



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
Σχολή Χημικών Μηχανικών και  
Μηχανικών Περιβάλλοντος

**«Μελέτη διαφορετικών φορτίσεων Τεχνητών Υγροβιότοπων Αφυδάτωσης Ιλύος  
τοποθετημένων σε εξωτερικό χώρο και σε θερμοκήπιο»**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΚΕΤΣΙΤΖΗ ΘΕΟΔΩΡΑ**

**Χανιά, 2025**



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
Σχολή Χημικών Μηχανικών και  
Μηχανικών Περιβάλλοντος

**«Μελέτη διαφορετικών φορτίσεων Τεχνητών Υγροβιότοπων Αφυδάτωσης Ιλύος  
τοποθετημένων σε εξωτερικό χώρο και σε θερμοκήπιο»**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΚΕΤΣΙΤΖΗ ΘΕΟΔΩΡΑ**

Εξεταστική επιτροπή:

Αλέξανδρος Στεφανάκης (Επιβλέπων Καθηγητής)

Καθηγήτρια Δανάη Βενιέρη

Αναπληρωτής Καθηγητής Γιαννής Απόστολος

## **Χανιά, 2025**

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

## **Ευχαριστίες**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου που με στήριξαν ψυχολογικά και οικονομικά όλα αυτά τα χρόνια, αλλά και τους φίλους που απέκτησα στην πορεία των σπουδών μου και βρίσκονται ακόμη δίπλα μου.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της παρούσας διπλωματικής κύριο Αλέξανδρο Στεφανάκη για την ανάθεση αυτού του ενδιαφέροντος θέματος. Γνώρισα μια νέα τεχνολογία με μελλοντικές προοπτικές αλλά και την έννοια της κυκλικής οικονομίας και την σημασία της στο χώρο της περιβαλλοντικής επιστήμης. Ακόμη τον ευχαριστώ για την συνεργασία μας και την εμπιστοσύνη του για την εκπόνηση του πειράματος αυτού.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την κυρία Ελισάβετ Κουκουράκη για την σημαντική βοήθεια της στο εργαστηριακό κομμάτι της εργασίας αλλά και για την υπομονή της και τις συμβουλές της όταν εμφανιζόντουσαν δυσκολίες. Φυσικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Ιωάννη Ασημακούλα που με βοήθησε σε όλη αυτήν την διαδρομή και στο πρακτικό κομμάτι του πειράματος αλλά και στην συγγραφή της παρούσας εργασίας. Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον μεταδιδακτορικό Παναγιώτη Ρεγκούζα που πρόσφερε την βοήθεια του σε όλη την ομάδα για την ολοκλήρωση της πειραματικής διάταξης.

Τέλος, δεν θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω τις φίλες και συναδέλφισσες μου Βιργινία Φούσκα και Ελένη Δαρδαμάνη για την συνεργασία μας ως ομάδα για το πέρας της εργασίας αλλά και το ευχάριστο κλίμα. Οι όμορφες αυτές στιγμές στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος θα μου μείνουν αξέχαστες.

## Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	4
Περίληψη.....	7
Abstract .....	8
Ευρετήριο Εικόνων.....	9
Ευρετήριο Πινάκων .....	9
Ευρετήριο Διαγραμμάτων.....	10
1. Εισαγωγή.....	11
2. Θεωρητικό υπόβαθρο.....	12
2.1 Λυματολάσπη.....	12
2.1.1 Εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων (ΕΕΛ) και παραγωγή λυματολάσπης	12
2.1.2 Επεξεργασία και διάθεση της λυματολάσπης στην ΕΕΛ.....	12
2.1.3 Μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα συμβατικών μεθόδων επεξεργασίας ...	14
2.1.4 Νομοθετικό πλαίσιο .....	15
2.2 Φυσικά συστήματα επεξεργασίας.....	16
2.2.1 Φυσικοί υδροβιότοποι .....	17
2.2.2 Ιστορική ανάδρομη τεχνητών υδροβιότοπων.....	18
2.3 Τεχνητοί υδροβιότοποι.....	19
2.3.1 Τεχνητοί υδροβιότοποι αφυδάτωσης ιλύος (ΤΥΑΙ).....	22
2.3.2 Λειτουργία τεχνητών υδροβιότοπων αφυδάτωσης ιλύος.....	23
2.3.3 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Τεχνητών Υδροβιότοπων .....	27
2.4 Αναφορά σε συστήματα τεχνητών υδροβιότοπων αφυδάτωσης ιλύος.....	28
1.5 Στόχος διπλωματικής εργασίας.....	29
2. Πειραματική διάταξη .....	30
2.1 Χωροθέτηση πειραματικής διάταξης και κλιματολογικά στοιχεία .....	30
2.2 Περιγραφή πειραματικής διάταξης .....	30
2.3 Πειραματική διαδικασία .....	33
2.4 Αναλυτικές μέθοδοι .....	37
2.4.1 Μέθοδοι δειγμάτων ιλύος .....	37
2.4.2 Μέθοδοι δειγμάτων υπολειμματικής ιλύος .....	41
2.4.3 Μέθοδοι δειγμάτων διασταλαγμάτων .....	44
3. Αποτελέσματα και συζήτηση .....	46
3.1 Υδάτινο ισοζύγιο .....	46
3.2 Φυσικοχημικές αναλύσεις .....	48

3.2.1	Χαρακτηρισμός λυματολάσπης.....	48
3.2.2	Αναλύσεις υπολειμματικής ιλύος .....	50
3.2.2.1	Απόδοση αφυδάτωσης .....	50
3.2.2.2	VS.....	53
3.2.2.3	Νιτρικό άζωτο.....	53
3.2.2.4	Αμμωνιακό άζωτο.....	54
3.2.2.5	Ολικός φώσφορος.....	55
3.2.2.6	Ηλεκτρική αγωγιμότητα .....	56
3.2.2.7	pH .....	56
3.2.2.8	Μέταλλα υπολειμματικής ιλύος .....	57
3.2.3	Αναλύσεις διασταλαγμάτων .....	58
3.2.3.1	Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD) .....	58
3.2.3.2	Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD <sub>5</sub> ).....	59
3.2.3.3	Νιτρικό άζωτο.....	60
3.2.3.4	Αμμωνιακό άζωτο.....	60
3.2.3.5	Ολικός φωσφόρος.....	61
3.2.3.6	Φωσφορικά .....	62
3.2.3.7	TSS .....	62
3.2.3.8	pH .....	63
3.2.3.9	Ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC).....	64
3.2.4	Ανάπτυξη των καλαμιών .....	65
4.	Συμπεράσματα και προτάσεις .....	66
4.1	Συμπεράσματα .....	66
4.2	Προτάσεις.....	67
	Βιβλιογραφία .....	68
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α .....	73

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην κατασκευή και μελέτη τεσσάρων πιλοτικών μονάδων τεχνητών υδροβιότοπων κατακόρυφης ροής, με σκοπό την αφυδάτωση λυματολάσσης σε δύο διαφορετικά περιβάλλοντα: σε εξωτερικό χώρο και σε θερμοκήπιο. Δύο πιλοτικές μονάδες εγκαταστάθηκαν στον υπαίθριο χώρο της Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) των Χανίων, ενώ δύο τοποθετήθηκαν εντός θερμοκηπίου. Σε όλες τις μονάδες τοποθετήθηκαν κροκάλες (G1) διαμέτρου 20-40 mm, μέσο χαλίκι (G2) διαμέτρου 8-20 mm και λεπτό χαλίκι (G3) διαμέτρου 2-8 mm, ενώ φυτεύτηκαν με το είδος καλαμιού *Phragmites australis*. Η λυματολάσση που χρησιμοποιήθηκε προήλθε από τη δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης της εγκατάστασης.

Μετά τη φύτευση των καλαμιών, εφαρμόστηκε πρωτοβάθμιο λύμα (5L/d) για να διευκολυνθεί η προσαρμογή και η ανάπτυξη των φυτών. Ακολούθως, ξεκίνησε η εφαρμογή λυματολάσσης από τη δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης σε δύο διαφορετικές φορτίσεις, 60kg TS/m<sup>2</sup>/έτος και 80kg TS/m<sup>2</sup>/έτος, με σκοπό τη μελέτη της βέλτιστης λειτουργίας του συστήματος. Επιπλέον, εφαρμόστηκαν διαφορετικοί κύκλοι φορτίσεων, ξεκινώντας με έναν κύκλο 1:1 (μία ημέρα φόρτισης και μία ημέρα ανάπαυσης), και καταλήγοντας στον κύκλο 7:7 (επτά ημέρες φόρτισης και επτά ημέρες ανάπαυσης). Η ποσότητα της λυματολάσσης που χρησιμοποιήθηκε σε κάθε κύκλο φόρτισης καθοριζόταν από τη συγκέντρωση ολικών στερεών (TS), η οποία μετρούταν μία ημέρα πριν την εφαρμογή. Αυτή η συνθήκη επέτρεψε την προσαρμογή της ποσότητας λυματολάσσης ανάλογα με τις τρέχουσες συνθήκες, επιδιώκοντας την επίτευξη της βέλτιστης απόδοσης του συστήματος.

Οι αναλύσεις των δειγμάτων λυματολάσσης αφορούν τις των παραμέτρους: TS, VS, MLSS, Σχετική πυκνότητα, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, Ολικό Άζωτο (TN), PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P, Ολικός Φώσφορος (TP), Ολικά μέταλλα (TM), pH και Αγωγιμότητα. Ενώ οι αναλύσεις για την υπολειμματική ιλύ, δηλαδή της λάσσης που συσσωρεύεται στις μονάδες αφορούν τις παραμέτρους: TS, VS, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, Ολικός Φώσφορος (TP), Ολικά μέταλλα (TM), pH και Αγωγιμότητα. Τέλος, οι αναλύσεις των δειγμάτων διασταλάγματος περιλαμβάνουν τις παραμέτρους: TSS, COD, BOD<sub>5</sub>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P, Ολικός Φώσφορος (TP), pH και Αγωγιμότητα.

Όσον αφορά τα αποτελέσματα, στην υπολειμματική ιλύ τα TS είχαν τιμές 46,4%, 11,4%, 13,2% και 9,2% για P60, PG60, P80 και PG80 αντίστοιχα, και τα VS παρουσίασαν μικρές διακυμάνσεις. Η μείωση του όγκου ιλύος στις κλίνες ήταν 97,5 %, 93,8%, 95% και 91,6% για τις P60, PG60, P80 και PG80 αντίστοιχα. Αυξημένες εμφανίστηκαν οι συγκεντρώσεις στα NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N και στον TP αλλά και στα NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N για τις κλίνες θερμοκηπίου, ενώ παρατηρείται αύξηση στις τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και το pH γίνεται ελαφρώς πιο όξινο σε όλες τις μονάδες. Τα μέταλλα στην ξηρή ιλύ εμφάνισαν αύξηση στις συγκεντρώσεις του Σιδήρου (Fe), του Πυριτίου (Si), του Καλίου (K) και του Ασβεστίου (Ca), ωστόσο δεν υπερβαίνουν τα όρια της νομοθεσίας για την διάθεση στην γεωργία. Όσον αφορά τα διασταλάγματα, οι τιμές του COD παραμένουν στο εύρος των 180 mg/L και για το BOD<sub>5</sub> κυμαίνονται στα 200 mg/L. Για την NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N παρατηρήθηκε αύξηση στις τιμές των συγκεντρώσεων σε όλες τις κλίνες, αλλά και αύξηση στις τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και το pH γίνεται ελαφρώς πιο αλκαλικό.

## Abstract

This thesis focuses on the construction and design of four pilot plants of vertical flow artificial wetlands for the dewatering of sewage sludge in two different environments: outdoors and in a greenhouse. Two pilot units were installed in the outdoor area of the Wastewater Treatment Plant (WWTP) of Chania, while two were placed inside a greenhouse. In all units, clinker (G1) with a diameter of 20-40 mm, medium gravel (G2) with a diameter of 8-20 mm and fine gravel (G3) with a diameter of 2-8 mm were placed and planted with the reed species *Phragmites australis*. The sewage sludge used came from the secondary sedimentation tank of the plant.

Translated with DeepL.com (free version) After planting the reeds, primary sewage sludge (5 L/d) was applied to facilitate plant adaptation and growth. Subsequently, the application of sewage sludge from the secondary settling tank was started at two different loadings, 60kg DM/m<sup>2</sup>/year and 80kg DM/m<sup>2</sup>/year, in order to study the optimal operation of the system. In addition, different watering cycles were applied, starting with a 1:1 cycle (one day of loading and one day of rest), and ending with a 7:7 cycle (seven days of loading and seven days of rest). The amount of sewage sludge used in each loading cycle was determined by the total solids (TS) concentration measured one day before application. This condition allowed the amount of sewage sludge to be adjusted according to current conditions, seeking to achieve optimal system performance.

The analyses of the sewage sludge samples include TS, VS, MLSS, Relative Density, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, Total Nitrogen (TN), PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P, Total Phosphorus (TP), Total Metals (TM), pH and electrical conductivity. While the analyses of the effluent samples, i.e. the dilutions, include the parameters TSS, COD, BOD<sub>5</sub>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P Total Phosphorus (TP), pH and electrical conductivity. Finally, the analyses for dry sludge, i.e. the sludge accumulated in the plants, include the parameters: TS, VS, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, Total Phosphorus (TP), Total Metals (TM), pH and electrical conductivity.

Regarding the results, in the residual sludge TS values were 46.4%, 11.4% 13.2% and 9.2% for P60, PG60, P80 and PG80 respectively, and VS showed slight variations. The sludge volume reduction in the beds was 97.5%, 93.8%, 95% and 91.6% for P60, PG60, P80 and PG80 respectively. Increased concentrations of NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N and TP as well as NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N appeared for the greenhouse beds, while an increase in electrical conductivity values was observed and pH became slightly more acidic in all units. The metals in the dry sludge showed an increase in the concentrations of Iron (Fe), Silicon (Si), Potassium (K) and Calcium (Ca), but do not exceed the limits of the legislation for disposal in agriculture. As for the dilutions, COD values remain in the range of 180 mg/L and for BOD<sub>5</sub> they are in the range of 200 mg/L. For NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, an increase in concentration values was observed in all beds, but also an increase in electrical conductivity values and the pH becomes slightly more alkaline.



## Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1-Φιλτράτρεσσα.....	14
Εικόνα 2-Φυγοκεντρικός διαχωριστής.....	14
Εικόνα 3-Φυσικός υδροβιότοπος.....	17
Εικόνα 4-Τεχνητός υδροβιότοπος στην κομητεία Κλείτον, Γεωργία, Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής.....	20
Εικόνα 5-Ταξινόμηση των τεχνητών υδροβιότοπων (Stefanakis et al., 2014).....	21
Εικόνα 6-Τεχνητός υδροβιότοπος κατακόρυφης υπόγειας ροής (Stefanakis et al., 2014). ...	22
Εικόνα 7-Σχηματική διατομή ενός συστήματος επεξεργασίας ιλύος με καλαμιώνες (Nielsen et al., 2020).....	23
Εικόνα 8- <i>Phragmites australis</i> (lizzieharper.co.uk).....	26
Εικόνα 9-Διάταξη του πειράματος.....	31
Εικόνα 10-Κλίνες υπό συνθήκες θερμοκηπίου.....	32
Εικόνα 11-Δοχείο συλλογής διασταλαγμάτων.....	32
Εικόνα 12-Το στραγγιστικό δίκτυο παθητικού αερισμού της κλίνης.....	34
Εικόνα 13-Το πληρωτικό υλικό πριν την τοποθέτηση.....	34
Εικόνα 14-Τα καλάμια πριν την φύτευση στις κλίνες.....	35
Εικόνα 15-Τα καλάμια στην πρώτη μέρα εφαρμογής της φόρτισης.....	36
Εικόνα 19-Δείγματα με το χαρακτηριστικό χρώμα της πρότυπης μεθόδου μέτρησης των φωσφορικών.....	39
Εικόνα 17-Δείγμα υπολειμματικής ιλύος στον ζυγό.....	42
Εικόνα 18-Δείγματα ξηρής λάσπης στην εστία χώνευσης.....	43
Εικόνα 19-Φιάλες με πιεζομετρικό αισθητήρα για την μέτρηση του BOD <sub>5</sub> .....	45

## Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1-Μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα συμβατικών συστημάτων επεξεργασίας λυματολάσπης (Στεφανάκης, 2011).....	14
Πίνακας 2-Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των τεχνητών υδροβιότοπων αφυδάτωσης ιλύος (EPA-A Handbook of Constructed Wetlands, 2015). ....	27
Πίνακας 3-Μετεωρολογικά στοιχεία πεδίου.....	30
Πίνακας 4-Ονομασία κλίνης και συντομογραφίας τους.....	33
Πίνακας 5-Μέσες τιμές των παραμέτρων της λυματολάσπης.....	48
Πίνακας 6-Τυπικές χαρακτηριστικά λυματολάσπης (Bennamoun et al., 2013).....	48
Πίνακας 7-Μέσες τιμές των μετάλλων στη λυματολάσπη.....	49
Πίνακας 8-Τυπικές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων στην ιλύ οικιακών λυμάτων (Stefanakis et al., 2014).....	49
Πίνακας 9-Τιμές βαρέων μετάλλων λυματολάσπης (Bennamoun et al., 2013).....	50
Πίνακας 10-Αφυδάτωση υπολειμματικής ιλύος.....	53
Πίνακας 11-Συγκεντρώσεις μετάλλων στην υπολειμματική ιλύ σε σύγκριση με την εισροή.....	57
Πίνακας 12-Οριακές τιμές συγκέντρωσης βαρέων μετάλλων στη γεωργία.....	58
Πίνακας 13-Αποτελέσματα μετρήσεων pH των εκροών.....	63
Πίνακας 14-Αποτελέσματα μετρήσεων EC των διασταλαγμάτων.....	64

## Ευρετήριο Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1-Διάγραμμα εξατμισοδιαπνοής για τις κλίνες της διάταξης και μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας. ....	47
Διάγραμμα 2-Διάγραμμα για την δημιουργίας ξηρής ιλύος. ....	51
Διάγραμμα 3-Ποσοστά ολικών στερεών στην υπολειμματική ιλύ. ....	52
Διάγραμμα 4-Ποσοστό πτητικών στερεών στην υπολειμματική ιλύ. ....	53
Διάγραμμα 5-Συγκεντρώσεις νιτρικών στην υπολειμματική ιλύ.....	54
Διάγραμμα 6-Συγκεντρώσεις αμμωνιακών στην υπολειμματική ιλύ.....	55
Διάγραμμα 7-Συγκεντρώσεις ολικού φωσφόρου στην υπολειμματική ιλύ. ....	55
Διάγραμμα 8-Ηλεκτρική αγωγιμότητα στην υπολειμματική ιλύ.....	56
Διάγραμμα 9-pH στην υπολειμματική ιλύ. ....	56
Διάγραμμα 10-Συγκεντρώσεις COD διασταλαγμάτων. ....	59
Διάγραμμα 11-Συγκεντρώσεις BOD <sub>5</sub> διασταλαγμάτων. ....	60
Διάγραμμα 12-Συγκεντρώσεις νιτρικού αζώτου διασταλαγμάτων. ....	60
Διάγραμμα 13-Συγκεντρώσεις αμμωνιακών διασταλαγμάτων.....	61
Διάγραμμα 14-Συγκεντρώσεις ολικού φωσφόρου διασταλαγμάτων. ....	62
Διάγραμμα 15-Συγκεντρώσεις φωσφορικών διασταλαγμάτων. ....	62
Διάγραμμα 16-Συγκεντρώσεις TSS διασταλαγμάτων. ....	63
Διάγραμμα 17-Συγκεντρώσεις pH διασταλαγμάτων. ....	64
Διάγραμμα 18-Συγκεντρώσεις ηλεκτρικής αγωγιμότητας διασταλαγμάτων.....	65
Διάγραμμα 19-Διάγραμμα για την ανάπτυξη των καλαμιών. ....	66

## 1. Εισαγωγή

Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν σηματοδοτηθεί από μια ραγδαίες προόδους στους τομείς της επιστήμης και της τεχνολογίας, συμβάλλοντας καθοριστικά στη βελτίωση του βιοτικού επιπέδου. Η Βιομηχανική Επανάσταση υπήρξε καταλυτικός παράγοντας αυτής της ανάπτυξης, ωστόσο, η αδιάκοπη εκμετάλλευση των φυσικών πόρων και η ανεξέλεγκτη τεχνολογική επέκταση οδήγησαν σε σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Μεταξύ αυτών συγκαταλέγονται η ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου, η ρύπανση των υδάτινων και εδαφικών πόρων, η εξάντληση των φυσικών αποθεμάτων και η επιταχυνόμενη κλιματική αλλαγή.

Αντιλαμβανόμενη τις επιπτώσεις αυτών των φαινομένων, η επιστημονική κοινότητα έχει στραφεί στη διερεύνηση τεχνολογιών μετριασμού και αντιστροφής των περιβαλλοντικών καταστροφών, καθώς και στην ανάπτυξη προληπτικών στρατηγικών. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη σχεδίαση καινοτόμων, περιβαλλοντικά φιλικών τεχνολογιών, οι οποίες στοχεύουν στην αντικατάσταση ή τη βελτίωση των συμβατικών μεθόδων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων.

Η διαχείριση των αστικών λυμάτων αποτελεί κρίσιμο ζήτημα για τη διατήρηση της δημόσιας υγείας και την προστασία των φυσικών οικοσυστημάτων. Η πλέον διαδεδομένη συμβατική μέθοδος επεξεργασίας λυμάτων είναι οι Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ), στις οποίες εφαρμόζονται συνδυασμένες φυσικοχημικές και βιολογικές διεργασίες για την απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών, οργανικών ρύπων και θρεπτικών στοιχείων, διασφαλίζοντας ότι η τελική εκροή πληροί τις νομοθετικές απαιτήσεις.

Πιο συγκεκριμένα το ενδιαφέρον της παρούσας διπλωματικής είναι η λυματολάσπη και η αφυδάτωση της που στις ΕΕΛ αυτή η διαδικασία με τις συμβατικές μεθόδους απαιτεί υψηλή κατανάλωση ενέργειας και οικονομικούς πόρους, γεγονός που καθιστά αναγκαία την ανάπτυξη βιώσιμων εναλλακτικών λύσεων. Σε αυτό το πλαίσιο, τα συστήματα φυσικής επεξεργασίας, γνωστά ως τεχνητοί υδροβιότοποι (ΤΥ), αποτελούν μια καινοτόμο και οικολογικά βιώσιμη επιλογή. Οι τεχνητοί υδροβιότοποι αξιοποιούν φυσικές διεργασίες, όπως η δράση φυτών, μικροοργανισμών και υποστρωμάτων, για την απομάκρυνση ρύπων, χωρίς να απαιτούν εξωτερική ενεργειακή τροφοδοσία.

Η συνδυαστική δράση φυσικών, χημικών και βιοχημικών μηχανισμών στους ΤΥ καθιστά αυτήν την τεχνολογία ιδιαίτερα αποδοτική για την επεξεργασία λυματολάσπης, ενώ παράλληλα μειώνει τις περιβαλλοντικές και οικονομικές επιπτώσεις. Οι τεχνητοί υδροβιότοποι αφυδάτωσης ιλύος (ΤΥΑΙ) βασίζονται στη βαρύτητα, την ηλιακή ακτινοβολία και την εξατμισοδιαπνοή ως πηγή ενέργειας για την αφυδάτωση ενώ η αλληλεπίδραση μεταξύ οξυγόνου, βακτηρίων και ριζών των φυτών προκαλεί την ανοργανοποίηση της οργανικής ύλης. Το τελικό προϊόν είναι εδαφοβελτιωτικό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ασφάλεια στη γεωργία. Συνεπώς, έχουν προσελκύσει αυξανόμενο επιστημονικό και επιχειρηματικό ενδιαφέρον, αποτελώντας μια πολλά υποσχόμενη προσέγγιση για τη βιώσιμη διαχείριση ιλύος σε παγκόσμια κλίμακα.

## **2. Θεωρητικό υπόβαθρο**

### **2.1 Λυματολάσπη**

Η λυματολάσπη δημιουργείται από τα αστικά λύματα που οδηγούνται στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων και διέρχονται από φυσικές, βιολογικές και φυσικοχημικές διεργασίες. Σκοπός των διεργασιών αυτών είναι η μείωση του οργανικού φορτίου αλλά και των παθογόνων μικροοργανισμών και των θρεπτικών συστατικών. Η διαχείριση της λυματολάσπης είναι μια εξαιρετικά πολύπλοκη και δαπανηρή δραστηριότητα, η οποία, αν δεν επιτευχθεί σωστά, μπορεί να θέσει σε κίνδυνο το περιβάλλον.

#### **2.1.1 Εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων (ΕΕΛ) και παραγωγή λυματολάσπης**

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω εντός μιας εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων πραγματοποιούνται φυσικές, βιολογικές και φυσικοχημικές διεργασίες που εφαρμόζονται στα αστικά λύματα και βιομηχανικά απόβλητα που εισέρχονται στην εγκατάσταση της περιοχής μέσω του δικτύου αποχέτευσης. Οι διεργασίες αυτές χωρίζονται στην προεπεξεργασία, στην πρωτοβάθμια, την δευτεροβάθμια και την τριτοβάθμια επεξεργασία.

Η παράγωγη της λυματολάσπης-ιλύος πραγματοποιείται στις ΕΕΛ από την πρωτοβάθμια και την δευτεροβάθμια καθίζηση, η οποία ύστερα συλλέγεται και μεταφέρεται για περαιτέρω επεξεργασία. Η πρωτοβάθμια ιλύς έχει συγκέντρωση των ολικών στερεών που κυμαίνεται από 2 έως 7%, και αποτελείται από καθιζάνοντα και αιωρούμενα στερεά, ανόργανα και οργανικά. Η δευτεροβάθμια ιλύς αποτελείται κυρίως από βιολογικά στερεά, κυρίως βακτηριακά κύτταρα και περιέχει ελάχιστα οργανικά στερεά, περίπου 0,5-1,5%. Επίσης πιθανότατα περιέχει και στερεά που κατά την πρωτοβάθμια επεξεργασία δεν απομακρύνθηκαν καθώς και υπολείμματα μικροοργανισμών.

Παρόλο που η ιλύς αντιπροσωπεύει μόνο το 1% έως 2% του όγκου των επεξεργασμένων λυμάτων, η διαχείρισή της είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη και το κόστος της κυμαίνεται συνήθως από 20% έως 60% του συνολικού λειτουργικού κόστους της μονάδας επεξεργασίας λυμάτων (M. von Sperling και C.V. Andreoli, 2007).

#### **2.1.2 Επεξεργασία και διάθεση της λυματολάσπης στην ΕΕΛ**

Η επεξεργασία της ιλύος έχει ως κύριο στόχο τη μείωση του όγκου της, μέσω της απομάκρυνσης του νερού που περιέχει. Παράλληλα, επιδιώκεται ο περιορισμός της ζύμωσης των αποδομήσιμων συστατικών της, συμβάλλοντας έτσι στη μείωση των δυσάρεστων οσμών (σταθεροποίηση). Επιπλέον, στοχεύει στη μείωση ή και στην πλήρη εξάλειψη των παθογόνων μικροοργανισμών που υπάρχουν στην ιλύ.

Το αρχικό στάδιο επεξεργασίας της ιλύος έχει ως στόχο τη βελτίωση των φυσικοχημικών της ιδιοτήτων, ώστε να αυξηθεί η αποτελεσματικότητα των επόμενων διαδικασιών. Μέσω αυτού, μεταβάλλεται το μέγεθος και η κατανομή των σωματιδίων, καθώς και το επιφανειακό τους φορτίο, διευκολύνοντας την ένωση των μικρότερων σωματιδίων σε μεγαλύτερα και επιτρέποντας τον ευκολότερο διαχωρισμό τους. Το αρχικό στάδιο διακρίνεται σε χημική με προσθήκη ανόργανων ή οργανικών ουσιών και οργανικά πολυμερή αλλά και τη θερμική που περιλαμβάνει τη θέρμανση της ιλύος σε θερμοκρασίες 150 – 200 °C προκαλώντας μετασχηματισμό της δομής της ιλύος.

Στην συνέχεια ακολουθεί η πάχυνση που αποτελεί το πρώτο στάδιο αφαίρεσης του περιεχόμενου νερού στην επεξεργασία της ιλύος, συμβάλλοντας στη μείωση του όγκου και της δυναμικότητας των επόμενων εγκαταστάσεων επεξεργασίας. Η πιο διαδεδομένη τεχνική είναι η πάχυνση με βαρύτητα, η οποία πραγματοποιείται σε δεξαμενές παρόμοιες με εκείνες της καθίζησης, αλλά με την προσθήκη μηχανικών περιστρεφόμενων αναμοχλευτήρων. Οι αναμοχλευτήρες αυτοί διευκολύνουν την άνοδο του πλεονάζοντος νερού προς την επιφάνεια, από όπου απομακρύνεται μέσω υπερχειλίσσης, ενώ η παχυμένη ιλύς συλλέγεται από τον πυθμένα της δεξαμενής. Η διαδικασία αυτή αυξάνει τη συγκέντρωση των στερεών στο 5-8% για τις πρωτοβάθμιες ιλύες, ενώ για τις δευτεροβάθμιες το ποσοστό φτάνει το 2% (Ασημάκη, 2022).

Η αφυδάτωση ακολουθεί το στάδιο της πάχυνσης και αποσκοπεί στην περαιτέρω μείωση του περιεχόμενου νερού, αποδίδοντας ιλύ με περιεκτικότητα σε στερεά έως και 30%. Παρακάτω παρουσιάζονται οι διαθέσιμες μηχανικές μεθόδους:

### **Φυγοκέντριση**

Η φυγοκέντριση ως τεχνική αφυδάτωσης της ιλύος αξιοποιεί τη διαφορά πυκνότητας μεταξύ των φάσεων και, μέσω της φυγόκεντρης δύναμης που προκύπτει από την ταχύτατη περιστροφή της ιλύος, επιτυγχάνει τον διαχωρισμό των στερεών από το υγρό στοιχείο. Πρόκειται για μια συνεχή διαδικασία, όπου η ιλύς τροφοδοτείται σε έναν περιστρεφόμενο κυλινδρικό θάλαμο, εντός του οποίου ένας κοχλίας περιστρέφεται, απομακρύνοντας την κατακρατημένη ιλύ από τα τοιχώματα. Η διαδικασία απαιτεί τη χρήση πολυηλεκτρολύτη για τη συσσωμάτωση των λεπτών αιωρούμενων στερεών και τη διευκόλυνση του διαχωρισμού τους. Παρόλο που είναι ιδιαίτερα αποδοτική, συνοδεύεται από υψηλό λειτουργικό κόστος (Ασημάκη, 2022).

