 παρατηρούνται ξεκάθαρα οι αυξημένες συγκεντρώσεις του ψευδαργύρου στην εισροή σε σχέση με το Διάγραμμα 4.2, της πρώτης πειραματικής φάσης. Παρόλο που οι συγκεντρώσεις στην είσοδο του υδροβιότοπου είναι πιο χαμηλές από την επιθυμητή, είναι σαφώς πιο αυξημένες και σταθερές από ότι πριν (Πίνακας 4.6). Στην πειραματική φάση αυτή σημειώθηκε 59,24% μέση απομάκρυνση για τον ψευδάργυρο, αυξημένη δηλαδή κατά 10% σε σχέση με την απομάκρυνση που σημειώθηκε στην πρώτη πειραματική φάση. Η απομάκρυνση αυτή επιβεβαιώνει την ικανότητα του τεχνητού υδροβιότοπου να εξυγιάνει τα λύματα από τον ψευδάργυρο.



Εικόνα 4.6: Συγκέντρωση Νι στην εισροή και στην εκροή του τεχνητού υδροβιότοπου για το χρονικό διάστημα Απριλίου-Μαΐου 2018 (n=42)

Στο Διάγραμμα 4.6 παρατηρείται ότι οι συγκεντρώσεις του καδμίου στην είσοδο είναι πολύ μεγαλύτερες από αυτές που σημειώθηκαν στο Διάγραμμα 4.3 και μάλιστα σε πολλές περιπτώσεις υπερβαίνουν και την επιθυμητή συγκέντρωση εισροής.

Η μέση απομάκρυνση που σημειώθηκε για το κάδμιο ήταν 63,19%. Σε σχέση με την μέση απομάκρυνση που είχε επιτευχθεί στην πρώτη πειραματική φάση (88%), η μέση απομάκρυνση του καδμίου έχει πέσει αρκετά. Αυτό όμως μπορεί να οφείλεται στο ότι οι συγκεντρώσεις του καδμίου στην πρώτη πειραματική φάση ήταν ήδη ιδιαίτερα χαμηλές στην είσοδο, ενώ εδώ είναι πολύ πιο αυξημένες ή την μείωση της ικανότητας απομάκρυνσης του μετάλλου του CW με την πάροδο του χρόνου. Σε έρευνα που έγινε πάνω σε 15 διαφορετικά είδη φυτών για την ανοχή και συσσώρευση καδμίου, από νερά ρυπασμένα με κάδμιο, σε τεχνητούς υδροβιότοπους (Liu et al., 2014),

σημειώθηκε πως η ικανότητα απομάκρυνσης του καδμίου διαφέρει στις χαμηλές και στις πιο υψηλές συγκεντρώσεις που προστίθενται. Για τις χαμηλότερες συγκεντρώσεις σημειώθηκε απομάκρυνση πάνω από 90% ενώ για πιο υψηλές συγκεντρώσεις του ρύπου σημειώθηκε μικρότερη αλλά ικανοποιητική απομάκρυνση, 16,8-23,5%.

Σε υδροπονική μελέτη που έγινε για το συγκεκριμένο φυτό (Christofilopoulos et al., 2016), με σκοπό να ερευνηθεί την αποτελεσματικότητα του να εξυγιάνει συνδυασμούς μίγματος με οργανικές ενώσεις (CIP, SMX, BPA) και μέταλλα (Cr, Cd, Ni, Zn), παρατηρήθηκε ολική απομάκρυνση του Cd, και ποσοστά περίπου 76% Ni και 98% Zn. Οι απομακρύνσεις που σημειώθηκαν στο πείραμα αυτό ήταν χαμηλότερες από τις αντίστοιχες βιβλιογραφικές, αλλά ικανοποιητικές καθώς επιβεβαιώναν την λειτουργία και την απόδοση του υδροβιότοπου στον μεγαλύτερο βαθμό.

Όπως στην πρώτη πειραματική φάση, έτσι και στην δεύτερη, μετρήθηκαν οι φυσικοχημικές παραμέτρους των λυμάτων για όλο το χρονικό διάστημα των μετρήσεων. Στον Πίνακα 4.7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από 42 δείγματα.

Πίνακας 4.7: Τιμές των ποιοτικών παραμέτρων του ρυπασμένου με βαρέα μέταλλα λύματος της εισροής και της εκροής (n=42)

Παράμετρος	Εισροή λυμάτων			
	Μέση τιμή	s.d	Μέγιστη	Ελάχιστη
<b>pH</b>	7,43	0,20	8,08	7,13
<b>EC (μS/cm)</b>	923,57	0,17	1075,0	842,0
<b>TDS (mg/l)</b>	451,86	25,88	530,0	413,0
<b>ORP (mV)</b>	191,47	10,32	218,80	167,6
<b>DO (mg/l)</b>	8,39	0,95	9,89	6,12
	Εκροή λυμάτων			
	Μέση τιμή	s.d	Μέγιστη	Ελάχιστη
<b>pH</b>	7,28	0,17	7,93	7,05
<b>EC (μS/cm)</b>	1141,52	131,4	1621	887,0
<b>TDS (mg/l)</b>	564,40	67,46	811,00	435,0
<b>ORP (mV)</b>	186,39	28,13	220,60	23,30
<b>DO (mg/l)</b>	8,16	1,14	9,94	5,85

Το pH των λυμάτων παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά με το pH των μετρήσεων της πρώτης πειραματικής φάσης, είναι δηλαδή σχετικά πιο μικρό στην έξοδο από ότι στην είσοδο. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η μείωση του pH πιθανώς οφείλεται στην έκκριση οργανικών οξέων από την ρίζα του φυτού *J. acutus* L (Dimitroula et al., 2015, Christofilopoulos, 2017).

