



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

***Βελτιστοποίηση σχεδιασμού Τεχνητών Υγροβιότοπων  
Κατακόρυφης ροής για την επεξεργασία αστικών  
υγρών αποβλήτων με χρήση πιλοτικών μονάδων***

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Πιπερίδης Λοΐζος



Χανιά, 2022



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

**Βελτιστοποίηση σχεδιασμού Τεχνητών Υγροβιότοπων Κατακόρυφης  
ροής για την επεξεργασία αστικών υγρών αποβλήτων με χρήση  
πilotικών μονάδων**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Πιπερίδης Λοΐζος**

**ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

**Επίκουρος Καθηγητής: Αλέξανδρος Στεφανάκης (επιβλέπων)**

**Καθηγητής: Πέτρος Γκίκας**

**Καθηγητής: Νίκος Παρανυχιαννάκης**

« 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 τη 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 το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης».

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με το πέρας της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω αρχικά τον Κύριο Αλέξανδρο Στεφανάκη που ήταν ο επιβλέπων καθηγητής μου και μου εμπιστεύτηκε την πειραματική έρευνα του προγράμματος που κάνει. Ενός πολύ ενδιαφέροντος θέματος και με προοπτική. Με τον τρόπο του και την άψογη συμπεριφορά του προς εμένα με έκανε να αγαπήσω και να βάλω τον καλύτερο μου εαυτό στη πειραματική διαδικασία της διπλωματικής και ως επέκταση να εμβαθύνω περισσότερο στο κλάδο του Χημικού Μηχανικού και Μηχανικού Περιβάλλοντος. Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω την εξαιρετική και πρόσχαρη υπεύθυνη του εργαστηρίου Τεχνολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος, κυρία Ελισάβετ Κουκουράκη που μου στάθηκε δίπλα μου καθ' όλη τη διεξαγωγή του πειράματος και με τις πολύτιμες συμβουλές της και γνώσεις με έφερε πιο κοντά στο αντικείμενο της σχολής.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω το συμφοιτητή μου Δημήτρη Μαυρογιάννη που με βοήθησε να προσαρμοστώ στις απαιτήσεις του εργαστηρίου, δίνοντας μου και αυτός με τη σειρά του τις δικές του πολύτιμες συμβουλές. Ακόμη ευχαριστώ τον υποψήφιο διδάκτορα Παναγιώτη Ρεγκούζα για τη βοήθεια του και τη φιλική συμπεριφορά που έμπνεε στο εργαστήριο.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, τους κύριους Πέτρο Γκίκα και Ευάγγελο Διαμαντόπουλο για το χρόνο που ξόδεψαν αξιολογώντας την παρούσα Διπλωματική εργασία και νοιώθω περήφανος που ήμουν φοιτητής τους.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	4
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	9
ABSTRACT.....	10
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	11
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ.....	12
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....	16
2.1 ΑΣΤΙΚΑ ΥΓΡΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ.....	16
2.1.1 ΕΝΝΟΙΕΣ.....	16
ΑΣΤΙΚΑ ΥΓΡΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ (MUNICIPAL WATERWASTE).....	16
2.1.2 ΣΥΣΤΑΣΗ ΑΣΤΙΚΩΝ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ.....	16
2.1.3 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΣΤΙΚΩΝ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ.....	17
2.1.3.1 ΠΟΙΟΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΣΤΙΚΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ.....	17
2.1.3.2 ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΑΣΤΙΚΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ.....	17
Προ-επεξεργασία.....	17
Πρωτοβάθμια Επεξεργασία.....	17
Δευτεροβάθμια Επεξεργασία.....	17
Τριτοβάθμια Επεξεργασία .....	18
Περαιτέρω Επεξεργασία.....	18
2.1.4 ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ.....	19
Νομοθεσία για τη διαχείριση των αστικών υγρών αποβλήτων.....	19
2.1.5 ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ.....	21
2.2 ΦΥΣΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.....	21
2.2.1 ΦΥΣΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ.....	21
Βραδεία εφαρμογή.....	22
Ταχεία διήθηση.....	22

Επιφανειακή ροή.....	23
Δεξαμενές Σταθεροποίησης.....	25
Αναερόβια λίμνη.....	25
Επαμφοτερίζουσες λίμνες.....	26
Λίμνες Ωρίμανσης.....	26
Συστήματα Υδροχαρών Φυτών.....	27
Συστήματα με επιπλέοντα υδροχαρή φυτά.....	27
Συστήματα με βυθισμένα υδροχαρή φυτά.....	28
Συστήματα Τεχνητών Υδροβιοτόπων.....	29
2.3 ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΙ.....	30
2.3.1 ΦΥΣΙΚΟΙ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΙ.....	30
2.3.2 ΤΕΧΝΗΤΟΙ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΙ.....	31
2.3.2.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΛΕΘΥΡΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΡΟΗΣ (FWS).....	33
2.3.2.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΥΠΟΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΡΟΗΣ (HSF CWS).....	34
2.3.2.3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΥΠΟΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΡΟΗΣ (VFCWS).....	36
2.3.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΥ .....	38
2.3.4 ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΡΥΠΩΝ ΣΤΟΥΣ ΤΕΧΝΗΤΟΥΣ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΥΣ.....	38
Απομάκρυνση Αζώτου N.....	39
Απομάκρυνση φωσφόρου P <sub>1</sub> .....	40
Απομάκρυνση Βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου BOD <sub>5</sub> .....	41
Απομάκρυνση στερεών αιωρούμενων σωματιδίων TSS.....	42
Απομάκρυνση παθογόνων μικροοργανισμών.....	43
2.4 ΣΤΟΧΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	45
3.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ.....	45
3.1.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ.....	45
3.1.2 ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	46
3.1.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	46
ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ.....	46

ΤΕΛΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ.....	47
3.2 ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ.....	48
3.2.1 ΥΓΡΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ ΑΠΟ Δ.Ε.Υ.Α. Χαλίων.....	48
3.2.2 ΒΛΑΣΤΗΣΗ.....	49
3.2.3 ΗΔΡΕ.....	51
3.3 ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	53
Μέτρηση του ΡΗ.....	53
Μέτρηση Ηλεκτρικής αγωγιμότητας EC.....	53
Μέτρηση ολικών αιωρούμενων στερεών TSS.....	54
Μέτρηση ολικού αζώτου TN.....	54
Μέτρηση αμμωνιακού αζώτου NH <sub>4</sub> -N.....	55
Μέτρηση νιτρικού αζώτου NO <sub>3</sub> -N.....	55
Μέτρηση φωσφορικών PO <sub>4</sub> .....	55
Μέτρηση ολικού φωσφόρου TP.....	56
Μέτρηση Βιοχημικά Απαιτούμενου Οξυγόνου BOD <sub>5</sub> .....	57
Μέτρηση Χημικά Απαιτούμενου Οξυγόνου COD.....	57
Μέτρηση διηθημένου οργανικού Άνθρακα DOC.....	58
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	59
4.1 ΥΔΑΤΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ.....	59
4.2 ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΥΓΡΟΥ ΑΠΟΒΛΗΤΟΥ.....	61
4.2.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΕΙΣΡΟΗΣ.....	61
4.2.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΕΚΡΟΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ.....	62
ΡΗ.....	62
Ηλεκτρική Αγωγιμότητα EC.....	63
Ολικά Αιωρούμενα Στερεά TSS.....	64
Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο BOD <sub>5</sub> .....	66
Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο COD.....	68
Ολικός οργανικός Άνθρακας TOC.....	69

Ολικό Άζωτο TN.....	71
Αμμωνιακό Άζωτο NH <sub>4</sub> -N.....	72
Νιτρικό Άζωτο NO <sub>3</sub> -N.....	74
Ολικός Φώσφορος TP.....	74
Φωσφορικά PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> P.....	76
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	<b>78</b>
5.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	<b>78</b>
5.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	<b>80</b>
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	<b>81</b>
ΕΛΛΗΝΙΚΗ.....	81
ΑΓΓΛΙΚΗ.....	83
ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ.....	84



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η περαιτέρω μελέτη των πειραματικών παραμέτρων καθώς και η βελτιστοποίηση της τεχνολογίας Τεχνητών Υγροβιότοπων Κατακόρυφης Ροής για την επεξεργασία αστικών υγρών αποβλήτων. Στο πείραμα χρησιμοποιήθηκαν τρεις πιλοτικές μονάδες οι οποίες τοποθετήθηκαν στον εξωτερικό χώρο του θερμοκηπίου της Σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης. Στη μία μονάδα G (Gravel) περιείχε ως πληρωτικό υλικό χαλίκι και για την επεξεργασία φυτεύτηκε το κοινό καλάμι *Phragmites Australis*. Στη δεύτερη μονάδα P (Plastic) το πληρωτικό υλικό ήταν ανακυκλωμένο πλαστικό HDPE και πάλι φυτεμένο το καλάμι. Τέλος στην τρίτη μονάδα C (Control) περιλάμβανε μόνο το ανακυκλωμένο πλαστικό HDPE.

Για εισροή στις μονάδες χρησιμοποιήθηκε υγρό απόβλητο από το Δ.Ε.Υ.Α. Χανίων, το οποίο συλλεγόταν μετά από τη Πρωτοβάθμια Επεξεργασία. Γινόταν εμπλουτισμός των μονάδων με το λύμα ανά δύο μέρες με 8 λίτρα σε κάθε πιλοτική μονάδα. Ο όγκος των μονάδων ήταν για C(Control) 88 L, G(Gravel) και P(Plastic) 63 L. Έπειτα πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για τις εισροές και τις εκροές των μονάδων για προσδιορισμό των πιο κάτω παραμέτρων. BOD<sub>5</sub>, COD, TSS, TN, NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, TP, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P, TOC, Ηλεκτρική αγωγιμότητα EC και pH.

Μέσω των αποτελεσμάτων των αναλύσεων πάρθηκαν οι πιο κάτω αποδόσεις απομάκρυνσης για τις μονάδες G, P και C. Για BOD<sub>5</sub> η απόδοση στη μονάδα G είναι 71.75±8.97 %, στη μονάδα P 80.1±5.99 % και στη μονάδα C είναι 55.76±18.43 %. Για COD η μονάδα G στο 70.06±12.08 %, η P έχει 78.91±6.24 % και η C στο 56.68±16.31 %. Για TSS η απόδοση βρέθηκε στη μονάδα G στο 87.5±10.08 %, στη μονάδα P 84.4±15.83 % και στη μονάδα C 82.1±8.66 %. Ακολούθως για TN η μονάδα G έχει απόδοση 52.09±15.35 %, η μονάδα P στο 62.09±12.28 % και η C στο 18.3±17.80 %. Έπειτα για NH<sub>4</sub>-N η μονάδα G είναι στα 63.27±20.25 %, η P στα 71.71±13.19 % και η C στο 24.24±20.32 %. Για TP βρέθηκε για τη μονάδα G 49.17±23.69 %, για τη μονάδα P στο 41.32±15.55 % και για τη μονάδα C 41.25±17.34 %. Αντίστοιχα η απόδοση για PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P είναι για τη μονάδα G στο 35.73±16.86 %, για τη μονάδα P στο 21.78±13.83 % και στη μονάδα C στο 21.84±17.60 %. Επιπλέον για TOC, η μονάδα G έχει 50.43±26.31 % απόδοση, η μονάδα P έχει 56.10±20.94 % και η μονάδα C 56.34±19.02 %. Αναφορικά με τα NO<sub>3</sub>-N οι τιμές ήταν πάρα πολύ χαμηλές, σε αμελητέα επίπεδα. Επίσης το pH κυμαίνεται σχεδόν στα ίδια επίπεδα με αυτό της εισροής, η μονάδα P και C να είναι ελάχιστα αλκαλικό και η μονάδα G σχεδόν ουδέτερο. Τέλος η Ηλεκτρική Αγωγιμότητα EC παρουσιάζει και αυτή σχεδόν τα ίδια αποτελέσματα με αυτά της εισροής, με την μονάδα G να είναι ελαφρώς πιο ψηλά.

Συμπερασματικά προκύπτει πως η χρήση του ανακυκλωμένου πλαστικού (Πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας HDPE) ως υπόστρωμα είναι κατάλληλη για απομάκρυνση ρύπων.

## ABSTRACT

The purpose of this research was to further study the experimental parameters and better the technology of the Vertical Flow Artificial Wetlands, so as to apply the findings at the municipal wastewater processing. In the experiment, three units were used which were placed outside the greenhouse of the School of Chemical and Environmental Engineering at the Technical University of Crete. The first unit G (gravel) contained gravel as a filler material and the common reed *Phragmite Australis* for the processing. The second unit P (plastic) contained recycled plastic HDPE as the filler material; this was processed with reed as well.

Liquid waste was used as input to the units from the D.E.Y.A. of Chania, which was collected after the primary processing. The units were enriched with the sewage with 8 litres per unit every two days. The volume of the units was 88 L for C (control), and 63L for both G (gravel) and P (plastic). In continuation, analyses were made for inputs and outputs of units to determine the following parameters: BOD<sub>5</sub>, COD, TSS, TN, NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, TP, PO<sub>4</sub><sup>3</sup>-P, TOC, electrical conductivity EC and pH.

Through the results of the analyses, the following removal efficiencies were obtained for the units G, P and C. For BOD<sub>5</sub> the performance in the unit G is 71,75±8,97%, in the unit P, 80,1±5,99%, and in the unit C, 55,76±18,43%. The performance found in unit G for COD is at 70,06±12,08%, P has 78,91±6,24% and C at 56,68±16,31%. For TSS the performance found in the unit G is at 87,5±10,08%, in unit P 84,4±15,83% and in unit C 82,1±8,66%. Subsequently for TN the unit G has a performance of 52,09±15,35%, the unit P at 62,09±12,28% and C at 18,3±17,80. Also, for NH<sub>4</sub>-N the unit G is at 63,27±20,25%, P at 71,71±13,19% and C at 24,24±20,32%. It was found for the unit G for TP 49,17±23,69%, for unit P at 41,32±15,55% and for unit C 41,25±17,34%. Respectively the performance for PO<sub>4</sub> P is for the unit G at 35,73±16,86%, for the unit P at 21,78±13,83% and for the unit C 21,84±17,60%. Likewise for TOC, unit G has 50,43±26,31% performance, unit P has 56,10±20,94% and unit C 56,34±19,02%. Regarding NO<sub>3</sub>-N, prices were very low to negligible levels. Also, the PH level fluctuates almost at the same levels as that of the input, unit P and C are slightly alkaline whereas unit G is nearly neutral. Lastly, the electrical conductivity also presents almost the same results as those of the input, with unit G being at slightly higher levels.

In conclusion, it appears that the use of recycled plastic (high density polyethylene HDPE) as a substrate, is suitable for the elements above.

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1.1 : Χαρακτηριστικά αστικών λυμάτων, βωθρολυμάτων και εισροών. (Γκίκας 2020).

Πίνακας 2.2.1 : Τυπικά οργανικά φορτία σε συστήματα εδαφικής επεξεργασίας (Reed et. al, 1995)

Πίνακας 2.2.2 : Ποιοτικά χαρακτηριστικά επεξεργασμένων Υγρών Αποβλήτων με γήινα Φυσικά Συστήματα (Αγγελάκης και Tchabanoglous, 1995).

Πίνακας 2.3.1 : Δομικά στοιχεία των Τεχνητών Υγροβιότοπων και ο ρόλος τους (Μίμης, 2006)

Πίνακας 3.1.1 : Μέση, μέση μέγιστη, μέση ελάχιστη θερμοκρασία, μέση βροχόπτωση, μέση ,μέγιστη και κατεύθυνση ταχύτητας ανέμου.

Πίνακας 4.2.1 : Μέση τιμή και εύρος τιμών για παραμέτρους των εισροών.

Πίνακας 4.2.2.1: Αποτελέσματα μέσης τιμής και εύρους τιμών συγκέντρωσης και απομάκρυνσης για BOD.

Πίνακας 4.2.2.2 : Αποτελέσματα μέσης τιμής και εύρους τιμών συγκέντρωσης και απομάκρυνσης για COD.

Πίνακας 4.2.2.3 : Αποτελέσματα μέσης τιμής και εύρους τιμών συγκέντρωσης και απομάκρυνσης για TN.

Πίνακας 4.2.2.4 : Αποτελέσματα μέσης τιμής και εύρους τιμών συγκέντρωσης και απομάκρυνσης για  $\text{NH}_4\text{-N}$ .

Πίνακας 4.2.2.5 : Αποτελέσματα μέσης τιμής και εύρους τιμών συγκέντρωσης και απομάκρυνσης για TP.

Πίνακας 4.2.2.6 : Αποτελέσματα μέσης τιμής και εύρους τιμών συγκέντρωσης και απομάκρυνσης για  $\text{PO}_4^{3-}\text{P}$ .

Πίνακας 4.2.2.7 : Αποτελέσματα μέσης τιμής και εύρους τιμών συγκέντρωσης και απομάκρυνσης για TOC.

Πίνακας 4.2.2.8 : Αποτελέσματα μέσης τιμής και εύρους τιμών συγκέντρωσης και απομάκρυνσης για TSS.

Πίνακας 4.2.2.9: Αποτελέσματα μέσης τιμής και εύρους τιμών του PH.

Πίνακας 4.2.2.10: Αποτελέσματα μέσης τιμής και εύρους τιμών της EC.

## **ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ**

**Διάγραμμα 4.2.2.1 :** Συγκέντρωση BOD σε εισροή και εκροή των μονάδων G, P και C.

**Διάγραμμα 4.2.2.2 :** Απομάκρυνση % BOD των μονάδων G, P και C.

**Διάγραμμα 4.2.2.3 :** Συγκέντρωση COD σε εισροή και εκροή των μονάδων G, P και C.

**Διάγραμμα 4.2.2.4 :** Απομάκρυνση % COD των μονάδων G, P και C.

**Διάγραμμα 4.2.2.5 :** Συγκέντρωση TN σε εισροή και εκροή των μονάδων G, P και C.

**Διάγραμμα 4.2.2.6 :** Απομάκρυνση % TN των μονάδων G, P και C.

**Διάγραμμα 4.2.2.7 :** Συγκέντρωση  $\text{NH}_4\text{-N}$  σε εισροή και εκροή των μονάδων G, P και C.

**Διάγραμμα 4.2.2.8 :** Απομάκρυνση %  $\text{NH}_4\text{-N}$  των μονάδων G, P και C.

**Διάγραμμα 4.2.2.9 :** Συγκέντρωση TP σε εισροή και εκροή των μονάδων G, P και C.

**Διάγραμμα 4.2.2.10 :** Απομάκρυνση % TP των μονάδων G, P και C.

**Διάγραμμα 4.2.2.11 :** Συγκέντρωση  $\text{PO}_4^{3-}\text{P}$  σε εισροή και εκροή των μονάδων G, P και C.

**Διάγραμμα 4.2.2.12 :** Απομάκρυνση %  $\text{PO}_4^{3-}\text{P}$  των μονάδων G, P και C.

**Διάγραμμα 4.2.2.13 :** Συγκέντρωση TOC σε εισροή και εκροή των μονάδων G, P και C.

**Διάγραμμα 4.2.2.14 :** Απομάκρυνση % TOC των μονάδων G, P και C.

**Διάγραμμα 4.2.2.15 :** Συγκέντρωση TSS σε εισροή και εκροή των μονάδων G, P και C

**Διάγραμμα 4.2.2.16 :** Απομάκρυνση % TSS των μονάδων G, P και C.

**Διάγραμμα 4.2.2.17 :** PH σε εισροή και εκροή των μονάδων G, P και C.

**Διάγραμμα 4.2.2.18:** EC σε εισροή και εκροή των μονάδων G, P και C

## **ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ**

**Εικόνα 2.1.1 :** διάγραμμα P&I Βιολογικού σταθμού (Γκίκας, 2020).

**Εικόνα 2.1.2 :** Βιολογικός σταθμός, Δ.Ε.Υ.Α. Χανίων

**Εικόνα 2.2.1 :** Σύστημα Βραδείας εφαρμογής (Παρανυχιανάκης, 2021)

**Εικόνα 2.2.2 :** Σύστημα ταχείας διήθησης ( Παρανυχιανάκης, 2021)

**Εικόνα 2.2.3 :** Σύστημα OF (Παρανυχιανάκης, 2021)

**Εικόνα 2.2.4 :** Κατηγορίες Δεξαμενών σταθεροποίησης (Tilley et al.2014).

**Εικόνα 2.2.5:** Διεργασίες σε φυσικές λίμνες σταθεροποίησης

**Εικόνα 2.2.6 :**Υδροχαρή φυτά: α) υδροχαρείς υάκινθος, β) λέμνα, γ) νούφαρα (Αμπαδίνη, 2009).

**Εικόνα 2.2.7 :**Βυθισμένα υδροχαρή φυτά α) υδροφίλη, β) άλγη.

**Εικόνα 2.2.8 :**Σύστημα υδροχαρών φυτών (USEPA 1995).

**Εικόνα 2.2.9 :**Υάκινθος του Νερού.

**Εικόνα 2.3.1 :** Λίμνη Βιστονίδα, Πόρτο-Λάγος.

**Εικόνα 2.3.2 :** Τεχνητή λίμνη Κερκίνη(βορειοδυτικά του Ν. Σερρών.

**Εικόνα 2.3.3 :** Σύστημα τεχνητού υγροβιότοπου.

**Εικόνα 2.3.4 :**Τεχνητός υγροβιότοπος επιφανειακής ροής (GWT, 2017)

**Εικόνα 2.3.5 :** Τεχνητός υγροβιότοπος υποεπιφανειακής οριζόντιας ροής.

**Εικόνα 2.3.6 :** Συστήματα υποεπιφανειακής διάθεσης με οριζόντια ροή.

**Εικόνα 2.3.7 :** Συστήματα υποεπιφανειακής διάθεσης με κατακόρυφη ροή.

**Εικόνα 2.3.8 :**Τεχνητός υγρότοπος υποεπιφανειακής κατακόρυφης ροής (GWT, 2017).

**Εικόνα 2.3.9 :** Μηχανισμός απομάκρυνσης αζώτου(Ζαρμακούπης, 2006).

**Εικόνα 2.3.10 :**Κύκλος του Φωσφόρου στους τεχνητούς υγροβιότοπους (Ακράτος, 2006).

**Εικόνα 2.3.11 :** Σχηματική απεικόνιση του μηχανισμού απομάκρυνσης BOD (Sinclair Knight Merz, 2000).

**Εικόνα 2.3.12 :** Μηχανισμός απομάκρυνσης και επαναιώρησης TSS(EPA, 2002).

**Εικόνα 3.1.1 :** πιλοτικές μονάδες πειράματος.

**Εικόνα 3.1.2 :** δείγματα εκρών και εισροής προς ανάλυση

**Εικόνα 3.2.1.1 :**Βιολογικός σταθμός – Δ.Ε.Υ.Α. Χανίων.

**Εικόνα 3.2.2.1 :** *Phragmites Australis* σε φυσικό υγροβιότοπο.

**Εικόνα 3.2.3.1:** Πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας HDPE.

**Εικόνα 3.3.1 :** CRISON microPH 2002.

**Εικόνα 3.3.2 :** Συσκευή CRISON microCM 2202.

**Εικόνα 3.3.3 :** Δείγματα αμμωνίας για υπολογισμό της συγκέντρωσης. Πρώτο στα αριστερά είναι το τυφλό διάλυμα.

**Εικόνα 3.3.4 :** Ηλεκτρικό μάτι για βρασμό των διαλυμάτων του ολικού φωσφόρου και των φωσφορικών.

**Εικόνα 3.3.5 :** Δείγματα ολικού φωσφόρου και των φωσφορικών για υπολογισμό των συγκεντρώσεων. Πρώτο στα αριστερά είναι το τυφλό διάλυμα.

**Εικόνα 3.3.6 :** Δείγματα Διαλυμένου Οργανικού Άνθρακα για υπολογισμό της συγκέντρωσης του.

**Εικόνα 3.3.7 :** Μηχάνημα αναλυτή οργανικού άνθρακα. TOC analyzer της εταιρείας SHIMADZU TOC-L.

**Εικόνα 4.2.1 :** απεικόνιση δεξαμενών επεξεργασίας λυμάτων. (Νταρακάς 2014).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στις μέρες μας η επεξεργασία αστικών λυμάτων είναι αναγκαία όσο ποτέ καθώς το τελευταίο αιώνα παρατηρείται αύξηση στη ρύπανση των υδατικών πόρων, τόσο των επιφανειακών όσο και των υπόγειων υδατικών πόρων. Πηγές ρύπανσης δεν αποτελούν μόνο τα αστικά λύματα αλλά και τα βιομηχανικά και αγροτικά απόβλητα.

Η αυξημένη αυτή ρύπανση πρέπει να μειωθεί με την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων για να διασφαλιστεί η ποιότητα ζωής των ανθρώπων και η ισορροπία των οικοσυστημάτων. Επιτυγχάνοντας ακόμη μια αειφόρο ανάπτυξη με ομαλή εναρμόνιση περιβάλλοντος και ανθρώπου. Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας στις μέρες μας μπορεί ένα μολυσματικό υγρό απόβλητο με την επεξεργασία να διαμορφωθεί ακόμη και σε πόσιμο νερό. Όμως αυτό προϋποθέτει υψηλό κόστος επεξεργασίας. Για το λόγο αυτό η επιστήμη έχει στραφεί σε τεχνολογίες με πιο χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις και λιγότερο περίπλοκες.

Τέτοιου είδους τεχνολογίες είναι τα τεχνικά τροποποιημένα οικοσυστήματα CWs που με φυσικό τρόπο αντιγράφοντας την φύση καταφέρνουν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό την βιοαποικοδόμηση του υγρού αποβλήτου. Τέτοιου είδους επεξεργασίας χαρακτηρίζονται ως πράσινες τεχνολογίες με οικονομικό και περιβαλλοντικό όφελος. (Stefanakis, et al., 2014). Διαθέτοντας μάλιστα μεγάλη ανθεκτικότητα σε διάφορες διακυμάνσεις του ρυπαντικού φορτίου. Ακόμη με τη χρήση τεχνητών υγροβιότοπων και την εφαρμογή φυσικοχημικών και βιολογικών διεργασιών, όπως (καθίζηση, προσρόφηση, μικροβιακή αποδόμηση ) επιτυγχάνεται εξάλειψη και μείωση διάφορων ρύπων.(Stefanakis and Tsihrintzis, 2012).

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ**

### **2.1 ΑΣΤΙΚΑ ΥΓΡΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ**

#### **2.1.1 ΕΝΝΟΙΕΣ**

##### **ΑΣΤΙΚΑ ΥΓΡΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ (MUNICIPAL WATERWASTE)**

Αστικά υγρά απόβλητα είναι τα αστικά λύματα τα οποία προέρχονται κατά κύριο λόγο από κουζίνες (πλυντήρια, άλλα είδη καθαριότητας οικίας), χώρους υγιεινής. Συμπεριλαμβανομένου εξίσου και τα ξενοδοχεία, καταστήματα, γραφεία κτλ.

Η διάθεση τους σε αποδέκτη είναι σίγουρο ότι εγκυμονεί κινδύνους λόγου των ρυπαντικών και μολυσματικών ουσιών που περιέχουν. Για το λόγο αυτό εκδόθηκε συγκεκριμένη οδηγία 91/271/ΕΟΚ 21.05.1991 με σκοπό την προστασία του περιβάλλοντος από της αρνητικές συνέπειες της απόρριψης των υγρών αποβλήτων.

[https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/39047/pizpikist\\_pcm.pdf?sequence=1](https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/39047/pizpikist_pcm.pdf?sequence=1)

#### **2.1.2 ΣΥΣΤΑΣΗ ΑΣΤΙΚΩΝ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ**

Τα αστικά υγρά απόβλητα αποτελούνται από οργανικές ουσίες(υδατάνθρακες, λίπη, πρωτεΐνες, έλαια, φαινόλες), ανόργανες ουσίες (άλατα, άζωτο, φώσφορο) και άλλα διάφορα στερεά. Ακόμη βρίσκονται σε αυτά μικροοργανισμοί, μέταλλα, ιχνοστοιχεία, τοξικές ουσίες και διαλυμένα αέρια όπως η αμμωνία και το υδρόθειο.

Συγκεκριμένα τα λύματα αποτελούνται κατά 99.99% από νερό το οποίο περιέχει οργανικά και ανόργανα στοιχεία, ακολούθως αυτά αποτελούνται από αιωρούμενα στερεά σωματίδια ή λεπτόκοκκα στερεά κολλοειδή σωματίδια σε μορφή διαλυμένων στερεών και μικροοργανισμών (Reed et al., 1995).

Ακόμη χρησιμοποιώντας φυσικές, χημικές και βιολογικές μεθόδους μπορεί να γίνει αναγνώριση των χαρακτηριστικών των λυμάτων (Μίμης, 2006).



### 2.1.3 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΣΤΙΚΩΝ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

#### 2.1.3.1 Ποιοτικά χαρακτηριστικά αστικών λυμάτων

**Πίνακας 2.1.1.** Χαρακτηριστικά αστικών λυμάτων, βωθρολυμάτων και εισροών. (Γκίκας 2020).

Παράμετροι	Είσοδος (mg/L)			
	Αστικά Λύματα	Βωθρολύματα	Εισροές	Μέση σταθμισμένη τιμή
BOD <sub>5</sub>	210	1200	50	256
COD	400	2100	130	480
TSS	230	1000	70	264
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	40	100	10	42
TN	50	110	12	52
TP	6	50	8	9

#### 2.1.3.2 ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΑΣΤΙΚΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ

##### Προ-επεξεργασία

Σε αυτό το στάδιο γίνεται αφαίρεση των μεγάλων σωματιδίων (πέτρες, άμμος, χαλίκια, ξύλα, πλαστικά, λίπη και έλαια) με τη χρήση σχαρών.

##### Πρωτοβάθμια Επεξεργασία

Γίνεται αφαίρεση των αιωρούμενων στερεών από τα λύματα. Χρησιμοποιούνται για την αφαίρεση φυσικές και χημικές μεθόδους. Σε αυτό το στάδιο μπορεί να γίνει μείωση του Βιοχημικά απαιτούμενου Οξυγόνου(BOD) μέχρι και 20% και αφαίρεση αιωρούμενων στερεών μέχρι και 25=50%.

