



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Εξέταση τριτογενούς επεξεργασίας υγρών  
αποβλήτων με χρήση υδροχαρών φυτών σε  
αντιδραστήρα συνεχούς λειτουργίας.**

**Δρόσης Κωνσταντίνος**

**Αθήνα, Φεβρουάριος 2024**

**Επιβλέπων :** Ανέστης Βλυσίδης

**Επίκουρος Καθηγητής Σχολής Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ**

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας σηματοδοτεί την ολοκλήρωση των προπτυχιακών σπουδών μου στη Σχολή των Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ως εκ τούτου θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Ανέστη Βλυσίδα για την ανάθεση ενός θέματος με ιδιαίτερο επιστημονικό ενδιαφέρον.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την υποψήφια διδάκτορα κα. Ιωάννα Γουδέλη, η οποία μου προσέφερε την βαθιά γνώση της επί του θέματος, αφιερώνοντας τον πολύτιμο χρόνο της εντός και εκτός του εργαστηρίου.

Τέλος, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους φίλους μου αλλά και ιδιαίτερα στην οικογένεια μου , καθώς όλα αυτά τα χρόνια σπουδών ήταν δίπλα μου δίνοντας πάντα την πολύτιμη βοήθειά τους.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<b>1</b>	<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	<b>4</b>
1.1	ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	4
1.2	ABSTRACT .....	6
1.3	ΣΚΟΠΟΣ .....	7
<b>2</b>	<b>ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ</b> .....	<b>8</b>
2.1	ΛΥΜΑΤΑ .....	8
	2.1.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΗΓΕΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ .....	8
	2.1.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΛΥΜΑΤΩΝ .....	12
2.2	ΦΥΤΟΕΞΥΓΙΑΝΣΗ .....	18
	2.2.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΕΝΝΟΙΑΣ ΦΥΤΟΕΞΥΓΙΑΝΣΗΣ: .....	18
	2.2.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΦΥΤΟΕΞΥΓΙΑΝΣΗΣ .....	23
2.3	ΦΥΤΑ ΛΕΜΝΑ ΜΙΝΟΡ .....	27
	2.3.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ .....	27
	2.3.2 ΡΥΘΜΟΣ ΑΝΑΠΑΡΑΓΩΓΗΣ .....	30
	2.3.3 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΔΙΑΒΙΩΣΗΣ.....	31
	2.3.4 ΧΡΗΣΕΙΣ .....	37
	2.3.5 ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΙ ΠΟΥ ΤΑ ΠΡΟΣΒΑΛΛΟΥΝ .....	39
<b>3</b>	<b>ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ</b> .....	<b>44</b>
3.1	ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ .....	44
	3.1.1 ΔΙΑΛΥΜΑ ΗΟAGLAND ΚΑΙ ΑΠΟΒΛΗΤΟ .....	44
	3.1.2 ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ .....	45
	3.1.3 ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ .....	46
	3.1.4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ .....	52

<b>4</b>	<b>ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ .....</b>	<b>55</b>
4.1	ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΜΕ ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΘΡΕΠΤΙΚΟΥ ΥΓΡΟΥ HOAGLAND .....	55
4.1.1	ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΘΡΕΠΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΑΤΙΚΩΝ ΣΤΟΝ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ .....	55
4.1.2	ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΤΩΝ ΦΥΤΩΝ ΣΤΟΝ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ .....	57
4.1.3	ΑΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΦΑΣΗΣ 1 .....	58
4.2	ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΜΕ ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΑΠΟΒΛΗΤΟΥ ΚΑΙ ΥΓΡΟΥ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ ΠΑΡΟΧΗΣ Q=50 ML/D .....	59
4.2.1	ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΘΡΕΠΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΑΤΙΚΩΝ .....	59
4.2.2	ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΤΩΝ ΦΥΤΩΝ ΣΤΟΝ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ .....	66
4.2.3	ΑΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΦΑΣΗΣ 2 .....	66
4.3	ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΜΕ ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΑΠΟΒΛΗΤΟΥ ΚΑΙ ΠΑΡΟΧΗ Q=200-250 ML/D .....	67
4.3.1	ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΘΡΕΠΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΑΤΙΚΩΝ ΣΤΟ ΑΠΟΒΛΗΤΟ ΚΑΙ ΤΟΝ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ .....	67
4.3.2	ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΤΩΝ ΦΥΤΩΝ ΣΤΟΝ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ .....	75
4.3.3	ΑΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΦΑΣΗΣ 3 .....	76
4.4	ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΜΕ ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΑΠΟΒΛΗΤΟΥ ΚΑΙ ΠΑΡΟΧΗ Q=100 ML/D ΜΕ ΑΝΑΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ .....	77
4.4.1	ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΘΡΕΠΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΑΤΙΚΩΝ ΣΤΟ ΑΠΟΒΛΗΤΟ ΚΑΙ ΣΤΟΝ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ .....	77
4.4.2	ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΤΩΝ ΦΥΤΩΝ ΣΤΟΝ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ .....	80
4.4.3	ΑΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΦΑΣΗΣ 4 .....	81
4.5	ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ .....	82
<b>5</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>90</b>

## Κατάλογος διαγραμμάτων

Διάγραμμα 3.4: Διάγραμμα ροής .....	53
Διάγραμμα 4.1: Συγκεντρώσεις νιτρικών – φωσφορικών ιόντων (Φάση 1, αντιδραστήρας) .....	56
Διάγραμμα 4.2: Ποσοστιαία μεταβολή νιτρικών – φωσφορικών ιόντων (Φάση 1, αντιδραστήρας) .	57
Διάγραμμα 4.3: Συγκεντρώσεις αμμωνιακών – νιτρικών ιόντων (Φάση 2, αντιδραστήρας) .....	60
Διάγραμμα 4.4: Συγκεντρώσεις φωσφορικών ιόντων (Φάση 2, απόβλητο – αντιδραστήρας) .....	61
Διάγραμμα 4.5: Τιμές pH (Φάση 2, απόβλητο – αντιδραστήρα) .....	62
Διάγραμμα 4.6: Συγκεντρώσεις ολικού αζώτου (Φάση 2, απόβλητο – αντιδραστήρας) .....	63
Διάγραμμα 4.7: Συγκεντρώσεις ολικού άνθρακα (Φάση 2, απόβλητο – αντιδραστήρας) .....	64
Διάγραμμα 4.8: Αγωγιμότητα (Φάση 2, απόβλητο – αντιδραστήρα) .....	65
Διάγραμμα 4.9: Συγκεντρώσεις αμμωνιακών – νιτρικών ιόντων (Φάση 3, αντιδραστήρας) .....	69
Διάγραμμα 4.10: Συγκεντρώσεις φωσφορικών ιόντων (Φάση 3, απόβλητο – αντιδραστήρας) .....	70
Διάγραμμα 4.11: Τιμές pH (Φάση 3, απόβλητο – αντιδραστήρας) .....	71
Διάγραμμα 4.12: Συγκεντρώσεις ολικού άνθρακα (Φάση 3, απόβλητο – αντιδραστήρας) .....	72
Διάγραμμα 4.13: Συγκεντρώσεις ολικού άνθρακα (Φάση 3, απόβλητο – αντιδραστήρας) .....	73
Διάγραμμα 4.14: Τιμές αγωγιμότητας (Φάση 3, απόβλητο – αντιδραστήρας) .....	74
Διάγραμμα 4.15: Συγκεντρώσεις νιτρικών ιόντων (Φάση 4, Effluent) .....	77
Διάγραμμα 4.16: Συγκεντρώσεις φωσφορικών ιόντων (Φάση 4, Effluent) .....	78
Διάγραμμα 4.17: Τιμές pH (Φάση 4, Effluent) .....	79
Διάγραμμα 4.18: Συγκεντρώσεις ολικού αζώτου (Φάσεις 1 – 4, αντιδραστήρας) .....	82
Διάγραμμα 4.19: Συγκεντρώσεις φωσφορικών ιόντων (Φάσεις 1 – 4, αντιδραστήρας) .....	83
Διάγραμμα 4.20: Τιμές pH (Φάσεις 1- 4, αντιδραστήρας) .....	84

## Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 2.1: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα φυτοεξυγίανσης .....	26
---	----

Πίνακας 2.2: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της φυτοεξυγίανσης **Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**

Πίνακας 2.3: Ιδανικό εύρος τιμής pH ανά γένος Lemnaceae .....	32
Πίνακας 2.4: Ιδανικό εύρος τιμής Αγωγιμότητας ανά γένος Lemnaceae .....	33
Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά αποβλήτου μετά την έξοδο από αναερόβιο αντιδραστήρα .....	45
Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά του αντιδραστήρα συνεχούς λειτουργίας .....	45
Πίνακας 4.1: Συγκεντρώσεις αμμωνιακών-νιτρικών ιόντων (Φάση 2, αντιδραστήρας) .....	60
Πίνακας 4.2: Συγκεντρώσεις φωσφορικών ιόντων (Φάση 2, απόβλητο - αντιδραστήρας).....	61
Πίνακας 4.3: Τιμές pH (Φάση 2, απόβλητο – αντιδραστήρας) .....	62
Πίνακας 4.4: Συγκεντρώσεις ολικού αζώτου (Φάση 2, απόβλητο – αντιδραστήρας) .....	63
Πίνακας 4.5: Συγκεντρώσεις ολικού άνθρακα (Φάση 2, απόβλητο – αντιδραστήρας) .....	64
Πίνακας 4.6: Τιμές αγωγιμότητας (Φάση 2, απόβλητο – αντιδραστήρας) .....	65
Πίνακας 4.7: Συγκεντρώσεις αμμωνιακών - νιτρικών ιόντων (Φάση 3, απόβλητο - αντιδραστήρα) .....	68
Πίνακας 4.8: Συγκεντρώσεις φωσφορικών ιόντων (Φάση 3, απόβλητο – αντιδραστήρας) .....	69
Πίνακας 4.9: Τιμές pH (Φάση 3, απόβλητο – αντιδραστήρας) .....	71
Πίνακας 4.10: Συγκεντρώσεις ολικού αζώτου (Φάση 3, απόβλητο – αντιδραστήρα) .....	72
Πίνακας 4.11: Τιμές αγωγιμότητας (Φάση 3, απόβλητο – αντιδραστήρας) .....	74
Πίνακας 4.12: Συγκεντρώσεις νιτρικών ιόντων (Φάση 4, Effluent) .....	77
Πίνακας 4.13: Συγκεντρώσεις φωσφορικών ιόντων (Φάση 4, Effluent) .....	78
Πίνακας 4.14: Τιμές pH (Φάση 4, Effluent) .....	79

## Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1: Στάδια επεξεργασίας λυμάτων .....	13
Εικόνα 2: Μηχανισμοί που εμπλέκονται στην τεχνική της φυτοαπορρύπανσης .....	21
Εικόνα 3: Μηχανισμοί που εμπλέκονται στην τεχνική της φυτοσταθεροποίησης .....	21

Εικόνα 4: Εφαρμογές φυτοεξυγίανσης .....	22
Εικόνα 5: Σχηματική απεικόνιση της ριζοδιήθησης .....	23
Εικόνα 6: Φυτά <i>lemna minor</i> σε λίμνη .....	27
Εικόνα 7: Γένη .....	27
Εικόνα 8: Είδος <i>Lemnaphila scotlandae</i> .....	40
Εικόνα 9: Είδος Duckweed weevil .....	41
Εικόνα 10: Είδος waterlily aphid .....	41
Εικόνα 11: Μύκητες .....	42
Εικόνα 12: Αντιδραστήρας συνεχούς λειτουργίας .....	46
Εικόνα 13: Βιομάζα αντιδραστήρα (Φάση 1, ημέρα 1 και ημέρα 42) .....	58
Εικόνα 14: Βιομάζα αντιδραστήρα (Φάση 2, ημέρα 43 και ημέρα 69) .....	66
Εικόνα 15: Βιομάζα αντιδραστήρα (Φάση 3, ημέρα 72 και ημέρα 106) .....	75
Εικόνα 16: Βιομάζα αντιδραστήρα (Φάση 4, ημέρα 176 και ημέρα 204) .....	80

## 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Περίληψη

Τη σημερινή εποχή, η ανάγκη για τριτογενή επεξεργασία των υγρών αποβλήτων κρίνεται απαραίτητη, αφενός εξ' αιτίας της αύξησης της ποσότητας των λυμάτων, αφετέρου λόγω της επιτακτικής πλέον ανάγκης για επαναχρησιμοποίηση του ανακτημένου νερού, για την κάλυψη αρδευτικών αναγκών, εμπλουτισμό του υπόγειου υδροφορέα και αστική – περιαστική χρήση. Οι περισσότερες μέθοδοι επεξεργασίας, όμως είναι δαπανηρές, λόγω της αύξησης του λειτουργικού κόστους, ήτοι του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας και των χημικών. Κατά συνέπεια, θεωρείται σημαντική η εκτέλεση έρευνας, με σκοπό την εύρεση εναλλακτικών, φυσικών μεθόδων επεξεργασίας των λυμάτων. Η φυτοεξυγίανση αποτελεί μία μέθοδο (σύστημα ή διαδικασία), κατά την οποία χρησιμοποιούνται φυτά για την επεξεργασία των λυμάτων.

Συγκεκριμένα, στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η τριτογενής επεξεργασία υγρών αποβλήτων με τη χρήση υδροχαρών φυτών *Lemna Minor* σε αντιδραστήρα συνεχούς λειτουργίας όγκου τεσσάρων λίτρων. Αντικείμενα της έρευνας ήταν η προοδευτική προσαρμογή των φυτών στο υγρό του αντιδραστήρα, η αφομοίωση των θρεπτικών συστατικών από αυτά και ταυτόχρονα η βελτιστοποίηση του ρυθμού ανάπτυξης της ωφέλιμης βιομάζας των φυτών, με την εισροή λυμάτων, έχοντας ως αποτέλεσμα την επεξεργασία αυτών.

Στο Εργαστήριο της Σχολής Χημικών Μηχανικών χρησιμοποιήθηκαν αυτά τα υδροχαρή φυτά, καθώς θεωρούνται κατάλληλα για την τριτογενή επεξεργασία υγρών αποβλήτων, λόγω της ικανότητάς τους για απορρόφηση αμμωνιακών και φωσφορικών ιόντων από το υδάτινο περιβάλλον. Το εργαστηριακό πείραμα χωρίστηκε σε τέσσερις Φάσεις. Αναφέρεται ότι η αλλαγή του φυτού σε κάθε νέο περιβάλλον χρειάζεται περίοδο προσαρμογής περίπου μιας εβδομάδας.

Στην πρώτη φάση του πειράματος (Φάση 1) στο υγρό του αντιδραστήρα προστέθηκε το θρεπτικό υγρό Hoagland, όπου είναι γνωστό για την ικανότητά του να δημιουργεί το ιδανικό περιβάλλον για την ανάπτυξη του φυτού. Τα αποτελέσματα της Φάσης 1 έδειξαν ότι η απορρόφηση των νιτρικών ιόντων από τα φυτά *lemna minor* φτάνει έως και 42%, ενώ για τα φωσφορικά ιόντα έως και 89%. Τέλος, υπήρχε ανάπτυξη της βιομάζας περίπου κατά 6%.

Στην δεύτερη φάση (Φάση 2), προστέθηκε στον υπάρχοντα αντιδραστήρα το απόβλητο με παροχή ίση με 50 ml/d. Το απόβλητο προέρχεται από την έξοδο ενός αναερόβιου αντιδραστήρα, που είχε ως πρώτη ύλη το άμυλο. Ο απολογισμός της Φάσης 2 ήταν ενθαρρυντικός, καθώς μετά την πρώτη εβδομάδα προσαρμογής των φυτών, η απορρόφηση των φυτών έφτασε έως και 48% όσον αφορά στα νιτρικά ιόντα, ενώ για τα φωσφορικά ιόντα υπήρξε αύξηση, καθώς μέσα στον αντιδραστήρα δημιουργήθηκαν μικροθήκη όπου απορροφούν μεγάλες ποσότητες φωσφόρου. Παράλληλα, υπήρχε αύξηση της ωφέλιμης βιομάζας κατά 11%.

Εξ' αιτίας του γεγονότος ότι τα προηγούμενα δύο υποπειράματα έδειξαν πολύ καλά αποτελέσματα, αποφασίστηκε η αύξηση της παροχής του αποβλήτου σε 200 - 250 ml/d για την Φάση 3 με ταυτόχρονη ανακυκλοφορία και εκροή με υπερχειλίση. Όμως, ο τετραπλασιασμός της εισερχόμενης παροχής του αποβλήτου επέφερε ζημιά στο σύστημα, καθώς αυτό δεν ήταν έτοιμο να επεξεργαστεί τόσο μεγάλο φορτίο. Πιθανή αιτία για την εξέλιξη του πειράματος είναι επίσης και η αύξηση της θερμοκρασίας, λόγω καλοκαιριού. Το



τρίτο πείραμα θεωρείται ως η περίοδος σφάλματος, αφού υπήρξε θάνατος 500 φυτών περίπου στον αντιδραστήρα.

Τέλος, η τέταρτη φάση (Φάση 4), λαμβάνοντας υπόψη τα συμπεράσματα των προηγούμενων φάσεων, εξετάστηκε με παροχή ίση με 100 ml/d και ανακυκλοφορία με υπερχειλίζουσα εκροή. Ο απολογισμός κρίθηκε άκρως επιτυχημένος για τη Φάση 4, καθώς η επιφάνεια του αντιδραστήρα γέμισε με υγιή φυτά και ταυτόχρονα, η απορρόφηση των θρεπτικών συστατικών από αυτά έφτασε πολύ υψηλές τιμές, γύρω στο 75% που βάσει βιβλιογραφίας πλησιάζει την ιδανική τιμή.

Το τελικό συμπέρασμα από το συνολικό πείραμα είναι ότι για τον αντιδραστήρα συνεχούς λειτουργίας όγκου τεσσάρων λίτρων, η καλύτερη λύση είναι η σταδιακή προσαρμογή των φυτών σε κάθε νέο περιβάλλον ξεκινώντας από το θρεπτικό υγρό, καταλήγοντας σε προσθήκη αποβλήτου με παροχή ίση με 100 ml/d και ταυτόχρονη ανακυκλοφορία του συστήματος με υπερχειλίζουσα εκροή. Με αυτές τις συνθήκες επιτυγχάνεται το βέλτιστο περιβάλλον ανάπτυξης των υδροχαρών φυτών, έχοντας ως αποτέλεσμα την επεξεργασία των λυμάτων στον αντιδραστήρα.

## 1.2 Abstract

In today's era, the need for tertiary treatment of liquid waste is considered necessary, on the one hand due to the increase in the amount of wastewater, on the other hand due to the imperative need for reuse of reclaimed water, to cover irrigation needs, enrichment of the underground aquifer and urban – peri-urban use. Most treatment methods, however, are expensive, due to the increase in operating costs, i.e. the cost of electricity and chemicals. Consequently, it is considered important to carry out research in order to find alternative, natural methods of wastewater treatment. Phytoremediation is a method (system or process) in which plants are used to treat wastewater.

Specifically, in this thesis, the tertiary treatment of liquid waste was conducted using the Lemna Minor water plant in a four-liter continuous reactor. The objects of the research were the progressive adaptation of the plants to the liquid of the reactor, the assimilation of the nutrients from them and at the same time the optimization of the growth rate of the useful biomass of the plants, with the inflow of wastewater, resulting in its treatment.

In the Laboratory of the School of Chemical Engineering, these aquatic plants were used, as they are considered suitable for the tertiary treatment of liquid waste, due to their ability

to absorb ammonium and phosphate ions from the water environment. The laboratory experiment was divided into four Phases. It is reported that changing the plant to any new environment needs an adaptation period of about a week.

In the first phase of the experiment (Phase 1), Hoagland nutrient fluid was added to the reactor fluid, where it is known for its ability to create the ideal environment for plant growth. The results of Phase 1 showed that the absorption of nitrate ions by lemna minor plants reaches up to 42%, while for phosphate ions up to 89%. Finally, there was a biomass growth of about 6%.

In the second phase (Phase 2), the effluent was added to the existing reactor at a flow rate equal to 50 ml/d. The waste comes from the output of an anaerobic reactor, which had starch as a raw material. The report of Phase 2 was encouraging, as after the first week of adaptation of the plants, the absorption of the plants reached up to 48% in terms of nitrate ions, while for phosphate ions there was an increase, as microalgae were created inside the reactor where they absorb large amounts phosphorus. At the same time, there was an increase in useful biomass by 11%.

Due to the fact that the previous two sub-experiments showed very good results, it was decided to increase the effluent flow to 200 - 250 ml/d for Phase 3 with simultaneous recirculation and overflow discharge. But quadrupling the incoming supply of waste took a toll on the system, as it was not ready to process such a large load. A possible cause for the development of the experiment is also the increase in temperature due to summer. The third experiment is considered as the error period, since there was death of about 500 plants in the reactor.

Finally, the fourth phase (Phase 4), taking into account the conclusions of the previous phases, was examined with a flow rate equal to 100 ml/d and recirculation with overflow outflow. The report was considered highly successful for Phase 4, as the reactor surface was filled with healthy plants and at the same time, nutrient absorption by them reached very high values, around 75%, which according to literature is close to the ideal value.

The final conclusion from the overall experiment is that for the continuous operation reactor of four liters volume, the best solution is to gradually adapt the plants to each new environment starting from the nutrient liquid, ending with the addition of waste at a flow rate equal to 100 ml/d and simultaneous recirculation of the system with overflow outflow. With

these conditions, the optimal environment for the growth of aquatic plants is achieved, resulting in the treatment of wastewater in the reactor.

### 1.3 Σκοπός

Παρακάτω παρουσιάζονται οι σκοποί της διπλωματικής εργασίας:

- Επεξεργασία απόβλητου από εκροή αναερόβιου χωνευτήρα με τη χρήση των υδροχαρών φυτών *Lemna minor*
- Διερεύνηση ικανότητας αφομοίωσης θρεπτικών συστατικών στο απόβλητο και στο υγρό του αντιδραστήρα με την παρουσία των *Lemna minor*
- Σταδιακή προσαρμογή των φυτών από την αρχή έως το τέλος του πειράματος στο περιβάλλον του αντιδραστήρα
- Ανάπτυξη ωφέλιμης βιομάζας για μελλοντική χρήση σε άλλες εφαρμογές και σε μεγαλύτερο αντιδραστήρα

## 2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### 2.1 Λύματα

#### 2.1.1 Ορισμός και πηγές ρύπανσης

Τα υγρά απόβλητα που προέρχονται από κατοικίες, βιομηχανίες, σχολεία, αγροκτηνοτροφικές δραστηριότητες ονομάζονται λύματα. Όταν τα λύματα καταλήγουν χωρίς να έχουν δεχθεί κάποιου είδους επεξεργασία στους υδάτινους αποδέκτες (ποτάμια, λίμνες, θάλασσες), μεταφέρουν σ' αυτούς ουσίες που τους προκαλούν ρύπανση.

Οι υδάτινοι αποδέκτες συνήθως είναι υδάτινα οικοσυστήματα, που σημαίνει ότι περιλαμβάνουν φυτά, ζώα, μικροοργανισμούς, που βέβαια διαθέτουν τρόπους αυτοκαθαρισμού τους, όμως στην εποχή μας οι ποσότητες των λυμάτων είναι τόσο μεγάλες, που οι μηχανισμοί αυτοκαθαρισμού, σε πολλές περιπτώσεις, δεν επαρκούν για την αντιμετώπιση της ρύπανσης.

Η ρύπανση του νερού διαφοροποιείται στην άμεση και στην έμμεση ρύπανση. Άμεση ρύπανση ονομάζεται όταν οι συνέπειες της είναι άμεσα αντιληπτές. Για παράδειγμα, άμεση ρύπανση θεωρείται η περίπτωση ενός ποταμού ή μιας λίμνης, όπου καταλήγουν τοξικά απόβλητα και προκαλείται άμεσος κι αιφνίδιος θάνατος ψαριών, ενώ αντίθετα στην έμμεση

ρύπανση τα αποτελέσματα δεν τα αντιλαμβανόμαστε εύκολα. Για παράδειγμα, όταν καταλήγουν σε έναν υδάτινο αποδέκτη ρύποι σε ποσότητες που δεν μπορούν τα υδατικά αυτά οικοσυστήματα να καθαρίσουν, θεωρείται σχεδόν βέβαιο ότι θα προκληθούν σταδιακά αλλαγές στα είδη που ζουν στο σύστημα αυτό. [16]

Η ρύπανση του νερού έχει ως αποτελέσματα:

- Μείωση της διαύγειάς του.
- Μείωση του διαλυμένου οξυγόνου.
- Μείωση της ποικιλότητας της χλωρίδας και της πανίδας. Αρκετοί οργανισμοί δεν καταφέρνουν να επιβιώνουν σε συνθήκες ρύπανσης, με αποτέλεσμα οι πληθυσμοί τους είτε μεταναστεύουν ή σταδιακά μειώνονται μέχρι που στο τέλος εξαφανίζονται.
- Αισθητική υποβάθμιση και ολική καταστροφή των υδάτινων οικοσυστημάτων (παραλίες, λίμνες, ποτάμια).

Οι ρύποι που περιέχονται στο νερό περιλαμβάνουν ζωντανούς μικροοργανισμούς, όπως ιούς και βακτήρια, ανόργανες και οργανικές ενώσεις, βαρέα μέταλλα και σε μερικές περιπτώσεις, τοξικές ουσίες. [14]

### **Πηγές ρύπανσης:**

Οι πιο σπουδαίες πηγές ρύπανσης, που επιβαρύνουν αρχικά τα επιφανειακά νερά και έπειτα τους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες δύνανται να χωριστούν στις παρακάτω κατηγορίες:

- Αστικά λύματα: Ακάθαρτα νερά που προκύπτουν από σπίτια, αλλά και άλλους χώρους συνάθροισης, όπως π.χ. σχολεία, χώροι εργασίας, νοσοκομεία, επιχειρήσεις κλπ.
- Βιομηχανικά λύματα: Αποτελούν υποκατηγορία των αστικών λυμάτων που προέρχονται από βιομηχανικές δραστηριότητες και ανάλογα με την παραγωγή τους διαφοροποιούνται σε επικίνδυνα και τοξικά.
- Γεωργικά υγρά απόβλητα: Όμβρια ύδατα που προκύπτουν από καλλιεργούμενες εκτάσεις και φέρουν λιπάσματα και φυτοφάρμακα.
- Κτηνοτροφικά υγρά απόβλητα: Υγρά που προκύπτουν από μονάδες εκτροφής ζώων.

- Όξινη βροχή: Τα νερά της βροχής που καταλήγουν στο έδαφος, με όξινο χαρακτήρα, καθώς παρασέρνουν μαζί αέρια με ιδιαίτερη οξύτητα, π.χ. το διοξείδιο του άνθρακα.

Στη χώρα μας, ανεπεξέργαστα αστικά λύματα μεταφέρονται μέσω των δικτύων αποχέτευσης σε επιφανειακούς υδάτινους αποδέκτες, (ρέματα, ποτάμια, λίμνες και θάλασσα) ή υπόγειους. Τα επιφανειακά νερά, ήτοι οι ποταμοί, οι λίμνες, οι λιμνοθάλασσες, οι κλειστοί θαλάσσιοι κόλποι και οι ανοιχτές θάλασσες είναι πιο πολύ ή πιο λίγο ευαίσθητα στη ρύπανση, ανάλογα με τη ικανότητα ανανέωσης και αυτοκαθαρισμού τους καθώς και το είδος των ρύπων που καταλήγει σε αυτά. Σημαντικός παράγοντας είναι η ποσότητα του οξυγόνου που είναι διαλυμένο στο νερό, διότι βοηθά στον αυτοκαθαρισμό τους. [35]

Το σύνολο της επιστημονικής γνώσης έχει επεκταθεί σημαντικά, καθώς η έρευνα των υγρών αποβλήτων είναι ποικιλοτρόπως εκτεταμένη με αποτέλεσμα οι μέθοδοι για την ανάλυση συγκεκριμένων συστατικών και των πιθανών συνέπειών τους στην υγεία και το περιβάλλον να έχουν γίνει πιο σαφείς. Πολλές από τις νέες μεθόδους επεξεργασίας που έχουν αναπτυχθεί εξετάζουν θέματα σχετικά με την υγεία και το περιβάλλον. Ωστόσο, η πρόοδος στην αποτελεσματικότητα της τεχνολογίας σχετικά με την επεξεργασία των αποβλήτων είναι μεν σημαντική αλλά ταυτόχρονα ανιχνεύονται και ρύποι, σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις, επιπλέον αυτών που είναι γνωστοί και δύνανται να επεξεργαστούν με τις υπάρχουσες τεχνολογίες.. Συνεπώς, η σωστή αξιολόγηση των συνεπειών στην υγεία και το περιβάλλον, καθώς και οι κοινωνικές αντιλήψεις για τις επιδράσεις αυτές δίνουν ιδιαίτερη σημασία στη διαχείριση υγρών αποβλήτων. Είναι απαραίτητο να καθιερωθεί ένας διάλογος με τους πολίτες, για να εξασφαλιστεί ότι θα προκύπτει λύση για τα θέματα υγείας και για το περιβάλλον. [29]

Θέματα ποιότητας των υδάτων δημιουργούνται, όταν μεγάλες ποσότητες επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων, διατίθενται σε υδάτινους αποδέκτες που χρησιμοποιούνται τελικά ως πηγές νερού. Στο εξωτερικό π.χ. στον ποταμό Τάμεση στην Μεγάλη Βρετανία επτά συνεχόμενες γεωγραφικά πόλεις αντλούν και επεξεργάζονται νερό για ύδρευση ενώ συγχρόνως διαθέτουν τα επεξεργασμένα υγρά απόβλητα στο ίδιο ποτάμι. Σε πολλές περιοχές της Ευρώπης, ακόμα και στη χώρα μας, μεγάλες ποσότητες επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων (μετά από τριτοβάθμια επεξεργασία) χρησιμοποιούνται για την επαναφόρτιση υπόγειων υδροφορέων, ώστε να βελτιωθούν τα υφιστάμενα αποθέματα πόσιμου νερού. Προκειμένου να προστατευθεί η δημόσια υγεία σε περιπτώσεις

επαναχρησιμοποίησης των υγρών αποβλήτων πρέπει να λαμβάνονται αυστηρά μέτρα ώστε η επαναχρησιμοποίηση να είναι απόλυτα ασφαλής .

Τυχόν ενδοιασμοί των πολιτών για την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων σχετίζονται με:

1. την απουσία επαρκών πληροφοριών όσον αφορά με τις συνέπειες που τίθενται για την υγεία από ορισμένα παθογόνα μικρόβια και χημικά συστατικά των υγρών αποβλήτων
2. Την ύπαρξη μη αναγνωρισμένων χημικών συστατικών και των δυνητικά παθογόνων
3. την απόδοση των διεργασιών επεξεργασίας για την απομάκρυνσή τους.

Λόγω του ότι νέες, πιο ακριβείς μέθοδοι για την ανίχνευση των χημικών συστατικών είναι σήμερα διαθέσιμες τα συστατικά που μέχρι πριν από λίγο ήταν άγνωστα ,αποτελούν στις πλέον αντικείμενο μελέτης. Παραδείγματα τέτοιου είδους χημικών συστατικών που βρίσκονται στα επιφανειακά και στα υπόγεια νερά είναι: η κανονική νιτρώδης διμεθυλαμίνη ένα βασικό συστατικό στα καύσιμα των πυραύλων, ο μεθυλικός τριτοταγής βουτυλαιθέρας, ένα ιδιαίτερα ευδιάλυτο στην βενζίνη πρόσθετο, ιατρικά ενεργές ουσίες όπου σε συνδυασμό με τις χημικές ουσίες, προκαλούν ενδοκρινικές μεταβολές, τα φυτοφάρμακα, τα βιομηχανικά χημικά και οι φαινολικές ενώσεις που υπάρχουν στα απορρυπαντικά. Οι χημικές ουσίες που προκαλούν ενδοκρινικές μεταβολές φέρουν μεγάλη ανησυχία για την υγεία, διότι έχουν δράση παρόμοια με τις ορμόνες που παράγονται στα σπονδυλωτά προκαλώντας έντονη αντίδραση του οργανισμού ή παρεμποδίζοντας τη δράση μιας ορμόνης στο σώμα . Αυτές οι χημικές ουσίες είναι ικανές να προκαλέσουν προβλήματα στην ανάπτυξη, στη συμπεριφορά και αναπαραγωγή στα διάφορα είδη. Αυξημένες περιπτώσεις καρκίνου των όρχεων, προστάτη και καρκίνου των μαστών έχουν αποδοθεί στις χημικές αυτές ενώσεις. Παρά το γεγονός ότι η απομάκρυνση των χημικών αυτών ουσιών δεν αποτελεί σήμερα τον βασικό στόχο της επεξεργασίας των υγρών αστικών αποβλήτων, αφού πρόκειται για μη συχνά ευρήματα, οι μονάδες επεξεργασίας αποβλήτων καλό θα είναι να σχεδιάζονται μελλοντικά με τέτοιο τρόπο ώστε να επεξεργάζονται ικανοποιητικά και τις παραπάνω ενώσεις. [40]

Άλλοι παράγοντες που προκαλούν ανησυχίες για την υγεία και το περιβάλλον περιλαμβάνουν:

- (1) τη διαφυγή των πτητικών οργανικών ενώσεων και των τοξικών αέριων ρύπων
- (2) την απολύμανση με χλώριο και
- (3) τα παραπροϊόντα της απολύμανσης

Μία άλλη σημαντική παράμετρος που απαιτεί σωστή διαχείριση είναι η παραγωγή οχληρών ουσιών (οσμές) από τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων. Σοβαρές προσπάθειες έχουν γίνει για την δημιουργία εγκαταστάσεων, όπου θα μειώνεται η παραγωγή οσμών, θα γίνεται αποτελεσματική συλλογή τους και θα παρέχεται η αναγκαία επεξεργασία για την καταστροφή τους. ( συστήματα απόσμησης)

Αρκετά βιομηχανικά απόβλητα διαθέτουν πτητικές ενώσεις (VOC) και μπορεί να είναι εύφλεκτα, τοξικά, με έντονη οσμή. Επίσης είναι πιθανό να συμμετέχουν στην παραγωγή του φωτοχημικού νέφους και τη μείωση του τροποσφαιρικού όζοντος. [19]

Για την ορθή διαχείριση των παραπάνω απαιτείται

- 1) Περιορισμός των εκπομπών του VOC στην πηγή
- 2) Περιορισμός της ποσότητας των λυμάτων και των εκπομπών των VOC

Πτητικές ενώσεις που εντάσσονται στην κατηγορία των τοξικών εκπομπών, ελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα και μεταφέρονται σε σημεία που βρίσκονται κατά την φορά του ρεύματος του αέρα. Σε μερικά προγράμματα διαχείρισης του αέρα υπάρχουν πλέον περιορισμοί λόγω της αυξημένης πιθανότητας εμφάνισης καρκίνου κατά την μακροχρόνια έκθεση σε χημικές ουσίες όπως το βενζόλιο, το τριχλωροαιθυλένιο, το χλωροφόρμιο, και το χλωριούχο μεθύλιο.