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα παρουσιάζει και αυτή την ίδια συμπεριφορά με τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.5, πιο αυξημένη στην εκροή του υδροβιότοπου, με πιθανή αιτία την εξατμισοδιαπνοή του φυτού (Christofilorou, 2017). Τα διαλυμένα στερεά έχουν μετρηθεί και αυτά με παρόμοιες τιμές.

Η διαφορά παρατηρείται στις τιμές του δυναμικού οξειδοαναγωγής και τις τιμές του διαλυμένου οξυγόνου. Και στις δύο παραμέτρους παρατηρούνται πιο μειωμένες τιμές στην έξοδο σε σχέση με την είσοδο των λυμάτων.

Οι μετρήσεις του δυναμικού οξειδοαναγωγής (ORP) αποτελούν έναν έμμεσο τρόπο προσδιορισμού των αναερόβιων ή αερόβιων συνθηκών που επικρατούν στον τεχνητό υδροβιότοπο (Zarate et al., 2007). Όμως καθώς οι παράγοντες που επηρεάζουν τις τιμές του είναι πολλοί όπως η θερμοκρασία, η ηλιακή ακτινοβολία και το βάθος του νερού είναι δύσκολο να αποδοθεί η αιτία των μειωμένων τιμών στην έξοδο του υδροβιότοπου (Szogi et al. 2004)

Από έρευνα που πραγματοποιήθηκε πάνω στην επίδραση διάφορων τύπων φυτών στους τεχνητούς υδροβιότοπους (Sewwandi et al., 2010) παρατηρήθηκε πως οι χαμηλότερες τιμές διαλυμένου οξυγόνου οφείλονται στην εμπόδιση της διάχυσης του ατμοσφαιρικού οξυγόνου στο νερό, λόγω σκίασης από τα φυτά. Παρόμοια αποτελέσματα παρατηρήθηκαν και από τους Nahlik and Mitsch (2006). Παρόλα αυτά η αιτία των χαμηλότερων τιμών του διαλυμένου οξυγόνου δεν είναι προφανής καθώς εξαρτάται από πολλούς περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως επιβεβαιώνει η έρευνα των Rehman et al. (2016).

Όπως έχει προαναφερθεί οι ρύποι απομακρύνονται με διάφορους μηχανισμούς από το νερό εντός του υδροβιότοπου, πέρα της φυτοαπορρόφησης και ριζοδιήθησης. Σύμφωνα με την EPA (A handbook for constructed wetlands, 2015) μέταλλα είναι δυνατόν να κατακρατούνται στο υπόστρωμα ή να αποθηκεύονται στα ιζήματα του τεχνητού υδροβιότοπου. Καθώς το pH που μετρήθηκε στην είσοδο και στην έξοδο του υδροβιότοπου ήταν σχετικά ουδέτερο, μπορεί να συμπεραθεί ότι το περιβάλλον εντός του υδροβιότοπου ήταν και αυτό ουδέτερο, συνεπώς είναι αναμενόμενη η προσρόφηση των μετάλλων καθώς και οι χημικοί σχηματισμοί και η ανταλλαγή των ιόντων στο υπόστρωμα (Justin, 2001). Καθώς όμως η μεταβολή του δυναμικού οξειδοαναγωγής ORP δεν είχε κάποια σημαντική μεταβολή, τότε δεν ξεκάθαρο ποιες διεργασίες συνέβησαν.

Ένας άλλος μηχανισμός απομάκρυνσης θα μπορούσε να είναι και η κατακρήμνιση των μετάλλων. Το pH των μετρήσεων όμως ορίζει ένα ουδέτερο περιβάλλον, που δεν ευνοεί τις συνθήκες για καταβύθιση (Γκαύρου, 2016).

Ο μηχανισμός της προσρόφησης των μετάλλων σχετίζεται άμεσα με το είδος του υλικού που χρησιμοποιείται. Στο πείραμα αυτό είχε επιλεγεί το χαλίκι, το οποίο θεωρείται ότι έχει μικρότερη ικανότητα προσρόφησης από το άλλα υλικά (άμμος, χώμα). Συνεπώς εάν πράγματι είχε προσροφηθεί ποσότητα μετάλλων από το χαλίκι θα έπρεπε να ήταν σχετικά μικρή. Αντίστοιχα, όπως ο ψευδάργυρος, το νικέλιο και το

κάδμιο συνήθως προσροφώνται ελαφρά. Επιπλέον στοιχεία για το κάδμιο αναφέρουν ότι απομακρύνεται κυρίως με χημική καθίζηση και ιοντοανταλλαγή (Γκαύρου, 2016).

Καθώς όμως δεν υπάρχουν περισσότερες λεπτομέρειες για τις δράσεις των μηχανισμών που συνέβαλαν στην μείωση των βαρέων μετάλλων, η θεώρηση ότι υπάρχει στο σύστημα του τεχνητού υδροβιότοπου μια αλληλεπίδραση των διαδικασιών της κατακρήμνισης, της προσρόφησης, της ιοντοανταλλαγής και της φυτοαπορρόφησης, οι οποίες εξαρτώνται η μία από την άλλη, είναι και η πιο ορθή (Γκαύρου, 2016).

Στην δεύτερη πειραματική φάση πραγματοποιήθηκαν και μετρήσεις για το βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο ( $BOD_5$ ) το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD), το ολικό φώσφορο (TP), το ολικό άζωτο (TN) και των ολικών αιωρούμενων στερεών (TSS). Οι μετρήσεις παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.8.