##### Δευτεροβάθμια Επεξεργασία

Σε αυτό το στάδιο τα λύματα οδηγούνται σε δεξαμενές αερισμού, όπου αναδεύονται και αερίζονται με την ενεργό ιλύς. Έπειτα με τη βοήθεια της βαρύτητας η ενεργός ιλύς οδηγείται στη δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης, όπου η ενεργός ιλύς διαχωρίζεται με φυσική καθίζηση και τα εναπομείναντα επεξεργασμένα λύματα οδηγούνται σε τριτοβάθμια επεξεργασία.

Επιτυγχάνεται αφαίρεση του BOD ως και 70% και 75% του Χημικά Απαιτούμενου Οξυγόνου (COD).

### Τριτοβάθμια Επεξεργασία

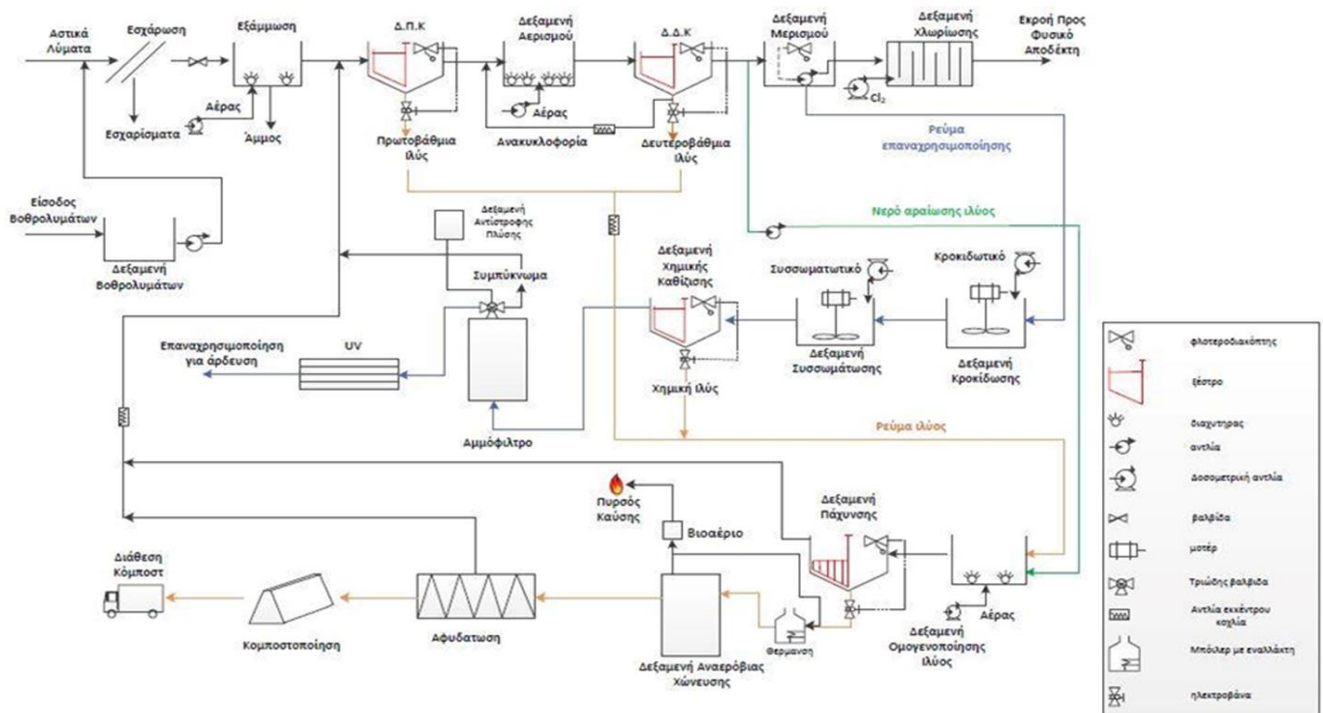
Γίνεται επιπλέον καθαρισμός των επεξεργασμένων λυμάτων με τη χρήση της διήθησης και απολύμανσης.

Απολύμανση γίνεται μέσω της χλωρίωσης, ή χρήσης όζου ή και ακόμη με UV ακτινοβολία. Η απολύμανση γίνεται ούτως ώστε να γίνει μείωση των παθογόνων μικροοργανισμών.

### Περαιτέρω Επεξεργασία

Επιπρόσθετες διεργασίες επεξεργασίας λυμάτων για αφαίρεση αζώτου, φωσφόρου ή ρυπογόνος ουσίας.

**Εικόνα 2.1.1** διάγραμμα P&I Βιολογικού σταθμού (Γκίκας, 2020).



**Εικόνα 2.1.2** Βιολογικός σταθμός, Δ.Ε.Υ.Α. Χανίων



#### **2.1.4 ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ**

##### **Νομοθεσία για τη διαχείριση των αστικών υγρών αποβλήτων**

- **Οδηγία 91/271/ΕΟΚ** του Συμβουλίου της 21<sup>ης</sup> Μαΐου 1991 για την επεξεργασία των αστικών λυμάτων η οποία τροποποιήθηκε από τη οδηγία 98/15/ΕΚ, του Συμβουλίου της 27/10/1998 και ενσωματώθηκε στο εθνικό δίκαιο **ΚΥΑ 5673/400/1997**: (Μέτρα και όροι για την επεξεργασία των αστικών λυμάτων.) που τροποποιήθηκε από την **ΚΥΑ 19661/1982/1999 (Β 1811)**: (κατάλογος ευαίσθητων περιοχών) και την **ΚΥΑ 48392/939/2002 (Β 405)**: Συμπλήρωση του καταλόγου ευαίσθητων περιοχών.

Οι χώρες – μέλη υποχρεούνται να προωθήσουν τους κατάλληλους κανονισμούς , διατάξεις και νομοθετικό πλαίσιο για την τελική διάθεση των εκροών των Μονάδων Επεξεργασίας Αστικών Λυμάτων και την απόρριψη υγρών Βιομηχανικών αποβλήτων στα αποχετευτικά δίκτυα που καταλήγουν με τη σειρά τους στις μονάδες Μονάδων Επεξεργασίας Αστικών Λυμάτων (Λοιζίδου, 2006).

Ακόμη σύμφωνα με τα άρθρα 4 και 5 της Οδηγίας οι εκροές των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων πρέπει να διατηρούν τις πιο κάτω προδιαγραφές.

- $BOD_5$  (Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο) < 25 mg/L.
- COD (Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο) < 125 mg/L.
- TSS (Ολικά αιωρούμενα στερεά) < 35 mg/L και μια διαφοροποίηση σε ορεινές περιοχές με κατοίκους κάτω των 10.000 το όριο να είναι 60 mg/L.

Σχετικά σε ευαίσθητες περιοχές που υπάρχει κίνδυνος ρύπανσης και ευτροφισμού προϋποθετούνται τα πιο κάτω όρια.

- Για 10.000 – 100.000 κατοίκους η εκροή φωσφόρου P και αζώτου N να είναι 2 και 15 mg/L αντίστοιχα.
  - Για 100.000 κατοίκους και άνω η εκροή φωσφόρου P και αζώτου N να είναι 1 και 10 mg/L αντίστοιχα.
- 
- [ΚΥΑ 145116/2011](#): Καθορισμός μέτρων , όρων και διαδικασιών για την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων και διατάξεις.
  - [ΚΥΑ 191002/2013](#): Τροποποίηση της υπ’ αριθμόν 145116/2011 κοινής υπουργικής απόφασης «Καθορισμός μέτρων , όρων και διαδικασιών για την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων (Β’ 354) και συναφείς διατάξεις».
  - [Οδηγία 86/278](#) του συμβουλίου των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων της 12<sup>ης</sup> Ιουνίου 1986 «Σχετικά με την προστασία του περιβάλλοντος και ιδίως του εδάφους κατά τη χρησιμοποίηση της ιλύος καθαρισμού λυμάτων στη γεωργία».
  - [ΚΥΑ 80568/4225/91](#): «Μέθοδοι, όροι και περιορισμοί για τη χρησιμοποίηση στην γεωργία την ιλύος που προέρχεται από την επεξεργασία οικιακών και αστικών λυμάτων».
  - [ΚΥΑ 26857 \(ΦΕΚ 196Β/6-4-88\)](#): Μέτρα και περιορισμοί για την προστασία των υπόγειων νερών και απορρίψεις ορισμένων επικίνδυνων ουσιών.
  - [Εγκύκλιος ΥΠ & ΚΑ με αρ. ΥΜ/2985/29.5-91](#) : Οδηγίες εφαρμογής Ειβ/221/65 σε συνδυασμό με 69269/5387/90 ΚΥΑ Επικαιροποιούνται και κωδικοποιούνται οι διαδικασίες για την έκδοση άδειας διάθεσης υγρών αποβλήτων με ταυτόχρονη έγκριση περιβαλλοντικών όρων, όπου απαιτείται σύμφωνα με την [ΚΥΑ 69269/5387/90](#)
  - [Εγκύκλιος 145447](#): Διευκρινίσεις με την ορθή εφαρμογή της ΚΥΑ 45116/02-02-2011 (ΦΕΚ Β’ 354/2011) «Καθορισμός μέτρων, όρων και διαδικασιών για την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων και διατάξεις».
  - [Εγκύκλιος 1589](#): Διευκρινίσεις με την ορθή εφαρμογή της ΚΥΑ 45116/02-02-2011 (ΦΕΚ Β’ 354/2011) «Καθορισμός μέτρων, όρων και διαδικασιών για την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων και διατάξεις» μετά την έκδοση του Ν.4014/2011 (ΦΕΚ 209/21-09-2011).
  - Το 1989 ο W.H.O(Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας), ο Οργανισμός Τροφίμων και Γεωργίας των Ηνωμένων Εθνών(FAO) και μαζί με την βοήθεια της Παγκόσμιας Τράπεζας και άλλων διεθνών οργανισμών προχώρησαν στη δημιουργία των πιο κάτω μέτρων για την εξάλειψη ή μείωση των κινδύνων μετάδοσης ασθενειών βασιζόμενη σε επιδημιολογικά δεδομένα ερευνών:
    - Επεξεργασία των λυμάτων.
    - Επιλογή μεθόδου άρδευσης.
    - Περιορισμός των τύπων των αρδευόμενων καλλιεργειών.
    - Έλεγχος της ανθρώπινης έκθεσης στους παθογόνους μικροοργανισμούς.

### 2.1.5 ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ

Η αλόγιστη ρήξη υγρών αποβλήτων στο περιβάλλον με συνέπεια την ρύπανση του και την οικολογική υποβάθμιση των υδατικών πόρων, των παραθαλάσσιων ακτών και θαλασσών και ακόμη τη δημιουργία και μεταφορά παθογόνων μολύνσεων οδήγησε στην ανάγκη για επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων για μια ποιοτική και βιώσιμη ανάπτυξη. Η ανάγκη αυτή επέβαλε τη λήψη δραστικών διαχειριστικών μέτρων για μείωση των κινδύνων που εγκυμονούν τα ανεπεξέργαστα λύματα (Αγγελάκης και Τσομπάνογλου, 1995).

Αιτία που κάνει επίσης αναγκαία την επαναχρησιμοποίηση λυμάτων είναι η κλιματική αλλαγή που χρόνο με το χρόνο αυξάνονται οι ξηρασίες, η υποβάθμιση υπόγειων και επιφανειακών νερών οδήγησαν επίσης στην ανάγκη εύρεσης νέων πηγών νερού (Metcalf and Eddy, 1991).

Παρόλα αυτά η επαναχρησιμοποίηση υγρών αποβλήτων πρέπει να προϋποθέτουν και να καλύπτουν συγκεκριμένους παραμέτρους, οι οποίοι είναι οι εξής (Κολικονιάρης, 2012).

- Κοινωνική αποδοχή.
- Προστασία του περιβάλλοντος.
- Προστασία των καλλιεργειών.
- Προστασία της δημόσιας υγείας.
- Συμφωνία διαφόρων κοινωνικοπολιτικών συνιστωσών.

## 2.2 ΦΥΣΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

### 2.2.1 ΦΥΣΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

Στο φυσικό περιβάλλον είναι γνωστό ότι λαμβάνουν χώρα διάφορες φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες. Αυτό για να γίνει χρειάζεται η μεσολάβηση του νερού, του εδάφους, της ατμόσφαιρας και ακόμη εξ' εξίσου σημαντική παράμετρος η αλληλοεπίδραση φυτικών και ζωικών οργανισμών. Αυτό θέλουν να αντιγράψουν τα φυσικά συστήματα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, χρησιμοποιώντας τις διεργασίες της φύσης να επιτύχουν την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων. (Kadlec and Knight, 1996).

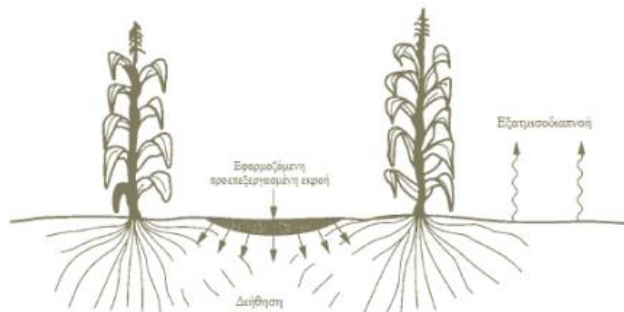
Οι διεργασίες των φυσικών συστημάτων εκτελούνται με «φυσικές» ταχύτητες διενεργώντας περισσότερες από μία συγχρόνως διεργασίες. Αντίθετα σε μηχανικά συστήματα εκτελούνται με επιταχυνόμενες ταχύτητες και οι διεργασίες γίνονται διαδοχικά, ως αποτέλεσμα της εισρέουσας σε αυτές ενέργεια (Metcalf and Eddy, 1991).

Τα φυσικά συστήματα ανήκουν σε δύο κατηγορίες (Metcalf and Eddy, 1991). :

- Αυτά που εξαρτώνται από το έδαφος ή άλλα φυσικά συστήματα. Στα συγκεκριμένα λαμβάνουν χώρα φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες και εφαρμόζονται σε βαθύτερους γεωλογικούς σχηματισμούς. Είναι οι εξής:
  - Βραδεία εφαρμογή
  - Ταχεία διήθηση
  - Επιφανειακή ροή
  - Συνδυασμένοι τύποι
- Και τα συστήματα που βρίσκονται υδροχαρή φυτά, όπως είναι οι τεχνητοί υδροβιότοποι.

#### **Βραδεία εφαρμογή**

Η εφαρμογή αυτή αποτελεί ο πιο επικρατέστερος τύπος επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, φυσικού χαρακτήρα. Γίνεται εφαρμογή προ επεξεργασμένων αποβλήτων στο έδαφος με φυτική βλάστηση, με απώτερο σκοπό την περαιτέρω επεξεργασία τους και παράλληλα ενισχύει την εξατμισοδιαπνοή της φυτικής βλάστησης. Το υγρό απόβλητο σε αυτού του τύπου επεξεργασίας μπορεί να εφαρμοστεί με καταιονισμό (εκτόξευση υγρού μέσω σταγόνων) ή επιφανειακούς μεθόδους (λεκάνες). Ακόμη για να επιτευχθούν ακόρεστες συνθήκες επιβάλλεται η διαλληματική εφαρμογή του αποβλήτου. Παρόλα αυτά τα συστήματα βραδείας εφαρμογής έχουν μερικό μεγαλύτερο κόστος από τα υπόλοιπα φυσικά συστήματα επεξεργασίας λόγω μεγάλης απαίτησης γης, σωληνώσεων και αντλιών. (Ζαρμακούπης, 2006).



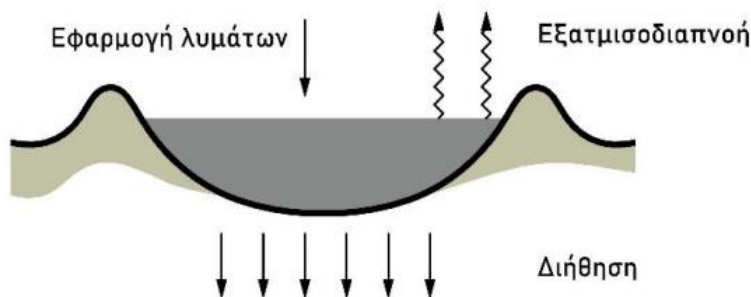
**Εικόνα 2.2.1 :**Σύστημα Βραδείας εφαρμογής (Παρανυχιανάκης, 2021)

### Ταχεία διήθηση

Ονομάζεται και SAT(Soil-Aquifer-Treatment) δηλαδή (Έδαφος-Υδροφορέας-Επεξεργασία). Τα συστήματα αυτά φέρουν το όνομα τους έτσι γιατί η εφαρμογή των αποβλήτων στις λεκάνες διήθησης γίνεται με δύναμη και με χρήση εκτοξευτών υψηλής ταχύτητας. Με αυτό τον τρόπο παρατηρείτε μικρό ποσοστό σε εξατμίσεις λόγω της γρήγορης διήθησης του υγρού αποβλήτου στο βαθύτερο στρώμα του εδάφους όπου διενεργείται περαιτέρω επεξεργασία του.

Στα συστήματα ταχείας διήθησης παρατηρείτε λιγότερη επεξεργασία από ότι στα συστήματα Βραδείας εφαρμογής, εξαιτίας του μικρότερου χρόνου κατακράτησης υγρού στο έδαφος. Ως εκ τούτου επιτυγχάνεται ικανοποιητική απομάκρυνση οργανικής ύλης και θρεπτικών συστατικών, με τις διαλυμένες ουσίες που βρίσκονται στο υγρό να μην μπορούν να μειωθούν.

Μερικά μειονεκτήματα για το συγκεκριμένο τύπο επεξεργασίας είναι πως στην αερόβια ζώνη υπάρχει πιθανότητα η οξείδωση των αζωτούχων ενώσεων με αποτέλεσμα την αύξηση των νιτρικών στον υδροφόρα. Ακόμη ένα άλλο πρόβλημα είναι πως η μέτρηση του ρυθμού διήθησης μακροχρόνια μπορεί να εκτιμηθεί λανθασμένα.(Ζαρμακούπης, 2006).



**Εικόνα 2.2.2 :**Σύστημα ταχείας διήθησης ( Παρανυχιανάκης, 2021)

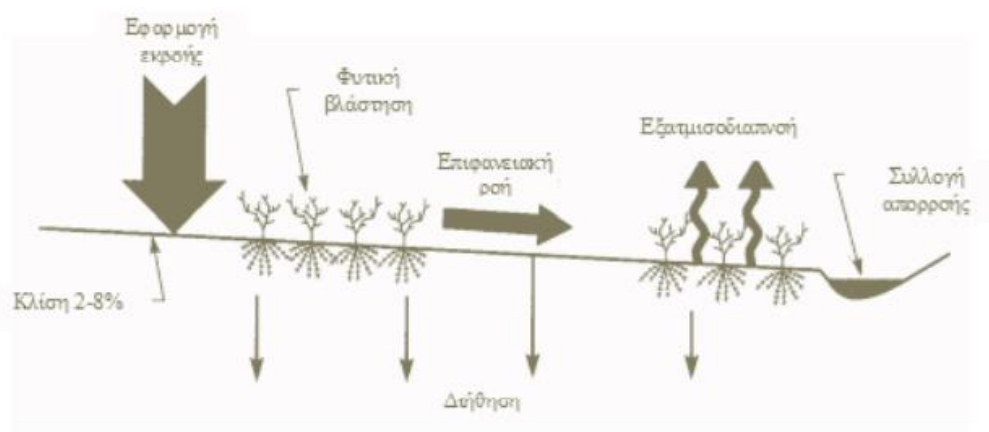


### Επιφανειακή ροή

Στα συγκεκριμένα συστήματα η εφαρμογή του προ επεξεργασμένου υγρού αποβλήτου γίνεται κατά μήκος στην ψηλότερη πλευρά της κεκλιμένης επιφάνειας με παρουσία φυτικής βλάστησης. Γίνεται ροή σε όλη την έκταση της επιφάνειας και στο τέλος της κλίσης συλλέγεται το επεξεργασμένο υγρό.

Παρατηρείτε μειωμένη εδαφική διήθηση στα συστήματα επιφανειακής ροής, με ένα μέρος του υγρού αποβλήτου να καταλήγει σε εξατμισοδιαπνοή. Οι συνολικές απώλειες του αποβλήτου εξαρτώνται από την εποχή, τις κλιματολογικές συνθήκες και το είδος της βλάστησης. Τα συστήματα αυτά λειτουργούν με εναλλασσόμενες περιόδους εφαρμογής και ανάπαυσης – ξήρανσης (Αγγελάκης και Τσομπάνογλου, 1995).

Μερικά προβλήματα που παρατηρούνται σε αυτά τα συστήματα είναι η διατήρηση της φυτικής βλάστησης και συγκεκριμένης απαιτούμενης απομάκρυνσης αιωρούμενων στερεών. Αυτό είναι συνέπεια της μη συνεχής ομοιόμορφης ροής του λύματος στην επιφάνεια της λεκάνης. (Ζαρμακούπης, 2006).



**Εικόνα 2.2.3 :**Σύστημα OF (Παρανυχιανάκης, 2021)

**Πίνακας 2.2.1** Τυπικά οργανικά φορτία σε συστήματα εδαφικής επεξεργασίας (Reed et. al, 1995)

Τύπος συστήματος	Οργανικό φορτίο (Kg/στρ. d)
Βραδεία Εφαρμογή	500 - 1000
Επιφανειακή Ροή	400-1100
Ταχεία Διήθηση	1450 - 10000



**Πίνακας 2.2.2 : Ποιοτικά χαρακτηριστικά επεξεργασμένων Υγρών Αποβλήτων με γήινα Φυσικά Συστήματα (Αγγελάκης και Tchabanoglous, 1995).**

Συστατικό	ΒΡΑΔΕΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗ <sup>a</sup>		ΤΑΧΕΙΑ ΔΙΗΘΗΣΗ <sup>b</sup>		ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΡΟΗ <sup>cd)</sup>	
	Υψηλότερη Δυνατή	Μέσος Όρος	Υψηλότερη Δυνατή	Μέσος Όρος	Υψηλότερη Δυνατή	Μέσος Όρος
<b>BOD<sub>5</sub></b>	<5	<2	<10	5	<15	10
<b>SS</b>	<5	<1	<5	2	<20	10
<b>N-NH<sub>4</sub></b>	<2	<0,5	<2	0,5	<8	,4
<b>Ολικό N</b>	<8	3	<20	10	<10	5
<b>Ολικός P</b>	<0,3	<0,1	<5	1	<6	4
<b>Κολοβακτηρίδια (No/100 cm<sup>3</sup>)</b>	<10	0	<200	10	<200	200

<sup>a</sup> Κατείδυση μέχρι 1,5 m βάθους πρωτοβάθμιας ή δευτεροβάθμιας εκροής υπό ακόρεστες συνθήκες.

<sup>b</sup> Κατείδυση μέχρι 4,5 m βάθους πρωτοβάθμιας ή δευτεροβάθμιας εκροής. Για μεγαλύτερα βάθη κατείδυσης έχουν διαπιστωθεί ακόμη υψηλότερα ποιοτικά χαρακτηριστικά, τουλάχιστον σε ό,τι αφορά το P και τα κολοβακτηρίδια.

<sup>c</sup> Απορροή αστικού υγρού αποβλήτου σε κλίση 45 m περίπου.

<sup>d</sup> Όλες οι μονάδες μέτρησης αναφέρονται σε mg/l εκτός από αυτές, που γίνεται ειδική αναφορά.

### Δεξαμενές Σταθεροποίησης

Χρησιμοποιούνται για μεγάλο εύρος ποικιλίας υγρών αποβλήτων, από οικιακά μέχρι σύνθετα βιομηχανικά απόβλητα και σε διάφορες καιρικές συνθήκες. Σημαντικό πλεονέκτημα τους είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθούν μόνες τους ή σε συνδυασμό με άλλα συστήματα επεξεργασίας.

Πιο κάτω είναι οι τρεις κατηγορίες δεξαμενών σταθεροποίησης, οι οποίες κατηγοριοποιούνται ανάλογα των αναγκών των βιολογικών διεργασιών και το βάθος τους.

- **Αναερόβια λίμνη**

Χρησιμοποιείτε σε ισχυρά βιομηχανικά και αστικά απόβλητα. Χαρακτηρίζεται με βάθος ως και 5m μικρής επιφάνειας και χρόνο παραμονής 24-50 ώρες. Για διατήρηση υψηλής θερμοκρασίας του υγρού αποβλήτου καλύπτεται η επιφάνεια είτε με φυσικό τρόπο, δηλαδή λίπη και έλαια ή με τεχνητό τρόπο, προσθέτοντας για παράδειγμα πλαστικά

Μειονέκτημα του συγκεκριμένου συστήματος είναι η ανάγκη για περαιτέρω επεξεργασία του αποβλήτου μετά την εκροή και η δημιουργία δυσάρεστων οσμών που παράγονται από τις βιολογικές διεργασίες, έκλυση υδρόθειου, αμμωνίας, μεθανίου. (Παρανυχιανάκης, 2021)

- **Επαμφοτερίζουσες λίμνες**

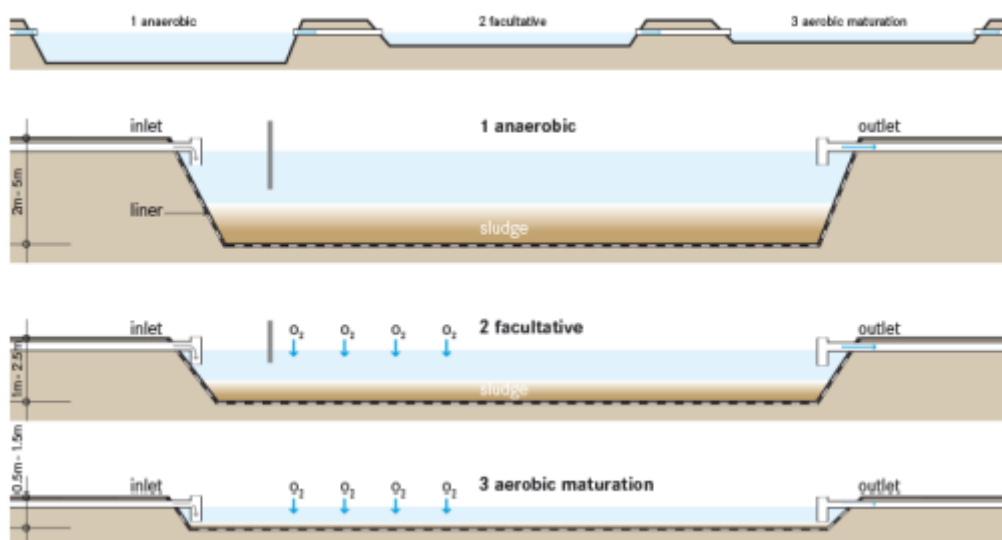
Αποτελεί το πιο συνηθισμένο τύπο λιμνών. Οι λίμνες αυτές έχουν βάθος 1-2,5m με μια αερόβια ζώνη να βρίσκεται πάνω από μια αναερόβια ζώνη. Ο αερισμός της αερόβιας ζώνης γίνεται μέσω της φωτοσύνθεσης των αλγών και της εισροής αέρα από την επιφάνεια. Κατηγοριοποιούνται ως εξής; (Ζαμπουράκης, 2006).

Πρωτοβάθμιες: επεξεργάζονται ανεπεξέργαστα υγρά απόβλητα

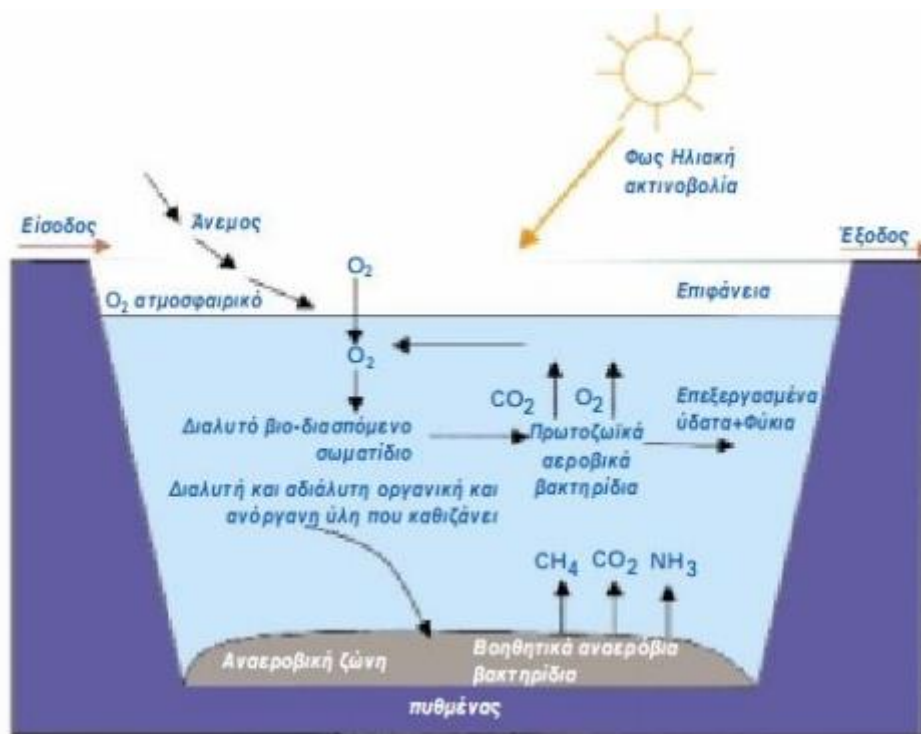
Δευτεροβάθμιες: επεξεργάζονται προ επεξεργασμένα υγρά απόβλητα

- **Λίμνες Ωρίμανσης**

Είναι σχεδιασμένες για απομάκρυνση παθογόνων μικροοργανισμών, οργανικού φορτίου και θρεπτικών συστατικών. Κυρίως οι συγκεκριμένες λίμνες δέχονται την εκροή των επαμφοτερίζουσών λιμνών. Καθοριστικοί παράγοντες για την απομάκρυνση των παθογόνων μικροοργανισμών είναι ο χρόνος παραμονής, η θερμοκρασία, η υπεριώδης ηλιακή ακτινοβολία, υψηλή συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου και το υψηλό pH (Παρανυχιανάκης, 2021).