### **Ταινιοφιλτρόπρεσες**

Στις ταινιοφιλτρόπρεσες, η απομάκρυνση του νερού πραγματοποιείται μέσω ατέρμωνων ταινιών. Αρχικά, το νερό αποστραγγίζεται με τη βοήθεια της βαρύτητας, ενώ στη συνέχεια εφαρμόζεται σταδιακά αυξανόμενη πίεση στην ιλύ, καθώς αυτή συμπιέζεται μεταξύ δύο ταινιών φίλτρανσης. Η πίεση που εφαρμόζεται μπορεί να είναι χαμηλή, μέση ή υψηλή. Το λειτουργικό κόστος περιλαμβάνει την κατανάλωση πολυηλεκτρολύτη και νερού, ενώ η απαιτούμενη ενέργεια είναι αρκετή (Ασημάκη, 2022).

### **Φιλτρόπρεσες**

Από την άλλη, οι φιλτρόπρεσες, οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρέως για την αφυδάτωση της ιλύος εδώ και δεκαετίες, λειτουργούν με ένα σύστημα επάλληλων πλακών και πλαισίων, τα οποία διαχωρίζονται από το φίλτρο. Η ιλύς τροφοδοτείται στο σύστημα, συμπιέζεται πάνω στο μέσο φίλτρανσης και το απομακρυνόμενο νερό συλλέγεται ξεχωριστά. Ο κύκλος λειτουργίας κυμαίνεται μεταξύ 1,5 και 4 ωρών, ενώ η πίεση μπορεί να είναι υψηλή. Το κόστος είναι αρκετό και σε αυτή τη μέθοδο (Ασημάκη, 2022).



**Εικόνα 1-**Φιλτρόπρεσσα.



**Εικόνα 2-**Φυγοκεντρικός διαχωριστής.

Τέλος το αφυδατωμένο προϊόν περνά στην διαδικασία της κομποστοποίησης για σταθεροποίηση της οργανικής ύλης και περαιτέρω μείωση της υγρασίας. Η επαναχρησιμοποίηση του τελικού αφυδατωμένου προϊόντος ως εδαφοβελτιωτικό είναι από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους αλλά η χρήση της στην Ελλάδα είναι περιορισμένη με την πλειοψηφία της λυματολάσπης να καταλήγει στον ΧΥΤΑ. Μερικές από άλλες εναλλακτικές της διάθεσης της αφυδατωμένης ιλύς είναι η εφαρμογή της στο έδαφος για γεωργικούς σκοπούς, εφαρμογή σε δασικές εκτάσεις και μετατροπή σε βιοεξανθράκωμα (Agrafioti et al., 2013).

### **2.1.3 Μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα συμβατικών μεθόδων επεξεργασίας**

Παραπάνω έγινε η αναφορά στα συμβατικές μεθόδους που υπάρχουν για την επεξεργασία της λυματολάσπης. Παρακάτω παρουσιάζεται ένας πίνακας με τα μειονεκτήματα και τα πλεονεκτήματά τους.

**Πίνακας 1-**Μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα συμβατικών συστημάτων επεξεργασίας λυματολάσπης (Στεφανάκης, 2011).

<b>Μειονεκτήματα</b>	<b>Πλεονεκτήματα</b>
Αποτελούνται από πολλά μηχανικά μέρη.	Είναι ικανά να παρέχουν συνεχή εκροή υψηλής ποιότητας.
Καταναλώνουν υψηλή ενέργεια και χρησιμοποιούν μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στην κατασκευή (σκυρόδεμα, χάλυβας κ.λ.π.) και τη λειτουργία (ηλεκτρική ενέργεια, χημικά).	Έχουν μικρές απαιτήσεις σε έκταση γης.
Έχουν υψηλό κόστος κατασκευής και λειτουργίας.	Οι οσμές που δημιουργούνται μπορούν να προληφθούν ή να περιοριστούν.
Απαιτείται συχνή παρακολούθηση από υπεύθυνο και εξειδικευμένο προσωπικό.	Συνήθως δεν εμφανίζονται έντομα.
Χρησιμοποιούν μηχανολογικό εξοπλισμό συνεπώς το κόστος συντήρησης είναι υψηλό.	
Ο υψηλές παροχές οδηγούν σε μειωμένη απόδοση.	

Παράγουν σημαντικές ποσότητες παραπροϊόντων και έτσι απαιτείται απομάκρυνση, επεξεργασία, αποθήκευση και διάθεση σε καθημερινή βάση.	
Η εμφάνιση τους είναι μη ελκυστική και πρέπει να αντισταθμιστεί με κατάλληλη διαμόρφωση του περιβάλλοντα χώρου.	

#### 2.1.4 Νομοθετικό πλαίσιο

Ως μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης, η Ελλάδα είναι υποχρεωμένη να εναρμονίζει την νομοθεσία με τις κοινοτικές οδηγίες για τη διαχείριση των απορριμμάτων. Η ύλη που προέρχεται από την επεξεργασία των αστικών λυμάτων, θεωρείται νομικά «Μη Επικίνδυνο Στερεό Απόβλητο» και επομένως εμπίπτει σε όλες τις διατάξεις που σχετίζονται με την διαχείριση στερεών αποβλήτων. Στην ισχύουσα νομοθεσία για τη διαχείριση, διάθεση και ανακύκλωση της ύλης, οι προδιαγραφές και τα όρια που τίθενται, εστιάζουν κυρίως στη χρήση ύλης στη γεωργία. Το νομοθετικό πλαίσιο που σχετίζεται με τη διαχείριση της ύλης από ΕΕΛ είναι:

- **Υ.Α. ΥΠΕΝ/ΔΔΑ/41828/630/2023 (ΦΕΚ 2692/Β` 21.4.2023)**

Μέτρα, όροι και διαδικασίες για τη χρησιμοποίηση επεξεργασμένης ύλης στη γεωργία και στην αποκατάσταση του εδάφους - Συμμόρφωση προς τις διατάξεις της Οδηγίας 86/278/ΕΟΚ του Συμβουλίου της 12ης Ιουνίου 1986 «σχετικά με την προστασία του περιβάλλοντος και ιδίως του εδάφους κατά τη χρησιμοποίηση της ύλης καθαρισμού λυμάτων στη γεωργία», όπως τροποποιήθηκε με τον Κανονισμό (ΕΕ) 2019/1010 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 5ης Ιουνίου 2019 και αντικατάσταση της υπ' αρ. 80568/4225/1991 (Β' 641) κοινής υπουργικής απόφασης

- **Π.Υ.Σ. 49/2015 (ΦΕΚ 174/Α` 15.12.2015)**

Τροποποίηση και έγκριση του Εθνικού Σχεδίου Διαχείρισης Αποβλήτων (Ε.Σ.Δ.Α.) και του Εθνικού Στρατηγικού Σχεδίου Πρόληψης Δημιουργίας Αποβλήτων που κυρώθηκαν με την 51373/4684/25-11-2015 κοινή απόφαση των Υπουργών Εσωτερικών και Διοικητικής Ανασυγκρότησης και Περιβάλλοντος και Ενέργειας, σύμφωνα με το άρθρο 31 του Ν. 4342/2015

- **Υ.Α. 2263.1-2/33741/2015/2015 (ΦΕΚ 2382/Β` 6.11.2015)**

Αποδοχή τροποποιήσεων στο Παράρτημα της Διεθνούς Σύμβασης για την πρόληψη της ρύπανσης από πλοία, 1973, όπως τροποποιήθηκε με το Πρωτόκολλο του 1978 που σχετίζεται με αυτή - Τροποποιήσεις στο κανονισμό 12 του Παραρτήματος Ι της Δ.Σ. MARPOL

- **Υ.Α. οικ. 5673/400/1997 (ΦΕΚ 192/Β` 14.3.1997)**

Μέτρα και όροι για την επεξεργασία αστικών λυμάτων

- **Κ.Υ.Α 80568/4225/1991 (ΦΕΚ 641/Β` 7.8.1991)**

Μέθοδοι όροι και περιορισμοί για τη χρησιμοποίηση στη γεωργία της ιλύος που προέρχεται από επεξεργασία οικιακών και αστικών λυμάτων

- **Υ.Α. Ε1β 221/1965 (ΦΕΚ 138/Β` 24.2.1965)**

Περί διαθέσεως λυμάτων και βιομηχανικών αποβλήτων

## **2.2 Φυσικά συστήματα επεξεργασίας**

Οι διεργασίες στην ΕΕΛ υποστηρίζονται κυρίως από μικροβιακούς μικροοργανισμούς, χρησιμοποιώντας πολύπλοκα και ενεργοβόρα μηχανικά συστήματα και χημικές ουσίες. Τα συμβατικά συστήματα επεξεργασίας καταναλώνουν ενέργεια από μη ανανεώσιμους πόρους όπως ορυκτά καύσιμα, προκαλώντας περιβαλλοντική υποβάθμιση λόγω της αφαίρεσης μη ανανεώσιμων πόρων και λόγω των παραπροϊόντων τους (ιλύς και βιο-στερεά) (Στεφανάκης, 2011).

Λαμβάνοντας επίσης υπόψη τις αυξανόμενες περιβαλλοντικές ανησυχίες και την ευαισθητοποίηση παγκοσμίως, προστέθηκε μια ακόμη παράμετρος στις προαπαιτούμενες συνθήκες των τεχνικών επεξεργασίας: πρέπει να είναι βιώσιμες, δηλαδή με χαμηλότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Στο σημείο αυτό, τα φυσικά συστήματα επεξεργασίας μπορούν να διαδραματίσουν καθοριστικό ρόλο. Αυτά τα εναλλακτικά συστήματα δεν εξαρτώνται από εντατικές βιολογικές διεργασίες που απαιτούν υψηλές ποσότητες ενέργειας, πόρων και ακριβές, σύνθετες πρώτες ύλες. Αντίθετα, βασίζονται στην εκμετάλλευση φυσικών διεργασιών και φυσικών συστατικών (π.χ. φυτά, αδρανή υλικά), ενώ το μεγαλύτερο μέρος των μηδαιμίνων ενεργειακών τους αναγκών καλύπτεται από ανανεώσιμες πηγές. Με άλλα λόγια, παρέχουν έναν οικολογικό τρόπο επεξεργασίας. Ακόμα, η ιδέα της χρήσης φυτών για την επεξεργασία των λυμάτων ήταν πάντα καινοτόμα και ελκυστική όχι μόνο από τους επιστήμονες αλλά και από το σύνολο της κοινωνίας. Έτσι, η τεχνολογία των συστημάτων αυτών προσελκύει αυξανόμενο παγκόσμιο ενδιαφέρον (Stefanakis et al., 2014).

Επιπλέον, στα φυσικά συστήματα λαμβάνουν χώρα, ταυτόχρονα πολλαπλές διεργασίες σε σχέση με τα μηχανικά συστήματα επεξεργασίας στα οποία οι διεργασίες πραγματοποιούνται διαδοχικά και σε διαφορετικούς αντιδραστήρες-δεξαμενές (Αγγελάκης και Τσομπάνογλου, 1995).

Για την επεξεργασία της λυματολάσπης έχουν χρησιμοποιηθεί φυσικά συστήματα τα οποία μπορούν να διακριθούν σε δυο κατηγορίες:

### **1) Κλίνες ξήρανσης**

Οι κλίνες ξήρανσης κατατάσσονται μεταξύ των παλαιότερων μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν στο παρελθόν για την αφυδάτωση της ιλύος και συνεχίζουν να χρησιμοποιούνται σε μικρές και μεσαίες ΕΕΛ. Η αφυδατωμένη ιλύς αφαιρείται συνήθως χειρωνακτικά με κατάλληλα εργαλεία. Έχει χαμηλό κόστος κατασκευής και συντήρησης και δεν απαιτεί την χρήση χημικών. Όμως, η απόδοση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις καιρικές συνθήκες και είναι πιθανή η δημιουργία δυσοσμίας (Κατσιμάντου, 2007).



## 2) Τεχνητοί υγροβιότοποι

Οι τεχνητοί υγροβιότοποι είναι κλίνες με πυθμένα από μη διαπερατό υλικό συνήθως άργιλο και στραγγιστικό δίκτυο σωληνώσεων, φυτεμένα με βλάστηση η οποία βοηθά στην απομάκρυνση του υδάτινου όγκου. Το σημαντικότερο πλεονεκτήματα της προσέγγισης αυτής είναι η δυνατότητα εφαρμογής της ιλύος για πολλά έτη. Είναι κατάλληλο για θερμές έως μέτριες θερμοκρασίες και απαιτείται ετήσια συγκομιδή της βλάστησης (Ronald W. Crites, 2014).

### 2.2.1 Φυσικοί υγροβιότοποι

Για την καλύτερη κατανόηση των τεχνητών υγροβιότοπων πρέπει να γίνει αναφορά στα φυσικά συστήματα, τα οποία είχαν πάντα την ικανότητα να καθαρίζουν το νερό και να βελτιώνουν την ποιότητα του. Η παρατήρηση αυτή οδήγησε στην επανεκτίμηση των δυνατοτήτων αποκατάστασης των υφιστάμενων υγροτόπων και στην αντιμετώπιση του υψηλού κόστους που συνδέεται με τις συμβατικές μεθόδους διαχείρισης. Οι φυσικοί υγρότοποι χρησιμοποιούνταν ως δευτερογενείς ή τριτογενείς χώροι διάθεσης υγρών αποβλήτων εδώ και πολλά χρόνια, ακόμη και πριν από μερικές χιλιάδες χρόνια. Όπως για παράδειγμα, κατά τη μινωική εποχή κατασκευάστηκαν συστήματα συλλογής λυμάτων στο ελληνικό νησί της Κρήτης στα ανάκτορα της Ζάκρου και της Κνωσού, όπου οι κοντινοί χείμαρροι και υγρότοποι χρησιμοποιούνταν ως χώροι απόρριψης (Stefanakis et al., 2014).

Οι φυσικοί υγροβιότοποι είναι μεταβατικές περιοχές μεταξύ χερσαίων και υδάτινων συστημάτων, ενσωματώνοντας χαρακτηριστικά τόσο ξηρού όσο και υγρού περιβάλλοντος. Μπορούν να καλύπτονται πλήρως ή μερικώς από νερό για παρατεταμένες χρονικές περιόδους ή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Πρόκειται για δυναμικά συστήματα, που εξελίσσονται συνεχώς και αλλάζουν τα χαρακτηριστικά τους στο πέρασμα του χρόνου. Το επίπεδο κορεσμού του νερού είναι ένας σημαντικός παράγοντας για τον καθορισμό της φύσης του εδάφους και των τύπων των φυτικών και ζωικών ειδών που ζουν στους υγροβιότοπους. Τα χαρακτηριστικά των φυσικών υγροτόπων επηρεάζονται από ποικίλα τοπικές/περιφερειακές παραμέτρους, όπως το κλίμα, την υδρολογία, τη τοπογραφία, τη χημεία του νερού, τη βλάστηση και την ανθρώπινη όχληση (Stefanakis et al., 2014).



Εικόνα 3-Φυσικός υγροβιότοπος.

Υπάρχει μεγάλη ποικιλία υγροτόπων, γεγονός που καθιστά δύσκολη τη διατύπωση ενός διεθνή αποδεκτού ορισμού. Ένας από τους καλύτερους και αναγνωρισμένους ορισμούς για τους φυσικούς υγροτόπους δόθηκε από τη Συνθήκη Ραμσάρ για τους υγροτόπους το 1971. Η εν λόγω συνθήκη υιοθέτησε ένα διεθνές, διακυβερνητικό ορισμό για τους υγροτόπους, που βασίζεται σε μια ευρεία προσέγγιση για την καλύτερη δυνατή περιγραφή των κύριων χαρακτηριστικών των υγροτόπων. Οι υγρότοποι ορίζονται ως "περιοχές με έλη, βάλτους, τυρφώνες, φυσικές ή τεχνητές, μόνιμες ή προσωρινές, με νερό στατικό ή τρεχούμενο, γλυκό, υφάλμυρο ή αλμυρό, συμπεριλαμβανομένων των θαλάσσιων υδάτινων περιοχών, το βάθος των οποίων κατά την παλίρροια δεν υπερβαίνει έξι μέτρα". Όπως υποδηλώνει και το όνομά τους, δημιουργούνται χωρίς καμία ανθρώπινη παρέμβαση.

Οι φυσικοί υγροβιότοποι περιλαμβάνουν διάφορα οφέλη όπως εμπλουτισμός του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, έλεγχος των πλημμυρικών φαινομένων, απορρόφηση διοξειδίου του άνθρακα, αποθήκευση θερμότητας και απελευθέρωση, παγίδευση ιζημάτων και άλλα (Stefanakis et al., 2014).

### **2.2.2 Ιστορική ανάδρομη τεχνητών υγροβιότοπων**

Η πρώτη χρήση φυτών σε ένα σύστημα τεχνητού υγροβιότοπου πραγματοποιήθηκε το 1950 στο Ινστιτούτο Max Planck της Γερμανίας από τον Dr. Seidel (1966). Αυτό το καινοτόμο πείραμα αποσκοπούσε στην εξισορρόπηση της υπερλίπανσης, από ρυπασμένα λύματα, και την πρόσχωση των εσωτερικών υδάτων με τη χρήση κατάλληλων φυτών (Seidel, 1955). Τα πειράματα του Seidel (1953) αποκάλυψαν ότι ορισμένα είδη καλαμιού (π.χ. βούρλα) ήταν ικανά να απομακρύνουν διάφορους ρύπους από τα λύματα και δρούσαν διαφορετικά από εκείνα που αναπτύσσονται σε άλλα μη μολυσμένα υδάτινα περιβάλλοντα. Παρατήρησε επίσης ότι η πυκνότητα των φυτών αυτών ήταν 10-20 φορές υψηλότερη σε σύγκριση με εκείνη παρόμοιων φυτών που αναπτύσσονται σε μη μολυσμένα ύδατα. Η συνεργασία των Dr. Seidel και Kickuth από το Πανεπιστήμιο του Göttingen είχαν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη της λεγόμενης "Μέθοδος της Ζώνης των Ριζών", η οποία ήταν ένα σύστημα ΤΥ οριζόντιας ροής (HF) φυτεμένο με κοινά καλάμια (Brix, 1994a).

Το πρώτο σύστημα ΤΥ στην Ευρώπη κατασκευάστηκε στην Ολλανδία τη δεκαετία του 1960 και ήταν ελεύθερης υδάτινης επιφάνειας (FWS) (Vyrmazal, 2011), ενώ οι πρώτες ερευνητικές δραστηριότητες στις Ηνωμένες Πολιτείες πραγματοποιήθηκαν στις δεκαετίες του 1970 και 1980. Οι εφαρμογές των ΤΥ στην Ευρώπη και τη Βόρεια Αμερική ήταν σταδιακές και ο αριθμός τους αυξήθηκε σχετικά αργά στην αρχή. Η δημιουργία του περιβαλλοντικού Protection Agency στις Ηνωμένες Πολιτείες ενίσχυσε τη δημιουργική σκέψη για εναλλακτικές μεθόδους επεξεργασίας λυμάτων. Ενώ η χρήση των ΤΥ υπόγειας ροής (SF) ήταν πιο διαδεδομένη στην Ευρώπη, στις Ηνωμένες Πολιτείες ΗΠΑ χρησιμοποιούνταν κυρίως συστήματα FWS (Brix, 1994a). Οι πρώτες εγκαταστάσεις στη Γερμανία και τη Δανία απέδειξαν την αποτελεσματικότητα της επεξεργασίας αυτών των συστημάτων, αλλά σύντομα παρουσιάστηκαν προβλήματα απόφραξης λόγω της χαμηλής υδραυλικής αγωγιμότητας του εδάφους. Αντίστοιχα προβλήματα λόγω λανθασμένου σχεδιασμού παρατηρήθηκαν σε πολλές εγκαταστάσεις κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1970, οπότε προέκυψε η ανάγκη για περαιτέρω έρευνα προς την κατεύθυνση της βελτίωσης του απόδοσης και λειτουργίας του συστήματος (Stefanakis et al., 2014).

Με την πάροδο του χρόνου και καθώς η τεχνολογία προόδευε, όλο και περισσότεροι ΤΥ σχεδιάστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων, και στο τέλος του εικοστού αιώνα ο αριθμός των εφαρμογών τους αυξήθηκε ραγδαία. Επίσης το εύρος των εφαρμογών διευρύνθηκε και συμπεριέλαβε την επεξεργασία της απορροής των ομβρίων υδάτων και της βιομηχανίας, αλλά και μεταλλευτικών και γεωργικών αποβλήτων (Vymazal, 2011). Σήμερα, περισσότερα από 10.000 συστήματα βρίσκονται σε λειτουργία στην Ευρώπη. Συνολικά, η εν λόγω τεχνολογία επεξεργασίας αποτελεί σχετικά πρόσφατη εξέλιξη (περίπου 30-40 χρόνια) σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους επεξεργασίας οι οποίες χρησιμοποιούνται εδώ και περισσότερα από 80 χρόνια. Αυτή η σχετικά σύντομη περίοδος συνεπάγεται ένα αντίστοιχα περιορισμένο επίπεδο εμπειρίας τόσο στο σχεδιασμό όσο και στη λειτουργία των ΤΥ.

Παρόλο που η τεχνολογία υπάρχει εδώ και περίπου τέσσερις δεκαετίες, κατά τη διάρκεια των τελευταίων 20-25 χρόνων παρατηρείται τεράστια αύξηση του ενδιαφέροντος. Αυτό σχετίζεται με το γεγονός ότι κατά την ίδια περίοδο έγινε αντιληπτή η πραγματική αξία των υδροτόπων, ως αποτέλεσμα της σταδιακής αύξησης των περιβαλλοντικών ανησυχιών. Είναι επίσης ενδιαφέρον ότι κατά την τελευταία δεκαετία οι δημοσιευμένες εργασίες για των ΤΥ κάθετης ροής (ΤΥΚΡ) και τις οριζόντιες υπόγειας ροής ΤΥ (ΤΥΟΡ) αυξήθηκαν περίπου τρεις και τέσσερις φορές, αντίστοιχα, σε σύγκριση με τη δεκαετία του 1990. Αυτό αποτελεί επίσης ένδειξη της απότομης αύξησης που σημειώθηκε στο ενδιαφέρον για τα υπόγεια συστήματα, αποτέλεσμα της συνειδητοποίησης των πλεονεκτημάτων αυτού του τύπου ΤΥ. Από την άλλη πλευρά, η αντίστοιχη αύξηση των επιφανειακών συστημάτων (ΤΥΕΡ) ήταν λιγότερο από το διπλάσιο, γεγονός που υποδηλώνει και πάλι τη μετακίνηση του ερευνητικού ενδιαφέροντος προς τα συστήματα υπόγειας ροής. Οι ΤΥ κατακόρυφης ροής θεωρούνται ως η τελευταία εξέλιξη της τεχνολογίας αυτής. Αν και συστήματα με κατακόρυφη ροή υπάρχουν εδώ και πολλά χρόνια, η χρήση αυτής της τύπου δεν ήταν πολύ διαδεδομένη. Η σταδιακή συνειδητοποίηση των συγκεκριμένων πλεονεκτημάτων αυτού του τύπου ΤΥ (π.χ. λιγότερες απαιτήσεις επιφάνειας, καλύτερος αερισμός των της κλίνης, κ.λπ.) προσέλκυσε το ενδιαφέρον ερευνητών και μηχανικών. Έτσι, σήμερα η λεγόμενη δεύτερη γενιά ΤΥΚΡ αντιπροσωπεύει πιθανώς μια από τις πιο υποσχόμενες εναλλακτικές λύσεις για την αποκεντρωμένη επεξεργασία λυμάτων (Stefanakis et al., 2014).

### **2.3 Τεχνητοί υδροβιότοποι**

Οι Τεχνητοί Υδροβιότοποι (ΤΥ) αποτελούν μια πολύ ενδιαφέρουσα και ελκυστική εξέλιξη στον τομέα της περιβαλλοντικής/οικολογικής μηχανικής, καθώς μιμούνται τα φυσικά συστήματα επεξεργασίας. Αναφέρονται σε κατασκευασμένα συστήματα που έχουν σχεδιαστεί για να χρησιμοποιούν διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στη φύση υπό ελεγχόμενες συνθήκες για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων χρησιμοποιώντας φυσικές, βιολογικές και χημικές διεργασίες με σκοπό την απομάκρυνση ρύπων σε επιφανειακά και υπόγεια νερά ή σε αστικά και βιομηχανικά απόβλητα (Στεφανάκης, 2011). Η φιλοσοφία πίσω από αυτού του είδους τα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων βασίζεται σε μια αποκεντρωμένη προσέγγιση σε αντίθεση με την συγκεντρωτική προσέγγιση των συμβατικών μεθόδων βιολογικής επεξεργασίας που κυριαρχούν στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων. Αυτή η νέα προσέγγιση εισάγει επίσης νέες παραμέτρους και απόψεις στην

επεξεργασία λυμάτων, όπως η βιωσιμότητα και οι συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Stefanakis, 2020).



**Εικόνα 4**-Τεχνητός υγροβιότοπος στην κομητεία Κλέιτον, Γεωργία, Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής.

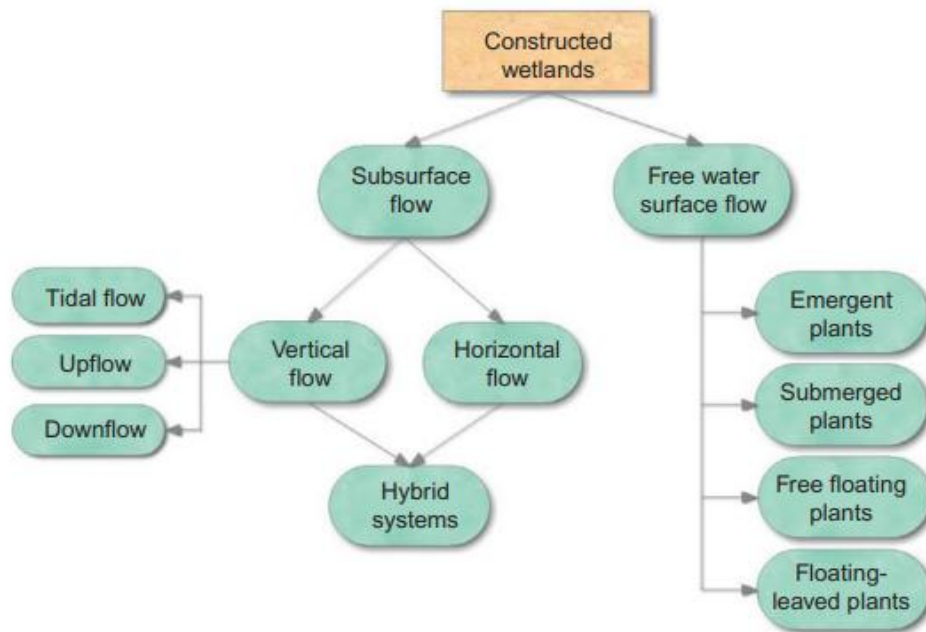
Οι τεχνητοί υγροβιότοποι χαρακτηρίζονται από μονωμένες κλίνες με βάθος συνήθως μεγαλύτερου του ενός μέτρου που γεμίζουν με το υγρό απόβλητο, το οποίο και υπόκειται σε ένα συνδυασμό διεργασιών. Εκτός αυτού, τα οικονομικά οφέλη αυτής της τεχνολογίας τόσο κατά την κατασκευή όσο και κατά την λειτουργία, οδήγησαν στην ανάπτυξη και κατασκευή τεχνητών υγροβιοτόπων που θα μπορούν να αξιοποιήσουν τους προαναφερθέντες μηχανισμούς εξυγίανσης του νερού (Stefanakis et al., 2014). Οι τεχνητοί υγροβιότοποι, όπως και όλα τα φυσικά συστήματα επεξεργασίας, βασίζονται (σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό) σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, περιλαμβάνοντας την ηλιακή ακτινοβολία, την κινητική ενέργεια του ανέμου, την ενέργεια του βρόχινου νερού, το επιφανειακό νερό, το έδαφος και την αποθήκευση ενδεχόμενης ενέργειας σε βιομάζα στο έδαφος (Ζουραράκη, 2002).

Οι τεχνητοί υγροβιότοποι μπορούν να ταξινομηθούν με βάση τα κύρια χαρακτηριστικά του συστήματος όπως η κατεύθυνση της ροής του νερού και ο τύπος της χρησιμοποιούμενης βλάστησης. Έτσι, με βάση τη κατεύθυνση της ροής του νερού τα συστήματα ΤΥ, ταξινομούνται σε δυο γενικούς τύπους (Kadlec & Wallace, 2009;Stefanakis et al., 2014):

α) τεχνητοί υγροβιότοποι επιφανειακής ροής (ΤΥΕΡ) και

β) τεχνητοί υγροβιότοποι υπόγειας ροής (ΤΥΥΡ).

Μια περαιτέρω ταξινόμηση των ΤΥΥΡ μπορεί να γίνει ανάλογα με την κατεύθυνση της διαδρομής της ροής, οριζόντια (ΤΥΟΡ) ή κατακόρυφα (ΤΥΚΡ) (Vymazal, 2007;Stefanakis et al., 2014).