Πίνακας 4.8: Τιμές  $BOD_5$ , COD, TN, TP, TSS και της απομάκρυνσης τους στο ρυπασμένο με μέταλλα λύμα ( $n=42$ )

Παράμετρος (mg/l)	Εισροή λυμάτων		Εκροή λυμάτων		Απομάκρυνση %
	mean	s.d	mean	s.d	
<b><math>BOD_5</math></b>	6	1,00	9	2,38	-54,55
<b>COD</b>	17	6,40	17	9,95	0,98
<b>TN</b>	15,05	5,49	4,92	1,65	67,33
<b>TP</b>	1,90	0,08	1,22	0,31	35,82
<b>TSS</b>	6,54	5,27	2,74	1,89	66,68

Όπως φαίνεται στον πίνακα, σημειώθηκε αρνητική απομάκρυνση για το βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο ( $BOD_5$ ), δηλαδή η συγκέντρωση του προέκυπτε πιο αυξημένη στην έξοδο του υδροβιότοπου σε σχέση με την είσοδο και 0,98% απομάκρυνση για το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD). Ο λόγος που προέκυψαν αυτά τα αποτελέσματα απομάκρυνσης για αυτές τις δύο παραμέτρους είναι διότι στην εισροή είχαμε ήδη πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις και των δύο παραμέτρων, λόγω της προεπεξεργασίας που είχαν υποστεί τα λύματα. Έτσι, το πολύ χαμηλό ρυπαντικό φορτίο δεν ήταν ενδεικτικό δείγμα για τις ικανότητες απομάκρυνσης που είχαν τα φυτά και ο υδροβιότοπος. Ασήμαντη απομάκρυνση οργανικής ύλης αναφέρεται και στην έρευνα που έγινε για αλόφυτα σε τεχνητούς υδροβιότοπους κάθετης ροής για την εξυγίανση λυμάτων (Fountoulakis et al., 2017).

Ικανοποιητική μετρήθηκε η λειτουργία του CW για την απομάκρυνση ολικού φωσφόρου και ολικού αζώτου, μέση απομάκρυνση 67,33% και 35,82% αντίστοιχα. Σε αντίστοιχη έρευνα σε τεχνητό υδροβιότοπο οριζόντιας ροής με χρήση των φυτών *Juncus acutus* L. είχε εκτιμηθεί απομάκρυνση ολικού αζώτου 24,2-38,9% και

αντίστοιχα του φωσφόρου 80-92% (Temel et al., 2017). Σε άλλη έρευνα για τα φυτά που χρησιμοποιούνται στους τεχνητούς υδροβιότοπους, φάνηκε ότι συμβάλλουν στα υψηλά ποσά απομάκρυνσης των συστατικών αυτών, 15-80% για το άζωτο και 24-80% για το φώσφορο (Greenway and Woolley, 2001). Άλλοι συγγραφείς δήλωσαν μικρότερη απομάκρυνση και μέσα στο εύρος των τιμών 14,29-51,89% ολικού αζώτου και 10,76-34,17% ολικού φωσφόρου (Wu et al., 2013a, 2013b)

Τέλος στον παραπάνω πίνακα φαίνεται η απομάκρυνση των αιωρούμενων σωματιδίων στα 66,68%. Τα ολικά αιωρούμενα σωματίδια απομακρύνονται με διάφορους μηχανισμούς από τον υδροβιότοπο, όπως με την διήθηση, την προσρόφηση πάνω στα βιοφιλμ που αναπτύσσεται πάνω στο υπόστρωμα και στην επιφάνεια των ριζών, τις κατακρημνίσεις, την μικροβιακή δραστηριότητα και την ιζηματοποίηση (Christofilopoulos, 2017). Επίσης οι χαμηλές παροχές δημιουργούν κατάλληλες συνθήκες για την απομάκρυνση των αιωρούμενων σωματιδίων, γιατί δρουν σαν οριζόντια φίλτρα χαλικιού. Η επίδραση της βλάστησης στην απομάκρυνση των αιωρούμενων σωματιδίων είναι συχνά αμφισβητήσιμη καθώς δεν σημειώνονται σημαντικές διαφορές (Christofilopoulos, 2017). Αντίστοιχη απομάκρυνση σημειώθηκε σε μια διατριβή που εξέταζε την απομάκρυνση δισφαινόλης Α από λύματα με την χρήση του φυτού *Juncus acutus* L. (Christofilopoulos, 2017) όπως και σε μια έρευνα για την μελέτη επεξεργασίας λυμάτων από το *Juncus acutus* L. (Coleman et al, 2001) με 70% απομάκρυνση.

Κάνοντας μια σύνοψη των αποτελεσμάτων του πειράματος, τα αποτελέσματα της απόδοσης του τεχνητού υδροβιότοπου έδειξαν ότι είναι δυνατή η απομάκρυνση των βαρέων μετάλλων Ni, Zn και Cd σε ποσοστά 50%, 49% και 88% αντίστοιχα, στην πρώτη πειραματική φάση, ενώ στην δεύτερη σε ποσοστά 23%, 59% και 66%.

Καθ' όλη την χρονική διάρκεια που εκτελούνταν το πείραμα, τα φυτά *J. acutus* παρουσίασαν μεγάλη ανοχή στις συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων που χρησιμοποιήθηκαν. Οι συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων ήταν βέβαια αρκετά χαμηλές, παρόλα αυτά κανένα από τα φυτά δεν παρουσίασε συμπτώματα τοξικότητας, όπως καχεκτική ανάπτυξη, ανεπαρκής ανάπτυξη ριζικού συστήματος, κατσαρά ή αποχρωματισμένα φύλλα, φύλλα χλώρωσης ή μααρασμού. Συνεπώς όλα τα φυτά ανταποκρίθηκαν πάρα πολύ καλά κάτω από τις συγκεκριμένες συνθήκες καταπόνησης.