**Εικόνα 2.2.4 :** Κατηγορίες Δεξαμενών σταθεροποίησης (Tilley et al.2014).



Εικόνα 2.2.5: Διεργασίες σε φυσικές λίμνες σταθεροποίησης

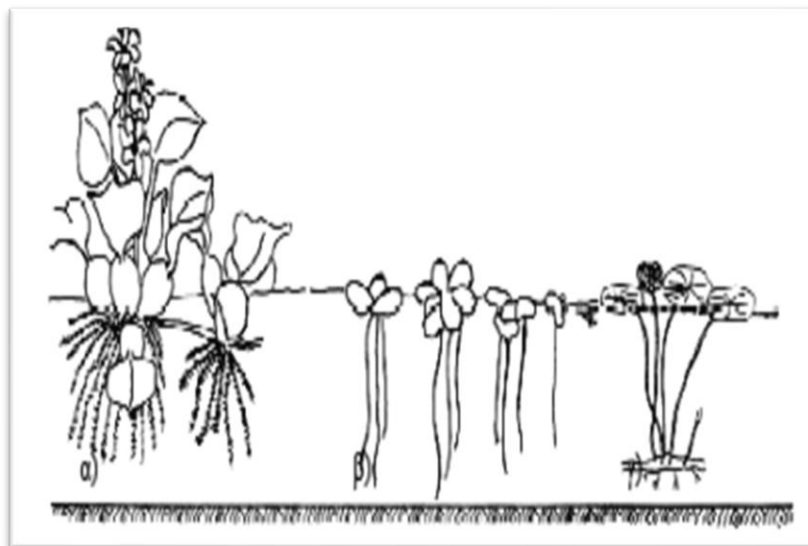
### Συστήματα Υδροχαρών Φυτών

Τα συστήματα υδροχαρών φυτών είναι παρόμοια με τα συστήματα των δεξαμενών σταθεροποίησης. Κατηγοριοποιούνται σε δύο τύπους συστημάτων :

- **Συστήματα με επιπλέοντα υδροχαρή φυτά**

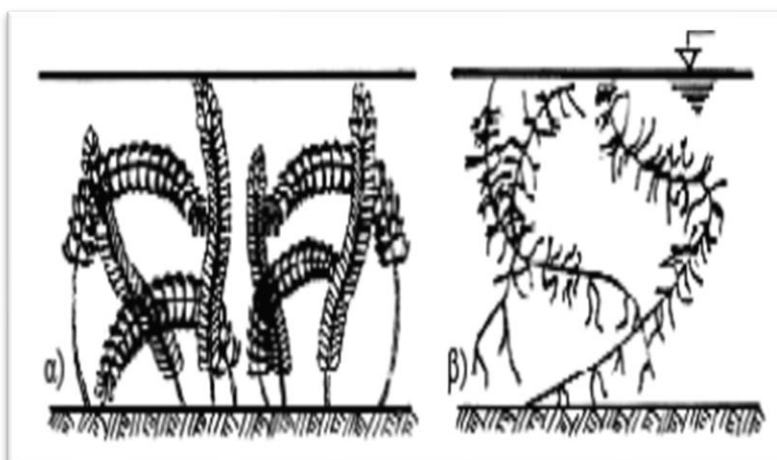
Τέτοιου είδους συστήματα μοιάζουν με αυτά της ελεύθερης επιφάνειας υγροβιότοπου, με βασική διαφορά τους, ότι σε αυτά τα φυτά είναι επιπλέοντα. Για περεταίρω αύξηση της ικανότητας της επεξεργασίας εφαρμόζεται περισσότερος αερισμός για διατήρηση αερόβιων συνθηκών. Το βάθος των συστημάτων αυτών κυμαίνεται από 0,5 – 1,8m.

Τέτοιου είδους επιπλέοντα υδροχαρή φυτά χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση αλγών από εκροές λιμνών σταθεροποίησης. (Ζαμπουράκης, 2006)

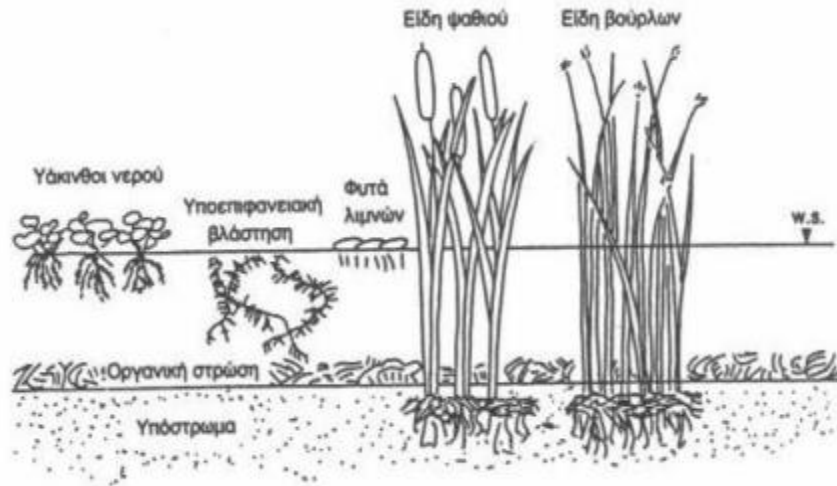


Εικόνα 2.2.6 :Υδροχαρή φυτά: α) υδροχαρείς υάκινθος, β) λέμνα, γ) νούφαρα (Αμπαδίνη, 2009)

- Συστήματα με βυθισμένα υδροχαρή φυτά



Εικόνα 2.2.7 :Βυθισμένα υδροχαρή φυτά α) υδροφίλη, β) άλγη



**Εικόνα 2.2.8 :** Σύστημα υδροχαρών φυτών (USEPA 1995)



**Εικόνα 2.2.9 :** Υάκινθος του Νερού

### **Συστήματα Τεχνητών Υδροβιοτόπων**

Οι τεχνητοί υδροβιότοποι χρησιμοποιούνται για μείωση του ρυπαντικού φορτίου αστικών, βιομηχανικών, γεωργικών λυμάτων και ακόμη νερών απορροής. Με αυτή την επεξεργασία των υγρών λυμάτων προστατεύονται οι εδαφικοί πόροι από οργανικό και ανόργανο ρυπαντικό φορτίο. Με τη βοήθεια φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών επιτυγχάνεται απομάκρυνση θρεπτικών συστατικών, τοξικών ουσιών και γίνεται συγκράτηση ιζημάτων.

## 2.3 ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΙ

### 2.3.1 ΦΥΣΙΚΟΙ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΙ

Υγροβιότοπος μπορούμε να πούμε πως είναι μια περιοχή η οποία καλύπτεται μόνιμα ή εποχιακά από νερά ή ακόμη το έδαφος να είναι ως επί το πλείστο υγρό για μεγάλο χρονικό διάστημα μέσα στο έτος. Το νερό μπορεί να είναι στάσιμο ή ρέον, γλυκό, υφάλμυρο ή και αλμυρό. Η οικολογική τους σημασία είναι πολύ σημαντική γιατί σε αυτούς ζουν και αναπαράγονται μεγάλος αριθμός οργανισμών χλωρίδας και πανίδας, μικροοργανισμοί, θηλαστικά, ερπετά, ψάρια κ.τ.λ. Βοηθώντας στην πραγματοποίηση υδρολογικών και χημικών κύκλων που οδηγούν στον καθαρισμό των υδάτων από ρυπασμένα φορτία. Συνεισφέρουν ακόμη στον εμπλουτισμό των υπόγειων υδάτων. Επιπλέον συμβάλλουν ακόμη στην αποτροπή πλημμυρών και προστασία ακτογραμμών. Αυτό τους δίνει σημαντική οικονομική αξία, αφού μπορεί να γίνει μέσω αυτών παραγωγή ενέργειας και τροφής( Prescott et. al., 1997). Λόγω της υψηλής τους σημασίας επικυρώθηκαν και προστατεύονται από τη διεθνή σύμβαση του Ραμσάρ.



**Εικόνα 2.3.1:** Λίμνη Βιστονίδα, Πόρτο-Λάγος.

Η μεγάλη αστική ανάπτυξη και η εκμετάλλευση φυσικών περιοχών έχει οδηγήσει στην καταστροφή πολλών φυσικών υγροβιότοπων (Tsihrintzis 1999). Με την επικύρωση νόμων από πλευράς Ευρωπαϊκής ένωσης και Παγκόσμιων οργανισμών έχει σταματήσει σημαντικά η καταστροφική εκμετάλλευση των Φυσικών υγροβιότοπων. Σε κάθε Φυσικό υγροβιότοπο προειποθετούντε ορισμένα όρια για εισροές υγρού αποβλήτου σε αυτούς, τα όρια θεσπίζονται από Νομοθετικά σχέδια και μέσω του Εθνικού Μολυσματικού Συστήματος Απαλλαγής Αποβολών (NPDES). Για το λόγο αυτό, για



εξασφάλιση και προστασία των Φυσικών οικοσυστημάτων, κατασκευάζονται τεχνητοί υγροβιότοποι για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων, από όπου και αν προέρχονται. (Tsihrintzis 2004).

Στους περισσότερους φυσικούς υγροβιότοπους περιλαμβάνονται συστήματα επιφανειακής ροής, τα οποία περιέχουν βαλτώδη βλάστηση (US. EPA., 2002).



**Εικόνα 2.3.2:** Τεχνητή λίμνη Κερκίνη(βορειοδυτικά του Ν. Σερρών

### **2.3.2 ΤΕΧΝΗΤΟΙ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΙ**

Οι τεχνητοί υγροβιότοποι είναι μια πράσινη τεχνολογία επεξεργασίας υγρών αποβλήτων με χρήση φυτών – υδροχαρών φυτών τα οποία έχουν την ικανότητα με την επαφή τους με τα υγρά απόβλητα να ελαχιστοποιούν ή ακόμη και να απομακρύνουν το ρυπογόνο φορτίο τους. Αυτό γίνεται μέσω φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών. Οι τεχνητοί υγροβιότοποι είναι πιστό αντίγραφο των φυσικών υδροβιοτόπων, εκμεταλλεύοντας τις διεργασίες που γίνονται στους φυσικούς υδροβιοτόπους για προστασία του φυσικού οικοσυστήματος (Stefanakis et al., 2014).

Παρόλα αυτά οι τεχνητοί υγροβιότοποι που επεξεργάζονται υγρά απόβλητα έχουν μεγαλύτερη απόδοση στην απομάκρυνση του ρυπογόνου φορτίου από ότι οι φυσικοί υγροβιότοποι. Αυτό συμβαίνει γιατί στους τεχνητούς υγροβιότοπους ενισχύονται και ρυθμίζονται στο επιθυμητό βαθμό που χρειάζονται η απαιτούμενες διεργασίες (Kadlec and Wallace 2009).

Οι τεχνητοί υγροβιότοποι θεωρούνται χαμηλού κόστους εναλλακτικές λύσεις για την επεξεργασία αστικών, βιομηχανικών και αγροτικών υγρών αποβλήτων. Οι τεχνητοί υγροβιότοποι προτιμώνται από τους φυσικούς γιατί εφαρμόζονται περισσότερα μηχανικά μέσα για τον καλύτερο έλεγχο τους (Kadlec and Knight 1995, Ayaz and Akca, 2001). Με τη σωστή διαχείριση και εφαρμογή της βλάστησης στον επιθυμητό βαθμό που χρειάζεται το σύστημα αυξάνεται η αξιοπιστία στην απόδοση του τεχνητού υγροβιότοπου (Bendoricchio et al., 2000). Ακόμη τέτοιου είδους τεχνολογίες έχουν χαμηλό κόστος και μικρές απαιτήσεις συντήρησης (Haberl et al., 1995, Hammer., 1989, Ayaz and Akca, 2001).

Χαρακτηριστικά που χαρακτηρίζουν κατά πόσο πράσινο είναι ένα σύστημα τεχνητού υγροβιότοπου, σύμφωνα με τον Brix (1999):

- Χαμηλή εκπομπή πολλαπλών ρύπων στο περιβάλλον.
- Υψηλή απόδοση επεξεργασίας σε σχέση με αποδεκτά όρια εκροής.
- Δυνατότητες ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης.
- Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας
- Ελάχιστη παραγωγή παραπροϊόντων.
- Χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.
- Ελάχιστες περιβαλλοντικές οχλήσεις και πολλαπλά περιβαλλοντικά οφέλη.
- Ελάχιστη ή μηδενική χρήση χημικών.



**Εικόνα 2.3.3 :** Σύστημα τεχνητού υγροβιότοπου



Υπάρχουν δύο συστήματα τεχνητών υδροβιοτόπων

- Συστήματα ελεύθερης επιφανειακής ροής (Free Water System, FWS)
- Συστήματα υποεπιφανειακής ροής, τα οποία χωρίζονται με τη σειρά τους σε δύο υποκατηγορίες:
  - Συστήματα υποεπιφανειακής οριζόντιας ροής (Horizontal subsurface flow, HSSF)
  - Συστήματα υποεπιφανειακής κατακόρυφης ροής (Vertical flow system, VFS)

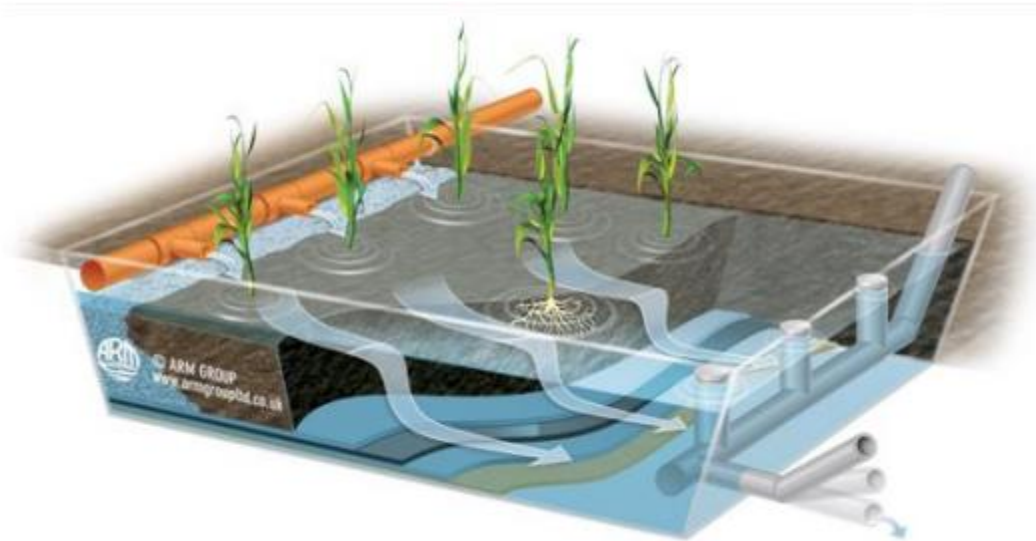
### **2.3.2.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΛΕΘΥΡΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΡΟΗΣ (FWS)**

Τέτοιου είδους συστήματα τεχνητών υδροβιοτόπων συναντώνται κυρίως στην Βόρεια Αμερική, οι οποίοι διαχειρίζονται αστικά απόβλητα (Kadlec and Wallace., 2009) και σύμφωνα με (Stefanakis, 2020) μπορούν ακόμη να διαχειριστούν και βιομηχανικά απόβλητα. Μοιάζουν με τους φυσικούς υγρότοπους στην εμφάνιση και συνήθως απαιτούν μεγάλη επιφάνεια για την κατανομή του νερού. Τα συγκεκριμένα συστήματα τεχνητών υδροβιοτόπων αποτελούνται από ρηχές λεκάνες οι οποίες είναι επενδυμένες στο πυθμένα με (γεωύφασμα, άργιλο) για αποφυγή διαρροής λυμάτων στον υδροφόρο ορίζοντα. Στις λεκάνες προθέτονται εδαφικό στρώμα πάχους 20-50cm στο οποίο γίνεται εκ φύτευση των φυτών που θα χρησιμοποιηθούν για την επεξεργασία του υγρού αποβλήτου. Όπως φέρει και το όνομα του συστήματος η ροή του νερού γίνεται στο άνω μέρος του εδαφικού στρώματος σε οριζόντια κίνηση και με μικρή ταχύτητα, δημιουργώντας με αυτό τον τρόπο στήλη νερού με πάχος από 20 ε ως 80 cm. Έπειτα με τη διείσδυση του νερού στο ριζικό σύστημα των φυτών λαμβάνουν χώρα οι φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες για την απομάκρυνση των ρύπων στα υγρά απόβλητα (Stefanakis et al. 2014).

Παρόλα αυτά συστήματα σαν αυτά σχεδιάζονται και σαν ενίσχυση υφιστάμενων φυσικών υδροβιοτόπων (Αγγελάκης και Tchobanoglous, 1995).

Η απομάκρυνση στερεών γίνεται μέσω της καθίζησης. Η απομάκρυνση αζώτου (N) γίνεται κυρίως λόγω των διεργασιών νιτροποίησης-απονιτροποίησης παρά από τα φυτά. Αυτό συμβαίνει λόγω του χρόνου συγκράτησης οργανικού φορτίου από τα φυτά. Και τέλος η απομάκρυνση φωσφόρου (P) πραγματοποιείται μέσω της προσρόφησης, συσσωμάτωσης και καθίζησης, η οποία είναι ελάχιστη λόγω μικρού χρόνου επαφής αποβλήτου εδάφους. (Σωτηροπούλου 2010, Σπυρίδων 2016, Tsihrintzis 2004). Το νερό που βρίσκεται κοντά στο πυθμένα βρίσκεται σε αναερόβια φάση, ενώ στην επιφάνεια επικρατούν αερόβιες συνθήκες (Kadlec and Wallace., 2009). Το χειμώνα όταν η θερμοκρασία είναι χαμηλή παρατηρείται μείωση ή ακόμη και αναστολή της ανάπτυξης μικροβίων λόγω της ενίσχυσης της διαλυτότητας του οξυγόνου στο νερό στο σύστημα (Vymazal, 2009).

Ακόμη παρατηρήθηκε πως οι εγκαταστάσεις τεχνητών υδροβιοτόπων επιφανειακής ροής είναι αρκετά αποδοτικοί σε περιοχές Μεσογειακού κλίματος (Tsihrintzis et al. 2007).

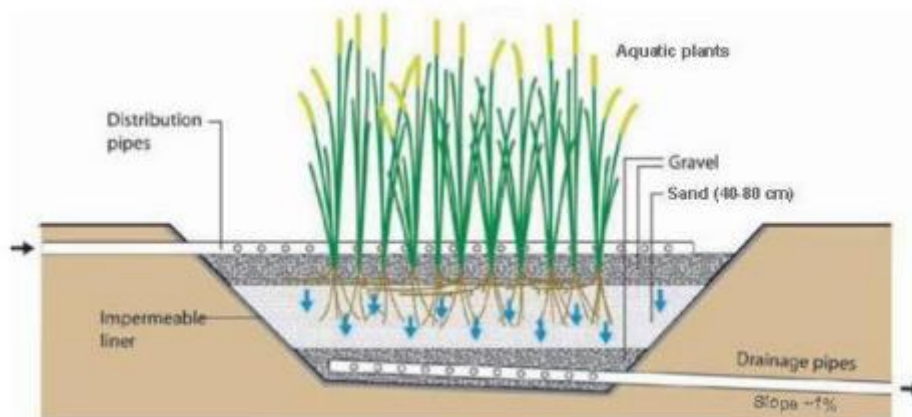


**Εικόνα 2.3.4** . Τεχνητός υγροβιότοπος επιφανειακής ροής (GWT, 2017)

#### **2.3.2.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΥΠΟΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΡΟΗΣ (HSF CWS)**

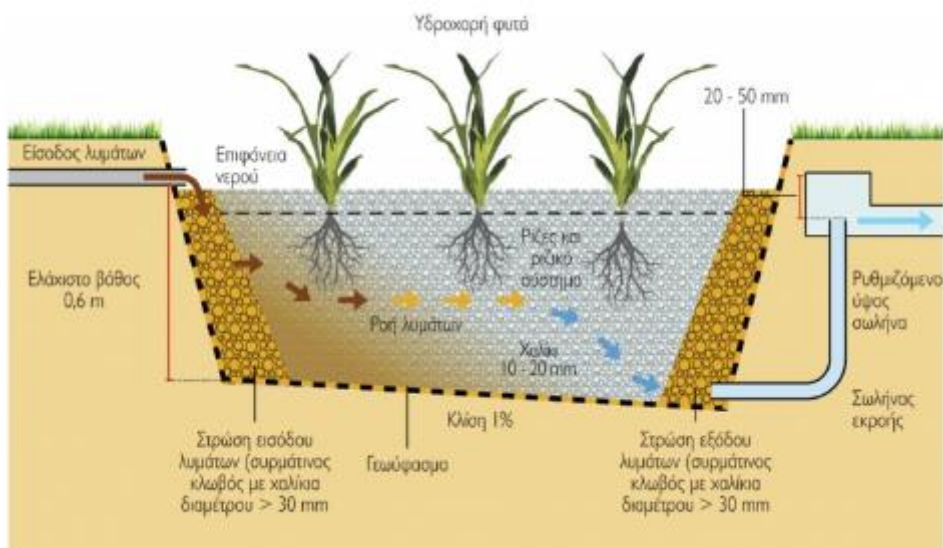
Σε τέτοιου είδους υγροτόπων τα λύματα εισέρχονται από τη μία άκρη της κλίνης και εξέρχονται από την άλλη άκρη. Τα συστήματα αυτά οριζόντιας ροής αποτελούνται από κλίνες με χαλίκι ή χώμα στα οποία η ροή γίνεται υπόγεια και σχεδόν οριζόντια, βάση αυτού δεν υπάρχει συγκέντρωση κουνουπιών λόγω της μη εκτεθειμένης ροής στην ατμόσφαιρα (Vymazal et al. 2006,1998, kadlec and Wallace., 2009). Οι κλίνες, οι οποίες διατηρούν μία κλίση της τάξης 1-2% τοποθετείτε το πληρωτικό υλικό με διάμετρο κόκκων 2,5-5cm στο οποίο γίνεται η φύτευση των υδροχαρών φυτών (καλάμια, βούρλα κ.τ.λ.) (Kadlec and Knight 1996, Reed et. al, 1995).

Μέσω της χρήσης διάτρητου σωλήνα που βρίσκεται κατά πλάτος της κλίνης παρατηρείτε ομοιόμορφη ροή των υγρών αποβλήτων. Ακόμη πραγματοποιείτε ανάπτυξη βιοφίλμ( συσσωρευμένη βιομάζα βακτηρίων και εξωκυτταρικού υλικού, το οποίο συμβάλλει η παρουσία ανεπτυγμένου ριζικού συστήματος στο πορώδες υλικό. Το βιοφίλμ με τη σειρά του συμβάλλει στην αφαίρεση τους οργανικής ύλης και των αιωρούμενων στερεών(Stefanakis et al. 2014).



**Εικόνα 2.3.5 :** Τεχνητός υγροβιότοπος υποεπιφανειακής οριζόντιας ροής

Στο μεγαλύτερο μέρος αυτού του συστήματος επικρατούν αναερόβιες συνθήκες. Η αφαίρεση αιωρούμενων στερεών και οργανικής ύλης γίνεται μέσω της κροκίδωσης και καθίζησης. Η απομάκρυνση αζώτου (N) αν και δεν είναι αποτελεσματική, λόγω μη ευνοϊκών συνθηκών γίνεται κατά κύριο λόγο μέσω νιτροποίησης και απονιτροποίησης. Και τέλος για αφαίρεση φωσφόρου (P) πραγματοποιείται απορρόφηση και κατακρήμνιση, που σε ορισμένες περιπτώσεις για ενίσχυση της αφαίρεσης προσθέτονται υλικά υψηλής προσρόφησης, όπως (σίδηρος, ασβεστώδη υλικά ή και ομάδες οξειδίων). Συνήθως σε τέτοιου είδους τεχνητών υγροβιότοπων εκτελείται δευτεροβάθμια και τριτοβάθμια επεξεργασία. (Crites et al., 2006; Kadlec & Wallace, 2008; Μουτάφη, 2018)



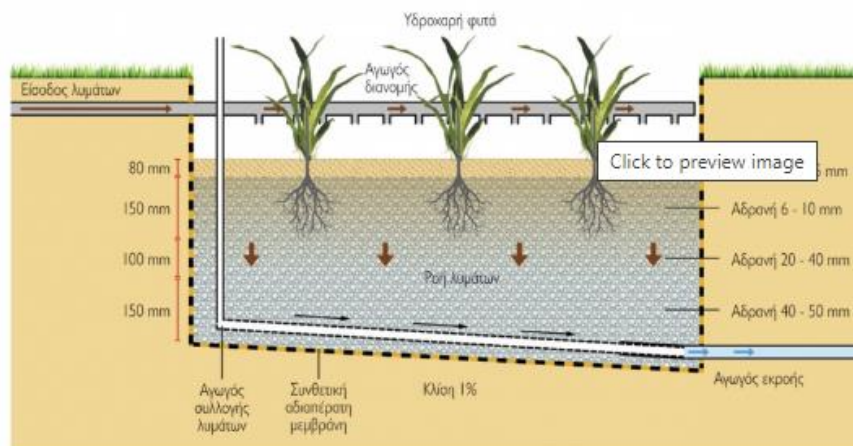
**Εικόνα 2.3.6:** Συστήματα υποεπιφανειακής διάθεσης με οριζόντια ροή.

### 2.3.2.3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΥΠΟΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΡΟΗΣ (VFCWs)

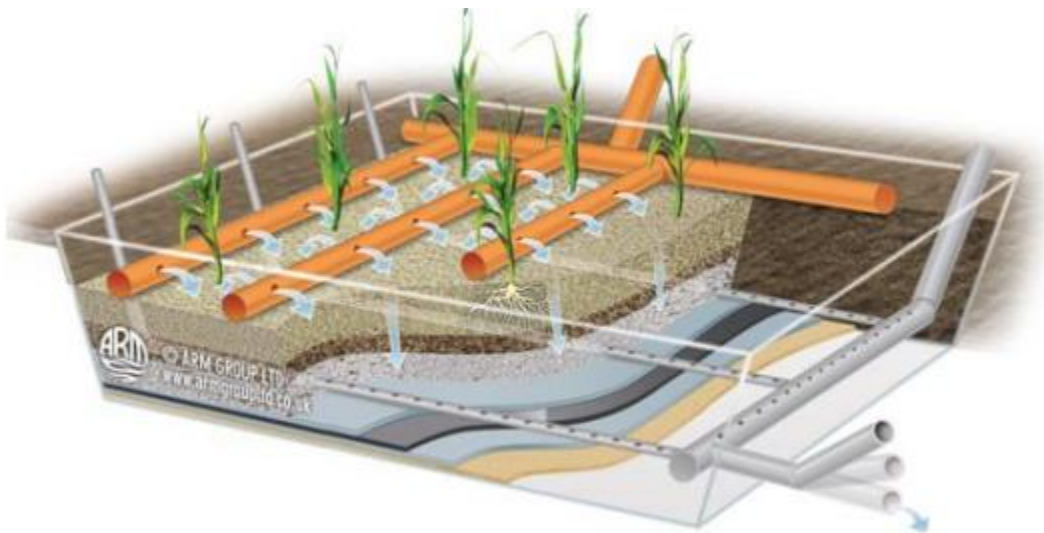
Τα συστήματα αυτά κατακόρυφης ροής αποτελούνται από κλίνες με βάθος από 0,45 -1,20m και κλίση πυθμένα 1-2%. Όπως και οι υπόλοιποι τεχνητοί υδροβιότοποι έτσι και αυτού του είδους ο πυθμένας καλύπτεται με γεωεμβράνη ή οπλισμένο σκυρόδεμα και ως πληρωτικό υλικό τοποθετείται άμμος ή χαλίκια διαφορετικής διαμέτρου. Για βλάστηση επιλέγεται κυρίως καλάμια (*Phragmites Australis*). (Stefanakis et al. 2014).

Η ροή στα συστήματα αυτά γίνεται κατά την κατακόρυφη διεύθυνση και η παροχή στις λεκάνες γίνεται περιοδικά με εφαρμογή μεγάλων ποσοτήτων λύματος. Σημαντικό πλεονέκτημα αυτού του είδους τεχνητού υδροβιότοπου είναι πως χρειάζονται μικρότερη έκταση για την επεξεργασία λυμάτων από ότι άλλου είδους συστήματα (Καραμούζης, 2003). Έπειτα αφού εισέλθει το υγρό απόβλητο στη κλίνη και διαπεράσει το πληρωτικό υλικό συλλέγεται από ένα σύστημα σωληνώσεων με οπές, οι οποίες είναι ομοιόμορφα καταναμημένες στο πυθμένα της κλίνης, όπου γίνεται η τελική διάθεση του επεξεργασμένου υγρού αποβλήτου (Ακράτος, 2006)

Το αυξημένο ριζικό σύστημα των φυτών που υπάρχει μέσα στο πληρωτικό υλικό παρέχει συνεχή αερισμό στο έδαφος. Ακόμη οι μικροοργανισμοί που αναπτύσσονται εκεί μπορούν να αποικοδομήσουν οργανικό φορτίο και δύσκολα διασπώμενες ενώσεις (Σπυρίδων, 2016). Επίσης επειδή δεν υπάρχει ελεύθερη επιφάνεια νερού τα προβλήματα κακοσμίας και ανάπτυξης εντόμων είναι λιγοστά. Με τη λειτουργία τους μπορεί να γίνει απομάκρυνση COD, TSS, ανεπιθύμητων βακτηρίων, αζώτου (N) και Φωσφόρου (P) σε συνθήκες αερόβιας και αναερόβιας φάσης και με τη βοήθεια των διεργασιών νιτροποίησης – απονιτροποίησης και προσρόφησης (Βάρκας, 2007).



Εικόνα 2.3.7: Συστήματα υποεπιφανειακής διάθεσης με κατακόρυφη ροή.



Εικόνα 2.3.8: Τεχνητός υγρότοπος υποεπιφανειακής κατακόρυφης ροής (GWT, 2017).

Πίνακας 2.3.1 :Δομικά στοιχεία των Τεχνητών Υγροβιότοπων και ο ρόλος τους (Μίμης,2006)

**Ο ρόλος του υποστρώματος στους Τεχνητούς Υγροτόπους.**

- Αποτελεί το μέσον ανάπτυξης των φυτών και της βιολογικής δραστηριότητας.
- Ρυθμίζει και κατανέμει τόσο την ροή του νερού όσο και την αποθήκευση του στο περιβάλλον.
- Ενεργεί τόσο ως περιβαλλοντικός ηθμός όσο και ως ρυθμιστής στην ακινητοποίηση και αποικοδόμηση των περιβαλλοντικά επικίνδυνων ουσιών.