**Εικόνα 5-**Ταξινόμηση των τεχνητών υγροβιότοπων (Stefanakis et al., 2014).

#### **Τεχνητοί υγροβιότοποι κατακόρυφης ροής (ΤΥΚΡ)**

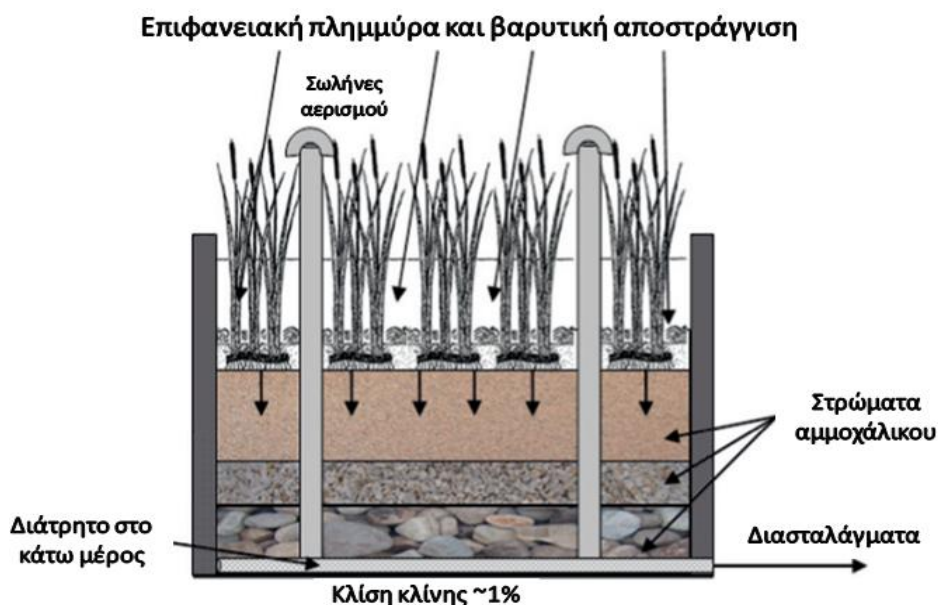
Μέχρι πρόσφατα, αυτός ο τύπος ΤΥ ήταν ο λιγότερο ανεπτυγμένος και εφαρμοσμένος. Στα πρώτα στάδια της τεχνολογίας των ΤΥ, οι ΤΥΕΡ και ΤΥΟΡ ήταν οι κυρίαρχοι τύποι, κυρίως λόγω του υψηλότερου συνολικού κόστους κατασκευής και λειτουργίας των ΤΥΚΡ. Ωστόσο, το ενδιαφέρον για τα ΤΥΚΡ αυξήθηκε σταδιακά με την πάροδο του χρόνου, ιδίως όταν έγινε αντιληπτή η υψηλότερη ικανότητα μεταφοράς οξυγόνου σε συστήματα αυτού του τύπου σε σύγκριση με τις κλίνες οριζόντιας ροής. Η πιο συνηθισμένη διάταξη ΤΥΚΡ είναι μια λεκάνη που περιέχει διάφορα στρώματα χαλικιών και άμμου με αυξανόμενη διαβάθμιση από πάνω προς τα κάτω. Το συνολικό πάχος του υποστρώματος ποικίλλει από 30 έως 180 cm (Stefanakis et al., 2014). Συνήθως, το ανώτερο στρώμα του πυθμένα είναι ένα στρώμα άμμου. Τα φυτά εγκαθίστανται στο ανώτερο στρώμα χαλικιού ή στο στρώμα της άμμου (εάν υπάρχει). Ο πυθμένας της κοίτης καλύπτεται από γεωμεμβράνη/γεωϋφάσματα και έχει μια μικρή κλίση 1-2%.

Οι ΤΥΚΡ περιέχουν επίσης διάτρητους κατακόρυφους σωλήνες αερισμού οι οποίοι συνδέονται στον πυθμένα της κλίνης με το σύστημα αγωγών συλλογής αποστράγγισης. Αυτοί οι σωλήνες επιτρέπουν τον καλύτερο αερισμό των βαθύτερων τμημάτων της κλίνης (Stefanakis & Tsihrintzis, 2012a). Τα λύματα εφαρμόζονται σε δόσεις στην επιφάνεια της κλίνης και αποστραγγίζονται κατακόρυφα με τη βαρύτητα, ενώ η κατανομή τους πρέπει να είναι ομοιόμορφη σε όλη την επιφάνεια της (Stefanakis et al., 2014). Οι ΤΥΚΡ έχουν μικρότερες επιφανειακές απαιτήσεις σε σύγκριση με τους ΤΥΕΡ και ΤΥΟΡ

Λόγω της καλύτερης ικανότητας αερισμού, οι ΤΥΚΡ είναι πολύ αποτελεσματικά στην αφαίρεση οργανικής ύλης ( $BOD_5$ ) και την απομάκρυνση αζώτου και αμμωνίας, συνήθως πιο αποτελεσματικά από τους ΤΥΟΡ (Stefanakis et al., 2014). Η απομάκρυνση του φωσφόρου παραμένει περιορισμένη και έχουν προταθεί εναλλακτικές τροποποιήσεις για τη βελτίωση



της απόδοσης, π.χ. ένα πρόσθετο στάδιο με φίλτρα βαρύτητας που περιέχουν βωξίτη, ζεόλιθο ή άλλο υλικό για την επεξεργασία των λυμάτων (Stefanakis & Tsihrintzis, 2012b). Η συνολική αποτελεσματικότητά τους προώθησε τη χρήση αυτού του τύπου ΤΥ για την επεξεργασία λυμάτων διαφορετικής προέλευσης, π.χ. οικιακών, αστικών, βιομηχανικών, αγροτοβιομηχανικών και στραγγίσματα από χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (Stefanakis et al., 2014).



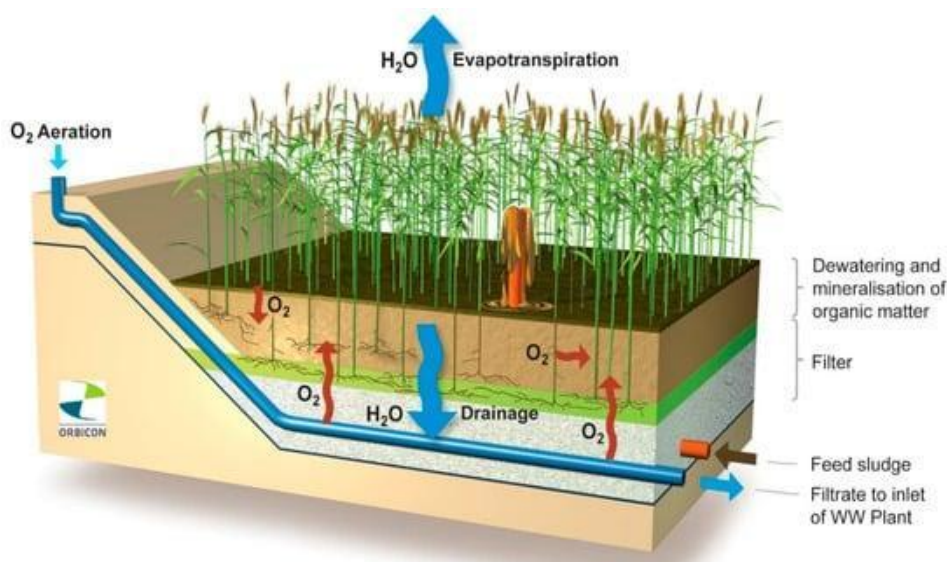
**Εικόνα 6-**Τεχνητός υδροβιότοπος κατακόρυφης υπόγειας ροής (Stefanakis et al., 2014).

### 2.3.1 Τεχνητοί υδροβιότοποι αφυδάτωσης ιλύος (ΤΥΑΙ)

Τα λεγόμενα συστήματα Sludge Drying Reed Bed (SDRB) ή Sludge Treatment Wetlands (STW) είναι μια εφαρμογή των ΤΥΚΡ. Οι τεχνητοί υδροβιότοποι αφυδάτωσης ιλύος είναι μια λιγότερη δαπανηρή τεχνολογία από τις μηχανικές μεθόδους και απαιτούν πολύ λιγότερη ενέργεια, καθώς βασίζονται στη δύναμη της βαρύτητας, την ηλιακή ακτινοβολία ή τις βιολογικές διεργασίες ως πηγή ενέργειας για την αφυδάτωση. Το σύστημα είναι ουσιαστικά μια βελτιωμένη κλίση ξήρανσης με χαλίκι ή άμμο με φυτεμένα καλάμια στην άμμο. Με βάση την εμπειρία που έχει αποκτηθεί μέχρι σήμερα, το κλειδί για την αποτελεσματική λειτουργία των ΤΥΑΙ είναι ο σωστός σχεδιασμός και η κατασκευή. Ωστόσο, παρά την πρόοδο και την αυξανόμενη έρευνα που διεξάγεται τα τελευταία χρόνια εξακολουθούν να υπάρχουν συγκεκριμένες αβεβαιότητες σχετικά με το σχεδιασμό του συστήματος, ενώ δεν υπάρχει γενικά αποδεκτή ρύθμιση ή κατευθυντήριες γραμμές σχεδιασμού (Stefanakis et al., 2011).

Αναλυτικότερα, ένα σύστημα ΤΥΑΙ αποτελείται από μια κλίση από τσιμέντο ή χώμα τραπεζοειδούς πυθμένα της οποίας συνήθως καλύπτεται από ένα υλικό στεγανοποίησης χαμηλής διαπερατότητας, όπως μια γεωμεμβράνη πολυαιθυλενίου υψηλής πυκνότητας (HDPE), την αποτροπή της έκπλυσης στραγγισμάτων στους υπόγειους σχηματισμούς και στα υπόγεια ύδατα. Η κλίση πληρώνεται με χαλίκι και άμμο διαφόρων μεγεθών και πάχους, ενώ στα ανώτερα στρώματα υποστρώματος φυτεύονται τοπικά είδη φυτών υδροτόπων, όπως κοινά καλάμια ή καλαμιές (*Phragmites australis* ή *Typha latifolia*). Ένα δίκτυο σωληνών διανομής ιλύος διαχέει την τροφοδοτούμενη ιλύ στην επιφάνεια της κλίσης, όπου

αφυδατώνεται μέσω κατακόρυφης αποστράγγισης και εξατμισοδιαπνοής. Ενώ στην επιφάνεια της κλίνης σχηματίζεται μία στρώση βιοστερεών η λεγόμενη υπολειμματική ύλης. Ένα δίκτυο σωλήνων αποστράγγισης τοποθετείται σε ένα στρώμα από βότσαλα πάνω από τη γεωμεμβράνη και συλλέγει το νερό αποστράγγισης. Το δίκτυο αποστράγγισης συνδέεται με σωλήνες που διευκολύνουν τον παθητικό αερισμό της κλίνης, ο οποίος έχει διαπιστωθεί ότι βελτιώνει την απόδοση της αφυδάτωσης του συστήματος.



**Εικόνα 7-**Σχηματική διατομή ενός συστήματος επεξεργασίας ύλης με καλαμιώνες (Nielsen et al., 2020).

Η παρουσία βλάστησης και ο παθητικός αερισμός συμβάλλουν στη δημιουργία ευνοϊκών συνθηκών για τη μετατροπή της βιοαποδομήσιμης οργανικής ύλης σε πιο σταθερές χουμικές ενώσεις. Η αφυδάτωση της ύλης, σε συνδυασμό με τη διαδικασία ανοργανοποίησης της οργανικής ύλης, οδηγεί σε σημαντική μείωση του όγκου της. Η υπολειμματική ύλη που συσσωρεύεται ενσωματώνεται σταδιακά στο στρώμα του υποστρώματος φιλτραρίσματος, όπου αναπτύσσονται τα φυτά. Με την πάροδο του χρόνου, το πάχος του συγκεκριμένου στρώματος αυξάνεται με ρυθμό περίπου 10-15 cm ετησίως, ρυθμός που εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της εισερχόμενης ύλης. Συνήθως, μετά από 8 έως 12 χρόνια συνεχούς λειτουργίας (και σε ορισμένες περιπτώσεις έως 20 έτη), και αφού εφαρμοστεί μία περίοδος εκτεταμένης ανάπαυσης το στρώμα της αφυδατωμένης και ανοργανοποιημένης ύλης αφαιρείται από τις λεκάνες και αξιοποιείται ως λίπασμα ή ως εδαφοβελτιωτικό. Οι ΤΥΑΙ έχουν τη δυνατότητα επεξεργασίας μιας ευρείας γκάμας τύπων ύλης, όπως ενεργός ύλη, χωνεμένη (αναερόβια) ύλη και ύλη από συστήματα ύδρευσης. Η εμπειρία δείχνει ότι οι ΤΥΑΙ μπορούν να επεξεργάζονται ύλη διαφορετικής ποιότητας, επιτυγχάνοντας συγκρίσιμη ή και ανώτερη απόδοση αφυδάτωσης σε σχέση με τις συμβατικές τεχνικές (Nielsen et al., 2020).

### **2.3.2 Λειτουργία τεχνητών υγροβιότοπων αφυδάτωσης ύλης**

Η αποδοτική αφυδάτωση και λειτουργία ενός ΤΥΑΙ επηρεάζεται από την ποιότητα της εισερχόμενης ύλης, τις κλιματολογικές συνθήκες και τον ορθό σχεδιασμό και κατασκευή

του συστήματος. Μία από τις κρίσιμες παραμέτρους σχεδιασμού του είναι ο ρυθμός φόρτισης της ιλύος (Sludge Loading Rate,  $\text{kg ds/m}^2/\text{έτος}$ ), ο οποίος εξαρτάται κυρίως από τα χαρακτηριστικά της ιλύος και τις επικρατούσες κλιματολογικές συνθήκες.

Μελέτες πιλοτικών μονάδων ΤΥΑΙ που συναντώνται στην βιβλιογραφία έχουν κλίνες επιφάνειας έως  $2\text{m}^2$  και η διάρκεια των πειραμάτων κυμαίνεται μεταξύ των 4 έως 12 μηνών, αν και σε ορισμένες περιπτώσεις τα πειράματα εκτείνονται έως και 3 έτη. Σκοπός των δοκιμών αυτών είναι η αποτελεσματικότητα της επεξεργασίας ιλύος σε ΤΥΑΙ, του βέλτιστου ρυθμού φόρτισης (SLR), καθώς και η διερεύνηση της διάρκειας των φάσεων τροφοδοσίας και ανάπαυσης, της αποδοτικότητας αφυδάτωσης ( $\text{L/s/m}^2$ ), της ποιότητας του αποστραγγιζόμενου νερού και της υπολειμματικής ιλύος, καθώς και της ανάπτυξης της φυτικής βιομάζας.

### **Κύκλοι φόρτισης λυματολάσπης και ανάπαυσης**

Η λειτουργία ενός ΤΥΑΙ βασίζεται σε κύκλους φόρτισης, τα οποία περιλαμβάνουν περιόδους τροφοδοσίας και ανάπαυσης της λυματολάσπης. Ο κύκλος φόρτισης μπορεί να διαρκεί από μερικές ημέρες έως μερικές εβδομάδες και ακολουθείται από περίοδο ανάπαυσης, κατά την οποία δεν εφαρμόζεται νέα ιλύς, επιτρέποντας τη φυσική αφυδάτωση μέσω αποστράγγισης και εξατμισοδιαπνοής. Η διάρκεια αυτών των περιόδων καθορίζεται από παράγοντες όπως η ποιότητα της ιλύος, οι κλιματικές συνθήκες (με τα ψυχρότερα κλίματα να απαιτούν μεγαλύτερες περιόδους ανάπαυσης), οι εποχιακές διακυμάνσεις, η ηλικία του ΤΥΑΙ.

Παρότι η λειτουργία των ΤΥΑΙ είναι σχετικά απλή, η αποτελεσματικότητά τους εξαρτάται από τη βέλτιστη διαχείριση των κύκλων φόρτισης, ώστε να αποφευχθεί η υπερφόρτιση των κλινών. Όταν το σύστημα διαχειρίζεται σωστά, μπορεί να επιτευχθεί περιεκτικότητα ξηρών στερεών έως 40% σε ψυχρά κλίματα (π.χ. στη Δανία) και έως 60% σε θερμότερα κλίματα, όπως στην Ελλάδα, ποσοστά που υπερβαίνουν εκείνα των ενεργοβόρων μηχανικών μεθόδων αφυδάτωσης. Λόγω της χαμηλής ενεργειακής απαίτησης, τα ΤΥΑΙ αποτελούν ενεργειακά αποδοτικές λύσεις, ενώ συμβάλλουν και στη δέσμευση άνθρακα μέσω της ανάπτυξης καλαμιών, λειτουργώντας έτσι ως αποθήκες άνθρακα (Nielsen et al., 2020).

### **Βλάστηση**

Σε ένα σύστημα ΤΥΑΙ μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε βλάστηση που έχει αποτελέσματα σε ΤΥ επεξεργασίας λυμάτων. Από όσο γνωρίζουμε είναι ζωτικής σημασίας να χρησιμοποιούνται τοπικά, ενδημικά είδη, δεδομένου ότι η εισαγωγή και εγκατάσταση εξωτικών ειδών, που δεν υπάρχουν φυσικά στην περιοχή, μπορεί να δημιουργήσουν διάφορους οικολογικούς κινδύνους. Επιπλέον, υπάρχει πάντα η πιθανότητα τα εξωτικά είδη να μην είναι καλά προσαρμοσμένα στις νέες κλιματικές συνθήκες. Προτιμώνται φυτά που αναπτύσσονται σε κοντινούς φυσικούς υγροτόπους και μπορούν να αναπτυχθούν καλά σε κορεσμένο υπόστρωμα. Τέλος, τα επιλεγμένα είδη θα πρέπει να είναι ανεκτικά έναντι



περιόδων με μεταβαλλόμενο επίπεδο κορεσμού (υψηλός όγκος εισροής και σύντομες ξηρές περιόδους) (Stefanakis et al., 2014).

Στο συγκεκριμένο πείραμα η βλάστηση που χρησιμοποιήθηκε είναι το κοινό καλάμι με επιστημονική ονομασία *Phragmites australis* του γένους *Phragmites*. Είναι το πιο ευρέως διαδεδομένο αγγειόσπερμο και υπάρχει σε εύκρατα κλίματα και σε τροπικές περιοχές. Είναι ένα χωροκατακτητικό είδος και μπορεί να αναπτυχθεί ακόμη και σε αλατούχα νερά (Stefanakis et al., 2014). Συνήθως, η ανάπτυξη του φτάνει σε τελικό ύψος κορμού έως 4m (σπανίως 6m) και το μήκος των φύλλων έως τα 70cm.

Χαρακτηρίζεται από μεγάλες ποσότητες βιομάζας τόσο υπέργεια, δηλαδή τα φύλλα όσο και υπόγεια, δηλαδή το ριζικό σύστημα, από την επιφάνεια του υποστρώματος. Ο ριζικός ιστός αναπτύσσεται οριζόντια και κατακόρυφα, δημιουργώντας έτσι ένα εκτενές πλέγμα που συνδέεται και μπλέκεται με τα σωματίδια του εδάφους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια μεγάλη διαθέσιμη επιφάνεια για την απορρόφηση θρεπτικών ουσιών και ιόντων. Αερόβιοι μικροοργανισμοί αναπτύσσονται σε ένα λεπτό στρώμα γύρω από τις ρίζες, ενώ αναερόβιοι μικροοργανισμοί είναι παρόντες στο υποκείμενο πληρωτικό υλικό (Shutes, 2001). Επιπλέον, παρουσιάζει ένα συνδυασμό μακριών, παχιών, μη διακλαδισμένων ριζών που διεισδύουν στο υπόστρωμα, καθώς και μικρότερων που διεισδύουν στο νερό και τα επιφανειακά στρώματα του ιζήματος. Συνδυαστικά, οι δύο τύποι ριζών μεγιστοποιούν τις πιθανότητες ριζών να προσλάβουν επιτυχώς τα διαθέσιμα θρεπτικά συστατικά, ακόμη και σε συνθήκες που δεν υπάρχει αρκετός διαθέσιμος χώρος. Συνήθως, τα υπόγεια τμήματα (ρίζωμα, ρίζα και βάσεις στελεχών) μπορεί να αποτελούν έως και το 80% της συνολικής βιομάζας.

Το *Phragmites australis* είναι ένα ταχέως αναπτυσσόμενο πολυετές φυτό. Μπορεί να αντέξει τιμές pH μεταξύ 4,8 και 8,2 ενώ είναι κατάλληλο για συνθήκες κακού αερισμού καθώς έχει χώρους με αέρα στο ανώτερο τμήμα των ριζών του και στα ριζώματα, που επιτρέπουν τη μεταφορά του αέρα κάτω στις ρίζες (Bakhshoodeh et al., 2020).



**Εικόνα 8-*Phragmites australis* (lizzieharper.co.uk).**

Ακόμη το *Phragmites australis* κατέχει σημαντικό ρόλο στα συστήματα διαχείρισης λυμάτων που χρησιμοποιούν τεχνητούς υδροβιότοπους πετυχαίνοντας απομάκρυνση του αζώτου, παροχή της απαιτούμενης ζήτησης βιολογικού οξυγόνου και μείωση των συνολικών αιωρούμενων στερεών από τα λύματα ([www.cabi.org](http://www.cabi.org)). Επίσης, μειώνουν την ταχύτητα του ανέμου, συνεπώς μειώνουν τον κίνδυνο επαναιώρησης, φιλτράρουν μεγάλα αιωρούμενα στερεά, προσλαμβάνουν θρεπτικά συστατικά, απελευθερώνουν οξυγόνο στη στήλη του νερού και παρέχουν επιφάνεια για προσκόλληση περιφύτων (Brix, 1997-Vymazal, 2013).

### **Πορώδες μέσο**

Σε ένα σύστημα ΤΥΑΙ μπορούν να απομακρυνθούν ρύποι από το διηθημένο νερό με ανταλλαγή, προσρόφηση, καθίζηση και συμπλοκοποίηση. Καθώς η απορρόφηση των ρύπων εξαρτάται από το περιεχόμενο του υποστρώματος, έτσι η δέσμευση των ρύπων ποικίλλει (Wu H. et al., 2015).

Μεταξύ των διαφόρων διεργασιών που συμβάλλουν στην απομάκρυνση του φωσφόρου σε συστήματα ΤΥ (προσρόφηση, καταβύθιση, πρόσληψη από τα φυτά, μικροβιακή κατανάλωση), η προσρόφηση στο μέσο φιλτραρίσματος θεωρείται ως η κύρια διαδικασία απομάκρυνσης (Vymazal, 2007). Τα χαλίκια που χρησιμοποιήθηκαν ως πληρωτικό υλικό στις πιλοτικές μονάδες του πειράματος προέρχονται από ποταμούς της Ελλάδας και χρησιμοποιούνται κυρίως ως δομικό υλικό. Εκτός από τον σπουδαίο ρόλο που κατέχουν στην φίλτρωση του λύματος, αποτελούν και ιδανικό μέσο για την ανάπτυξη βιοφίλμ. Το ποτάμιο χαλίκι είναι ένα θραύσμα πετρώματος του οποίου το μέγεθος των σωματιδίων είναι μεγαλύτερο από 2 mm και μικρότερο από ένα απλό χώμα, και οι κύριες χημικές συνθέσεις είναι  $\text{SiO}_2$  και  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Ένας μεγάλος αριθμός μελετών έχει δείξει ότι η ύπαρξη

χαλικιών στο έδαφος δεν επηρεάζει μόνο την τραχύτητα της επιφάνειας και τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους (πυκνότητα όγκου εδάφους, πορώδες εδάφους, αγωγιμότητα νερού εδάφους, περιεκτικότητα υγρασίας εδάφους), αλλά επηρεάζει επίσης τα χαρακτηριστικά διήθησης του εδάφους. Τα χαλικώδη εδάφη είναι ευρέως διαδεδομένα στον κόσμο και είναι σχετικά εύκολα στην απόκτησή τους, ασφαλή και μη ρυπογόνα (Yang et al., 2020).

Η παρουσία χαλικιού προσφέρει μια σειρά από οφέλη, τα οποία θα μπορούσαν να συνοψιστούν ως εξής (Stefanakis et al., 2014):

- Υποστηρίζει την ανάπτυξη της φυτεμένης βλάστησης.
- Παρέχει φιλτράρισμα.
- Εξασφαλίζει υψηλή διαπερατότητα, δηλαδή υδραυλική αγωγιμότητα, για την ανεμπόδιστη διέλευση των λυμάτων προς τα κάτω (με την προϋπόθεση χρήσης κατάλληλου όγκου πόρων), μειώνοντας έτσι την εμφάνιση πιθανής φραγής.
- Ενισχύει την αποτελεσματικότητα της επεξεργασίας, λειτουργώντας ως αποδέκτης διαφόρων βιοτικών και αβιοτικών στοιχείων.
- Παρέχει επιφάνεια προσκόλλησης για διάφορους μικροοργανισμούς (δημιουργία βιοϋμενίου) που συμμετέχουν στις διεργασίες απομάκρυνσης των ρύπων.

### 2.3.3 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Τεχνητών Υγροβιότοπων

Παρακάτω παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των τεχνητών υγροβιότοπων αφυδάτωσης ιλύος.

**Πίνακας 2-**Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των τεχνητών υγροβιότοπων αφυδάτωσης ιλύος (EPA, A Handbook of Constructed Wetlands, 2015).

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
η κατασκευή τους μπορεί να είναι λιγότερο δαπανηρή από άλλες μεθόδους επεξεργασίας	τα βιολογικά συστατικά είναι ευαίσθητα σε τοξικά χημικές ουσίες, όπως η αμμωνία και τα φυτοφάρμακα
τα έξοδα λειτουργίας και συντήρησης (ενέργεια και προμήθειες) είναι χαμηλά	η απόδοση τους μπορεί να μεταβάλλεται εποχιακά διότι επηρεάζονται από τις μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες (βροχοπτώσεις και ξηρασία).
η λειτουργία και η συντήρηση τους απαιτεί μόνο περιοδική και όχι συνεχή εργασία από προσωπικό	απαιτούν μια ελάχιστη ποσότητα νερού για την επιβίωσή τους. Ενώ οι υγροβιότοποι μπορούν να ανεχθούν την προσωρινή ξήρανση, δεν μπορούν να αντέξουν την πλήρη ξήρανση
παράγουν βιοστερεά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε καλλιέργειες	
παρέχουν ένα περιβάλλον ανάπτυξης για πολλούς υγροτοπικούς οργανισμούς	
μπορούν να κατασκευαστούν ώστε να ταιριάζουν αρμονικά στο τοπίο	
αντιμετωπίζονται ευνοϊκά από το ευρύ κοινό λόγω της περιβαλλοντικής τους προσέγγισης	
Παρέχουν καλή αφυδάτωση με μηδαμινό	

## 2.4 Αναφορά σε συστήματα τεχνητών υδροβιότοπων αφυδάτωσης ιλύος

Η τεχνολογία των τεχνητών υδροβιότοπων χρησιμοποιείται κυρίως για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων. Τα τελευταία χρόνια έχει όμως αρχίσει να εφαρμόζεται και σε άλλα απόβλητα, ένα από αυτά είναι η λυματολάσπη. Παρακάτω παρουσιάζονται αναφορές σε τεχνητούς υδροβιότοπους που έχουν μελετηθεί και χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία λυματολάσπης σε παγκόσμιο επίπεδο.

### Παραδείγματα Τεχνητών υδροβιότοπων επεξεργασίας λυματολάσπης στην Ευρώπη

Οι (Stefanakakis and Tsihrintzis, 2011) κατασκεύασαν στην Ξάνθη έντεκα κλίνες ξήρανσης ιλύος σε πιλοτική κλίμακα και τις λειτούργησαν για την επεξεργασία αστικής ενεργού ιλύος. Στην παρούσα εργασία επιχειρείται η ποσοτικοποίηση των μηχανισμών αφυδάτωσης σε αυτά τα συστήματα (δηλ. εξατμισοδιαπνοή και αποστράγγιση) και παρουσιάζονται οι επιδράσεις διαφόρων παραμέτρων, όπως του επιπέδου φόρτισης της ιλύος, της παρουσίας καλαμιών, της διαβάθμισης των υλικών του υποστρώματος κ.λπ. στους μηχανισμούς αυτούς. Τα αποτελέσματα αποκαλύπτουν ότι η εξατμισοδιαπνοή είναι η σημαντικότερη διαδικασία αφυδάτωσης που λαμβάνει χώρα στα συστήματα SDRB, αντιπροσωπεύοντας το 58-84% των συνολικών απωλειών νερού, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της μονάδας, το φορτίο ιλύος, την εποχή και άλλες παραμέτρους. Η αποστράγγιση είναι ο δεύτερος σημαντικότερος μηχανισμός, με αντίστοιχες τιμές που κυμαίνονται από 13% έως 41% των συνολικών απωλειών νερού, ενώ 1% έως 4% του νερού παραμένει στο στρώμα της ιλύος. Η παρουσία καλαμιών κρίθηκε απαραίτητη, καθώς βελτίωσε την αποτελεσματικότητα της αφυδάτωσης. Οι βροχοπτώσεις και η θερμοκρασία βρέθηκαν επίσης να επηρεάζουν τη διαδικασία αφυδάτωσης υπό εύκρατες κλιματικές συνθήκες.

Οι (S. Troesch et al., 2009) παρακολούθησαν στην Andancette, πόλη της Γαλλίας, 8 πιλοτικές μονάδες των 2 m<sup>2</sup> έκαστος και μια μονάδα πλήρους κλίμακας (13.000 p.e, 8 κλίνες των 470 m<sup>2</sup> σε λειτουργία για 4 χρόνια) για να εξεταστεί η επίδραση του ρυθμού φόρτισης της ιλύος, της ποιότητας της ιλύος και της συχνότητας φόρτισης στην αποτελεσματικότητα της αφυδάτωσης και της ανοργανοποίησης. Δύο στρώματα διήθησης και δύο ρυθμοί φόρτισης δοκιμάστηκαν σε πιλοτικές που τροφοδοτήθηκαν με ρυθμό φόρτισης 25-30 kg DM m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup> κατά το πρώτο έτος λειτουργίας (περίοδος θέσης σε λειτουργία). Η υδραυλική συμπεριφορά (ρυθμός διήθησης, εκροή), οι σχετικές συγκεντρώσεις O<sub>2</sub> και CO<sub>2</sub> στο μέσο διήθησης, το δυναμικό οξειδοαναγωγής, η απομάκρυνση ρύπων και η περιεκτικότητα σε ξηρή ουσία αξιολογήθηκαν καθ' όλη τη διάρκεια της μελέτης. Η ποιότητα της εξαγόμενης ιλύος από κλίνες πλήρους κλίμακας αξιολογήθηκε και έδειξε ότι η μηχανική της συμπεριφορά υπερβαίνει εκείνη της ιλύος ανάλογης περιεκτικότητας σε ξηρή ουσία, καθιστώντας ευκολότερη τη διάχυσή της.

Οι (S. Troesch et al., 2009) διεξήγαγαν στην Γαλλία πειράματα σε οκτώ πιλοτικής κλίμακας ξηραντήρια καλαμιών (2 m<sup>2</sup>) φυτεμένα με *Phragmites australis*. Η μελέτη αφορά τόσο τη σκοπιμότητα των καλαμιών που προορίζονται για την επεξεργασία της λυματολάσπης όσο και την αξιολόγηση της ταυτόχρονης επεξεργασίας με αεριζόμενη ιλύς. Δοκιμάστηκαν δύο στρώματα διήθησης είτε από φυτικό κομπόστ είτε από άμμο. Η μελέτη επικεντρώνεται

στην περίοδο έναρξης της λειτουργίας (πρώτο φυτικό έτος) με ρυθμό φόρτισης  $30 \text{ kg SS m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ . Σύμφωνα με αυτές τις συνθήκες λειτουργίας, η απόδοση αφυδάτωσης έφθασε περίπου το 30% DM κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, αλλά λιγότερο από 20% DM το χειμώνα για κάθε στρώμα διήθησης και ιλύς. Υψηλές αποδόσεις απομάκρυνσης, με μέσο όρο 96%, 92% και 89% για τα TSS, COD και TKN αντίστοιχα, επιτεύχθηκαν με τη ιλύς, ενώ ήταν χαμηλότερες για την αεριζόμενη ιλύς.