Με βάση τα παραπάνω, το *J. acutus* είναι ένα πολυετές φυτό αλμυρών βάλτων που ριζοβολά εύκολα χωρίς ιδιαίτερες καλλιεργητικές τεχνικές. Έχει επιβεβαιωθεί από διάφορες έρευνες (Γκαύρου, 2016, Syranidou et al., 2016, Christofilopoulos, 2016, Dimitroula et al., 2015) πως είναι ανεκτικό σε συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων και συγκεκριμένα στο κάδμιο, το νικέλιο και το ψευδάργυρο. Συνεπώς το φυτό *J. acutus* έχει μεγάλες δυνατότητες για να χρησιμοποιηθεί σε τεχνητούς υδροβιότοπους για την επεξεργασία ρυπασμένων νερών.

## 5 ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Ο τεχνητός υγροβιότοπος που κατασκευάστηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής στον Βιολογικό Καθαρισμό λειτούργησε συνεχόμενα για επτά μήνες. Καθ' όλη την διάρκεια της λειτουργίας του προέκυψαν διάφορες προκλήσεις που δυσχέραιναν την διεξαγωγή του πειράματος, αλλά οι τρόποι με τους οποίους αντιμετωπίστηκαν βοήθησαν στην εξαγωγή συμπερασμάτων καθώς και στην σύνταξη προτάσεων για μελλοντική επέκταση της έρευνας αυτής.

## 5.1 Συμπεράσματα

Τα κύρια συμπεράσματα που προέκυψαν από την μελέτη αυτή ήταν:

- Η χρήση τεχνητών υδροβιότοπων ενδείκνυται για την απομάκρυνση των βαρέων μετάλλων από τα αστικά λύματα

Όπως αναφέρεται και στην έρευνα του Christofiloropoulos (2017), οι τεχνητοί υδροβιότοποι είναι μια καινοτόμος τεχνολογία, χαμηλού κόστους περιβαλλοντικά και κοινωνικά φιλική, με επιτυχημένες εφαρμογές παγκοσμίως τις τελευταίες δεκαετίες στην εξυγίανση υγρών αποβλήτων από θρεπτικά, οργανική ύλη και ορισμένους οργανικούς όπως και ανόργανους ρύπους. Η συνύπαρξη διαφορετικών διεργασιών απομάκρυνσης ή/και αποδόμησης σε μια μόνο τεχνολογία αποτελεί σημαντικό τους προτέρημα. Παρόλα αυτά, η γνώση για την αποτελεσματικότητα των ικανοτήτων απομάκρυνσης των τεχνητών υδροβιότοπων, των μηχανισμών που συμπεριλαμβάνονται και η επίδραση των σχεδιαστικών και λειτουργικών παραμέτρων είναι ακόμα περιορισμένη. Επίσης, η επιλογή του κατάλληλου είδους φυτού για τις απαιτήσεις του κάθε πειράματος είναι πολύ σημαντική. Από τα πειράματα που έγιναν συμπεραίνεται πως η σωστή κατασκευή και συντήρηση του τεχνητού υδροβιότοπου αποτελεί σίγουρα καθοριστικό βήμα προς την επιτυχία της όλης διεργασίας.

Επιπρόσθετα, όπως προαναφέρθηκε, η επιλογή των κατάλληλων φυτών αποτελεί σημαντικό παράγοντα στην επιτυχημένη λειτουργία του πειράματος. Συνεπώς τα φυτά *Juncus acutus* L. επιλέχθηκαν σύμφωνα με την ικανότητα τους να αντέχουν την καταπόνηση από διάφορες πηγές, συμπεριλαμβανομένων των βαρέων μετάλλων και του μεγάλου οικολογικού τους εύρους. Ταυτόχρονα αποτελούν φυσική χλωρίδα της περιοχής, που οι περιβαλλοντικές συνθήκες ευνοούν την ανάπτυξη τους.

Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι το σύστημα του τεχνητού υγροβιότοπου σημείωσε ικανοποιητικές μέσες απομακρύνσεις των βαρέων μετάλλων. Συγκεκριμένα η μεγαλύτερη απομάκρυνση που σημειώθηκε ήταν του καδμίου Cd, με ποσοστό απομάκρυνσης 88% στην πρώτη πειραματική φάση και 67% στην δεύτερη. Η ικανότητα απομάκρυνσης του συστήματος ήταν ικανοποιητική και για τα τρία μέταλλα και για αυτό θα χαρακτηριζόταν κατάλληλη τεχνολογία για την εξυγίανση ρυπασμένων νερών από βαρέα μέταλλα.

- Η χρήση τεχνητών υγροβιότοπων ενδείκνυται για την απομάκρυνση των θρεπτικών στοιχείων ολικό άζωτο (TN) και ολικό φώσφορο (TP) καθώς και των ολικών αιωρούμενων στερεών (TSS).

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων του πειράματος έδειξαν ικανοποιητική και σταθερή απομάκρυνση των θρεπτικών υλικών και των αιωρούμενων στερεών. Συγκεκριμένα, η συνολική απομάκρυνση που σημειώθηκε ήταν 67,33% για το ολικό άζωτο, 35,82% για τον ολικό φώσφορο και 66,68% για τα ολικά αιωρούμενα στερεά. Καθ' όλη την διάρκεια των μετρήσεων, οι τιμές της απομάκρυνσης για την κάθε παράμετρο ήταν σταθερές χωρίς μεταβολές, σε κάθε μέτρηση, γεγονός που δείχνει την αξιόπιστη λειτουργία του υγροβιότοπου στην απομάκρυνση τους. Η ικανότητα ενός υγροβιότοπου να απομακρύνει τα θρεπτικά στοιχεία είναι πολύ σημαντική καθώς τα στοιχεία αυτά είναι υπεύθυνα για σοβαρά προβλήματα στην ανθρώπινη υγεία καθώς και για το πρόβλημα του ευτροφισμού σε λίμνες ή ποτάμια.