**Ο ρόλος της υδρολογίας στους Τεχνητούς Υγροτόπους.**

- Η υδρολογία καθορίζει τη δομή και την εξέλιξη της φυτοκοινωνίας.
- Η πρωτογενής παραγωγικότητα και η βιοποικιλότητα ευνοούνται από τη συνεχή ροή ή εναλλασσόμενη υδροπερίοδο, ενώ αντίθετα μειώνονται σε συνθήκες λιμνάζοντος νερού.
- Η συσσώρευση οργανικής ουσίας στους υγροτόπους ελέγχεται από την υδρολογία, μέσω της επίδρασης στην πρωτογενή παραγωγικότητα, στην αποσύνθεση και στην μεταφορά οργανικής ουσίας.
- Η υδρολογία ελέγχει άμεσα ή έμμεσα τους βιομηχανικούς κύκλους στοιχείων και τη διαθεσιμότητα των θρεπτικών.

**Ο ρόλος των φυτών στους Τεχνητούς Υγροτόπους .**

- Σταθεροποίηση υδραυλικής αγωγιμότητας.
- Μεταφορά οξυγόνου στο υπόστρωμα.
- Υπόστρωμα ανάπτυξης βακτηρίων.
- Πρόσληψη θρεπτικών.
- Περιορισμός οσμών.
- Βελτίωση αισθητικής.



### 2.3.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΥ

Πιο κάτω αναφέρονται κάποια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που έχουν οι τεχνητοί υδροβιότοποι σύμφωνα με τους (Ζουραράκη. 2002, Stefanakis et al. 2014, Ρούση και Βερτούδος. 2005):

#### ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- Χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας π.χ.(ηλιακή, αιολική).
- Χαμηλό κόστος κατασκευής(αν υπάρχουν διαθέσιμες εκτάσεις), μηδαμινό λειτουργικό κόστος.
- Χαμηλά έξοδα συντήρησης.
- Ανθεκτικότητα σε μεγάλες διακυμάνσεις της παροχής και σε τοξικές ουσίες.
- Χαρακτηρίζεται ως «πράσινο» χαρακτήρα.
- Δεν υπάρχουν μηχανικά μέσα.
- Λειτουργούν καθ' όλη τη διάρκεια του έτους
- Ενισχύουν την ανάγκη της ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης του νερού.
- Απομακρύνουν μεγάλο ποσοστό BOD<sub>5</sub> και TSS και ήπιο ποσοστό παθογόνων μικροοργανισμών.
- Αξιοποιούνται φυσικές διεργασίες.

#### ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- Σχετικά μεγάλη απαίτηση έκτασης (όχι για όλα τα συστήματα).
- Μερική παρουσία κουνουπιών
- Δημιουργία οσμών από τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα ή και από τα ίδια τα υγρά απόβλητα.

### 2.3.4 ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΡΥΠΩΝ ΣΤΟΥΣ ΤΕΧΝΗΤΟΥΣ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΥΣ

Όπως στους φυσικούς έτσι και στους τεχνητούς υδροβιότοπους οι διεργασίες που γίνονται είναι παρόμοιες. Μέσω των διεργασιών αυτών απομακρύνεται άζωτο, φώσφορος, οργανικά φορτία, αμμωνία, παθογόνοι μικροοργανισμοί και στερεά σωματίδια. Καθοριστικό παράγοντα στην αφαίρεση των ρύπων αυτών έχουν οι περιβαλλοντικές συνθήκες της περιοχής και κατά συνέπεια η θερμοκρασία, το είδος της βλάστησης που υπάρχει στις πιλοτικές μονάδες και ο υδραυλικός χρόνος παραμονής HRT. Οι περιβαλλοντικές συνθήκες και κατά επέκταση η θερμοκρασία παίζουν σημαντικό ρόλο στην απομάκρυνση των ρύπων γιατί με αυτές εξαρτώνται σημαντικές διεργασίες. Για παράδειγμα στην απομάκρυνση του αζώτου και συγκεκριμένα στην νιτροποίηση η βέλτιστη θερμοκρασία είναι 25-35°C. Σε αντίθεση στο φώσφορο η θερμοκρασία δεν επηρεάζει τόσο γιατί εξαρτάται κυρίως από την προσρόφηση και κατακρήμνιση της οργανικής ύλης από το λίμα.

Ακόμη χωρίς την βλάστηση δεν θα επιτύγχανε τόση απομάκρυνση ρύπου, γιατί μέσω των φυτών υπάρχει υψηλό ποσοστό πρόσληψης οργανικών ουσιών και κατά επέκταση ρυπασμένου φορτίου μέσω των ριζικών τους συστημάτων, που εκεί συσσωρεύονται βακτήρια και μικροοργανισμοί που συμμετέχουν στις διεργασίες. Ανά τακτά χρονικά διαστήματα θα είναι καλό να κλαδεύονται τα φυτά για καλύτερη προσρόφηση του οργανικού υλικού. Όσο αφορά για τον υδραυλικό χρόνο παραμονής, όσο πιο μεγάλο χρόνο επαφής υπάρχει τόσο πιο μεγάλη απομάκρυνση ρύπου θα επιτευχθεί.

Για αποδόμηση της οργανικής ύλης λαμβάνουν χώρα αερόβιες ή αναερόβιες διεργασίες. Κατά την διάρκεια της μέρας λαμβάνουν χώρα αερόβιες συνθήκες ενώ για την νύχτα αναερόβιες. Σημαντικό ρόλο σε αυτές φέρουν η ποσότητα-παροχή οξυγόνου και το οργανικό φορτίο. Το οργανικό φορτίο ως επί το πλείστον προέρχεται από την εισροή των λυμάτων και το οξυγόνο μέσω της επιφάνειας του νερού και των αλγών που είναι προσκολλημένα στην επιφάνεια των αναδυόμενων φυτών. Ακόμη μικρή ποσότητα οξυγόνου μπορεί να αποκομηθεί από το ριζικό σύστημα των φυτών .

### **Απομάκρυνση Αζώτου N**

Το Άζωτο βρίσκεται σε διάφορες μορφές μέσα στο λύμα, στις ενώσεις αμμωνίας, οργανικό άζωτο, αέρια αμμωνία  $\text{NH}_3$ , νιτρώδες και νιτρικό άζωτο. Γι' αυτό το λόγο η αφαίρεση του είναι πολύπλοκη. Η πρόσληψη του από τα φυτά είναι μόλις 10% της συνολικής απομάκρυνσης του. (Ζαρμακούπης, 2006).

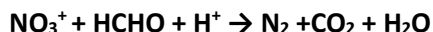
Σημαντική απομάκρυνση αζώτου γίνεται με τις διεργασίες της νιτροποίησης και απονιτροποίησης σε αερόβιες και αναερόβιες συνθήκες αντίστοιχα. Για το λόγο αυτό η απομάκρυνση του αζώτου περιορίζεται από τις ανοξικές και αναερόβιες συνθήκες εκεί δηλαδή που υπάρχουν περιοχές στο σύστημα με χαμηλή ή επαρκής ποσότητα οξυγόνου. (Vymazal, 2005). Ακόμη γίνεται απομάκρυνση μέσω της προσρόφησης, όπου ιονισμένη αμμωνία αντιδρά με το πληρωτικό υλικό και ένα άλλο μέρος γίνεται εξάτμιση της αμμωνίας μετατρέποντας την σε ελεύθερη αμμωνία.

Πιο αναλυτικά οι οργανισμοί για τη νιτροποίηση χρειάζονται οξυγόνο και επαρκή επιφάνεια για να αναπτυχθούν αυτός είναι και ο κύριος λόγος ανεπαρκής πιθανής ποσότητας τους, ειδικά σε σχετικά νέα συστήματα με λιγοστή βλάστηση που περιέχουν υψηλό ποσοστό οργανικού φορτίου (Kadlec, 1995). Ο βαθμός αφαίρεσης του αζώτου είναι ανάλογος της μορφής που βρίσκεται στο σύστημα, δηλαδή οργανικό άζωτο, διαλυμένη αέρια αμμωνία  $\text{NH}_3$ , νιτρικά  $\text{NO}_3$ , νιτρώδες άζωτο  $\text{NO}_2$  και ενώσεις αμμωνίας  $\text{NH}_4^+$ , της θερμοκρασίας, του διαλυμένου οξυγόνου και του pH (Reed et al., 1995). Επίσης το οργανικό άζωτο στο σύστημα βρίσκεται σε μορφή στερεών και φύκι. Μέσω αυτής της μορφής γίνεται απομάκρυνση του με τη διαδικασία της καθίζησης και του φιλτραρίσματος (Ακράτος, 2006).

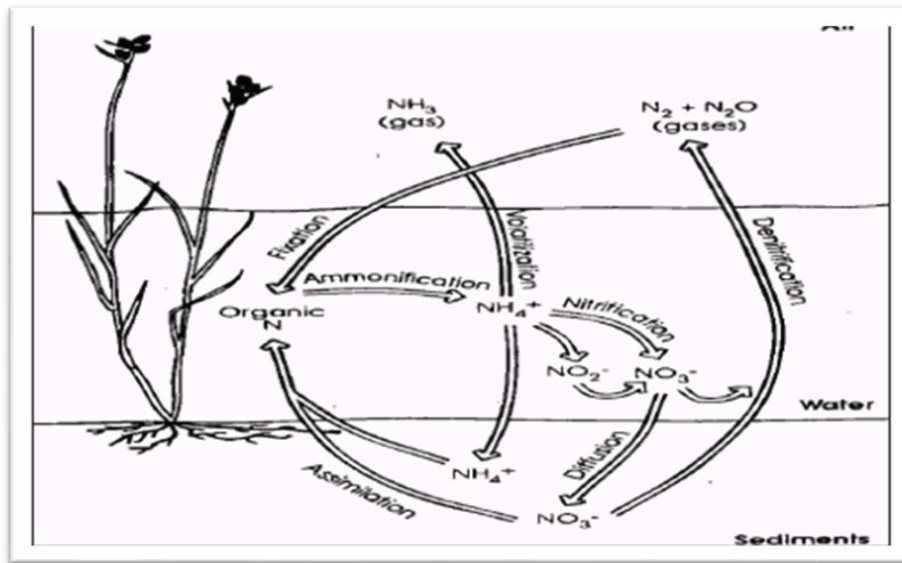
**Νιτροποίηση** είναι η διεργασία στην οποία η αμμωνία μέσω οξείδωσης μετατρέπεται σε νιτρώδη αμμωνία από τα βακτήρια *Nitrosomonas* και τελικά σε νιτρική αμμωνία με τη δράση των βακτηρίων *Nitrobacter* (Νταρακάς, 2014).



**Απονιτροποίηση** είναι η διεργασία στην οποία η νιτρική αμμωνία μετατρέπεται σε αέριο άζωτο με τη δράση βακτηρίων απονιτροποίησης (Νταρακάς, 2014).



**Εικόνα 2.3.9:** Μηχανισμός απομάκρυνσης αζώτου(Ζαρμακούπης, 2006)



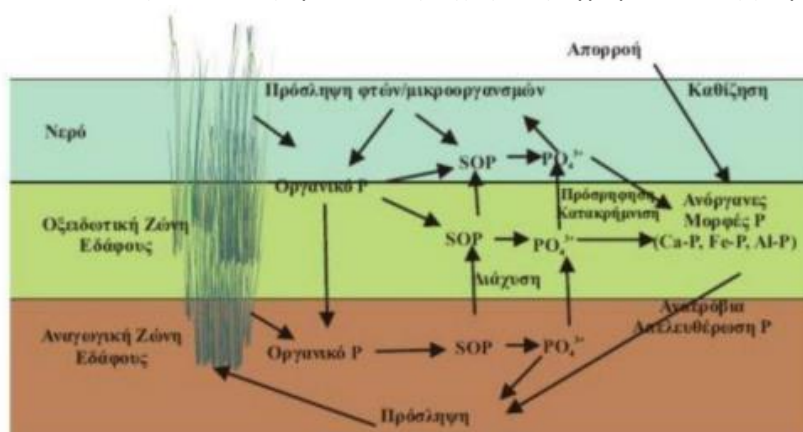
### Απομάκρυνση φωσφόρου P

Η κύρια μορφή φωσφόρου στα νερά και υγρά απόβλητα είναι σε μορφή φωσφορικών, τα οποία ταξινομούνται σε ορθοφωσφορικά, συμπυκνωμένα φωσφορικά και οργανικά δεσμευμένα. Βρίσκονται σε σωματιδιακή και διαλυτή μορφή. Για τα οικοσυστήματα ο φώσφορος αποτελείται από τα κύρια συστατικά, είναι το κυριότερο περιοριστικό στοιχείο σε υδάτινα οικοσυστήματα. Ο φώσφορος για να απομακρυνθεί έχει την τάση να συσσωρεύεται στο ίζημα των συστημάτων επεξεργασίας(Kadlec, 1995).

Ακόμη απορρόφηση φωσφόρου επιτυγχάνεται και μέσω της απορρόφησης από τα φυτά και της προσρόφησης στο έδαφος. Τα φυτά αρχίζουν να απορροφούν πριν φθάσουν καν σε κατάσταση ωριμότητας, ενώ η προσρόφηση στο έδαφος μειώνεται με το χρόνο. Μακροπρόθεσμα μπορεί να γίνει αφαίρεση φωσφόρου από 30 έως 50%( Reed et al., 1995). Όταν το σύστημα φτάσει σε ισορροπία παρατηρείτε μείωση στην αφαίρεση του φωσφόρου, ενώ καθώς συνεχίζεται η λήψη από τα φυτά μέρος του φωσφόρου απελευθερώνεται από την αποσύνθεση τους(Vymazal, 1998). Τα μικρόβια και τα φυτά είναι υπεύθυνα μόνο για την αφαίρεση των ορθό-φωσφορικών ενώ για την αφαίρεση των υπόλοιπων μορφών φωσφόρου είναι υπεύθυνη οι υπόλοιποι μηχανισμοί- διεργασίες απομάκρυνσης (Kadlec and Knight, 1996). Άλλοι παράγοντες που συμβάλλει στην αφαίρεση φωσφόρου είναι το είδος του πληρωτικού υλικού που υπάρχει στους τεχνητούς υδροβιότοπους, το οποίο περιορίζει την επαφή του λύματος με το υπόστρωμα(Vymazal, 1998).



**Εικόνα 2.3.10 :**Κύκλος του Φωσφόρου στους τεχνητούς υγροβιότοπους (Ακράτος, 2006).



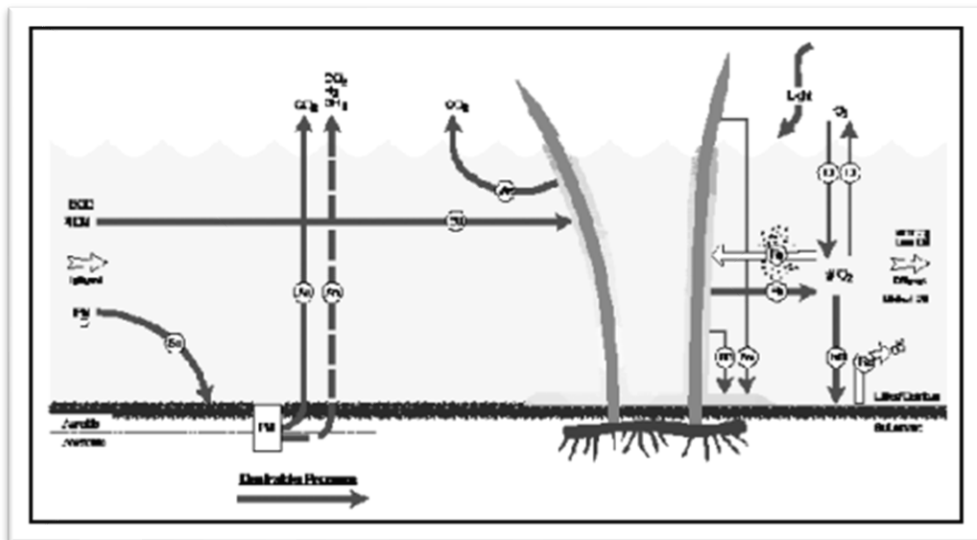
### **Απομάκρυνση Βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου BOD<sub>5</sub>**

Απομάκρυνση οργανικού φορτίου επιτυγχάνεται με υψηλές ταχύτητες σε όλα τα συστήματα υγροβιότοπων. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω αδιάτάραχτων συνθηκών που επικρατούν, στα συστήματα επιφανειακής ροής, η διήθηση και στα συστήματα υποεπιφανειακής ροής, η απόθεση. Το οργανικό φορτίο το οποίο καθιζάνει περνά από αερόβια ή αναερόβια αποσύνθεση, ανάλογα με την ποσότητα του οξυγόνου και το υπόλοιπο συνεχίζει να αφαιρείται όταν το λύμα έρχεται σε επαφή με το μικροβιακό φορτίο που έχει αναπτυχθεί στο ριζικό σύστημα των φυτών και στο πληρωτικό υλικό των συστημάτων (Reed et al., 1995; Vymazal, 1998).

Όταν το οξυγόνο περνά στη στήλη νερού από τον ατμοσφαιρικό αέρα και μέσω της φωτοσύνθεσης η παροχή οξυγόνου ικανοποιεί την απαίτηση σε οξυγόνο, η αποικοδόμηση του BOD γίνεται σε αερόβιες συνθήκες. Όμως όταν η απαίτηση σε οξυγόνο είναι μεγαλύτερη από την παροχή οξυγόνου η αποικοδόμηση γίνεται σε αναερόβιες συνθήκες. (Ζαρμακούπης, 2006).

Ακόμη να αναφερθεί πως παρατηρείται ταχύτερη απομάκρυνση BOD<sub>5</sub> στους υποεπιφανειακής ροής υγροβιότοπους παρά στους υγροβιότοπους επιφανειακής ροής (Kadlec and Knight 1996).

**Εικόνα 2.3.11:** Σχηματική απεικόνιση του μηχανισμού απομάκρυνσης BOD (Sinclair Knight Merz, 2000)

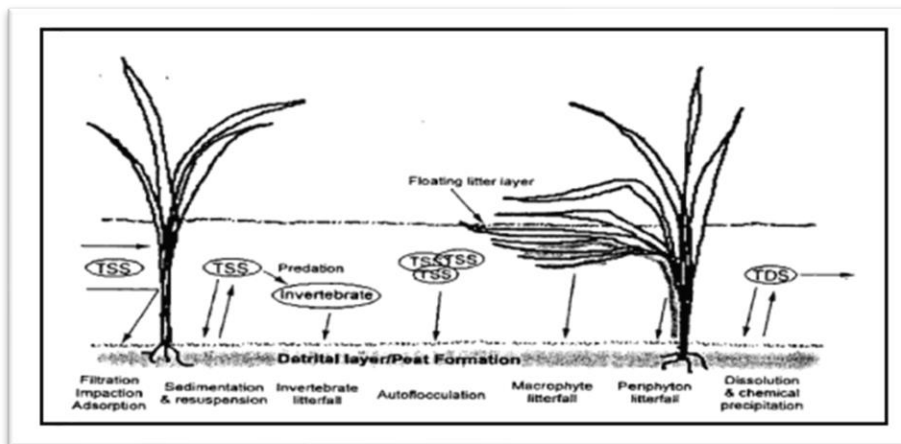


### Απομάκρυνση στερεών αιωρούμενων σωματιδίων TSS

Αποτελούνται από ανόργανα και οργανικά αιωρούμενα στερεά, τα οποία απομακρύνονται με φυσικές διεργασίες. Καθώς παγιδεύονται μέσα στους πόρους του πληρωτικού υλικού στους οποίους διέρχεται το λύμα. Κύριοι μηχανισμοί για την απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών (TSS) είναι η καθίζηση και η διήθηση (Stefanakis et al., 2014). Άλλοι μηχανισμοί απομάκρυνσης είναι η συσσωμάτωση και η φίλτρανση στα διάκενα του υποστρώματος. Ιδανικά απαιτείται διευκόλυνση της φίλτρανσης και της καθίζησης από το ριζικό σύστημα της βλάστησης για αποφυγή εμφάνισης αλγών (Ζαρμακούπης, 2006).

Τα μικρότερα σε μέγεθος σωματίδια (βακτήρια, κολλοειδή κ.λπ.) δεν μπορούν να συσσωματωθούν για να καθιζάνουν στο σύστημα. Έτσι χρησιμοποιούν το μηχανισμό της προσκόλλησης τους στις επιφάνειες των φυτών (Ζαρμακούπης, 2006).

**Εικόνα 2.3.12:** Μηχανισμός απομάκρυνσης και επαναιώρησης TSS (EPA, 2002).



### **Απομάκρυνση παθογόνων μικροοργανισμών**

Στο τεχνητό υγροβιότοπο μπορούν να εισέλθουν οι παθογόνοι μικροοργανισμοί μέσω των αιωρούμενων στερεών είτε να αιωρούνται στην εισροή του λύματος. Οι μικροοργανισμοί που είναι ενσωματωμένοι με τα αιωρούμενα στερεά απομακρύνονται με τον ίδιο τρόπο που απομακρύνονται και τα ολικά αιωρούμενα στερεά TSS (καθίζηση, φίλτρωση, προσρόφηση)

Οι παθογόνοι μικροοργανισμοί θα βρεθούν σε περιβάλλον με παρουσία άλλων οργανισμών και τότε θα πρέπει να ανταγωνιστούν. Οι περισσότεροι δεν μπορούν να επιζήσουν στον ανταγωνισμό αυτό, αφού θα καταστραφούν σαν θηράματα άλλων οργανισμών ή από την ακτινοβολία UV εκείνοι που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια του νερού (Ζαρμακούπης, 2006).

Να αναφερθεί πως βρέθηκε πως το λεπτόκοκκο πορώδες είναι καλύτερο σε απομάκρυνση μικροοργανισμών παρά το πιο χονδρόκοκκο. Με ποσοστό αφαίρεσης να υπερβαίνει το 90% σε μικροβιακά φορτία που αποτελούνται από περιττωματικά κολοβακτηρίδια και ιούς με χρόνο παραμονής 3-6 ημέρες (Reed et, al., 1995). Οι ιοί απομακρύνονται μόνο με προσρόφηση για τη θανάτωση τους (Metcalf and Eddy, 1991).

## 2.4 ΣΤΟΧΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι να εξεταστεί η αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης ρύπων με την εφαρμογή τεχνητών υδροβιότοπων. Η επιλογή της τεχνολογίας αυτής έγινε με κατεύθυνση έτσι ώστε να ικανοποιείται η ανάγκη ανάπτυξης και βελτιστοποίησης μιας φιλικής για το περιβάλλον διαχείρισης των ρυπογόνων λυμάτων. Ταυτοχρόνως αξιοποιείται το μοντέλο της κυκλικής οικονομίας και επαναχρησιμοποίησης υλικών.

Αναλυτικά κατασκευάστηκαν τρεις μονάδες τεχνητών υδροβιότοπων υποεπιφανειακής κατακόρυφης ροής, οι οποίες αξιολογήθηκαν ως προς την απόδοση επεξεργασίας υγρών αποβλήτων από το βιολογικό σταθμό στα Χανιά. Στις μονάδες περιείχε ως πληρωτικό υλικό ανακυκλωμένο πλαστικό HDPE (High Density Poly Ethylene), χαλίκι και σε βλάστηση χρησιμοποιήθηκε το καλάμι *Phragmites Australis*.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### 3.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

#### 3.1.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

Η πειραματική διάταξη της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας αποτελείται από τρεις πιλοτικές μονάδες τεχνητών υδροβιοτόπων κατακόρυφης ροής. Χρησιμοποιήθηκαν πλαστικές δεξαμενές κυκλικού σχήματος. Το πληρωτικό υλικό στην πρώτη μονάδα (**Control - C**) είναι ανακυκλωμένο πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας HDPE με ύψος πληρωτικού υλικού 50cm και διάμετρο 39,4cm. Στη δεύτερη μονάδα (**Plastic - P**) πάλι πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας HDPE με το καλάμι που επιλέχθηκε *Phragmites Australis*. Με ύψος πληρωτικού υλικού στα 50cm και διάμετρος 39,3 cm και στη τελευταία μονάδα (**Gravel - G**) χρησιμοποιήθηκε χαλίκι μαζί με το καλάμι με ύψος πληρωτικού υλικού στα 50cm και διάμετρος 39,3 cm. Και στις τρεις πιλοτικές μονάδες δόθηκε μια κλίση της τάξης του 1% για να γίνετε πιο εύκολα η ροή του λύματος προς την έξοδο. Στο χαμηλότερο σημείο των βαρελιών τοποθετήθηκαν βάνες για την συλλογή της εκροής των μονάδων. Στις μονάδες προστέθηκαν λάστιχα κρατώντας την στάθμη σε ένα σταθερό σημείο και μεταφερόταν η εκροή σε μικρότερα δοχεία χωρητικότητας 10L.

Για εισροή στις μονάδες εφαρμόζεται υγρό απόβλητο από τη Μονάδα Επεξεργασίας Λυμάτων Χανίων Δ.Ε.Υ.Α.Χ.

**Εικόνα 3.1.1:** πιλοτικές μονάδες πειράματος.



### 3.1.2 ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η έρευνα της συγκεκριμένης διπλωματικής έγινε στο Πολυτεχνείο Κρήτης. Οι εργαστηριακές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος που ανήκει στη σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, ενώ η πειραματική διάταξη έγινε σε ανοιχτό χώρο της Σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος.

Η διάρκεια του πειράματος ξεκίνησε τον Δεκέμβρη του 2021 μέχρι τον Ιούνιο του 2022. Στο παρακάτω πίνακα αναφέρονται μερικά κλιματολογικά δεδομένα για την περιοχή όπου βρίσκεται το θερμοκήπιο, τα οποία πάρθηκαν από το μετεωρολογικό σταθμό που βρίσκεται εντός του Πολυτεχνείου Κρήτης (<http://meteosearch.meteo.gr/>).

**Πίνακας 3.1.1 :** Μέση, μέση μέγιστη, μέση ελάχιστη θερμοκρασία, μέση βροχόπτωση, μέση ,μέγιστη και κατεύθυνση ταχύτητας ανέμου.

ΜΗΝΕΣ	ΜΕΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (°C)	ΜΕΣΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (°C)	ΜΕΣΗ ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (°C)	ΜΕΣΗ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ (mm)	ΜΕΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΕΜΟΥ (Km/h)	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΕΜΟΥ (Km/h)	ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΑΝΕΜΟΥ
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	12.5	16.4	9.7	156.8	9.1	61.2	SW
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	10	14.2	6.7	104	8.3	62.8	SW
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	11.8	16.4	8.3	76.8	8.7	69.2	SW
ΜΑΡΤΙΟΣ	10.2	14.6	7.1	181.2	9.3	53.1	N
ΑΠΡΙΛΙΟΣ	16.5	22.1	12.2	4.2	9.6	67.6	N
ΜΑΙΟΣ	20.1	26	15	1.2	6.7	49.9	N
ΙΟΥΝΙΟΣ	25.6	31.2	20.7	0	7	45.1	SW

### 3.1.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

#### ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Η προσθήκη λύματος στις πιλοτικές μονάδες για τη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία ξεκίνησε 13 Δεκεμβρίου και τοποθετούνταν κάθε φορά 8L υγρού αποβλήτου σε κάθε πιλοτική μονάδα. Η προσθήκη γινόταν ανά δύο μέρες μέχρι τις 17 Μαΐου. Ακολούθως από τους 17 Μαΐου μέχρι το τέλος τις πειραματικής διαδικασίας, στις 16 Ιουνίου η προσθήκη λύματος γινόταν ανά μία μέρα.

Μια φορά την εβδομάδα γινόταν δειγματοληψία για να χρησιμοποιηθεί στις πειραματικές αναλύσεις όπου πραγματοποιούνταν μία φορά την εβδομάδα. Πιο συγκεκριμένα γινόταν συλλογή της εκροής από κάθε πιλοτική μονάδα.

Το υγρό απόβλητο προερχόταν από τον Βιολογικό σταθμό Δ.Ε.Υ.Α. Χανίων. Συλλεγόταν μετά από τη Δεξαμενή Πρωτοβάθμιας καθίζησης και τοποθετείτο σε πλαστικά μπιτόνια. Κάθε φορά που συλλεγόταν λύμα από το Βιολογικό σταθμό συλλεγόταν μικρή ποσότητα για να χρησιμοποιηθεί και αυτή στις πειραματικές αναλύσεις.

Πιο κάτω απεικονίζονται η συλλογή λύματος από της εκροές των πιλοτικών μονάδων (Control, Plastic και Gravel). Όπως και από το Βιολογικό που γίνεται η προμήθεια του υγρού αποβλήτου.

**Εικόνα 3.1.2 :** δείγματα εκροών και εισροής προς ανάλυση



## **ΤΕΛΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ**

Μετά από διάστημα 6 μηνών παρατήρησης, ανάλυσης των εκροών από τις πιλοτικές μονάδες.



## 3.2 ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ

### 3.2.1 ΥΓΡΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ ΑΠΟ Δ.Ε.Υ.Α. Χανίων

Η εισροή που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση του πειράματος προέρχεται από τον Δ.Ε.Υ.Α. Χανίων. Η εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων Χανίων δέχεται κατά μέσο όρο 23.600 m<sup>3</sup>/ημέρα όπου επιτυγχάνεται επεξεργασία του οργανικού φορτίου μεγαλύτερη του 97% και της αμμωνίας στο 97%. Η μονάδα αποτελείται από τα πιο κάτω στάδια.