Οι εκροές που διαθέτουν υπολείμματα χλωρίου είναι τοξικές για την υδρόβια ζωή και έτσι θεσμοθετούνται όλο και περισσότερες διατάξεις για τον περιορισμό του υπολειμματικού χλωρίου. [13]

Σημαντικά θέματα που σχετίζονται με την υγεία αφορούν την μείωση των παραπροϊόντων απολύμανσης, θεωρούνται δυνητικά καρκινογόνες ουσίες και σχηματίζονται όταν το χλώριο αντιδρά με οργανική ύλη. Με στόχο το να επιτευχθούν υψηλότερα και πιο ακριβή επίπεδα αδρανοποίησης των μικροοργανισμών, απαιτείται να εξετασθεί η βελτίωση της λειτουργίας των συστημάτων απολύμανσης. Λόγω επικινδυνότητας του χλωρίου (εξαρτόμενης από τη μορφή του χλωρίου- υγρό και αέριο-)σε πολλές χώρες, λαμβάνεται πρόνοια και μέτρα ασφαλείας κατά τη μεταφορά, αποθήκευση και διαχείριση του χλωρίου.

### 2.1.2 Επεξεργασία λυμάτων

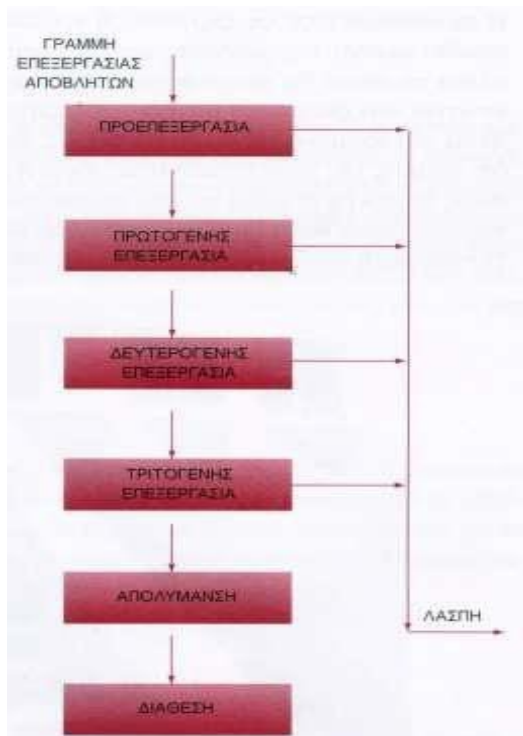
Οι μονάδες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων διαθέτουν μια σειρά από διεργασίες που μπορεί να είναι φυσικές, χημικές ή βιολογικές. Συνηθίζεται να χρησιμοποιείται ο όρος βιολογικός καθαρισμός όταν αναφερόμαστε στις μονάδες επεξεργασίας αποβλήτων. Ο συγκεκριμένος όρος δεν είναι ορθός, αφού η βιολογική επεξεργασία των υγρών αποβλήτων

δεν είναι παρά ένα από τα στάδια τα οποία πραγματοποιούνται σε μια μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. [7]

Οι μονάδες επεξεργασίας αποβλήτων περιλαμβάνουν τα παρακάτω στάδια:

- Προκαταρκτική επεξεργασία ή προεπεξεργασία
- Πρωτοβάθμια ή πρωτογενή επεξεργασία
- Δευτεροβάθμια ή δευτερογενή επεξεργασία
- Τριτοβάθμια ή τριτογενή επεξεργασία
- Απολύμανση

Σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας υγρών αποβλήτων υπάρχουν δύο γραμμές επεξεργασίας. Η πρώτη αφορά την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων, δηλαδή το να μειωθούν ουσίες, επικίνδυνες για το τελικό αποδέκτη από την υγρή μάζα των αποβλήτων και η δεύτερη αφορά την επεξεργασία λάσπης, δηλαδή το προϊόν που παράγεται από την πρώτη διεργασία. Στις επόμενες σελίδες ακολουθεί η ανάλυση του κάθε σταδίου επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. [34]



Εικόνα 1: Στάδια επεξεργασίας λυμάτων [48]



Πιο αναλυτικά:

- **Προκαταρκτική επεξεργασία:**

Η προκαταρκτική επεξεργασία ή προεπεξεργασία (preliminary treatment) είναι το στάδιο της μονάδας επεξεργασίας αποβλήτων στο οποίο διενεργείται αφαίρεση αδρανών, όπως ογκώδη αντικείμενα, κουρέλια και χαλίκια-άμμος, λίπη και έλαια τα οποία θα μπορούσαν στην συνέχεια να δημιουργήσουν πρόβλημα λειτουργίας και βλάβες στον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό. Συνεπώς το στάδιο της προεπεξεργασίας αφορά κυρίως την προστασία των επομένων μονάδων. Η προεπεξεργασία συνήθως περιλαμβάνει τις παρακάτω διεργασίες:

- Εσχάρωση (screening). Στόχος των εσχάρων αποτελεί η απομάκρυνση ογκωδών αντικειμένων, τα οποία είναι ικανά να φράξουν και να καταστρέψουν τις αντλίες και τον υπόλοιπο ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό της μονάδας. Η απομάκρυνση των ογκωδών αντικειμένων γίνεται με την συγκράτηση τους σε σχάρες, κατά τη μεταφορά των υγρών αποβλήτων από αυτές.
- Αμμοσυλλογή (Εξάμμωση) . Σκοπός της είναι η απομάκρυνση βαρέων αδρανών υλικών όπως χαλίκια, άμμος, ή άλλων σωματιδίων γεωλογικής ή άλλης υφής, με διάμετρο συνήθως μεγαλύτερη των 200 μm, που είναι ανόργανες ουσίες και έχουν ταχύτητες καθίζησης μεγαλύτερες από εκείνες των οργανικών ουσιών. Η απομάκρυνση των σωματιδίων αυτών είναι απαραίτητη, γιατί η παρουσία τους δημιουργεί προβλήματα, όπως καθίζηση φερτών υλών στο πυθμένα των αγωγών, φράξιμο σωληνώσεων, καταστροφή του μηχανολογικού εξοπλισμού (αντλίες κ.λπ) και μείωση της αποτελεσματικότητας στα διάφορα στάδια καθαρισμού. Η εξάμμωση γίνεται σε συγκεκριμένες επιμήκεις δεξαμενές που ονομάζονται εξαμμωτές (grit chambers) με τη δημιουργία απαραίτητων συνθηκών ροής που ευνοούν την καθίζηση και απομάκρυνση της άμμου και άλλων ανόργανων σωματιδίων και την αιώρηση των οργανικών ουσιών. Αρκετές μονάδες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων (ΜΕΥΑ) στο στάδιο της εξάμμωσης διαθέτουν ειδικούς κοχλίες που γίνεται ανύψωση της άμμου σε δοχεία συλλογής.
- Άλεση ή πολτοποίηση. Είναι μια φυσικομηχανολογική διεργασία που λειτουργεί συνδυαστικά με την εσχάρωση για την απομάκρυνση των ογκωδών αντικειμένων. Ο

πολτοποιητής που λειτουργεί, πολτοποιεί τα χοντρά στέρεα υλικά που υπάρχουν στα λύματα.

- Λιποσυλλογή (Αφαίρεση λιπών). Στόχος της διεργασίας αυτής είναι το να απομακρυνθούν υλικά όπως λίπη και έλαια με σκοπό την αποφυγή προβλημάτων στο στάδιο της βιολογικής επεξεργασίας. Τα ελεύθερα και επιπλέοντα λιπαρά υλικά απομακρύνονται σύμφωνα με το νόμο της βαρύτητας. Άρα ,τα λιπαρά συστατικά έχουν ειδικό βάρος μικρότερο από του νερού και επιπλέουν στην επιφάνεια του διαχωριστή και συλλέγονται για επιπλέον επεξεργασία ή διάθεση.

## **1. Πρωτοβάθμια επεξεργασία:**

Σκοπός της πρωτοβάθμιας επεξεργασίας είναι η απομάκρυνση των στερεών από τα υγρά απόβλητα. Περιλαμβάνει τις παρακάτω διεργασίες:

- Καθίζηση. Στόχος της πρωτοβάθμιας καθίζησης (primary sedimentation) είναι η απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών, οργανικών και ανόργανων. Η απομάκρυνση αυτή στοχεύει στη μείωση του ρυπαντικού φορτίου τους ( BOD) και αιωρουμένων στερεών (SS).
- Χημική επεξεργασία (κροκίδωση) με καθίζηση. Σε περιπτώσεις όπου η πρωτοβάθμια καθίζηση δεν είναι αποτελεσματική υποβοηθάται με προσθήκη χημικών ουσιών (κροκίδωση). Κατά τη φάση αυτή πραγματοποιείται διάσπαση κολλοειδών στερεών και εν συνεχεία συσσωμάτωση αυτών με στόχο τη δημιουργία μεγάλων αιωρουμένων στερεών που απομακρύνονται με βαρύτητα. Η διαδικασία αυτή σκοπεύει στη μείωση των ολικών στερεών (TS), στη βελτίωση της απόδοσης της πρωτοβάθμιας καθίζησης και στην απομάκρυνση του φωσφόρου.

Με την πρωτοβάθμια επεξεργασία επιτυγχάνεται απομάκρυνση ενός μεγάλου ποσοστού 50- 70% από τα αιωρούμενα στέρεα (SS) των αποβλήτων και ένα μικρότερο ποσοστό 25- 40% από το οργανικό τους φορτίο (BOD5).

Η πρωτοβάθμια επεξεργασία υγρών αποβλήτων επιτυγχάνεται σε δεξαμενές κυκλικής ή ορθογώνιας επιφάνειας και αφορά συνήθως μεγάλες ποσότητες υγρών αποβλήτων (μεγάλες σε πληθυσμό πόλεις).

## **2. Δευτεροβάθμια επεξεργασία:**

Στόχος της δευτεροβάθμιας ή βιολογικής επεξεργασίας (secondary treatment) είναι η απομάκρυνση των οργανικών ουσιών με τη χρήση βιολογικών διεργασιών στις οποίες υπάρχουν μικροοργανισμοί (βακτήρια) που αναπαράγονται καταναλώνοντας τις οργανικές ουσίες.

Για να διευκολυνθεί η διάσπαση και η απομάκρυνσή τους, διαμορφώνονται κατάλληλες συνθήκες για την ανάπτυξη αυτοφυτικών μικροοργανισμών, που λαμβάνουν μεταξύ άλλων τις οργανικές ουσίες των λυμάτων ( τις οποίες και διασπούν) για σύνθεση νέων κυττάρων και νερού και παραγωγή της απαραίτητης ενέργειας. Οι βιολογικές διεργασίες διευκολύνονται και επιταχύνονται με την έκκριση από τους οργανισμούς διαφόρων ενζύμων από το κύτταρό τους που δρουν καταλυτικά και εξασφαλίζουν τη διάσπαση και μεταβολισμό των ουσιών. Πρακτικά, εφαρμόζεται κατά κανόνα η αερόβια επεξεργασία όπου με παρουσία οξυγόνου επιτυγχάνεται η διάσπαση του οργανικού φορτίου και η μετατροπή του σε νερό και νέους μικροοργανισμούς.

Σε ειδικές περιπτώσεις και ειδικά σε βιομηχανικά λύματα με πολύ υψηλό οργανικό φορτίο χρησιμοποιείται κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες και η αναερόβια επεξεργασία, όπου, απουσία αέρα, επιτυγχάνεται η διάσπαση του οργανικού φορτίου και η παραγωγή μεθανίου και νέων μικροοργανισμών. Οι παραγόμενοι μικροοργανισμοί τόσο στην αερόβια όσο και στην αναερόβια επεξεργασία απομακρύνονται μέσω καθίζησης σε δεξαμενές κυκλικής ή ορθογωνικής μορφής (δευτεροβάθμια καθίζηση) και έτσι επιτυγχάνεται ο διαχωρισμός των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων και των μικροοργανισμών (λάσπη-ιλύς)

Πρέπει να τονιστεί ιδιαίτερα ότι η δευτεροβάθμια ή βιολογική επεξεργασία είναι το βασικό στάδιο μιας μονάδας επεξεργασίας υγρών αποβλήτων και για το λόγο αυτό έχει επικρατήσει ο όρος, βιολογικός καθαρισμός. Αυτό που στην πραγματικότητα γίνεται στη βιολογική επεξεργασία είναι ότι ο άνθρωπος συμβάλλει στο έργο της φύσης δίνοντας στους μικροοργανισμούς το οξυγόνο και τις απαραίτητες συνθήκες ώστε να διασπάσουν το οργανικό φορτίο (BOD) των αποβλήτων. [17]

### **3. Τριτοβάθμια επεξεργασία:**

Σκοπός της τριτοβάθμιας ή τριτογενούς επεξεργασίας (tertiary treatment) είναι να απομακρυνθούν οι υπόλοιπες ρυπαντικές ουσίες που δεν μπορούν ή δεν έχουν

απομακρυνθεί στα προηγούμενα στάδια επεξεργασίας. Η χρήση της τριτοβάθμιας ή τριτογενούς επεξεργασίας εξαρτάται κυρίως από τις απαιτήσεις του τελικού αποδέκτη.

Η τριτοβάθμια ή προχωρημένη επεξεργασία των αποβλήτων (advanced wastewater treatment) δεν είναι αναγκαία στις περισσότερες μονάδες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. Με την πρωτοβάθμια και δευτεροβάθμια επεξεργασία επιτυγχάνεται ένα ποσοστό καθαρισμού του οργανικού φορτίου και των αιωρούμενων στερεών της τάξης του 85- 90%. Παρά την επιπλέον απομάκρυνση οργανικού φορτίου ή αιωρούμενων στερεών η τριτοβάθμια επεξεργασία γίνεται ακόμη για να απομακρυνθεί το άζωτο, ο φώσφορος, ή άλλα ανεπιθύμητα συστατικά των υγρών αποβλήτων. Η απομάκρυνση αυτή αποσκοπεί στο να προστατευθεί το υδάτινο περιβάλλον από επιβλαβείς ουσίες ή ακόμη και στο να προετοιμαστούν τα απόβλητα για επαναχρησιμοποίηση.

#### **4. Απολύμανση:**

Στόχος της απολύμανσης είναι να καταστραφούν οι παθογόνοι μικροοργανισμοί ώστε να ελαχιστοποιείται η μετάδοση ασθενειών με τα νερά του αποδέκτη, στα οποία μεταφέρονται τα επεξεργασμένα απόβλητα.

Είναι το μοναδικό στάδιο στην επεξεργασία των αποβλήτων με μοναδικό στόχο την καταστροφή των παθογόνων μικροοργανισμών, παρά το ότι η μερική απομάκρυνσή τους συμβαίνει και στα προηγούμενα στάδια επεξεργασίας.

Η περισσότερο διαδεδομένη και δοκιμασμένη μέθοδος απολύμανσης είναι η χλωρίωση με υποχλωριώδες νάτριο, δηλαδή, η διοχέτευση υγρού χλωρίου στην υδάτινη μάζα. Παρά τα πολλά πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η μέθοδος αυτή, έχει ως βασικό μειονέκτημα τη δυσμενή επίδραση του χλωρίου στο υδάτινο περιβάλλον που διοχετεύονται τα χλωριωμένα απόβλητα. Η επίδραση αυτή εκδηλώνεται άμεσα στις διάφορες μορφές ζωής (π.χ. ψάρια) λόγω της τοξικότητας του χλωρίου ή έμμεσα από τις ενώσεις που δημιουργούνται από την αντίδραση του χλωρίου με τυχόν υπολοιπούμενες οργανικές ενώσεις ή αιωρούμενα στερεά και που πιθανολογείται ότι είναι καρκινογόνες. [5]

Είναι σαφές πως δεν είναι καλό στο υδάτινο περιβάλλον να διοχετεύονται μεγάλες ποσότητες χλωρίου. Σήμερα γίνονται αρκετές προσπάθειες για τη βελτίωση της απόδοσης της χλωρίωσης, με σκοπό να αποφεύγεται η ανεξέλεγκτη χρήση του χλωρίου. Το βασικό μειονέκτημα της χλωρίωσης που αναφέραμε έχει οδηγήσει σε μεθόδους αντικατάστασής

της από άλλους τρόπους απολύμανσης που είναι το ίδιο δραστικές χωρίς να υπάρχουν επιπτώσεις στο περιβάλλον. Στις μεθόδους αυτές ανήκει η απολύμανση με υπεριώδη ακτινοβολία (UV), η οποία κερδίζει συνεχώς έδαφος καθώς και η χρήση όζοντος. [18]

## 2.2 Φυτοεξυγίανση

### 2.2.1 Ορισμός και τεχνολογία της έννοιας φυτοεξυγίανσης:

Η τεχνολογία της φυτοεξυγίανσης έχει προκαλέσει μεγάλο ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια ως μια σημαντική εναλλακτική μέθοδος εξυγίανσης ρυπασμένων εδαφών και υδάτων. Η υπηρεσία προστασίας του περιβάλλοντος των ΗΠΑ εντάσσει την φυτοεξυγίανση στις επανομαζόμενες πρωτότυπες τεχνολογίες επεξεργασίας (Innovative treatment technologies).

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

Παρά το γεγονός ότι η εφαρμογή της φυτοεξυγίανσης είναι πρόσφατη, η ιδέα για την εφαρμογή της είχε συλληφθεί πριν από πολλούς αιώνες. Μάλιστα, το πρώτο σύστημα επεξεργασίας αστικών λυμάτων που είχε βασιστεί στην χρήση φυτών λειτούργησε στην

Γερμανία, περίπου τον 17<sup>ο</sup> αιώνα. Μέχρι σήμερα έχει επιτευχθεί αξιόλογη ανάπτυξη στην εφαρμογή διάφορων τεχνικών μέχρι και σε επίπεδο εμπορικής κλίμακας για την δευτερογενή και τριτογενή επεξεργασία αστικών υδατικών αποβλήτων με την χρήση φυτών. Οι μέθοδοι περιλαμβάνουν την χρήση υδρόβιων και υδροχαρών φυτών για την δημιουργία φυσικών συστημάτων επεξεργασίας, όπως και τεχνητών υδροβιότοπων (constructed wetlands) και δεξαμενών σταθεροποίησης. Τα τελευταία χρόνια, η χρήση των φυσικών συστημάτων επεξεργασίας έχει επεκταθεί πέρα από την χρησιμοποίησή τους στην επεξεργασία των υγρών αποβλήτων, για τη χρήση τους στην εξυγίανση αβαθών υδροφορέων με στόχο την αντιμετώπιση της ρύπανσης η οποία προκαλείται από τα εντομοκτόνα και ανόργανα στοιχεία, όπως το άζωτο και ο φώσφορος. [36]

Μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον παρουσιάζει και η δυνατότητα εξυγίανσης της ατμόσφαιρας με τη χρήση φυτών. Τα φύλλα των φυτών καλύπτονται με κηρώδεις ουσίες, στόχος των οποίων είναι η υδατική οικονομία εντός του φυτικού σώματος. Οι ουσίες αυτές ευνοούν την προσρόφηση λιποφιλικών πτητικών οργανικών ουσιών, όπως π.χ. οι αρωματικοί υδρογονάνθρακες. Με την διαδικασία αυτή τα φυτά συμμετέχουν στον περιορισμό της συγκέντρωσης επικίνδυνων ρυπαντών στην ατμόσφαιρα .

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

Η τεχνολογία της φυτοεξυγίανσης έχει αποδειχθεί, κυρίως μέσω εργαστηρίων , πως μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αντιμετώπιση τόσο οργανικών (πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs), χλωριωμένων διαλυτών, εντομοκτόνα, φυτοφαρμάκων), όσο και ανόργανων ρυπαντών (βαρέα μέταλλα). Παρόλο που στην παρούσα φάση η τεχνολογία της φυτοεξυγίανσης δεν εφαρμόζεται σε ευρεία κλίμακα, οι ειδικοί θεωρούν ότι πρόκειται για μια τεχνολογία εξυγίανσης με μεγάλο εύρος εφαρμογής και εξέλιξης. [33]

### 2.2.2. Τεχνικές φυτοεξυγίανσης:

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται κατά τη μέθοδο της φυτοεξυγίανσης κατανέμονται σε δύο κατηγορίες:

#### □ **Φυτοαπορρύπανση (Phytodecontamination)**

Οι μηχανισμοί που περιλαμβάνει η φυτοαπορρύπανση μειώνουν την συγκέντρωση του ρυπαντή σε μεγάλο ποσοστό στο σύστημα που ερευνάται (έδαφος, νερό και ατμόσφαιρα). Οι μηχανισμοί που εμπλέκονται στην διαδικασία της φυτοαπορρύπανσης αναλύονται παρακάτω.

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

Η φυτοσυσσώρευση αναφέρεται στην πρόσληψη μετάλλων και την μεταφορά τους στα υπέργεια τμήματα του φυτού. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις που υπάρχουν ρυπασμένα εδάφη με βαρέα μέταλλα. Βασίζεται στην ικανότητα των φυτών να συσσωρεύουν συγκεντρώσεις μετάλλων στην βιομάζα τους, μέχρι και 100 φορές περισσότερο συγκριτικά με άλλα φυτά.

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

Η φυτοαποδόμηση περιέχει διεργασίες που βοηθούν στην διάσπαση/αποδόμηση του ρυπαντή. Η διαδικασία της διάσπασης του ρυπαντή πραγματοποιείται είτε εντός του φυτού, μέσω μεταβολικών διεργασιών, είτε εξωτερικά στην περιοχή της ρίζας μέσω της παραγωγής ενζύμων. Μετά την διάσπαση του ρυπαντή ακολουθεί η ενσωμάτωση του στους φυτικούς ιστούς. Πολλές φορές, τα τελικά προϊόντα της διάσπασης απελευθερώνονται στο περιβάλλον, κάτι που εξαρτάται από το είδος του φυτού και του ρυπαντή. Ο μηχανισμός της φυτοαποδόμησης εφαρμόζεται σε ρυπασμένα εδάφη και υπόγεια ή και επιφανειακά ύδατα.

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

Με διαδικασία της φυτοεξάτμισης, μέταλλα και οργανικές ουσίες προσλαμβάνονται από τα φυτά, μετατρέποντάς τα σε πτητικές ουσίες και απελευθερώνοντάς τα στην ατμόσφαιρα. Με αυτό το είδος μηχανισμού πραγματοποιείται η εξυγίανση ρυπασμένων εδαφών και υπόγειων υδάτων, χωρίς την αναγκαιότητα συγκομιδής του φυτικού υλικού.

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

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

- **Ριζοδιήθηση (Rhizofiltration):**

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



[46]

Εικόνα 2: Μηχανισμοί που εμπλέκονται στην τεχνική της φυτοαπορρύπανσης

- **Φυτοσταθεροποίηση (Phytostabilization) .**

Η φυτοσταθεροποίηση περιέχει μηχανισμούς συσσώρευσης και κατακρήμνισης των ρυπαντών με στόχο τη μείωση της κινητικότητάς τους στο έδαφος. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η μόλυνση του υδροφόρου ορίζοντα, η είσοδος τους στην τροφική αλυσίδα ή ακόμη και η διασπορά τους με τον άνεμο.

Η φυτοσταθεροποίηση βασίζεται στην ικανότητα των φυτών να εκκρίνουν ουσίες από τις ρίζες τους , οι οποίες ευνοούν μηχανισμούς όπως η χουμοποίηση, με δέσμευση του ρυπαντή στα χουμικά συστατικά του εδάφους, η λιγνιτοποίηση , με τη δέσμευση στα κυτταρικά τοιχώματα των ριζών και η δέσμευση στα εδαφικά σωματίδια.



[46]



Εικόνα 3: Μηχανισμοί που εμπλέκονται στην τεχνική της φυτοσταθεροποίησης

Εκτός από τις τεχνικές που αναφέρθηκαν, η φυτοεξυγίανση χρησιμοποιείται και σε πολλές διαφορετικές περιπτώσεις, όπως την (i) *φυτοκάλυψη (vegetation caps)* δηλαδή χρήση φυτών για επικάλυψη του εδάφους σε χώρους ταφής απορριμμάτων, τους (ii) *τεχνητούς υγροβιότοπους (constructed wetlands)*, δηλαδή την χρήση φυτών ως μέρος ενός τεχνητού οικοσυστήματος για την απομάκρυνση ρύπων από υδατικές εκροές απόβλητων, τις (iii) *παρόχθιες ζώνες (riparian corridors)*, η οποία συμβάλλει και σε υπόγεια και επιφανειακά νερά για την καταστροφή υδατοδιαλυτών οργανικών και ανόργανων ουσιών και για (iv) *υδραυλικό έλεγχο (hydraulic control)* όπου ελέγχεται η ροή των υπόγειων υδάτων μέσω της πρόσληψης νερού από τα φυτά. [27]

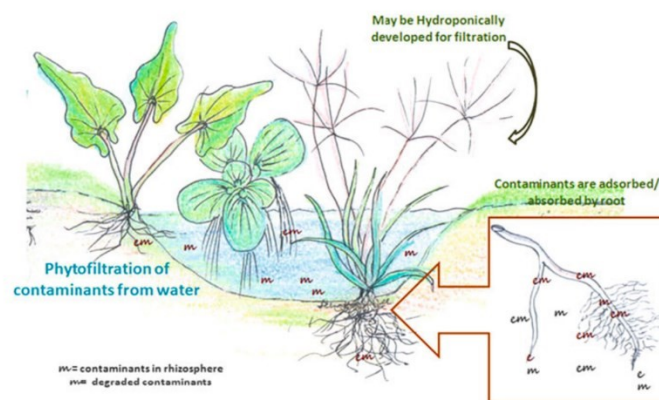


Εικόνα 4: Εφαρμογές φυτοεξυγίανσης

Η ριζοδιήθηση (rhizofiltration) είναι μια τεχνική της φυτοεξυγίανσης, όπου χρησιμοποιούνται φυτά για την απορρόφηση, συγκέντρωση και απομάκρυνση ρυπαντών, όπως βαρέα μέταλλα, ραδιενεργές ουσίες και θρεπτικά συστατικά από μολυσμένα ύδατα. Η τεχνική είναι περίπου ίδια με εκείνη της φυτοσυσσώρευσης με την διαφορά ότι τα φυτά χρησιμοποιούνται κατά βάση σε μολυσμένα ύδατα αντί για χώμα. Τα φυτά τα οποία χρησιμοποιούνται στην ριζοδιήθηση είναι απαραίτητο να διαθέτουν ανεπτυγμένο και δυνατό ριζικό σύστημα. Η ανάπτυξη τους πραγματοποιείται σε θερμοκήπια εντός υδατικών διαλυμάτων, με την μέθοδο της υδροπονίας. Το μολυσμένο νερό είτε συλλέγεται από μια ρυπασμένη περιοχή και

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

Ο ρύπος τις περισσότερες φορές παραμένει είτε πάνω στην ρίζα, ή μέσα στην ρίζα, ή απορροφάται και μεταφέρεται σε άλλα τμήματα του φυτού, όπως το κοτσάνι ή τα φύλλα. Κατά την απορρόφηση των ρύπων στους ιστούς είναι πιθανό να προκύψει και η εξάτμιση τους από τα φυτά. Για την ριζοδιήθηση είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούνται φυτά των οποίων οι ρίζες έχουν μεγαλύτερη ινώδη επιφάνεια. Το είδος του κάθε ρύπου που κατακρατείται εξαρτάται από την φύση του, τη συγκέντρωση του καθώς και το είδος του φυτού.



Εικόνα 5: Σχηματική απεικόνιση της ριζοδιήθησης [47]

Η εφαρμογή της ερευνάται για την εξυγίανση επιφανειακών και υπόγειων υδάτων, υγρών αποβλήτων, αποβλήτων ορυχείων, γεωργικών απορροών και νερουλές ιλύς. Είναι εφαρμόσιμη και για την κατεργασία μεγάλων όγκων νερού με χαμηλές συγκεντρώσεις ρύπων (της τάξης των ppb). Θεωρείται ως ιδανική μέθοδος απομάκρυνσης του Pb, Cd, Cu, Ni, Zn, Cr, μέταλλα τα οποία κυρίως παρεμένουν στις ρίζες των φυτών. Παρόλα αυτά, στο παρελθόν έχει χρησιμοποιηθεί για την απομάκρυνση ραδιενεργών στοιχείων από υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα κατά τη διάρκεια έρευνας στο Chernobyl της Ουκρανίας, με την χρήση του φυτού ηλίανθου .

### 2.2.2 Σχεδιασμός συστημάτων φυτοεξυγίανσης

Ο σχεδιασμός συστημάτων φυτοεξυγίανσης ποικίλει ανάλογα με:

- το είδος του ρυπαντή
- το επίπεδο μείωσης της συγκέντρωσης του
- τις περιβαλλοντικές συνθήκες
- από τα φυτά που θα συμμετέχουν στις τεχνικές.

Για την χρήση της τεχνολογίας της φυτοεξυγίανσης λαμβάνουν χώρα προκαταρκτικές εργαστηριακές έρευνες. Σκοπός των ερευνών αυτών είναι η απόφαση της εφαρμογής ή μη των βιολογικών διαδικασιών της φυτοεξυγίανσης, μέσω μιας σειράς ερωτήσεων με θέμα την *βιοαποικοδόμηση των ρυπαντών*, το *ποσοστό βιοδιαθεσιμότητας* τους στο έδαφος και στο υπόγειο νερό και τέλος τον καθορισμό των *ιδανικών συνθηκών για την ανάπτυξη των φυτών*. [22]

Παρά το γεγονός ότι οι παράμετροι σχεδιασμού διαφέρουν για κάθε τεχνική, είναι δυνατόν να προσδιοριστούν κάποιοι κοινοί παράμετροι σχεδιασμού για όλες τις εφαρμογές της τεχνολογίας της φυτοεξυγίανσης. Οι παράμετροι αυτοί είναι:

#### **Προσδιορισμός του επιπέδου της ρύπανσης**

Κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού ενός συστήματος φυτοεξυγίανσης, είναι αναγκαίο να καθοριστεί το είδος και η συγκέντρωση των ρυπαντών όπως επίσης και το βάθος που μεταφέρεται η ρύπανση. Σε περίπτωση οργανικών ρυπαντών θα πρέπει να διαθέτονται στοιχεία για τη δομή τους, τη λιποφιλικότητα τους ( $\log KOW$ ) όπως και για τις ιδιότητες προσρόφησης τους.

#### **Επιλογή του φυτικού υλικού**

Τα φυτά που πρόκειται να ερευνηθούν επιλέγονται βάσει τον επιθυμητό μηχανισμό της φυτοεξυγίανσης και το είδος του ρυπαντή. Στην περίπτωση του φυτομετασχηματισμού οργανικών ρυπαντών και της φυτοεξαγωγής βαρέων μετάλλων τα φυτά είναι αναγκαίο να έχουν την ικανότητα ώστε να παρουσιάζουν ταχύ ρυθμό ανάπτυξης, γρήγορους ρυθμούς εξατμισοδιαπνοής, βαθύ ριζικό σύστημα (για την περίπτωση υπογείων υδάτων) και να μετατρέπουν το ρυπαντή σε μη τοξικά παράγωγα.

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

Στο στάδιο αυτό γίνεται έλεγχος της τοξικότητας των ρυπαντών όπως και προϊόντων τα οποία προκύπτουν από την χρήση της φυτοεξυγίανσης. Σε εργαστηριακά πειράματα εφαρμόζονται διαφορετικές συγκεντρώσεις του ρυπαντή στα προτεινόμενα φυτικά είδη και ερευνώνται τα παραγόμενα προϊόντα του μεταβολισμού.

## **Συντήρηση του συστήματος της φυτοεξυγίανσης**

Η συντήρηση του συστήματος της φυτοεξυγίανσης περιέχει την άρδευση των φυτών, προσθήκη κατάλληλων λιπασμάτων για την ταχεία ανάπτυξή τους και σε αρκετές περιπτώσεις την αντιμετώπιση βιολογικών εχθρών των φυτών.