Οι υγροβιότοποι είναι επίσης γνωστοί για την ικανότητα απομάκρυνσης τους για το BOD<sub>5</sub> και το COD. Στην προκειμένη περίπτωση όμως, τα λύματα που εισέρχονταν στον υγροβιότοπο είχαν πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις των παραμέτρων αυτών, λόγω σωστής δευτερογενής επεξεργασίας τους. Συνεπώς δεν παρατηρήθηκε περαιτέρω μείωση του οργανικού φορτίου τους, χωρίς όμως αυτό να δείχνει ελλιπή λειτουργία του υγροβιότοπου.

- Στα φυτά *Juncus acutus* L. δεν παρατηρήθηκαν συμπτώματα φυτοτοξικότητας ή καταπόνισης.

Τα φυτά *Juncus acutus* που φυτεύτηκαν στην έναρξη του πειράματος σημείωσαν ταχεία ανάπτυξη και δημιούργησαν εκτεταμένο και δυνατό ριζικό σύστημα μέσα σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Επιπρόσθετα, τυχόν συμπτώματα τοξικότητας δεν παρατηρήθηκαν οπτικά στα φυτά κατά την διάρκεια του πειράματος από τις καταπονήσεις των μετάλλων. Συμπεραίνεται ότι το κάδμιο, το νικέλιο και ο ψευδάργυρος, για το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα του πειράματος και στις συγκεκριμένες συγκεντρώσεις, δεν είχαν δυσμενείς επιπτώσεις στη λειτουργία των φυτών.

Κατά συνέπεια, η αντοχή στις συγκεκριμένες συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων σε συνδυασμό με την ικανότητά τους να εγκατασταθούν σε ξηρό κλίμα, ιδιαίτερα στη μεσογειακή ζώνη, αντικατοπτρίζει το γεγονός ότι τα είδη αυτά είναι κατάλληλα για φυτοεξυγίανση σε συστήματα τεχνητών υγροβιότοπων με αστικά και βιομηχανικά λύματα. Σίγουρα όμως προτείνεται να ελεγχθούν σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις μετάλλων και για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα ώστε να εξαχθούν πιο ασφαλή και αξιόπιστα συμπεράσματα σχετικά με την ανθεκτικότητα των φυτών.

## 5.2 Προτάσεις

Υπάρχουν πολλές αναπάντητες ερωτήσεις στην τεχνολογία των τεχνητών υγροβιότοπων που πιθανόν να μπορούσαν να απαντηθούν μέσω περαιτέρω έρευνας.

Κάποια ερωτήματα που προέκυψαν κατά την εκτέλεση της πειραματικής διαδικασίας παρατίθενται παρακάτω:

- ✓ Πώς επηρεάζουν την λειτουργία ενός τεχνητού υδροβιότοπου οι εποχιακές διακυμάνσεις και μεταβολές.
- ✓ Ποια είναι η περαιτέρω συμβολή κάθε μηχανισμού που συμμετέχει στην λειτουργία ενός τεχνητού υδροβιότοπου για την εξυγίανση ρυπασμένου νερού από βαρέα μέταλλα και λύματα.
- ✓ Πώς συμβάλλει η μικροβιακή κοινότητα που βρίσκεται στην ριζόσφαιρα των φυτών στους τεχνητούς υδροβιότοπους και πώς συμβάλλουν τα ενδοφυτικά βακτήρια για την απομάκρυνση των βαρέων μετάλλων.

## 6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### 6.1 Διεθνής Βιβλιογραφία

Agency for toxic substances and disease registry (atsdr), 2018. Environmental health and medicine education, cadmium toxicity.

Appenroth, Klaus J., 2010. Definition of Heavy Metals and Their Role in Biological Systems, Soil Heavy Metals.

Ayers, R.S. and Westcot, D.W. 1985. Water Quality for Agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper 29 Rev. 1., FAO, Rome

Barbier, B.E., 2011. Wetlands as natural assets, Hydrological Sciences Journal, Volume 56, Issue 8: Ecosystem services of Wetlands.

Bassi, N., Kumar, M.D., Sharma, A., Pardha-Saradhi, P., 2014. Status of wetlands in India: A review of extent, ecosystem benefits, threats and management strategies, Journal of Hydrology: Regional Studies, Volume 2, Pages 1-19.

Bodelier, P.L.E., Dedysh, S. N., 2013. Microbiology of wetlands, Frontiers in Microbiology, US National Library of Medicine, National Institutes of Health.

Brown K., Brooks K., 2002. Bushland Weeds: A practical guide to their management, Environmental Weeds Action Network, Greenwood, WA.

Campbell, C.S, Ogden, M., 1999. Constructed Wetlands in the Sustainable Landscape.

Carter, V., 1996. Technical aspects of wetlands-Wetland Hydrology, Water Quality and Associated Functions, United States Geological Survey, Water Supply Paper 2425.

Chauhan, S., Thakur, Risikesh and Sharma, G.D., 2008. Nickel: its availability and reactions in soil, Department of Soil Science and Agricultural Chemistry, J.N. Krishi Vishwa Vidyalaya, Jabalpur 482 004, M.P., India

Christofilopoulos, S., Syranidou, E., Gkavrou, G., Manousaki, E., Kalogerakis, N., 2016. The role of halophyte *Juncus acutus* L. in the remediation of mixed contamination in a hydroponic greenhouse experiment, Society of Chemical Industry, 91: 1665-1674.

Coleman J., Hench K., Garbutt K., Skousen J.G., Sexstone A., Bissonnette, G., 2001. Treatment of Domestic Wastewater by Three Plant Species in Constructed Wetlands, Water Air and Soil Pollution 128(3):283-295

Dimitroula, H., Syranidou, E., Manousaki, E., Nikolaidis, N., Karatzas, G., and Kalogerakis, N., 2015. Mitigation measures for chromium-VI contaminated groundwater - the role of endophytic bacteria in rhizofiltration, J Hazard Mater, 281:114-20.