Πρώτα αφού τα λύματα έρχονται στην ΕΕΛ μέσω κεντρικού αποχετευτικού αγωγού περνούν από χονδροεσχάρωση (με σύστημα έκπλυσης και συμπίεσης των εσχαρισμάτων. Παράλληλα υπάρχει σταθμός υποδοχής βοθρολυμάτων και υπολειμμάτων αποφρακτικών οχημάτων. Μετά ακολουθεί εσχάρωση (όπου γίνεται απομάκρυνση των ογκωδών αντικειμένων μέσω σχαρών και μετέπειτα μεταφορά τους σε κάδο συλλογής μέσω μεταφορικής ταινίας). Αργότερα ακολουθεί η εξάμμωση όπου γίνεται απομάκρυνση της άμμου με τη χρήση αέρα. Ακολούθως έρχεται η επεξεργασία λιπών όπου επιτυγχάνεται μείωση του οργανικού φορτίου κατά 80%. Έπειτα ακολουθεί η πρωτοβάθμια επεξεργασία(καθίζηση). Στην παρούσα επεξεργασία επιτυγχάνεται απομάκρυνση του οργανικού φορτίου BOD<sub>5</sub> κατά 33% και αιωρούμενων στερεών κατά 60%. Μετά ακολουθεί η Δεξαμενή Επιλογής , όπου αναμιγνύονται με ανοξικές συνθήκες τα πρωτοβάθμια λύματα με την ανακυκλοφορία της δευτεροβάθμιας καθίζησης όπου οδηγούνται σε Βιοαντιδραστήρες (Δεξαμενές αερισμού). Ακολουθεί η δεξαμενές τελικής καθίζησης. Στις οποίες η ιλύς καθιζάνει στον πυθμένα ενώ τα επεξεργασμένα λύματα οδηγούνται προς την έξοδο μέσω συστήματος υπερχειλιστών. Ακολούθως μετά από τη Βιολογική επεξεργασία του λύματος γίνεται απολύμανση με χρήση διαλύματος υποχλωριώδους νατρίου 15% σε ενεργό χλώριο και αποχλωρίωση με υποθειώδες νάτριο. Ακόμη γίνεται και επεξεργασία της ιλύος με Μηχανική Πάχυνση με μείωση του όγκου για καλύτερη διαχείριση και επεξεργασία της ιλύος. Έπειτα η πρωτοβάθμια και δευτεροβάθμια ιλύς οδηγείτε σε Δεξαμενές Ανάμιξης- παχυντές βαρύτητας όπου τροφοδοτούν τους Αναερόβιους Χωνευτές. Στην αναερόβια χώνευση επιτυγχάνεται σταθεροποίησης της ιλύος με αναερόβια βακτήρια, με μείωση του οργανικού φορτίου και με αποτέλεσμα την παραγωγή Βιοαερίου, όπου γίνεται αποθήκευση του σε αεριοφυλάκια μεταβλητής δυναμικότητας. Τέλος ακολουθεί η Μεταπάχυνση (εφαρμόζεται πάχυνση βαρύτητας), όπου τροφοδοτεί την μονάδα αφυδάτωσης. Εκεί με τη χρήση φυγόκεντρων διαχωριστών και προσθήκης πολυηλεκτρολύτη και ασβέστη επιτυγχάνεται μείωση των παθογόνων οργανισμών και οσμών της ιλύος. Με το πέρας της επεξεργασίας της ιλύος, η ιλύς φορτώνεται σε κάδους και μεταφέρεται στον τελικό εγκεκριμένο χώρο τελικής διάθεσης ΧΥΤ Κορακιάς.





**Εικόνα 3.2.1.1** :Βιολογικός σταθμός – Δ.Ε.Υ.Α. Χανίων.

### 3.2.2 ΒΛΑΣΤΗΣΗ

Το 1950 στη Γερμανία έγινε για πρώτη φορά η χρήση βλάστησης για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων σε τεχνητούς υδροβιότοπους από τον Seidel(Σωτηροπούλου, 2010). Μέσω της βλάστησης μπορεί να γίνει ανάπτυξη των βακτηριακών μεμβρανών, προσφέρει διήθηση και προσρόφηση του οργανικού και ανόργανου φορτίου των υγρών αποβλήτων, είναι υπεύθυνη για τη μεταφορά οξυγόνου στο νερό και περιορίζει την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία αποτρέποντας σε μερικό βαθμό την ανάπτυξη αλγών(Σπυρίδων, 2016).

Το φυτό που χρησιμοποιήθηκε στην συγκεκριμένη έρευνα είναι ένα είδος καλαμιού με ονομαστική ονομασία *Phragmites Australis*. Μοιάζει πάρα πολύ με μπαμπού, αλλά είναι πιο λεπτό σε διάμετρο. Αποτελείται από μακρόστενα φύλλα (που μπορεί να φτάσουν μέχρι και 70 εκ.) και το ύψος του φυτού μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 8 μέτρα με έντονη ανάπτυξη ριζικού συστήματος.

Σημαντικά πλεονεκτήματα του συγκεκριμένου είδους καλαμιού είναι πως ευδοκimeί και σε μη αρκετά φιλόξενα εδάφη, όπως σε ξηρά, άνυδρα και χαλκώδη εδάφη. Παρεμπιπτόντως λόγω των ανθεκτικών χαρακτηριστικών του ως υδροχαρές φυτό, συναντάτε και σε παραποτάμιας περιοχές, εκβολές ποταμών, υδροβιότοπων και γενικά σε υγρά εδάφη. Ακόμη εξαιτίας του μεγάλου ριζικού συστήματος που μπορεί να αναπτύξουν τα συγκεκριμένα είδη φυτών εξασφαλίζουν μεγαλύτερη επαφή λύματος με το υπόστρωμα, ευνοώντας με αυτό τον τρόπο τις διάφορες φυσικοχημικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα. Πιο συγκεκριμένα στο ριζικό σύστημα αναπτύσσεται το μικροβιακό φορτίο όπου λαμβάνουν μέρος βιοχημικές διεργασίες, νιτροποίηση και απονιτροποίηση. Το ρίζωμα μπορεί να συγκρατήσει

μεγάλη ποσότητα αιωρούμενων στερεών, ακόμη και απομάκρυνση αζώτου. Και τέλος κάνοντας λόγο και πιο πάνω για την ανθεκτικότητα του καλαμιού, είναι ανθεκτικό σε ρυπογόνο λύμα από θρεπτικά συστατικά, αζωτούχες και φωσφορούχες ενώσεις και ακόμη σε βαρέα μέταλλα (Stefanakis et al. 2014).



**Εικόνα 3.2.2.1 :** *Phragmites Australis* σε φυσικό υγροβιότοπο

### 3.2.3 Ανακυκλωμένο HDPE

Πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας ή Αλκαθενικό. Είναι ένα θερμοπλαστικό πολυμερές που παράγεται από το μονομερές αιθυλένιο. Υπάρχει ποικιλία εφαρμογών του, όπως στην παραγωγή πλαστικών φιαλών, ανθεκτικών πλαστικών σωληνώσεων, γεωμεμβρανών, πλαστικής ξυλείας και ακόμη στην πλαστική χειρουργική. Ακόμη το HDPE μπορεί να αντικαταστήσει βαρύτερα υλικά κάνοντας το πιο βιώσιμο και προσιτό στην αγορά.

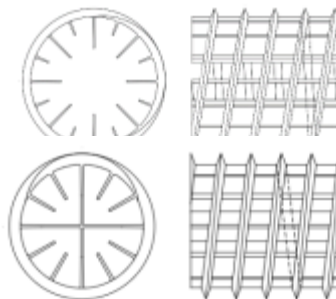
Το ανακυκλωμένο HDPE που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία είναι φιλικό προς το περιβάλλον και λόγω τις μεγάλης του πυκνότητας είναι ιδανικό σε συνθήκες μεγάλης αντοχής.

Ως εκ τούτου χρησιμοποιήθηκαν τα συγκεκριμένα ανακυκλωμένα πλαστικά, βασιζόμενοι στα πιο πάνω πλεονεκτήματα τους αλλά και ακόμη στα πιο κάτω σύμφωνα με τους (Tatoulis et al., 2017, and Luis et al., 2021) :

- Έχουν αντοχή στα υψηλά ποσοστά ρύπων.
- Λόγω της ελαφρότητας του είναι εύκολο στη μεταφορά και στην διαχείριση του.
- Έχουν αρκετά υψηλό πορώδες.
- Χρησιμοποιώντας ανακυκλώσιμο πλαστικό βοηθά στη βιωσιμότητα της διαδικασίας.
- Δεν επηρεάζεται η αποτελεσματικότητα της απομάκρυνσης των ρύπων στους τεχνητούς υδροβιότοπους με τη χρήση πλαστικού υποστρώματος.

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν δύο μεγέθη ανακυκλωμένου πλαστικού HDPE ως πληρωτικό υλικό στις πιλοτικές μονάδες. Πιο κάτω αναφέρονται κάποια χαρακτηριστικά τους:

- **Υλικό 1** : Ειδική επιφάνεια:  $188 \text{ m}^2/\text{m}^3$   
Μήκος: 38mm  
Διάμετρος: 38mm
- **Υλικό 2** : Ειδική επιφάνεια:  $360 \text{ m}^2/\text{m}^3$   
Μήκος: 25mm  
Διάμετρος: 25mm





**Εικόνα 3.2.3.1 :** Ανακυκλωμένο Πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας HDPE

### 3.3 ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Εργαστηριακές αναλύσεις γίνονταν μία φορά την εβδομάδα. Ως δείγματα ήταν οι εκροές των πιλοτικών μονάδων (gravel, plastic και control) και η εισροή υγρού αποβλήτου. Σκοπός των αναλύσεων ήταν ο προσδιορισμός του pH, της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, των ολικών αιωρούμενων στερεών TSS, του ολικού αζώτου TN, του αμμωνιακού αζώτου  $\text{NH}_4\text{-N}$ , του νιτρικού αζώτου  $\text{NO}_3\text{-N}$ , του ολικού φωσφόρου TP, των φωσφορικών  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ , του ολικού απαιτούμενου άνθρακα TOC, του Βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου BOD και του Χημικά απαιτούμενου οξυγόνου COD.

#### Μέτρηση του PH

Η μέτρηση του PH γίνεται μέσω της συσκευής CRISON microPH 2002. Πρώτα γίνεται βαθμονόμηση της συσκευής με δύο διαλύματα των pH 4 και 7. Ακολούθως τοποθετώντας το ηλεκτρόδιο της συσκευής μέσα στα δείγματα παίρνουμε τις τιμές.



Εικόνα 3.3.1 :CRISON microPH 2002

#### Μέτρηση Ηλεκτρικής αγωγιμότητας EC

Γίνεται μέσω της συσκευής CRISON microCM 2202. Η μέτρηση πραγματοποιείται με την βύθιση του ηλεκτροδίου στα δείγματα, αφού πρώτα γίνει καλή ανάδευση ώστε να μην έχουμε καθιζόμενα στερεά.





**Εικόνα3.3.2 :** Συσκευή CRISON microCM 2202.

### **Μέτρηση ολικών αιωρούμενων στερεών TSS**

Σε αυτή την διαδικασία γίνεται διήθηση των δειγμάτων με υαλόφιλτρα διήθησης GF/C της εταιρείας Whatman με διάμετρο 47mm. Το διηθητικό αυτό φίλτρο μπορεί να διηθήσει μέχρι και 1μm. Αρχικά τα φίλτρα ζυγίζονται σε ζυγό τύπου SHIMADZU LIBROR AEG-220 ακρίβειας 0.0001g ακολούθως τοποθετούνται στην αντλία κενού της εταιρείας Vaccubrand παροχής 3.6/4.0 m<sup>3</sup>/h και διηθήτε ποσότητα >70ml (η ποσότητα εξαρτάται από το πλήθος των αιωρούμενων στερεών), αφού γίνει πρώτα μια καλή ανάδευση των δειγμάτων. Ακολούθως αφού γίνει η διήθηση τα φίλτρα τοποθετούνται σε φούρνο ξήρανσης για 20 λεπτά στους 100°C. Και τέλος αφού σταθεροποιηθεί η θερμοκρασία των φίλτρων γίνεται εκ νέου ζύγιση και υπολογισμός της ξηρής μάζας.

Στο τέλος, τα διηθήματα κρατιούνται για να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P και TOC.

### **Μέτρηση ολικού αζώτου TN**

Για την μέτρηση του ολικού αζώτου τοποθετήθηκαν σε κυψελίδες του εργαστηρίου στη κάθε μία 1ml από το δείγμα, 9ml απιονισμένο νερό και ακολούθως προστίθεται από το kit Nitrogen total Cell Test 1.4763.0001 φασματοφωτομετρικής μεθόδου της Merck με εύρος συγκεντρώσεων 10-1500 mg/L N 1 κουταλιά N-1K, γίνεται ανάδευση και προστίθενται ακόμη 6 σταγόνες N-2K. Αφού γίνει καλή ανάδευση τοποθετούνται στο μάτι για χώνευση στους 120 °C για 1 ώρα. Ακολούθως αφού γίνει η χώνευση αφαιρούνται οι κυψελίδες από το μάτι και μένουν σε ηρεμία μέχρι να κρυώσουν. Έπειτα πάλι από το kit χρησιμοποιούνται αντιδραστήρια στα οποία προστίθεται 1ml από το χωνεμένο, αφού γίνει ανάδευση των κυψελίδων και τέλος προστίθεται 1ml N-3K. Αργότερα ανακινούνται καλά τα αντιδραστήρια και αφήνονται να κρυώσουν για 10-15λεπτά. Στο τέλος πραγματοποιείται φωτομέτρηση με τη χρήση του μηχανήματος Merck NOVA 60, το οποίο έχει έτοιμη την καμπύλη βαθμονόμησης και δίνονται απευθείας οι μετρήσεις σε mg/L.

### **Μέτρηση αμμωνιακού αζώτου $\text{NH}_4\text{-N}$**

Χρησιμοποιώντας το kit Ammonium Test 1.00683.0001 φασματοφωτομετρικής μεθόδου με εύρος συγκεντρώσεων 2,0-150 mg/L τοποθετείται για κάθε δείγμα 5ml  $\text{NH}_4\text{-1}$  και ακολούθως από τα δείγματα που κρατήθηκαν στην διήθηση, διηθείται ξανά μικρή ποσότητα με φίλτρο των 0,45μm και τοποθετείται σε κάθε δείγμα 0,10ml από το διηθημένο. Στο τέλος προστίθεται μια κουταλιά  $\text{NH}_4\text{-2}$ . Έπειτα μετريέται στο φασματοφωτόμετρο στα 690nm.



**Εικόνα 3.3.3 :** Δείγματα αμμωνίας για υπολογισμό της συγκέντρωσης. Πρώτο στα αριστερά είναι το τυφλό διάλυμα.

### **Μέτρηση νιτρικού αζώτου $\text{NO}_3\text{-N}$**

Για την μέτρηση αυτή χρησιμοποιήθηκε το kit Nitrat της εταιρείας MACHEREY-NAGEL 91865 φασματοφωτομετρικής μεθόδου με εύρος συγκεντρώσεων 0,10-30 mg/L  $\text{NO}_3\text{-N}$ . Σε ποτήρια ζέσεως προστίθεται 4ml R1, 0,5ml R2 και 0,5ml δείγματος αφού πρώτα διηδηθεί με φίλτρο των 0,45μm από τα ήδη διηθημένα που κρατήθηκαν στα TSS. Ακολούθως μετά από αντίδραση 10-15λεπτών γίνεται μέτρηση τους στο φασματοφωτόμετρο στα 365nm.

### **Μέτρηση φωσφορικών $\text{PO}_4^3$**

Για την μέτρηση των φωσφορικών  $\text{PO}_4^3$  πάρθηκαν 50ml διηθημένο με φίλτρο 0,45μm από τη διήθηση που έγινε για τα TSS.

Ακολούθως παρασκευάζεται combined reagent με τα παρακάτω συστατικά:

- 70ml στα 500ml Sulfuric Acid 5M
- 20gr στα 500ml Ammonium Molybdate
- 1,3715gr στα 500ml Potassium Antimonyl Tartrate
- 0,88gr στα 50ml Ascorbic Acid

Για τα δείγματα χρειάζεται combined reagent 100ml, δηλαδή:

- 50ml Sulfuric Acid 5M

- 15ml Ammonium Molybdate
- 5ml Potassium Antimonyl Tartrate
- 30ml Ascorbic Acid

Έπειτα προστίθεται από το αντιδραστήριο 8ml σε κάθε δείγμα, συν στο τυφλό το οποίο αποτελείται από 50ml απιονισμένο νερό. Μετά από 10-15λεπτά γίνεται μέτρηση τους στο φασματοφωτόμετρο στα 880nm.

### **Μέτρηση ολικού φωσφόρου TP**

Για την μέτρηση του TP πάρθηκαν 50ml από κάθε δείγμα από τις πιλοτικές μονάδες. Έπειτα προστέθηκαν σε αυτά 5ml νιτρικό οξύ και 1ml θειικού οξέος. Ακολούθως τοποθετήθηκαν στο μάτι, σε ήπιο βρασμό μέχρι να παραμείνουν σε αυτά τουλάχιστον 1ml. Αργότερα ρυθμίζεται το pH τους να είναι 6,5-7,5 προσθέτοντας απιονισμένο νερό. Ακολουθεί διήθηση με φίλτρο 0,45μm και προσθήκη αν χρειαζόταν απιονισμένου νερού για να φτάσει τα 50ml. Και τέλος όπως και στα φωσφορικά προστέθηκαν 8ml αντιδραστηρίου σε κάθε δείγμα. Μετά από 10-15λεπτά γίνεται μέτρηση τους στο φασματοφωτόμετρο στα 880nm.



**Εικόνα 3.3.4 :** Ηλεκτρικό μάτι για βρασμό των διαλυμάτων του ολικού φωσφόρου και των φωσφορικών.





**Εικόνα 3.3.5 :** Δείγματα ολικού φωσφόρου και των φωσφορικών για υπολογισμό των συγκεντρώσεων. Πρώτο στα αριστερά είναι το τυφλό διάλυμα.

### **Μέτρηση Βιοχημικά Απαιτούμενου Οξυγόνου BOD<sub>5</sub>**

Για την μέτρηση του BOD<sub>5</sub> χρησιμοποιήθηκαν ειδικευμένες φιάλες με χωρητικότητα 500ml, οι οποίες διαθέτουν πιεσομετρικό αισθητήρα OxITor της εταιρείας WTW. Για το κάθε δείγμα τοποθετείτο συγκεκριμένος όγκος διασταλάγματος. Κάτω από το μανομετρικό αισθητήρα προστίθεντο σε ειδικό φυλάκιο 6 σταγόνες καυστικής ποτάσας KOH ως οξειδωτικό. Έπειτα αφού σφραγιστούν τοποθετούνταν στο ψυγείο σε θερμοκρασία 20 °C και με τη βοήθεια μαγνήτη που βρίσκεται μέσα στη φιάλη γίνεται συνεχής ανάδευση. Η μέτρηση γίνεται μετά από 5 ημέρες.

### **Μέτρηση Χημικά Απαιτούμενου Οξυγόνου COD**

Για την μέτρηση του COD χρησιμοποιήθηκε το kit COD Cell Test 1.14541.0001 φασματοφωτομετρικής μεθόδου με εύρος συγκεντρώσεων 52-1500 mg/L. Προστίθενται στα φιαλίδια 3ml από το κάθε δείγμα και τοποθετούνται στην εστία μετά από ανάδευση στους 148 °C για 2h. Έπειτα αφού έχει γίνει η χώνευση και φτάσουν τα φιαλίδια σε θερμοκρασία περιβάλλοντος τοποθετούνται στο φασματοφωτόμετρο της εταιρείας SHIMADZU UV-1202 και μετριοούνται στα 610nm. Να αναφερθεί επίσης ότι χρησιμοποιήθηκε και τυφλό διάλυμα για να μηδενιστεί το φασματοφωτόμετρο.

### **Μέτρηση διηθημένου οργανικού Άνθρακα DOC**

Για τον προσδιορισμό του διαλυμένου οργανικού άνθρακα DOC γινόταν αρχικά διήθηση από τα δείγματα που κρατιόνταν από τη διήθηση για TSS με φίλτρα μεμβράνης με μέγεθος πόρων 0,45  $\mu\text{m}$ . Τα δείγματα τοποθετούνταν στον αναλυτή οργανικού άνθρακα TOC analyzer της εταιρείας SHIMADZU μοντέλο TOC-L για μέτρηση του DOC.

Το δείγμα στο μηχάνημα οξινίζεται με 1,5% HCL ούτως ώστε να μετατραπεί ο ανόργανος άνθρακας σε  $\text{CO}_2$  το οποίο στη συνέχεια απομακρύνεται με διοχέτευση αέρα για 400 sec (sparging). Με αυτή τη μέθοδο το Total Carbon (TC) που μετριέται στη συνέχεια αντιστοιχεί στον Organic Carbon (OC). Η μέθοδος που χρησιμοποιείται από τον αναλυτή για τη μέτρηση του TC βασίζεται στη μέθοδο 5310 από το Standard Methods, στην οποία γίνεται οξείδωση του δείγματος στους 680°C με καταλύτη σφαιρίδια αλουμίνης επικαλυμμένα με πλατίνα, μετατρέποντας το TC σε  $\text{CO}_2$ . Το  $\text{CO}_2$  μετριέται από τον ανιχνευτή υπέρυθρης ακτινοβολίας με μορφή κορυφών (peak).



**Εικόνα 3.3.6 :** Δείγματα Διαλυμένου Οργανικού Άνθρακα για υπολογισμό της συγκέντρωσης του.



**Εικόνα 3.3.7 :** Μηχάνημα αναλυτή οργανικού άνθρακα. TOC analyzer της εταιρείας SHIMADZU TOC-L.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

### 4.1 ΥΔΑΤΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ

Στο πιο κάτω πίνακα καταγράφονται οι εισροές και οι εκροές που γίνονταν στις πιλοτικές μονάδες G(gravel), P(plastic), C(control). Καθόλη τη διάρκεια του πειράματος η εισροή – παροχή ήταν 8L, ενώ στην εκροή παρατηρείτε αυξομείωση στον όγκο που αφαιρείται. Αυτό συμβαίνει λόγω της εξατμισοδιαπνοής και του εμπλουτισμού επιπλέον βρόχινου νερού.

Πιο αναλυτικά στη μονάδα C (control) που ονομάστηκε έτσι για να γίνετε έλεγχος του λύματος με χρήση μόνο του ανακυκλωμένου πλαστικού HDPE, χωρίς τη επέμβαση άλλων μέσων και υλικών όπως των υπόλοιπων πιλοτικών μονάδων, η εισροή που γινόταν κάθε φορά ήταν 8L. Η στάθμη εντός της μονάδας διατηρούνταν σταθερή.

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	G		P		C	
	IN (L)	OUT (L)	IN (L)	OUT (L)	IN (L)	OUT (L)
16/12/2022	8	6.46	8	8.72	8	10
20/12/2022	8	12.64	8	13.15	8	12
7/1/2022	8	17.96	8	20.5	8	26
10/1/2022	8	5.36	8	7.19	8	9
13/1/2022	8	9.62	8	10.45	8	10
16/1/2022	8	10.6	8	10.7	8	8.5
19/1/2022	8	3.39	8	5.6	8	9.5
22/1/2022	8	7.9	8	8.66	8	8
26/1/2022	8	7.5	8	7.83	8	6
29/1/2022	8	7.5	8	7.82	8	8
1/2/2022	8	6.5	8	8.72	8	11
4/2/2022	8	2.92	8	9.1	8	9
7/2/2022	8	7.85	8	6.82	8	8
10/2/2022	8	8.72	8	8.03	8	10
13/2/2022	8	7.74	8	9.4	8	8
16/2/2022	8	6.95	8	5.88	8	8
18/2/2022	8	9.3	8	10.11	8	9
21/2/2022	8	6.92	8	10.1	8	8
24/2/2022	8	10.11	8	8.4	8	9.9
2/3/2022	6	15.7	6	12.5	6	13
5/3/2022	8	11.5	8	6.38	8	13
8/3/2022	8	0.04	8	6.05	8	9
11/3/2022	8	4.96	8	11.74	8	12
14/3/2022	8	11.05	8	3.3	8	9

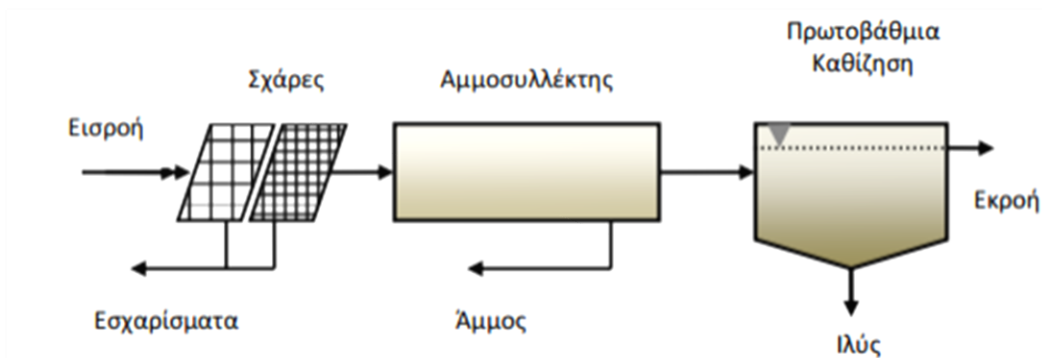
17/3/2022	8	11	8	8.4	8	8
20/3/2022	8	12.3	8	7.77	8	8.5
23/3/2022	8	0.14	8	6.74	8	8
26/3/2022	8	2.94	8	10.17	8	8.5
29/3/2022	8	5.81	8	7.33	8	8
1/4/2022	8	6.35	8	7.8	8	7.5
4/4/2022	8	3.5	8	6.13	8	7
7/4/2022	8	3.43	8	2.23	8	8
10/4/2022	8	8.46	8	11.23	8	8
13/4/2022	8	2.98	8	0.22	8	7.5
18/4/2022	8	-	8	-	8	-
22/4/2022	8	0	8	0.08	8	14
26/4/2022	8	0.1	8	4.4	8	8
29/4/2022	8	0	8	4.98	8	10
2/5/2022	8	1.95	8	4.09	8	10
5/5/2022	8	3.7	8	2.24	8	7.5
8/5/2022	8	8.12	8	9.54	8	8
11/5/2022	8	0.654	8	2.47	8	8
14/5/2022	8	2.76	8	4.55	8	7.5
17/5/2022	8	1.54	8	4.6	8	7
19/5/2022	8	7.79	8	4.06	8	8
21/5/2022	8	1.101	8	4.93	8	8
23/5/2022	8	3.12	8	6.45	8	8
25/5/2022	8	0.88	8	4.21	8	8
27/5/2022	8	2	8	5.22	8	8
29/5/2022	8	0.92	8	4.03	8	8
31/5/2022	8	4.07	8	2.84	8	8
2/6/2022	8	2.18	8	6.68	8	7.5
4/6/2022	8	7.88	8	4.07	8	7.5
6/6/2022	8	1.65	8	6.84	8	8

## 4.2 ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΥΓΡΟΥ ΑΠΟΒΛΗΤΟΥ

### 4.2.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΕΙΣΡΟΗΣ

Η εισροή που χρησιμοποιήθηκε για το πείραμα προερχόταν από το Δ.Ε.Υ.Α. Χανίων. Πριν τη συλλογή του περνούσε από μερική επεξεργασία. Πρώτα από το αντλιοστάσιο εισόδου – Χονδροεσχάρωση. Μετά από εσχάρωση όπου γίνεται απομάκρυνση των ογκωδών αντικειμένων μέσω σχαρών. Αργότερα ακολουθεί η εξάμμωση όπου γίνεται απομάκρυνση της άμμου με τη χρήση αέρα. Ακολούθως έρχεται η επεξεργασία λιπών όπου επιτυγχάνεται μείωση του οργανικού φορτίου κατά 80%. Έπειτα ακολουθεί η πρωτοβάθμια επεξεργασία(καθίζηση). Στην προκομμένη επεξεργασία επιτυγχάνεται απομάκρυνση του οργανικού φορτίου BOD<sub>5</sub> κατά 33% και αιωρούμενων στερεών κατά 60%. Το λύμα συλλεγόταν μετά από την Πρωτοβάθμια καθίζηση . Στο πιο κάτω Πίνακα παρουσιάζεται η μέση τιμή και το εύρος τιμών για τις παραμέτρους της εισροής.

**Εικόνα 4.2.1:** απεικόνιση δεξαμενών επεξεργασίας λυμάτων. (Νταρακάς 2014).



**Πίνακας 4.2.1 :** Μέση τιμή και εύρος τιμών για παραμέτρους της εισροής.

Παράμετροι	Μέση τιμή	Εύρος τιμών
BOD <sub>5</sub>	277.35±54.62 mg/L	210-412 mg/L
COD	354.04±55.64 mg/L	246-430 mg/L
TN	58.77±11.26 mg/L	31-80 mg/L
NH <sub>4</sub> -N	44.20±9.94 mg/L	27.7-63.3 mg/L
NO <sub>3</sub> -N	<2 mg/L	<2 mg/L
TP	3.67±0.70 mg/L	2.46-4-69 mg/L
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	2.23±0.58 mg/L	1.1-3.78 mg/L
TOC	34.2±11.78 mg/L	9.9-56.2 mg/L
TSS	108.3±38.67 mg/L	62-226.6 mg/L
PH	7.23±0.12	6.94-7.39
EC	1067.54±302.42 μS/cm	819-2020 μS/cm
BOD <sub>5</sub> /COD	0.78	

Σύμφωνα με τον πιο πάνω Πίνακα ο λόγος **BOD<sub>5</sub>/COD** ισούται με **0.78**, τιμή που δείχνει ότι το υγρό απόβλητο είναι σχετικά εύκολο βιοαποικοδομήσιμο. Η τιμή για τα ανεπεξέργαστα υγρά απόβλητα κυμαίνεται από 0,4-0,8, ενώ μετά από πρωτοβάθμια επεξεργασία 0,4-0,6. Το βέλτιστο θα ήταν 1. (Καραπαναγιώτη Χ., 2015).

Η τιμή του COD είναι μειωμένη αρκετά, αυτό φανερώνει ικανοποιητική οξείδωση της οργανικής ύλης στο στάδιο της Πρωτοβάθμιας επεξεργασίας.