## **Συγκομιδή του φυτικού υλικού**

Όταν τα φυτά συσσωρεύσουν τον ρυπαντή καλο είναι να πραγματοποιηθεί η συγκομιδή και η απομάκρυνση τους από την περιοχή. Η επιπλέον επεξεργασία του φυτικού υλικού εξαρτάται από τη φύση των παραγόμενων προϊόντων μεταβολισμού καθώς και από την συγκέντρωσή τους στα φυτικά κύτταρα. Στην περίπτωση οργανικών ρυπαντών που χωρίζονται σε μη τοξικές ουσίες δεν είναι αναγκαία η περαιτέρω επεξεργασία του φυτικού υλικού. Όταν όμως πραγματοποιείται μεγάλη συσσώρευση στην περιοχή της ρίζας, τότε είναι αναγκαία η περαιτέρω επεξεργασία των φυτικών ιστών. Η πιο συνηθισμένη διαδικασία επεξεργασίας του φυτικού υλικού είναι η ελεγχόμενη καύση (controlled incineration). Διαφορετικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι η κομποστοποίηση (composting) όπως επίσης και διάθεση σε χωματερές (landfilling). [41]

## **2.2.4. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της φυτοεξυγίανσης**

Τα συστήματα φυτοεξυγίανσης παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα όπως και μειονεκτήματα κατά την χρήση τους. Παρακάτω παρουσιάζεται ο Πίνακας όπου παρατίθενται μερικά από τα μειονεκτήματα και τα πλεονεκτήματα που εμφανίζονται κατά την εφαρμογή της τεχνολογίας αυτής σε σύγκριση με άλλες αντίστοιχες μεθόδους. [42] **Πίνακας 2.1: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα φυτοεξυγίανσης**

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
Λιγότερα δευτερογενή απόβλητα	Αργός ρυθμός , εξαρτάται πολύ από την εποχή και την καλλιέργεια
Εφαρμόζεται επί τόπου με εκσκαφή ή άντληση.	Έχει αποτέλεσμα όταν η μόλυνση δεν ξεπερνά το 1 μέτρο στο έδαφος και 3 μέτρα στον υδροφόρο ορίζοντα
Οικονομικά αποδεκτή, κυρίως σε μεγάλες περιοχές ρύπανσης	Πρόβλημα με την εναπόθεση των ρυπασμένων φυτών μετά τη συγκομιδή τους.
Περιβαλλοντικά φιλική	Απαιτεί μεγάλες εκτάσεις για να πραγματοποιηθεί
Κοινωνικά αποδεκτή από τους κατοίκους των γύρω περιοχών	Μεγάλες συγκεντρώσεις ρύπανσης προκαλούν ζημιά στα φυτά που χρησιμοποιούνται
Χρησιμοποιείται σε μεγάλη ποικιλία ρύπων	Δυνατότητα μετάδοσης επικίνδυνων ουσιών μέσω της τροφικής αλυσίδας, πιθανή κατανάλωση των μολυσμένων φυτών από ζώα του οικοσυστήματος

## 2.3 Φυτά Lemna Minor

### 2.3.1 Χαρακτηριστικά

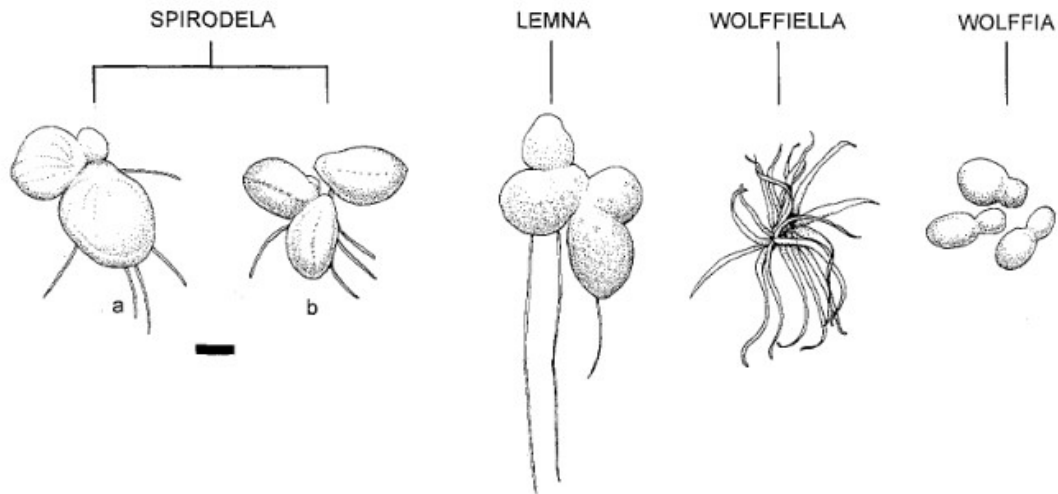


Εικόνα 6: Φυτά *lemna minor* σε λίμνη

Τα φυτά *Lemna minor* ανήκουν στην οικογένεια *lemnaceae*, όπου η ονομασία της προέρχεται από την ελληνική λέξη 'λίμνη', αποτελώντας μαζί με τα *Spirodela*, *Wolffia* και *Wolffiella* τα 4 γένη της. Έως τώρα, έχουν ταυτοποιηθεί 37 είδη που ανήκουν στα τέσσερα γένη, από διάφορα μέρη του κόσμου. Ταξινομικά, η οικογένεια είναι περίπλοκη λόγω

Σελίδα

κλωνικών χαρακτηριστικών. Το πιο ευρέως διαδεδομένο είδος ανήκει στα τρία γένη *Lemna*, *Spirodela* και *Wolffia*. Αρκετά συχνά, τα επιπλέοντα στρώματα των duckweed αποτελούνται από περισσότερα του ενός είδους, για παράδειγμα, συνδιασμός *Lemna* και *Wolffia*. [1]



Εικόνα 7: Γένη

Τα *Lemna* είναι το ευρύτερο γένος της οικογένειας *Lemnaceae*. Τα *Lemna* είναι μεταξύ των πιο πολύπλοκων ομάδων μέσα σε μια οικογένεια. Ο Landolt (1986) υπέθεσε ότι τα είδη *Lemna disperna* και *Lemna gibba* σχετίζονται ως είδη πρόγονος-παράγωγο και το είδος που προηγείται διαφοροποιήθηκε από το αυτό που ακολούθησε. Η συρρίκνωση κάποιων δομών όπως το μέγεθος του φύλλου, ο αριθμός των νευρώνων και των ωαρίων στο *Lemna disperna*, σε συνδυασμό με την περιορισμένη γεωγραφική κατανομή, υποστηρίζουν την υπόθεση ότι προήλθε από το είδος *Lemna gibba* ή από ένα κοινό πρόγονο. Το είδος *Lemna disperna* έχει αριθμό χρωμοσωμάτων ίσο με 40, ενώ στο *Lemna gibba* έχουν βρεθεί 40, 50, 70 και 80. Σύμφωνα με τις αλλοενζυμικές μελέτες τα δύο είδη συνδέονται ως πρόγονος και παράγωγο. Η μορφολογία της *Lemna disperna* και τα δεδομένα της αλλοενζυμικής έρευνας υποδεικνύουν πως το είδος αυτό προήλθε με διασκορπισμό του *Lemna gibba* ή από ένα κοινό πρόγονο των δύο ειδών. [2]

### Χαρακτηριστικά

Πρόκειται για μικρά επιπλέοντα υδρόβια μονοκοτυλήδονα φυτά και κατηγοριοποιούνται ως ανώτερα φυτά ή μακρόφυτα. Τα φύλλα τους έχουν ωσειδές σχήμα και διάμετρο μερικών χιλιοστών έως δύο εκατοστών, ενώ το μήκος των ριζών τους επηρεάζεται από τη διαθεσιμότητα θρεπτικών συστατικών. Τα *Lemna minor* αποτελούν αντλίες θρεπτικών

συστατικών, μειώνουν την επίδραση του ευτροφισμού και παρέχουν οξυγόνο από την φωτοσυνθετική τους δραστηριότητα. Γενικά, είναι μόνοικα, σπανίως δίοικα, μικρού εως μεσαίου μεγέθους υδρόβια φυτά, επιπλέοντα στην επιφάνεια του νερού ή πλέοντα ακριβώς κάτω από αυτή, με ένα μικρό μόνο μέρος του φύλλου εκτεθειμένο στον αέρα, ή εντελώς βυθισμένο με εξαίρεση το άνθος κατά την περίοδο άνθησης. Τα φύλλα είτε μονήρη είτε συνδεδεμένα σε μικρές ομάδες, συμμετρικά ή μη, επίπεδα ή διογκωμένα, με κυμαινόμενα σχήμα, νεφροειδές, κυκλικό ελλειπτικό, λογχοειδές, ευθύ, σφαιρικό, πράσινο με ή χωρίς κόκκινη ή καφέ χρωστική. Ρίζες πολλαπλές, μία, ή καμία. Με ένα ή δύο βλαστικές πτυχές. Όταν υπάρχει μία βλαστική πτυχή, υπάρχει μια ανθοδόχη όπου μέσα σε αυτή δημιουργείται ένα εκτεθειμένο άνθος. Όταν υπάρχουν δύο βλαστικές πτυχές, μία από αυτές παράγει άνθος περιτυλιγμένο από σέπαλα. [11]

Τα Lemna έχουν προσαρμοστεί σε ένα ευρύ φάσμα γεωγραφικών και κλιματικών ζωνών και έχουν κατανεμηθεί σχεδόν σε όλο τον κόσμο, με εξαίρεση τις περιοχές όπου η θερμοκρασία διατηρείται κάτω από τους 0 °C για κάποιο διάστημα. Τα περισσότερα είδη μπορούν να εντοπιστούν σε μετριοπαθή κλίματα των τροπικών και εύκρατων ζωνών. Σε ερήμους και πολύ υγρές περιοχές, η παρουσία των duckweed είναι σπάνια. Για παράδειγμα, τα Lemna spp σπανίως εμφανίζονται σε περιοχές με υψηλή ή πολύ χαμηλή βροχόπτωση και δεν βρίσκονται στην Γροιλανδία και τις Αλεούτιες νήσους. Αν και πολλά είδη μπορούν να επιζήσουν σε ακραίες θερμοκρασίες, γενικά μεγαλώνουν γρηγορότερα υπό θερμές συνθήκες με ηλιοφάνεια. Τα περισσότερα είδη παρουσιάζουν περισσότερη γονιμότητα στους τροπικούς. Πολλοί μικροκλιματικοί παράγοντες, όπως για παράδειγμα η ένταση του φωτός, η αλατότητα, η διακύμανση στη θερμοκρασία, μπορούν να επηρεάσουν την διαμοίραση των ειδών Lemnaceae. Τα πτηνά και οι πλημμύρες συχνά διασκορπίζουν τα duckweed σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές.

#### Διαδικασία αναπαραγωγής

Ο τρόπος και η διαδικασία αναπαραγωγής των φυτών Lemna minor χωρίζεται σε δυο βασικές κατηγορίες, που όμως, τις περισσότερες φορές λειτουργούν συνδυαστικά ώστε η τελική διαδικασία αναπαραγωγής και ανάπτυξης τους να είναι ραγδαία. [4]

### 1. Ασεξουαλική αναπαραγωγή

- Εκβλάστηση

Το *lemna minor* αναπαράγεται κυρίως ασεξουαλικά μέσω της εκβλάστησης. Νέοι βλαστοί ή θυγατρικά φυτά αναπτύσσονται ως αποφυάδες από το μητρικό φύλλο. Αυτά τα θυγατρικά φύλλα παραμένουν προσκολλημένα στον γονέα μέχρι να μεγαλώσουν αρκετά ώστε να χωριστούν και να γίνουν ανεξάρτητα φυτά.

- Διαίρεση

Ορισμένα είδη φυτών μπορούν να χωριστούν σε δύο θυγατρικά φύλλα μέσω μιας διαδικασίας παρόμοιας με τη δυαδική σχάση. Αυτή η διαίρεση συμβαίνει όταν το μητρικό φυτό φτάσει να έχει διάμετρο μεγαλύτερης των 5 χιλιοστών.

- Αποικιακή ανάπτυξη

Το *lemna minor* συχνά σχηματίζει αποικίες ή ψάθες στην επιφάνεια του νερού, δημιουργώντας ένα πυκνό κάλυμμα, το οποίο δημιουργεί κλίμα 'ασφάλειας' για τα φύλλα που δίνει την ευκαιρία στα φύλλα να ανεξαρτητοποιηθούν.

Αυτές οι αποικίες μπορούν να προσφέρουν οφέλη όπως η σκίαση του νερού, η μείωση της εξάτμισης και η χρήση ως βιότοπος για διάφορους υδρόβιους οργανισμούς.

## 2. Σεξουαλική αναπαραγωγή

- Ανθοφορία και σχηματισμός σπόρων

Το *lemna minor* έχει μικροσκοπικά λουλούδια που δεν είναι εύκολα ορατά επειδή συχνά κρύβονται ανάμεσα στα φύλλα. Στη σεξουαλική αναπαραγωγή, τα λουλούδια παράγουν αρσενικά και θηλυκά αναπαραγωγικά όργανα. Τα αρσενικά άνθη απελευθερώνουν γύρη, η οποία στη συνέχεια μεταφέρεται στα θηλυκά άνθη για γονιμοποίηση. Τα γονιμοποιημένα άνθη εξελίσσονται σε σπόρους.

- Διασπορά σπόρων

Οι σπόροι απελευθερώνονται στο νερό και μπορούν να παραμείνουν αδρανείς για μια ορισμένη περίοδο. Όταν οι συνθήκες είναι κατάλληλες, οι σπόροι βλασταίνουν, δημιουργώντας νέα φυτά *lemna minor*. Ενώ η σεξουαλική αναπαραγωγή είναι λιγότερο συχνή από την ασεξουαλική αναπαραγωγή, συμβάλλει στη γενετική ποικιλομορφία του πληθυσμού.

Ο συνδυασμός αποτελεσματικής ασεξουαλικής αναπαραγωγής και περιστασιακής σεξουαλικής αναπαραγωγής επιτρέπει στους πληθυσμούς των *lemna* να αποικίζουν γρήγορα τις επιφάνειες του νερού και να προσαρμοστούν σε διάφορες περιβαλλοντικές



συνθήκες. Αυτή η αναπαραγωγική στρατηγική είναι ένας από τους λόγους για τους οποίους το φυτό αυτό μπορεί να είναι εξαιρετικά επιτυχημένο και μερικές φορές να θεωρείται επεμβατικό σε ορισμένα υδάτινα οικοσυστήματα. [3]

### 2.3.2 Ρυθμός αναπαραγωγής

Το *Lemna minor* είναι γνωστό για την ταχεία αναπαραγωγή του και η ικανότητά του να πολλαπλασιάζεται γρήγορα είναι ένας από τους λόγους που μπορεί να γίνει επεμβατικό σε ορισμένα περιβάλλοντα. Ο ρυθμός αναπαραγωγής μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με παράγοντες όπως οι περιβαλλοντικές συνθήκες, η διαθεσιμότητα θρεπτικών ουσιών, η εποχή, αλλά και το είδος φύλλων που έχει. [15]

Ο μεγαλύτερος βαθμός ανάπτυξης των *Lemnaceae* κάτω από τις βέλτιστες εργαστηριακές συνθήκες έχει καταγραφεί σε 0,66 ανάπτυξη ανά ημέρα, το οποίο αντιστοιχεί σε διπλασιασμό ενός πληθυσμού φυτών μέσα σε περίπου 16 ώρες. Τα *Lemna* γενικά μπορούν να διπλασιάσουν τη μάζα τους σε 16 ώρες ως 2 ημέρες ανάλογα με τις συνθήκες. Το κάθε φυτό μπορεί να παράγει από 10 μέχρι 20 νέα φυτά κατά τη διάρκεια του κύκλου του, το οποίο διαρκεί από 10 ημέρες έως μερικές εβδομάδες. Τα παραγόμενα φυτά επαναλαμβάνουν ένα νέο κύκλο παρόμοιο με αυτό του μητρικού φυτού. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μια εκθετική ανάπτυξη η οποία μπορεί να διακοπεί μόνο όταν προκληθεί συνωστισμός των φυτών ή όταν το σύστημα εξαντλήσει τα θρεπτικά συστατικά. [6]

Όσον αφορά στην παραγόμενη ξηρή μάζα κατά την ανάπτυξη του φυτού, έχει παρατηρηθεί διαφοροποίηση μεταξύ ανάπτυξης σε φυσικό περιβάλλον και τεχνητές δεξαμενές ανάπτυξης. Συγκεκριμένα, στο φυσικό περιβάλλον, ο ρυθμός παραγωγής ξηρής μάζας είναι σαφώς μικρότερος (3,14 – 3,54 g/m<sup>2</sup>/d) σε σχέση με τον αντίστοιχο ρυθμό των δεξαμενών επεξεργασίας (7,1 g/m<sup>2</sup>/d). Όταν οι φυσικές λίμνες είναι εμπλουτισμένες με θρεπτικά συστατικά, φαίνεται ο ρυθμός παραγωγής να προσεγγίζει το ρυθμό εξωτερικών δεξαμενών εμπλουτισμένων με λίπασμα (κοπριά βοοειδών) (15 g/m<sup>2</sup>/d). Γενικά, κάτω από διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες, ο ρυθμός παραγωγής μάζας των duckweed κυμαίνεται από 9 έως 38 τόνους ξηρής μάζας ανά εκτάριο το χρόνο. Αυτή η ευρεία διαφοροποίηση παραγωγής μπορεί να οφείλεται στις διαφορές ανάμεσα στα είδη της οικογένειας *Lemnaceae*, σε κλιματικούς παράγοντες, την διαφοροποίηση και παροχή θρεπτικών συστατικών αλλά και τις περιβαλλοντικές συνθήκες.

Όλα τα παραπάνω, αναλύονται εκτεταμένα στο επόμενο υποκεφάλαιο.

### 2.3.3 Περιβάλλον διαβίωσης

Ένα φάσμα περιβαλλοντικών παραγόντων, όπως η θερμοκρασία του νερού, η τιμή του pH και η συγκέντρωση των θρεπτικών συστατικών, ορίζουν την ανάπτυξη και την επιβίωση των duckweed. Άλλοι περιβαλλοντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ανάπτυξη των πληθυσμών duckweed είναι η ύπαρξη τοξινών στο νερό, ο πληθυσμός και η υπερανάπτυξη της αποικίας και ο ανταγωνισμός με άλλα παρόντα φυτά για την πρόσληψη θρεπτικών συστατικών και φωτός. Ωστόσο, ο ρυθμός ανάπτυξης των duckweed ωφελείται από οργανικούς ρύπους καθώς και τα ανόργανα θρεπτικά συστατικά. Η επίδραση διαφόρων παραγόντων αναφέρεται παρακάτω. [9,12]

#### A) pH

Τα lemna γενικά θεωρείται πως έχουν ένα ευρύ φάσμα ανεκτικότητας όσον αφορά την τιμή pH του περιβάλλοντός στο οποίο αναπτύσσονται. Μπορούν να ανταπεξέλθουν σε τιμές pH από 5 έως 9, αν και κάποιοι υποστηρίζουν πως αυτό το φάσμα διευρύνεται από το 3 έως το 10. Ωστόσο, η ανεκτικότητα στο pH περιορίζεται από τις διαφορές των ειδών. Ο Stephenson παρατήρησε ότι τα φυτά αυτά παρουσιάζουν τη μέγιστη ανάπτυξη σε μέσο με pH 5-7. Γενικά, τα duckweed αναπτύσσονται καλύτερα σε pH από 6,5 έως 7,5. Ο διπλασιασμός της βιομάζας από 2 έως 4 ημέρες έχει πραγματοποιηθεί σε επίπεδα pH 7 έως 8 (38). Η αμμωνία (NH<sub>4</sub>) αποτελεί την συνήθη προτεινόμενη πηγή αζώτου για τα duckweed. Το αλκαλικό pH μεταφέρει την ισορροπία αμμωνίου (NH<sub>4</sub>)-αμμωνίας(NH<sub>3</sub>) προς τη μη ιοντισμένη κατάσταση έχει ως αποτέλεσμα την απελευθέρωση της αμμωνίας, η οποία είναι τοξική για τα lemna σε υψηλές συγκεντρώσεις (100 mg NH<sub>3</sub>/L).

Οι Islam και Paul (1977) παρατήρησαν ότι το *W. Arrhizal* αναπτύσσεται σε φάσμα pH από 5 έως 10, όμως το βέλτιστο pH παρατηρήθηκε στις τιμές 7-8. Στο Μπανγκλαντες, το *S. polyrrhiza* έχει αναφερθεί πως αναπτύσσεται ταχύτερα σε τιμές pH από 6,5-7,5. Το φάσμα του pH για τη βέλτιστη ανάπτυξη του *S. polyrrhiza* αναφέρθηκε στην Ινδία πως ήταν 6,88,5. Οι Khondker, Islam και Makhnun (1994) προσδιόρισαν το εύρος του pH από 6,9 έως 7,8 πως είναι κατάλληλο για την ανάπτυξη του *L. perpusilla*. Παρομοίως, οι Van der Does και Klink (1991) παρατήρησαν πως σε τιμή pH 7,36 αναπτύσσεται στην Ολλανδία το είδος *L. perpusilla*. [8]

Παρακάτω παρατίθεται πίνακας με τις βέλτιστες τιμές pH για τα είδη της οικογένειας Lemnaceae.

**Πίνακας 2.2: Ιδανικό εύρος τιμής pH ανά είδος Lemnaceae**

Είδος lemnaceae	Ιδανικές εύρος τιμών pH
L. Gibba	5-9
L.minor	7,4-9,8
L. perpusilla	3,2-9,2
S. polyrrhiza	3,7-9,45

**B) Αγωγιμότητα**

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα φαίνεται πως επηρεάζει τον ρυθμό ανάπτυξης των διαφόρων ειδών duckweed. Για παράδειγμα, φαίνεται πως τα είδη L. gibba και L. minor αναπτύσσονται σε στάσιμα νερά με αγωγιμότητα που κυμαίνεται στα 400 έως 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Για τα είδη L. perpusilla και S. polyrrhiza, η βέλτιστη αγωγιμότητα κυμαίνεται από 650 έως 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Έχει παρατηρηθεί άλλωστε η εξαφάνιση του είδους S. polyrrhiza στα τέλη Μαΐου από λίμνες στις οποίες υπήρχε απότομη πτώση της τιμής της αγωγιμότητας. Γενικά έχει παρατηρηθεί ότι η ανάπτυξη Lemnaceae μπορεί να επηρεάσει την αγωγιμότητα του μέσου και το pH . [32]

Παρακάτω παρατίθεται πίνακας με τις βέλτιστες τιμές αγωγιμότητας για τα είδη της οικογένειας Lemnaceae.

**Πίνακας 2.3: Ιδανικό εύρος τιμής Αγωγιμότητας ανά γέννος Lemnaceae**

Είδος lemnaceae	Ιδανικές τιμές αγωγιμότητας (mS/cm)
L. Gibba	400-500
L.minor	400-500
L. perpusilla	200-1.000
S. polyrrhiza	650-1.000

## Γ) Θερμοκρασία

Η ανεκτικότητα στη θερμοκρασία καθώς και η ιδανική τιμή εξαρτώνται από το είδος του duckweed. Οι ιδανικές τιμές για τη μέγιστη ανάπτυξη κυμαίνονται από 17,5 έως 30 °C για τα περισσότερα είδη. Παρόλο που κάποια είδη μπορούν να ανέχονται θερμοκρασίες σχεδόν ψύξης, ο ρυθμός ανάπτυξης ελαττώνεται σε χαμηλή θερμοκρασία. Κάτω από τους 17 °C κάποια duckweed εμφανίζουν ελάττωση του ρυθμού ανάπτυξης τους (38). Τα περισσότερα είδη φαίνονται να νεκρώνουν εφόσον η θερμοκρασία του νερού ανέβει πάνω από τους 35°C. Η επίδραση της θερμοκρασίας στην ανάπτυξη επηρεάζεται από την ένταση του φωτός. Για παράδειγμα, καθώς το φως αυξάνεται, ο ρυθμός ανάπτυξης αυξάνεται από τους 10 έως τους 30°C.

## Δ) Άζωτο (N)

Το άζωτο αποτελεί το πιο σημαντικό στοιχείο για την ανάπτυξη ενός φυτού καθώς οι πρωτεΐνες, τα αμινοξέα, τα νουκλεϊκά οξέα και άλλα σημαντικά βιομόρια περιέχουν άζωτο. Το περιεχόμενο ακατέργαστης πρωτεΐνης των duckweed φαίνεται να αυξάνεται μέχρι μια ανώτατη τιμή περίπου 40% (επί ξηρής βάσης) με τιμή συγκέντρωσης της αμμωνίας στο διάλυμα από 7 έως 12 mg N/L . Σύμφωνα με μελέτες, το TKN (άζωτο κατά Kjeldahl) του νερού δεν πρέπει να υπολείπεται της συγκέντρωσης 20 έως 30 mg/l για την διατήρηση της βέλτιστης παραγωγής και του υψηλού ποσοστού περιεχόμενης πρωτεΐνης. [38]

Τα lemna απορροφούν άζωτο κυρίως με τη μορφή αμμωνίας ( $NH_4$ ), ακόμα και με την ύπαρξη νιτρικών ( $NO_3$ ) σε υψηλή συγκέντρωση. Έχει αποδειχθεί ότι τα επιδεικνύουν υψηλότερους ρυθμούς ανάπτυξης όταν η πηγή αζώτου βρίσκεται σε μορφή αμμωνίας. Σε υδρόβια συστήματα πλούσια σε οργανικά συστατικά, το άζωτο τείνει να συγκεντρώνεται στη μορφή αμμωνιακών και όχι τόσο σε μορφή νιτρικών ιόντων όταν το pH δεν ξεπερνά την τιμή 9. Σε λίμνες όπου απορρίπτονται οργανικά ζωικά κατάλοιπα, το pH σπάνια ξεπερνά την τιμή 8, ιδίως όταν υπάρχει κάλυψη της επιφάνειας του νερού, με συνέπεια να εμποδίζεται η ανάπτυξη του φυτοπλαγκτόν. Τα φυτά της οικογένειας Lemnaceae είναι γενικά ανεκτικά σε υψηλές συγκεντρώσεις αμμωνιακών ιόντων (σε μορφή  $NH_4$ ) αλλά όχι τόσο σε μορφή  $NH_3$ . Η ουρία είναι ένα είδος κατάλληλης λίπανσης καθώς μετατρέπεται ταχύτατα σε αμμωνία υπό συνθήκες συνθήκες.

## **E) Φώσφορος (P)**

Μετά το άζωτο, ο φώσφορος είναι το δεύτερο σημαντικότερο στοιχείο. Αποτελεί τμήμα πολλών φωσφορυλιωμένων ενώσεων που εμπλέκονται σε σημαντικές μεταβολικές διαδικασίες. Είναι απαραίτητος για την ανάπτυξη των φυτών και είναι ένας σημαντικός περιοριστικός παράγοντας ως θρεπτικό συστατικό, αν και η συγκέντρωση που απαιτείται για την βέλτιστη ανάπτυξη είναι γενικά χαμηλή. Η ταχεία ανάπτυξη των duckweed σε ύδατα εμπλουτισμένα σε θρεπτικά συστατικά είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος για την ελάττωση της συγκέντρωσης του φωσφόρου και του καλίου. Σε συγκεντρώσεις φωσφορικών ιόντων  $PO_4$  από 4 έως 8 mg/l θεωρείται ότι η πρόσληψη φωσφόρου από τα duckweed είναι κορεσμένη. Η ανάπτυξή τους δεν επηρεάζεται έντονα από τη συγκέντρωση του καλίου ή του φωσφόρου όταν τα φυτά φτάσουν σε ένα επαρκές επίπεδο, ενώ ρυθμός ανάπτυξής τους θεωρείται εύλογος σε συγκεντρώσεις φωσφόρου από 6 έως 154 mg/l. (11) Η απουσία της απαιτούμενης ποσότητας φωσφόρου κατά την ανάπτυξη των φυτών μπορεί να προκαλέσει μεταβολή της μορφής της ρίζας (για την αποτελεσματικότερη απορρόφηση συστατικών), συνένωση των ριζών με μυκόρριζα (είδος μύκητα που καθιστά το φυτό πιο ανθεκτικό), και αύξηση των τριχιδίων στη ρίζα. (42) Η διαθεσιμότητα του φωσφόρου στα φυτά ελέγχεται από φυσικές και χημικές ισορροπίες και βιολογικές διεργασίες οι οποίες περιλαμβάνουν την ρόφηση/εκρόφηση, την κατακρήμνιση/διάλυση καθώς και την ορυκτοποίηση. (61) Τα φυτά μπορούν να απορροφήσουν τον φώσφορο, όταν αυτός βρίσκεται σε μορφή ορθοφωσφορικών ιόντων. Σε σειρά πειραμάτων καλλιέργειας υδρόβιων φυτών, παρατηρήθηκε ότι η διαθεσιμότητα του φωσφόρου μειώθηκε κατά την αύξηση του pH του μέσου ανάπτυξης. Αυτό φαίνεται να συμβαίνει λόγω της πρόσδεσης του φωσφόρου με κατιόντα στο διάλυμα, δημιουργώντας δυσδιάλυτα μόρια. Για την καλλιέργεια υδρόβιων και υδροχαρών φυτών η πρόσληψη φωσφόρου βελτιστοποιείται όταν το pH κυμαίνεται μεταξύ 5.5 και 7.2. [33,37]

## **Z) Αναλογία Redfield ( λόγος Αζώτου προς Φώσφορο (N/P))**

Εμπειρικά, η αναλογία αζώτου – φωσφόρου αποτελεί έναν δείκτη σχετικά με τους παράγοντες περιορισμού κατά την ανάπτυξη των φυτών. Σύμφωνα με αναφορές επί της λίπανσης υγρότοπων, προέκυψαν οι παρακάτω συσχετισμοί ανάμεσα σε άζωτο και φώσφορο. Για αναλογία αζώτου προς φώσφορο μικρότερη του 14 (N:P <14) το άζωτο αποτελούσε τον μοναδικό παράγοντα περιορισμού ανάπτυξης των φυτών. Για αναλογία μεγαλύτερη του 16, ως παράγοντας περιορισμού λειτουργούσε το φώσφορο. Στην

περίπτωση αναλογίας περίπου 15, και τα δύο θρεπτικά συστατικά είχαν ρόλο παράγοντα περιορισμού.

Συνηθίζεται να χαρακτηρίζονται οι λίμνες ανάλογα με το λόγο N:P σαν :

Ολιγοτροφικές (N:P >16)

Ευτροφικές (N:P <16)

Παράγοντες περιορισμού μπορεί να αποτελέσουν και το ποσοστό σιδήρου, η ένταση του φωτός ενώ και η αναλογία άνθρακα – αζώτου – φωσφόρου έχει παρατηρηθεί πως καθορίζει την ανάπτυξη των φυτών. Φαίνεται πως ο λόγος αζώτου προς φώσφορο έχει σημαντική επίπτωση στην ανάπτυξη ενός φυτού ενώ το κάθε φυτό έχει συγκεκριμένη βέλτιστη αναλογία ανάπτυξης. Έχει παρατηρηθεί η ανάπτυξη αζωτοποιητικών μικροοργανισμών (Nfixing bacteria) σε περιβάλλοντα στα οποία ο λόγος αζώτου – φωσφόρου είναι χαμηλότερος του 16. [25,39]

### **Η) Μαγνήσιο (Mg)**

Το μαγνήσιο ως συστατικό της χλωροφύλλης, είναι απαραίτητο για την ανάπτυξη των φυτών. Επίσης ενεργοποιεί πολλά ένζυμα υπεύθυνα για διαδικασίες όπως η αναπνοή, η φωτοσύνθεση και η βιοσύνθεση νουκλεοτιδίων (DNA, RNA).

Το μαγνήσιο παίζει σημαντικό ρόλο στην μεταφορά του φωσφόρου στο εσωτερικό του φυτού. Έχει παρατηρηθεί αύξηση της παραγωγής φυτών με την προσθήκη μαγνησίου ενώ έχει αναφερθεί και αύξηση της απορρόφησης φωσφόρου.

### **Θ) Θείο (S)**

Το θείο είναι απαραίτητο συστατικό για την ανάπτυξη όλων των οργανισμών. Ο σημαντικότερος ρόλος του είναι στη σύνθεση αμινοξέων (κυστεΐνη, μεθειονίνη). Είναι επίσης παρόν σε πολλούς ενζυμικούς συμπαράγοντες (θειαμίνη, βιοτίνη, κ.α.). Στα φυτά, εκτός από τη συμμετοχή του σε πρωτεΐνες, αποτελεί και μέσο αντίδρασης σε στρεσογόνους παράγοντες. Η ιδιότητα χηλίωσης μετάλλων του θείου περιορίζει την επίδραση των βαρέων μετάλλων ενώ λειτουργεί και ως άμυνα εναντίον παθογόνων μικροοργανισμών.

Τα ανόργανα θειικά άλατα αποτελούν λιγότερο από το 5% του ολικού θείου που υπάρχει στο έδαφος, ενώ το μεγαλύτερο μέρος του βρίσκεται σε οργανικά μόρια τα οποία δεν είναι άμεσα διαθέσιμα για αφομοίωση από τα φυτά. Η μετατροπή τους σε ανόργανη μορφή καταλύεται από μικροοργανισμούς που υπάρχουν στο έδαφος. Ο περιορισμός θειικών αλάτων

προκαλεί χλώρωση των φύλλων, μείωση της απόδοσης της παραγωγής και χαμηλής ποιότητας προϊόντα.

Τα φυτά έχουν ρόλο κλειδί στον κύκλο του θείου καθώς αποτελούν πρωτογενείς παραγωγούς οργανικών ενώσεων που περιέχουν θείο. Η διαδικασία της φωτοσύνθεσης συνδυάζεται με την αναγωγή θειικών αλάτων ενώ αφομοιώνονται σε κυστεΐνη και μεταβολίζονται περαιτέρω σε μεθειονίνη, γλουταθειόνη και άλλες ενώσεις. Τα φυτά έχουν την ικανότητα να αφομοιώνουν ανόργανο θειικό άλας το οποίο ανάγεται σε σουλφίδιο και στη συνέχεια αφομοιώνεται σε κυστεΐνη. [43]

### **I) Κάλιο (K)**

Το κάλιο είναι απαραίτητο για την εκτέλεση διαδικασιών όπως η κυτταρική έκταση, η κίνηση των φύλλων, το άνοιγμα των στομάτων, η μεταβολική ομοιοστασία και άλλα. Η έλλειψη καλίου εμφανίζεται πρώτα στα γηραιότερα φύλλα. Ταχέως αναπτυσσόμενα *lemna* μπορούν να αντλήσουν μεγάλες ποσότητες καλίου, όμως η ανάγκη απαιτήσεων των φυτών της οικογένειας *Lemnaceae* είναι χαμηλές όταν ικανοποιούνται οι απαιτήσεις στα υπόλοιπα θρεπτικά συστατικά. [28]

### **ΣΤ) Σίδηρος (Fe)**

Ο σίδηρος, σε αντίθεση με το μαγνήσιο, δεν είναι συστατικό της χλωροφύλλης. Είναι όμως απαραίτητο για τη δράση των ενζύμων τα οποία καταλύουν τη σύνθεσή τους. Είναι επίσης συστατικό βιομορίων, όπως η φερρεδοξίνη και τα κυτοχρώματα, και λειτουργούν ως μεταφορείς ηλεκτρονίων σε σημαντικές οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στα φυτά (φωτοσύνθεση, αναπνοή, κ.α.).

Σε σειρά πειραμάτων ανάπτυξης καλλιεργείων *duckweed*, ο εμπλουτισμός του μέσου ανάπτυξης με σίδηρο είχε σαν αποτέλεσμα την σημαντική βελτίωση του βαθμού μικροβιακής διαδοχής. Κατά τη διαδικασία της μικροβιακής διαδοχής, οι μικροβιακές αποικίες που σχηματίζονται και αλληλεπιδρούν με το φυτό και το περιβάλλον, προκαλούν αλλαγές οι οποίες επηρεάζουν την πορεία ανάπτυξης του μικροβιακού πληθυσμού καθαυτού.

Μεγάλη ποσότητα σιδήρου προκαλεί καταστροφή στη δομή των μεμβρανών, στο DNA και τις πρωτεΐνες. Το *L. minor* φαίνεται πως έχει την ικανότητα να απορροφά βαρέα μέταλλα (Fe, Cu, Zn) από υδάτινα οικοσυστήματα με γραμμική απόδοση σε σχέση με την περίοδο

επώασης τους σε ποσοστό που μπορεί να ξεπεράσει ακόμα και το 90% της αρχικής ποσότητας τους.