Οι (Peruzzi et al., 2009) κατασκεύασαν ένα σύστημα επεξεργασίας ιλύος σε καλαμιώνες στην Ιταλία με ένα έτος λειτουργίας σε δύο μονάδες επεξεργασίας αστικών λυμάτων, όπου το *Phragmites australis* φυτεύτηκε απευθείας σε έκτακτες κλίνες που αναδιαμορφώθηκαν για το έργο. Για την αξιολόγηση της διαδικασίας σταθεροποίησης της ιλύος ανιχνεύθηκαν παράμετροι που ήταν συμβατικές και μη συμβατικές για την εκτίμηση της εξέλιξης της ποιότητας της οργανικής ύλης (υδατοδιαλυτός άνθρακας (WSC), δραστηριότητα αφυδρογονάσης (Dhase), φουλβικά οξέα, χουμικά οξέα, πυρολυτικοί δείκτες ανοργανοποίησης και χουμοποίησης (B/E3)). Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν τόσο στην ιλύ όσο και στους φυτικούς ιστούς, για να εκτιμηθεί η βιοσταθεροποίηση της ιλύος και η πρόσληψη θρεπτικών στοιχείων και βαρέων μετάλλων από τα φυτά. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι με την πάροδο του χρόνου επήλθε ανοργανοποίηση και σταθεροποίηση της ιλύος, όπως φαίνεται από τη μείωση του διαλυμένου οργανικού άνθρακα και την επανασύνθεση της χουμοειδούς ιλύς. Το συνδυασμένο σύστημα καλαμιώνων-βιοστερεών είναι αποτελεσματικό όχι μόνο στην αποτοξίνωση των βαρέων μετάλλων και στην απομάκρυνση των θρεπτικών συστατικών (N, P) από τα βιοστερεά, τα οποία συσσωρεύονται στα φυτά, αλλά και στη δραματική μείωση του όγκου της ιλύος (95-99%).

### 1.5 Στόχος διπλωματικής εργασίας

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η κατασκευή και μελέτη τεχνητών υγροβιότοπων για την αποτελεσματική αφυδάτωση της λυματολάσπης, με στόχο τη βελτιστοποίηση της απόδοσής τους και την προσαρμογή του σχεδιασμού και της λειτουργίας τους στις κλιματολογικές συνθήκες της νοτιοανατολικής Μεσογείου.

Επιπλέον, η μελέτη επικεντρώνεται στη συγκριτική αξιολόγηση της απόδοσης των ΤΥΑΙ υπό συνθήκες θερμοκηπίου και υπαίθριου περιβάλλοντος, προκειμένου να διερευνηθεί η δυνατότητα μείωσης της απαιτούμενης επιφάνειας αφυδάτωσης ενός τέτοιου συστήματος.

Η εν λόγω τεχνολογία προσφέρει περιβαλλοντικά βιώσιμη διαχείριση της λυματολάσπης, συμβάλλοντας στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος, στη σημαντική μείωση του λειτουργικού κόστους.

## 2. Πειραματική διάταξη

### 2.1 Χωροθέτηση πειραματικής διάταξης και κλιματολογικά στοιχεία

Η πειραματική διάταξη χωροθετείται σε υπαίθριο χώρο της ΕΕΛ στην περιοχή του Κουμπελή στα Χάνια, με συντεταγμένες 35°32'15.0"N 24°03'11.3"E και 12 μέτρα υψόμετρο.

Σύμφωνα με τον μετεωρολογικό σταθμό, που βρίσκεται σε υψόμετρο 15 μέτρων πλησίον της διάταξης, αντλήθηκαν δεδομένα για το διάστημα του πειράματος. Παρακάτω παρουσιάζονται τα μετεωρολογικά δεδομένα για τους μήνες Ιούνιος του 2023 έως Νοέμβριος του 2023 από μετεωρολογικό σταθμό που λειτουργεί το Εργαστήριο Τεχνολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος.

**Πίνακας 3-Μετεωρολογικά στοιχεία πεδίου.**

Μήνας	Μέση βροχόπτωση (mm)	Μέση θερμοκρασία (°C)	Μέγιστη θερμοκρασία (°C)	Επικρατούσα διεύθυνση ανέμου	Μέση ταχύτητα ανέμου (km/h)
Ιούνιος	34	22,9	28,1	ΒΒΔ	3,9
Ιούλιος	0	28,7	34,9	ΒΔ	4,6
Αύγουστος	0	27,1	32,8	Δ	6,6
Σεπτέμβριος	96	23,2	28,4	ΒΔ	4,7
Οκτώβριος	96	20,5	25,7	ΝΔ	4
Νοέμβριος	34	18,6	23,7	ΝΔ	7,1

### 2.2 Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Η πειραματική διάταξη της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελείται από πιλοτικές μονάδες ΤΥΑΙ για την αφυδάτωση ιλύος από την δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης της μονάδας επεξεργασίας υγρών απόβλητων στην ΕΕΛ.

Η ΕΕΛ που βρίσκεται σε λειτουργία από το 1995 προβλέπει την επεξεργασία αστικών λυμάτων που αντιστοιχούν σε 105.500 κατοίκους, βιομηχανικά απόβλητα που αντιστοιχούν σε 5.000 ισοδυνάμους κατοίκους και βοθρολύματα που αντιστοιχούν σε 7.000 ισοδυνάμους κατοίκους, δηλαδή συνολικά εξυπηρετεί 117.500 ισοδύναμους κατοίκους και 26.000 m<sup>3</sup>/d. Οι δεξαμενές δευτεροβάθμιας καθίζησης από όπου προέρχεται η ιλύς είναι τρεις, διαμέτρου 33 μέτρων και όγκου 2.130 m<sup>3</sup> η κάθε μια. Πριν την μηχανική πάχυνση η ιλύς αποθηκεύεται σε μια δεξαμενή από όπου αντλείται για την εφαρμογή της στη διάταξη του πειράματος ([www.deyach.gr](http://www.deyach.gr)).



**Εικόνα 9-Διάταξη του πειράματος.**

Οι πιλοτικές μονάδες αποτελούνται από πλαστικές κλίνες ορθογωνικής διατομής, IBC Tank, με διαστάσεις  $1,2 \times 1 \times 1 \text{ m}$  (Π×Μ×Υ) και όγκο  $1 \text{ m}^3$ . Χρησιμοποιήθηκαν τρία διαφορετικά πληρωτικά υλικά και τοποθετήθηκαν σε όλες τις κλίνες κροκάλα (G1) διαμέτρου 40-90 mm, μέσο χαλίκι (G2) διαμέτρου 8-20 mm και λεπτό χαλίκι (G3) διαμέτρου 2-8 mm. Κάθε στρώση υλικού ήταν στα 15 cm άρα στο σύνολο η πλήρωση έφτασε τα 45 cm. Σχετικά με την βλάστηση σε όλες οι μονάδες τοποθετήθηκε καλάμι *Phragmites Australis*.

Δύο από τις κλίνες τοποθετήθηκαν εντός θερμοκηπίου το οποίο κατασκευάστηκε από σκελετό PVC σωληνώσεων και βάσεις από τσιμέντο, όπως φαίνεται και στην παρακάτω φωτογραφία.





**Εικόνα 10-**Κλίνες υπό συνθήκες θερμοκηπίου.

Κάθε κλίνη διαθέτει ένα εύκαμπτο σωλήνα ο οποίος βρίσκεται στην έξοδο της κλίνης και είναι τοποθετημένο έτσι ώστε να ρέουν από εκεί τα διασταλάγματα και να περνάνε στο δοχείο συλλογής όγκου 30 λίτρων.



**Εικόνα 11-**Δοχείο συλλογής διασταλαγμάτων.



Οι κλίνες χωρίστηκαν σε δυο κατηγορίες που αφορούν την ποσότητα φόρτισης της ιλύος. Οι φορτίσεις που επιλέχτηκαν είναι 60kg TS/m<sup>2</sup>/y και 80kg TS/m<sup>2</sup>/y. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα ονόματα των κλινών με βάση τα χαρακτηριστικά τους ώστε να γίνεται η διάκριση μεταξύ τους.

**Πίνακας 4-Ονομασία κλίνης και συντομογραφίας τους.**

Ονομασία κλίνης	Συντομογραφία
<i>P.Australis</i> 60	P60
<i>P.Australis</i> Greenhouse 60	PG60
<i>P.Australis</i> 80	P80
<i>P.Australis</i> Greenhouse 80	PG80

Κοντά στις κλίνες βρίσκεται μια δεξαμενή προσωρινής αποθήκευσης ιλύος όπου από εκεί γίνεται η άντληση της για την φόρτιση των κλινών.

### 2.3 Πειραματική διαδικασία

Το πείραμα της παρούσας διπλωματικής διήρκησε περίπου 8 μήνες. Η διεξαγωγή του πειράματος μπορεί να χωριστεί σε επιμέρους στάδια και δίνεται ιδιαίτερη βάση στο κομμάτι της κατασκευής των κλινών και την έναρξη του πειράματος.

#### Κατασκευή πιλοτικών μονάδων

Για την διαμόρφωση της πειραματικής διάταξης, επιλέχθηκε η κατάλληλη τοποθεσία για την χωροθέτηση της. Αρχικά τον Μάρτιο, πραγματοποιήθηκε η αποκοπή του ανώτερου τμήματος και η καθαριότητα κάθε δεξαμενής, που θα φιλοξενήσουν τους τεχνητούς υγροβιότοπους του πειράματος. Κάθε δεξαμενή ανυψώθηκε από το έδαφος με την χρήση τσιμεντόλιθων και παλετών. Ύστερα τοποθετήθηκαν στο κάτω μέρος κάθε κλίνης σωλήνες PVC σε σχήμα Χ, όπου κάθε άκρη του σχήματος προεκτείνεται μέχρι να περάσει την επιφάνεια της κλίνης. Στα σημεία των σωλήνων που ακουμπάνε το κάτω μέρος της κλίνης δημιουργήθηκαν τρύπες ώστε να γίνεται η αποστράγγιση του υγρού αλλά και ο αέρας του περιβάλλοντος να εισέρχεται στο σύστημα. Δηλαδή δημιουργήθηκε ένα στραγγιστικό δίκτυο με παθητικό αερισμό. Στην συνέχεια, παραλήφθηκαν τα πληρωτικά υλικά τα οποία υποβλήθηκαν σε διαδικασία πλύσης και τοποθετήθηκαν στις δεξαμενές. Τα υλικά αυτά προέρχονταν από ελληνικούς ποταμούς και ήταν απαραίτητο να απομακρυνθεί το επιφανειακό χώμα προκειμένου να διασφαλιστεί η απρόσκοπτη λειτουργία του πειράματος. Η διαδικασία πλύσης πραγματοποιήθηκε ξεπλένοντας το υλικό με νερό υπό πίεση, έως ότου αφαιρεθεί το χώμα. Η παράλειψη αυτής της διαδικασίας ενδέχεται να οδηγούσε στην έμφραξη του συστήματος, καθώς το χώμα θα μπορούσε να φράξει το πληρωτικό υλικό και να προκαλέσει προβλήματα στη λειτουργία του πειράματος. Κάθε φορά που πλενόταν μια ποσότητα χαλικιού, τοποθετούνταν κατευθείαν στις κλίνες ξεκινώντας πρώτα με την κροκάλα και μετά το μεσαίο χαλίκι και τέλος το λεπτό χαλίκι. Επίσης μετά την πλήρωση τοποθετήθηκαν μεζούρες πάνω στους σωλήνες PVC ώστε να είναι εφικτή η μέτρηση του βάθους της υπολειμματικής ιλύος. Ακόμη έγινε και η τοποθέτηση των υδραυλικών μέσων επιτρέποντας την ασφαλή στράγγιση των διασταλαγμάτων μέσω σωλήνα εκροής προς τα δοχεία συλλογής. Ύστερα έγινε και η εξωτερική κάλυψη κάθε κλίνης με πλαστικό πανί χρώματος λευκού για πρόσθετη

προστασία. Τέλος έγινε και η κατασκευή και τοποθέτηση του σκελετού για την δημιουργία του θερμοκηπίου για τις δυο κλίνες. Πιο συγκεκριμένα, με την χρήση τσιμεντόλιθων δημιουργήθηκαν βάσεις ώστε να τοποθετηθούν μέσα σε αυτές οι σωλήνες PVC. Αφού δημιουργήθηκε ο σκελετός αυτός, τοποθετήθηκε περιμετρικά νάιλον.



**Εικόνα 12-**Το στραγγιστικό δίκτυο παθητικού αερισμού της κλίνης.



**Εικόνα 13-**Το πληρωτικό υλικό πριν την τοποθέτηση.

### **Συλλογή και φύτευση βλάστησης**

Η συλλογή και φύτευση της βλάστησης έγινε στα τέλη Μαρτίου 2023 από κοντινό σύστημα φυσικού υγροβιότοπου στην περιοχή του Πλατανιά. Μεταφερθήκαν από εκεί στην τοποθεσία του πειράματος και φυτεύτηκαν 7 βλαστοί σε κάθε μονάδα.



**Εικόνα 14-**Τα καλάμια πριν την φύτευση στις κλίνες.

#### **Στάδιο ωρίμανσης-σταθεροποίησης**

Αφού έγινε η τοποθέτηση των καλαμιών στο νέο περιβάλλον, τους δόθηκε ένα χρονικό διάστημα ώστε να γίνει η προσαρμογή τους. Στα τέλη Μαρτίου 2023 έγινε και η έναρξη της εφαρμογής πρωτοβάθμιου λύματος (5L/d) για να αναπτυχθεί το ριζικό τους σύστημα ικανό για την παροχή των απαραίτητων θρεπτικών συστατικών και την επιβίωσή τους.

#### **Έναρξη πειράματος**

Τα καλάμια στα μέσα του Ιουνίου έχουν αναπτυχθεί και είναι έτοιμα να ανταπεξέλθουν στις συνθήκες που θα επικρατήσουν κατά την διάρκεια του πειράματος. Οι συνθήκες αυτές περιλαμβάνουν κύκλους φόρτισης ανάπαυσης, δηλαδή ένα διάστημα κατά το οποίο δέχονται φόρτιση και ύστερα υπάρχει ένα διάστημα ανάπαυσης. Μετά την ολοκλήρωση ενός κύκλου φόρτισης λυματολάσπης, ακολουθεί η έναρξη του επόμενου. Στην παρούσα μελέτη, εξετάστηκαν διαφορετικοί κύκλοι λειτουργίας για τη βέλτιστη προσαρμογή των φυτών καλαμιού στους τεχνητούς υδροβιότοπους. Αρχικά, δοκιμάστηκε ο κύκλος 1:1, ακολουθούμενος από τους κύκλους 2:2, 3:3, 4:4, 5:5, 7:7 και 10:10. Η προοδευτική αυτή αύξηση των χρονικών διαστημάτων στοχεύει στη σταδιακή προσαρμογή των καλαμιών στις μεταβαλλόμενες συνθήκες του πειράματος. Στο τέλος των δοκιμών, ο κύκλος 7:7 αναδείχθηκε ως ο πλέον κατάλληλος, εξασφαλίζοντας τη βέλτιστη απόδοση του συστήματος για το συγκεκριμένο στάδιο του πειράματος και τις κλιματολογικές συνθήκες. Ως εκ τούτου, ο κύκλος αυτός υιοθετήθηκε και εφαρμόστηκε μέχρι την ολοκλήρωση του πειράματος.



**Εικόνα 15-**Τα καλάμια στην πρώτη μέρα εφαρμογής της φόρτισης.

Στα τέλη Ιουνίου 2023 η φόρτιση ξεκίνησε με την ιλύ που προερχόταν από τη δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης. Μία ημέρα πριν από κάθε προγραμματισμένη φόρτιση, συλλεγόταν δείγμα της ιλύος, με σκοπό τον προσδιορισμό των TS ούτως ώστε να υπολογιστεί η ποσότητα φόρτισης που θα τηρεί τους ετήσιους ρυθμούς φόρτισης του πειράματος. Αφού καθοριζόταν ο απαιτούμενος όγκος, αυτός μετατρεπόταν σε χρόνο, με βάση τη ροή της αντλίας ( $\text{m}^3/\text{s}$ ). Κατά τη διαδικασία της φόρτισης, ο σωλήνας φόρτισης διοχετεύει την ιλύ σε διάτρητο σκεύος για την ομοιόμορφη διασπορά στην επιφάνεια της κλίνης. Επιπλέον, σε κάθε φόρτιση γίνεται η μέτρηση του όγκου εκροής από κάθε κλίνη για τη δημιουργία βάσης δεδομένων που αφορά το υδάτινο ισοζύγιο. Οι μετρήσεις εκτελούνται σε τρία χρονικά σημεία: στα 15 λεπτά, στα 30 λεπτά και στη μία ώρα από την έναρξη της φόρτισης.

Στη συνέχεια, η συλλογή και ανάλυση των διασταλαγμάτων επαναλαμβάνονταν μία έως δύο φορές το μήνα. Παράλληλα με την ανάλυση των εκροών, γινόταν και ανάλυση της εισροής, δηλαδή της ίδιας της ιλύος. Τέλος, όταν σχηματίστηκε μια ικανοποιητική στρώση υπολειμματικής ιλύος, έγινε συλλογή δείγματος και ανάλυσή της. Μια φορά τον μηνά πριν την έναρξη της φόρτισης γινόταν και μετρήσεις του βάθους της ξηρής λάσπης αλλά και μετρήσεις του ύψους των καλαμιών.

### **Ολοκλήρωση του πειράματος**

Έπειτα από έξι μήνες εφαρμογής, κατά τη διάρκεια των οποίων πραγματοποιήθηκαν 24 κύκλοι φόρτισης, συγκεντρώθηκαν τα απαραίτητα δεδομένα σχετικά με τα διασταλάγματα, την υπολειμματική ιλύ και την ανάπτυξη των καλαμιών. Αυτά τα δεδομένα αποτέλεσαν τη βάση για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας του συστήματος.

## 2.4 Αναλυτικές μέθοδοι

Σημαντικό κομμάτι της παρούσας εργασίας αποτελούν οι εργαστηριακές αναλύσεις, μέσω των οποίων παρέχεται η δυνατότητα διαπίστωσης της απομάκρυνσης των παραμέτρων από την εφαρμοζόμενη εισροή συγκρίνοντας την με τις συγκεντρώσεις των ρύπων στις εκροές των πιλοτικών μονάδων. Οι αναλύσεις των δειγμάτων εισροής, δηλαδή της ιλύος από την ΔΔΚ, περιλαμβάνουν τον προσδιορισμό των παραμέτρων TS (total solids), VS (volatile solids), MLSS (mixed liquor suspended solids), Σχετική πυκνότητα (density), Νιτρικό άζωτο ( $\text{NO}_3^-$ -N), Αμμωνιακό άζωτο ( $\text{NH}_4^+$ -N), Ολικό Άζωτο (TN), Φωσφορικά ( $\text{PO}_4^{3-}$ -P), Ολικός Φώσφορος (TP), Ολικά μέταλλα (TM), pH και Αγωγιμότητα. Ενώ οι αναλύσεις για την υπολειμματική ιλύ, δηλαδή της λάσπης που συσσωρεύεται στις μονάδες, αποτελούνται από τον προσδιορισμό των παραμέτρων TS (total solids), VS (volatile solids), Νιτρικό άζωτο ( $\text{NO}_3^-$ -N), Αμμωνιακό άζωτο ( $\text{NH}_4^+$ -N), Ολικός Φώσφορος (TP), Ολικά μέταλλα (TM), pH και Αγωγιμότητα. Τέλος οι αναλύσεις των διασταλαγμάτων, περιλαμβάνουν τον προσδιορισμό των παραμέτρων TSS (total suspended solids), COD, BOD<sub>5</sub>, Νιτρικό άζωτο ( $\text{NO}_3^-$ -N), Αμμωνιακό άζωτο ( $\text{NH}_4^+$ -N), Φωσφορικά ( $\text{PO}_4^{3-}$ -P), Ολικός Φώσφορος (TP), pH και Αγωγιμότητα.

### 2.4.1 Μέθοδοι δειγμάτων ιλύος

#### i. Προσδιορισμός ολικών στερεών (TS)

Για τον υπολογισμό των ολικών στερεών πρώτα ζυγίζονται οι κάψες πριν χρησιμοποιηθούν σε ζυγό SHIMADZU LIBROR AEG-220 ακρίβειας 0,0001g και μετά από καλή ανακίνηση του δείγματος τοποθετείται μια ποσότητα. Έπειτα οι κάψες τοποθετούνται στον φούρνο για ξήρανση στους 103°C για μια ώρα. Ύστερα, όταν η θερμοκρασία τους φτάσει σε θερμοκρασία δωματίου, πραγματοποιείται εκ νέου ζύγιση και προσδιορισμός της ξηρής μάζας του. Ο υπολογισμός των ολικών αιωρούμενων στερεών πραγματοποιείται με την χρήση του παρακάτω μαθηματικού τύπου.

$$TS = \frac{\text{βάρος δείγματος ξηρό}(g) - \text{βάρος δείγματος υγρό}(g)}{\text{βάρος δείγματος υγρό}(g)} 100\%$$

#### ii. Προσδιορισμός πτητικών στερεών (VS)

Μετά την ξήρανση για τον προσδιορισμό των TS οι κάψες τοποθετούνται στον φούρνο στους 550°C για 4 ώρες. Αφού η θερμοκρασία τους φτάσει σε θερμοκρασία δωματίου, πραγματοποιείται εκ νέου ζύγιση και προσδιορισμός. Ο υπολογισμός των πτητικών αιωρούμενων στερεών πραγματοποιείται με την χρήση του παρακάτω μαθηματικού τύπου.

$$VS = \frac{\text{βάρος δείγματος μετ' την ξήρανση στους } 103^\circ\text{C}(g) - \text{βάρος δείγματος μετ' την ξήρανση στους } 550^\circ\text{C}(g)}{\text{βάρος δείγματος μετ' την ξήρανση στους } 103^\circ\text{C}(g) - \text{βάρος δείγματος πριν}(g)} 100\%$$

#### iii. Προσδιορισμός αιωρούμενων στερεών (MLSS)

Για τον υπολογισμό των αιωρούμενων στερεών πρώτα ζυγίζεται το υαλόφιλτρο διήθησης τύπου GF/C της εταιρείας Whatman και διαμέτρου περίπου 1μm πριν



χρησιμοποιηθεί σε ζυγό SHIMADZU LIBROR AEG-220 ακρίβειας 0,0001g και μετά από καλή ανακίνηση του δείγματος διηθείται ποσότητα 20 ml στο φίλτρο με την βοήθεια αντλίας κενού της εταιρείας Vaccubrand παροχής 3,6 / 4,0 m<sup>3</sup>/h. Στην συνέχεια το φίλτρο τοποθετούνται στον φούρνο για ξήρανση στους 103°C για μια ώρα. Ύστερα, όταν η θερμοκρασία του φτάσει σε θερμοκρασία δωματίου, πραγματοποιείται εκ νέου ζύγιση και προσδιορισμός της ξηρής μάζας του. Ο υπολογισμός των αιωρούμενων στερεών πραγματοποιείται με την χρήση του παρακάτω μαθηματικού τύπου.

$$MLSS(\frac{mg}{L}) = \frac{\text{βάρος φίλτρου μετά}(g) - \text{βάρος φίλτρου πριν}(g)}{\text{όγκος διηθημένου δείγματος}(L)}$$

iv. Προσδιορισμός σχετικής πυκνότητας

Για την μέτρηση χρησιμοποιείται ένας ογκομετρικός σωλήνας ο οποίος τοποθετείται σε ζυγό SHIMADZU LIBROR AEG-220 ακρίβειας 0,0001g και μηδενίζεται. Μετά το δείγμα ανακινείται καλά και τοποθετείται ποσότητα 20ml και ζυγίζεται. Ο υπολογισμός της σχετικής πυκνότητας πραγματοποιείται με την χρήση του παρακάτω μαθηματικού τύπου.

$$\rho = \frac{\text{βάρος } 20 \text{ mL δείγματος}(g)}{\text{όγκος δείγματος}(mL)}$$

v. Προσδιορισμός νιτρικού αζώτου (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)

Για τον προσδιορισμό του νιτρικού αζώτου χρησιμοποιήθηκε το kit Nitrate Cell Test HCO36730 φασματοφωτομετρικής μεθόδου της WTW για εύρος συγκεντρώσεων 0,5-25,0 mg/l NO<sub>3</sub>-N. Αρχικά, πραγματοποιείται διήθηση του δείγματος σε φίλτρα μεμβράνης Whatman 0,45μm. Στη συνέχεια ακολουθήθηκαν τα απαραίτητα βήματα με την χρήση του kit και η εισαγωγή των δειγμάτων εντός των φιαλιδίων. Τέλος, τα φιαλίδια μετρήθηκαν στο φασματοφωτόμετρο στα 365nm και με την χρήση της καμπύλης βαθμονόμησης (βλέπε Παράτημα Α) υπολογίστηκαν οι συγκεντρώσεις των δειγμάτων.

vi. Προσδιορισμός αμμωνιακού αζώτου (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)

Για την μέτρηση του αμμωνιακού αζώτου έγινε χρήση του kit Ammonium Test 1.00683.0001 φασματοφωτομετρικής μεθόδου της εταιρείας Supelco για εύρος συγκεντρώσεων 2,0-150 mg/l NH<sub>4</sub>-N. Πρώτα, πραγματοποιείται διήθηση του δείγματος σε φίλτρα μεμβράνης Whatman 0,45μm. Ύστερα ακολουθήθηκαν τα απαραίτητα βήματα με την χρήση του kit και η εισαγωγή των δειγμάτων εντός των φιαλιδίων. Και τέλος τα φιαλίδια μετρήθηκαν στο φασματοφωτόμετρο στα 690nm και μέσω της καμπύλης βαθμονόμησης (βλέπε Παράτημα) υπολογίστηκαν οι συγκεντρώσεις των δειγμάτων.

vii. Προσδιορισμός ολικού αζώτου (TN)

Η μέτρηση του ολικού αζώτου πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας ένα φιαλίδιο και τοποθετώντας 0,25ml από το δείγμα και 9,75ml απιονισμένο νερό και ακολουθήθηκε η διαδικασία του kit Nitrogen (Total) Cell Test 1.4763.0001

φασματοφωτομετρικής μεθόδου της Merck για εύρος συγκεντρώσεων 10-1500 mg/L N. Έπειτα, τα δείγματα φωτομετρήθηκαν στο φασματοφωτόμετρο της Merck Nova 60 που περιείχε την καμπύλη βαθμονόμησης και παρείχε μετρήσεις σε μορφή συγκεντρώσεων mg/L.

viii. Προσδιορισμός φωσφορικών ( $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ )

Για τον προσδιορισμό των φωσφορικών των δειγμάτων με την πρότυπη μέθοδο 4550-P Ascorbic Acid Method είναι απαραίτητη η παρασκευή ενός διαλύματος που θα περιέχει τα παρακάτω συστατικά:

1. Sulfuric Acid 5M: 70mL στα 500mL
2. Potassium Antimony Tartrate: 0,2734g στα 100mL
3. Ammonium Molybdate: 10g στα 100mL
4. Ascorbic Acid: 0,88 g στα 50mL

Με το πέρας της παρασκευής των παραπάνω, παρασκευάζεται ένα διάλυμα όγκου 100ml όπου περιέχει 50ml από το (1), 5ml από το (2), 15ml από το (3) και 30ml από το (4). Έπειτα, γίνεται προσθήκη 4ml του παραπάνω διαλύματος σε 25ml διηθημένου δείγματος με φίλτρο 0,45μm με την κατάλληλη αραίωση. Τέλος, πραγματοποιείται μέτρηση των διαλυμάτων στο φασματοφωτόμετρο SHIMADZU UV-1202 στα 880nm και υπολογισμός των συγκεντρώσεων με την καμπύλη στο Παράρτημα Α.



**Εικόνα 16-**Δείγματα με το χαρακτηριστικό χρώμα της πρότυπης μεθόδου μέτρησης των φωσφορικών.

- ix. Προσδιορισμός ολικού φωσφόρου (TP)  
Για τον προσδιορισμό του ολικού φωσφόρου αρχικά χρησιμοποιήθηκαν 10ml δείγματος, 20ml απιονισμένου νερού, 5ml νιτρικό οξύ και 1ml θειικό οξύ. Το μείγμα αυτό χωνεύεται στους 250°C μέχρι περίπου να μείνει 1ml και ύστερα ακολουθεί η ρύθμιση του pH στο εύρος 6 έως 8. Ύστερα συμπληρώνεται στα 30ml και τοποθετείται για φυγοκέντρωση για 10 λεπτά στους 4000rpm και μετά διηθείται με φίλτρο μεμβράνης 0,45μm. Έπειτα πραγματοποιείται η ίδια μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση των φωσφορικών, δηλαδή προστίθενται 4ml από το διάλυμα που αναφέρεται παραπάνω σε 25ml δείγματος με την κατάλληλη αραίωση. Τέλος, μετρούνται στο φασματοφωτόμετρο της εταιρίας SHIMADZU UV-1202 στα 880nm και υπολογίζονται οι συγκεντρώσεις μέσω της καμπύλης βαθμονόμησης που παρουσιάζεται στο Παράρτημα Α.
- x. Προσδιορισμός ολικών μετάλλων (TM)  
Για τον προσδιορισμό των ολικών μετάλλων χρησιμοποιήθηκαν 15ml δείγματος, 15ml απιονισμένου νερού, 1ml νιτρικό οξύ και 5ml υδροχλώριο. Το μείγμα αυτό χωνεύεται για 1 ώρα στους 400°C μέχρι περίπου να μείνουν 10ml. Μετά διηθείται με φίλτρο μεμβράνης 0,45μm και συμπληρώνεται απιονισμένο νερό ώστε να φτάσει στα 30 ml και τέλος συλλέγεται σε ειδικά φιαλίδια και τοποθετείται στο ψυγείο μέχρι τη στιγμή της μέτρησης. Η ολική συγκέντρωση των μετάλλων στη λάσπη υπολογίστηκε στο σύστημα Φασματομετρίας ατομικών μαζών σε επαγωγικά συζευγμένο πλάσμα (ICP-MS) του οίκου Agilent μοντέλο CX 7500 series, στο εργαστήριο Υδρογεωχημικής Μηχανικής και Αποκατάστασης Εδαφών της Σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης.
- xi. Προσδιορισμός χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (COD)  
Για το προσδιορισμό του COD, χρησιμοποιήθηκε το kit COD Cell Test 2420722 Φασματοφωτομετρικής μεθόδου για εύρος συγκεντρώσεων 0-15000 mg/l της εταιρίας WTW. Αρχικά τοποθετούνται 0,2 ml στο φιαλίδιο του kit εύρους 0-15000 mg/l και στην συνέχεια τοποθετούνται σε προθερμασμένη εστία στους 148°C για 2 ώρες. Αφού έχουν επέλθει τα φιαλίδια σε θερμοκρασία περιβάλλοντος τοποθετούνται στο φασματοφωτόμετρο της εταιρίας SHIMADZU UV-1202, όπου έχει ρυθμιστεί στα 610nm και μηδενιστεί με την χρήση του τυφλού διαλύματος για κάθε kit. Στην συνέχεια γίνεται καταγραφή της απορρόφησης κάθε φιαλιδίου και τέλος υπολογίζονται οι συγκεντρώσεις των δειγμάτων με την χρήση καμπύλων βαθμονόμησης που κατασκευάστηκαν με πρότυπα διαλύματα και παρατίθενται στο Παράρτημα Α.
- xii. Προσδιορισμός pH  
Η μέτρηση του pH πραγματοποιήθηκε με την συσκευή CRISON microPH 2002. Πριν την έναρξη της μέτρησης έγινε βαθμονόμηση της συσκευής με την χρήση διαλυμάτων με pH 4 και 7. Ύστερα έγινε η λήψη της μέτρησης βυθίζοντας το ηλεκτρόδιο της συσκευής μέσα στα δείγματα και καταγράφοντας τις τιμές τους.