#### 4.2.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΕΚΡΟΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ

##### PH

**Πίνακας 4.2.2.9** :Αποτελέσματα μέσης τιμής και εύρους τιμών του PH.

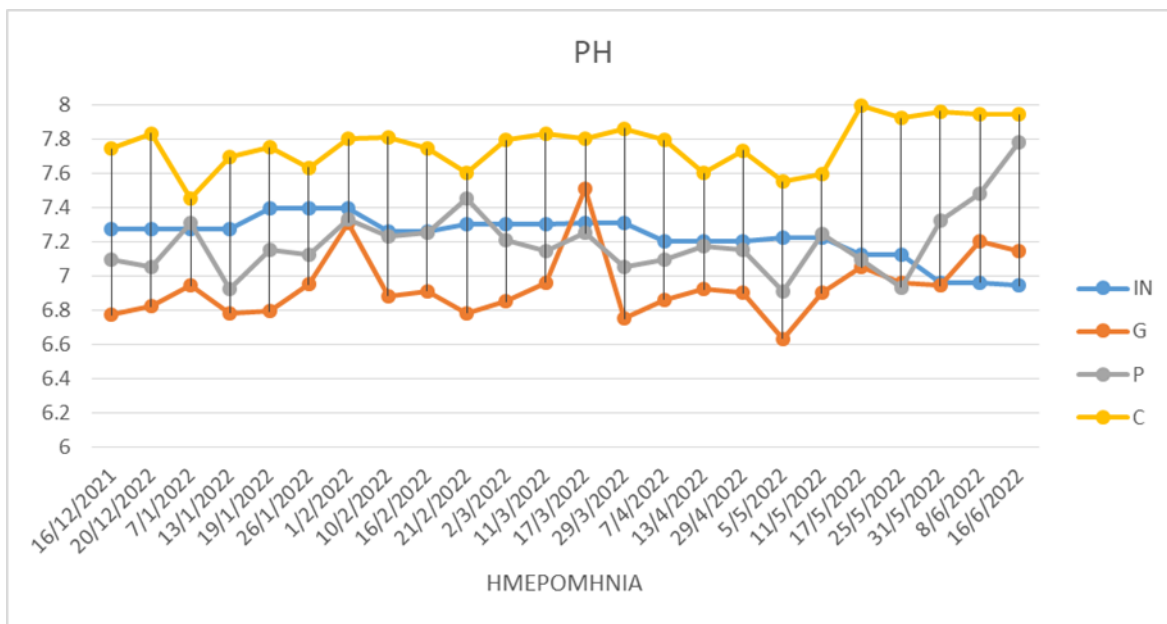
pH	Μέση τιμή	Εύρος Τιμών
<b>Εισροή</b>	7.23 ± 0.12	6.94-7.39
<b>G</b>	6.94 ± 0.19	6.63-7.51
<b>P</b>	7.2 ± 0.19	6.91-7.78
<b>C</b>	7.76 ± 0.14	7.45-7.99

Βλέποντας τον πίνακα και το διάγραμμα για την τιμή του pH για τις μονάδες διαπιστώνεται πως οι μονάδες P(plastic) και C(control) είναι προς αλκαλικά φορτισμένες στα  $7.2 \pm 0.19$  και  $7.76 \pm 0.14$  αντίστοιχα. Σε ουδέτερη κατάσταση φαίνεται να είναι η μονάδα G(gravel) με τιμή  $6.94 \pm 0.19$ , λίγο πιο κάτω από το απόλυτο ουδέτερο 7. Συγκρίνοντας με το pH της εισροής που είναι ελαφρώς αλκαλικό στα  $7.23 \pm 0.12$  παρατηρείται μείωση μόνο στη μονάδα G και ελάχιστη στη μονάδα P. Ενώ για την μονάδα C παρατηρείται μια μικρή αύξηση.

Το pH εκφράζει τη συγκέντρωση των ιόντων υδρογόνου σε ένα υδατικό διάλυμα. Πιο συγκεκριμένα συμβολίζεται με τον αρνητικό δεκαδικό λογάριθμο της συγκέντρωσης των ιόντων υδρογόνου στο διάλυμα.

Σε ψηλές τιμές του pH προκαλείται απομάκρυνση της αμμωνίας σε τεχνητές λίμνες. Με συνέπεια η νιτροποίηση να γίνεται σε περιορισμένο βαθμό λόγω μειωμένης παρουσίας των κατάλληλων βακτηρίων. Το ίδιο συμβαίνει και με τη διεργασία της απονιτροποίησης, εκτός αν υπάρχουν αυξημένες τιμές νιτρικών. Επίσης σε  $pH > 9$  επιτυγχάνεται απομάκρυνση βακτηρίων. Δαμάλα 2015. Υπάρχει και μια εξαίρεση που κολοβακτηρίδια περιττωματικής προέλευσης παρακμάζουν ταχύτατα όταν το  $pH > 9$ . Pearson et al., 1987.

**Διάγραμμα 4.2.2.17** :PH σε εισροή και εκροή των μονάδων G, P και C.



## Ηλεκτρική Αγωγιμότητα EC

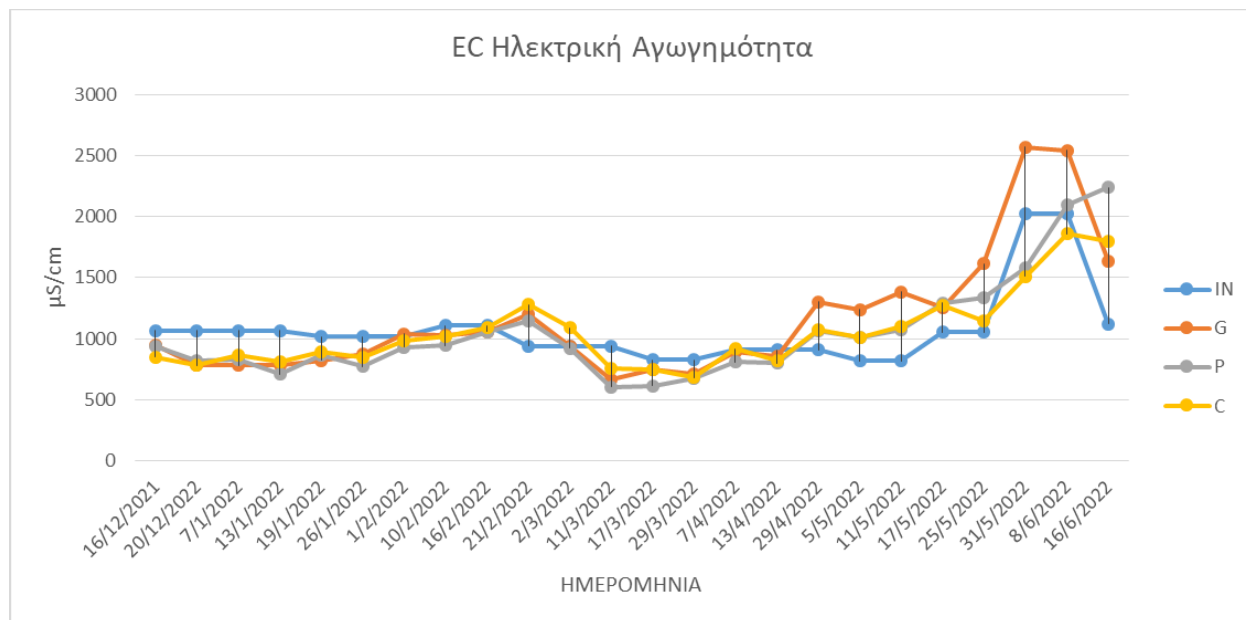
**Πίνακας 4.2.2.10** :Αποτελέσματα μέσης τιμής και εύρους τιμών της EC.

EC	Μέση τιμή (μS/cm)	Εύρος Τιμών (μS/cm)
<b>Εισροή</b>	1067.54 ± 302.42	819-2020
<b>G</b>	1151.86 ± 498.25	662-2570
<b>P</b>	1046.92 ± 407.35	605-2240
<b>C</b>	1049.79 ± 303.43	682-1860

Μελετώντας τον πίνακα και το διάγραμμα της Ηλεκτρικής αγωγιμότητας για της μονάδες φαίνεται πως συγκριτικά οι μονάδες P(plastic) και C(control) με τιμές  $1046.92 \pm 407.35 \mu\text{S/cm}$  και  $1049.79 \pm 303.43 \mu\text{S/cm}$  αντίστοιχα είναι λίγο ελάχιστα πιο αποφορτισμένες από αυτή της εισροής. Λίγο περισσότερη ηλεκτρική αγωγιμότητα κατέχει η μονάδα G(gravel) στα  $1151.86 \pm 498.25 \mu\text{S/cm}$ . Με τη πάροδο του χρόνου και συγκεκριμένα τους καλοκαιρινούς μήνες παρατηρείται μια αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Αυτό συμβαίνει λόγω της μεγαλύτερης ηλιοφάνειας και θερμοκρασίας με συνέπεια δημιουργίας και αποκόλλησης βιοφίλμ (ανόργανης και οργανικής ύλης) στις πιλοτικές μονάδες.

Ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι ένα φυσικό μέγεθος με μονάδα μέτρησης διεθνώς το dS/m. Είναι το αντίστροφο της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας ενός υλικού. Σε ένα υδατικό διάλυμα με συγκεκριμένη θερμοκρασία η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι ανάλογη της συγκέντρωσης των ιόντων που βρίσκονται διαλυμένα στο συγκεκριμένο διάλυμα. (Μπάστα, 2007).

**Διάγραμμα 4.2.2.18 :**EC σε εισροή και εκροή των μονάδων G, P και C.



### Ολικά Αιωρούμενα Στερεά TSS

**Πίνακας 4.2.2.8 :**Αποτελέσματα μέσης τιμής και εύρους τιμών συγκέντρωσης και απομάκρυνσης για TSS.

TSS	Μέση τιμή Συγκέντρωσης (mg/L)	Εύρος τιμών Συγκέντρωσης (mg/L)	Μέση τιμή Απομάκρυνσης (%)	Εύρος τιμών Απομάκρυνσης (%)
ΕΙΣΡΟΗ	108.3 ± 38.97	62-226.6	-	-
G	13.9 ± 11.99	1.2-41.9	87.5 ± 10.08	60.8-98.4
P	16.1 ± 16.18	0.8-70.8	84.4 ± 15.83	33.8-98.9
C	19.1 ± 9.48	3.2-37.7	82.1 ± 8.66	62.9-94.8

Σύμφωνα με το πίνακα και τα διαγράμματα οι συγκεντρώσεις των εκροών από τις μονάδες είναι αρκετά κοντά η μία με την άλλη. Αναμενόμενο ήταν η ψηλότερη συγκέντρωση να είναι της μονάδας C(control), με τιμή συγκέντρωσης στα  $19.1 \pm 9.48 \text{ mg/L}$ . Ακολουθεί η μονάδα P(plastic) με  $16.1 \pm 16.18 \text{ mg/L}$  και με τη λιγότερη συγκέντρωση η μονάδα G(gravel) με  $13.9 \pm 11.99 \text{ mg/L}$ . Η μονάδα C κατέχει τη μεγαλύτερη συγκέντρωση λόγω της απουσίας της φυτικής μάζας και του επιπρόσθετου υποστρώματος που διαθέτουν οι υπόλοιπες μονάδες G και P. Στοιχεία που συγκρατούν και απορροφούν οργανική και ανόργανη ύλη. Όσο για το ποσοστό απομάκρυνσης παρατηρείτε αρκετά ικανοποιητικοί και στις τρεις πιλοτικές μονάδες. Με τη μεγαλύτερη απομάκρυνση είναι η μονάδα G με ποσοστό  $87.5 \pm 10.08 \%$ , ακολουθεί η μονάδα P με ελάχιστη διαφορά στο  $84.4 \pm 15.83\%$  και τέλος η μονάδα C με  $82.1 \pm 8.66\%$  ελάχιστα μικρότερο ποσοστό από της υπόλοιπες μονάδες. Λογικό ήταν η μονάδα G να έχει την περισσότερη απομάκρυνση λόγω της παρουσίας χαλικιού ως υπόστρωμα που δημιουργεί μικρότερους πόρους σε σύγκριση με της υπόλοιπες μονάδες που διαθέτουν ως υπόστρωμα το ειδικό Πολυαιθυλένιο



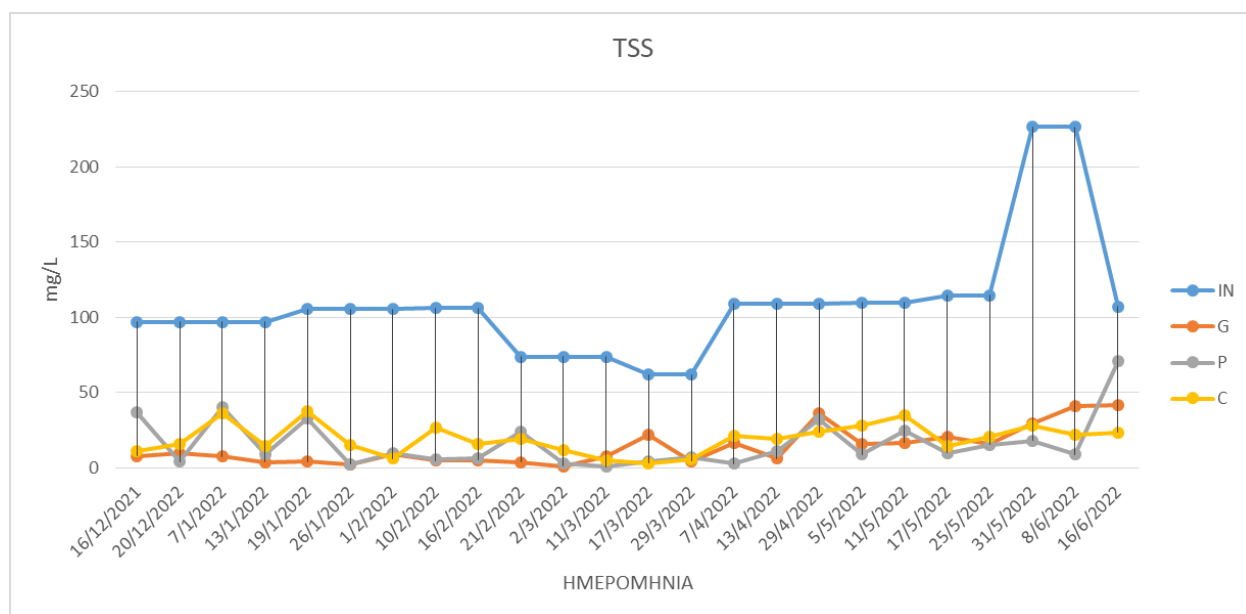
υψηλής πυκνότητας HDPE με πιο μεγάλο πορώδες από το χαλίκι. Άλλος σημαντικός παράγοντας είναι η βλάστηση που συγκρατεί την οργανική και ανόργανη ύλη.

Τα ολικά αιωρούμενα στερεά TSS που βρίσκονται στα υγρά απόβλητα αποτελούνται από οργανικά και ανόργανα συστατικά διαφόρου μορφής και πυκνότητας. Κατά κύριο τρόπο απομάκρυνσης τους γίνεται μέσω συσσωμάτωσης, καθίζησης και φίλτρανσης από το πορώδες υλικού του υποστρώματος. Σωματίδια με μεγάλη διάμετρο και πιο βαριά κατακάθονται στη ζώνη του υδροβιότοπου που εισρέει το απόβλητο. Ενώ τα ελαφρύτερα σωματίδια κατακάθονται με τη συμβολή της φυτικής βλάστησης.

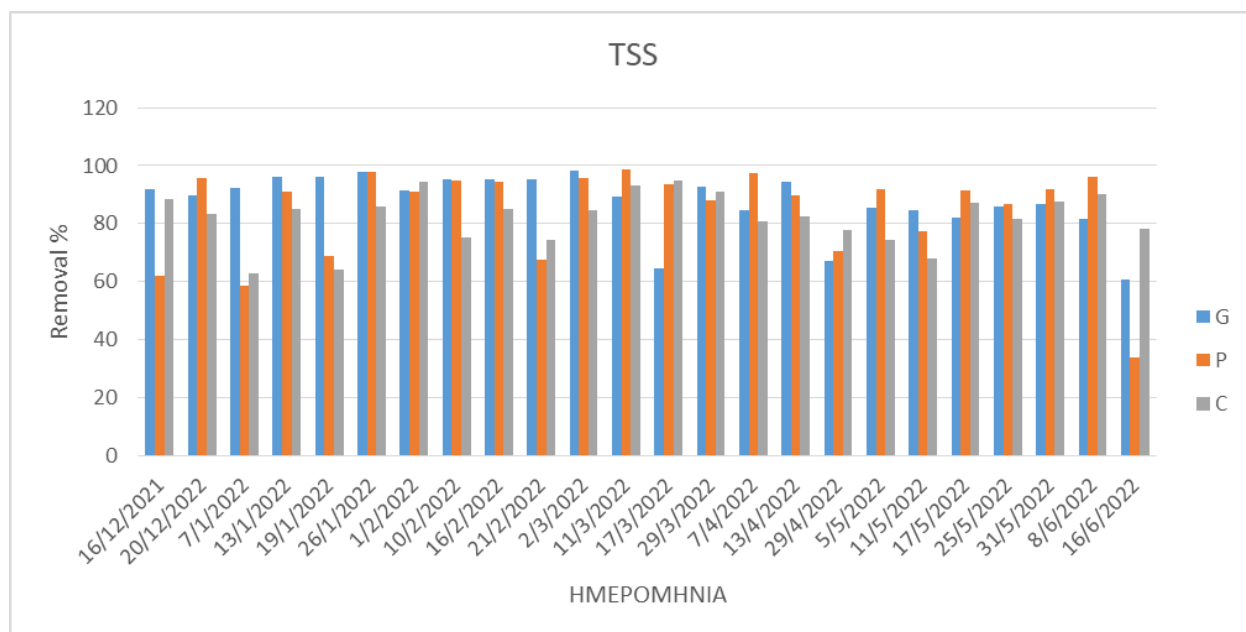
Η διεργασία της καθίζησης γίνεται από μεμονωμένα και συσσωματωμένα σωματίδια στα οποία στηρίζονται από το μέγεθος, το σχήμα, τη βαρύτητα και το ιξώδες. Η συσσωμάτωση γίνεται μέσω φυσικών διεργασιών και χημικής προσρόφησης (Ζαρμακούπης 2006). Επίσης σύμφωνα (Αγιουτάντη 2018) τα αιωρούμενα στερεά μπορούν να απομακρυνθούν και μέσω της προσρόφησης τους πάνω στο βιοφίλμ που αναπτύσσεται στην επιφάνεια του ριζικού συστήματος και του υποστρώματος.

Στην εκροή του υδροβιότοπου παρατηρούνται στερεά τα οποία προκύπτουν κυρίως από τις ίδιες τις μονάδες και όχι από την εισροή των λυμάτων, τα οποία οι συγκεντρώσεις είναι ελάχιστες. (Water Environment Federation, 2001).

**Διάγραμμα 4.2.2.15 :**Συγκέντρωση TSS σε εισροή και εκροή των μονάδων G, P και C



**Διάγραμμα 4.2.2.16 :** Απομάκρυνση % TSS των μονάδων G, P και C.



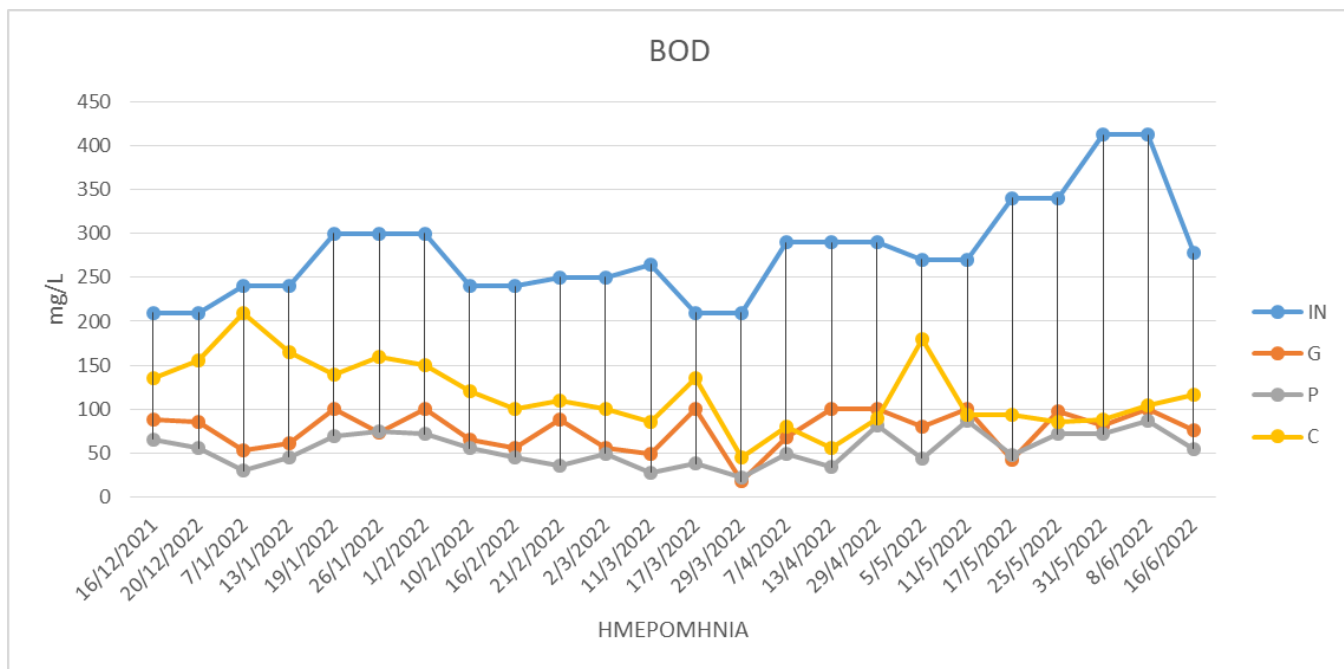
#### Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο BOD<sub>5</sub>

**Πίνακας 4.2.2.1 :** Αποτελέσματα μέσης τιμής και εύρους τιμών συγκέντρωσης και απομάκρυνσης για BOD.

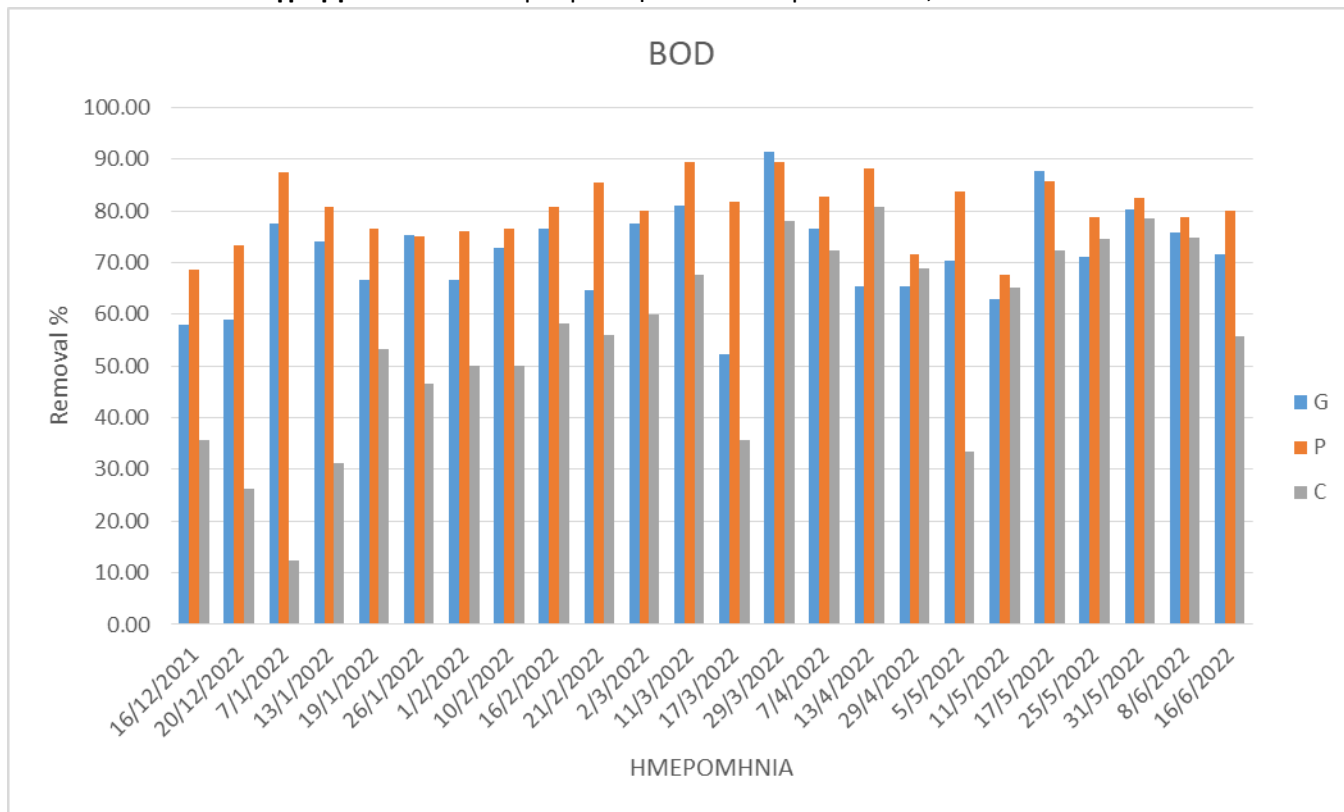
BOD	Μέση τιμή Συγκέντρωσης (mg/L)	Εύρος τιμών Συγκέντρωσης (mg/L)	Μέση τιμή Απομάκρυνσης (%)	Εύρος τιμών Απομάκρυνσης (%)
ΕΙΣΡΟΗ	277.35 ± 54.62	210-412	-	-
G	76.78 ± 22.17	18-100	71.75 ± 8.97	52.38-91.43
P	55.09 ± 18.61	22-87	80.1 ± 5.99	67.78-89.52
C	116.7 ± 38.71	46-210	55.76 ± 18.43	12.5-80.69

Σύμφωνα από τον πίνακα και τα διαγράμματα οι συγκεντρώσεις εκροών των μονάδων G(gravel) και P(Plastic) είναι αρκετά πιο χαμηλά από τη μονάδα C(control). Με μέση συγκέντρωση 76.78 ± 22.17 mg/L , 55.09 ± 18.61 mg/L και 116.7 ± 38.71 mg/L αντίστοιχα. Ενώ στις απομακρύνσεις των μονάδων παρατηρήθηκε ικανοποιητική απομάκρυνση της μονάδας P(Plastic) της τάξεως του 80.1 ± 5.99 %, ακολουθεί η μονάδα G(gravel) στο 71.75 ± 8.97 % και τέλος με την μικρότερη απομάκρυνση η μονάδα C(control) με ποσοστό απομάκρυνσης στο 55.76 ± 18.43 %. Το μικρό ποσοστό απομάκρυνσης της μονάδας C οφείλεται στην απουσία του φυτού (*Phragmites Australis*), το οποίο συμβάλει δραστικά στην οξείδωση την οργανικής ύλης με τις φυσικοχημικές του ιδιότητες. Αυτό διαπιστώνεται από τις άλλες δύο μονάδες G,P που διαθέτουν φυτική ύλη.

**Διάγραμμα 4.2.2.1 :** Συγκέντρωση BOD σε εισροή και εκροή των μονάδων G, P και C.



**Διάγραμμα 4.2.2.2 :** Απομάκρυνση % BOD των μονάδων G, P και C.



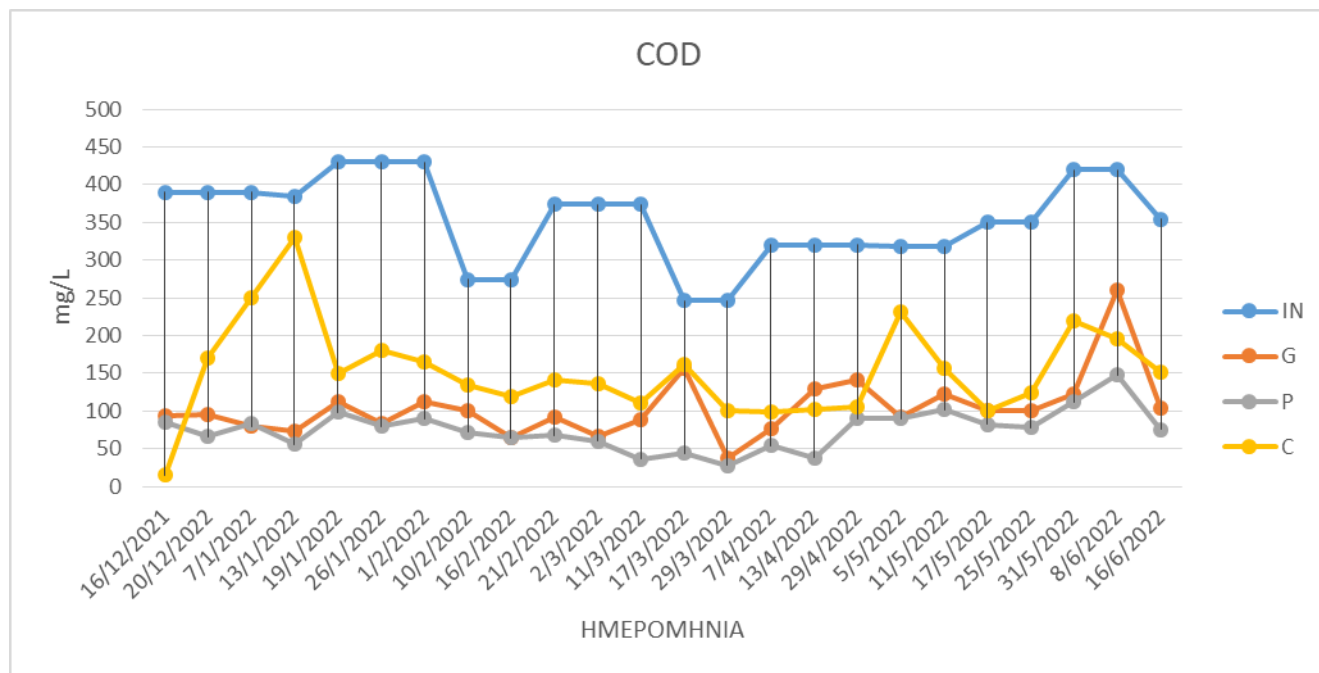
## Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο COD

**Πίνακας 4.2.2.2 :** Αποτελέσματα μέσης τιμής και εύρους τιμών συγκέντρωσης και απομάκρυνσης για COD.

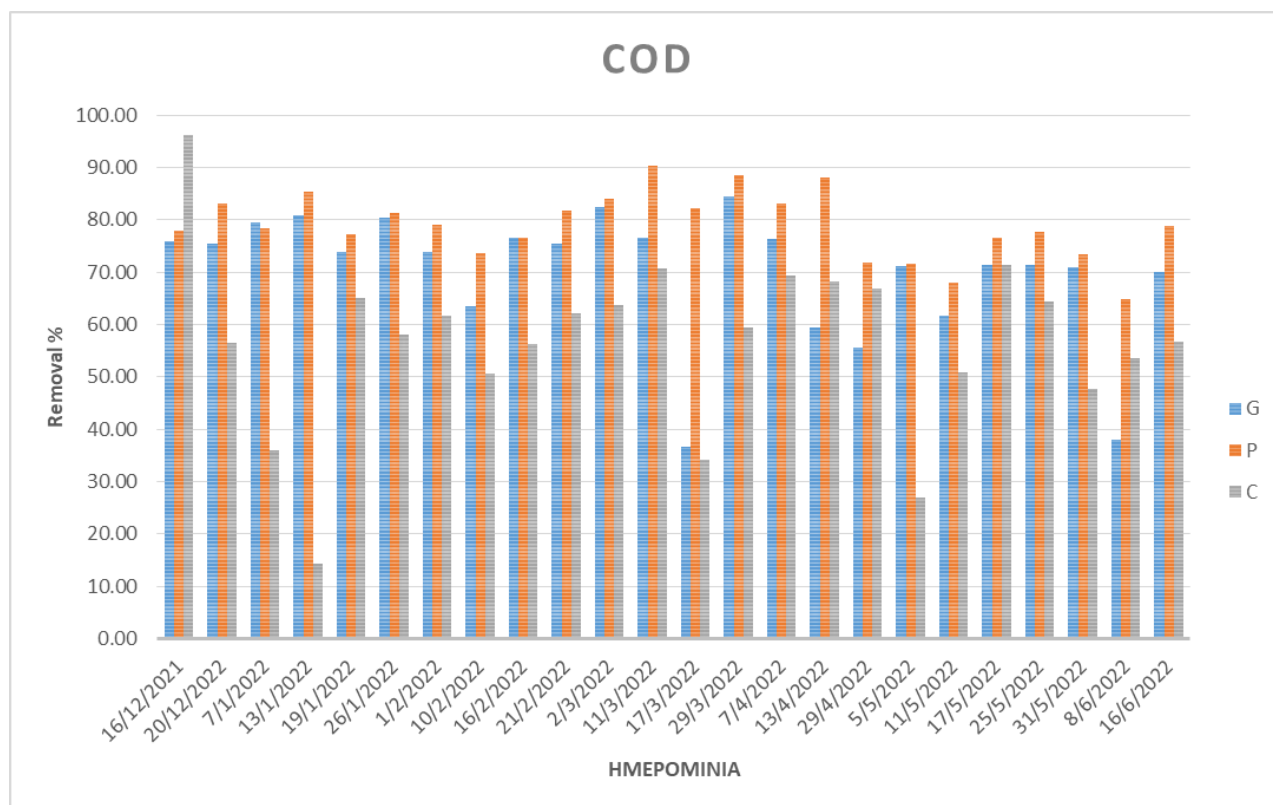
COD	Μέση τιμή Συγκέντρωσης (mg/L)	Εύρος τιμών Συγκέντρωσης (mg/L)	Μέση τιμή Απομάκρυνσης (%)	Εύρος τιμών Απομάκρυνσης (%)
ΕΙΣΡΟΗ	354.04 ± 55.64	246-430	-	-
G	104.35 ± 41.21	38-260	70.06 ± 12.08	36.59-84.55
P	75.04 ± 26.03	28-148	78.91 ± 6.24	64.76-90.37
C	152.13 ± 61.72	15-330	56.68 ± 16.31	14.29-96.15

Παρατηρώντας τον πίνακα και τα διαγράμματα φαίνεται πως η συγκέντρωση εκροής της μονάδας C(control) έχει τη μεγαλύτερη τιμή 152.13 ± 61.72 mg/L, ακολουθεί η μονάδα G(gravel) με πιο μειωμένη συγκέντρωση, στα 104.35 ± 41.21 mg/L. Και τέλος η μονάδα P(plastic) που διαθέτει τη μισή περίπου συγκέντρωση από τη μονάδα C, δηλαδή 75.04 ± 26.03 mg/L. Όσο αφορά στα ποσοστά απομάκρυνσης η μονάδα P έχει το μεγαλύτερο και ικανοποιητικό ποσοστό της τάξεως του 78.91 ± 6.24 %. Δεύτερη και με μικρή διαφορά είναι η μονάδα G, με ποσοστό απομάκρυνσης 70.06 ± 12.08 % και τέλος με μειωμένο ποσοστό απομάκρυνσης η μονάδα C, με τιμή απομάκρυνσης στα 56.68 ± 16.31 %. Το μειωμένο ποσοστό απομάκρυνσης για την μονάδα C οφείλεται και πάλι στην απουσία της φυτικής μάζας.