Κατά την παραγωγή μεθανίου σε αντιδραστήρες διαλείποντος έργου, παρατηρήθηκε πως η προσθήκη Lemnaceae εμπλουτισμένων με σίδηρο προκάλεσε επιτάχυνση της παραγωγής μεθανίου. [21,22]

### **2.3.4 Χρήσεις**

Οι εφαρμογές των φυτών Lemna minor έχουν αναπτυχθεί απότομα τα τελευταία χρόνια. Αυτήν την στιγμή, οι χρήσεις τους χωρίζονται σε δύο κατηγορίες.

#### **1. Επεξεργασία λυμάτων με φυτά Lemna minor**

Στη φύση τα φυτά της οικογένειας Lemnaceae δρουν ως βιοφίλτρα απορρόφησης φωσφόρου και αζώτου. Σε λίμνες που επιδρούν Lemna minor, τα επίπεδα αζώτου και φωσφόρου ελαττώνονται σε ανεκτά περιβαλλοντικά επίπεδα. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως μέσο απομάκρυνσης μολυσματικών ουσιών από λύματα. Η ιδιότητα τους αυτή βρίσκει εφαρμογή σε πολλά συστήματα διαχείρισης λυμάτων, όπως σε καθαρισμό οικιακών λυμάτων με απόδοση απομάκρυνσης του αζώτου κατά kjeldahl (σε μορφή αμμωνίου) έως και 74% και κατά 77% απομάκρυνση ολικού φωσφόρου (15). Η επεξεργασία οικιακών λυμάτων σε λίμνες με duckweed είναι πολύ αποδοτικές σε μικρές αστικές περιοχές και συνίστανται λόγω και χαμηλού κόστους

Επίσης χρησιμοποιούνται στη δευτεροβάθμια επεξεργασία υγρών αποβλήτων, σε λίμνες σταθεροποίησης αποβλήτων και συστήματα αναπαραγωγής ψαριών. Η κεντρική ιδέα αυτού του είδους επεξεργασίας αποβλήτων είναι η καλλιέργεια Lemna χρησιμοποιώντας το προς κατεργασία απόβλητο. Τα συγκεκριμένα φυτά έχουν μεγάλη ικανότητα απορρόφησης ανόργανων συστατικών, υψηλή ανεκτικότητα σε οργανικό φορτίο αλλά και μεγάλες συγκεντρώσεις μικροθρεπτικών συστατικών. Εφόσον απορροφήσουν μεγάλο ποσοστό των προς απομάκρυνση συστατικών στα λύματα, στη συνέχεια, τα συστατικά αυτά απομακρύνονται δια παντός από το σύστημα, απομακρύνοντας μέρος των φυτών (συγκομιδή). Εκτός από τα συστατικά που απορροφούν, κατά την ανάπτυξη τους τα duckweed, λόγω της κάλυψης της επιφάνειας του συστήματος, προκαλούν επίσης και μείωση του BOD και των αιωρούμενων στερεών. Έχει αναφερθεί επίσης πως σε σχέση με άλλα υδρόβια φυτά, η οικογένεια των Lemnaceae έχει την ικανότητα να αφομοιώνει τις



μεγαλύτερες ποσότητες των μακροστοιχείων N, P, K, Ca και Mg. Εκτός από τον καθαρισμό των λυμάτων, το γεγονός ότι η συγκεκριμένη διαδικασία παράγει και ένα παραπροϊόν με πλούσια σε πρωτεΐνη βιομάζα την καθιστά συμφέρουσα σε σχέση με άλλες. [23,26]

## **2. Χρήση των φυτών *Lemna minor* ως τροφή για άλλους οργανισμούς**

Λόγω της θρεπτικής αξίας των duckweed, έχει μελετηθεί αρκετά η δυνατότητα χρήσης τους ως ζωοτροφή. Χρησιμοποιούνται αρκετά συχνά ως μέρος της διατροφής πτηνών (πάπιες) σε ιχθυοκαλλιέργειες, στη αρχική του ακατέργαστη μορφή αλλά και ως συστατικό σε άλλη μορφή τροφής .

Έχουν διεκπεραιωθεί εργαστηριακές μελέτες όσον αφορά τη χρήση των *Lemna* ως τροφή σε ιχθυοκαλλιέργειες για διάφορα είδη ψαριών όπως διάφορα είδη κυπρίνων, ψάρια βυθού και κιχλίδες. Η διατροφή με duckweed φαίνεται να έχει θετική επίδραση στην ανάπτυξη των ψαριών καθώς το τελικό βάρος τους προκύπτει μεγαλύτερο ακόμα και κατά 3 φορές σε σχέση με άλλες ευρέως χρησιμοποιούμενες τροφές. Το ποσοστό θρεπτικών που απορροφάται από τα ζώα μέσω του πεπτικού συστήματος είναι περίπου 50%. Τα εναπομείναντα θρεπτικά συστατικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως λίπανση για καλλιέργειες duckweed.

Το φυτό *Lemna minor* μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν ένα γρήγορο, οικονομικά προσιτό και εύκολα αναπαραγωγίμο φυτικό σύστημα για τη μελέτη των αλληλεπιδράσεων μεταξύ ξενιστών και παθογόνων οργανισμών. Αποτελεί μια εναλλακτική επιλογή για τη μελέτη τοξικών παραγόντων και μπορεί δυνητικά να χρησιμοποιηθεί σε ευρείας κλίμακας ελέγχου για την ανακάλυψη αντιμικροβιακών χημικών.

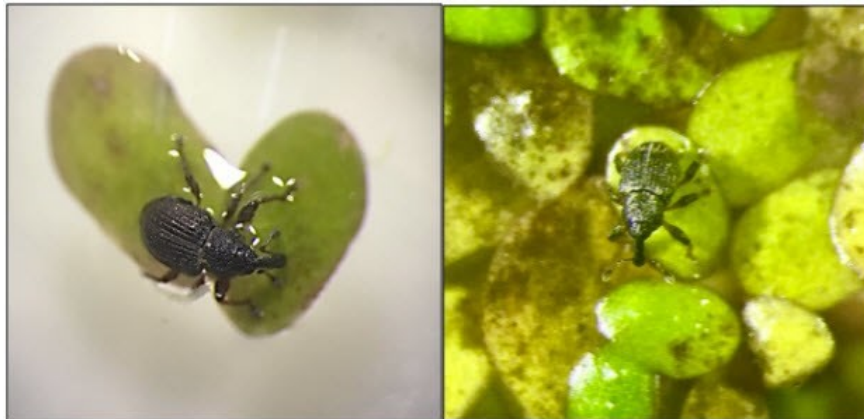
## **3. Χρήση για μελέτη τοξικότητας**

Έχει χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη τοξικότητας που παρουσιάζουν τα φυτοπροστατευτικά προϊόντα Linuron και Monolinuron τα οποία χρησιμοποιούνται για την προστασία των φυτών και της γεωργικής παραγωγής από διάφορα παράσιτα και ασθένειες , ενώ φαίνεται πιθανή η χρήση του για την παραγωγή μεθανόλης, αιθανόλης και βιοαερίου, ιδίως φυτών με περιεχόμενα υψηλά ποσοστά αμύλου. [19,20]

### 2.3.5 Οργανισμοί που τα προσβάλλουν

Υπάρχουν αρκετοί οργανισμοί που προσβάλλουν τα υδροχαρή φυτά και επηρεάζουν σημαντικά την έκβαση των καλλιεργειών τους. Παρακάτω αναφέρονται μερικοί από τους πιο σημαντικούς και επιβλαβείς για την ανάπτυξη των φυτών οργανισμούς. [39]

#### □ Duckweed fly, *Lemnaphila scotlandae* Cresson



Εικόνα 7: Είδος *Lemnaphila scotlandae*

Το είδος *Lemnaphila scotlandae*, γνωστό και ως μύγα των duckweed αναπτύσσεται κυρίως στα φυτά *lemna minor* και αποτελεί ένα από τα μικρότερα έντομα που προσβάλλουν υδροχαρή φυτά. [10,24]

Τα έντομα έχουν μικρό μέγεθος (περίπου 1,2 mm) και προσομοιάζουν με μικρές μύγες, συνήθως μαύρου χρώματος με κίτρινα σημάδια στα πόδια. Τρέφονται από το φυτό αποξέοντας το ανώτερο μέρος της επιφάνειας του φύλλου χρησιμοποιώντας τους άκανθες που διαθέτουν στο στόμα τους, δημιουργώντας διακριτές παράλληλες κοιλότητες.

#### □ Duckweed weevil, *Tanysphyrus lemnae* Paykull



Εικόνα 9: Είδος Duckweed weevil

Το duckweed weevil είναι ένα από τα πιο κοινά και διαδεδομένα φυτοφάγα παράσιτα που προσβάλλουν τα duckweed. Τα θηλυκά έντομα γενούν τα αυγά τους κατευθείαν μέσα στο φύλλο ανοίγοντας αρχικά μια τρύπα. Τα αυγά τοποθετούνται από το επάνω μέρος το φύλλου και γενικά πληρούν το χώρο ανάμεσα στην πάνω και κάτω επιφάνεια. Στη συνέχεια το θηλυκό κλείνει την τρύπα και τα αυγά εκκολάπτονται σε περίπου μία εβδομάδα παράγοντας μια διάφανη προνύμφη μήκους 0,5 mm. Η νεοεκολλαπτόμενη προνύμφη αρχίζει να τρέφεται άμεσα. Κάθε προνύμφη καταναλώνει το μεγαλύτερο μέρος του φύλλου μέσα σε 12 ώρες. Εάν στο αρχικό φύλλο συνδέονται και άλλα. Τότε η προνύμφη μεταφέρεται άμεσα στο επόμενο, διαφορετικά μπορεί να μετακινηθεί μέσω του νερού. Οι προνύμφες καταναλώνουν το πράσινο μέρος των φύλλων, αφήνοντας το μεγαλύτερο μέρος της επιδερμίδας του φυτού ακέραιη. Καθώς η προνύμφη αναπτύσσεται, προσλαμβάνει ένα ημιδιάφανο μπεζ χρώμα με το μήκος της να φτάνει τα 3 mm. [31,44]

#### □ **Waterlily Aphid, *Rhopalosiphum nymphaeae* (Linnaeus)**



Εικόνα 8: Είδος *waterlily aphid*

Το συγκεκριμένο έντομο είναι ευρέως καταμεμημένο και είναι γνωστή η ιδιότητα του να προσβάλλει υδροχαρή φυτά. Οι αφίδες απορροφούν τους χυμούς των φύλλων του φυτού, αλλά μπορεί και να προκαλέσει ζημιά στο φυτό μεταφέροντας ιούς. Το συγκεκριμένο έντομο μπορεί να επιφέρει μεγάλη καταστροφή σε υδρόβια συστήματα και είναι επίσης υπεύθυνο για τη μεταφορά τουλάχιστον πέντε ιών που προσβάλλουν φυτά.

Τα θηλυκά διαθέτουν φτερά και μπορούν να μετακινηθούν από υδρόβια συστήματα σε δέντρα κατά τα τέλη του φθινοπώρου για να γεννήσουν εκεί τα αυγά τους. Εκεί μπορούν να παραμείνουν κατά τη διάρκεια του χειμώνα ώστε οι μεταγενέστερες γενιές να τραφούν από τα δέντρα την άνοιξη. Από τα μέσα μέχρι τα τέλη του καλοκαιριού, οι αφίδες μεταφέρονται σε υδροχαρή φυτά. Ενώ κατά τη διάρκεια της ζωής τους στα δέντρα, είναι ωτόκα, στο περιβάλλον των υδρόβιων φυτών εκκολάπτουν τα αυγά στο σώμα τους και γεννούν μικρά έντομα. Τα συγκεκριμένα θηλυκά δεν έχουν φτερά σε αντίθεση με αυτά που μεταναστεύουν στα καρποφόρα δέντρα. Η *waterlily aphid* μπορεί να περπατήσει επάνω στην επιφάνεια του νερού αλλά και κάτω από το νερό ώστε να τραφεί. Ειδικευμένα τριχίδια στο σώμα της παγιδεύουν φυσαλίδες αέρα όσο το έντομο βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια του νερού.

#### □ Μύκητες (fungi)



Εικόνα 9: Μύκητες

Υπάρχουν αρκετές αναφορές ότι οι μύκητες μολύνουν τα φυτά *lemna minor* και ο πιο συνηθισμένος και επιδραστικός μύκητας ονομάζεται *Pythium myriotylum*.

Ο συγκεκριμένος μύκητας φαίνεται να προσβάλλει τα φυτά που αναπτύσσονται σε εξωτερικές δεξαμενές αλλά και σε φυσικές συνθήκες σε λίμνες. Η ποσότητα των *lemna minor* που θανατώθηκαν από τον μύκητα αυξήθηκε εκθετικά με αποτέλεσμα ολόκληρες δεξαμενές να νεκρώνουν σε περίοδο μερικών ημερών έως ενός μήνα. Από τα έξι είδη duckweed τα

οποία ερευνήθηκαν σε εργαστήριο, τα είδη *Lemna gibba*, *Lemna minor* και *Spirodela polyrrhiza* αποτέλεσαν τα περισσότερα επιρρεπή σε μολύνσεις από μύκητες. Η βέλτιστη θερμοκρασία για μόλυνση και θανάτωση των duckweed παρουσιάστηκε στους 32 °C. [30]

Ο μύκητας *Pythium myriophyllum* είναι ένα από τα πιο κοινά είδη *Pythium* που βρίσκονται σχεδόν σε όλο τον κόσμο καταλαμβάνοντας εδάφη σε περιοχές με υγρό κλίμα στο φυσικό περιβάλλον, σε αγροτικές περιοχές, υδάτινα οικοσυστήματα και συστήματα άρδευσης. Συχνά προξενούν τη σήψη των σπορόφυτων και των ριζών πολλών φυτών, συμπερασματικά, αυτό το είδος δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ως σχετιζόμενο αποκλειστικά με τα *lemna*. [46]

## 3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

### 3.1 Υλικά και μέθοδοι

#### 3.1.1 Διάλυμα Hoagland και απόβλητο

##### Διάλυμα Hoagland

Γνωστό θρεπτικό διάλυμα που πήρε το όνομά του το 1938 από τους δημιουργούς: Dennis R. Hoagland και Daniel I. Arnon.

Μία έρευνα το 2004 έδειξε ότι η αύξηση της συγκέντρωσης του Hoagland στο 200% προκάλεσε τα φυτά να ανθίσουν οχτώ ημέρες νωρίτερα από τα φυτά σε χαμηλές συγκεντρώσεις, αυξάνοντας το συνολικό ξηρό βάρος και την επιφάνεια των φύλλων. Το Hoagland έχει υιοθετηθεί ευρέως στην επιστημονική έρευνα και τις γεωργικές μελέτες. Οι ερευνητές το χρησιμοποιούν ως τυποποιημένο θρεπτικό διάλυμα για τη διεξαγωγή πειραμάτων σχετικά με τη διατροφή, την ανάπτυξη και τις αντιδράσεις των φυτών σε διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες.

Τα βασικά στοιχεία του διαλύματος Hoagland

- $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
- $\text{KH}_2\text{PO}_4$
- $\text{KNO}_3$

Στο συγκεκριμένο πείραμα μας ενδιαφέρουν οι συγκεντρώσεις που έχει το διάλυμα σε άζωτο και φωσφορικά ιόντα. Οι συγκεντρώσεις που παράγεται είναι:

- $\text{NO}_3 = 100 \text{ (mg/L)}$
- $\text{PO}_4 = 20 \text{ (mg/L)}$

##### Απόβλητο

Το απόβλητο που χρησιμοποιείται στην εκτέλεση της διπλωματικής εργασίας προέρχεται από την έξοδο ενός αναερόβιου αντιδραστήρα που έχει ως πρώτη ύλη το άμυλο μετά από υδρόλυση. Επειδή το συγκεκριμένο απόβλητο είχε αρκετά υψηλές τιμές σε κάποια στοιχεία μετά από την έξοδο τοποθετούταν σε δοχεία ώστε να αντιδρά στο χώρο του εργαστηρίου και πρακτικά, με τον αέρα, με στόχο την οξυγόνωση του, πριν προστεθεί στο σύστημα μας για επεξεργασία. Για αυτό άλλωστε οι τιμές στις αναλύσεις που έγιναν δεν είναι

Σελίδα

συγκεκριμένες, αλλά ένα εύρος αυτών για όλες τις τιμές που έπαιρναν τα στοιχεία κατά τη διάρκεια ολόκληρης της πειραματικής διαδικασίας. Παρακάτω απεικονίζονται τα χαρακτηριστικά του αποβλήτου.

**Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά αποβλήτου μετά την έξοδο από αναερόβιο αντιδραστήρα**

Χαρακτηριστικά	Αποτελέσματα
Πρώτη ύλη	Άμυλο μετά από υδρόλυση
Ροή	50-250 ml/d
pH	7,65-8,84
Αγωγιμότητα	1.381- 2.170 $\mu\text{S}/\text{cm}$
	0,3 – 7 mg/L
TN	85,8 – 353,4 mg/L
TOC	93,69- 471,6 mg/L

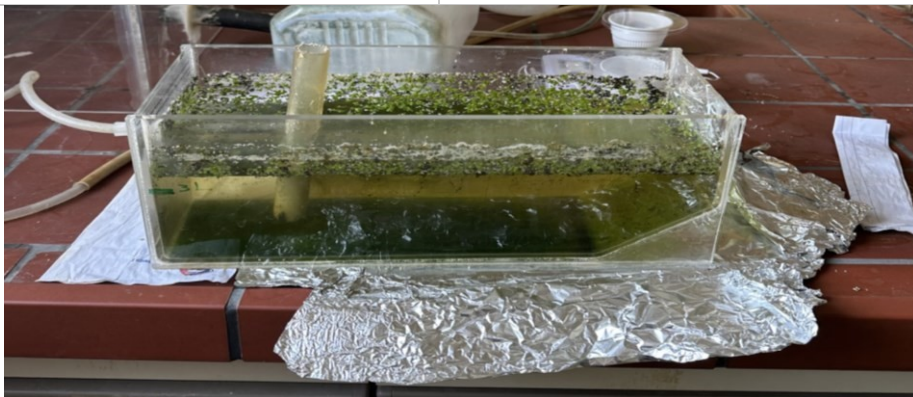
### 3.1.2 Αντιδραστήρας

Για την εκτέλεση της διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιείται ένας μικρός αντιδραστήρας συνεχούς λειτουργίας με δυνατότητα ροής εισόδου και εξόδου για περίπου 200 ημέρες αναλύσεων. Παρακάτω παρουσιάζεται ένας πίνακας για όλα τα χαρακτηριστικά του αντιδραστήρα.

**Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά του αντιδραστήρα συνεχούς λειτουργίας**

Χαρακτηριστικά	Αποτελέσματα
<b>Εμβαδόν επιφάνειας αντιδραστήρα</b>	$C(35,5\text{cm} \times 13\text{cm}) = 0,461 \text{ m}^2$
<b>Συνολικός όγκος αντιδραστήρα</b>	$(0,461\text{m}^2 \times 12\text{cm}) = 5,538 \text{ L}$
<b>Πειραματικός όγκος αντιδραστήρα</b>	<b>4L</b>
<b>Ροή εισόδου</b>	<b>50-250 ml/d</b>

Χαρακτηριστικά	Αποτελέσματα
Ροή εξόδου	50-250 ml/d
Φωτεινότητα	1730 Lux



Εικόνα 10: Αντιδραστήρας συνεχούς λειτουργίας

### 3.1.3 Αναλύσεις εργαστηρίου

Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία γίνονται αναλύσεις τόσο στο απόβλητο πριν τη χρησιμοποίησή του, καθώς όπως αναφέρθηκε πιο πάνω αφήνεται να αντιδράει με τον αέρα για οξυγόνωση οπότε οι τιμές του συνεχώς αλλάζουν, αλλά και στο υγρό που υπάρχει μέσα στον αντιδραστήρα. Παρακάτω αναλύονται οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται.

#### □ **Ανάλυση Νιτρικών ιόντων (NO<sub>3</sub>) – Ultraviolet Spectrophotometric Screening Method**

Η παραπάνω μέθοδος χρησιμοποιείται και στο απόβλητο και στο υγρό του αντιδραστήρα για την ανάλυση των νιτρικών ιόντων (NO<sub>3</sub>). [10]

Η απορρόφηση ακτινοβολίας UV από τα νιτρικά ιόντα γίνεται στα 220 nm και η καμπύλη βαθμονόμησης NO<sub>3</sub> ακολουθεί το νόμο του Beer για συγκεντρώσεις ως 11 mg N/L.

Αρχικά γίνεται η μέτρηση σε μήκος κύματος  $\lambda=220\text{nm}$  για τον προσδιορισμό NO<sub>3</sub> στο δείγμα, όμως δεν θεωρείται ακριβής γιατί αυτό περιέχει διαλυμένη οργανική ύλη. Συνεπώς, απαιτείται δεύτερη, διορθωτική μέτρηση σε μήκος κύματος  $\lambda=275\text{nm}$  ώστε να διευκρινιστεί το μέγεθος των παρεμβολών.



Η παραπάνω μέθοδος θεωρείται σωστή, εφόσον για τα αποτελέσματα από τις απορροφήσεις των δύο μετρήσεων ισχύει ότι: Absorption [275nm] < 10% absorption [220nm]

**Διαδικασία:**

- Ρίχνεται δείγμα 50 ml με συγκέντρωση νιτρικού αζώτου έως και 7 mg/L σε ογκομετρική φιάλη.
- Προσθήκη 1ml διαλύματος HCL συγκέντρωσης 1N
- Ανάδευση για 1 λεπτό
- Μεταφορά του δείγματος σε ειδική πλαστική και διαυγής κυψελίδα
- Μηδενισμός του μηχανήματος με τυφλό δείγμα
- Μέτρηση της απορρόφησης της ακτινοβολίας σε  $\lambda=220\text{nm}$
- Διορθωτική μέτρηση της απορρόφησης της ακτινοβολίας σε  $\lambda=275\text{nm}$

Τέλος, σχεδιάζεται η καμπύλη βαθμονόμησης  $\text{NO}_3$  ακολουθώντας τον νόμο του Beer.

□ **Ανάλυση αμμωνιακών ιόντων ( $\text{NH}_4^+$ ) Nessler Method**

Η παραπάνω μέθοδος χρησιμοποιείται και στο απόβλητο και στο υγρό του αντιδραστήρα για την ανάλυση των αμμωνιακών ιόντων ( $\text{NH}_4^+$ ).

Αρχικά, η Nessler Method δίνει αποτελέσματα για δείγματα που έχουν συγκέντρωση Αμμωνιακών ιόντων έως και 100 mg/L. Κάποιες φορές που το δείγμα ξεπερνούσε το όριο, ακολουθούσε αραίωση και στο τελικό αποτέλεσμα ο αντίστοιχος πολλαπλασιασμός.

**Διαδικασία:**

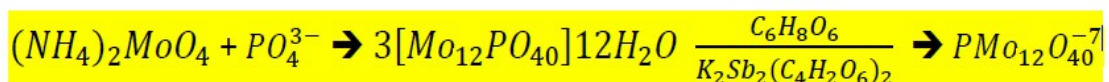
- Τυφλό δείγμα των 25 ml τοποθετείται σε ειδική πλαστική και διαυγή κυψελίδα που μεταφέρεται στο μηχάνημα, για μηδενισμού του.
- Λαμβάνεται σε ογκομετρική φιάλη 1ml από το δείγμα (αποβλήτου ή αντιδραστήρα)
- Προστίθενται στη φιάλη 9ml από το αντιδραστήριο Nessler Kit 1 και 4 σταγόνες από το αντιδραστήριο Nessler Kit 2.
- Ανάδευση για 1'
- Μεταφορά του τελικού δείγματος σε ειδική πλαστική και διαυγής κυψελίδα □ Μέτρηση της απορρόφησης της ακτινοβολίας  $\text{NH}_4$  σε συγκέντρωση.

Πρακτικά, όταν προστίθενται τα αντιδραστήρια στο δείγμα δημιουργείται αντίδραση ανάμεσα στην Αμμωνία (NH<sub>3</sub>) και αυτά, προκαλώντας στο τελικό δείγμα ένα κίτρινο χρώμα. Η ένταση του κίτρινου αυτού φωτός στο τελικό δείγμα είναι εκείνη που αποτυπώνεται από ένα συμβατό φωτόμετρο σε συγκέντρωση αμμωνιακών ιόντων (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), όπου είναι το επιθυμητό αποτέλεσμα.

- **Ανάλυση ορθοφωσφορικών ιόντων (PO<sub>4</sub>) - Molybdenum Blue/Ascorbic Acid**

**Μέθοδος που χρησιμοποιείται: [27,33,44]**

Μέθοδος Ασκορβικού οξέος με βάση την παρακάτω αντίδραση:



**Ανάλυση:**

Το μολυβδαινικό αμμώνιο και το τρυγικό κάλιο αντιμονίου σε όξινο περιβάλλον αντιδρούν με τα ορθοφωσφορικά ιόντα δημιουργώντας το ετεροπολυμεταλλικό οξύ το οποίο παρουσία ασκορβικού οξέος εμφανίζει το έντονο μπλε χρώμα, του οποίου η ένταση αποτυπώνεται από φωτόμετρο ως συγκέντρωση Ορθοφωσφορικών ιόντων (PO<sub>4</sub>) **Διαδικασία:**

- Λαμβάνονται 20 ml όγκος διαλύματος από το δείγμα
- Προσθήκη 2 αντιδραστηρίων Kit από 1 ml το καθένα
- Προσθήκη 3 ml H<sub>2</sub>O
- Ανάδευση 1'
- Το τελικό δείγμα αποκτά χρώμα μπλε
- Μέτρηση της έντασης του σε φωτόμετρο

Η ένταση του παραπάνω μπλε χρώματος στο τελικό δείγμα αποτυπώνεται από το φωτόμετρο σαν συγκέντρωση φωσφορικών ιόντων στο δείγμα. (mg/L)

## □ Total Kjeldahl Nitrogen – TKN

Η παραπάνω μέθοδος χρησιμοποιείται και στο απόβλητο και στο υγρό του αντιδραστήρα για τον προσδιορισμό της πρωτεΐνης του δείγματος. Μπορεί , όμως να γίνει και σε στερεά δείγματα. [32]

### **Αντιδραστήρια:**

- Διάλυμα εξουδετέρωσης Scrubber: 300 gr NaOH, 600 gr  $Na_2CO_3$ , δείκτης Bromothymol blue, 3 L  $H_2O$
- Καταλύτης χώνευσης: 100 gr  $K_2SO_4$ , 3 gr  $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ , 3 gr TiO
- Διάλυμα stock Urea: 1,056 gr/L
- Πυκνό  $H_2SO_4$
- NaOH 32%: 320 gr/L
- NaOH 0,1 M: 1 gr/250 ml νερό
- $H_3BO_3$  2%: 20 gr  $H_3BO_3$ , 3 gr KCl (100 °C) σε 1 L νερό
- $H_2SO_4$  0,01 M
- $Na_2CO_3$  0,05 N: 2,5 gr/L
- Δείκτης bromocresol green/methyl red

Η παραπάνω μέθοδος περιλαμβάνει τρία βασικά στάδια, με τη σειρά που αναγράφονται:

## **Χώνευση (digestion) -> Απόσταξη (distillation) -> Τιτλοδότηση (titration)**

### **A. Χώνευση (digestion)**

- Λαμβάνεται τυφλό δείγμα των 25ml μόνο με απιονισμένο νερό
- Λαμβάνεται δείγμα 5 ml stock urea + 20 ml απιονισμένο νερό
- Προσθήκη σε κάθε δείγμα 3,71 gr σκόνη καταλύτη
- Προσθήκη σε κάθε δείγμα 8 ml πυκνό θειικό οξύ
- Χώνευση στην συσκευή για 55 λεπτά
- Αφήνεται να κρυώσουν τα δείγματα μετά την χώνευση για 15 λεπτά

Σε αυτό το στάδιο, το οργανικό άζωτο N μετατρέπεται τελικά σε αμμωνιακά ιόντα  $NH_4^+$

## Β. Απόσταξη (distillation)

- Γίνεται προθέρμανση της συσκευής απόσταξης και καθαρισμός της με 150ml απιονισμένο νερό για να καθαρίσουν οι σωλήνες.
- Προσθήκη στα δείγματα 50ml νερού
- Προσθήκη στα δείγματα 40ml NaOH
- Προσθήκη στα δείγματα 50ml H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>
- Απόσταξη για 50 δευτερόλεπτα σε κάθε δείγμα

Σε αυτό το στάδιο, τα αμμωνιακά ιόντα NH<sub>4</sub><sup>+</sup> μετατρέπονται σε αμμωνία NH<sub>3</sub>, καθώς στο τέλος της παραπάνω διαδικασίας, υπάρχει κωνική φιάλη με διάλυμα υποδοχής βορικού οξέος BOH<sub>3</sub> που δεσμεύει την NH<sub>3</sub> και το μετατρέπει σε NH<sub>4</sub><sup>+</sup>.

## Γ. Τιτλοδότηση (titration)

Στα τελικά διαλύματα, γίνεται προσθήκη αραιού H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> για να αντιδράσει το βορικό οξύ για μετατροπή από βασικό σε όξινο και το χρώμα του δείκτη bromocresol green/methyl red να αλλάξει από μπλε σε ροζ. [47,48]

## Υπολογισμοί των αναλύσεων:

$$\text{Recovery\%} = \frac{\left[ \frac{(\text{ml urea} - \text{ml blank}) * N_{H_2SO_4} * 14,007}{5} \right]}{0,4925}$$

$$\text{Sample [N gr/L]} = \frac{[(\text{ml sample} - \text{ml blank}) * N_{H_2SO_4} * 14,007]}{V_{\text{sample}}(\text{ml})}$$

**Υπολογισμός NH<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:** Ο υπολογισμός του N γίνεται με 15 ml διαλύματος Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> και 22,5 ml νερό. Το διάλυμα τιτλοδοτείται με H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> έως pH = 5. Ακολουθεί θέρμανση και βρασμός του διαλύματος για 4 λεπτά (σε κλειστό δοχείο ώστε να παραμένουν οι υδρατμοί μέσα). Το διάλυμα τιτλοδοτείται ξανά έως pH =4,5.

$$N \text{ H}_2\text{SO}_4 = (A * B) / (53 * C)$$

$$A = \text{gr Na}_2\text{CO}_3/\text{L} (2,5)$$

$$B = \text{ml Na}_2\text{CO}_3 (15)$$

$$C = \text{Σύνολο ml H}_2\text{SO}_4 \text{ έως pH} = 4,5$$

## □ **Ανάλυση Βιομάζας**

### **Στόχος:**

Η μέτρηση της βιομάζας και του αριθμού φυτών στον αντιδραστήρα κατά τη διάρκειας του πειράματος. [31]

### **Μέθοδος:**

#### **Digital analysis and human evaluation**

#### **(Ψηφιακή ανάλυση και ανθρώπινη αξιολόγηση)**

Η ανάλυση βιομάζας στον αντιδραστήρα έγινε με φωτογραφικό και εμπειρικό τρόπο. Ο αντιδραστήρας χωρίστηκε σε 8 ίσα μέρη και φωτογραφείται ένα εξ αυτών (το ίδιο σε κάθε μέτρηση).

Γίνεται μέτρηση του αριθμού των φυτών ψηφιακά μέσω μέτρησης ένα προς ένα σε ψηφιακή εικόνα.

Υποθέτοντας ότι τα φυτά είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα στην επιφάνεια του αντιδραστήρα, η μέτρηση γίνεται αναλογικά για ολόκληρο τον αντιδραστήρα.

(Πολλαπλασιάζεται ο αριθμός των φυτών επί 8).

### **3.1.4 Πειραματική διαδικασία**

Η διπλωματική εργασία διήρκησε 203 ημέρες μετρήσεων και πιο συγκεκριμένα η πρώτη μέτρηση έγινε στις 13 Απριλίου 2023. Κατά την εκτέλεση των πειραμάτων μελετήθηκαν οι συνθήκες ανάπτυξης του φυτού *Lemna minor* και η τριτογενής επεξεργασία του αποβλήτου που εισέρχεται στον αντιδραστήρα. Ειδικότερα, αναλύονταν οι συνθήκες διαβίωσης των φυτών (pH, αγωγιμότητα, αμμωνιακά ιόντα, νιτρικά ιόντα, φωσφορικά ιόντα, θερμοκρασία, ολικό άζωτο, ολικός άνθρακας κλπ) και στο υγρό του αντιδραστήρα, αλλά και στο ίδιο το

απόβλητο πριν προστεθεί σε αυτόν, και τέλος, η ανάπτυξη της βιομάζας των φυτών εντός του αντιδραστήρα.

Το πείραμα έχει χωριστεί σε τέσσερα υποπειράματα (φάσεις), καθώς όπως έχει αναλυθεί εκτενέστερα στο θεωρητικό κεφάλαιο, οι αλλαγές των συνθηκών στον αντιδραστήρα συνεχούς λειτουργίας με την ύπαρξη των φυτών *lemna minor* πρέπει να γίνονται σταδιακά και να αφήνεται περίοδος προσαρμογής κάθε φορά.

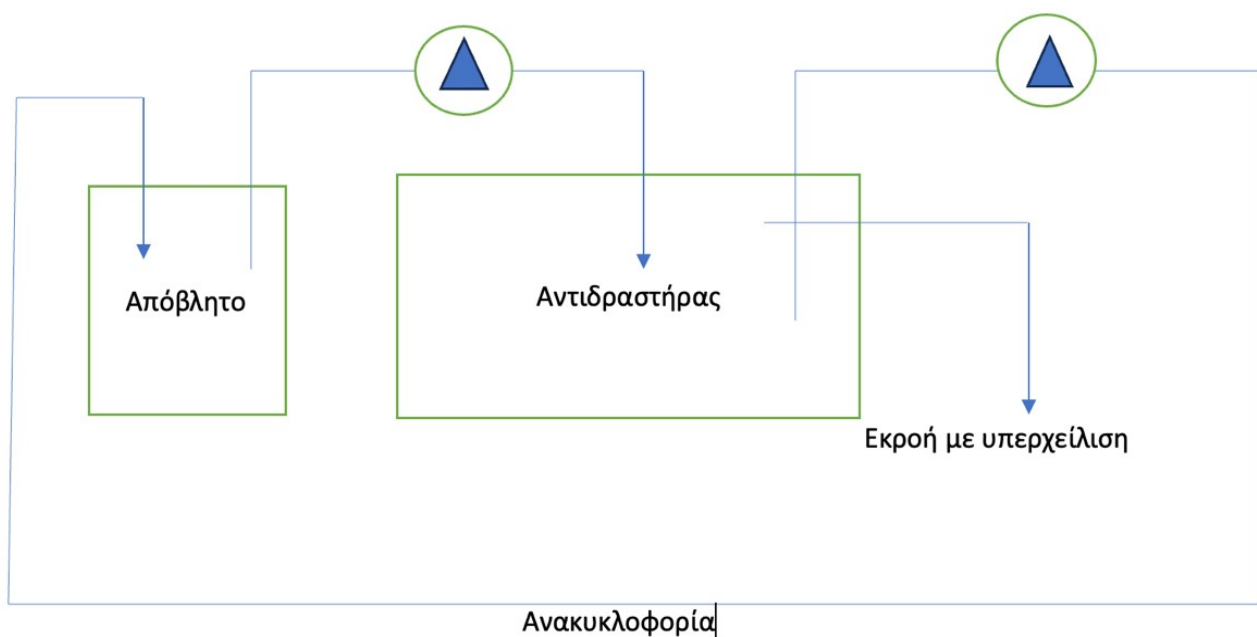
Αυτό φαίνεται και υπολογιστικά με τα αποτελέσματα των αναλύσεων και στις τέσσερις διαφορετικές φάσεις που χωρίστηκε η διπλωματική εργασία, αφού κάθε αρχική τιμή διαφέρει κατά πολύ από την τελική σε κάθε φάση, γεγονός που δηλώνει ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος παραμονής των φυτών με τις ίδιες συνθήκες ( πχ το υγρό που ζουν), τόσο καλύτερα είναι τα συμπεράσματα που μπορούν να βγουν από τις αναλύσεις.