- xiii. Προσδιορισμός ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC)  
Η αγωγιμότητα μετρήθηκε με την συσκευή CRISON microCM 2202, η οποία βαθμονομείται αυτόνομα, βυθίζοντας το ηλεκτρόδιο στα δείγματα και καταγράφοντας τις τιμές τους.

#### **2.4.2 Μέθοδοι δειγμάτων υπολειμματικής ιλύος**

- i. Προσδιορισμός ολικών στερεών (TS)  
Για τον υπολογισμό των ολικών αιωρούμενων στερεών ισχύει η ίδια διαδικασία που αναφέρεται παραπάνω για την ιλύ.
- ii. Προσδιορισμός πτητικών αιωρούμενων στερεών (VS)  
Για τον υπολογισμό των πτητικών αιωρούμενων στερεών ισχύει η ίδια διαδικασία που αναφέρεται παραπάνω για την ιλύ.
- iii. Προσδιορισμός νιτρικού αζώτου ( $\text{NO}_3^-$ -N)  
Για τον προσδιορισμό του νιτρικού αζώτου περίπου 0,5 g δείγματος ξηρής ιλύς ζυγίζεται και καταγράφεται η ακριβής μάζα και ύστερα αναμειγνύονται με 25 ml KCL 2M για να πραγματοποιηθεί εκχύλιση. Το δείγμα στην συνέχεια αφήνεται για ανάδευση για 1 ώρα στα 100rpm. Έπειτα από την ανάδευση το δείγμα αφήνεται σε συνθήκες ηρεμίας για 30 λεπτά ώστε να καθιζάνει το στερεό μέρος του δείγματος. Στην συνέχεια ακολουθείται διήθηση του δείγματος με φίλτρο μεμβράνης Whatman 0,45  $\mu\text{m}$  και μετά η κατάλληλη προετοιμασία τους σύμφωνα με τις οδηγίες του kit Nitrate Cell Test 91865 Φασματοφωτομετρικής μεθόδου για εύρος συγκεντρώσεων 0,1-30 mg/l της εταιρίας Nanocolor. Τέλος, το δείγμα τοποθετήθηκε για μέτρηση στο φασματοφωτόμετρο στα 410nm και με την χρήση της καμπύλης βαθμονόμησης (βλέπε Παράτημα) υπολογίστηκε η συγκέντρωση του δείγματος.



**Εικόνα 17-**Δείγμα υπολειμματικής ιλύος στον ζυγό.

- iv. Προσδιορισμός αμμωνιακού αζώτου ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ )  
Για τον προσδιορισμό των αμμωνιακών περίπου 0,5 g δείγματος ξηρής ιλύς ζυγίζεται και καταγράφεται η ακριβής μάζα και ύστερα αναμειγνύονται με 25 ml KCL 2M για να πραγματοποιηθεί εκχύλιση. Το δείγμα στην συνέχεια αφήνεται για ανάδευση για 1 ώρα στα 100rpm. Έπειτα από την ανάδευση το δείγμα αφήνεται σε συνθήκες ηρεμίας για 30 λεπτά ώστε να καθιζάνει το στερεό μέρος του δείγματος. Στην συνέχεια ακολουθείται διήθηση του δείγματος με φίλτρο μεμβράνης Whatman 0,45  $\mu\text{m}$  και μετά η κατάλληλη προετοιμασία τους σύμφωνα με τις οδηγίες του kit. Τέλος, το δείγμα τοποθετήθηκε για μέτρηση στο φασματοφωτόμετρο στα 690nm και με την χρήση της καμπύλης βαθμονόμησης (βλέπε Παράρτημα) υπολογίστηκε η συγκέντρωση του δείγματος.
- v. Προσδιορισμός ολικού φωσφόρου (TP)  
Για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης του ολικού φωσφόρου περίπου 0,5 g δείγματος ξηρής ιλύς ζυγίζεται και καταγράφεται η ακριβής μάζα και ύστερα αναμείχθηκαν με 25ml απιονισμένου νερού καθώς και 1ml  $\text{H}_2\text{SO}_4$  και 0,5g  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ . Το δείγμα στη συνέχεια αφήνεται για χώνευση στην απαγωγό εστία μέχρι ο όγκος του δείγματος να κατέβει στα 10ml και έπειτα γίνεται η απαραίτητη ρύθμιση του pH ώστε να φτάσει περίπου στο 6 με 8. Το δείγμα στη συνέχεια διηθείται σε φίλτρο Whatman 0,45nm και του προστίθεται απιονισμένο νερό μέχρι να φτάσει τον αρχικό του όγκο στα 25ml. Έπειτα, γίνεται προσθήκη 4ml του διαλύματος με τα τέσσερα αντιδραστήρια που χρησιμοποιείται και στις παραπάνω μεθόδους σε 25ml διηθημένου δείγματος με φίλτρο 0,45 $\mu\text{m}$  με την κατάλληλη αραιώση. Τέλος, πραγματοποιείται μέτρηση των διαλυμάτων στο φασματοφωτόμετρο SHIMADZU

UV-1202 στα 880nm και υπολογισμός των συγκεντρώσεων με την καμπύλη στο Παράρτημα Α.



**Εικόνα 18-**Δείγματα ξηρής λάσπης στην εστία χώνευσης.

- vi. Προσδιορισμός pH  
Η μέτρηση του pH πραγματοποιήθηκε με την συσκευή CRISON microPH 2002. Πριν την έναρξη της μέτρησης έγινε βαθμονόμηση της συσκευής με την χρήση διαλυμάτων με pH 4 και 7. Για την προετοιμασία του δείγματος 5g ξηρής ιλύς αναμειγνύονται με 12,5ml απιονισμένου νερού και τοποθετούνται σε ειδική συσκευή ανάδευσης για 1 ώρα στα 100rpm. Το διάλυμα στη συνέχεια αφήνεται σε συνθήκες ηρεμίας για την επόμενη 1 ώρα και στο τέλος βυθίζοντας το ηλεκτρόδιο της συσκευής μέσα στα δείγματα καταγράφονται οι τιμές τους.
- vii. Προσδιορισμός ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC)  
Η αγωγιμότητα μετρήθηκε με την συσκευή CRISON microCM 2202, η οποία βαθμονομείται αυτόνομα. Για την προετοιμασία του δείγματος ακολουθείται η ίδια διαδικασία που αναφέρεται παραπάνω για το pH.
- viii. Προσδιορισμός ολικών μετάλλων (TM)  
Για τον προσδιορισμό των ολικών μετάλλων προετοιμάζεται κατάλληλο διάλυμα που περιέχει 0,25g ξηρή ιλύς, 6,5ml υδροχλωρίου (HCL) και 3,5ml νιτρικό οξύ (HNO<sub>3</sub>). Ύστερα τα δείγματα παραμένουν κάτω από τον απαγωγέα ώστε να φύγουν οι ατμοί που δημιουργούνται. Το διάλυμα τοποθετείται σε ειδικό αναδευτήρα στα 100rpm για 24 ώρες. Μετά τη χώνευση ακολουθεί η διήθηση του δείγματος σε φίλτρα μεμβράνης Whatman 0,45nm και το διήθημα συλλέγεται σε ειδικά φιαλίδια και τοποθετείται στο ψυγείο μέχρι τη στιγμή της μέτρησης. Η ολική συγκέντρωση των μετάλλων στη λάσπη υπολογίστηκε στο σύστημα Φασματομετρίας ατομικών μαζών

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

#### 2.4.3 Μέθοδοι δειγμάτων διασταλαγμάτων

i. Προσδιορισμός ολικών αιωρούμενων στερεών (TSS)

Για τον υπολογισμό των ολικών αιωρούμενων στερεών πρώτα ζυγίζονται τα υαλόφιλτρα διήθησης τύπου GF/C της εταιρείας Whatman και διαμέτρου περίπου 47mm πριν χρησιμοποιηθούν σε ζυγό SHIMADZU LIBROR AEG-220 ακρίβειας 0,0001g και μετά από καλή ανακίνηση του δείγματος διηθείται μια ικανοποιητική ποσότητα του δείγματος με την βοήθεια αντλίας κενού της εταιρείας Vaccubrand παροχής 3,6 / 4,0 m<sup>3</sup>/h. Στην συνέχεια το φίλτρο τοποθετούνται στον φούρνο για ξήρανση στους 103°C για μια ώρα. Ύστερα, όταν η θερμοκρασία του φτάσει σε θερμοκρασία δωματίου, πραγματοποιείται εκ νέου ζύγιση και προσδιορισμός της ξηρής μάζας του. Ο υπολογισμός των αιωρούμενων στερεών πραγματοποιείται με την χρήση του παρακάτω μαθηματικού τύπου.

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

ii. Προσδιορισμός νιτρικού αζώτου (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)

Για τον προσδιορισμό του νιτρικού αζώτου ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία που αναφέρεται παραπάνω για την ιλύ.

iii. Προσδιορισμός αμμωνιακού αζώτου (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)

Για την μέτρηση του αμμωνιακού αζώτου ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία που αναφέρεται παραπάνω για την ιλύ.

iv. Προσδιορισμός φωσφορικών (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P)

Για τον προσδιορισμό των φωσφορικών ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία που αναφέρεται παραπάνω για την ιλύ.

v. Προσδιορισμός ολικού φωσφόρου (TP)

Για τον προσδιορισμό του ολικού φωσφόρου ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία που αναφέρεται παραπάνω για την ιλύ.

vi. Προσδιορισμός χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (COD)

Για το προσδιορισμό του COD, χρησιμοποιήθηκε το kit COD Cell Test 2420721 Φασματοφωτομετρικής μεθόδου για εύρος συγκεντρώσεων 0-1500 mg/l της εταιρίας WTW και το kit COD Cell Test 2420722 Φασματοφωτομετρικής μεθόδου για εύρος συγκεντρώσεων 0-15000 mg/l της εταιρίας WTW αναλόγως με τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζει το δείγμα. Αρχικά τοποθετούνται 2ml δείγματος στα φιαλίδια που περιέχονται στο kit εύρους 0-1500 mg/l και 0,2 ml στο kit εύρους 0-15000 mg/l και στην συνέχεια τοποθετούνται σε προθερμασμένη εστία στους

148°C για 2 ώρες. Αφού έχουν επέλθει τα φιαλίδια σε θερμοκρασία περιβάλλοντος τοποθετούνται στο φασματοφωτόμετρο της εταιρίας SHIMADZU UV-1202, όπου έχει ρυθμιστεί στα 610nm και μηδενιστεί με την χρήση του τυφλού διαλύματος για κάθε kit. Στην συνέχεια γίνεται καταγραφή της απορρόφησης κάθε φιαλιδίου και τέλος υπολογίζονται οι συγκεντρώσεις των δειγμάτων με την χρήση καμπύλων βαθμονόμησης που κατασκευάστηκαν με πρότυπα διαλύματα και παρατίθενται στο Παράρτημα Α.

- vii. Προσδιορισμός βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου (BOD<sub>5</sub>)  
Για τον προσδιορισμό του BOD<sub>5</sub>, χρησιμοποιήθηκε κατάλληλη φιάλη όγκου 500ml με πιεζομετρικό αισθητήρα OxīTop της WTW. Κατά την πειραματική διαδικασία, επιλέχθηκε ο κατάλληλος όγκος δείγματος σύμφωνα με την αναμενόμενη τιμή BOD<sub>5</sub> και τοποθετήθηκε στην φιάλη μαζί με ένα μαγνήτη ενώ στη συνέχεια σφραγίστηκε με τον ηλεκτρονικό αισθητήρα και τοποθετήθηκε σε περιβάλλον 20°C εντός κατάλληλης βάσης που πραγματοποιεί την ανάδευση.



**Εικόνα 19-**Φιάλες με πιεζομετρικό αισθητήρα για την μέτρηση του BOD<sub>5</sub>.

- viii. Προσδιορισμός pH  
Η μέτρηση του pH πραγματοποιήθηκε με την ίδια διαδικασία που αναφέρεται παραπάνω για την ιλύ.
- ix. Προσδιορισμός ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC)  
Η αγωγιμότητα μετρήθηκε με την ίδια διαδικασία που αναφέρεται παραπάνω για την ιλύ.

### 3. Αποτελέσματα και συζήτηση

#### 3.1 Υδάτινο ισοζύγιο

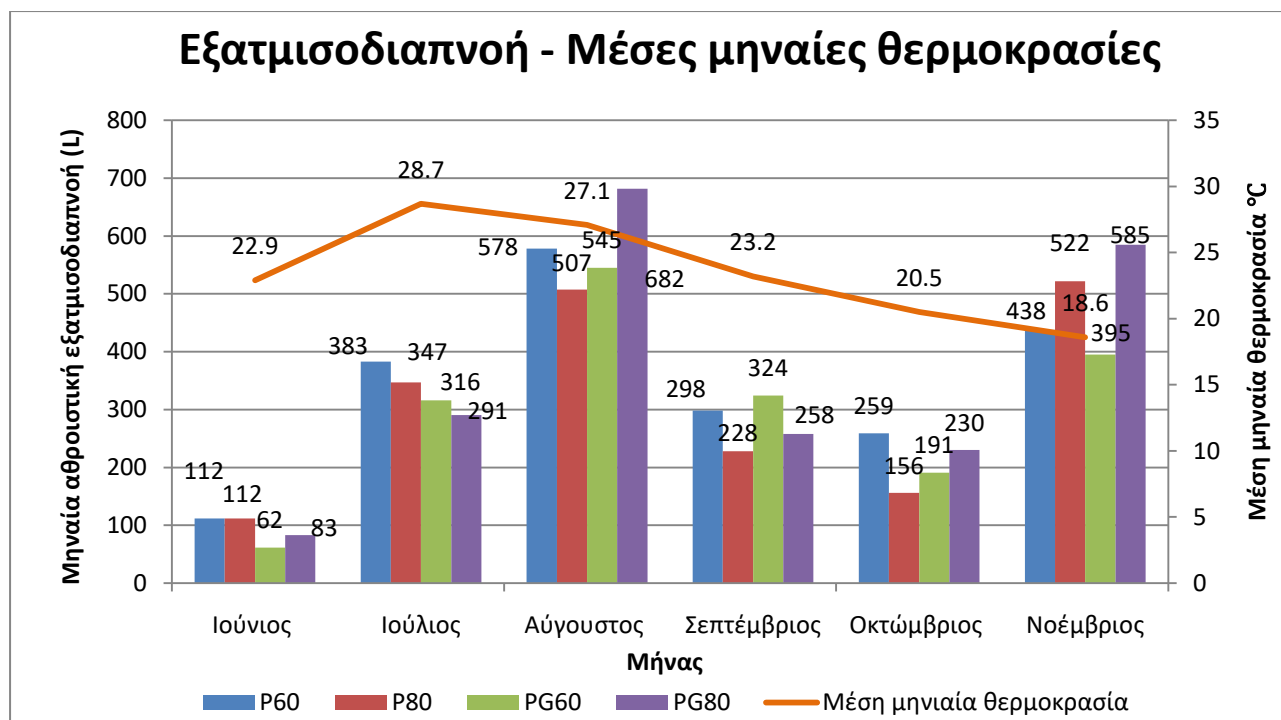
Το υδάτινο ισοζύγιο εκπροσωπεί μια συνάρτηση των εισροών και των εκροές υδάτων ενός συστήματος. Η παράμετρος που μας απασχολεί στη συνάρτηση αυτή είναι η εξατμισοδιαπνοή που αναφέρεται στο φαινόμενο της απώλειας νερού που επιτυγχάνεται με την εξάτμιση και την αναπνοή της βλάστησης. Εξαρτάται από το είδος της βλάστης και ριζικό του σύστημα αλλά και από τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής, δηλαδή τη θερμοκρασία, την ηλιακή ακτινοβολία, τις βροχοπτώσεις, την υγρασία και την ταχύτητα του ανέμου. Για την κατασκευή του διαγράμματος χρησιμοποιήθηκαν και τα δεδομένα για των μηνιαίων αθροιστικών βροχοπτώσεων και τις μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες που παρουσιάζονται στον πίνακα 3. Η ET προσδιορίστηκε από τον παρακάτω τύπο:

$$\left\{ \begin{array}{l} P + Q_{ws} - E_s - Q_{ds} = \Delta V_1(1) \\ Q_{ds} - T - Q_d = \Delta V_2(2) \end{array} \right\} \rightarrow ET = E_s + T = P + Q_{ws} - Q_d - \Delta V_1 - \Delta V_2$$

(Stefanakis, 2011)

Όπου, ET είναι ο εκτιμώμενος όγκος εξατμισοδιαπνοής (L),  $Q_{ws}$  είναι ο όγκος νερού που περιέχεται στην ενεργό ιλύ (L),  $Q_{ds}$  είναι ο όγκος νερού που αποστραγγίζεται στο κάτω στρώμα του πορώδους μέσου (L),  $Q_d$  είναι ο όγκος νερού που αποστραγγίζεται από τον πυθμένα της μονάδας (L),  $E_s$  είναι ο όγκος εξάτμισης από την επιφάνεια του στρώματος ιλύος (L), T είναι ο όγκος διαπνοής των φυτών από το στρώμα πορώδους μέσου (L), P είναι ο όγκος κατακρήμνισης (L),  $V_1$  είναι ο όγκος νερού στην υπολειμματική ιλύ στο τέλος κάθε περιόδου ανάπαυσης πριν από την προσθήκη του νέου φορτίου ιλύος (L),  $V_2$  είναι ο όγκος νερού στο στρώμα πορώδους μέσου (L).

Η εξατμισοδιαπνοή μπορεί να εκφραστεί είτε σε χιλιοστά (mm) είτε σε λίτρα (L), καθώς 1 mm ύψος νερού αντιστοιχεί σε 1 L ανά τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας. Στην προκειμένη περίπτωση, δεδομένου ότι ο όγκος των κλινών είναι 1 m<sup>3</sup>, δηλαδή αντιστοιχεί σε επιφάνεια 1 m<sup>2</sup>, οι τιμές της εξατμισοδιαπνοής σε mm και L είναι αριθμητικά ισοδύναμες.



**Διάγραμμα 1**-Διάγραμμα εξατμισοδιαπνοής για τις κλίνες της διάταξης και μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η εξατμισοδιαπνοή εξαρτάται από τις κλιματικές συνθήκες. Το πείραμα διεξήχθη κατά τους καλοκαιρινούς μήνες προς τους φθινοπωρινούς όπου παρατηρούνται οι πιο υψηλές θερμοκρασίες μέσα στον χρόνο και οι βροχοπτώσεις είναι μηδενικές έως ελάχιστες, με τη μέγιστη βροχόπτωση να φτάνει τον Σεπτέμβριο με 96 mm. Να σημειωθεί ότι οι κλίνες της διάταξης δέχονταν ηλιακή ακτινοβολία σχεδόν όλη την ημέρα. Ακόμη, οι μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες που επικρατούσαν κυμαίνονταν από 18,6°C τον Νοέμβριο μέχρι 28,1°C τον Ιούλιο ευνοώντας έτσι τις συνθήκες τις εξατμισοδιαπνοής. Ακόμη, το *P.australis* αντέχει σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών από 0 έως και 40°C (Srivastava et al., 2014), οπότε η ανάπτυξη του αν και καλοκαίρι δεν περιορίστηκε. Τέλος, οι άνεμοι που επικρατούσαν ήταν ασθενής που κυμαίνονταν από 3,9 έως 7,1 km/h.

Καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος το καλάμι βρισκόταν σε στάδιο ανάπτυξης οπότε και οι ανάγκες σε νερό μεγιστοποιούνται με το φυτό να λαμβάνει μεγάλες ποσότητες, δηλαδή ο κύριος μηχανισμός απομάκρυνσης του νερού είναι η εξατμισοδιαπνοή.

Την εντονότερη εξατμισοδιαπνοή την παρατηρούμε τον μήνα Αύγουστο όπου και η μέση θερμοκρασία είναι 27,1°C και η υψηλότερη εξατμισοδιαπνοή εμφανίζεται στην PG80 με τιμή 682 L που πιθανό να οφείλεται στο ότι η κλίνη είναι εντός θερμοκηπίου. Αν και τον Ιούλιο η μέση θερμοκρασία είναι υψηλότερη, η εξατμισοδιαπνοή είναι χαμηλότερη συγκριτικά με τον Αύγουστο. Αυτό μπορεί να οφείλεται στις εντονότερες ταχύτητες του ανέμου τον μήνα Αυγούστου που εμφάνισαν μέση ταχύτητα 6,6 km/h.

Για τους μήνες Σεπτέμβριο και Οκτώβριο δεν παρατηρούνται έντονες διαφορές μεταξύ των εξατμισοδιαπνοών καθώς οι τιμές για τη μέση θερμοκρασία, τη μέση βροχόπτωση και τη μέση ταχύτητα αέρα είναι παρόμοιες για τους δυο μήνες αυτούς.

Τον μήνα Νοέμβριο οι τιμές είναι υψηλές και κοντινές με αυτές του Αύγουστου ενώ η μέση θερμοκρασία πέφτει. Όμως επικρατούν εντονότεροι άνεμοι σε σχέση με τους προηγούμενους μήνες με τη μέση ταχύτητα να φτάνει τα 7,1 km/h το οποίο μπορεί να δικαιολογήσει τις τιμές της εξατμισοδιαπνοής.

Να σημειωθεί ότι το μήνα Ιούνιο οι τιμές είναι χαμηλές καθώς οι μετρήσεις αφορούν το τελευταίο δεκαήμερο και όχι όλο τον μήνα, οπότε είναι δύσκολο να καταλήξουμε σε κάποιο συμπέρασμα.

Τέλος, παρατηρήθηκε ότι οι τιμές της PG80 και της PG60 ήταν κυρίως υψηλότερες από εκείνες της P80, ενώ η P60 παρουσίασε τιμές πολύ κοντά σε αυτές των PG80 και PG60. Οπότε οι τιμές της εξατμισοδιαπνοής επηρεάζονται από την χρήση θερμοκηπίου και λόγω των υψηλότερων θερμοκρασιών που επικρατούν είναι και αυξημένες. Επίσης παρατηρείται ότι κυρίως η κλίνη PG80 με φόρτιση 80kg TS/m<sup>2</sup>/γ είχε μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με την PG60, αλλά δεν μπορούμε να πούμε το ίδιο ότι ισχύει για τις P60 και P80 καθώς όλους τους μήνες εκτός του Νοέμβριου είχε υψηλότερη εξατμισοδιαπνοή η φόρτιση των 60kg TS/m<sup>2</sup>/γ.

## 3.2 Φυσικοχημικές αναλύσεις

### 3.2.1 Χαρακτηρισμός λυματολάσσης

Η εισροή προέρχεται, όπως προαναφέρθηκε, από την καθίζηση της δευτεροβάθμιας δεξαμενής της ΕΕΛ Χανίων. Παρακάτω παρουσιάζονται οι πίνακες με τα συγκεντρωτικά χαρακτηριστικά των παραμέτρων της λυματολάσσης αλλά και των μετάλλων της.

**Πίνακας 5-**Μέσες τιμές των παραμέτρων της λυματολάσσης.

Παράμετροι	Μέση τιμή	Εύρος τιμών
MLSS (g/kg)	12,84 ± 0,91	[8,74-22,7]
TN (mg/ kg)	367,8 ± 17,4	[212-508 ]
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N (mg/ kg)	11,11 ± 3,14	[1-38,14]
NO <sub>3</sub> -N (mg/ kg)	1,52 ± 0,49	[0,2-4,89]
TP (mg/ kg)	99,17 ± 12,29	[30-213,4]
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P (mg/ kg)	21,31 ± 6,96	[0,71-92,46]
COD (mg/ kg)	8858,85 ± 1418,31	[1818-10706]
TS (%)	1,24 ± 0,05	[0,38-1,9]
VS (%TS)	79,97 ± 0,71	[67,2-94,3]
pH	6,8 ± 0,03	[6,41-7,04]
Αγωγιμότητα (μS/cm)	983,00 ± 82,99	[698-1573]
Σχετική πυκνότητα (kg/L)	0,995 ± 0,003	[0,99-1,01]

**Πίνακας 6-**Τυπικές χαρακτηριστικά λυματολάσσης (Bennamoun et al., 2013).

Παράμετροι	Λυματολάσση
TS (%)	0,5-2
VS (% of TS)	50-60
Άζωτο (N, % of TS)	2,4-5
Φώσφορος (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , % of TS)	0,5-0,7
pH	6-8



Συγκρίνοντας τις τιμές από τους πίνακες 5 και 6 παρατηρείται ότι η λυματολάσπη που χρησιμοποιήθηκε στο παρών πείραμα είναι στα επιθυμητά όρια. Αρχικά οι τιμές για τα TS και pH είναι κοντινές, ενώ η τιμή για τα VS είναι αυξημένη. Για την σύγκριση των υπόλοιπων παραμέτρων έγινε μετατροπή με βάση την τιμή το TS (1,24 %) και έτσι καταλήξαμε στις τιμές TP = 0,80 (% of TS) και TN = 0,03(% of TS). Όποτε διαπιστώνεται ότι για τον φώσφορο η τιμή είναι λίγο πιο αυξημένη ενώ για το άζωτο είναι αρκετά χαμηλότερη. Αυτές οι παράμετροι όμως επηρεάζονται πολύ από διάφορους παράγοντες, όπως από τον χρόνο παραμονής της λυματολάσπης, οπότε αυτές οι διαφορές που εμφανίστηκαν παραπάνω δεν θα επηρεάσουν την λειτουργία τους συστήματος μας.

**Πίνακας 7-**Μέσες τιμές των μετάλλων στη λυματολάσπη.

Παράμετρος	Μέση τιμή (mg/kg)
B	0,330 ± 0,098
Na	0,084 ± 0,030
Mg	0,066 ± 0,140
Al	0,018 ± 0,004
Si	19,8 ± 2,7
K	42,68 ± 9,44
Ca	211,42 ± 44,78
Cr	0,432 ± 0,098
Mn	1,414 ± 0,340
Fe	123,96 ± 30,62
Co	0,01
Ni	0,16 ± 0,05
Cu	1,94 ± 0,44
Zn	5,66 ± 0,80
Mo	0,086 ± 0,030
Cd	-
Pb	0,376 ± 0,090

Οι τιμές της λυματολάσπης της διάταξης για τα βαρέα μέταλλα είναι εντός των τυπικών τιμών που παρουσιάζονται στον πίνακα 8 και μάλιστα αρκετά χαμηλές, αλλά και σε σχέση με μέσες τιμές του πίνακα 9 πάλι δεν παρατηρήτρια κάτι ανησυχητικό.

**Πίνακας 8-**Τυπικές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων στην ιλύ οικιακών λυμάτων (Stefanakis et al.,2014).

Μέταλλα	Τιμές (mg/kg)
Cd	1-3500
Cr	10-95.000
Cu	84-18.000
Pb	10-25.000
Ni	2-5.500
Zn	100-50.000
Fe	1.000-150.000
Co	11-2.500

Mn	32-9.950
----	----------

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες μέσες τιμές βαρέων μετάλλων για λυματολάσπη που μέτρησαν οι Bennamoun et al. (2013).

**Πίνακας 9-**Τιμές βαρέων μετάλλων λυματολάσπης (Bennamoun et al., 2013).

Μέταλλα	Τιμές (mg/kg)
Cd	10
Cr	500
Cu	800
Pb	500
Mo	4
Ni	80
Zn	1.700
Fe	17.000
Co	30
Mn	260

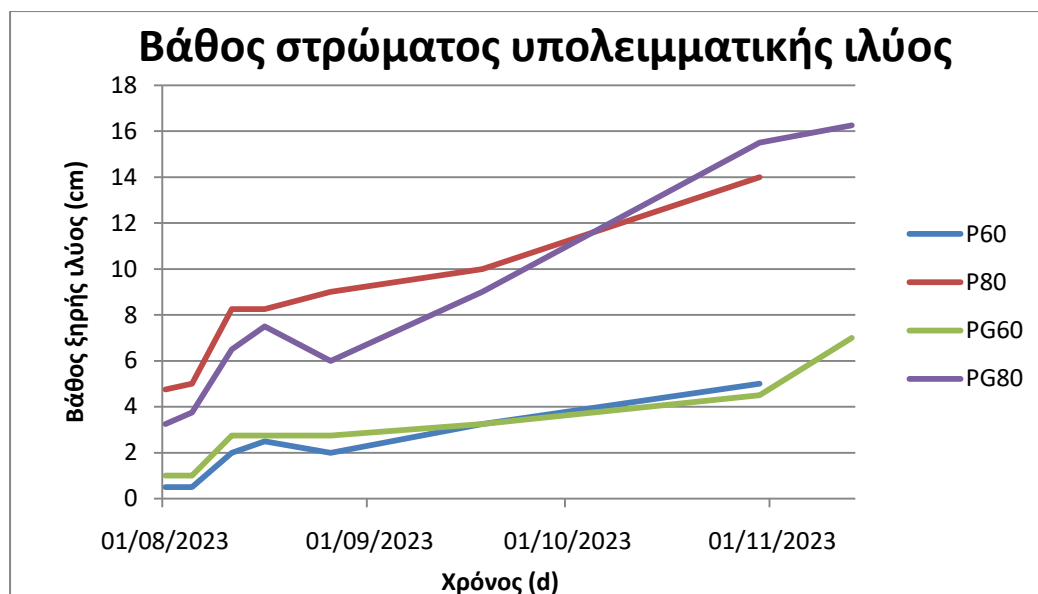
### 3.2.2 Αναλύσεις υπολειμματικής υλός

Τα δείγματα για την ανάλυση της υπολειμματικής υλός συλλέγονταν την τελευταία ημέρα της περιόδου ανάπαυσης.