**Διάγραμμα 4.2.2.3 :** Συγκέντρωση COD σε εισροή και εκροή των μονάδων G, P και C.



**Διάγραμμα 4.2.2.4 :Απομάκρυνση % COD των μονάδων G, P και C.**



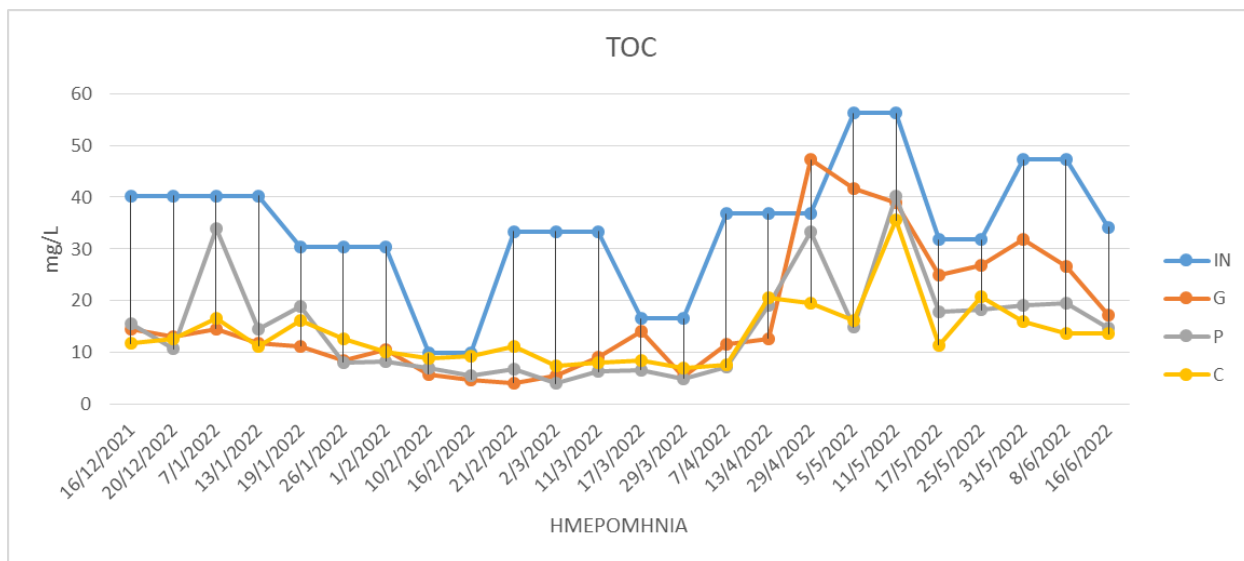
### Ολικός οργανικός Άνθρακας TOC

**Πίνακας 4.2.2.7 :**Αποτελέσματα μέσης τιμής και εύρους τιμών συγκέντρωσης και απομάκρυνσης για TOC.

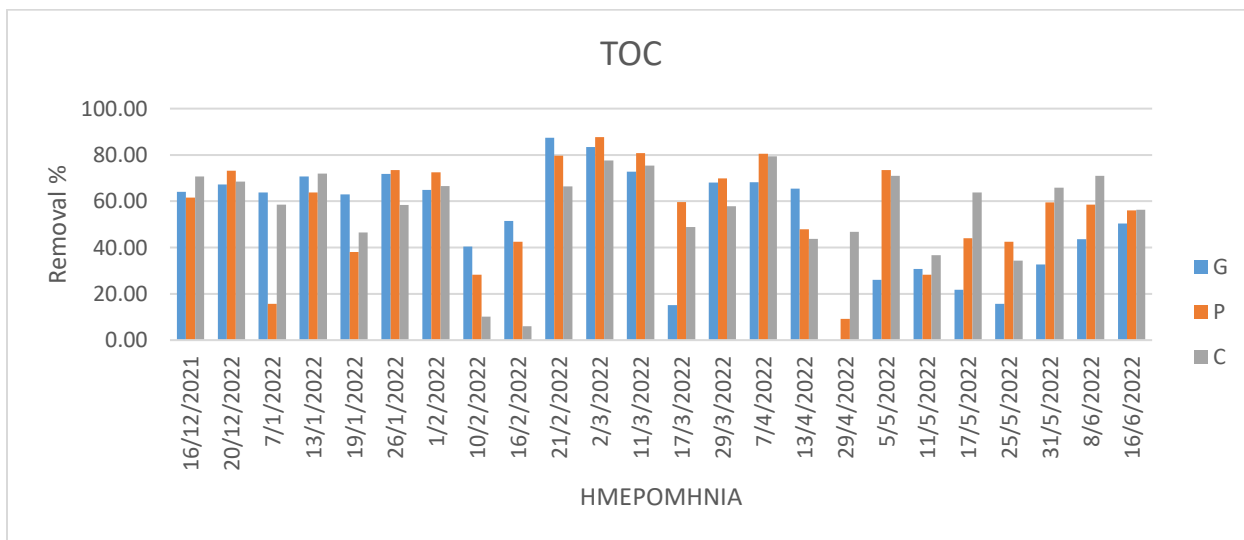
TOC	Μέση τιμή Συγκέντρωσης (mg/L)	Εύρος τιμών Συγκέντρωσης (mg/L)	Μέση τιμή Απομάκρυνσης (%)	Εύρος τιμών Απομάκρυνσης (%)
<b>ΕΙΣΡΟΗ</b>	34.2 ± 11.78	9.9-56.2	-	-
<b>G</b>	17.21 ± 12.05	4.2-47.2	50.43 ± 23.20	0-87.43
<b>P</b>	14.87 ± 9.52	4.1-40.3	56.10 ± 20.94	9.24-87.72
<b>C</b>	13.67 ± 6.12	7-35.6	56.34 ± 19.02	6.06-79.35

Από το πίνακα και τα διαγράμματα διαπιστώνεται πως οι συγκεντρώσεις ολικού οργανικού άνθρακα των εκροών για τις μονάδες G(gravel), P(plastic) και C(control) είναι αρκετά κοντά η μία με την άλλη. Με τιμές  $17.21 \pm 12.05$  mg/L ,  $14.87 \pm 9.52$  mg/L και  $13.67 \pm 6.12$  mg/L αντίστοιχα. Επίσης παρατηρείτε όμοια απομάκρυνση για τις μονάδες P και C με δεκαδική διαφορά.  $56.10 \pm 20.94\%$  για τη μονάδα P και  $56.34 \pm 19.02\%$  για τη μονάδα C. Ακολουθεί η μονάδα G με λίγο μικρότερο ποσοστό απομάκρυνσης στο  $50.43 \pm 23.20\%$ .

**Διάγραμμα 4.2.2.13 :** Συγκέντρωση TOC σε εισροή και εκροή των μονάδων G, P και C.



**Διάγραμμα 4.2.2.14 :** Απομάκρυνση % TOC των μονάδων G, P και C.



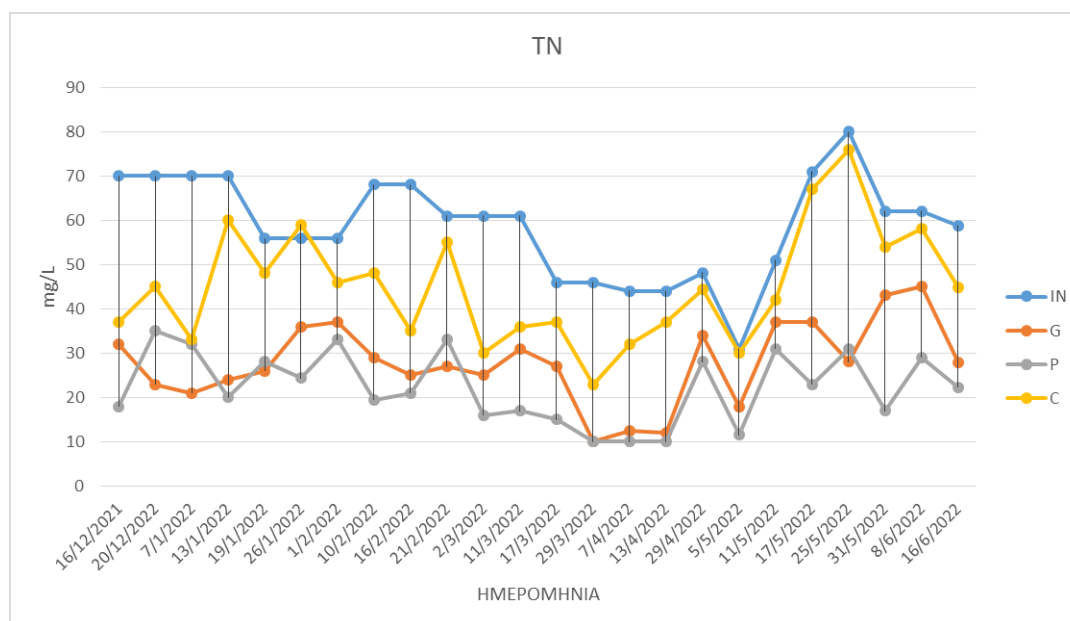
## Ολικό Άζωτο TN

**Πίνακας 4.2.2.3 :** Αποτελέσματα μέσης τιμής και εύρους τιμών συγκέντρωσης και απομάκρυνσης για TN.

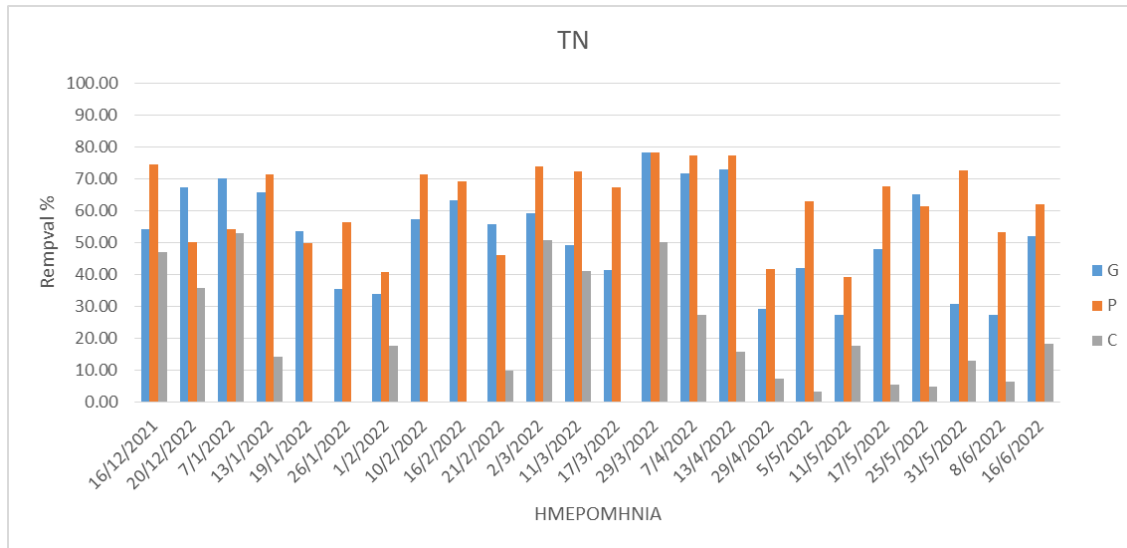
TN	Μέση τιμή Συγκέντρωσης (mg/L)	Εύρος τιμών Συγκέντρωσης (mg/L)	Μέση τιμή Απομάκρυνσης (%)	Εύρος τιμών Απομάκρυνσης (%)
ΕΙΣΡΟΗ	58.77 ± 11.26	31-80	-	-
G	27.80 ± 8.94	10-45	52.09 ± 15.35	27.42-78.26
P	22.28 ± 7.92	10-35	62.09 ± 12.28	39.22-78.26
C	44.89 ± 12.69	23-76	18.3 ± 17.80	0-52.86

Βλέποντας τον πίνακα και τα διαγράμματα, διαπιστώνεται πως η συγκέντρωση της εκροής για τις μονάδες G(gravel) και P(plastic) είναι κατά το ήμισυ μικρότερες από τη μονάδα C(control) που περιέχει 44.89 ± 12.69 mg/L ολικού Αζώτου . Η τιμή της συγκέντρωσης για τη μονάδα G είναι 27.80 ± 8.94 mg/L και για τη μονάδα P πιο μειωμένη στα 22.28 ± 7.92 mg/L. Επιπλέον παρατηρείτε μειωμένο ποσοστό απομάκρυνσης για τη μονάδα C, το οποίο είναι στο 18.3 ± 17.80 %. Ακολουθεί η μονάδα G με ποσοστό 52.09 ± 15.35 % και με το μεγαλύτερο η μονάδα P στο 62.09 ± 12.28 %. Ποσοστά ικανοποιητικά αν εξαιρεθεί η μονάδα C. Πιθανός λόγος μεγαλύτερης απομάκρυνσης ενώσεων αμμωνίας στη μονάδα P είναι η ικανοποιητική μικροβιακή ανάπτυξη βακτηρίων που συμβάλουν στις διεργασίες της νιτροποίησης και απονιτροποίησης. Αυτό συμβαίνει λόγω του μεγαλύτερου πορώδους που έχει το HDPE σε σύγκριση με το χαλίκι που υπάρχει στη μονάδα G. Επιτυγχάνεται ακόμη καλύτερη κυκλοφορία οξυγόνου διαμέσου του πληρωτικού υλικού και του ριζικού συστήματος, ενός σημαντικού παράγοντα για τη διεργασία της νιτροποίησης.

**Διάγραμμα 4.2.2.5 :** Συγκέντρωση TN σε εισροή και εκροή των μονάδων G, P και C.



**Διάγραμμα 4.2.2.6 :** Απομάκρυνση % TN των μονάδων G, P και C.



#### Αμμωνιακό Άζωτο NH<sub>4</sub>-N

**Πίνακας 4.2.2.4 :** Αποτελέσματα μέσης τιμής και εύρους τιμών συγκέντρωσης και απομάκρυνσης για NH<sub>4</sub>-N.

NH <sub>4</sub> -N	Μέση τιμή Συγκέντρωσης (mg/L)	Εύρος τιμών Συγκέντρωσης (mg/L)	Μέση τιμή Απομάκρυνσης (%)	Εύρος τιμών Απομάκρυνσης (%)
ΕΙΣΡΟΗ	44.20 ± 9.94	27.7-63.3	-	-
G	16.07 ± 9.46	2.6-34.8	63.27 ± 20.25	24.82-94.16
P	12.23 ± 5.87	1-23	71.71 ± 13.19	42.37-97.34
C	30.93 ± 8.13	15.2-49.5	24.24 ± 20.32	0-60.95

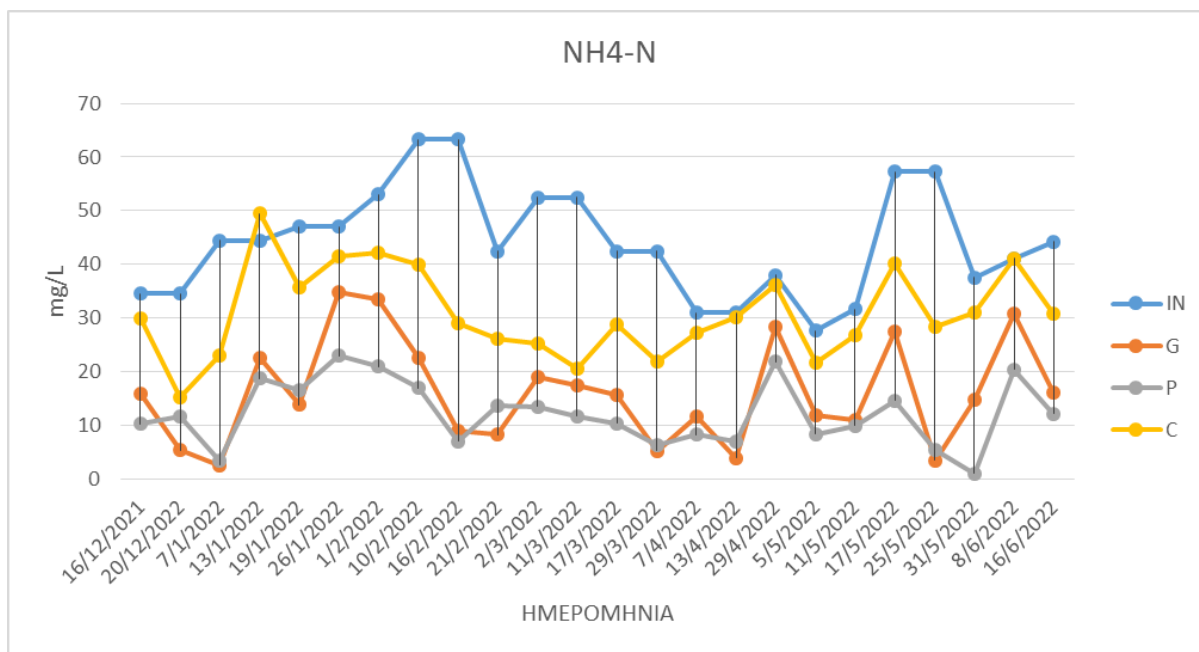
Σύμφωνα από τον πίνακα και τα διαγράμματα οι συγκεντρώσεις εκροών για Αμμωνιακό Άζωτο των μονάδων G(gravel) και P(Plastic) είναι μειωμένες από τη συγκέντρωση της μονάδας C(control), με τιμή συγκέντρωσης 30.93 ± 8.13 mg/L. Οι τιμές για τις μονάδες G και P είναι 16.07 ± 9.46 mg/L και 12.23 ± 5.87 mg/L αντίστοιχα. Ακολούθως παρατηρήθηκε αρκετά ικανοποιητικό ποσοστό απομάκρυνσης για τη μονάδα P, της τάξεως του 71.71 ± 13.19 %. Για τη μονάδα G λίγο λιγότερο στο 63.27 ± 20.25 % και τέλος σε πιο χαμηλά επίπεδα η μονάδα C με ποσοστό απομάκρυνσης στα 24.24 ± 20.32 %.

Η απομάκρυνση της αμμωνίας γίνεται με νιτροποίηση η οποία είναι ακολουθούμενη από τη διεργασία της απονιτροποίησης. Και στους δύο τύπους τεχνητών υδροβιότοπων γίνεται εφαρμογή των πιο πάνω διεργασιών. Για να γίνει νιτροποίηση βασικές και απαιτούμενες συνθήκες είναι πρώτον η παρουσία οξυγόνου( απαιτούνται 4,6 gr για την οξείδωση 1 gr NH<sub>4</sub>-N), αυτό προϋποθέτει αερόβιες συνθήκες. Δεύτερον ικανοποιητική αλκαλικότητα και τρίτον κατάλληλη θερμοκρασία. Οι μικροοργανισμοί που αναπτύσσονται και λειτουργούν για τη διεργασία της νιτροποίησης έχουν την τάση να προσκολλούνται σε επιφάνειες (Reed et al., 1995).

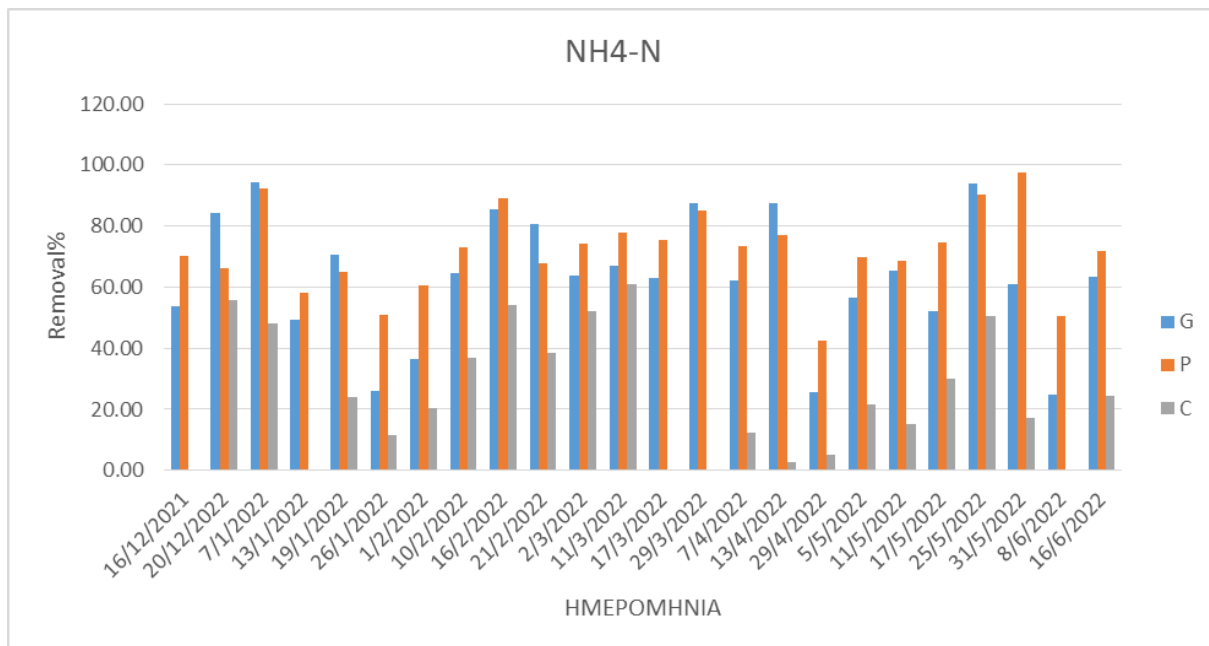


Σε συστήματα υποεπιφανειακής ροής η μεταφορά οξυγόνου γίνεται μέσω των υδροχαρών φυτών, μέσω του ριζικού τους συστήματος που αναπτύσσεται σε όλο το βάθος του πληρωτικού και πορώδους μέσο. Άλλος τρόπος μεταφοράς οξυγόνου είναι από την ατμόσφαιρα στις ρίζες αλλά είναι σχετικά μια αργή διαδικασία που προϋποθέτει ελάχιστο υδραυλικό χρόνο παραμονής 6-8 μέρες (Βοροστούκ, 2012).

**Διάγραμμα 4.2.2.7 :** Συγκέντρωση  $\text{NH}_4\text{-N}$  σε εισροή και εκροή των μονάδων G, P και C.



**Διάγραμμα 4.2.2.8 :** Απομάκρυνση %  $\text{NH}_4\text{-N}$  των μονάδων G, P και C.



### Νιτρικό Άζωτο NO<sub>3</sub>-N

Οι συγκεντρώσεις νιτρικών και στις τρεις μονάδες είναι ελάχιστες με συνέπεια να μην είναι αναγκαία η παρατήρηση της απομάκρυνσης του. Οι συγκεντρώσεις δεν ξεπέρασαν τα 2mg/L καθόλη τη διάρκεια των πειραμάτων.

### Ολικός Φώσφορος TP

Πίνακας 4.2.2.5 :Αποτελέσματα μέσης τιμής και εύρους τιμών συγκέντρωσης και απομάκρυνσης για TP.

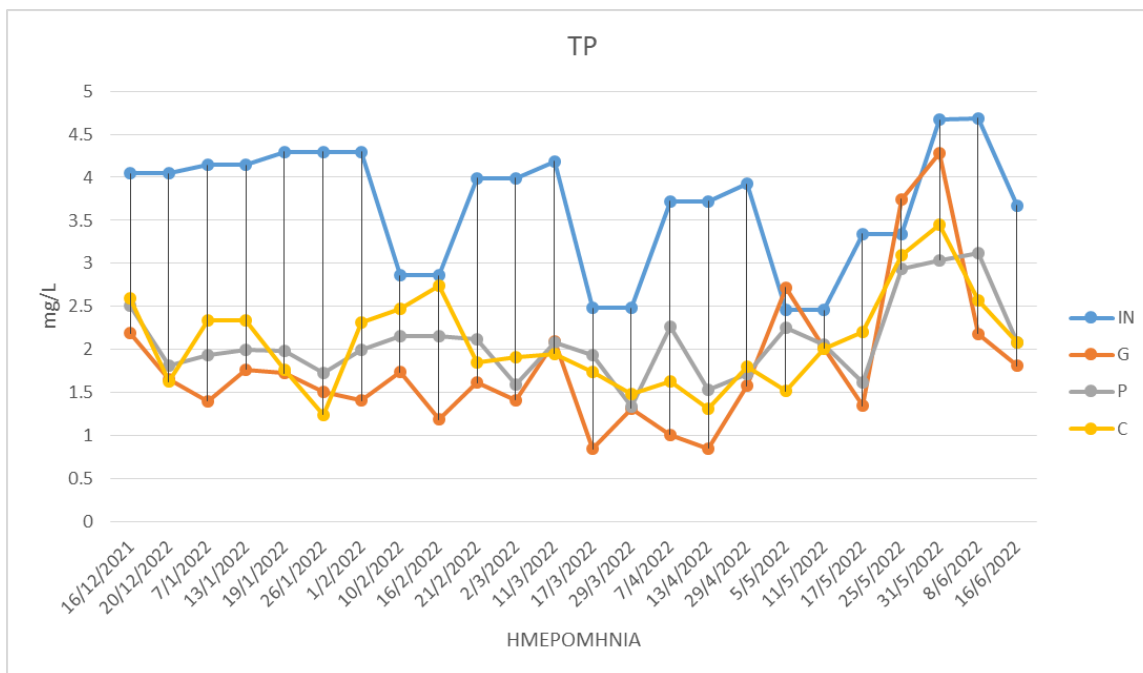
TP	Μέση τιμή Συγκέντρωσης (mg/L)	Εύρος τιμών Συγκέντρωσης (mg/L)	Μέση τιμή Απομάκρυνσης (%)	Εύρος τιμών Απομάκρυνσης (%)
ΕΙΣΡΟΗ	3.67 ± 0.70	2.46-4.69	-	-
G	1.81 ± 0.79	0.85-4.28	50.11 ± 21.39	0-77.07
P	2.08 ± 0.44	1.34-3.12	41.32 ± 15.55	8.29-59.95
C	2.09 ± 0.54	1.25-3.45	41.25 ± 17.34	4.20-70.98

Διακρίνοντας το πίνακα και τα διαγράμματα, φαίνεται πως οι συγκεντρώσεις των εκροών για τις μονάδες G(gravel), P(plastic) και C(control) είναι αρκετά κοντά η μία με την άλλη. Με τιμές για τη μονάδα P στα  $2.08 \pm 0.44$  mg/L , για τη μονάδα C ελάχιστα πιο πάνω στα  $2.09 \pm 0.54$  mg/L και τέλος με τη μικρότερη συγκέντρωση η μονάδα G, με τιμή  $1.81 \pm 0.79$  mg/L. Αντίστοιχα στα ποσοστά απομάκρυνσης του ολικού φωσφόρου παρατηρήθηκε για τις μονάδες P και C σχεδόν το ίδιο ποσοστό απομάκρυνσης της τάξεως του  $41.32 \pm 15.55$  % και  $41.25 \pm 17.34$  % αντίστοιχα. Ακολουθεί η μονάδα G με λίγο περισσότερο ποσοστό απομάκρυνσης στα  $50.11 \pm 21.39$ %. Παρατηρείτε όμοια απομάκρυνση στις μονάδες P και C.