Πιο συγκεκριμένα, οι τέσσερις φάσεις όπου χωρίστηκε η συγκεκριμένη διαδικασία είναι οι εξής:

- Αναλύσεις αντιδραστήρα με προσθήκη του θρεπτικού υγρού Hoagland για 42 ημέρες (ημέρα 1 έως 42)
- Αναλύσεις αποβλήτου και αντιδραστήρα με παροχή αποβλήτου  $Q=50$  ml/d για 28 ημέρες (ημέρα 43 έως 69)
- Αναλύσεις αποβλήτου και αντιδραστήρα με παροχή αποβλήτου  $Q=200-250$  ml/d και ταυτόχρονα ανακυκλοφορία για 46 ημέρες ανάλυσης (ημέρα 72 έως 106)
- Αναλύσεις αντιδραστήρα με παροχή αποβλήτου  $Q= 100$  ml/d και ταυτόχρονα ανακυκλοφορία για 21 ημέρες (ημέρα 176 έως 204)

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής και οι φάσεις που χρησιμοποιούνταν:

### Διάγραμμα ροής



Πίνακας 3.1: Διάγραμμα ροής

Φάση πειράματος	Influent	Αντλία ανακύκλωσης	Παροχή ανακυκλωφoρίας	Effluent
1	Υγρό Hoagland	Κλειστή	-	Αντλία εξόδου
2	Απόβλητο	Κλειστή	-	Αντλία εξόδου
3	Απόβλητο	Ανοιχτή	5,2 L/d	Εκροή με υπερχείλιση
4	Απόβλητο	Ανοιχτή	5,2 L/d	Εκροή με υπερχείλιση

Με τη λήξη του κάθε πειράματος γινόταν απολογισμός και σχεδιασμός του επόμενου.



## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

### 4.1 Αναλύσεις με προσθήκη θρεπτικού υγρού Hoagland

Οι αναλύσεις που παρουσιάζονται παρακάτω αφορούν 42 ημέρες , όπου στον αντιδραστήρα συνεχούς λειτουργίας προστέθηκαν 4L υγρού Hoagland και τα φυτά *lemna minor*. Το υγρό Hoagland παρασκευάστηκε ώστε η συγκέντρωση του φωσφορικών ιόντων PO<sub>4</sub> να είναι περίπου 20 mg/L και των νιτρικών ιόντων NO<sub>3</sub> 100 mg/L.

Στην συγκεκριμένη περίοδο , μελετήθηκαν οι τιμές Φωσφορικών ιόντων (PO<sub>4</sub>)και Νιτρικών ιόντων (NO<sub>3</sub>), η ποσοστιαία διαφορά ανάμεσα στην είσοδο του αντιδραστήρα και στην έξοδο , αλλά και η ανάλυση βιομάζας και αριθμού των φυτών που υπήρχαν στην επιφάνεια του αντιδραστήρα. [37]

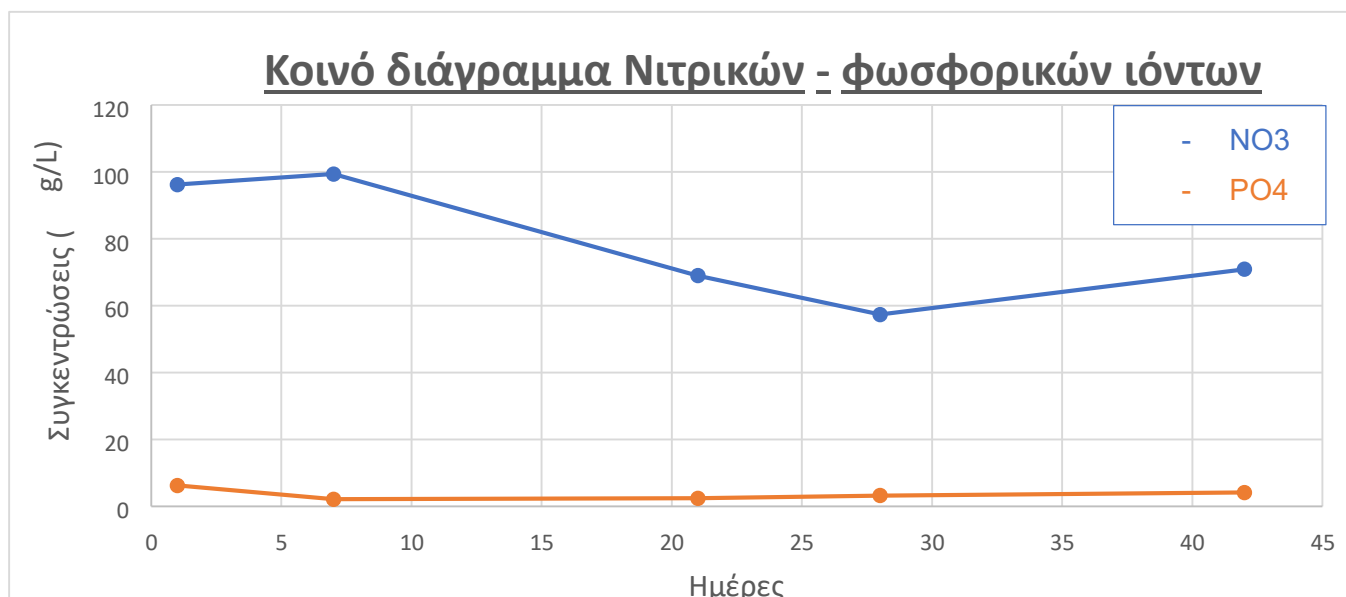
#### 4.1.1 Αναλύσεις θρεπτικών συστατικών στον αντιδραστήρα

Συγκεντρώσεις στην είσοδο του αντιδραστήρα ( παρασκευή του υγρού Hoagland ) (mg/L):

- NO<sub>3</sub> = 100
- PO<sub>4</sub> = 20

Συγκεντρώσεις στην έξοδο του αντιδραστήρα για τις 42 ημέρες μετρήσεων (mg/L)

- 1η ημέρα: 96,25 και 6,2
- 7η ημέρα: 99,38 και 2,1
- 21η ημέρα: 68,97 και 2,4
- 28η ημέρα: 57,36 και 3,2
- 42η ημέρα: 70,89 και 4,3



**Διάγραμμα 4.1:** Συγκεντρώσεις νιτρικών – φωσφορικών ιόντων (Φάση 1, αντιδραστήρας)

Υπολογίστηκε η ποσοστιαία διαφορά ανάμεσα στην είσοδο και την έξοδο του αντιδραστήρα για τις 42 ημέρες μετρήσεων με το θρεπτικό υγρό Hoagland.

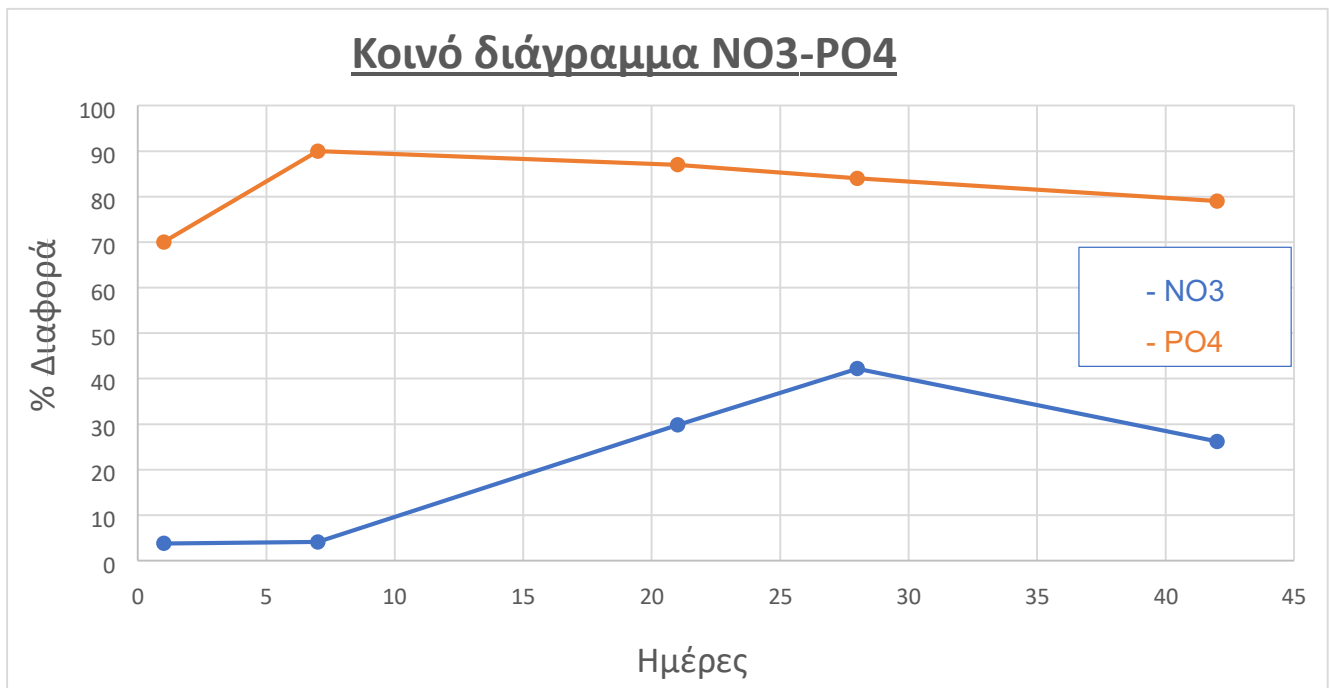
**Ποσοστιαία διαφορά (%) σε είσοδο- έξοδο [(C<sub>in</sub>-C<sub>out</sub>)/C<sub>in</sub>]**

**NO<sub>3</sub>**

- 1<sup>η</sup> ημέρα : 3,8%
- 7η ημέρα : 4,1%
- 21η ημέρα: 29,8% □ 28η ημέρα: 42,2%
- 42η ημέρα: 26,2%

**PO<sub>4</sub>**

- 1η ημέρα: 70%
- 7η ημέρα: 90%
- 21η ημέρα: 87%
- 28η ημέρα: 84%
- 42η ημέρα: 79%

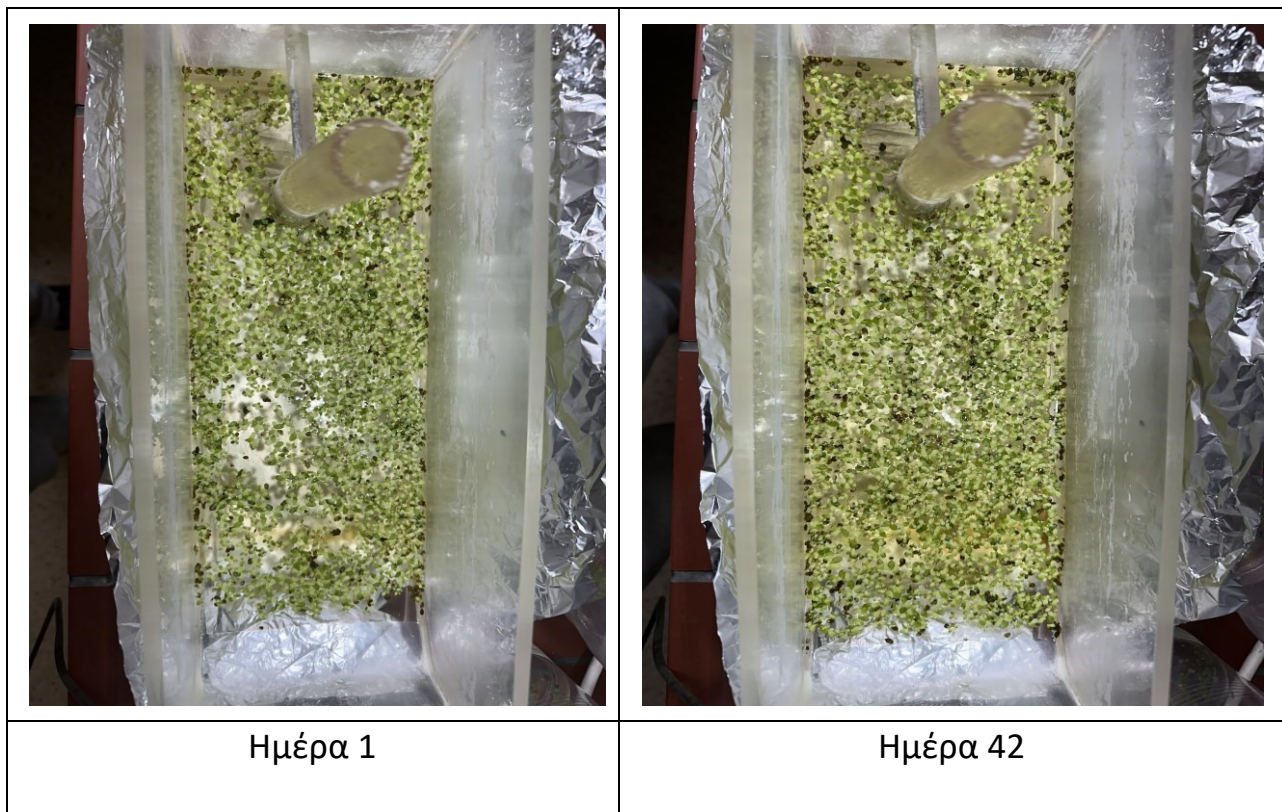


**Διάγραμμα 4.2:** Ποσοστιαία μεταβολή νιτρικών – φωσφορικών ιόντων (Φάση 1, αντιδραστήρας)

#### 4.1.2 Ανάλυση Βιομάζας των φυτών στον αντιδραστήρα

Σκοπός της συγκεκριμένης ανάλυσης είναι να μελετηθεί κατά προσέγγιση η ανάπτυξη των φυτών και ο αριθμός των φυτών στον αντιδραστήρα.

#### Ανάλυση Βιομάζας



Εικόνα 11: Βιομάζα αντιδραστήρα (Φάση 1, ημέρα 1 και ημέρα 42)

**Ποσοστό πληρότητας επιφάνειας αντιδραστήρα :**

Ημέρα 1: 60% και ημέρα 42: 66%

**Κατά προσέγγιση αριθμός φυτών στον αντιδραστήρα :**

Ημέρα 1:  $(220 * 8) = 1.760$  και ημέρα 42: 1.856

**4.1.3 Απολογισμός φάσης 1**

Σε αυτή τη φάση (ημέρα 1 έως 42) παρατηρούμε τα παρακάτω:

- Η προσθήκη του υγρού Hoagland συνδράμει στην ανάπτυξη της βιομάζας και δρα καταλυτικά στην αύξηση του αριθμού των φυτών στον αντιδραστήρα.
- Τα φυτά χρειάζονται κάποιο χρονικό διάστημα για να προσαρμοστούν στις συνθήκες του αντιδραστήρα (υγρό Hoagland) και για αυτό μετά την πρώτη εβδομάδα το ποσοστό

αφομοίωσης του αζώτου αυξάνεται απότομα. Αυτό το χρονικό διάστημα ονομάζεται περίοδος προσαρμογής. [21]

- Σχετικά με τη συγκέντρωση των νιτρικών ( $\text{NO}_3$ ), παρατηρήθηκε ποσοστιαία μείωση μέχρι και 42%, ενώ σχετικά με τη συγκέντρωση των φωσφορικών ( $\text{PO}_4$ ) παρατηρήθηκε ποσοστιαία μείωση μέχρι 90%. Η προσθήκη του θρεπτικού υγρού αύξησε τον αριθμό των φυτών στον αντιδραστήρα από 1.760 σε 1.856 φυτά, ενώ αυξήθηκε και η επιφάνεια πλήρωσης από 60% σε 66%. Με βάση τα παραπάνω εξάγεται το συμπέρασμα ότι η προσθήκη του θρεπτικού υγρού Hoagland επιδρά θετικά τόσο στην ανάπτυξη των φυτών, όσο στην απομάκρυνση των νιτρικών και φωσφορικών ενώσεων. [45]
- Οι τιμές του φωσφόρου είναι πολύ χαμηλές, καθώς στον αντιδραστήρα παράγονται μικροφύκη που απορροφούν μεγάλη ποσότητα φωσφόρου, για αυτό άλλωστε η ποσοστιαία διαφορά ανάμεσα σε νιτρικά και φωσφορικά ιόντα είναι τόσο μεγάλη. [28]

Το πείραμα κρίνεται επιτυχημένο, αφού τα φυτά κατάφεραν να προσαρμοστούν στο νέο περιβάλλον (τον αντιδραστήρα με το θρεπτικό υγρό) απορροφώντας άζωτο και φώσφορο και ταυτόχρονα υπήρξε αύξηση της ωφέλιμης βιομάζας κατά 100 φυτά.

## 4.2 Αναλύσεις με προσθήκη αποβλήτου και υγρού αντιδραστήρα παροχής

Q=50 ml/d

### 4.2.1 Αναλύσεις θρεπτικών συστατικών

Για τις ημέρες μετρήσεων 43 έως και 69, οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν και στο ίδιο το απόβλητο πριν την προσθήκη του στον αντιδραστήρα, καθώς είχε μεταφερθεί σε δοχείο ώστε να έχει επαφή με τον αέρα άρα και να οξυγονώνεται, αλλά και στο ίδιο το υγρό του αντιδραστήρα.

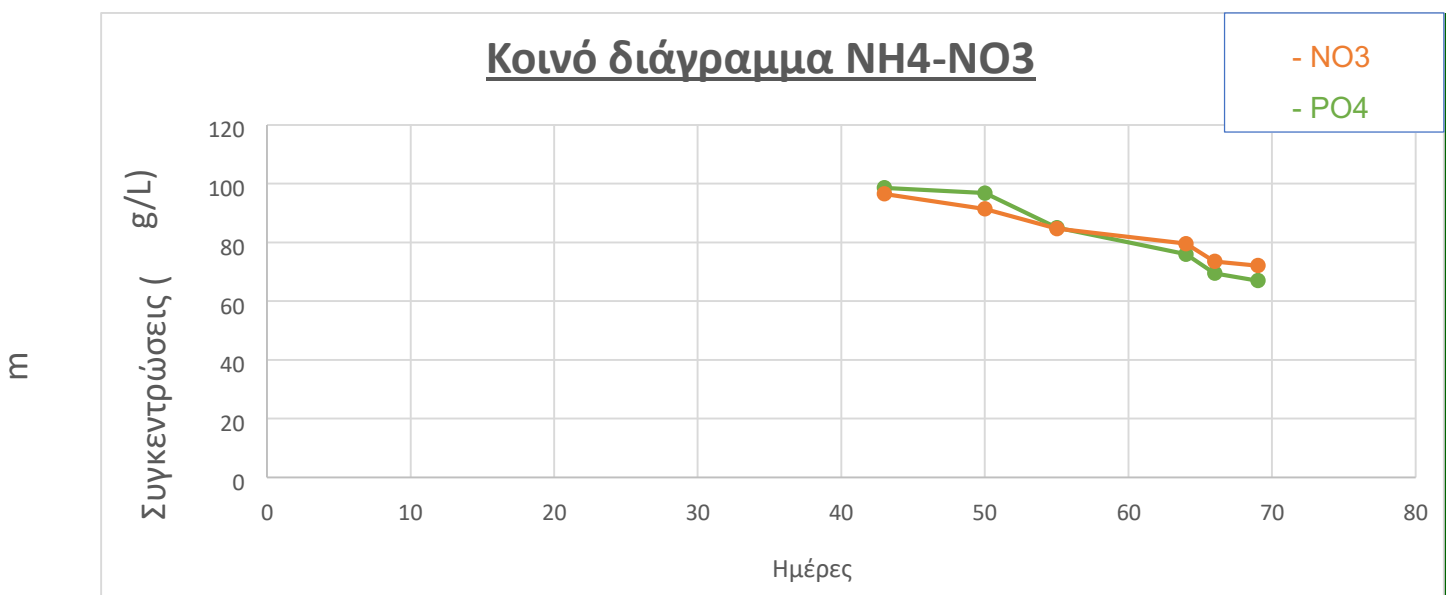
Οι αναλύσεις που έγιναν αυτήν την περίοδο αφορούσαν τα νιτρικά ιόντα ( $\text{NO}_3$ ), τα αμμωνιακά ιόντα ( $\text{NH}_4^+$ ), τα φωσφορικά ιόντα ( $\text{PO}_4$ ), το ολικό άζωτο (TN), τον ολικό άνθρακα (TC), το pH, την αγωγιμότητα και τέλος, την ανάλυση της βιομάζας και του αριθμού φυτών που ήταν ζωντανά στον αντιδραστήρα.

Παρακάτω φαίνονται αναλυτικά όλα τα παραπάνω στο απόβλητο και στον αντιδραστήρα ξεχωριστά.

#### Πίνακας 4.1: Συγκεντρώσεις αμμωνιακών-νιτρικών ιόντων (Φάση 2, αντιδραστήρας)

Ημέρα	NH <sub>4</sub> (mg/L) Influent / Effluent	NO <sub>3</sub> (mg/L) (Effluent)
43	98,6 / 0	96,3
50	96,5 / 0	91,39
55	85 / 0	84,7
64	76 / 0	79,58
66	69,5 / 0	73,5
69	67 / 0	72,1

Όλα τα παραπάνω παρουσιάζονται σε ένα κοινό διάγραμμα:



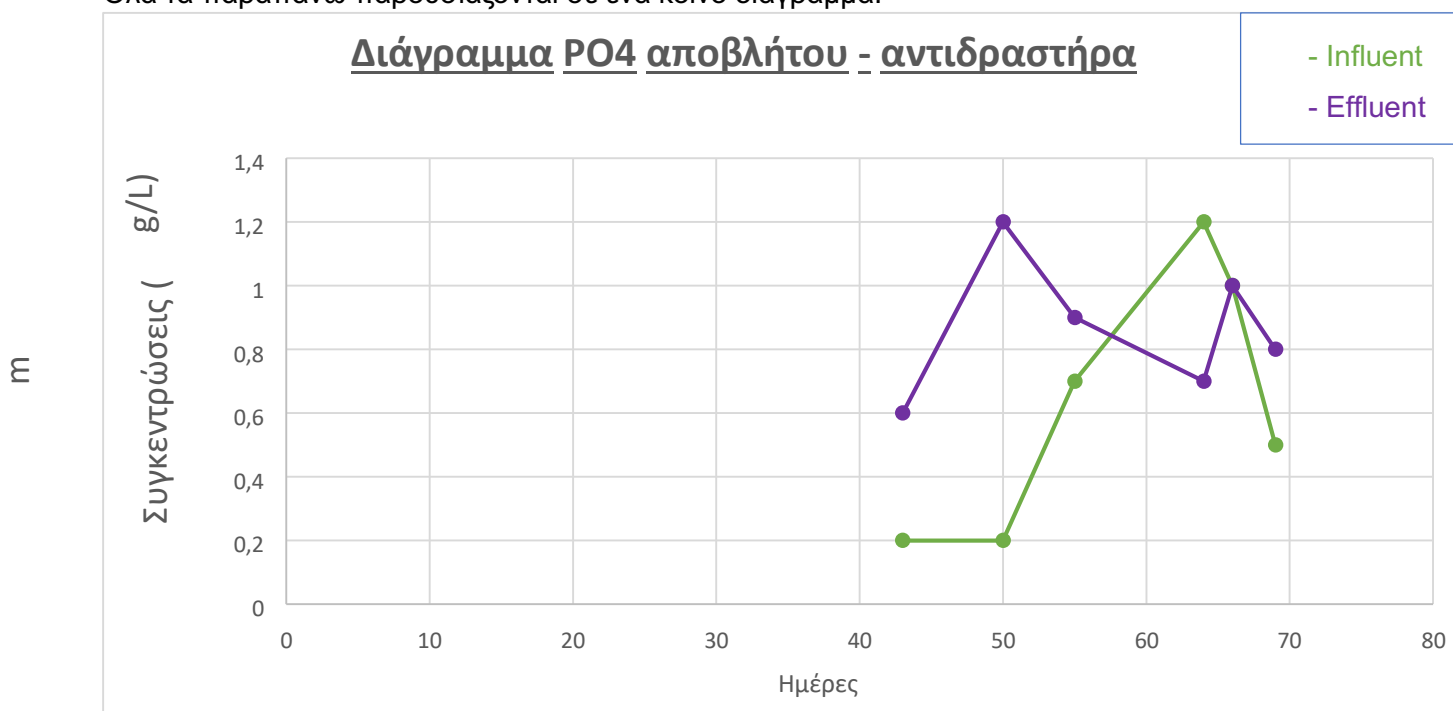
**Διάγραμμα 4.3:** Συγκεντρώσεις αμμωνιακών – νιτρικών ιόντων (Φάση 2, αντιδραστήρας)

Όσον αφορά τα **φωσφορικά ιόντα (PO<sub>4</sub>)**:

**Πίνακας 4.2: Συγκεντρώσεις φωσφορικών ιόντων (Φάση 2, απόβλητο - αντιδραστήρας)**

Ημέρα	PO <sub>4</sub> (mg/L) (Influent)	PO <sub>4</sub> (mg/L) (Effluent)
43	0,2	0,6
50	0,2	1,2
55	0,7	0,9
64	1,2	0,7
66	1	1
69	0,5	0,8

Όλα τα παραπάνω παρουσιάζονται σε ένα κοινό διάγραμμα:



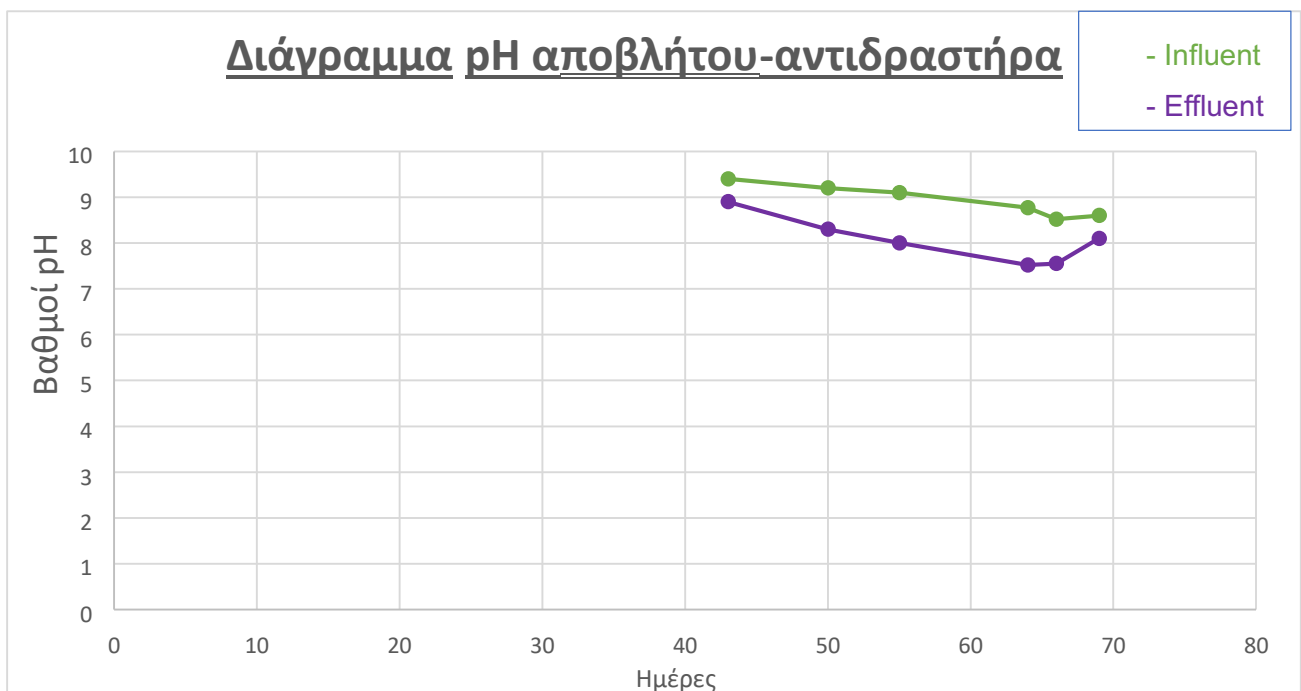
**Διάγραμμα 4.4:** Συγκεντρώσεις φωσφορικών ιόντων (Φάση 2, απόβλητο – αντιδραστήρας)

Όσον αφορά το pH:

**Πίνακας 4.3: Τιμές pH (Φάση 2, απόβλητο – αντιδραστήρας)**

Ημέρα	pH (Influent)	pH (Effluent)
43	9,4	8,9
50	9,2	8,3
55	9,1	8
64	8,77	7,52
66	8,52	7,55
69	8,6	8,1

Όλα τα παραπάνω παρουσιάζονται σε ένα κοινό διάγραμμα:



**Διάγραμμα 4.5:** Τιμές pH (Φάση 2, απόβλητο – αντιδραστήρα)

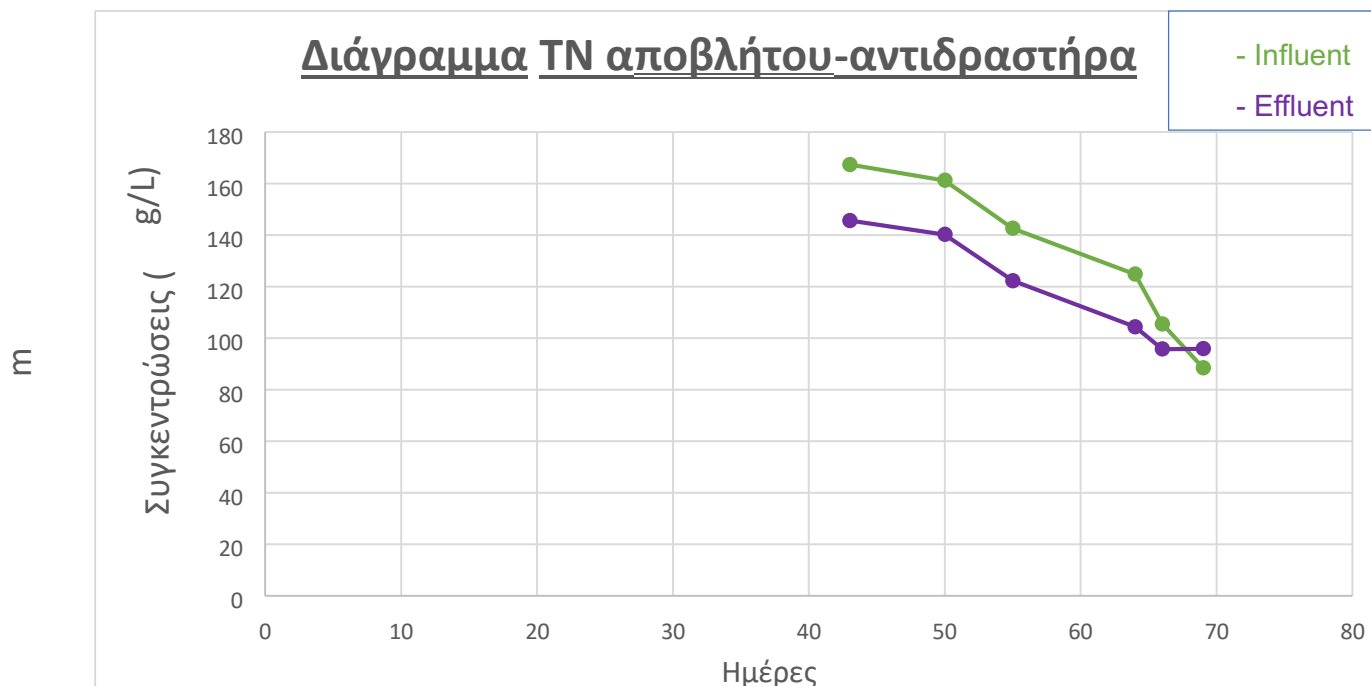
Όσον αφορά το **ολικό άζωτο (TN)**:

**Πίνακας 4.4:** Συγκεντρώσεις ολικού αζώτου (Φάση 2, απόβλητο – αντιδραστήρας)



Ημέρες	TN (mg/L) (Influent)	TN (mg/L) (Effluent)
43	167,4	145,61
50	161,2	140,45
55	142,6	122,30
64	124,8	104,35
66	105,5	95,74
69	88,5	95,86

Όλα τα παραπάνω παρουσιάζονται σε ένα κοινό διάγραμμα:



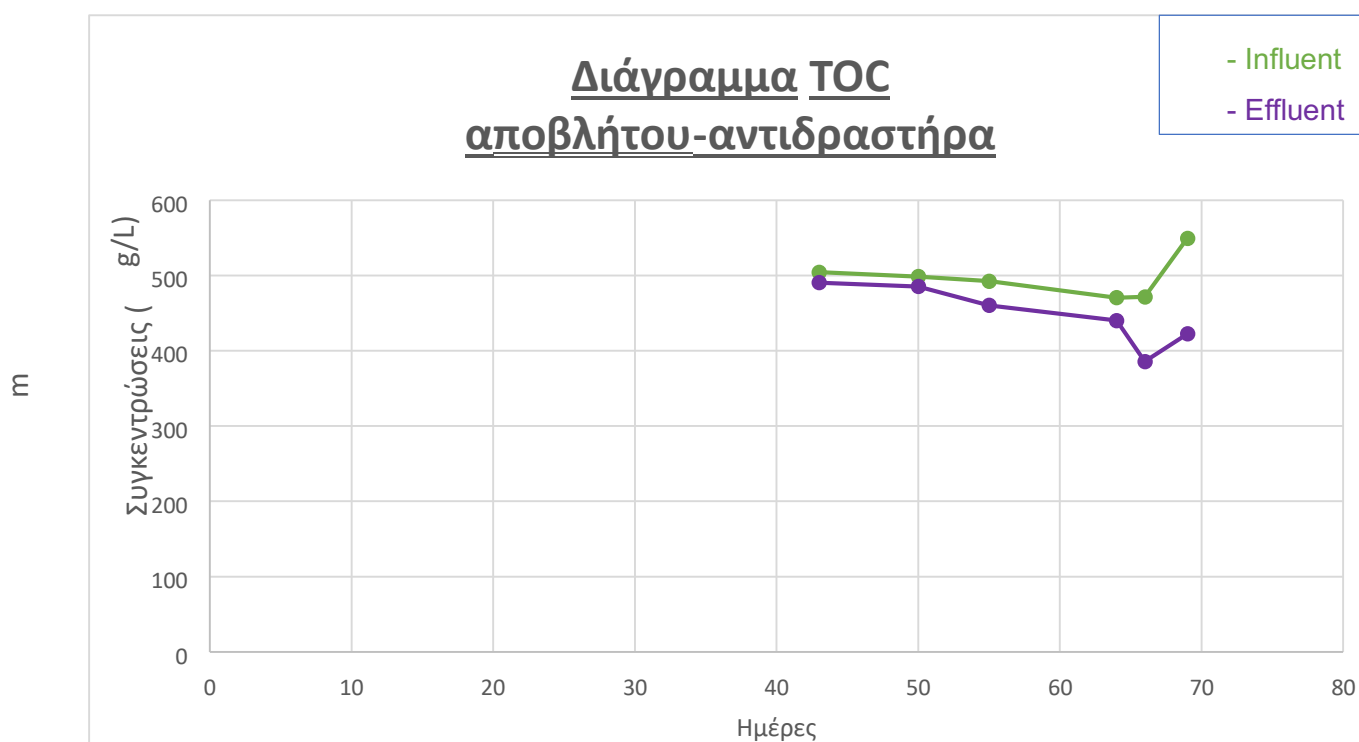
**Διάγραμμα 4.6:** Συγκεντρώσεις ολικού αζώτου (Φάση 2, απόβλητο – αντιδραστήρας)

Όσον αφορά τον **ολικό άνθρακα (TOC):**

Πίνακας 4.5: Συγκεντρώσεις ολικού άνθρακα (Φάση 2, απόβλητο – αντιδραστήρας)

Ημέρες	TOC (mg/L) (Influent)	TOC (mg/L) (Effluent)
43	504,2	490,4
50	498,6	485,3
55	492,41	460,2
64	470,55	440,1
66	471,6	385,6
69	459,4	422,5

Όλα τα παραπάνω παρουσιάζονται σε ένα κοινό διάγραμμα:



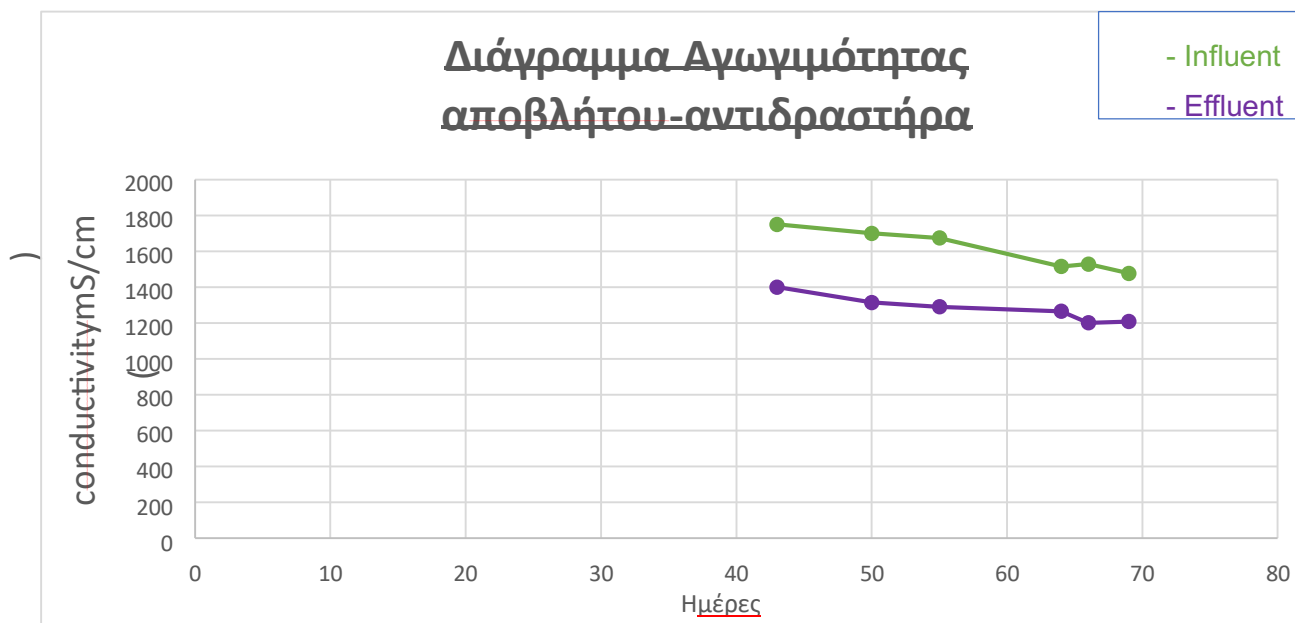
Διάγραμμα 4.7: Συγκεντρώσεις ολικού άνθρακα (Φάση 2, απόβλητο – αντιδραστήρας)

Όσον αφορά την αγωγιμότητα (conductivity)

Πίνακας 4.6: Τιμές αγωγιμότητας (Φάση 2, απόβλητο – αντιδραστήρας)

Ημέρες	Conductivity (mS/cm) Influent	Conductivity (mS/cm) (Effluent)
43	1750	1400
50	1700	1314
55	1674	1290
64	1515	1265
66	1528	1201
69	1477	1208

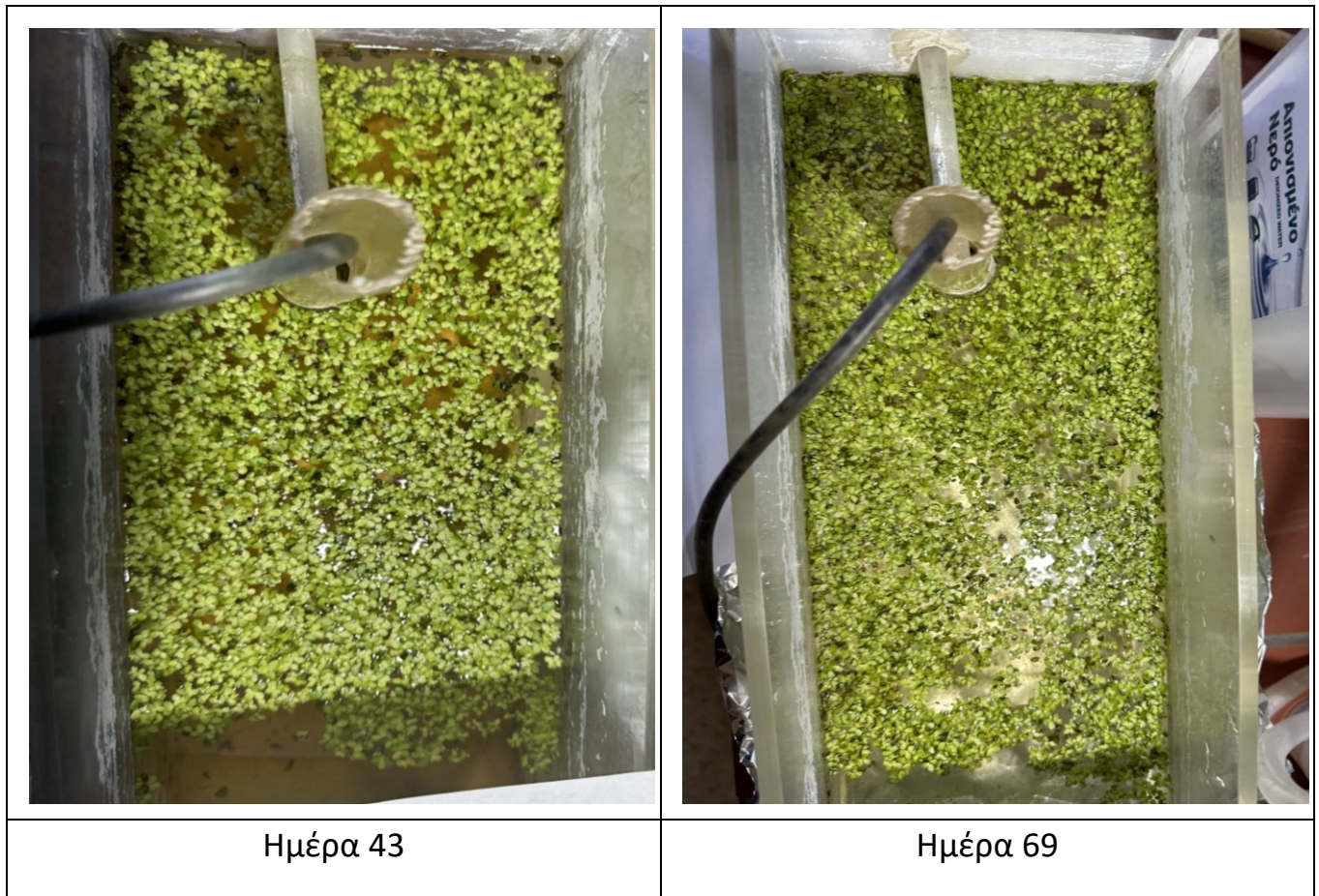
Όλα τα παραπάνω παρουσιάζονται σε ένα κοινό διάγραμμα:



**Διάγραμμα 4.8:** Αγωγιμότητα (Φάση 2, απόβλητο – αντιδραστήρα)

#### 4.2.2 Ανάλυση βιομάζας των φυτών στον αντίδραστήρα

##### Ανάλυση Βιομάζας



*Εικόνα 12: Βιομάζα αντιδραστήρα (Φάση 2, ημέρα 43 και ημέρα 69)*

##### **Ποσοστό πληρότητας επιφάνειας αντιδραστήρα :**

Ημέρα 43: 66% και ημέρα 69: 77%

##### **Κατά προσέγγιση αριθμός φυτών στον αντιδραστήρα :**

Ημέρα 43: 1.856 και ημέρα 69: 2.060

### 4.2.3 Απολογισμός φάσης 2

Σε αυτή τη φάση (ημέρα 43 έως 69) παρατηρούμε τα παρακάτω:

- Στο σύνολο των εξεταζόμενων παραμέτρων, εκτός από τα φωσφορικά άλατα, η επίδραση του αντιδραστήρα ήταν ευμενής, καθώς οδήγησε σε μείωση των συγκεντρώσεων των ρυπαντικών φορτίων, σε σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές εκτός του αντιδραστήρα. Σε αυτή τη φάση υπήρξε ανάπτυξη της βιομάζας, απομείωση των συγκεντρώσεων των εξεταζόμενων ποιοτικών παραμέτρων και συνεπώς επετεύχθει επεξεργασία του αποβλήτου.
- Η προσθήκη του αποβλήτου με παροχή  $Q=50\text{ml/d}$  αύξησε τον αριθμό των φυτών στον αντιδραστήρα από 1.856 σε 2.060 φυτά, ενώ αυξήθηκε και η επιφάνεια πλήρωσης από 66% σε 77%.
- Παρατηρούμε ότι την πρώτη εβδομάδα η απορρόφηση των συστατικών από τα φυτά είναι μικρή, σε σχέση με τις επόμενες ημέρες. Συμπεραίνουμε ότι και σε αυτή τη φάση, όπου προστίθεται το απόβλητο στον αντιδραστήρα, απαιτείται επίσης περίοδος προσαρμογής.
- Η συγκέντρωση των αμμωνιακών ιόντων του αντιδραστήρα καταγράφεται συνεχώς ως μηδενική, λόγω της οξυγόνωσης με την επίδραση του αέρα.
- Η αύξηση της συγκέντρωσης των φωσφορικών δικαιολογείται καθώς στον αντιδραστήρα παράγονται μικροφύκη, που απορροφούν μεγάλη ποσότητα φωσφόρου.
- Παρατηρείται και σε αυτή τη φάση περίοδος προσαρμογής, καθώς την πρώτη εβδομάδα παρατηρήθηκε ότι η απορρόφηση των συστατικών από τα φυτά είναι μικρή σε σχέση με τις επόμενες ημέρες.
- Στο απόβλητο το άζωτο είναι σε μορφή αμμωνιακού αζώτου, ενώ στον αντιδραστήρα σε μορφή νιτρικού αζώτου, λόγω της νιτροποίησης που πραγματοποιείται στον αντιδραστήρα.

Το συγκεκριμένο πείραμα (φάση 2) κρίνεται επιτυχημένο, καθώς οι τιμές στην έξοδο του αντιδραστήρα είναι κατά βάση μικρότερες από εκείνες στην είσοδο, γεγονός που δηλώνει ότι τα φυτά έχουν την ικανότητα να απορροφούν στοιχεία από το υγρό μέσα στο οποίο αναπτύσσονται. Επιπρόσθετα, υπήρξε αύξηση στην ωφέλιμη βιομάζα κατά 204 φυτά.

## 4.3 Αναλύσεις με προσθήκη αποβλήτου και παροχή $Q=200-250\text{ ml/d}$

### 4.3.1 Αναλύσεις θρεπτικών συστατικών στο απόβλητο και τον αντιδραστήρα

Καθώς στο προηγούμενο υποκεφάλαιο εξηγήθηκε ότι η παροχή  $50\text{ ml/d}$  βοήθησε το σύστημα συνολικά, έγινε δοκιμή για τις ημέρες αναλύσεων 72 έως και 106 με μεγαλύτερη

παροχή 200-250 ml/d. Ταυτόχρονα, εντάχθηκε στο σύστημα μας η ανακυκλοφορία του υγρού με εκροή με υπερχειλίση όταν ο όγκος του υγρού ξεπερνούσε τα 4 λίτρα.

Οι αναλύσεις που έγιναν αυτήν την περίοδο αφορούσαν τα νιτρικά ιόντα ( $\text{NO}_3$ ), τα αμμωνιακά ιόντα ( $\text{NH}_4^+$ ), τα φωσφορικά ιόντα ( $\text{PO}_4$ ), το ολικό άζωτο (TN), τον ολικό άνθρακα (TC), το pH, την αγωγιμότητα και τέλος, την ανάλυση της βιομάζας και του αριθμού φυτών που ήταν ζωντανά στον αντιδραστήρα.

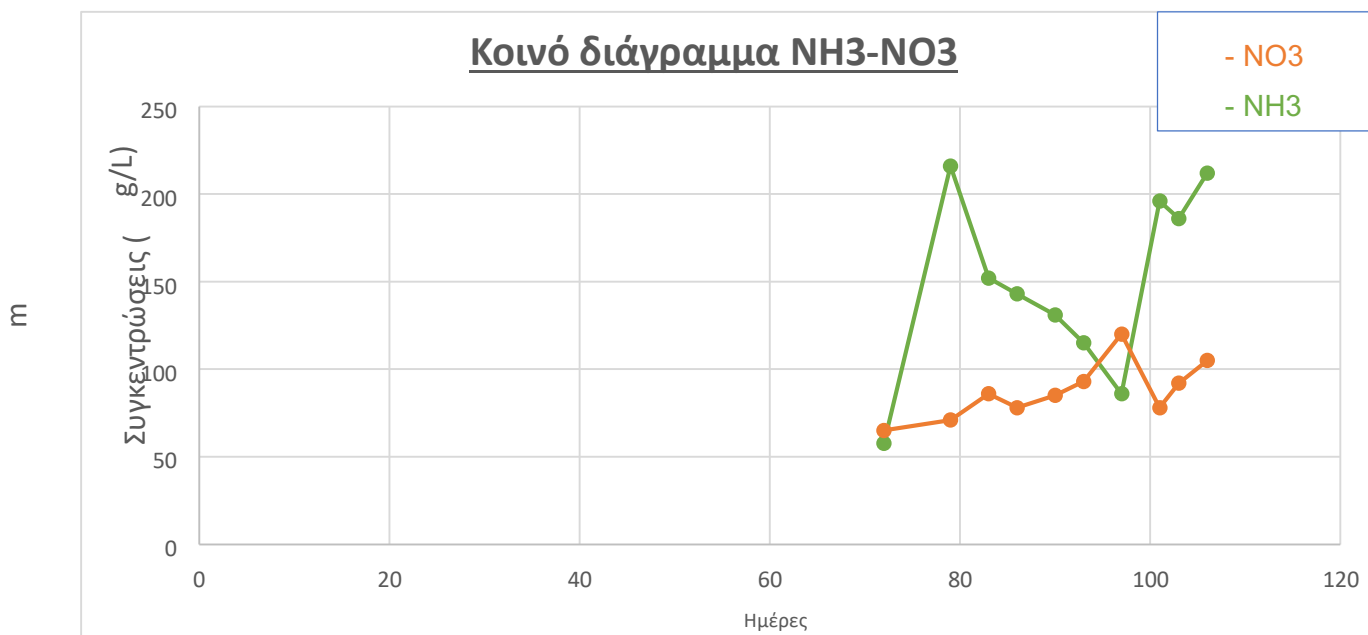
Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν στο απόβλητο, αλλά και στο υγρό του αντιδραστήρα και παρουσιάζονται παρακάτω:

### Όσον αφορά τα $\text{NH}_3$ και $\text{NO}_3$

**Πίνακας 4.7: Συγκεντρώσεις αμμωνιακών - νιτρικών ιόντων (Φάση 3, απόβλητο - αντιδραστήρα)**

Ημέρα	$\text{NH}_3(\text{mg/L})$ Influent	$\text{NH}_3(\text{mg/L})$ Effluent	$\text{NO}_3(\text{mg/L})$ Effluent
72	57,6	0	65,64
79	216	0	71,24
83	152,8	3,2	86,35
86	143	0	78,37
90	131	0	85,24
93	115	0	93,01
97	86	1,8	120,64
101	196	0,7	78,47
103	186	0,1	92,41
106	212	0,2	105,34

Όλα τα παραπάνω παρουσιάζονται σε ένα κοινό διάγραμμα:



**Διάγραμμα 4.9:** Συγκεντρώσεις αμμωνιακών – νιτρικών ιόντων (Φάση 3, αντιδραστήρας)

Όσον αφορά τα φωσφορικά ιόντα PO<sub>4</sub>

**Πίνακας 4.8:** Συγκεντρώσεις φωσφορικών ιόντων (Φάση 3, απόβλητο – αντιδραστήρας)

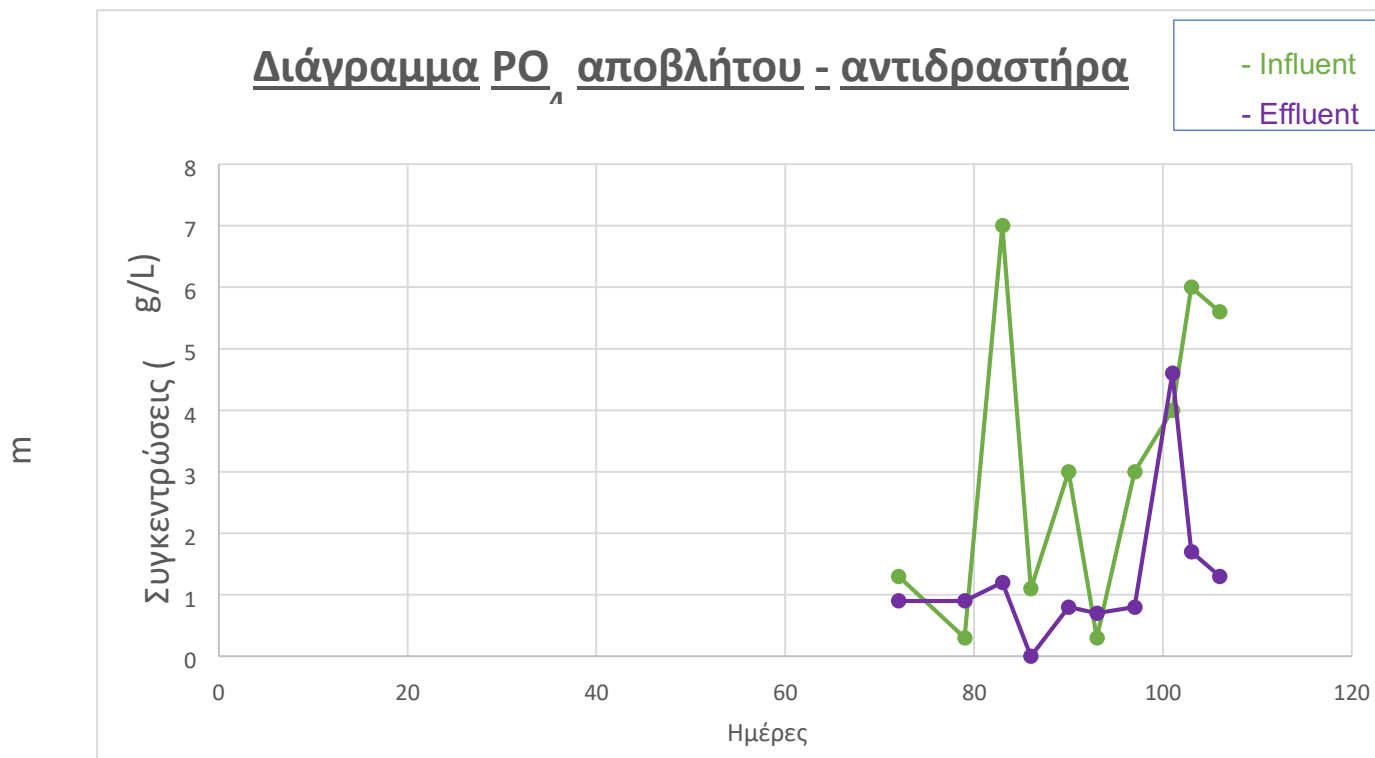
Ημέρες	PO <sub>4</sub> (mg/L) Influent	PO <sub>4</sub> (mg/L) Effluent
72	1,3	0,9
79	0,3	0,9
83	7	1,2
86	1,1	0
90	3	0,8
93	0,3	0,7
97	3	0,8
101	4	4,6
103	7	1,7

106

5,6

1,3

Όλα τα παραπάνω παρουσιάζονται σε ένα κοινό διάγραμμα:



**Διάγραμμα 4.10:** Συγκεντρώσεις φωσφορικών ιόντων (Φάση 3, απόβλητο – αντιδραστήρας)

Όσον αφορά το pH:

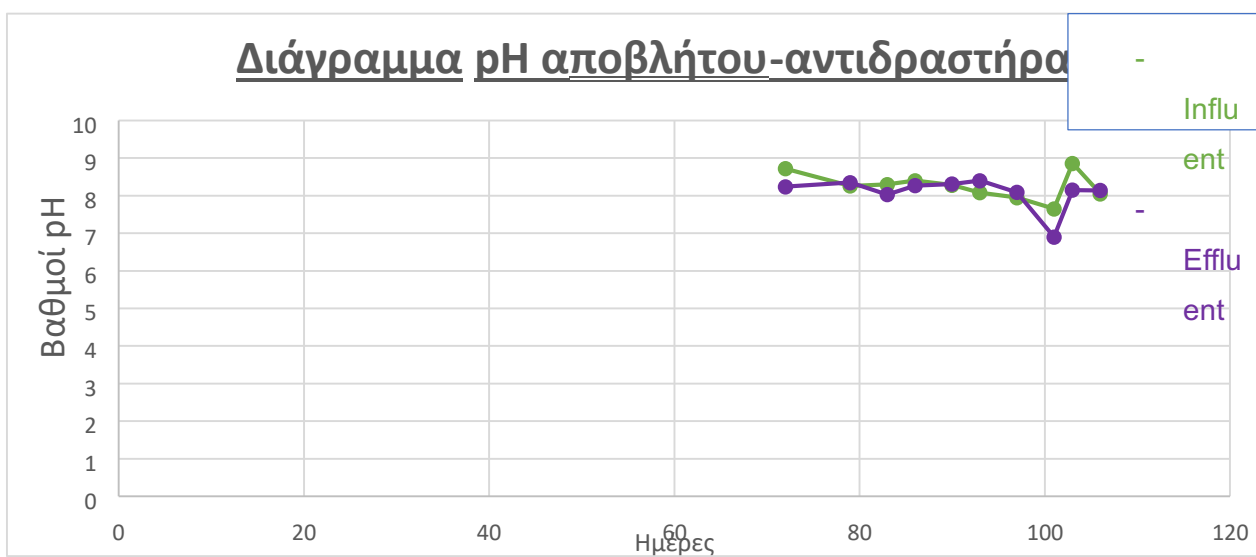
**Πίνακας 4.9:** Τιμες pH (Φάση 3, απόβλητο – αντιδραστήρας)

Ημέρες	pH (Influent)	pH (Effluent)
72	8,72	8,24
79	8,26	8,35
83	8,3	8,03



86	8,4	8,27
90	8,28	8,31
93	8,08	8,4
97	7,95	8,09
101	7,65	6,9
103	8,86	8,15
106	8,04	8,14

Όλα τα παραπάνω παρουσιάζονται σε ένα κοινό διάγραμμα:



**Διάγραμμα 4.11:** Τιμές pH (Φάση 3, απόβλητο – αντιδραστήρας)

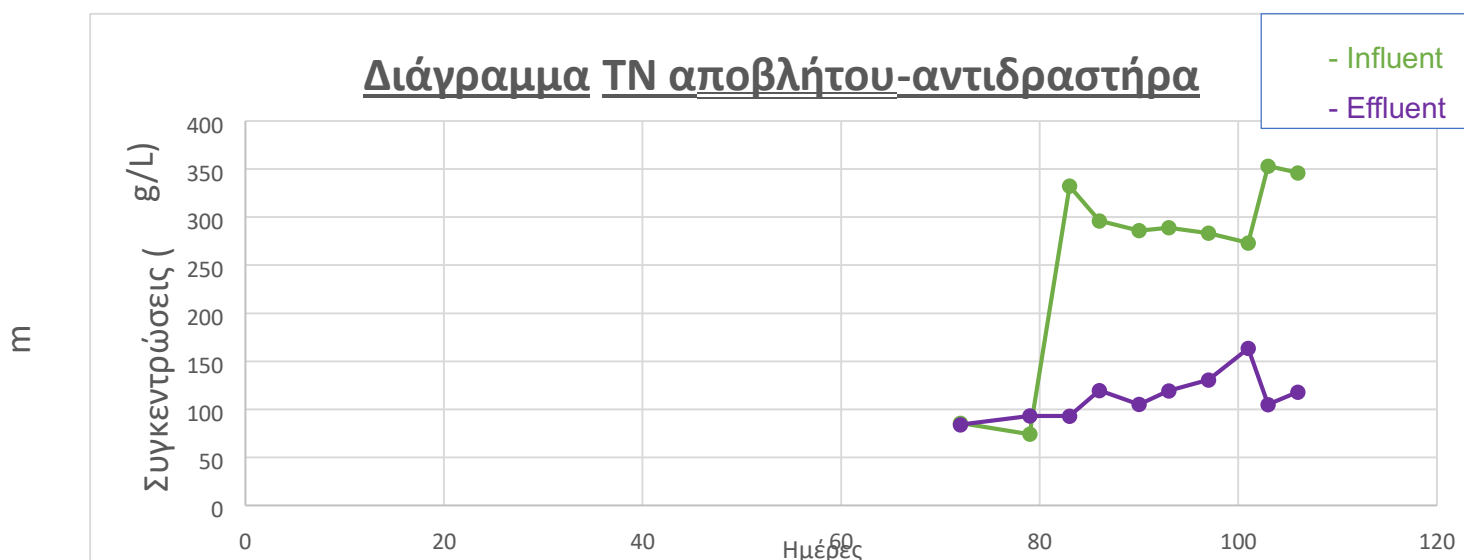
Όσον αφορά το **ολικό άζωτο (TN)**:

**Πίνακας 4.10:** Συγκεντρώσεις ολικού αζώτου (Φάση 3, απόβλητο – αντιδραστήρα)

--	--

Ημέρες	TN(mg/L) Influent	TN(mg/L) Effluent
72	85,8	84,09
79	74,32	93,2
83	332,3	97,13
86	296,2	119,7
90	286,1	105,2
93	289	119,3
97	283,3	130,7
101	273,3	163,5
103	352,3	105,1
106	346,1	118,1

Όλα τα παραπάνω παρουσιάζονται σε ένα κοινό διάγραμμα:

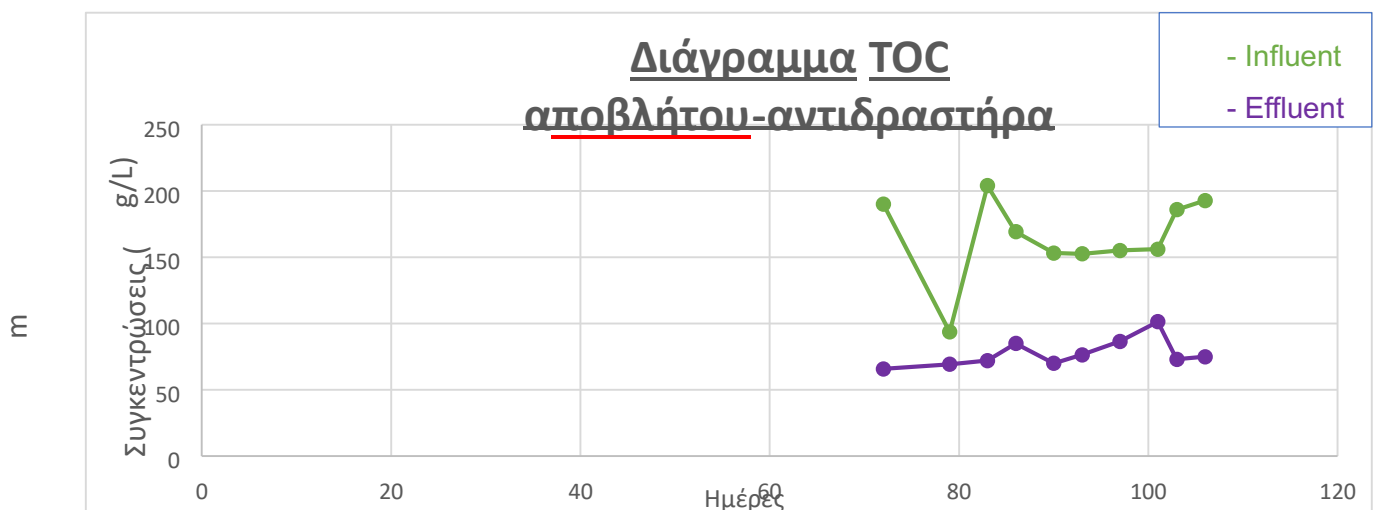


**Διάγραμμα 4.12:** Συγκεντρώσεις ολικού άνθρακα (Φάση 3, απόβλητο – αντιδραστήρας)

Όσον αφορά τον **ολικό άνθρακα (TOC):**

Ημέρες	TOC(mg/L) Influent	TOC(mg/L) Effluent
72	190,1	65,8
79	93,69	69,35
83	204,2	72,09
86	169,4	85,03
90	153,3	70,06
93	152,7	76,45
97	155,2	96,6
101	156,2	101,5
103	186	73,07
106	192,9	74,99

Όλα τα παραπάνω παρουσιάζονται σε ένα κοινό διάγραμμα:



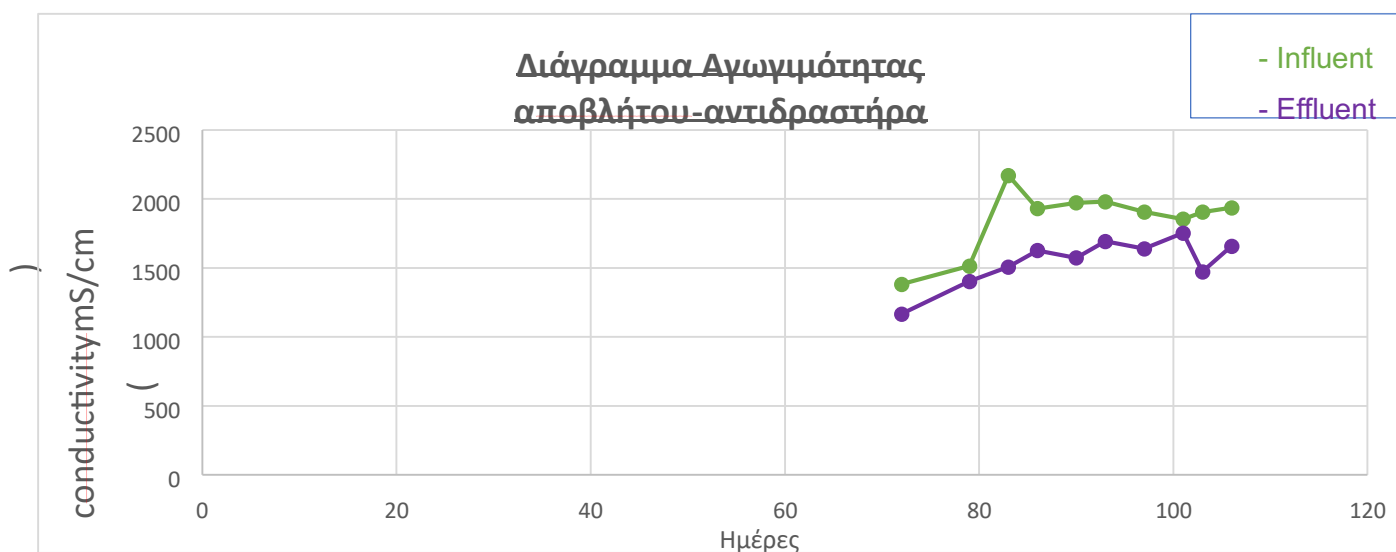
**Διάγραμμα 4.13:** Συγκεντρώσεις ολικού άνθρακα (Φάση 3, απόβλητο – αντιδραστήρας)

Όσον αφορά την **αγωγιμότητα (conductivity)**

**Πίνακας 4.11: Τιμές αγωγιμότητας (Φάση 3, απόβλητο – αντιδραστήρας)**

<b>Ημέρες</b>	<b>Conductivity (mS/cm) Influent</b>	<b>Conductivity (mS/cm) Effluent</b>
72	1381	1165
79	1513	1402
83	2170	1507
86	1930	1626
90	1972	1573
93	1980	1692
97	1906	1639
101	1854	1752
103	1904	1472
106	1936	1657