#### 3.2.2.1 Απόδοση αφυδάτωσης

##### Βάθος στρώματος υπολειμματικής υλός

Η σταδιακή αύξηση του πάχους της υπολειμματικής στις κλίνες είναι εμφανής, με το μεγαλύτερο βάθος να παρατηρείται στις κλίνες που υπόκεινται στη μεγαλύτερη φόρτιση, δηλαδή 80kg TS/m<sup>2</sup>/έτος. Οι κύκλοι φόρτισης συμβάλλουν στη σταθεροποίηση του στρώματος κατά την περίοδο της ανάπαυσης, ενώ βοηθούν και στη μείωση του όγκου της λάσπης, καθώς μειώνεται η περιεκτικότητα σε νερό. Αυτό φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα που εμφανίζονται πτώσεις στα βάθη, οι οποίες ήταν λίγο πιο έντονες για τις κλίνες στο θερμοκήπιο. Το οποίο οφείλεται στις υψηλότερες θερμοκρασίες που επικρατούν μέσα στο θερμοκήπιο και έτσι η αφυδάτωση επιτυγχάνεται πιο γρήγορα.

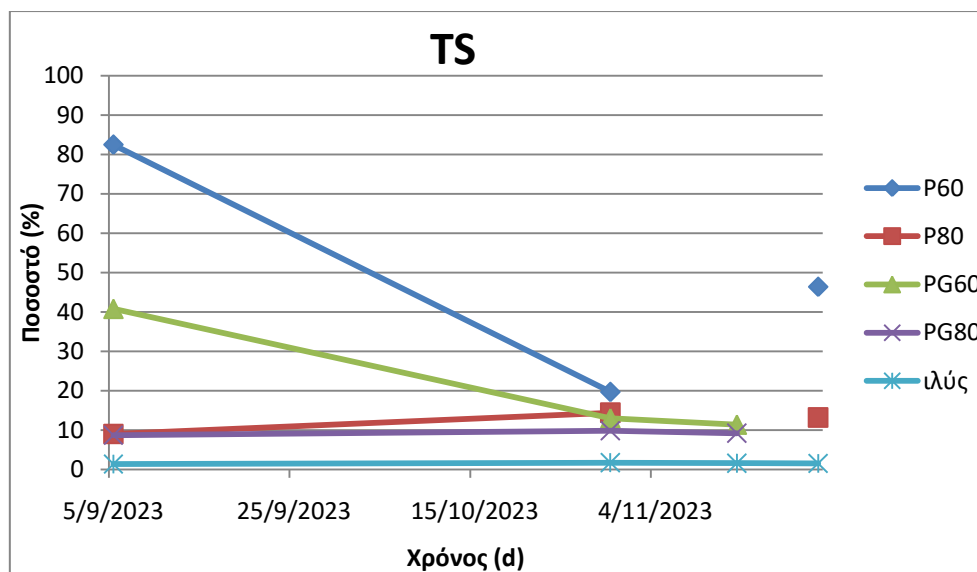


**Διάγραμμα 2-**Διάγραμμα για την δημιουργίας ξηρής ιλύος.

Είναι σημαντικό να καθοριστεί ο κατάλληλος κύκλος φόρτισης ανάλογα με την εποχή. Για παράδειγμα, το καλοκαίρι απαιτείται μικρότερη διάρκεια ανάπαυσης, καθώς οι αυξημένες θερμοκρασίες και η μεγαλύτερη ανάγκη των φυτών για νερό ευνοούν τη διαδικασία της εξατμισοδιαπνοής. Ωστόσο, τα μέχρι τώρα αποτελέσματα δεν είναι επαρκή για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων, καθώς αντιπροσωπεύουν ένα σχετικά μικρό χρονικό διάστημα, περίπου τριών μηνών. Για την εξαγωγή πιο έγκυρων συμπερασμάτων, απαιτούνται δεδομένα από μεγαλύτερης διάρκειας παρακολούθηση.

### TS υπολειμματικής ιλύος

Η μείωση του όγκου της λυματολάσπης και η αντίστοιχη αύξηση της περιεκτικότητας σε TS αποτελούν κρίσιμες παραμέτρους στις διάφορες μεθόδους και τεχνικές αφυδάτωσης, δεδομένου ότι μια καλή απόδοση αφυδάτωσης σχετίζεται με την μείωση των εξόδων (δηλ. μικρότερο τελικό όγκο) για την τελική μεταφορά και διάθεση (ή περαιτέρω χρήση) της υπολειμματικής ιλύος (Stefanakis et al, 2014).



**Διάγραμμα 3-**Ποσοστά ολικών στερεών στην υπολειμματική ιλύς.

Στην δικιά μας περίπτωση, που ήταν το αρχικό στάδιο με συχνά διαστήματα φόρτισης για την επίτευξη της επιθυμητής στρώσης βιοστερεών, παρατηρούμε ότι κυρίως οι τιμές κυμαίνονται κοντά στο 15%. Βροχοπτώσεις υπήρχαν όλους τους μήνες αυτούς που έγιναν οι μετρήσεις και οι θερμοκρασίες ήταν υψηλές. Μια διάφορα παρατηρείται στις κλίνες θερμοκηπίου που στις τελευταίες μετρήσεις τους οι τιμές ήταν χαμηλότερες από αυτές των απλών κλινών.

Οι Stefanakis et. al (2011) στο πείραμα που διεξήγαν παρατήρησαν ότι η περιεκτικότητα σε TS παρέμεινε κάτω από 35% για τις μονάδες κατά τη διάρκεια της φάσης φόρτισης. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι η φάση φόρτισης συνέπεσε με τη χειμερινή και την πρώιμη εαρινή περίοδο με αυξημένες βροχοπτώσεις και περιορισμένη δραστηριότητα των φυτών (λόγω χαμηλότερων θερμοκρασιών).

### **Αφυδάτωση υπολειμματικής ιλύος**

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η μείωση του όγκου της υπολειμματικής ιλύος λόγω της αφυδάτωσης της και παρατηρείται ότι για το χρονικό διάστημα του πειράματος τα ποσοστά είναι πάνω από 90%. Για τις κλίνες που δέχονται φόρτιση 60kg TS/m<sup>2</sup>/y η μείωση είναι σημαντικότερη, το ίδιο και τα ολικά στερεά που είναι σε μεγαλύτερα ποσοστά. Αυτό υποδεικνύει ότι το σύστημα για την φόρτιση αυτή αποδίδει καλύτερη αφυδάτωση.

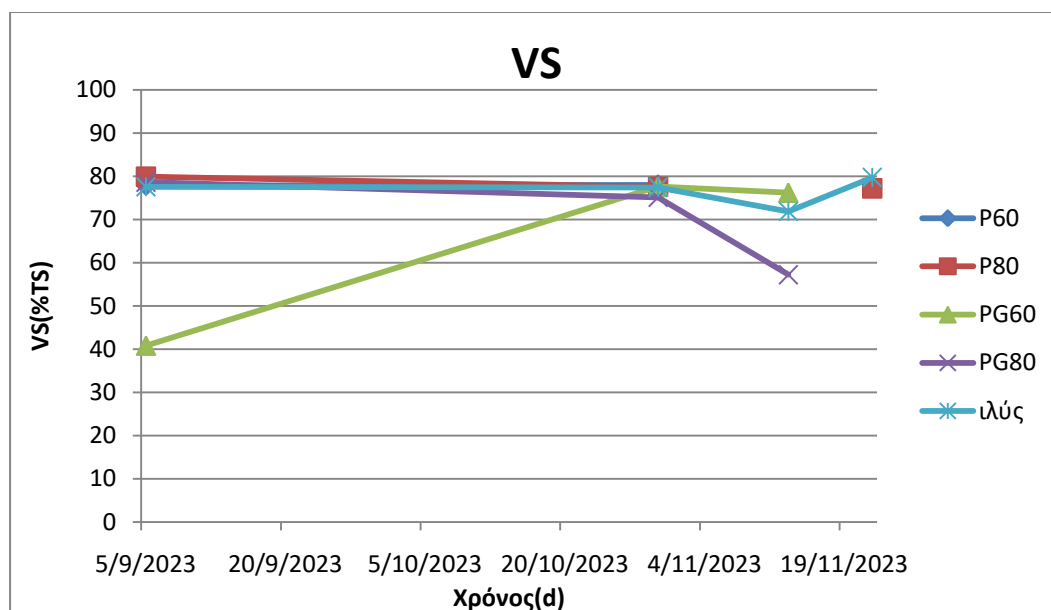
Όσον αφορά την λειτουργία των κλινών στο θερμοκήπιο παρατηρείται ότι η μείωση του όγκου της ιλύος δεν ήταν καλύτερη από αυτή των απλών κλινών. Αλλά οι τιμές των TS ήταν χαμηλότερες και το βάθος της υπολειμματικής ιλύος ήταν λίγο μεγαλύτερο. Αυτό υποδεικνύει η χρήση θερμοκηπίου δεν παρέχει καλύτερη αφυδάτωση στο παρών στάδιο.

**Πίνακας 10-**Αφυδάτωση υπολειμματικής ιλύος.

	Συνολικός όγκος εφαρμοζόμενης ιλύος (L)	Υπολειπόμενος όγκος ιλύος (L)	Μείωση όγκου ιλύος (%)	TS (%)	Βάθος υπολειμματικής ιλύος (m)
Λυματολάσπη				1,5	
P60	2380	60,0	97,5	46,4	0,05
PG60	2380	147,6	93,8	11,4	0,07
P80	3150	159,0	95,0	13,2	0,14
PG80	3150	264,0	91,6	9,2	0,16

### 3.2.2.2 VS

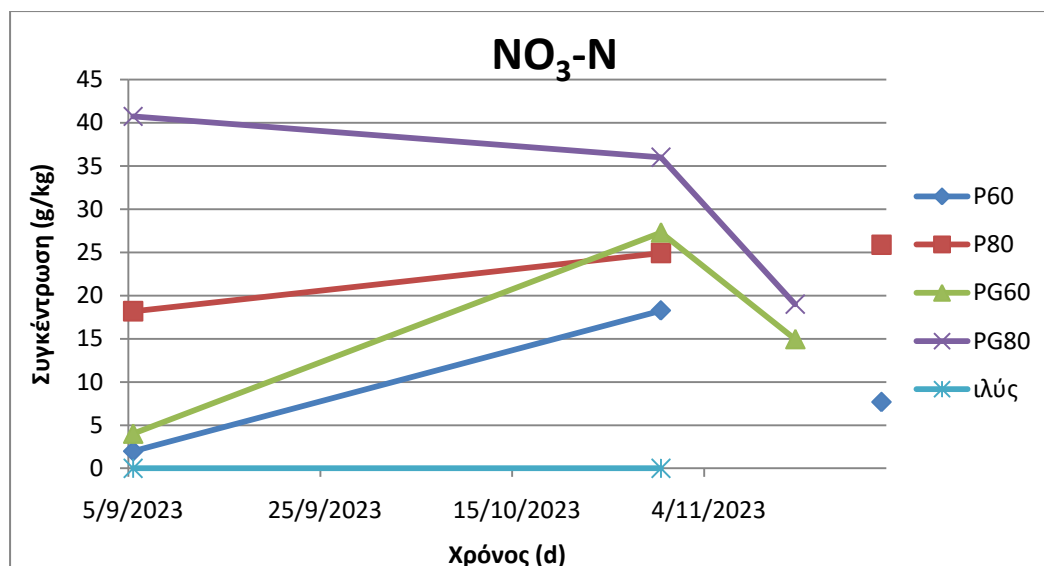
Παρατηρείται ότι οι τιμές των VS βρίσκονται στο 80% ιδανικό θα ήταν να φτάσουν οι τιμές κοντά στο 60-50%. Όπως παρατήρησαν και οι Stefanakis et. al (2011) οι μέσες τιμές των VS κατά την φάση φόρτισης (2.5 χρόνια) για τις μονάδες τους ήταν 65.1%, 62.4%, 61.6% και 66.4%. Παρατήρησαν επίσης ότι από τις διακυμάνσεις των VS η ανοργανοποίηση προχωρά πιο αργά σε σύγκριση με την αφυδάτωση. Είναι έτσι λογικό να μην βλέπουμε αυτές τις τιμές ακόμη διότι είναι η αρχή του πειράματος και δεν έχουμε μεγάλες περιόδους ανάπαυσης ανάμεσα στις φορτίσεις και τα καλάμια ακόμη βρισκόταν σε στάδιο ανάπτυξης.



**Διάγραμμα 4-**Ποσοστό πτητικών στερεών στην υπολειμματική ιλύ.

### 3.2.2.3 Νιτρικό άζωτο

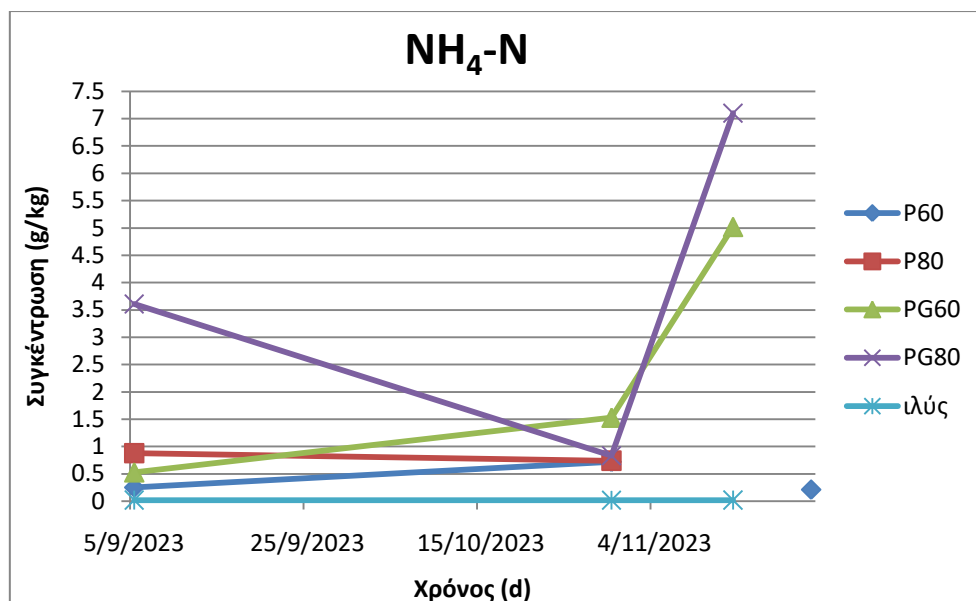
Παρατηρείται ότι στη στρώση της υπολειμματικής ιλύος σημειώνεται αύξηση στις συγκεντρώσεις νιτρικού αζώτου, γεγονός που αποδίδεται στη διαδικασία της νιτροποίησης. Η νιτροποίηση είναι η μετατροπή του αμμωνιακού αζώτου σε νιτρικό άζωτο, η οποία λαμβάνει χώρα στις αερόβιες ζώνες που ενδέχεται να σχηματίζονται εντός του στρώματος της ιλύος, αλλά και γύρω από τις ρίζες των φυτών.



**Διάγραμμα 5-**Συγκεντρώσεις νιτρικών στην υπολειμματική ιλύ.

#### 3.2.2.4 Αμμωνιακό άζωτο

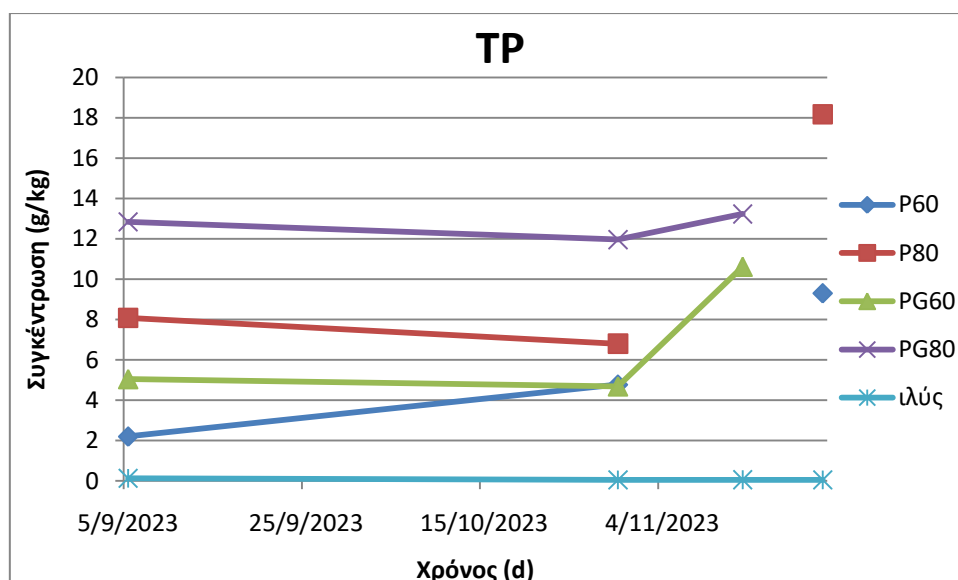
Εκτός από την παραγωγή νιτρικού αζώτου ένα μέρος του διαθέσιμου οργανικού αζώτου μετατρέπεται επίσης σε αμμώνιο (αμμωνιοποίηση). Οι βέλτιστες συνθήκες όσον αφορά την θερμοκρασία και το pH για την αμμωνιοποίηση είναι 40-60°C και 6,5-8,5 αντίστοιχα (Nymazal, 1995). Όποτε, αν και δεν μπορούμε να το πούμε με σιγουριά λόγω των λίγων δεδομένων, επειδή εντός των θερμοκηπίων κλινών επικρατούν υψηλότερες θερμοκρασίες ίσως και γι' αυτό να παρατηρούμε μια παραπάνω αύξηση στις συγκεντρώσεις των αμμωνιακών στις κλίνες αυτές. Επίσης λαμβάνει μέρος και η διεργασία της απονιτροποίησης, μάλλον όχι σε μεγάλο βαθμό διότι θα βλέπαμε πτώση του νιτρικού αζώτου παραπάνω. Παρόλα αυτά δικαιολογούνται και οι δυο διεργασίες διότι αμέσως μετά τη φόρτιση η ιλύς δεν έχει προλάβει να αφυδατωθεί και κυριαρχούν αναερόβιες συνθήκες. Προς το τέλος της φάσης ανάπαυσης, όταν η ιλύς έχει αφυδατωθεί και δημιουργούνται ρωγμές στη στρώση και επικρατούν αερόβιες συνθήκες.



**Διάγραμμα 6**-Συγκεντρώσεις αμμωνιακών στην υπολειμματική ιλύ.

### 3.2.2.5 Ολικός φώσφορος

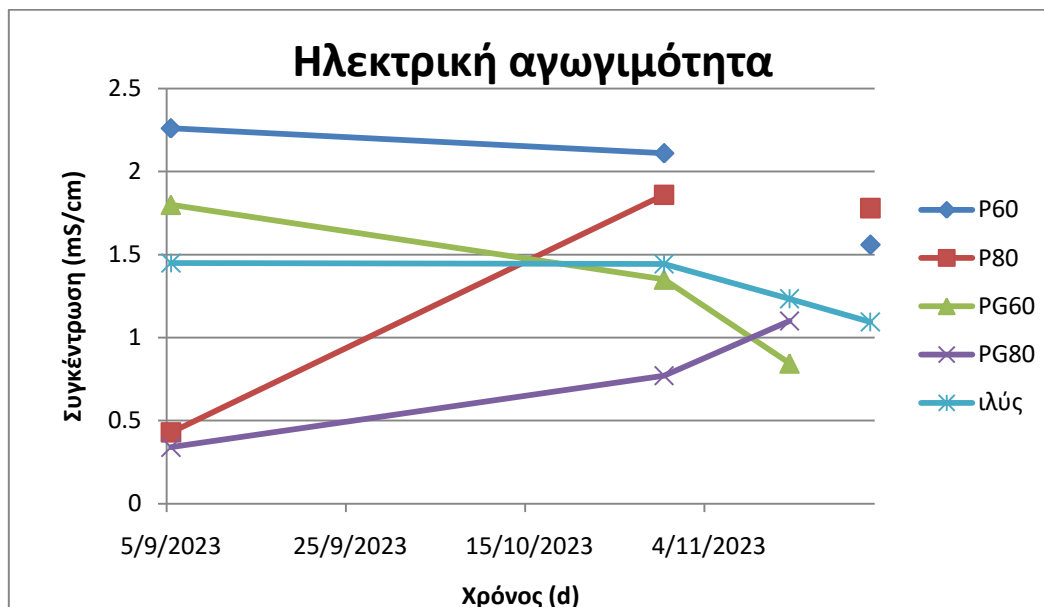
Στο παρακάτω διάγραμμα παρατηρείται αύξηση των συγκεντρώσεων ολικού φωσφόρου, ενώ θα αναμενόταν μείωση. Η μείωση των συγκεντρώσεων TP θα μπορούσε να αποδοθεί στην ακινητοποίηση των φωσφορικών αλάτων μέσω της ενσωμάτωσής τους στα μικροβιακά κύτταρα και στην πρόσληψή τους από τα φυτά. Αυτή η διαδικασία θα εμποδίζει την επανεισαγωγή του φωσφόρου στον κύκλο επεξεργασίας, όπως αναφέρεται και στη βιβλιογραφία (Stefanakis et al., 2014). Ωστόσο, η παρατηρούμενη αύξηση των συγκεντρώσεων πιθανόν να οφείλεται στο γεγονός ότι η δέσμευση του φωσφόρου από τα φυτά δεν έχει ακόμη ξεκινήσει, καθώς αυτά βρίσκονται σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης.



**Διάγραμμα 7**-Συγκεντρώσεις ολικού φωσφόρου στην υπολειμματική ιλύ.

### 3.2.2.6 Ηλεκτρική αγωγιμότητα

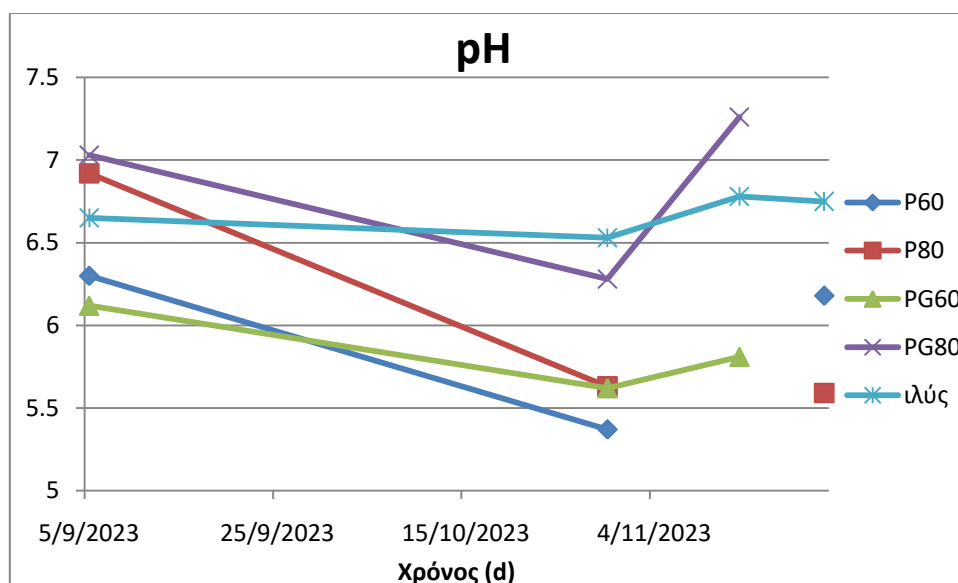
Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι οι τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας βρίσκονται κοντά σε αυτές της λυματολάσσης. Οι Stefanakis et. al (2011) παρατήρησαν ότι στην φάση των φορτίσεων οι τιμές τους βρίσκονταν στο εύρος 0,5-2,5 mS/cm. Οπότε οι τιμές που απεικονίζονται παρακάτω βρίσκονται σε φυσιολογικά επίπεδα.



Διάγραμμα 8-Ηλεκτρική αγωγιμότητα στην υπολειμματική ιλύ.

### 3.2.2.7 pH

Από τα παρακάτω αποτελέσματα παρατηρείται ότι το εύρος των τιμών του pH αρχίζει να πέφτει πιο χαμηλά από της λυματολάσσης και να γίνεται πιο όξινο. Αυτή η συμπεριφορά μπορεί να αποδοθεί στην παραγωγή οξέων λόγω της συνεχούς αποσύνθεσης της εναπομείνουσας οργανικής ύλης (Stefanakis et al, 2014).



Διάγραμμα 9-pH στην υπολειμματική ιλύ.



### 3.2.2.8 Μέταλλα υπολειμματικής ιλύος

Τα βαρέα μέταλλα (ΗΜ) αποτελούν έναν κρίσιμο ρύπο που υπάρχει στην ιλύ των λυμάτων. Δεδομένου ότι η αφυδατωμένη ιλύς στο τέλος δύναται να χρησιμοποιηθεί ως λίπασμα σε γεωργικές εκτάσεις ή για την αποκατάσταση εδαφών, είναι σημαντικό να προσδιορίζεται περιεκτικότητά τους, προκειμένου να αποφευχθούν πιθανοί περιβαλλοντικοί κίνδυνοι και κίνδυνοι για την υγεία.

Ωστόσο, στην αστική λυματολάσπη, οι συγκεντρώσεις είναι συνήθως χαμηλές επομένως, οι ρυθμοί συσσώρευσης στην αφυδατωμένη ιλύ είναι αργοί και η περιεκτικότητα σε βαρέα μέταλλα παραμένει κάτω από τα νομικά όρια. Ακόμη και μετά από πολλά χρόνια λειτουργίας, η περιεκτικότητα παραμένει κάτω από τα νομοθετικά όρια, γεγονός που δείχνει ότι ο ρυθμός συσσώρευσης στους ΤΥ είναι πράγματι πολύ αργός και είναι κατάλληλη για εφαρμογή στο έδαφος. Επίσης αναφέρονται και εποχιακές διακυμάνσεις της περιεκτικότητας σε βαρέα μέταλλα, με χαμηλότερες συγκεντρώσεις κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης των φυτών, δηλαδή τους ανοιξιάτικους μήνες (Stefanakis et al., 2014).

**Πίνακας 11-**Συγκεντρώσεις μετάλλων στην υπολειμματική ιλύ σε σύγκριση με την εισροή.

Παράμετρος	Μέση τιμή εισροής (mg/kg)	Μέση τιμή P60 (mg/kg)	Μέση τιμή P80 (mg/kg)
B	0,330 ± 0,098	12,91 ± 7,37	11,44 ± 10,00
Na	0,084 ± 0,030	1,18 ± 0,46	0,78 ± 0,24
Mg	0,066 ± 0,140	3,32 ± 1,27	0,62 ± 0,09
Al	0,018 ± 0,004	0,83 ± 0,27	0,27 ± 0,01
Si	19,8 ± 2,7	954,55 ± 59,29	1.050,09 ± 100,00
K	42,68 ± 9,44	1.020,80 ± 307,19	233,49 ± 44,82
Ca	211,42 ± 44,78	15.180,37 ± 6.272,50	2.833,53 ± 831,47
Cr	0,432 ± 0,098	19,75 ± 8,92	4,33 ± 0,77
Mn	1,414 ± 0,340	156,99 ± 82,20	13,16 ± 1,78
Fe	123,96 ± 30,62	5.299,38 ± 1.645,28	1.859,16 ± 230,89
Co	0,01	-	-
Ni	0,16 ± 0,05	9,28 ± 0,24	-
Cu	1,94 ± 0,44	88,90 ± 33,84	24,02 ± 3,08
Zn	5,66 ± 0,80	247,00 ± 78,21	85,13 ± 8,39
Mo	0,086 ± 0,030	3,32 ± 2,14	2,71
Cd	-	0,53	-
Pb	0,376 ± 0,090	30,55 ± 12,99	7,25 ± 1,62

Παράμετρος	Μέση τιμή εισροής (mg/kg)	Μέση τιμή PG60 (mg/kg)	Μέση τιμή PG80 (mg/kg)
B	0,330 ± 0,098	3,03 ± 1,93	3,66 ± 1,7
Na	0,084 ± 0,030	0,88 ± 0,25	0,89 ± 0,12
Mg	0,066 ± 0,140	0,91 ± 0,19	0,66 ± 0,14
Al	0,018 ± 0,004	0,31 ± 0,06	0,27 ± 0,02
Si	19,8 ± 2,7	905,96 ± 19,88	933,39 ± 48,10
K	42,68 ± 9,44	431,99 ± 53,80	258,37 ± 51,04
Ca	211,42 ± 44,78	4.478,47 ± 668,00	10.299,04 ± 7.277,71
Cr	0,432 ± 0,098	6,49 ± 2,12	4,78 ± 1,57

Mn	1,414 ± 0,340	24,71 ± 6,20	13,60 ± 3,81
Fe	123,96 ± 30,62	2.566,05 ± 251,37	1.768,40 ± 419,89
Co	0,01	-	-
Ni	0,16 ± 0,05	-	-
Cu	1,94 ± 0,44	32,57 ± 7,53	23,16 ± 9,07
Zn	5,66 ± 0,80	112,77 ± 13,65	167,72 ± 82,95
Mo	0,086 ± 0,030	3,14	2,17
Cd	-	68,13	-
Pb	0,376 ± 0,090	6,34 ± 2,30	6,84 ± 3,06

Σε όλα τα μέταλλα υπάρχει αύξηση των συγκεντρώσεων, αλλά παρατηρείται μια έντονη αύξηση στις συγκεντρώσεις του Σιδήρου (Fe), του Πυριτίου (Si), του Καλίου (K) και του Ασβεστίου (Ca). Να σημειωθεί ότι έχει διαπιστωθεί ότι εμφανίζονται κυμαινόμενες διαφορές με το βάθος με τις βαριές συγκεντρώσεις μετάλλων να αυξάνονται με το βάθος του υπολειμματικού στρώματος ιλύος λόγω ανοργανοποίησης της οργανικής ύλης, η οποία συγκεντρώνει τα συσσωρευμένα μέταλλα. Τα χαρακτηριστικά καθώς και η κινητικότητα και η βιοδιαθεσιμότητα κάθε συγκεκριμένου μετάλλου θα μπορούσαν να εξηγήσουν τις διαφορές που υπάρχουν ανάμεσα στις συγκεντρώσεις τους (Stefanakis et al., 2014).