Dunbabin, J.S. and Bowmer, K.H. (1992) Potential Use of Constructed Wetlands for Treatment of Industrial Wastewaters Containing Metals. Science of the Total Environment, 11, 151-168. [http://dx.doi.org/10.1016/0048-9697\(92\)90353-T](http://dx.doi.org/10.1016/0048-9697(92)90353-T).

Dushenkov, V., Kumar, N., Motto, H., Raskin, I., 1995. Rhizofiltration: The Use of Plants to Remove Heavy Metals from Aqueous Streams, Environmental Science and Technology.

Environmental Protection Agency (EPA), 2015. A handbook of constructed wetlands, Volume 1.

Environmental Protection Agency (EPA), 2017. Trace Metals Analysis by ICP-MS – PBM.

Environmental Protection Agency (EPA), 2018. How do wetlands function and why are they valuable.

Forstner, U and Wittmann, G.T.W, 1983. Metal pollution in the aquatic environment. Springer-Verlag, Berlin, pp. 30-61.

Fountoulakis M.S, Sabathianakis G, Kritsotakis I, Kabourakis E.M, Manios T, 2017. Halophytes as vertical-flow constructed wetland vegetation for domestic wastewater treatment.

Galletti A., Verlicchi, P., Ranieri, E., 2010. Removal and accumulation of Cu, Ni and Zn in horizontal subsurface flow constructed wetlands: contribution of vegetation and filling medium, The science of the total environment.

Greenway, M, Woolley A, 2001. Changes in plant biomass and nutrient removal over 3 years in a constructed wetland in Cairns, Australia, Water Science and Technology, Volume 44, Issue 11-12

Harasim, P., Filipek, T., 2015. Nickel in the environment, Department of Agricultural and Environmental Chemistry, Lublin University of Life Sciences.

International Zinc Association, 2014. Zinc in the environment.

Iyaka, Yahaya Ahmed, 2011. Nickel in soils: A review of its distribution and impacts Department of Chemistry, Federal University of Technology, P. M. B. 65, Minna.

Jaishankar, M., Tseten, T., Anbalagan, N., Mathew, B.B., Beeregowda, K.N., 2014. Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals, Interdisciplinary. Toxicology.

Justin M., Alenka Š.S, Tjaša G., 2008. Removal of Cu, Cd, Zn, Ni and Fe from wastewater comparison of three different substrates used in model scaled constructed wetland

Kropschot, S.J, Doebrich, J.L, 2011. Uses of Zinc-The metal that is key to preventing corrosion, Repu United States Geological Survey Fact Sheet.

Lasat, M.M, Pence, N.S, Garvin, D.F, Ebbs, S.D, Kochian, L.V, 2000. Molecular physiology of zinc transport in the Zn hyperaccumulation in *Thlaspi caerulescens*. Journal of Experimental Botany.

Lee, M., Yang, M., 2010. Rhizofiltration using sunflower (*Helianthus annuus* L.) and bean (*Phaseolus vulgaris* L. var. *vulgaris*) to remediate uranium contaminated groundwater, Journal of Hazardous Materials, Volume 173, Issues 1-3.

Lindsay, W.L., 1972. Zinc in Soils and Plant Nutrition, *Advances in Agronomy*, Volume 24, Pages 147-186.

Liu, J., Zhang, W., Qu, P., Wang, M., 2014. Cadmium tolerance and accumulation in fifteen wetland plant species from cadmium polluted water in constructed wetlands, *Frontiers of Environmental Science and Engineering*, Volume 10, Issue 2.

MacFarlane GR, Pulkownik A, Burchett MD., 2003. Accumulation and distribution of heavy metals in the grey mangrove, *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh.: biological indication potential. *Environ Pollut*; 123:139 – 51

Manousaki, E., Kalogerakis, N., 2011. Halophytes Present New Opportunities in Phytoremediation of heavy metals and saline soils.

Mason, C.F., 1991. *Biology of freshwater pollution*. Longman Scientific and Technical, Harlow, England.

Matagi, S. V., Swai, D.2., Mugabe, R., 1998. A Review Of Heavy Metal Removal Mechanisms In Wetlands.

Metcalf & Eddy, Inc. 2006. Μηχανική υγρών αποβλήτων, Επεξεργασία και επαναχρησιμοποίηση, 4η έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, ISBN 960-418-108-4.

Mitsch, W. J., Gosselink, J. G., 1993. *Wetlands* (2nd edn.), Van Nostrand Reinhold, New York, ISBN 0 442 00805 8

National Academy of Science (NAS) (1974). Chromium: Its medical and biological effects. Washington DC. National Research Council Committee on biological effects of Atmospheric pollutants.

Perez-Villar, M.M., Dominguez E.R., Tack, F., Hernandez Ruiz, J.M, Sanchez Morales, R., Arteaga, L.E., 2012. Vertical Subsurface Wetlands for Wastewater Purification, *Procedia Engineering*, Volume 42, Pages 1960-1968.

Phytoremediation of Heavy Metals and Saline Soils, *Industrial and Engineering Chemistry Research* 50: 656–660.

Plum, L.M., Rink, L., Haase, H., 2010. The Essential Toxin: Impact of Zinc on Human Health, *International Research and Public Health*.

Qasaimeh, A., Alsharie, H., Masoud, T., 2015. A review on constructed wetlands components and heavy metal removal from wastewater.

Raskin I., Nanda-Kumar P.B.A., Dushenkov S., Salt D.E. 1994. Bioconcentration of heavy metals by plants. *Current Opinion Biotechnology*, 5: 285–290.

Rehman, F., Khattack, N., Pervez, A., Ahmad, R., 2016. Constructed Wetlands: Perspectives of the Oxygen Released in the Rhizosphere of Macrophytes, *CLEAN-Soil Air Water*, Article.