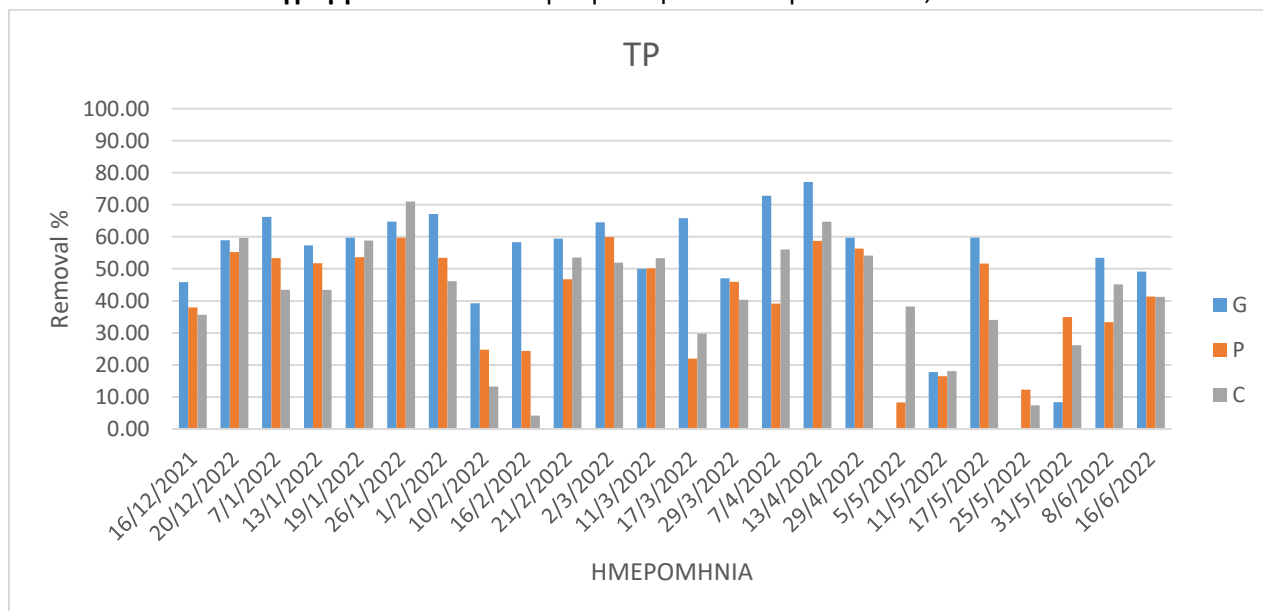
Στους κατακόρυφους ροής υδροβιότοπους η απομάκρυνση του φωσφόρου γίνεται με προσρόφηση του από το υπόστρωμα. (IWA. 2000). Ως εκ τούτου ορισμένοι ερευνητές υδροβιότοπων για να πετύχουν μεγαλύτερο βαθμό κατακράτησης φωσφόρου χρησιμοποιούν βιομηχανικά παραπροϊόντα (τσιμεντολάσπη), απορρίμματα από βιομηχανίες και φυσικά υλικά που έχουν υψηλή προσροφητικότητα (karkusuz et. al., 2004). Επίσης σύμφωνα (Stefanakis et. al., 2014) την ικανότητα προσρόφησης καθορίζουν και τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του υποστρώματος.

Αναλυτικότερα η απομάκρυνση του φωσφόρου στους τεχνητούς υδροβιότοπους, γίνεται μέσω βακτηρίων, μέσω κατακράτησης του από τα φυτά, προσρόφησης του από τα πορώδη υλικά, όπως αναφέρθηκαν και πιο πάνω. Και τέλος με την κατακρήμνιση (Akratos et. al., 2007). Η κατακρήμνιση επιτυγχάνεται με χρήση Al, Fe, Ca και Mg σύμφωνα (Drizo et.al., 2000).

**Διάγραμμα 4.2.2.9 :** Συγκέντρωση TP σε εισροή και εκροή των μονάδων G, P και C.



**Διάγραμμα 4.2.2.10 :** Απομάκρυνση % TP των μονάδων G, P και C.



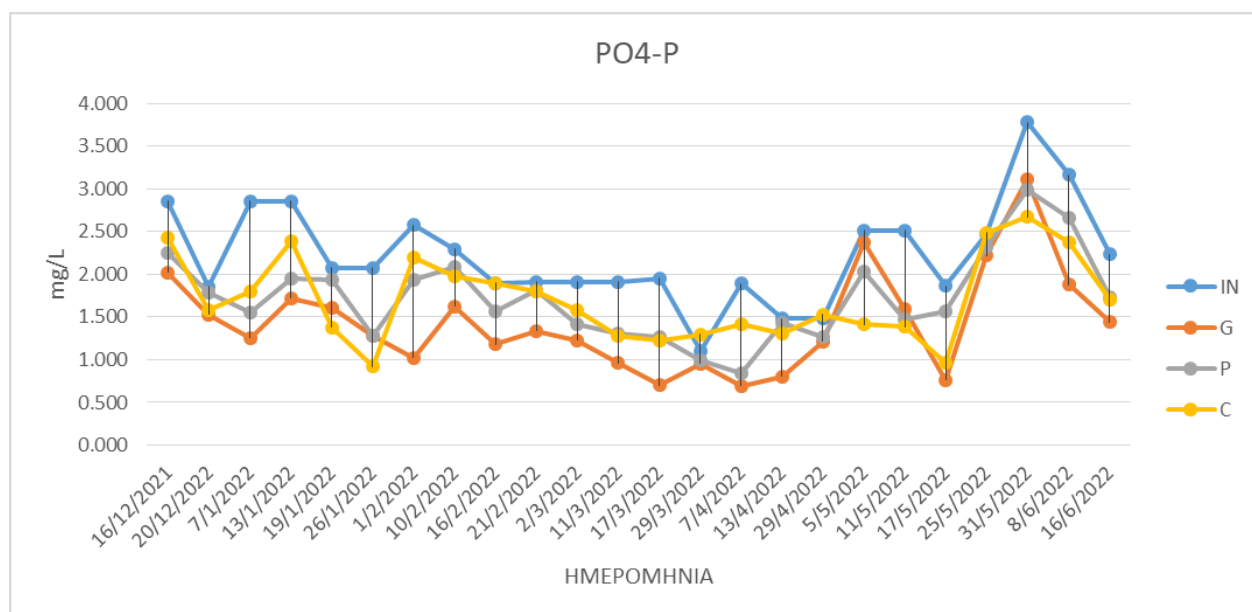
## Φωσφορικά $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$

**Πίνακας 4.2.2.6 :** Αποτελέσματα μέσης τιμής και εύρους τιμών συγκέντρωσης και απομάκρυνσης για  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ .

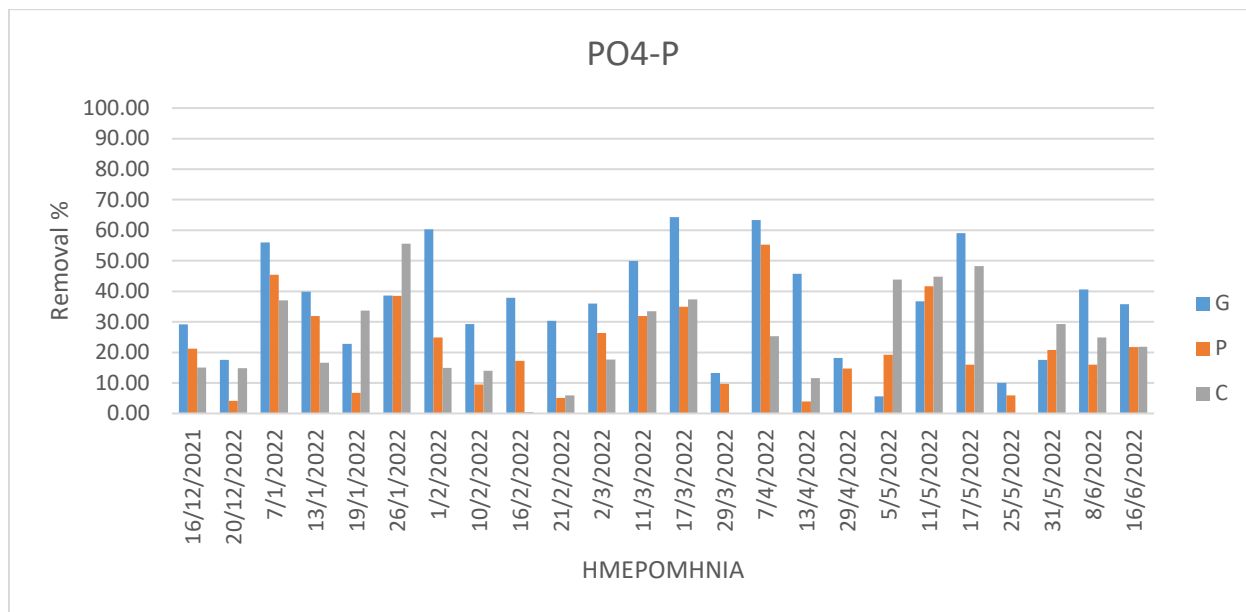
$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	Μέση τιμή Συγκέντρωσης (mg/L)	Εύρος τιμών Συγκέντρωσης (mg/L)	Μέση τιμή Απομάκρυνσης (%)	Εύρος τιμών Απομάκρυνσης (%)
<b>ΕΙΣΡΟΗ</b>	$2.23 \pm 0.58$	1.1-3.78	-	-
<b>G</b>	$1.44 \pm 0.57$	0.62-3.12	$35.73 \pm 16.86$	5.56-64.28
<b>P</b>	$1.73 \pm 0.50$	0.84-2.99	$21.78 \pm 13.83$	3.91-55.32
<b>C</b>	$1.71 \pm 0.49$	0.92-2.67	$22.75 \pm 16.01$	0-55.57

Ομοίως από το πίνακα και τα διαγράμματα διακρίνεται πως οι συγκεντρώσεις των εκροών για τις μονάδες G(gravel), P(plastic) και C(control) είναι αρκετά κοντά η μία με την άλλη. Με τιμές για τη μονάδα P στα  $1.73 \pm 0.50$  mg/L , για τη μονάδα C ελάχιστα πιο κάτω στα  $1.71 \pm 0.49$  mg/L και τέλος με τη μικρότερη συγκέντρωση η μονάδα G, με τιμή  $1.44 \pm 0.57$  mg/L. Έπειτα όσο αφορά το ποσοστό απομάκρυνσης των φωσφορικών η μονάδα G έχει το μεγαλύτερο στα  $35.73 \pm 16.86$  % και ακολουθούν οι μονάδες P και C στο  $21.78 \pm 13.83\%$  και  $22.75 \pm 16.01\%$  αντίστοιχα. Παρατηρείτε όμοια απομάκρυνση στις μονάδες P και C.

**Διάγραμμα 4.2.2.11 :** Συγκέντρωση  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  σε εισροή και εκροή των μονάδων G, P και C.



**Διάγραμμα 4.2.2.12 :** Απομάκρυνση %  $\text{PO}_4^{3-}\text{P}$  των μονάδων G, P και C.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

### 5.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία συμπεραίνω ντε τα εξής συμπεράσματα όσον αφορά τη Βελτιστοποίηση σχεδιασμού Τεχνητών Υδροβιότοπων Κατακόρυφης ροής για την επεξεργασία αστικών υγρών αποβλήτων με χρήση πιλοτικών μονάδων, τα οποία αναγράφονται πιο κάτω:

- Αναφορικά με την απομάκρυνση της οργανικής ύλης BOD<sub>5</sub> και COD βασίζεται κυρίως από τις διεργασίες των αερόβιων και αναερόβιων μικροοργανισμών και λιγότερο από τη θερμοκρασία. Ως επακόλουθω σημαντικός παράγοντας παίζει και η παροχή του οξυγόνου για την βιοαποικοδόμηση της οργανικής ύλης.
- Οι αερόβιες συνθήκες που επικρατούν ως επί το πλείστον σε μεγάλο μέρος του λειτουργικού όγκου του τεχνητού υδροβιότοπου υποεπιφανειακής κατακόρυφης ροής λειτουργούν θετικά στην απομάκρυνση του αζώτου, μέσω των διεργασιών της νιτροποίησης και της απονιτροποίησης.
- Σχετικά με την απομάκρυνση του φωσφόρου σημαντικό ρόλο παίζει το πληρωτικό υλικό, ως υπόστρωμα και η παρουσία της φυτικής βλάστησης που μέσω αυτών γίνεται προσρόφηση φωσφορικών και κατακράτησης τους από το ριζικό σύστημα των φυτών.
- Παρατηρήθηκε ότι όντως οι ψηλές θερμοκρασίες που επικρατούν την άνοιξη και το καλοκαίρι ευνοούν τις διεργασίες της νιτροποίησης και απονιτροποίησης. Καθώς παρατηρείται περισσότερη απομάκρυνση των ενώσεων του αζώτου. Η ευνοϊκή θερμοκρασία ανάπτυξης οργανισμών για να μπορεί να γίνουν οι διεργασίες είναι γύρω στους 25°C. Οι πιο ψηλές θερμοκρασίες μπορούν να λειτουργήσουν αρνητικά.
- Η χρήση του ανακυκλωμένου πλαστικού HDPE αποδείχτηκε αρκετά ικανοποιητική ως υλικό υποστρώματος. Καθώς είναι ένα υλικό με χαμηλό κόστος και αξαιρετικά πορώδες της τάξεως του 95%. Επιπλέον λόγω του αυξημένου πορώδους γίνεται περισσότερη προσκόλληση και ανάπτυξη μικροβιακού φορτίου. Το HDPE επειδή είναι και ανακυκλώσιμο υλικό η χρήση του συμβάλει στην κυκλική οικονομία.

## **5.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ**

Για βελτίωση και ενίσχυση του αερισμού των μονάδων θα μπορούσε να τοποθετηθούν κατακόρυφα διάτρητες σωλήνες για ομοιόμορφη εφαρμογή αέρα σε όλο των όγκων τους. Ενισχύοντας με αυτό τον τρόπο τις διεργασίες για αποικοδόμηση της οργανικής ύλης και της οξείδωσης τους.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### ΕΛΛΗΝΙΚΗ

- Αγγελάκης Α.Ν. και Τσομπάνογλου, Γ.(1995). Υγρά Απόβλητα, Φυσικά Συστήματα Επεξεργασίας και Ανάκτηση, Επεξεργασία και Διάθεση Εκροών. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης.
- Αγιουτάντη Ροζαλία, «**Μελέτη αποτελεσματικότητας τεχνητού υγροβιότοπου με αλόφυτα για την απομάκρυνση Cd, Ni και Zn από αστικά λύματα**», Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2018.
- Ακράτος Σ. Χρήστος, «**Βελτιστοποίηση Παραμέτρων Σχεδιασμού Τεχνητών Υγροβιότοπων Υπόγειας Ροής με χρήση Πιλοτικών Μονάδων**», Διδακτορική διατριβή για το πρόγραμμα σπουδών του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης, Θράκη, 2006.
- Αμπαδίνη Ελένη, «**Φυσικά Συστήματα Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων**», Διπλωματική εργασία, Κοζάνη (2009).
- Βαρκάς Α. 2007, «**Κατασκευή και Λειτουργία Συστημάτων Τεχνητών Υγροβιότοπων Κατακόρυφης Ροής Πιλοτικής Κλίμακας για την Επεξεργασία Αστικών Αποβλήτων**». Μεταπτυχιακή εργασία. Τμήμα Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Μυτιλήνη.
- Βοροστούκ, Ιρίνα, «**Επεξεργασία Υγρών Αποβλήτων Κτηνοτροφικής Μονάδας σε Συστήματα Τεχνητού Υγροβιότοπου**», Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείου Κρήτης, Χανιά,. 2012.
- Γκουμάς, Φίλιππος, «**Σχεδιασμός Συστήματος Τεχνητού Υγροβιότοπου Κατακόρυφης ροής για την επιτόπια Επεξεργασία Οικιακών Αποβλήτων**», Πτυχιακή εργασία, Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Αθήνα, 2017.
- Δαμάλα Πολυξένη , «**Αξιολόγηση Φυσικών Συστημάτων Επεξεργασίας Λυμάτων στις αναπτυσσόμενες Χώρες**», Μεταπτυχιακή εργασία, Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Αθήνα, 2015.
- Ζαρμακούρης Α, 2006. «**Η Αξιοποίηση Τεχνητών Υγροβιότοπων στην Επεξεργασία Υδάτινων Εκροών Αυτοκινητοδρόμων.**» Πτυχιακή εργασία , Τμήμα Θερμοκηπιακών Καλλιεργειών και Ανθοκομίας. Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης, Ηράκλειο.
- Καραμούζης Ν. Διαμαντής, «**Φυσικά Συστήματα Επεξεργασίας Λυμάτων (Τεύχος 1: Τεχνητοί Υγροβιότοποι)**», Εκδόσεις Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, 2003.
- Καραπαναγιώτη Χρυσή Κ. «**Επεξεργασία αποβλήτων. Αστικά και Βιομηχανικά απόβλητα**». Πανεπιστήμιο Πατρών, 2015.
- Κολικονιάρης, Π. 2012. «**Τεχνικοοικονομική Αξιολόγηση Εναλλακτικών Συστημάτων Τριτοβάθμιας Επεξεργασίας Αστικών Λυμάτων με σκοπό την επαναχρησιμοποίηση** » Μεταπτυχιακή Διατριβή, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.



- Λαπαβίτσας, Α., «**Διαχείριση και Επεξεργασία Αστικών Λυμάτων μικρών οικισμών, με Φυσικά συστήματα επεξεργασίας. Δυνατότητες εφαρμογές τεχνητών υγροβιότοπων στο Νομό Ημαθίας.**» Μεταπτυχιακή Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2015.
- Λοιζίδου, Μ., 2006. Μονάδα Περιβαλλοντικής Επιστήμης και Τεχνολογίας, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Μπάστα, Σταυρούλα., «**Υδροπονική Καλλιέργεια Πιπεριάς**», Πτυχιακή εργασία, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό ίδρυμα, Καλαμάτας, 2007.
- Μίμης, Στυλιανός, «**Φυσικά Συστήματα, Τεχνητοί Υγροβιότοποι Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων, Εφαρμογές και Συγκριτικά Αποτελέσματα**» Πτυχιακή εργασία , Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Σχολή Περιβάλλοντος, Μυτιλήνη (2006).
- Μουτάφη Λουίζα, «**Επεξεργασία Αστικών Λυμάτων με Φωτοκατάλυση και Τεχνητούς Υγρότοπους: Σύγκριση βιβλιογραφικών και πραγματικών δεδομένων λειτουργίας**» Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2018.
- Νταρακάς, Ε. 2014. Σημειώσεις μαθήματος Τεχνική Περιβάλλοντος: Διεργασίες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης – Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών.
- Οδηγός εκτατικών διαδικασιών καθαρισμού ακάθαρτων υδάτων. Εφαρμογή της Κοινοτικής Οδηγίας 91/271 της 21 Μαΐου 1991 σχετικά με την επεξεργασία των αστικών υγρών αποβλήτων.
- Παρανυχιανάκης Ν., Σημειώσεις Μαθήματος «**Αποκεντρωμένα Συστήματα Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων**», Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος Πολυτεχνείου Κρήτης, Χανιά 2021.
- Παρασκελίδου, Μαρίνα., «**Επεξεργασία υγρών Αποβλήτων με την μέθοδο των Τεχνητών Υγροτόπων – Εφαρμογή σε ορεινή περιοχή του Ν.Ροδόπης.**», Διπλωματική εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, 2009.
- Ρούση Κ., και Βερτούδας Ν. «**Σχεδιασμός και Κατασκευή τεχνητού Υγροβιότοπου για την Επεξεργασία Υδάτινων Απορροών Αυτοκινητοδρόμων**» Η διαχείριση του φυτικού υλικού. Πτυχιακή εργασία, Τμήμα Φυτικής Παραγωγής. Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης, Ηράκλειο, 2005.
- Σπυρίδων, Σοφιανός, «**Επεξεργασία Λυμάτων Υψηλής Αλατότητας με Υγροβιότοπους**», Μεταπτυχιακή εργασία, Πολυτεχνείου Κρήτης, Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος, Κρήτη, Χανιά (2016).
- Σωτηροπούλου , Αγαθονίκη , «**Συστήματα Τεχνητών Υγροβιότοπων για την Επεξεργασία Υγρών Αποβλήτων**» Πτυχιακή εργασία, Α.Τ.Ε.Ι. Δυτ. Μακεδονίας, Κοζάνη (2010).
- Στεφανάκης Αλέξανδρος, 2011 «**Βελτιστοποίηση Παραμέτρων Σχεδιασμού Τεχνητών Υγροβιότοπων Κατακόρυφης Ροής για την Επεξεργασία Αστικών Υγρών Αποβλήτων και Λάσπης με Χρήση Πιλοτικών Μονάδων**», Διδακτορική Διατριβή , Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη.

## ΑΓΓΛΙΚΗ

- Ayaz, S.C. and Akca, L., **“Treatment of Wastewater by Natural System”**, Environmental International, Vol. 26, pp.189-195.
- Bendoricchio, G., Cin, L.D. and Person J., **“Guidelines for Free Water Surface Wetland Design”**, EcoSys Bd., Vol. 8, (2000).
- Brix, H. 1999. How green are aquaculture, constructed wetlands and conventional wastewater treatment systems. Water Science and Technology 40 (3), 45-50.
- Crites R.W., Middlebrooks E.J., Reed S.C., (2006). Natural Wastewater treatment systems. Taylor & Francis Group.
- Dialynas, G., Kefalakis, N., Dialynas, M. and Angelakis, A., 2002, **“Performance of an Innovative FWS Constructed Wetland in Crete, Greece”**, Water Science and Technology, Vol. 46 (4-5), 2001.
- Drizo, A., Frost, c. a., Grace, J., & Smith, k.a. (2000). Phosphate and ammonium distribution in a pilot-scale constructed wetland with horizontal subsurface flow using shale as a substrate. Water Research, 34(9)
- EPA (US), **“Constructed wetlands and Aquatic plant Systems for Municipal Wastewater Treatment”**, Design Manual, Environmental Protection Agency, (USA 2002).
- Haberl, R., Perfeler, R. and Mayer, H., **“Constructed Wetlands in Europe”**, Water Science and Technology, Vol. 32, 1995
- Hammer, D.A., **“Designing constructed wetlands systems to treat agricultural nonpoint source pollution”**, Ecological Engineering Vol. 1, 1989.
- IWA, (Specialist Group on use of macrophytes in water pollution control, constructed wetlands for pollution control-Processes, performances, Desing and Operation, Scientific and Technical report No:8. 2000, International Water Association, London, UK.
- Kadlec R., and Knight R., **“Treatment Wetlands”**, Lewis Publishers, New York, 1995
- Kadlec, R.H., Wallace, S.D., 2009. Treatment Wetlands, second ed. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Kadlec, R., Knight, R. 1996. Treatment Wetlands, CRC Press.
- Kadlec, R.H., Wallace, S. (2008). Treatment wetlands. CRC press.
- Luis, A., Lorena, E. G. A., Amaya, L., & Inaki, T. 2021. Unplanted wetland-type filter for co-treatment of landfill leachate and septic tank wastewater: Analyzing gravel replacement by plastic and passive (filling – emptied) aeration effects at pilot scale. Journal of Environmental Management, 294, 112940.
- Metcalf and Eddy, 1991. **“Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse”**, MacGraw and Hill, 4 ed., N. York.
- Pearson, H.W., Mara, D.D., Smallman, D.J. & Mills, S. (1987) Physicochemical parameters influencing faecal coliform survival in waste stabilization ponds. Water Science and Technology, 19(12), 145-152.

- Prescott, K.L., Tsanis, I.K. 1997. Mass balance modeling and wetland Restoration. Ecological Engineering, Vol. 9, pp. 1-18.
- Reed S.C., and Crites R. W., **“Handbook of Land Treatment Systems for Industrial and Municipal Wastes”**, Noyes Publications, Park Ridge, 1984.
- Reed S.C., and Crites R. W., Middlebrooks, 1995., **“Natural Systems for Waste Management and Treatment”**, 2<sup>nd</sup> Edition, McGraw-Hill
- Stefanakis, A ., Akrotos, C. S., and Tsihrintzis, V.A., 2014. Vertical flow Constructed wetlands: eco-engineering systems for Wastewater and sludge treatment. Newnes.
- Stefanakis, A.I., 2020. Constructed Wetlands for Sustainable Wastewater Treatment in Hot and Arib Climates Opportunities, Challenges and Case Studies in the Middle East. Water 12 (6), 1665.
- Stefanakis, A.I. and Tsihrintzis, V.A., 2012. Effects of loading, resting period, temperature, porous media, vegetation and aeration on performance of pilot-scale Vertical Flow Constructed Wetlands. Chemical Engineering Journal 181-182, 416-430.
- Tatoulis, T., Akrotos, C.S., Tekerlekopoulou, A. G., Vayenas, D. V., and Stefanakis, A. i. 2017. A novel horizontalsubsurface flow constructed wetlands: Reducing area requirements and clogging risk. Chemosphere 186, 257-268.
- Tsihrintzis, V.A., Vasarhelyi, G.M., Lipa, J. 1995b. Multiobjective approaches in freshwater wetland restoration and design. Water International 20 (2), 98-105
- Tsihrintzis, V.A., Akrotos, C.S., Gikas, G.D., Karamouzis, D., Angelakis, A.N. 2007. Performance and cost comparison of a FWS and a VFS constructed wetlands system. Environmental Technology 28, 621-628.
- Tsihrintzis, V.A., Vasarhelyi, G.M., Lipa, J. 1995a. Hydrodynamic and constituent transport modeling of coastal wetlands. Journal of Marine Environmental Engineering 1 (4), 295-314.
- Vymazal, J. 2009. The use constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater. Ecological Enginnering 35, 1-17.
- Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P.F., Green, M.B., Haberl, R. 1998. Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Europe. Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands.
- Vymazal, J. 2005. Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. Ecological Engineering. Vol. 25, pp. 478-490.
- Water Environment Federation (2001), **“Natural Systems for Wastewater Treatment “**, Manual of Practice No. FD-16, Alexandria-USA.

## ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ

- [http://www.google.com/search?hl=phragmites+australis&sxsr=ALiCzsYfpFVd\\_jthPIT3LbwqSGl8V\\_TtFw:1666602020065&source=inms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwiG8lyrwpJ6AhUPxYUKHUBGCbEQ\\_AUoAXoECAEQAw&biw=1366&bih=657&dpr=1#imgsrc=FT4-dztuopyzuM](http://www.google.com/search?hl=phragmites+australis&sxsr=ALiCzsYfpFVd_jthPIT3LbwqSGl8V_TtFw:1666602020065&source=inms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwiG8lyrwpJ6AhUPxYUKHUBGCbEQ_AUoAXoECAEQAw&biw=1366&bih=657&dpr=1#imgsrc=FT4-dztuopyzuM)
- <http://meteosearch.meteo.gr/>
- <https://www.envinow.gr/post/%CE%B7-%CE%B2%CE%B9%CF%8E%CF%83%CE%B9%CE%BC%CE%B7-%CE%B5%CE%BD%CE%B1%CE%BB%CE%BB%CE%B1%CE%BA%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AE-%CF%84%CF%89%CE%BD-%CF%84%CE%B5%CF%87%CE%BD%CE%B7%CF%84%CF%8E%CE%BD-%CF%85%CE%B3%CF%81%CE%BF%CE%B2%CE%B9%CF%8C%CF%84%CE%BF%CF%80%CF%89%CE%BD-%CE%B3%CE%B9%CE%B1-%CF%84%CE%B7%CE%BD-%CE%B5%CF%80%CE%B5%CE%BE%CE%B5%CF%81%CE%B3%CE%B1%CF%83%CE%AF%CE%B1-%CE%B1%CF%80%CE%BF%CE%B2%CE%BB%CE%AE%CF%84%CF%89%CE%BD>
- <https://www.ecosafe.gr/wp-content/uploads/pdfs/ecosafegr.pdf>
- <https://sites.google.com/site/civilsorras/physika-systemata/systemata-techneton-ygrotopon>
- <http://ecoenvir.vet.auth.gr/wp-content/uploads/2015/11/%CE%9ACE%95%CE%A6-3-%CE%92%CE%99%CE%9F%CE%93%CE%95%CE%A9%CE%A7%CE%97%CE%9C%CE%99%CE%9ACE%9F%CE%99-%CE%9ACE%A5%CE%9ACE%9B%CE%9F%CE%99.pdf>
- <https://www.ktirio.gr/>
- <https://www.followgreen.gr/arta/blog/single/%CE%9F%CE%B9-10-%CF%83%CE%B7%CE%BC%CE%B1%CE%BD%CF%84%CE%B9%CE%BA%CF%8C%CF%84%CE%B5%CF%81%CE%BF%CE%B9-%CF%85%CE%B3%CF%81%CF%8C%CF%84%CE%BF%CF%80%CE%BF%CE%B9-%CF%84%CE%B7%CF%82-%CE%95%CE%BB%CE%BB%CE%AC%CE%B4%CE%B1%CF%82-%>
- <https://hellanicus.lib.aegean.gr/bitstream/handle/11610/13297/file0.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- <https://deyach.gr/viologikos/perigrifi-egkatastasis/>
- <https://www.eclass.tuc.gr/modules/document/index.php?course=MHPER150&openDir=/6034c6afQdWB>
- <http://www.moa.gov.cy/moa/wdd/Wdd.nsf/All/4948BD41256C7D38C2258235003BDC19?OpenDocument>
- <https://ypen.gov.gr/diacheirisi-apovliton/astika-lymata/nomothesia/>
- <http://www.globalwettech.com/about-constructed-wetlands.html>
- <https://www.shimadzu.eu/toc-l-options-accessories>