Με βάση όμως και την ελληνική νομοθεσία που αφορά την διάθεση στην γεωργία για κάποια από τα μέταλλα παρατηρούμε ότι οι τιμές δεν είναι ανησυχητικές.

Οριακές τιμές συγκέντρωσης βαρέων μετάλλων στην ιλύ που χρησιμοποιείται στη γεωργία, υπουργική απόφαση: 80568/4225/91

**Πίνακας 12-**Οριακές τιμές συγκέντρωσης βαρέων μετάλλων στη γεωργία.

Βαρέα Μέταλλα	Οριακές τιμές (mg/kg ξηράς ουσίας)
Κάδμιο (Cd)	20 έως 40
Χαλκός (Cu)	1000 έως 1750
Νικέλιο (Ni)	300 έως 400
Μόλυβδος (Pb)	750 έως 1200
Ψευδάργυρος (Zn)	2500 έως 4000

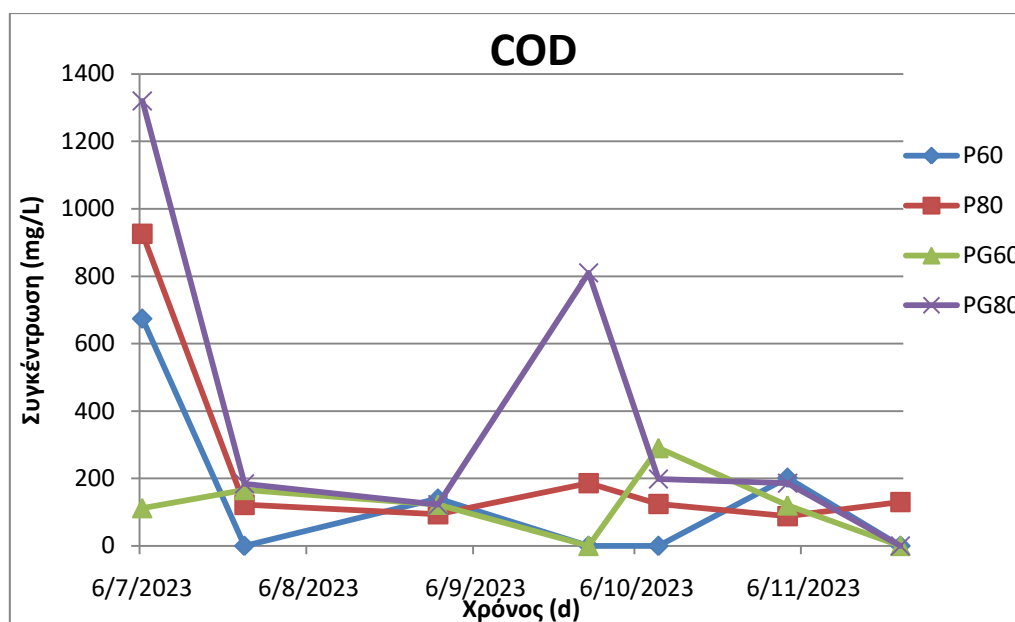
### 3.2.3 Αναλύσεις διασταλαγμάτων

Τα δείγματα των διασταλαγμάτων συλλέγονταν την τελευταία ημέρα της περιόδου φόρτισης της λυματολάσπης.

#### 3.2.3.1 Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD)

Το COD είναι η ποσότητα του οξυγόνου που απαιτείται για την ολική χημική οξείδωση των οργανικών συστατικών μιας ουσίας. Η μέτρηση του προσδιορίζει τόσο το βιοαποδομήσιμο όσο και το μη βιοαποδομήσιμο κλάσμα του οργανικού φορτίου στα διασταλάγματα. Οι Hu S. et al. (2020) σε ΤΥΑΙ μέτρησαν συγκεντρώσεις COD κάτω από 180 mg/L με την χρήση *P.australis*. Στην αρχή των μετρήσεων μας παρατηρούνται υψηλότερες τιμές που οφείλονται στο πέρασμα περισσότερων στερεών στο σύστημα, όμως μετά από ένα μικρό

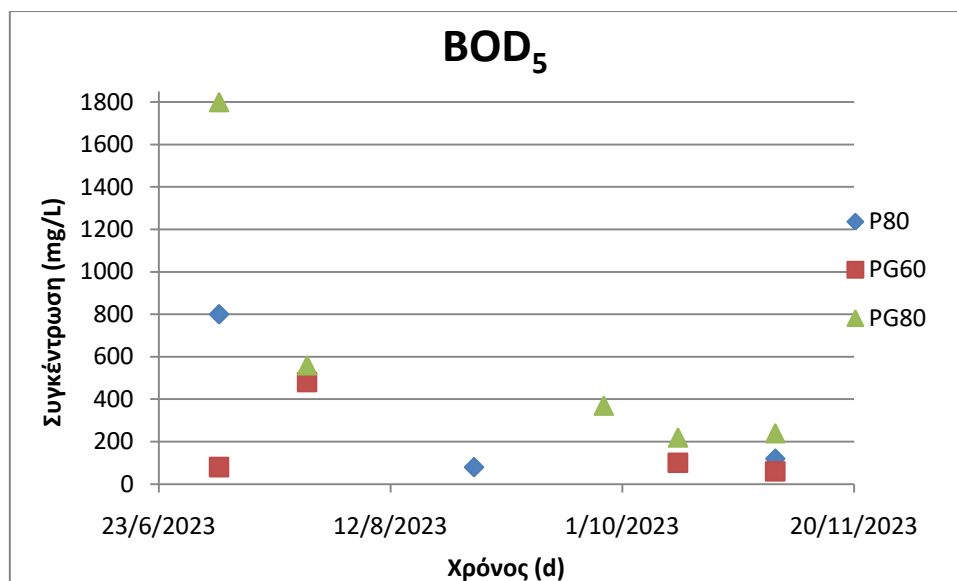
διάστημα λειτουργίας οι τιμές παραμένουν στο εύρος των 180 mg/L και κάτω που υποδεικνύει την ομαλή λειτουργία του συστήματος.



**Διάγραμμα 10-**Συγκεντρώσεις COD διασταλαγμάτων.

### 3.2.3.2 Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD<sub>5</sub>)

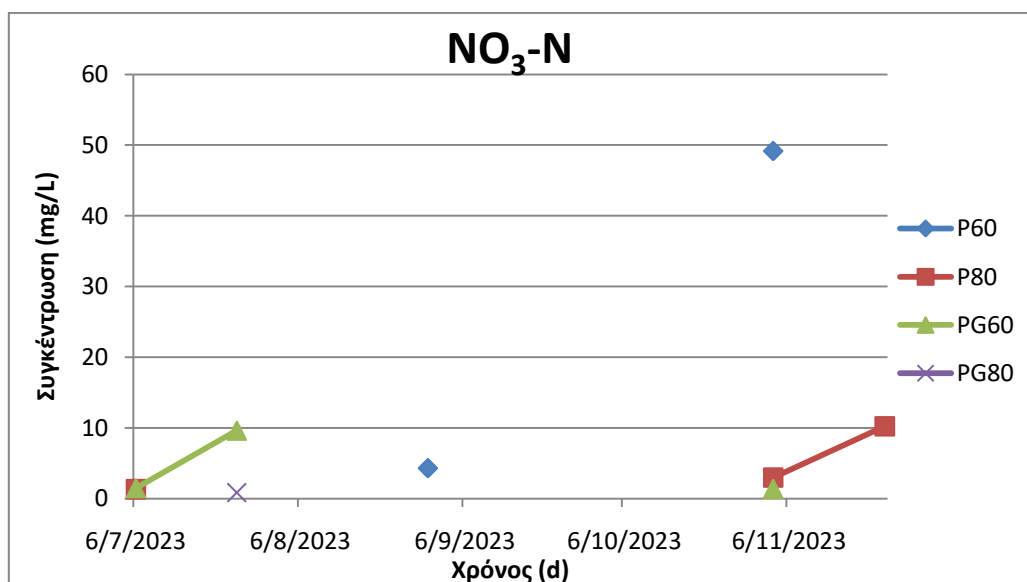
Το BOD<sub>5</sub> αντιπροσωπεύει την ποσότητα σε οξυγόνο που καταναλώθηκε από τους μικροοργανισμούς για την οξείδωση της οργανικής και υποδηλώνει την απόδοση του συστήματος στην απομάκρυνση των στερεών και κατά συνέπεια της οργανικής ύλης. Η διαφορά με την μέτρηση του BOD<sub>5</sub> από το COD είναι ότι προσδιορίζει μόνο το βιοδιασπάσιμο οργανικό φορτίο. Παρατηρούμε στα παραπάνω αποτελέσματα ότι στις τελευταίες τιμές οι συγκεντρώσεις πέφτουν κοντά 200 mg/L. Συνήθως οι συγκεντρώσεις είναι κάτω από 100 mg/L (Stefanakis et al., 2014), παρ' όλα αυτά η τιμή αυτή δεν απέχει πολύ και επειδή ακόμη είναι αρχές του πειράματος τα αποτελέσματα υποδηλώνουν ομαλή λειτουργία του συστήματος.



**Διάγραμμα 11-**Συγκεντρώσεις BOD<sub>5</sub> διασταλαγμάτων.

### 3.2.3.3 Νιτρικό άζωτο

Από το διάγραμμα παρατηρείται ότι οι τιμές των εκροών έχουν χαμηλό εύρος. Αυτό δικαιολογείται μάλλον λόγω των σωματιδίων της λυματολάσσης που περνάνε μέσα στο σύστημα και καβαλάνε το φορτίο οργανικής ύλης σε μεγαλύτερο ποσοστό από ότι θα ήταν επιθυμητό. Αυτή η οργανική ύλη οδηγεί σε αυξημένη κατανάλωση οξυγόνου και δεν περισσεύει για την διαδικασία της νιτροποίησης ή διαφορετικά να μειώνει την ταχύτητας της με αποτέλεσμα να μην υπάρχει ή να είναι πολύ μικρή η δημιουργία νιτρικού αζώτου.

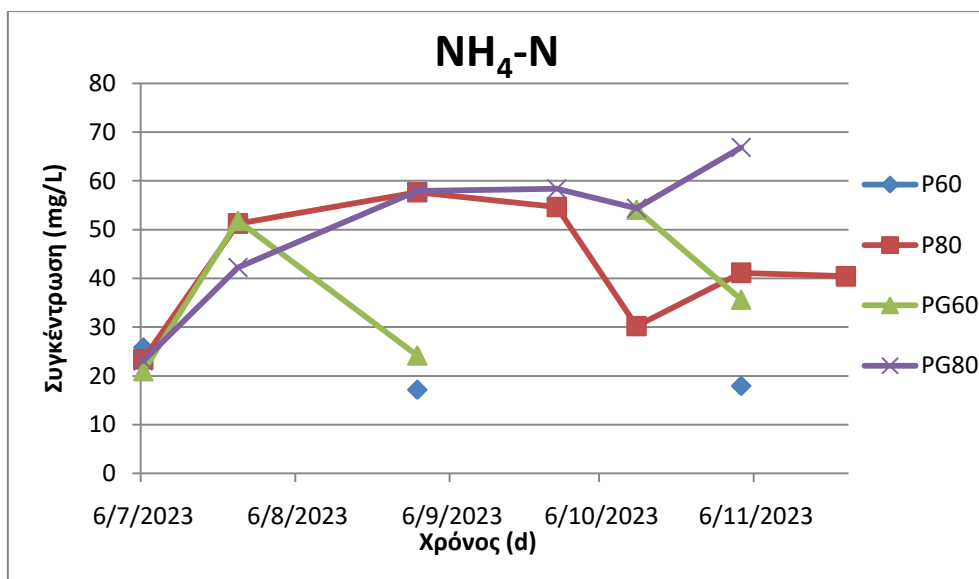


**Διάγραμμα 12-**Συγκεντρώσεις νιτρικού αζώτου διασταλαγμάτων.

### 3.2.3.4 Αμμωνιακό άζωτο

Παρατηρείται από το παρακάτω διάγραμμα ότι για όλες τις κλίνες οι τιμές παραμένουν σε ένα συγκεκριμένο εύρος. Συνήθως, το μεγαλύτερο μέρος του οργανικού N μετατρέπεται σε αμμωνία από τα μικρόβια. Η διαδικασία αυτή λαμβάνει χώρα τόσο στις αερόβιες όσο και στις αναερόβιες περιοχές της κλίνης, αλλά εξελίσσεται ταχέως στα πλούσια σε οξυγόνο

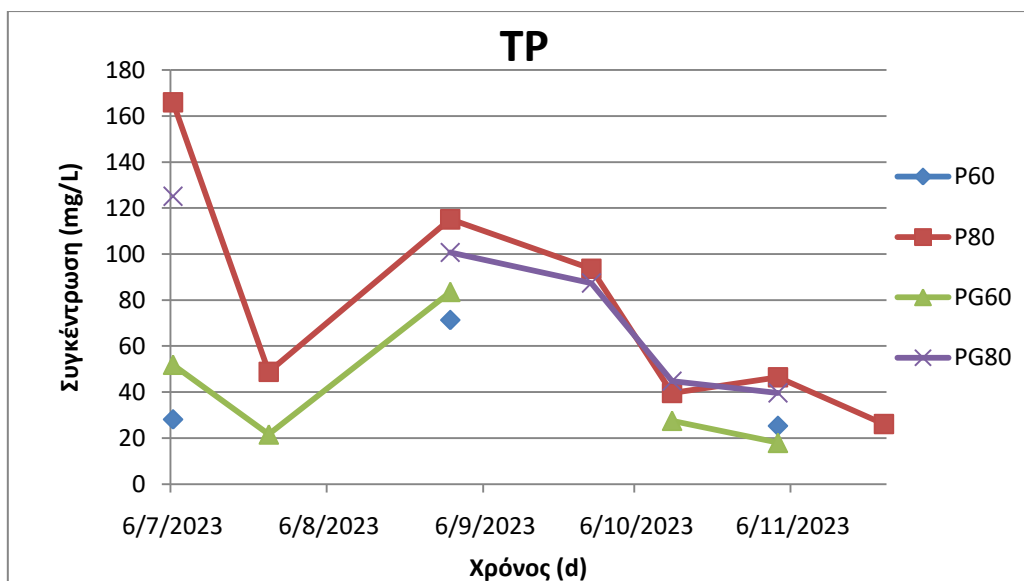
στρώματα. Η βέλτιστη περιοχή pH είναι μεταξύ 6,5 και 8,5 και η θερμοκρασία μεταξύ 40 και 60 °C. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω για το νιτρικό άζωτο, παρατηρείται και εδώ έλλειψη οξυγόνου. Το φαινόμενο αυτό είναι πιο εμφανές, καθώς οι κλίνες με φόρτιση 80 kg TS/m<sup>2</sup>/γ περιέχουν υψηλότερο ποσοστό οργανικής ύλης, γεγονός που αυξάνει τις συγκεντρώσεις του αμμωνιακού αζώτου. Αυτό συμβαίνει επειδή ούτε η νιτροποίηση ούτε η αμμωνιοποίηση πραγματοποιούνται. Ίσως υπάρχουν σε ένα μικρό βαθμό στην φάση αυτή του πειράματος το οποίο δεν είναι αντιληπτό.



**Διάγραμμα 13-**Συγκεντρώσεις αμμωνιακών διασταλαγμάτων.

### 3.2.3.5 Ολικός φωσφόρος

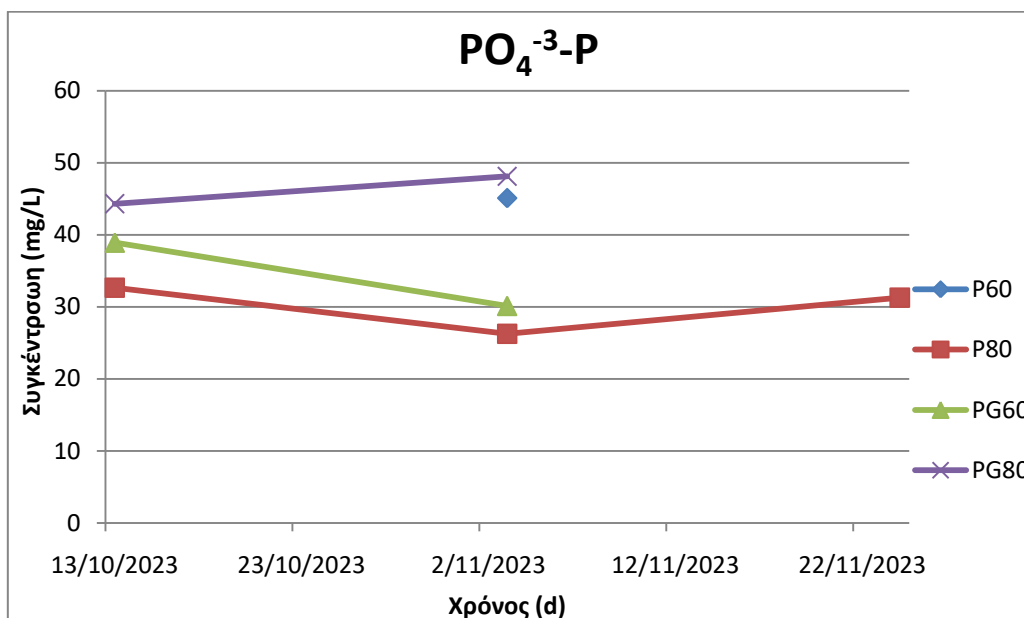
Παρατηρούμε ότι οι συγκεντρώσεις στις εκροές κατά μέσο όρο παραμένουν μικρές, αυτό μπορεί να οφείλεται στην ικανότητα απορρόφησης TP του πληρωτικού υλικού. Δηλαδή του διοξειδίου του πυριτίου (SiO<sub>2</sub>), το οποίο μπορεί να φτάσει σε ποσοστά απομάκρυνσης του TP έως και 60% (Cheng et al., 2013).



**Διάγραμμα 14**-Συγκεντρώσεις ολικού φωσφόρου διασταλαγμάτων.

### 3.2.3.6 Φωσφορικά

Από το παρακάτω διάγραμμα παρατηρούνται ότι οι συγκεντρώσεις των φωσφορικών για τις τρεις κλίνες βρίσκονται στα 26-48 mg/L, αλλά δεν επαρκούν και δεν μπορούμε να καταλήξουμε σε κάποιο ακριβές συμπέρασμα. Παρόλα αυτά ο Στεφανάκης (2011) μέτρησε τιμές για τα φωσφορικά μέσες τιμές στα 8,9 mg/L και 10,9 mg/L για φορτίσεις κοντινές με τις δικές μας.

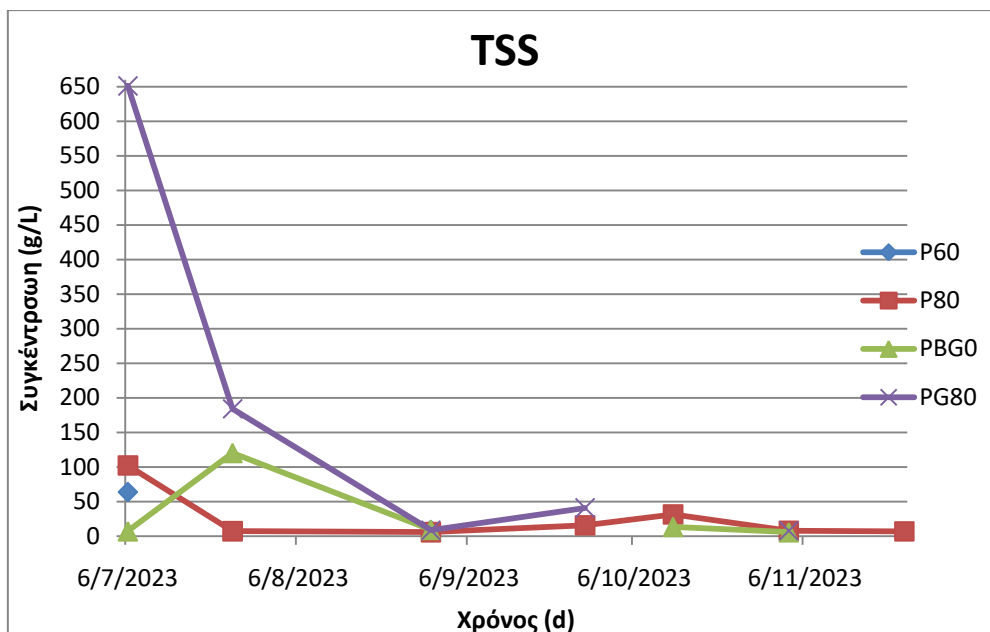


**Διάγραμμα 15**-Συγκεντρώσεις φωσφορικών διασταλαγμάτων.

### 3.2.3.7 TSS

Η απομάκρυνση των ολικών αιωρούμενων στερεών γίνεται μέσω της βαρυτικής καθίζησης και τη διήθησης. Τα στερεά συσσωρεύονται στην κορυφή της κλίνης δημιουργώντας στρώμα υπολειμματικής ιλύος (Stefanakis et al., 2011), το οποίο στην περίπτωση μας ακόμη δεν έχει δημιουργηθεί επαρκώς και γι αυτό παρατηρούνται κάποιες διακυμάνσεις. Προς τις

τελευταίες τιμές όμως παρατηρείται μείωση που υποδεικνύει την ομαλή λειτουργία του συστήματος.



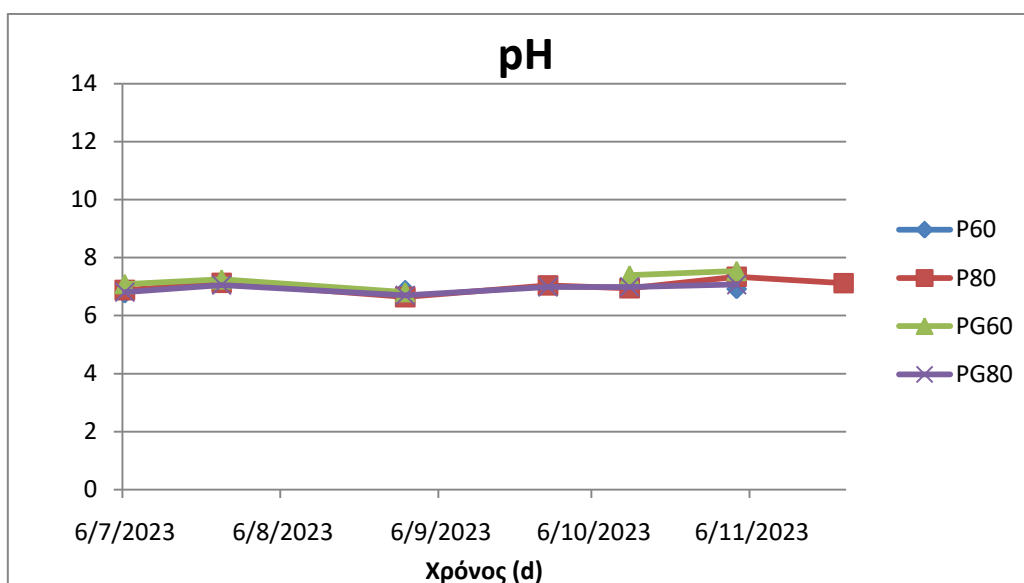
**Διάγραμμα 16-**Συγκεντρώσεις TSS διασταλαγμάτων.

### 3.2.3.8 pH

Το pH είναι μια σημαντική ένδειξη για την ποιότητα των διασταλαγμάτων και για την επισήμανση της οξύτητας ή της αλκαλικότητας του. Σύμφωνα με την ΚΥΑ 5673/ 400/ 1997 (Β 192), οι τιμές pH ανάμεσα στο 6.5 με 8.5 είναι αποδεκτές για επεξεργασμένα υγρά απόβλητα.

**Πίνακας 13-**Αποτελέσματα μετρήσεων pH των εκροών.

pH	Μέση τιμή	Εύρος τιμών
P60	6,86 ± 0,04	[6,77-6,92]
P80	7,01 ± 0,08	[6,64-7,34]
PG60	7,22 ± 0,13	[6,81-7,54]
PG80	6,94 ± 0,06	[6,70-7,07]



**Διάγραμμα 17-**Συγκεντρώσεις pH διασταλαγμάτων.

Η ελαφριά αυτή αλκαλικότητα των διασταλαγμάτων πιθανόν να οφείλεται στην παρουσία υδροξειδίων  $\text{OH}^-$ , ανθρακικών ιόντων  $\text{CO}_3^{2-}$  και όξινων ανθρακικών ιόντων  $\text{HCO}_3^-$  στοιχείων όπως το ασβέστιο, το μαγνήσιο, το νάτριο και το κάλιο. Ακόμη είναι πιθανό να οφείλεται στην ύπαρξη αμμωνίας η οποία κυριαρχεί σε pH από 6 έως 9. Η αλκαλικότητα στα υγρά απόβλητα συμβάλλει στην πρόληψη διακυμάνσεων των τιμών του pH που μπορεί να προκληθούν από την παρουσία οξέων (Metcalf & Eddy, 2006).

### 3.2.3.9 Ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC)

Ηλεκτρική αγωγιμότητα ορίζεται ως η ικανότητα ενός διαλύματος να άγει το ηλεκτρικό ρεύμα. Τα ιόντα ενός διαλύματος είναι το μέσο αγωγής και συνεπώς η τιμή της παριστάνει τη συγκέντρωση των ολικών διαλυμένων στερεών ενός δείγματος (Metcalf & Eddy, 2006).

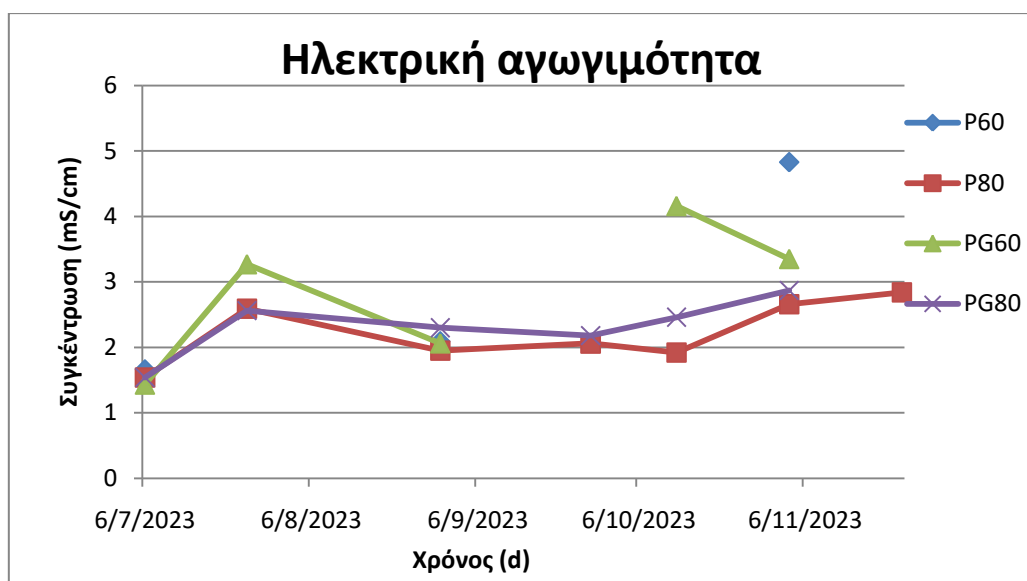
**Πίνακας 14-**Αποτελέσματα μετρήσεων EC των διασταλαγμάτων.

EC	Μέση τιμή (mS/cm)	Εύρος τιμών (mS/cm)
P60	$2,86 \pm 0,99$	[1,66-4,83]
P80	$2,22 \pm 0,18$	[1,54-6,84]
PG60	$2,85 \pm 0,49$	[1,43-4,16]
PG80	$2,32 \pm 0,18$	[1,54-2,87]

Παρατηρείται ότι οι κλίνες με τις ίδιες φορτίσεις εμφανίζουν παρόμοιες τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας, 2,86 mS/cm και 2,85 mS/cm για τις P60 και PG60 αντίστοιχα και 2,22 mS/cm και 2,32 mS/cm για τις P80 και PG80 αντίστοιχα. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να οφείλεται στην εξατμισοδιαπνοή. Η περιορισμένη διαθέσιμη ποσότητα νερού στις κλίνες δεν αρκούσε πάντα για την κάλυψη των αναγκών των φυτών και έτσι τα φυτά δέσμευαν ποσότητες ύδατος από το διαθέσιμο στο εσωτερικό της κλίνης αυξάνοντας με αυτό τον τρόπο την



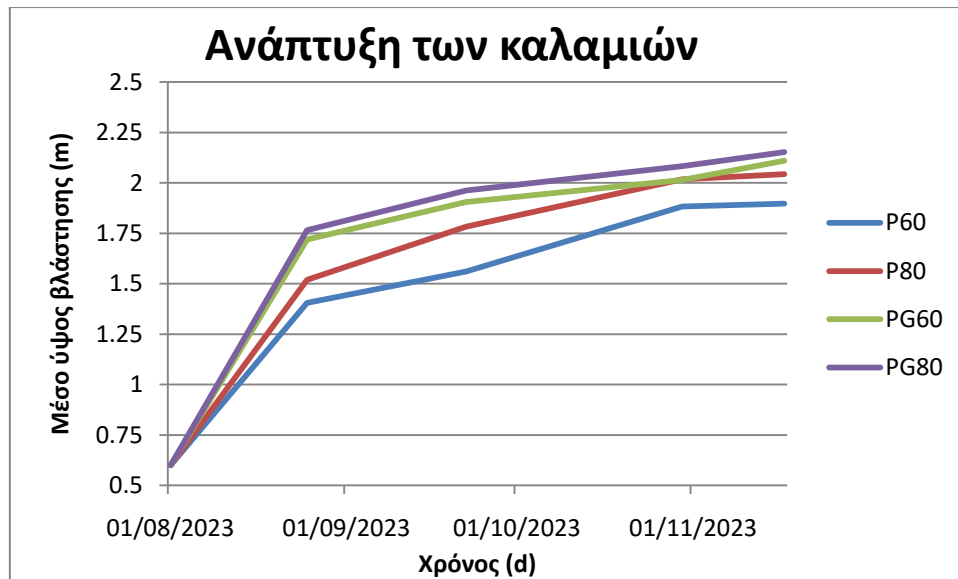
συγκέντρωση τους (Stefanakis et al., 2011b). Και αυτό το φαινόμενο είναι λογικό να είναι πιο έντονο στις κλίνες με μικρότερες φορτίσεις.