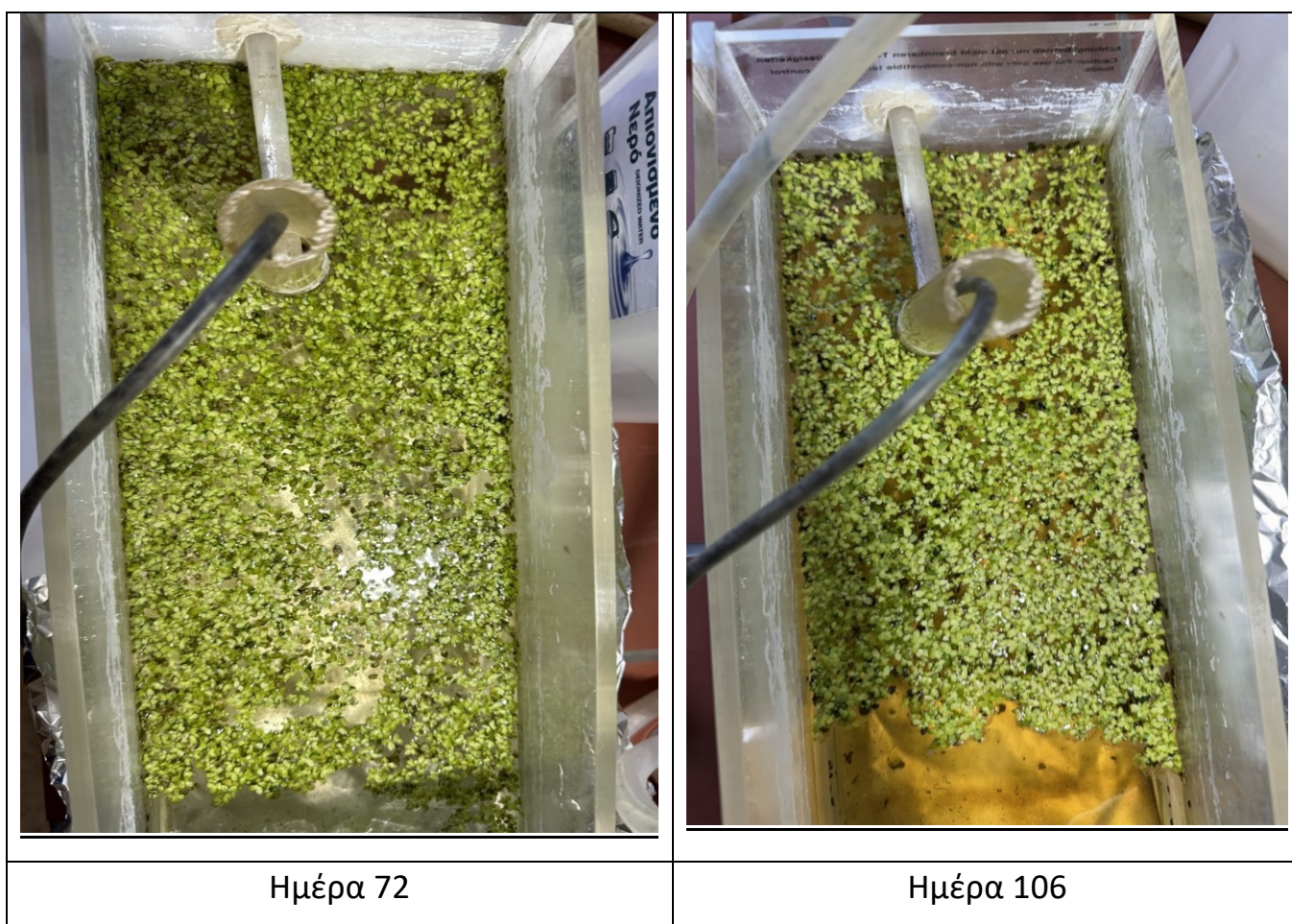
Όλα τα παραπάνω παρουσιάζονται σε ένα κοινό διάγραμμα:



**Διάγραμμα 4.14:** Τιμές αγωγιμότητας (Φάση 3, απόβλητο – αντιδραστήρας)

#### 4.3.2 Ανάλυση βιομάζας των φυτών στον αντιδραστήρα

Ανάλυση βιομάζας:



Εικόνα 13: Βιομάζα αντιδραστήρα (Φάση 3, ημέρα 72 και ημέρα 106)

**Ποσοστό πληρότητας επιφάνειας αντιδραστήρα :**

**Ημέρα 72:** 77% και **ημέρα 106:** 58%

**Κατά προσέγγιση αριθμός φυτών στον αντιδραστήρα :**

**Ημέρα 72:** 2.060 και **ημέρα 106:** 1.551

**4.3.3 Απολογισμός φάσης 3**

Σε αυτή τη φάση (ημέρα 72 έως 106) παρατηρούμε τα παρακάτω:

- Η επίδραση του αντιδραστήρα με τον τετραπλασιασμό της εισερχόμενης παροχής ήταν δυσμενής, καθώς οδήγησε σε νέκρωση των φυτών. Το συμπέρασμα είναι ότι το εν λόγω

σύστημα δεν δύναται να επεξεργαστεί τόσο μεγάλη παροχή αποβλήτου. Αποτέλεσμα της νέκρωσης των φυτών ήταν η αύξηση των συγκεντρώσεων των ρυπαντικών φορτίων στο αντιδραστήρα. Η παραπάνω περίοδος μετρήσεων χαρακτηρίζεται ως **περίοδος σφάλματος** για την εξέλιξη του πειράματος, καθώς έχει προκληθεί ζημία στα φυτά του αντιδραστήρα με τον θάνατο 500 σχεδόν φυτών, δηλαδή το 20% της υπάρχουσας βιομάζας. Συγκεκριμένα, η προσθήκη του αποβλήτου με παροχή  $Q=200-250$  ml/d μείωσε τον αριθμό των φυτών στον αντιδραστήρα από 2.060 σε 1.551, ενώ μειώθηκε και η επιφάνεια πλήρωσης από 77% σε 58%.

- Οι μετρήσεις των συγκεντρώσεων των ποιοτικών παραμέτρων δεν ήταν οι αναμενόμενες, καθώς παρατηρήθηκε εν γένει αύξηση και όχι μείωσή τους.
- Οι δύο παράγοντες που διαφοροποιήθηκαν σε αυτή τη φάση των πειραμάτων ήταν η αύξηση της παροχής του αποβλήτου και η αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος
- Λόγω του τετραπλασιασμού της ροής αποβλήτου, αλλά και της απότομης αύξησης της θερμοκρασίας τον μήνα Ιούλιο υπήρχαν αρκετά νεκρά φυτά, άρα για αυτό προκύπτει η μεγάλη αύξηση των θρεπτικών συστατικών του αντιδραστήρα.

Η παραπάνω περίοδος μετρήσεων χαρακτηρίζεται ως **περίοδος σφάλματος** για την εξέλιξη του πειράματος μας, καθώς έχει προκληθεί ζημία στα φυτά του αντιδραστήρα με τη νέκρωση 500 σχεδόν φυτών, δηλαδή το 20% της υπάρχουσας βιομάζας.

Σε αυτό το σημείο προτείνεται στο μέλλον να διερευνηθεί η επίδραση ξεχωριστά της αύξησης της θερμοκρασίας και της αύξησης της εισερχόμενης παροχής του αποβλήτου, ώστε να είναι σαφές ποιος είναι ο κύριος ανασταλτικός παράγοντας στην ανάπτυξη της βιομάζας. [25]

#### **4.4 Αναλύσεις με προσθήκη αποβλήτου και παροχή $Q=100$ ml/d με ανακυκλοφορία**

##### **4.4.1 Αναλύσεις θρεπτικών συστατικών στο απόβλητο και στον αντιδραστήρα**

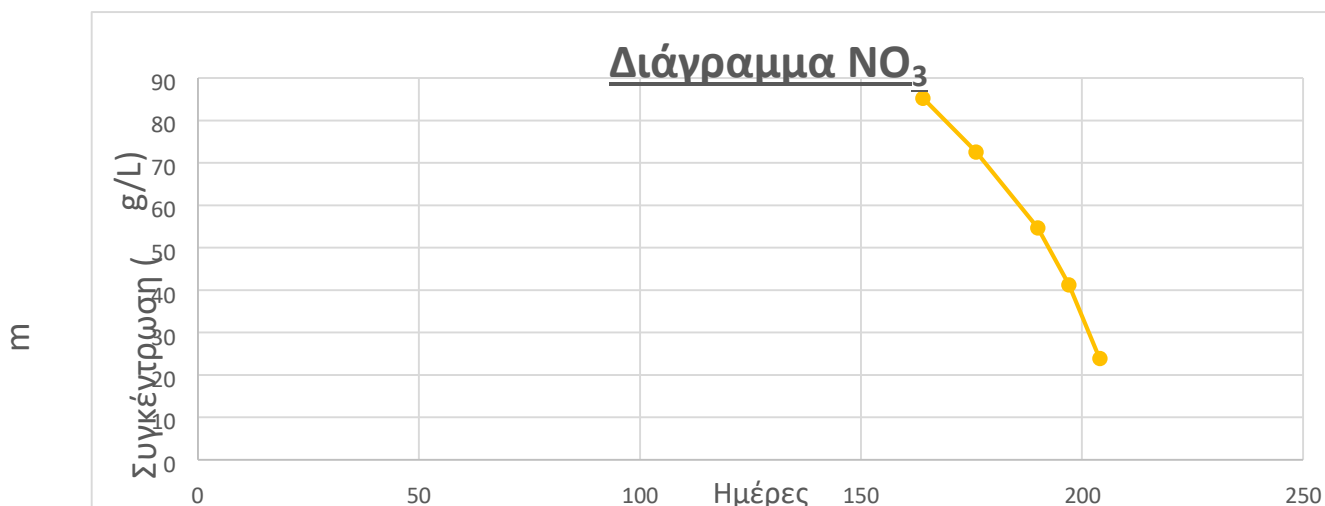
Καθώς στο προηγούμενο πείραμα η παροχή αποβλήτου  $Q= 200-250$  ml/d φάνηκε μεγάλη και το συγκεκριμένο πείραμα χαρακτηρίστηκε λανθασμένο, αποφασίστηκε η μείωση της παροχής σε  $Q= 100$  ml/d με ταυτόχρονη ανακυκλοφορία του υγρού με παροχή  $Q =$  και έξοδο με υπερχείλιση όταν το υγρό του αντιδραστήρα ξεπερνούσε τον όγκο  $V= 4L$ .

Οι αναλύσεις έγιναν στο υγρό του αντιδραστήρα και παρουσιάζονται παρακάτω:

**Πίνακας 4.12: Συγκεντρώσεις νιτρικών ιόντων (Φάση 4, Effluent)**

Ημέρες	NO <sub>3</sub> (mg/L)
164	85,3
176	72,6
190	54,7
197	41,3
204	23,9

Παρουσιάζεται το διάγραμμα:



**Διάγραμμα 4.15: Συγκεντρώσεις νιτρικών ιόντων (Φάση 4, Effluent)**

Όσον αφορά το PO<sub>4</sub>:

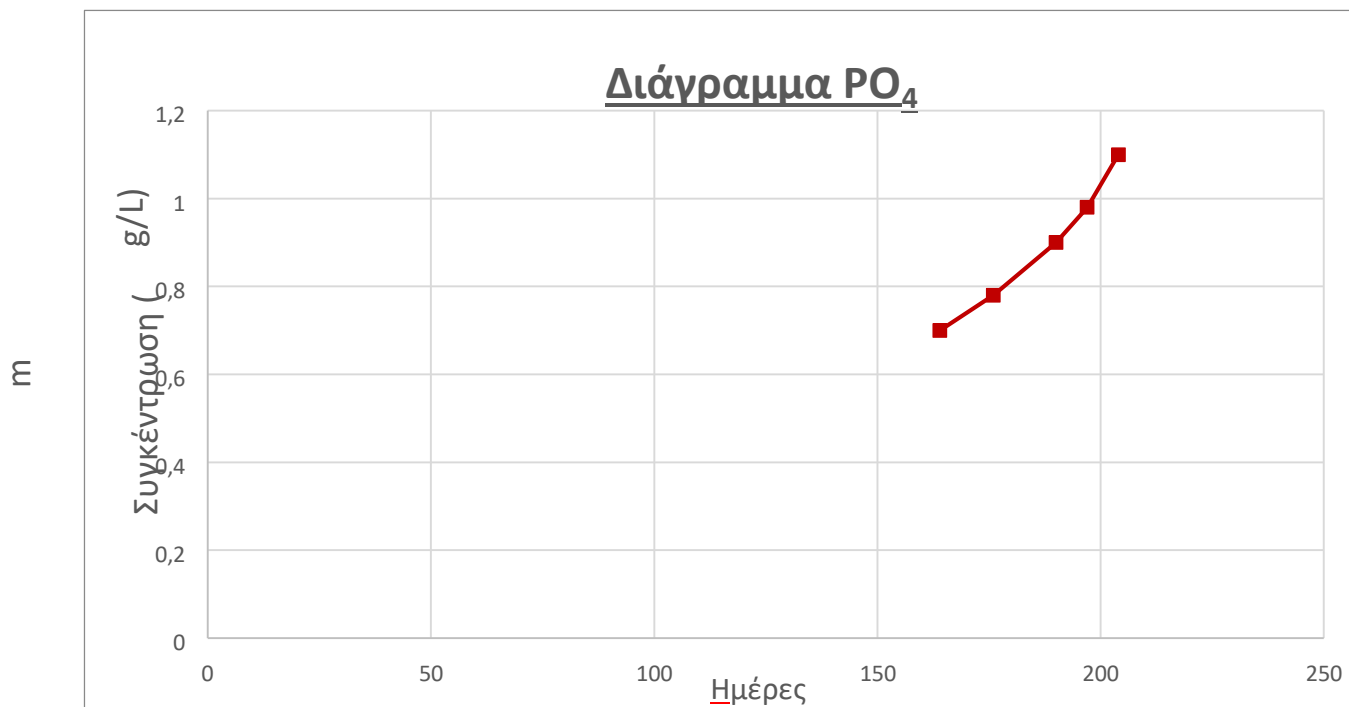
**Πίνακας 4.13: Συγκεντρώσεις φωσφορικών ιόντων (Φάση 4, Effluent)**

Ημέρες	PO <sub>4</sub> (mg/L)
164	0,7
176	0,78



190	0,9
197	0,97
204	1,1

Παρουσιάζεται το διάγραμμα:



**Διάγραμμα 4.16:** Συγκεντρώσεις φωσφορικών ιόντων (Φάση 4, Effluent)

Και όσον αφορά το pH : **Πίνακας 4.14:**

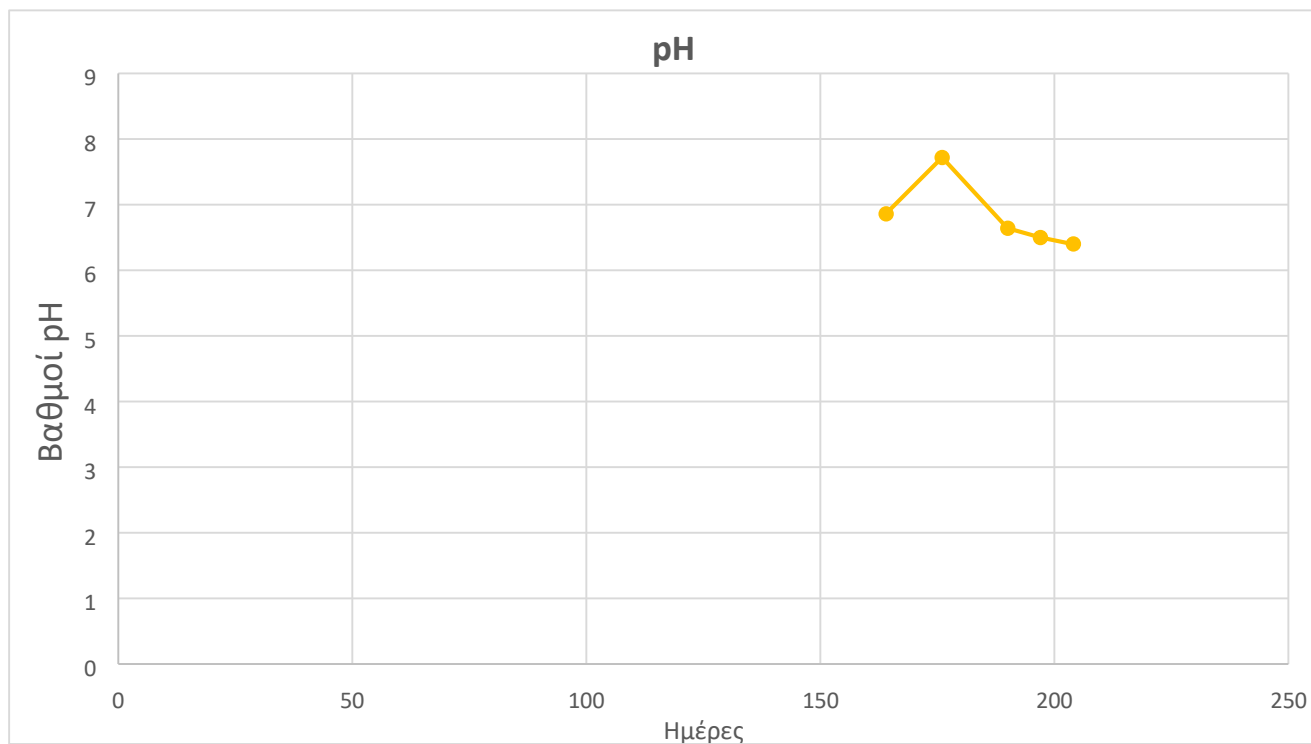
**Τιμές pH (Φάση 4, Effluent)**

Ημέρες	pH
164	6,86
176	6,72
190	6,64
197	6,5

204

6,4

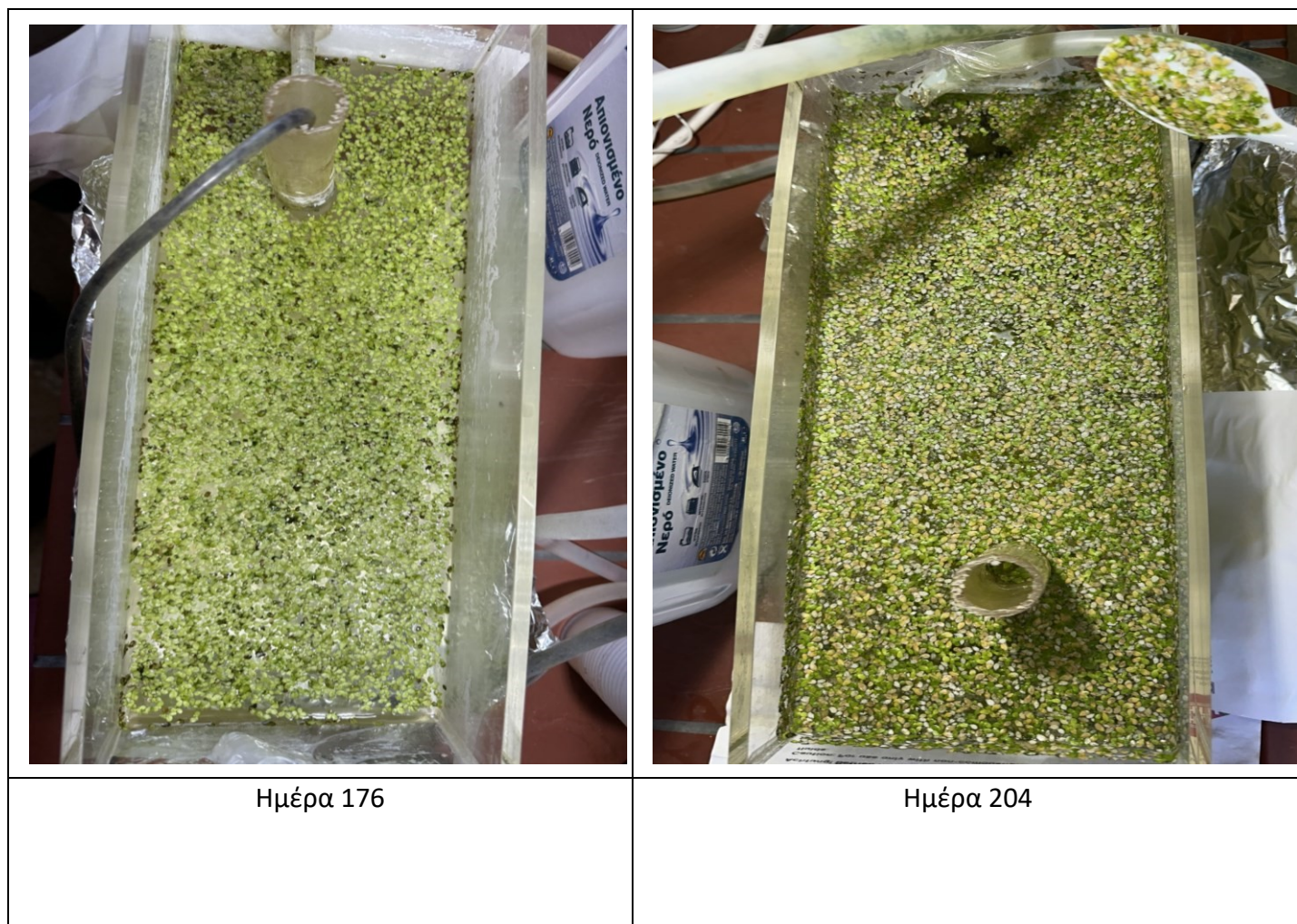
Παρουσιάζεται το διάγραμμα:



**Διάγραμμα 4.17:** Τιμές pH (Φάση 4, Effluent)

#### 4.4.2 Ανάλυση βιομάζας των φυτών στον αντιδραστήρα

Ανάλυση βιομάζας:



Εικόνα 14: Βιομάζα αντιδραστήρα (Φάση 4, ημέρα 176 και ημέρα 204)

**Ποσοστό πληρότητας επιφάνειας αντιδραστήρα :**

**Ημέρα 176:** 89% και **ημέρα 204:** 100%

**Κατά προσέγγιση αριθμός φυτών στον αντιδραστήρα :**

**Ημέρα 176:** 2.307 και **ημέρα 204:** 2.569

**4.4.3 Απολογισμός φάσης 4**

Σε αυτή τη φάση (ημέρα 176 έως 204) παρατηρούμε τα παρακάτω:

- Σε αυτή τη φάση υπήρξε ανάπτυξη της βιομάζας, απομείωση των συγκεντρώσεων των εξεταζόμενων ποιοτικών παραμέτρων και συνεπώς επετεύχθη επεξεργασία του αποβλήτου.

- Παρατηρείται μια μικρή αύξηση στις τιμές των φωσφορικών ιόντων, η οποία οφείλεται στον συχνό καθαρισμό του αντιδραστήρα, ο οποίος δεν άφηνε την δημιουργία άλγης που όπως έχει αναφερθεί, απορροφάει μεγάλη ποσότητα φωσφόρου.

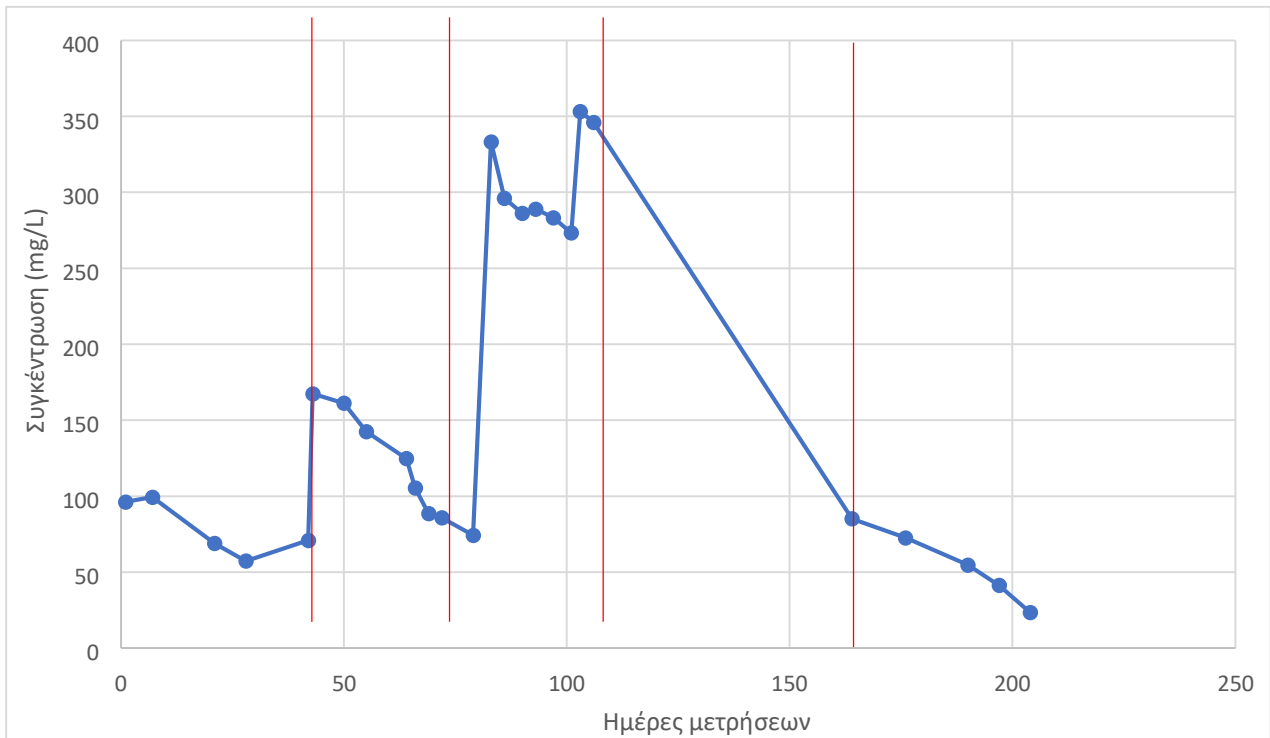
Το συγκεκριμένο πείραμα (φάση 4) κρίνεται επιτυχημένο, καθώς τα φυτά δημιούργησαν υγιείς συνθήκες για να επιζήσουν, κάτι που φαίνεται κυρίως στην διαύγεια που υπάρχει στο υγρό του αντιδραστήρα, όπου είναι σχεδόν διαφανές. Ταυτόχρονα, υπήρξε μεγάλη αύξηση στην ωφέλιμη βιομάζα κατά 262 φυτά και είναι αρκετά πιθανό να υπήρχε πολύ μεγαλύτερη αύξηση αν υπήρχε ελεύθερος χώρος στην επιφάνεια του αντιδραστήρα, καθώς είχε καλυφθεί ολόκληρη και δεν μπορούσαν τα φυτά πλέον να αναπαραχθούν. [11]

#### 4.5 Συνολικά αποτελέσματα αναλύσεων

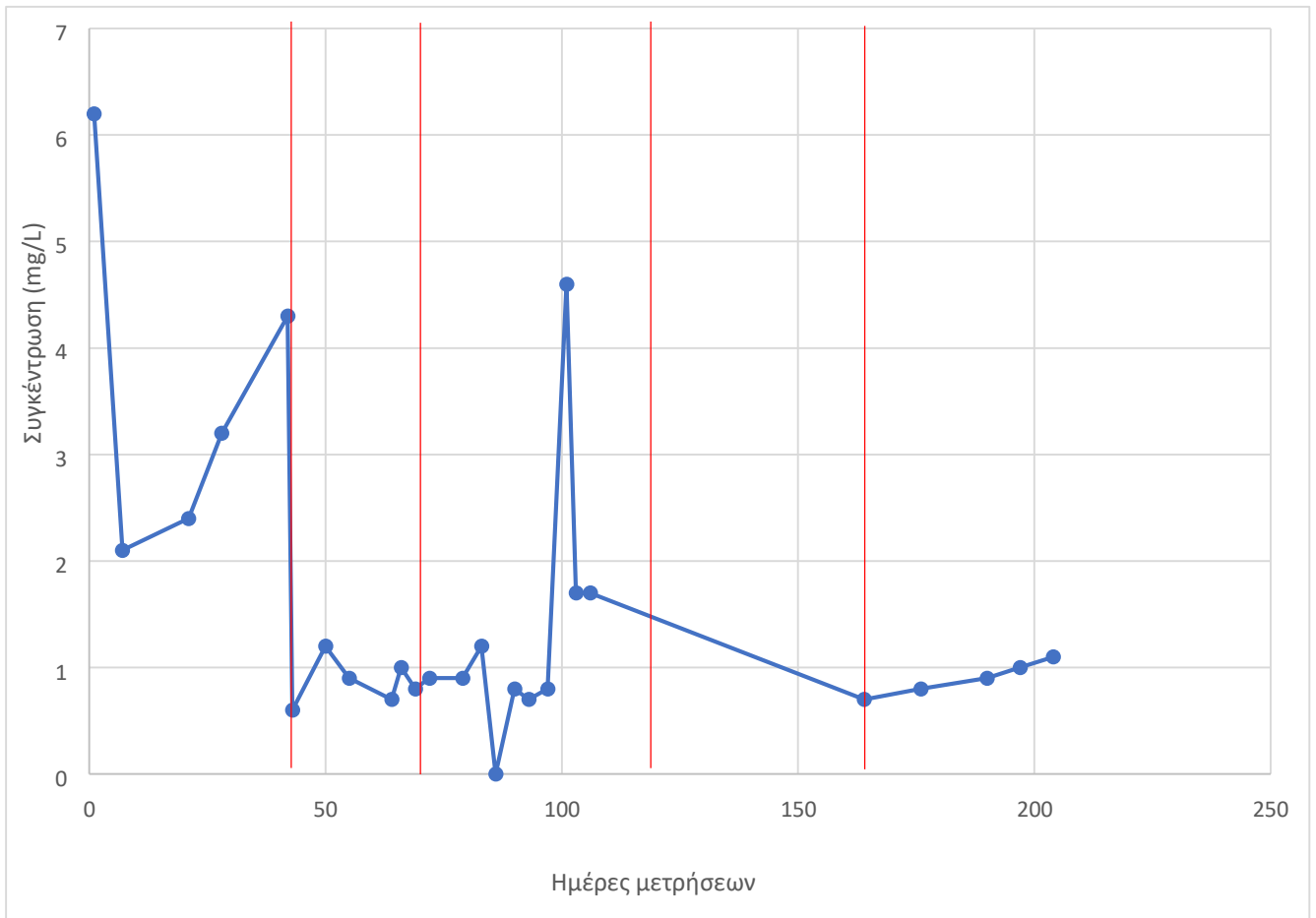
Παρακάτω αποτυπώνονται διαγράμματα από την ημέρα μέτρησης 1 έως και την ημέρα 204 σε κοινά διαγράμματα για τα βασικά στοιχεία του πειράματος: TN, PO<sub>4</sub> και το pH.

Τα παρακάτω διαγράμματα αφορούν στο υγρό που υπάρχει στον αντιδραστήρα όλες τις ημέρες μετρήσεων.