Sandoval-Herazo, L.C., Marin-Muniz, J.L, Ordunas, M.G H Y., Aleman-Chang, A.J., 2018. Role of Wetland Plants and Use of Ornamental Flowering Plants in Constructed

Wetlands for Wastewater Treatment: A Review. Preprints, 2018100178 (doi: 10.20944/preprints201810.0178.v1).

Sewwandi, B.G.N., Weragoda, S.K., Mowjood, M.I.M, Tanaka, N., Sasikala, S., 2010. Effect of submerged and Floating Plants on Dissolved Dynamics and Nitrogen Removal in Constructed Wetlands.

Sheoran, A.S. and Sheoran, V., 2006. Heavy metal removal mechanism of acid mine drainage in wetlands: A critical review.

Stephen B. Hooser, 2007. Veterinary Toxicology, Chapter 27, Edited by Ramesh C. Gupta ISBN: 978-0-12-370467-2

Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Stauffer B., Spuhler D., 2018. Vertical Flow Constructed Wetland, Compendium of Sanitation Systems and Technologies. 2nd Revised Edition

Syraniidou, E., Christofilopoulos, S., Gkavrou, G., Thijs, S., Weyens, N., Vangronsveld, J., Kalogerakis, N., 2016. Exploitation of endophytic bacteria to enhance the phytoremediation potential of the wetland helophyte *Juncus acutus*.

Szogi, A.A, Hunt, P.G, Sadler, E.J., Evans, D.E., 2004. Characterization of Oxidation-Reduction Processes in Constructed Wetlands for Swine Wastewater Treatment.

Tchounwou, P.B, Yedjou, C.G, Patlolla, A.K, Sutton, J.S., 2014. Heavy Metals Toxicity and the Environment, HHS Public Access, Author manuscript.

Temel F. A., Avci E., Ardali, Y. 2017. Full scale horizontal subsurface flow constructed wetlands to treat domestic wastewater by *Juncus acutus* and *Cortaderia selloana*, International Journal of Phytoremediation 20(5).

The International Cadmium Association, 2018. Management of the Risks Related to Chronic Occupational Exposure to Cadmium and its Compounds

Toxicology Department CRCE, 2009. Nickel Toxicological Overview, Public Health, England.

United States-Environmental Protection Agency (US EPA), 2007. Framework for Metals Risk Assessment, Office of the Science Advisor.

Weber, K.P., 2016. Microbial Community Assessment in Wetlands for Water Pollution Control: Past, Present, and Future Outlook, Environmental Sciences Group, Department of Chemistry and Chemical Engineering, Royal Military College of Canada, Kingston

Weis, J.S., Weis, P., 2003. Metal uptake, transport and release by wetland plants: implications for phytoremediation and restoration, Environmental International.

Wilderer, P.A., Kolb, F.R, 1997. Activated carbon sequencing batch biofilm reactor to treat industrial wastewater, Water Sci Technol.

Worrall, P., Peberdy, K.J., Millett, M.C., 1997. Constructed wetlands and nature conservation, *Water Science and Technology*, Volume 35, Issue 5, Pages 205-213.

Wu, H., Zhang, J., Li, C., Fan, J., Zou, Y., 2013b. Mass balance study on phosphorus removal in constructed wetland microcosms treating polluted river water. *CLEAN – Soil Air Water* 41, 844-850.

Wu, H., Zhang, J., Ngo HH., Guo W., Hu Z., Liang S., Fan J., Liu H., 2014. A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: Design and operation, US National Library of Medicine, National Institutes of Health.

Wu, H., Zhang J., Ngo, H.H., Guo, W., Hu, Z., Liang S., Fan J., Liu H., 2015. A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: Design and operation, *Biosource Technology*, Volume 175, Pages 594-601

Wu, H., Zhang, J., Wei, R., Liang, S., Li, C., Xie, H., 2013a. Nitrogen transformations and balance in constructed wetlands for slightly polluted river water treatment using different macrophytes. *Environ. Sci. Pollut. R.* 20, 443-451.

Zarate, A.G., Buitron, G., Mijaylova-Nacheva, P., Duran de Bazua, C., 2007. Behavior of redox potentials in artificial wetlands models: A tool for controlling its efficiency.

## 6.2 Ελληνική Βιβλιογραφία

Αναστασίου. Μ, 2011. Φυσικοχημικές και βιοτεχνολογικές μέθοδοι επεξεργασίας για τον καθαρισμό νερού και υγρών αποβλήτων από βαρέα μέταλλα, Πτυχιακή εργασία, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Καβάλας, Σχολή Τεχνολογιών Εφαρμογών, Τμήμα Τεχνολογίας Πετρελαίου και Φυσικού Αερίου.

Βασιλειάδου Ν., Ζαμπετάκης Γ., 2010. Νερό δηλητήριο σε όλη την Ελλάδα, *Γεωπονικό και Πανεπιστήμιο Αθηνών*.

Βασιλικιώτης Γ., 1986. Μέθοδοι ελέγχου ρυπάνσεως περιβάλλοντος»

Γαλανάκη Κ., 2011. Φυτοεξυγίανση εδάφους από Cd και Pb με τα αλόφυτα: *Halimione portulacoides* (L.) Aellen, *Tamarix parviflora* (DC) και *Limnium monoptalum* (L.) Boiss, Μεταπτυχιακή διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

Γκαύρου Γ., 2016. Ικανότητα απομάκρυνσης Cd, Ni και Zn τεχνητών υδροβιότοπων με δύο είδη αλοφύτων για επεξεργασία ρυπασμένου νερού, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Χανιά.

Γουδέλη, Ι., 2017. Τριτογενής επεξεργασία υγρών αποβλήτων με χρήση του υδροχαρούς φυτού *Lemna minor*, Πτυχιακή Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Χημικών Μηχανικών.