**Διάγραμμα 18**-Συγκεντρώσεις ηλεκτρικής αγωγιμότητας διασταλαγμάτων.

### 3.2.4 Ανάπτυξη των καλαμιών

Για κάθε πειραματική κλίση, είχαν επιλεγθεί εξαρχής τέσσερις βλαστοί του καλαμιού, των οποίων το ύψος μετρούταν σε τακτά χρονικά διαστήματα πριν την έναρξη μιας φόρτισης. Κατά την φύτευση τους στο σύστημα τα καλάμια είχαν αρχικό ύψος 0,6m. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η μέση τιμή του ύψους των βλαστών αυτών. Από το διάγραμμα παρατηρείται η σταδιακή ανάπτυξη των καλαμιών σε ύψος το οποίο υποδεικνύει την προσαρμογή τους στο νέο περιβάλλον. Το τελικό ύψος τους ήταν 1,86m, 2,04m, 2,05m, 2,13m για τις κλίνες P60 PG60 P80 και PG80 αντίστοιχα. Μια μικρή διάφορα διακρίνεται στο ανάπτυξη της βλάστησης εντός των κλινών του θερμοκηπίου, που έχουν μια πιο σταδιακή ανάπτυξη, που μάλλον οφείλεται στις υψηλότερες θερμοκρασίες που βοηθούν την βλάστηση. Με βάση τα δεδομένα για αυτή την μικρή χρονική περίοδο σημειώνεται ανάπτυξη 1,26m, 1,44m, 1,67m και 1,46m για τις κλίνες P60 PG60 P80 και PG80 αντίστοιχα. Για τις φορτίσεις παρατηρούμε ότι οι ρυθμός 80kg TS/m<sup>2</sup>/γ είχε ως αποτέλεσμα την λίγο μεγαλύτερη ανάπτυξη των καλαμιών.



**Διάγραμμα 19-**Διάγραμμα για την ανάπτυξη των καλαμιών.

Οι τιμές για το ύψος των βλαστών παρουσιάζουν σημαντικές διακυμάνσεις, καθώς οι τοπικές καιρικές συνθήκες κάθε περιβάλλοντος επηρεάζουν άμεσα την ανάπτυξή τους. Σύμφωνα με τον Nyamazal (2005), το εύρος ύψους για το *Phragmites australis* κυμαίνεται από 1,57 έως 3,80 μέτρα, όπως έχει καταγραφεί σε διάφορες μελέτες παγκοσμίως. Αυτή η διαφοροποίηση στο ύψος των φυτών αντικατοπτρίζει την επίδραση παραγόντων όπως η θερμοκρασία, η υγρασία και η ηλιοφάνεια, που ποικίλλουν ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος και τις τοπικές κλιματικές συνθήκες.

## 4. Συμπεράσματα και προτάσεις

### 4.1 Συμπεράσματα

Μετά την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα τόσο για την λειτουργία των πιλοτικών ΤΥΑΙ όσο και για την μελλοντική βελτίωσή τους.

- Ο βασικός στόχος αφυδάτωσης φαίνεται πως επιτυγχάνεται με βάση τα πρώτα αποτελέσματα, καθώς η μείωση του όγκου της υλός ξεπερνά ήδη το 90% σε όλες τις πιλοτικές μονάδες.
- Το κλίμα της περιοχής και ειδικότερα τους μήνες του πειράματος ευνοεί την ανάπτυξη των καλαμιών αλλά και τις διεργασίες απομάκρυνσης ρύπων, καθώς πολλοί μικροοργανισμοί δρουν καλύτερα σε θερμοκρασίες άνω των 15°C.
- Οι συγκεντρώσεις των μετάλλων στο στρώμα της υπολειμματικής υλός βρίσκονται εντός ορίων που υποδηλώνει την σωστή λειτουργία των ΤΥ και η μελλοντική εφαρμογή της στο έδαφος δεν θα εμφανίσει προβλήματα.
- Σχετικά με τις κλίνες εντός του θερμοκηπίου παρατηρήθηκε μια γρηγορότερη ανάπτυξη των καλαμιών που οφείλεται στην υψηλότερη θερμοκρασία που επικρατεί και είναι ιδανικότερη για το φυτό. Αλλά όσον αφορά την αφυδάτωση και

τις τιμές των TS, δεν παρατηρείται διάφορα που να υποδεικνύει μέχρι στιγμής καλύτερη απόδοση λειτουργίας συγκριτικά με τις άλλες κλίνες.

- Η 80kg TS/m<sup>2</sup>/γ φόρτιση δημιουργεί παχύτερη στρώση υπολειμματικής ιλύος χωρίς να εμποδίζει την λειτουργία του συστήματος, καθώς καταφέρνει ένα μέρος της να ξηραίνεται επαρκώς κατά την διάρκεια του πειράματος.
- Όμως η μείωση του όγκου της ιλύος λόγω της αφυδάτωσης στις κλίνες που δέχονται φόρτιση 60kg TS/m<sup>2</sup>/γ είναι σημαντικότερη και το ίδιο παρατηρείται και στα ολικά στερεά που είναι σε μεγαλύτερα ποσοστά. Αυτό υποδεικνύει ότι το σύστημα για την φόρτιση αυτή αποδίδει καλύτερη αφυδάτωση, με την κλίση P60 να ξεχωρίζει.

Οι τεχνητοί υγροβιότοποι αποτελούν μια φιλική προς το περιβάλλον τεχνολογία και καθιστούν την χρήση τους σημαντική για τις μελλοντικές γενιές. Με σκοπό την αύξηση της απόδοσης τους έγινε η προσπάθεια βελτιστοποίησης σχετικά με την απόδοση αφυδάτωσης της δευτεροβάθμιας ιλύος. Από τα παραπάνω αποτελέσματα συμπεραίνεται ότι το παρόν πείραμα μπορεί να επιφέρει αξιόλογα αποτελέσματα και να χρησιμοποιηθεί ως φυσικό σύστημα ξήρανσης λυμάτων σε ΕΕΛ, χωρίς να αποκλείουμε το γεγονός ότι πάντα θα υπάρχει δυνατότητα για βελτίωση της διαδικασίας.

## 4.2 Προτάσεις

Παρακάτω παρουσιάζονται πιθανές μετατροπές του συστήματος και προτάσεις για την παρούσα διπλωματική εργασία που έχουν σκοπό την βελτιστοποίηση της απόδοσης των τεχνητών υγροβιότοπων.

- Παρακολούθηση της υγρασίας στο στρώμα της υπολειμματικής ιλύος εντός των κλινών του θερμοκηπίου για την βελτιστοποίηση των κύκλων φόρτισης.
- Χρήση βοηθητικών μέσων για επεξεργασία διασταλαγμάτων για απευθείας επαναχρησιμοποίηση, όπως το βιοεξανθράκωμα.
- Παρακολούθηση μεγαλύτερης διάρκειας των συστημάτων για την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας τους.
- Σχεδιασμός των συστημάτων με τη χρήση διαφορετικών πληρωτικών υλικών.

## Βιβλιογραφία

### Ελληνική Βιβλιογραφία

- Αγγελάκης Α. Ν. και Τσομπάνογλου Γ. (1995), «Υγρά Απόβλητα: Φυσικά Συστήματα Επεξεργασίας και Ανάκτηση, Επεξεργασία και Διάθεση Εκρών», Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, Κρήτη.
- Αγιουτάντη Ροζαλία, «Μελέτη αποτελεσματικότητας τεχνητού υγροβιότοπου με αλόφυτα για την απομάκρυνση Cd, Ni και Zn από αστικά λύματα», Διπλωματική Εργασία για το προπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης, (Χανιά 2018).
- Ακράτος Σ. Χρήστος (2006), «ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΦΥΣΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ», διδακτορική διατριβή για το πρόγραμμα σπουδών του τμήματος Χημείας της σχολής θετικών επιστημών του Αριστοτέλειου πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.
- Ασημάκη Βασιλική (2022), «Βιώσιμη Διαχείριση Ιλύος από Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων στο πλαίσιο μετάβασης στην Κυκλική Οικονομία», μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Διαχείριση απόβλητων, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.
- Ασημακούλας Ιωάννης, «Βελτιστοποίηση πιλοτικών μονάδων Τεχνητών Υγροβιότοπων με χαλίκι και βιοεξανθράκωμα για την επεξεργασία διασταλάγματος από τον ΧΥΤΑ Χανίων», Διπλωματική εργασία, Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά 2022.
- Γκίκας Πέτρος, Σημειώσεις Μαθήματος «Σχεδιασμός Περιβαλλοντικών Εγκαταστάσεων και Εκτίμηση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων», Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος Πολυτεχνείου Κρήτης, Χανιά 2020.
- Ζουραράκη Ε. (2002), 'Σχεδιασμός και Λειτουργία Τεχνητών Υγροβιότοπων'.
- Κατσιμάντου Κωνσταντίνα, «Ξήρανση ιλύος αστικών και βιομηχανικών αποβλήτων με τη βοήθεια της ηλιακής ενεργείας», Διπλωματική εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη 2007.
- Λουφοπούλου Π. Μαρία, 'Απομάκρυνση βαρέων μετάλλων από επεξεργασμένα λύματα με τεχνητούς υγροβιότοπους', Μεταπτυχιακή διατριβή, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά 2018.
- Metcalf & Eddy, Inc. (2006), "Μηχανική υγρών αποβλήτων, Επεξεργασία και επαναχρησιμοποίηση", 4η έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, ISBN 960-418-108-4.
- Νταρακάς Ε.Ν. (2016), 'Τεχνικές περιβάλλοντος, Διεργασίες επεξεργασίας νερού και υγρών αποβλήτων', Εκδόσεις Σοφία, Θεσσαλονίκη.
- Σκουντούρογλου Ελένη, 'Μέθοδοι εξυγίανσης και χαρακτηρισμός ιλύος εγκαταστάσεων επεξεργασίας αστικών λυμάτων', Διπλωματική εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Θεσσαλονίκη 2019.
- Στεφανάκης Αλέξανδρος (2011), 'ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΩΝ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΡΟΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΣΤΙΚΩΝ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΚΑΙ ΛΑΣΠΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΙΛΟΤΙΚΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ', Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη.
- Σωτηροπούλου Α. (2010), 'Συστήματα τεχνητών υγροβιότοπων για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων', Πτυχιακή εργασία, Α.Τ.Ε.Ι. Δυτ. Μακεδονίας, Κοζάνη.
- Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος (2005), 'Εναλλακτικοί τρόποι διαχείρισης των παραπροϊόντων από Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων'.

- Τσιχριντζής Β., 2000, 'Οικολογική Μηχανική και Τεχνολογία, Τόμος II: Φυσικές Μέθοδοι Επεξεργασίας και Πρόληψη Ρύπανσης', Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Δημοκriteίου Πανεπιστημίου Θράκης.

#### Διεθνής Βιβλιογραφία

- Agrafioti, E., Bouras, G., Kalderis, D. and Diamadopoulos, E. (2013), "Biochar production by sewage sludge pyrolysis", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 101, pp.72–78.
- Akratos C. S., Papaspyros J. N. & Tsihrintzis V. A. (2009), "Total nitrogen and ammonia removal prediction in horizontal subsurface flow constructed wetlands: use of artificial neural networks and development of a design equation" *Bioresource technology*, 100(2), 586-596.
- Alexandros I. Stefanakis (2020), "Constructed Wetlands: Description and Benefits of an Eco-Tech Water Treatment System".
- Bakhshoodeh, R., Alavi, N., Oldham, C., Santos, R. M., Babaei, A. A., Vymazal, J., & Paydary P. (2020), "Constructed wetlands for landfill leachate treatment: A Review", *Ecological Engineering*, 146, 105725.
- Bennamoun L., Arlabosse P. and Léonard A. (2013), "Review on fundamental aspect of application of drying process to wastewater sludge". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, pp.29–43.
- Brix H. (1994a), "Use of constructed wetlands in water pollution control: historical development, present status and future perspectives", *Water Science and Technology* 30 (8), 20.
- Brix H. (1997), "Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands?", *Water Science and Technology* 35 (5), 11–17.
- Chen Y.T., Kao M.C., Yeh Y.T., Chien Y.H., Chao C.A. (2006), "Application of a constructed wetland for industrial wastewater treatment: A pilot-scale study", *Chemosphere* 64 (3), 497-502.
- Cheng Jiang, Liyue Jia, Bo Zhang, Yiliang He, George Kirumba (2013), "Comparison of quartz sand, anthracite, shale and biological ceramsite for adsorptive removal of phosphorus from aqueous solution", *Journal of Environmental Sciences* 26, (2014) 466–477.
- Cleveron Vitorio Andreoli, Marcos von Sperling, Fernando Fernandes (2007), "Biological Wastewater Treatment Series", volume 6: "Sludge Treatment and Disposal", 1-2.
- Cooper P.F., Job G.D., Green M.B., Shute R.B.E. (1996), "Reed Beds and Constructed Wetlands for Wastewater Treatment" *Water Research Center Publications*, Swindon, UK, 184.
- Environmental Protection Agency (EPA) 2015, "A handbook of constructed wetlands", Volume 1.
- EPA, September 1988, Design Manual – "Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Wastewater Treatment", EPA, Office of Research and Development, Center for Environmental Research Information, Cincinnati, Ohio.
- Halverson V. N. (2004), "Review of Constructed Subsurface Flow vs. Surface Flow Wetlands", *WSRC*, Prepared for the U.S. Department of Energy.

- Hu S., Chen H. and Chen Z. (2020), "Performance of sludge drying reed beds for the leachate purification: Effects of sludge loading frequencies and plant species". *Environmental Research*, 194, p.110452.
- Kadlec R. and Knight R. (1996), "Treatment Wetlands", CRC Press, New York.
- Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009), "Treatment Wetlands (2nd ed.)", Boca Raton, FL: CRC Press.
- Kusch P., Wiebner A., Kappelmeyer U., Weibbrodt E., Kastner M. and Stottmeister U. (2003), "Annual cycle of nitrogen removal by a pilot-scale subsurface horizontal flow in a constructed wetland under moderate climate", *Water Research*, 37: 4236-4242.
- Marchand L. et al. (2010), "Metal and metalloid removal in constructed wetlands, with emphasis on the importance of plants and standardized measurements: A review", *Environmental Pollution*, 158(12), pp.3447–3461.
- Mohamed Oussama Belloulid et al. (2017), "Solar Greenhouse Drying of Wastewater Sludges Under Arid Climate", *Waste and Biomass Valorization* volume 8, pages 193–202.
- Nielsen, S. and Stefanakis, A.I. (2020), "Sustainable Dewatering of Industrial Sludges in Sludge Treatment Reed Beds: Experiences from Pilot and Full-Scale Studies under Different Climates". *Applied Sciences*, [online] 10(21), p.7446.
- Peruzzi E., Macci C., Doni S., Masciandaro G., Peruzzi P., Aiello M. and Ceccanti B. (2009), "Phragmites australis for sewage sludge stabilization". *Desalination*, 246(1-3), pp.110–119.
- Qasaimeh A., Alsharie H., Masoud T. (2015), "A review on constructed wetlands components and heavy metal removal from wastewater".
- Reed S., Middlebrooks E. and Crites R. (1995), "Natural Systems for Waste Management and Treatment", McGraw Hill, New York.
- Ronald W. Crites, E. Joe Middlebrooks, Robert K. Bastian (2014), "Natural Wastewater Treatment Systems", Second Edition Civil and Environmental Engineering Series, CRC Press, 5-7.
- Seidel K. (1953), "Pflanzungen zwischen Gewässern und Land", *Mitteilungen Max-Planck Gesellschaft*, 17–20.
- Seidel K. (1965), "Neue Wege zur Grundwasseranreicherung in Krefeld", Vol. II. Hydrobotanische Reinigungsmethode. *GWF Wasser/Abwasser* 30, 831–833.
- Seidel K. (1966), "Reinigung von Gewässern durch höhere Pflanzen", *Deutsche Naturwissenschaft* 12, 297–298.
- Sheoran A.S., Sheoran V. (2006), "Heavy metal removal mechanisms of acid mine drainage in wetlands: A critical review", *Minerals Engineering* 19, 105–116.
- Shutes R.B.E. (2001), "Artificial wetlands and water quality improvement", *Environ. Int.* 26, 441-447.
- Srivastava J., Kalra S.J.S. and Naraian R. (2014), "Environmental perspectives of *Phragmites australis* (Cav.) Trin. Ex. Steudel", *Applied Water Science*, 4(3), pp.193–202.
- Stefanakis, Akratos & Tsinhirtzis (2014), "Vertical Flow Constructed Wetlands Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment".
- Stefanakis A. I. & Tsihrantzis V. A. (2011), "Dewatering mechanisms in pilot-scale Sludge Drying Reed Beds: Effect of design and operational parameters", *Chemical Engineering Journal*, 430-443.

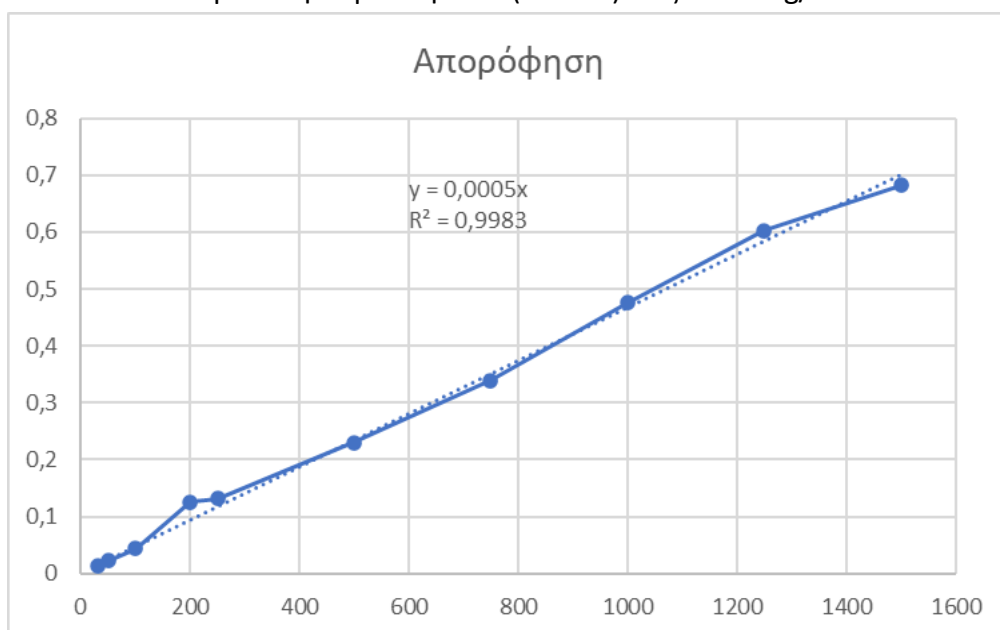
- Stefanakis, A.I., Komilis, D.P., Tsihrintzis, V.A. (2011b), "Stability and maturity of thickened wastewater sludge treated in pilot-scale sludge treatment wetlands", *Water Research* 45, 6441–6452.
- Stefanakis A. I. & Tsihrintzis V. A. (2012a), "Effects of loading, resting period, temperature, porous media, vegetation and aeration on performance of pilot-scale vertical flow constructed wetlands", *Chemical Engineering Journal*, 181-182.
- Stefanakis A. I. & Tsihrintzis V. A. (2012b), "Use of zeolite and bauxite as filter media treating the effluent of Vertical Flow Constructed Wetlands. Microporous and Mesoporous Materials", 155, 106–116.
- Steen Nielsen & Alexandros I. Stefanakis (2020), "Sustainable Dewatering of Industrial Sludges in Sludge Treatment Reed Beds: Experiences from Pilot and Full-Scale Studies under Different Climates".
- S. Troesch et al. (2009), "Sludge drying reed beds: full- and pilot-scale study for activated sludge treatment", *Water Science & Technology*, Volume 60.
- Sultana M. et al. (2014), "Chromium removal in constructed wetlands: A review" *International Biodeterioration & Biodegradation*.
- USEPA (1988). "Design Manual. Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Wastewater Treatment", U.S. Environmental Protection Agency: Office of Research and Development, Cincinnati, OH, USA.
- Vymazal J. (1995), "Algae and element cycling in wetlands". Chelsea, Michigan: Lewis Publishers 1995. 698 pp.
- Vymazal J. (1999), "Nitrogen removal in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow – can we determine the key process?", In: Vymazal J. (Ed.), *Nutrient Cycling and Retention in Natural and Constructed Wetlands*, Backhuys Publishers, Leiden, pp.1 – 17.
- Vymazal J. (2002), "The use of sub-surface constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic: 10 years experience", *Ecol. Eng.* 18, 633-646.
- Vymazal J. & Kropfelov L. (2005), "Growth of *Phragmites australis* and *Phalaris arundinacea* in constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic", *Ecological Engineering*, 606–621.
- Vymazal, J. (2007), "Removal of nutrients in various types of constructed wetlands", *The Science of the Total Environment*.
- Vymazal J., (2011), "Constructed Wetlands for wastewater treatment: five decades of experience", *Environmental Science and Technology* 45, 61–69.
- Vymazal J. (2013), "Emergent plants used in free water surface constructed wetlands: A review", *Ecological Engineering*, 61P, 582–592.
- Wang Hanxi, Sun Jitian, Xu Jianling, Sheng Lianxi (2020), "Study on clogging mechanisms of constructed wetlands from the perspective of wastewater electrical conductivity change under different substrate conditions", *Journal of Environmental Management*, Volume 292, 15 August 2021, 112813.
- Wang Y., Cai Z., Sheng S., Pan F., Chen F.-F. and Fu J. (2020), "Comprehensive evaluation of substrate materials for contaminants removal in constructed wetlands", *Science of The Total Environment*, 701, pp.134736–134736.

- Wu H. et al. (2015), "A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: Design and operation", *Bioresource Technology*, 175, pp.594–601.
- Wu S. et al. (2015), "Treatment of industrial effluents in constructed wetlands: Challenges, operational strategies and overall performance", *Environmental Pollution*, 201, pp.107–120.
- Yang L., Chang H.T. and Huang M.N.L. (2001), "Nutrient removal in gravel and soil based wetland microcosms with and without vegetation", *Ecological Engineering*, 18: 91-105.
- Yeh T.Y. (2008), "Removal of metals in constructed wetlands: a review". *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management* 12 (2), 96–101.

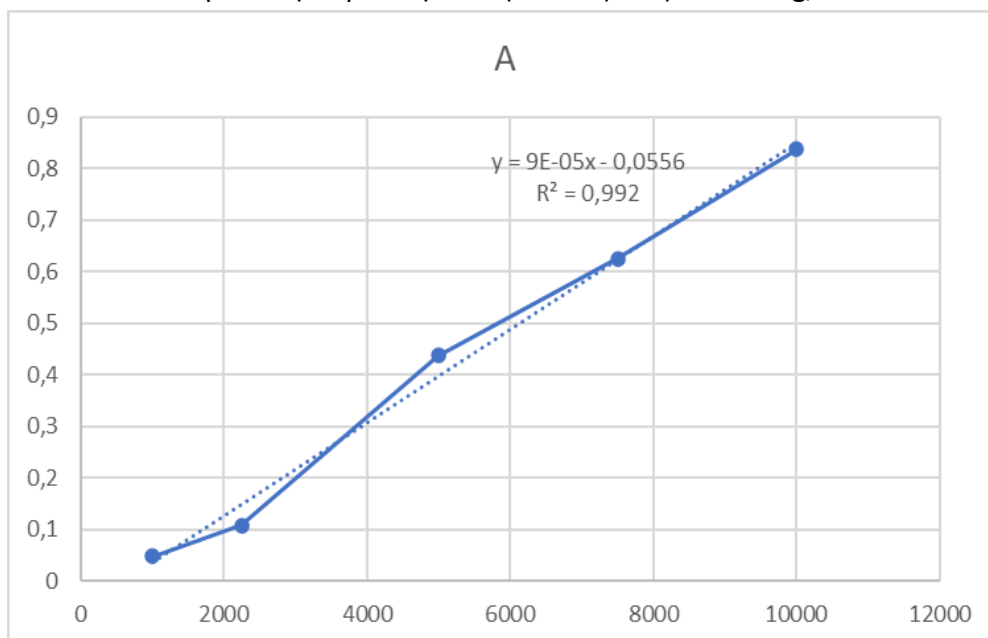


## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

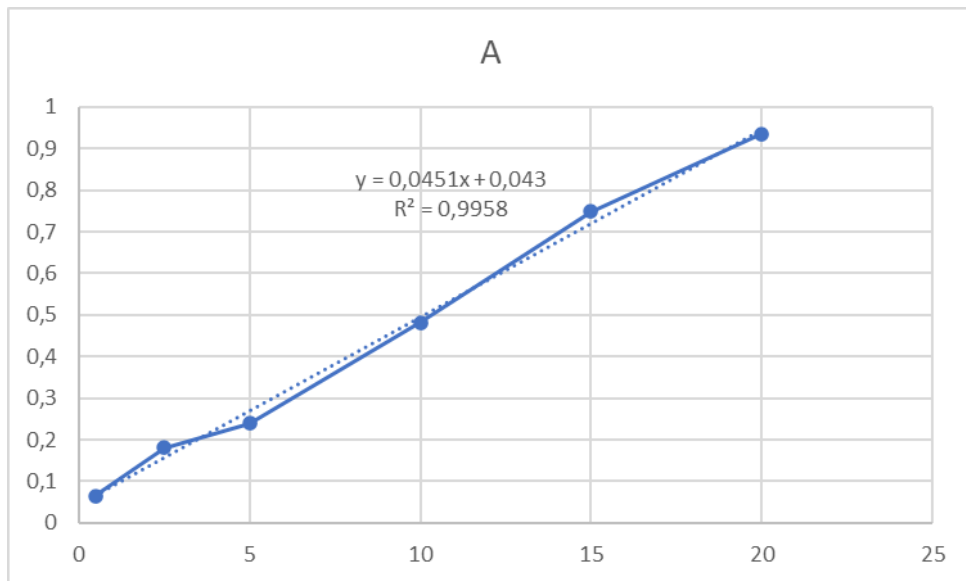
Πρότυπη Καμπύλη COD (610nm) έως 1500 mg/L



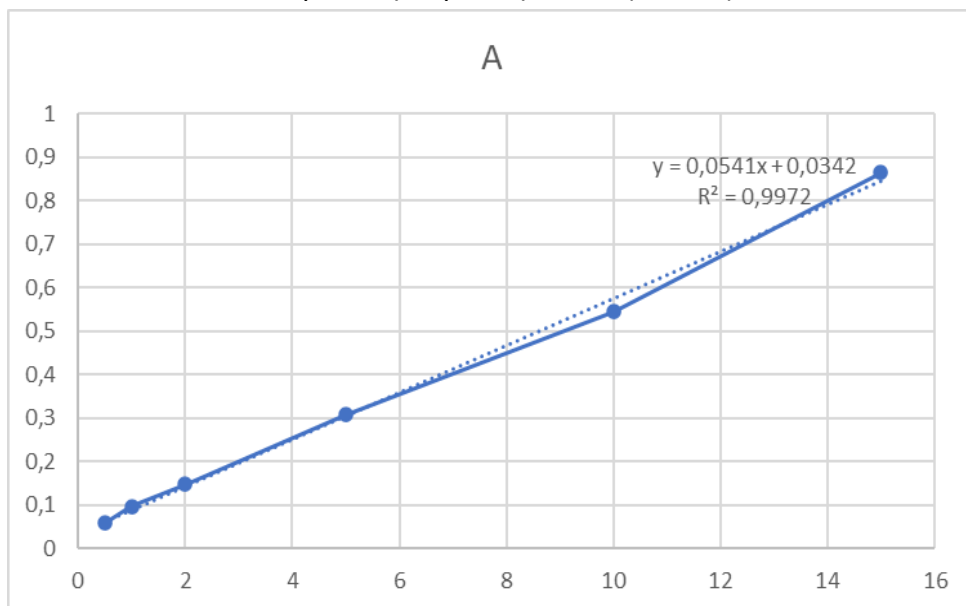
Πρότυπη Καμπύλη COD (610nm) έως 15000 mg/L



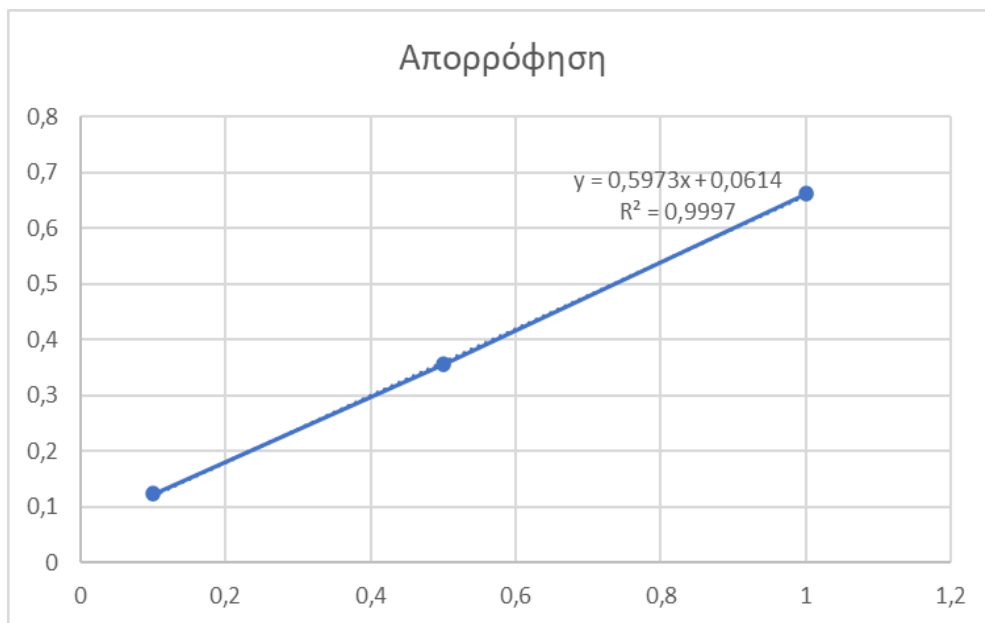
Πρότυπη Καμπύλη NH<sub>4</sub>-N (690nm)



Πρότυπη Καμπύλη NO<sub>3</sub>-N (365nm)



Πρότυπη Καμπύλη PO<sub>4</sub>-P (880nm) για απορρόφηση < 0,7



Πρότυπη Καμπύλη PO<sub>4</sub>-P (880nm) για απορρόφηση > 0,7