Δασενάκης Ε., 2015. Χημική θαλάσσια ρύπανση, Κεφάλαιο 8 ([https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/4690/1/Chapter\\_08\\_Dasenakis.pdf](https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/4690/1/Chapter_08_Dasenakis.pdf))

- Δεινάκη Ε., 2010. Φυτοεξυγίανση ρυπασμένων εδαφών από βαρέα μέταλλα, Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Κρήτης, Ηράκλειο.
- Δεληγιάννης Α., 2009. Βιολογική επεξεργασία, University Studio Press, Θεσσαλονίκη
- Εργαστηριακές Σημειώσεις του Μαθήματος Ελέγχου Ρύπανσης Νερών, 2018. Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος.
- Ζαμπετάκης Α.Λ, Μανιός Β.Θ., Καρατζάς Γ., 2005. Καινοτομικές μέθοδοι εξυγίανσης ρυπασμένων εδαφών και υπόγειων υδάτων, η τεχνολογία της φυτοεξυγίανσης.
- Κάτσου, Ε., 2011. Επεξεργασία υγρών αποβλήτων με τη χρήση μεμβρανών, Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Χημικών Μηχανικών.
- Κουϊμτζής Θ., Φυτιάνος, Κ., Σαμαρά-Κωνσταντινίδου, Κ., 1998. Χημεία Περιβάλλοντος. 1η έκδοση, University Studio Press, Θεσσαλονίκη.
- Λέκκα, Α.-Θ., 2013. Επεξεργασία υγρών αποβλήτων - Περιγραφή και λειτουργία μονάδας επεξεργασίας λυμάτων Ιωαννίνων, Πτυχιακή Εργασία, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Μηχανολογίας.
- Μανιός, Θ., 2009. Τεχνητοί Υγροβιότοποι, Εργαστήριο Διαχείρισης Στερεών Υπολειμμάτων και Υγρών Αποβλήτων, Επίκουρος Καθηγητής, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης.
- Μανουσάκη Ε., 2008. Χαρακτηρισμός της ικανότητας μεσογειακών φυτών για απομάκρυνση Pb και Cd από ρυπασμένα εδάφη, Διδακτορική Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Μαρκαντωνάτος Γ., 1990. Επεξεργασία και διάθεση υγρών αποβλήτων. Αστικά λύματα, βιομηχανικά απόβλητα, ζωϊκά απορρίμματα, Β' έκδοση, Αθήνα
- Μήτρακας Μ., 2001. Ποιοτικά χαρακτηριστικά και επεξεργασία νερού, Εκδόσεις Τζιόλα, ISBN 960-8050-46-4.
- Μπαρώτα Τ., 2015. Απομάκρυνση τοξικών μετάλλων από ρυπασμένα εδάφη χρήσει εδαφικής πλύσης με τρυγικό οξύ, Πτυχιακή εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Μωραΐτη, Ε., 2011. Παραγωγή μικροβιακού λίπους από αμυλούχα απόβλητα βιομηχανίας τροφίμων, Πτυχιακή εργασία, Ανώτατο Τεχνολογικό Ίδρυμα Καλαμάτας, Τμήμα Τεχνολογίας Γεωργικών Τροφίμων
- Ναυτίλους της HELMEPA, 2018. Λύματα και υγρά απόβλητα. (<http://www.helmepacadets.gr/gr/sea-human/threats/pollution/wastewater>)
- Νταρακάς, Ε., 2010. Διεργασίες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Υδραυλικής και Τεχνικής Περιβάλλοντος.
- Περράκη, Α., 2009. Το σελήνιο-εφαρμογή της τεχνολογίας της φυτοεξυγίανσης, Μεταπτυχιακή διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Χανιά.

Σοφιανός, Σ., 2016. Επεξεργασία λυμάτων υψηλής αλατότητας με υγροβιότοπους, Μεταπτυχιακή διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Χανιά.

Στεφανόπουλος Κ., 2006. Επεξεργασία πυκνών λυμάτων μέσω τεχνητού υγροβιότοπου σε ξηρά κλίματα, Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

Σωτηρόπουλος, Σ., 2011. Διερεύνηση της συμπεριφοράς μακροθρεπτικών και βαρέων μετάλλων στο σπανάκι με την επαναχρησιμοποίηση της ιλύος του Βιολογικού Καθαρισμού της Καλαμάτας, Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία ειδίκευσης, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Γεωλογίας.

Σωτηροπούλου, Α., 2010. Συστήματα τεχνητών υγροβιότοπων για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων, Πτυχιακή εργασία, Α.Τ.Ε.Ι. Δυτ. Μακεδονίας, Κοζάνη.

Τρουλινός, Κ., Σωμαράκη, Β., 2009. Φυτοεξυγίανση εδαφών μολυσμένων με διασταλάζοντα υγρά χλωματερών με την χρήση ενδημικών κρητικών φυτών, Πτυχιακή Εργασία, ΑΤΕΙ Κρήτης, Σχολή Τεχνολογίας Γεωπονίας, Τμήμα Θερμοκηπιακών Καλλιεργειών και Ανθοκομίας, Ηράκλειο.

Τσώνης, Σ. Π., 2004. Επεξεργασία Λυμάτων, Αναπληρωτής Καθηγητής, Πανεπιστήμιο Πατρών.

Φραγκούλης Π, 2015. Καθαρισμός υγρών αποβλήτων που περιέχουν βαρέα μέταλλα με χρήση ενεργών υλικών, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

Χρήστος, Α., 2009. Φυτοεξυγίανση-φυτοθεραπεία με την βοήθεια του φυτού *Jerusalem artichoke* από βαρέα μέταλλα που βρίσκονται σε μολυσμένο έδαφος, ΤΕΙ Καβάλας, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Τεχνολογίας Πετρελαίου και Φυσικού Αερίου, Καβάλα.