**TN (mg/L)**

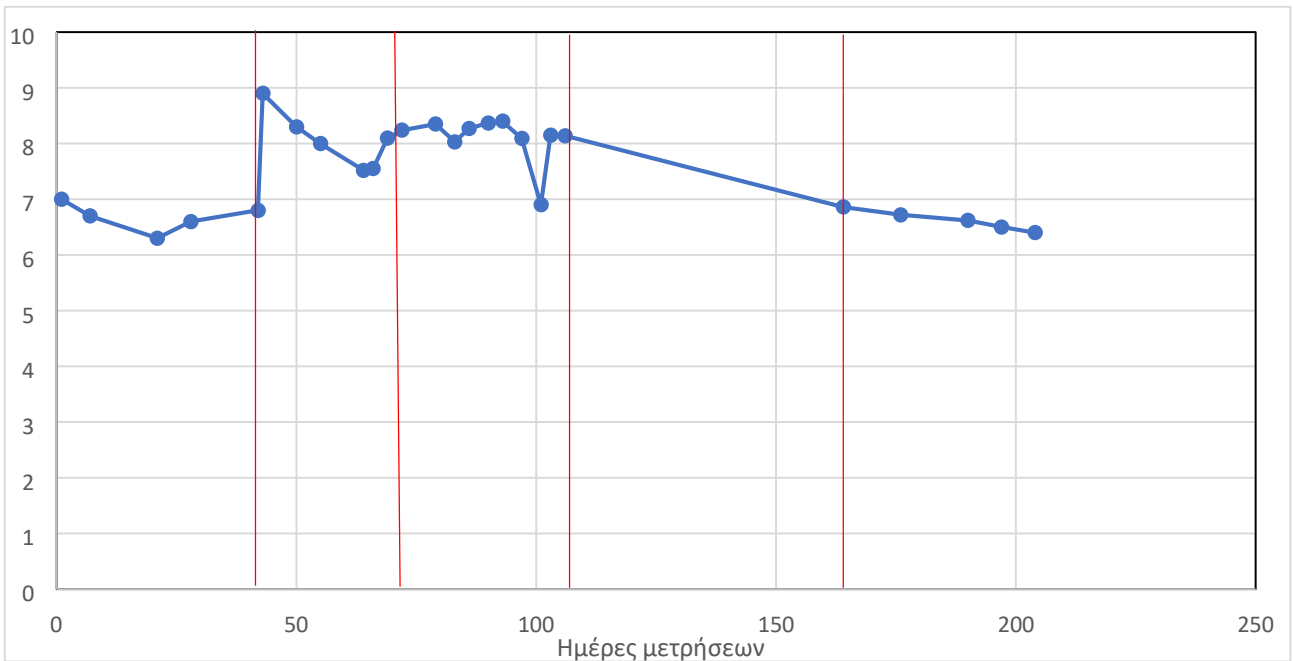


**Διάγραμμα 4.18:** Συγκεντρώσεις ολικού αζώτου (Φάσεις 1 – 4, αντιδραστήρας)  
**PO<sub>4</sub> (mg/L)**

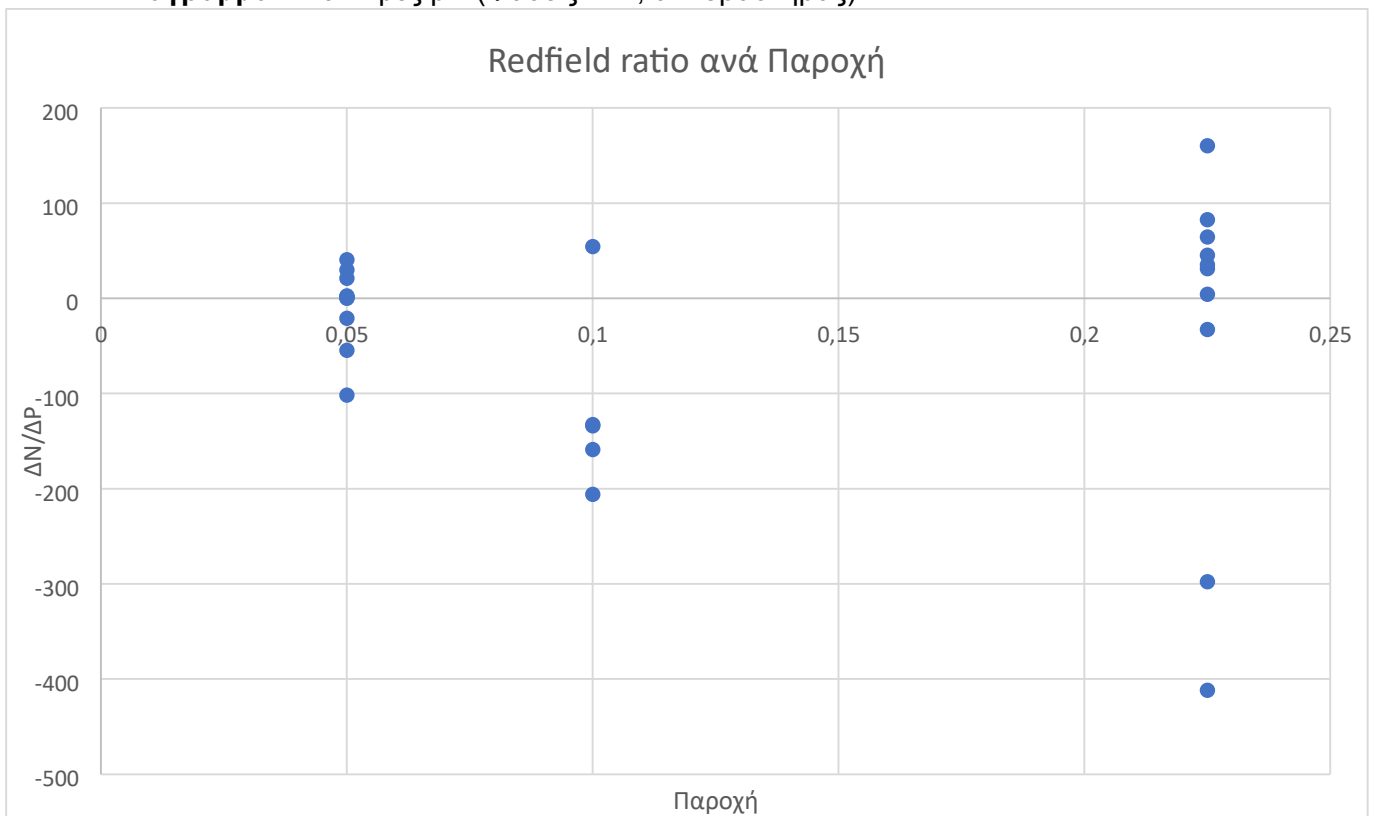


**Διάγραμμα 4.19:** Συγκεντρώσεις φωσφορικών ιόντων (Φάσεις 1 – 4, αντιδραστήρας)

pH

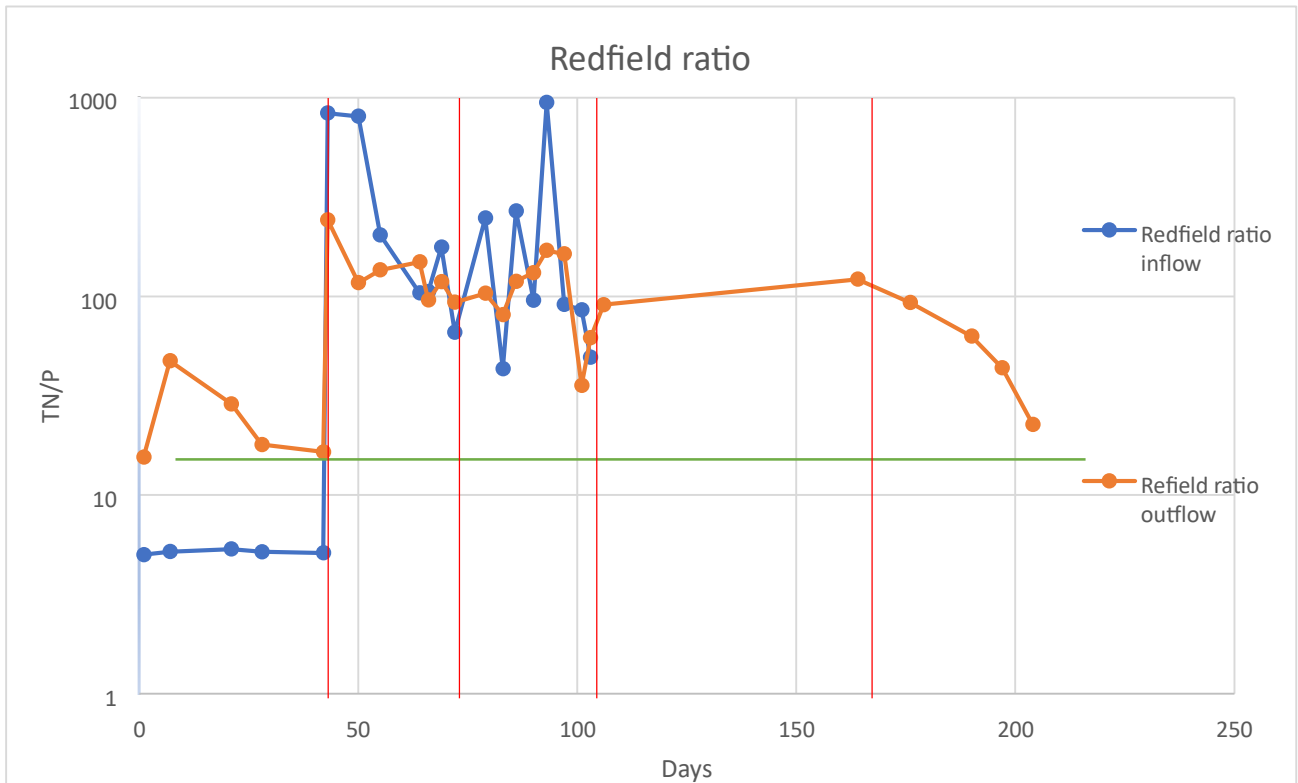


**Διάγραμμα 4.20:** Τιμές pH (Φάσεις 1- 4, αντιδραστήρας)



**Διάγραμμα 4.21:** Αναλογία Redfield ανά παροχή

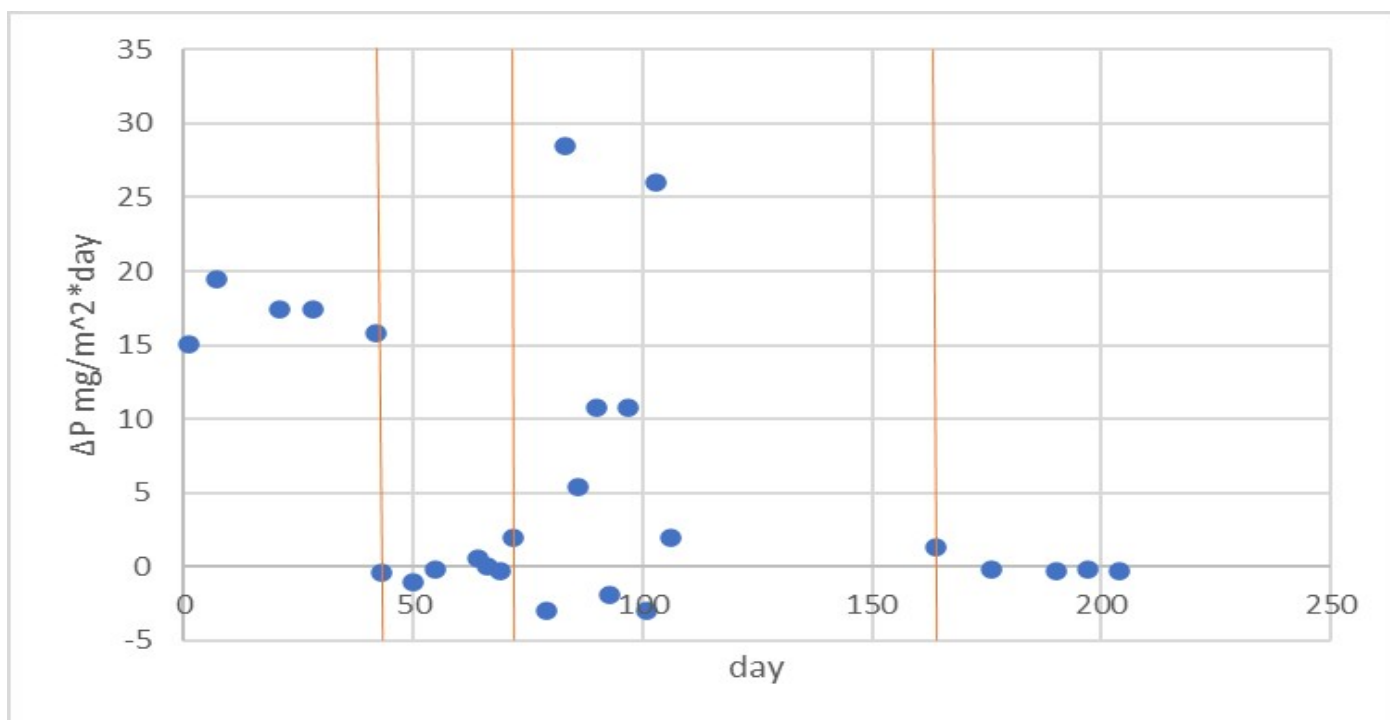
Στο διάγραμμα Redfield ανά παροχή συμπεραίνουμε ότι σχεδόν με όλες τις παροχές του συστήματος ο μέσος όρος του λόγου Redfield παραμένει σταθερός, το οποίο σημαίνει ότι οι βιολογικές διεργασίες που συμβαίνουν εντός του αντιδραστήρα φαίνεται να έχουν αναλογικά ίδιες απαιτήσεις σε άζωτο και φώσφορο σε όλες τις παροχές.



**Διάγραμμα 4.22:** Αναλογία redfield ανά ημέρα για είσοδο και έξοδο

Στην δική μας περίπτωση, το σύστημα στην έξοδο του αντιδραστήρα είναι πάντα ολιγοτροφικό, καθώς ο λόγος Redfield είναι πάνω από την τιμή 16 σε όλες τις ημέρες μετρήσεων, οπότε η έξοδος του αντιδραστήρα θεωρείται ασφαλής για την εναπόθεση της στο περιβάλλον.

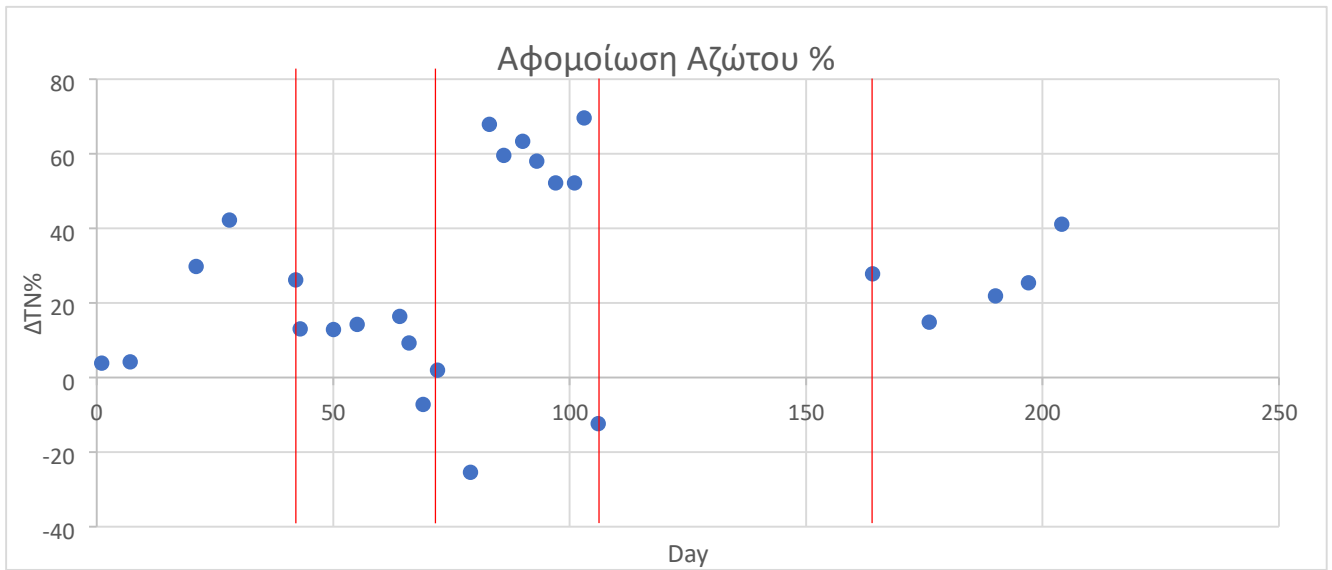




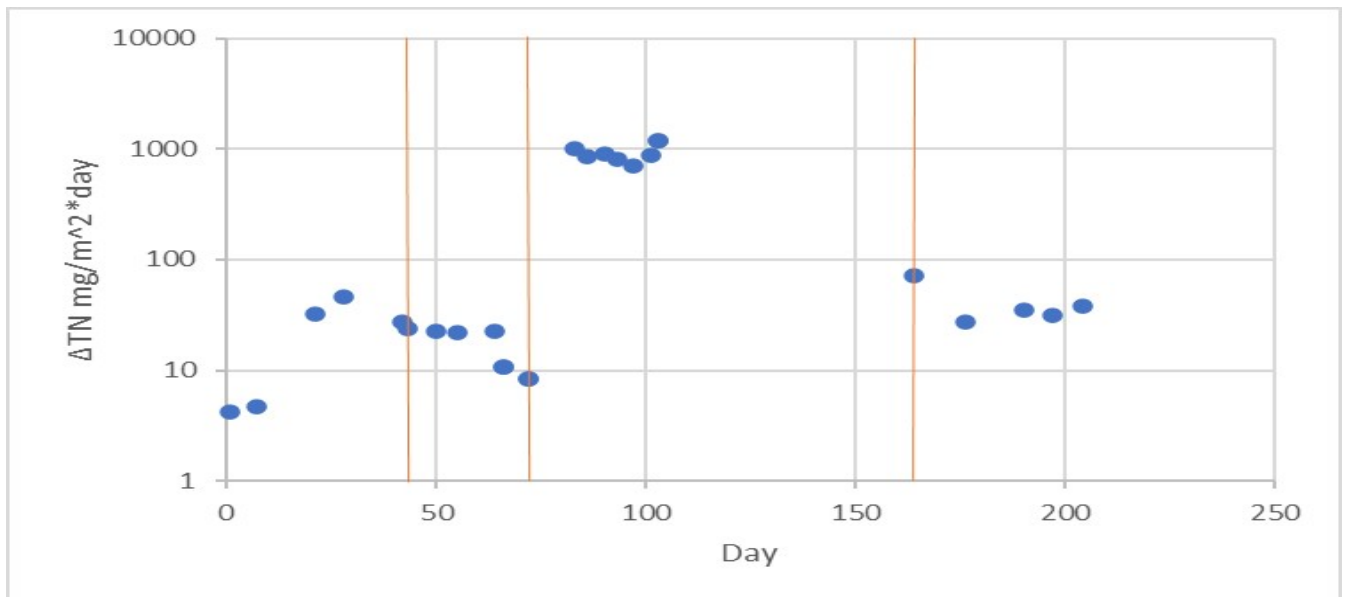
**Διάγραμμα 4.23:** Αφομοίωση φωσφόρου ανά ημέρα

Η αφομοίωση φωσφόρου ανά ημέρα στο σύστημα του αντιδραστήρα εξαρτάται κατά βάση από την παρουσία άλγης στον βυθό του αντιδραστήρα. Παρατηρείται ότι τις ημέρες όπου δεν έχει καθαριστεί ο αντιδραστήρας και υπάρχει άλγη, το σύστημα μας απορροφάει μεγάλη ποσότητα φωσφόρου.

**Διάγραμμα ΔTN % ανά ημέρα και Διάγραμμα ΔTN mg/m<sup>2</sup>\*d ανά ημέρα:**



**Διάγραμμα 4.24:** Αφομοίωση αζώτου (%) ανά ημέρα



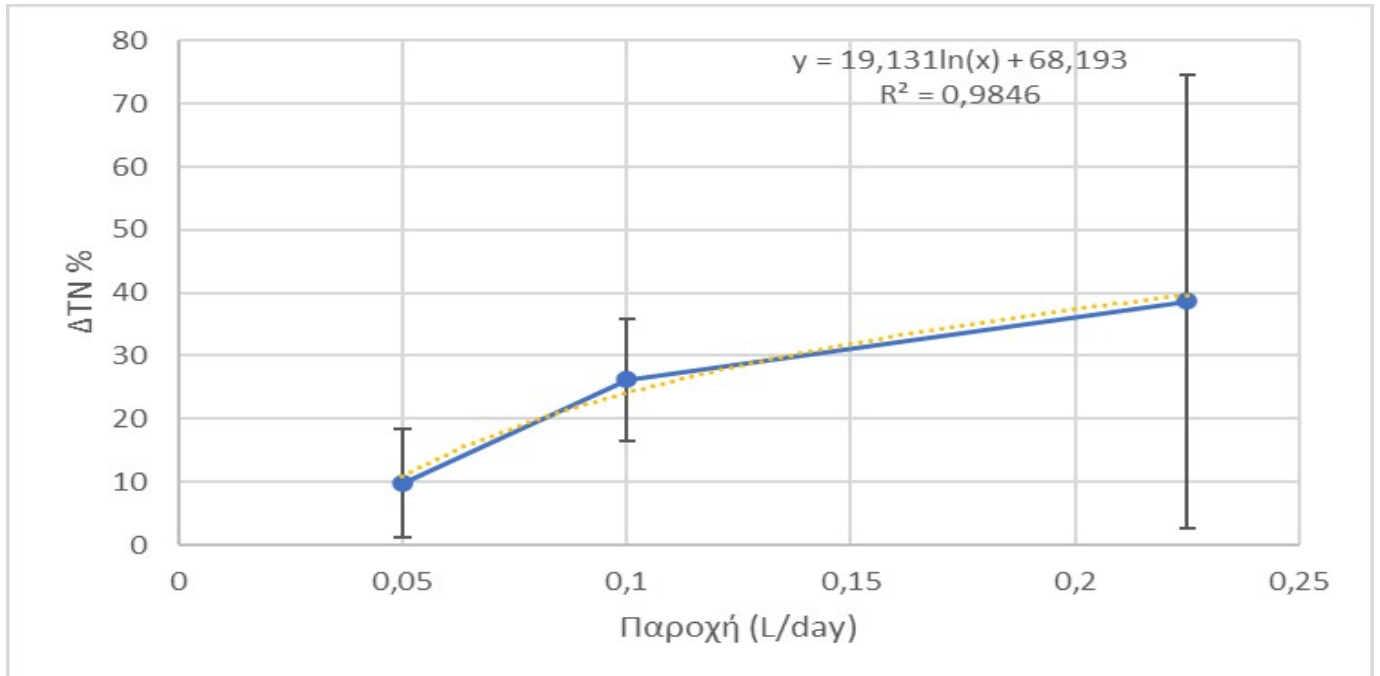
**Διάγραμμα 4.25:** Αφομοίωση αζώτου ανά μονάδα επιφάνειας ανά ημέρα

Η αφομοίωση του ολικού αζώτου ήταν κατά μέσο όρο υψηλότερη κατά την τρίτη φάση του πειράματος (φάση με την υψηλότερη παροχή), πριν η θερμοκρασία του αντιδραστήρα ανέβει σε επίπεδο μη ανεκτό για τη διατήρηση των φυτών. Αυτό υποδεικνύει ότι η αυξημένη παροχή, άρα αυξημένα επίπεδα αζώτου στον αντιδραστήρα έδρασαν θετικά στην ικανότητα αφομοίωσης του, ωστόσο ο παράγοντας της θερμοκρασίας και συγκεκριμένα η αύξησή της έδρασαν κατασταλτικά.

**Διάγραμμα ΔTN% αφομοίωση ανά παροχή και Διάγραμμα Μ.Ο. ΔTN% ανά παροχή:**



**Διάγραμμα 4.26:** Αφομοίωση ΔTN% ανά παροχή



**Διάγραμμα 4.27:** Αφομοίωση Μ.Ο. ΔTN% ανά παροχή

Η απόδοση του αντιδραστήρα φαίνεται να είναι υψηλότερη κατά μέσο όρο, όσο αυξάνεται η παροχή. Σύμφωνα με τα δεδομένα του Διαγράμματος Μ.Ο. ΔΤΝ% ανά παροχή, φαίνεται πως αυτή αυξάνεται με μειούμενη τάση, πιθανόν μέχρι να φτάσει ένα μέγιστο σημείο, που αποτελεί το σημείο της αντοχής του συστήματος.

## 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα των αναλύσεων στα τέσσερα σενάρια (φάσεις) που εξετάστηκαν. Παρακάτω συνοψίζονται τα συμπεράσματα από την έρευνα που πραγματοποιήθηκε, ανά φάσεις:

- Φάση 1 (ημέρα 1 έως 42): Όσον αφορά στην προσθήκη του θρεπτικού υγρού Hoagland, οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στην έναρξη και έπειτα από 42 ημέρες στην έξοδο του αντιδραστήρα. Η προσθήκη του υγρού Hoagland συνέδραμε στην ανάπτυξη της βιομάζας και έδρασε καταλυτικά στην αύξηση του αριθμού των φυτών στον αντιδραστήρα. Σχετικά με τη συγκέντρωση των νιτρικών ( $\text{NO}_3$ ), παρατηρήθηκε ποσοστιαία μείωση μέχρι και 42%, ενώ σχετικά με τη συγκέντρωση των φωσφορικών ( $\text{PO}_4$ ) παρατηρήθηκε ποσοστιαία μείωση μέχρι 90%. Η προσθήκη του θρεπτικού υγρού αύξησε τον αριθμό των φυτών στον αντιδραστήρα από 1.760 σε 1.856, ενώ αυξήθηκε και η επιφάνεια πλήρωσης από 60% σε 66%. Επίσης, διαπιστώθηκε ότι τα φυτά χρειάζονται κάποιο χρονικό διάστημα για να προσαρμοστούν στις συνθήκες του αντιδραστήρα (υγρό Hoagland) και για αυτό μετά την πρώτη εβδομάδα το ποσοστό αφομοίωσης του αζώτου αυξήθηκε απότομα. Αυτό το χρονικό διάστημα ονομάζεται περίοδος προσαρμογής. Με βάση τα παραπάνω εξάγεται το συμπέρασμα ότι η προσθήκη του θρεπτικού υγρού Hoagland επιδρά θετικά τόσο στην ανάπτυξη των φυτών, όσο στην απομάκρυνση των νιτρικών και φωσφορικών ενώσεων.
- Φάση 2 (ημέρα 43 έως 69): Όσον αφορά στις αναλύσεις του αποβλήτου με παροχή  $Q=50$  ml/d, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις εντός και εκτός του αντιδραστήρα από την ημέρα 43 έως την ημέρα 69. Οι αναλύσεις που έγιναν αυτήν την περίοδο αφορούσαν τα νιτρικά ιόντα ( $\text{NO}_3$ ), τα αμμωνιακά ιόντα ( $\text{NH}_4^+$ ), τα φωσφορικά ιόντα ( $\text{PO}_4$ ), το ολικό άζωτο (TN), τον ολικό άνθρακα (TC), το pH, την αγωγιμότητα και τέλος, την ανάλυση της βιομάζας και του αριθμού των φυτών που ήταν ζωντανά στον αντιδραστήρα. Στο σύνολο των εξεταζόμενων παραμέτρων, εκτός από τα φωσφορικά άλατα, η επίδραση του αντιδραστήρα ήταν ευμενής, καθώς οδήγησε σε μείωση των συγκεντρώσεων των ρυπαντικών φορτίων, σε σύγκριση με

τις αντίστοιχες τιμές εκτός του αντιδραστήρα. Η προσθήκη του αποβλήτου με παροχή  $Q=50\text{ml/d}$  αύξησε τον αριθμό των φυτών στον αντιδραστήρα από 1.856 σε 2.060, ενώ αυξήθηκε και η επιφάνεια πλήρωσης από 66% σε 77%. Η αύξηση της συγκέντρωσης των φωσφορικών δικαιολογείται, καθώς στον αντιδραστήρα παράγονται μικροφύκη, που απορροφούν μεγάλη ποσότητα φωσφόρου. Αντίστοιχη περίοδος προσαρμογής απαιτήθηκε και σε αυτό το πείραμα, όπου υπήρχε ροή με απόβλητο, καθώς την πρώτη εβδομάδα παρατηρήθηκε ότι η απορρόφηση των συστατικών από τα φυτά είναι μικρή, σε σχέση με τις επόμενες ημέρες. Η συγκέντρωση των νιτρικών είναι μηδενική, λόγω της οξυγόνωσης με την επίδραση του αέρα. Η προσθήκη του αποβλήτου με παροχή  $Q=50\text{ml/d}$  αύξησε τον αριθμό των φυτών στον αντιδραστήρα από 1.856 σε 2.060, ενώ αυξήθηκε και η επιφάνεια πλήρωσης από 66% σε 77%. Η αύξηση της συγκέντρωσης των φωσφορικών δικαιολογείται, καθώς στον αντιδραστήρα παράγονται μικροφύκη, που απορροφούν μεγάλη ποσότητα φωσφόρου.

- Φάση 3 (ημέρα 72 έως 106): Όσον αφορά στις αναλύσεις του αποβλήτου με παροχή  $Q=200\text{250ml/d}$  και ταυτόχρονα ανακυκλοφορία του υγρού του αντιδραστήρα και εκροή με υπερχειλίση, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις εντός και εκτός του αντιδραστήρα από την ημέρα 72 έως την ημέρα 106. Οι αναλύσεις που έγιναν αυτήν την περίοδο αφορούσαν ομοίως τα νιτρικά ιόντα ( $\text{NO}_3$ ), τα αμμωνιακά ιόντα ( $\text{NH}_4^+$ ), τα φωσφορικά ιόντα ( $\text{PO}_4$ ), το ολικό άζωτο (TN), τον ολικό άνθρακα (TC), το pH, την αγωγιμότητα και τέλος, την ανάλυση της βιομάζας και του αριθμού φυτών που ήταν ζωντανά στον αντιδραστήρα. Η επίδραση του αντιδραστήρα με τον τετραπλασιασμό της εισερχόμενης παροχής ήταν δυσμενής, καθώς οδήγησε σε νέκρωση των φυτών. Το συμπέρασμα είναι ότι το εν λόγω σύστημα δεν δύναται να επεξεργαστεί τόσο αυξημένη παροχή αποβλήτου. Αποτέλεσμα της νέκρωσης των φυτών ήταν η αύξηση των συγκεντρώσεων των ρυπαντικών φορτίων στο αντιδραστήρα. Η παραπάνω περίοδος μετρήσεων χαρακτηρίζεται ως περίοδος σφάλματος για την εξέλιξη του πειράματος, καθώς έχει προκληθεί ζημία στα φυτά του αντιδραστήρα με τη νέκρωση 500 σχεδόν φυτών, δηλαδή το 20% της υπάρχουσας βιομάζας. Η προσθήκη του αποβλήτου με παροχή  $Q=200\text{-}250\text{ ml/d}$  μείωσε τον αριθμό των φυτών στον αντιδραστήρα από 2.060 σε 1.551, ενώ μειώθηκε και η επιφάνεια πλήρωσης από 77% σε 58%.
- Φάση 4 (ημέρα 176 έως 204): Όσον αφορά στις αναλύσεις του αποβλήτου με παροχή  $Q=100\text{0ml/d}$  και με ανακυκλοφορία του υγρού του αντιδραστήρα και εκροή με υπερχειλίση, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις εντός και εκτός του αντιδραστήρα από την ημέρα 176 έως την ημέρα 204. Οι αναλύσεις που έγιναν αυτήν την περίοδο αφορούσαν ομοίως τα νιτρικά ιόντα ( $\text{NO}_3$ ), τα αμμωνιακά ιόντα ( $\text{NH}_4^+$ ), τα φωσφορικά ιόντα ( $\text{PO}_4$ ), το ολικό άζωτο (TN), τον

ολικό άνθρακα (TC), το pH , την αγωγιμότητα και τέλος, την ανάλυση της βιομάζας και του αριθμού φυτών που ήταν ζωντανά στον αντιδραστήρα. Η επίδραση του αντιδραστήρα με εισερχόμενη παροχή ίση με 100 ml/d ήταν ευμενής. Η προσθήκη του αποβλήτου με παροχή Q=100 ml/d αύξησε τον αριθμό των φυτών στον αντιδραστήρα από 2.307 σε 2.569, ενώ αυξήθηκε και η επιφάνεια πλήρωσης από 89% σε 100%.

Κατά την ανάπτυξη του φυτού σε αντιδραστήρα συνεχούς ροής, παρατηρήθηκε έντονη παρουσία άλγης με ταυτόχρονη αναστολή της ανάπτυξης του φυτού. Λόγω της ανταγωνιστικής δράσης μεταξύ άλγης και μακρόφυτων είναι πιθανόν η ανάπτυξή της να έδρασε ως παράγοντας παρεμπόδισης στην ανάπτυξη του φυτού. Ως λύση προτείνεται η εξ αρχής κάλυψη μεγάλου μέρους της επιφάνειας του μέσου καλλιέργειας (>50%), ώστε να ανακόπτεται η πορεία του ηλιακού φωτός στα βαθύτερα στρώματα νερού και να αναστέλεται η ανάπτυξη άλγης. Επίσης, προτείνεται συνεχής καθαρισμός του βυθού του αντιδραστήρα.

Προτείνεται στο μέλλον να διερευνηθεί η επίδραση ξεχωριστά της αύξησης της θερμοκρασίας και της αύξησης της εισερχόμενης παροχής του αποβλήτου, ώστε να είναι σαφές ποιος είναι ο κύριος ανασταλτικός παράγοντας στην ανάπτυξη της βιομάζας.

Με βάση τα εξεταζόμενα σενάρια συμπεραίνουμε ότι η προσθήκη του θρεπτικού υγρού επιδρά ευμενώς στην ανάπτυξη των φυτών και συνεπώς στη λειτουργία του αντιδραστήρα. Με βάση τις μετρήσεις έχουμε βρει τη μέγιστη παροχή που μπορεί να επεξεργαστεί το εν λόγω σύστημα και έχουμε καταλήξει ότι η ανακυκλοφορία συνδράμει θετικά στην επεξεργασία του αποβλήτου από τα φυτά.

Τα υδροχαρή φυτά *lemna minor* χρειάζονται σταδιακή αλλαγή περιβάλλοντος, καθώς σε οποιαδήποτε άμεση και μη ελεγχόμενη προσθήκη του αποβλήτου, υπήρχε μεγάλη ποσότητα νεκρών φυτών. Επίσης, σε κάθε τέτοια αλλαγή απαιτείται μια περίοδος προσαρμογής των φυτών, περίπου επτά με δέκα ημέρες.

Τέλος, όσο οι συνθήκες περιβάλλοντος προσεγγίζουν τις ιδανικές, η ανάπτυξη των φυτών γίνεται ραγδαία, όπως και η απόδοσή τους στην απορρόφηση αμμωνιακών και φωσφορικών ιόντων, το οποίο επιβεβαιώνει τις ιδιότητές του ως κατάλληλο φυτό για χρήση τσε τριτογενή επεξεργασία αποβλήτων.

## Βιβλιογραφία:

1. Acosta, K., Appenroth, K.J., Borisjuk, L., Edelman, M., Heinig, U., Jansen, M.A.K., Oyama, T., Pasaribu, B., Schubert, I., Sorrels, S., Sree, K.S., Xe, S., Todd, P.M., Lam, E., 2021. Return of the Lemnaceae: duckweed as model plant system in the genomics and postgenomics era. *Plant Cell* 33 (10), 3207–3234.
2. Alaerts GJ, Mahbubar R, Kelderman P. Performance analysis of a full-scale duckweed-covered sewage lagoon. *Water Research*. 1996 Apr 1; 30(4):843–52.
3. Al Nozaily F. Performance and Process Analysis of Duckweed-Covered Sewage Lagoons for High Strength Sewage-the Case of Sana'a, Yemen. CRC Press; 2000.
4. Andrades-Moreno, L., Del Castillo, I., Parra, R., Doukkali, B., Redondo-Gómez, S., Pérez-Palacios, P. & Rodríguez-Llorente, I. D. 2014. Prospecting metal-resistant plant-growth promoting rhizobacteria for rhizoremediation of metal contaminated estuaries using *Spartina densiflora*. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(5), 3713-3721.
5. Antonious, G. F. 2016. Distribution of seven heavy metals among hot pepper plant parts. *Journal of environmental science and health, part B*, 51(5), 309-315.
6. Appenroth, K.J., Sree, K.S., Bohm, V., Hammann, S., Vetter, W., Leiterer, M., Jahreis, G., 2017. Nutritional value of duckweeds (Lemnoideae) as human food. *Food Chem*. 217, 266–273.
7. Azeez, N. M., & Sabbar, A. A. 2012. Efficiency of duckweed (*Lemna minor* L.) in phytotreatment of wastewater pollutants from Basrah oil refinery. *Journal of Applied Phytotechnology in Environmental Sanitation*, 1(4), 163-172.
8. Chakrabarty, R., Clark, W.D., Sharma, J.G., Goswami, R.K., Shrivastav, A.K., Tocher, D.R., 2018. Mass production of *Lemna minor* and its amino acid and fatty acid profiles. *Front. Chem*. 2018.
9. Cheng J, Landesman L, Bergmann BA, Classen JJ, Howard JW, Yamamoto YT. Nutrient removal from swine lagoon liquid by *Lemna minor* 8627. *Transactions of the ASAE*. 2002; 45(4):1003.

10. Devlamynck, R., de Souza, M.F., Bog, M., Leenknecht, J., Eeckhout, M., Meers, E., 2020. Effect of the growth medium composition on nitrate accumulation in the novel protein crop *Lemna minor*. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 206, 111380, 2020.
11. Driever SM, van Nes EH, Roijackers RM. Growth limitation of *Lemna minor* due to high plant density. *Aquatic Botany*. 2005 Mar 1; 81(3):245–51.
12. Duong TP, Tiedje JM. Nitrogen fixation by naturally occurring duckweed–cyanobacterial associations. *Canadian journal of microbiology*. 1985 Apr 1; 31(4):327–30.
13. Droop, M.R. (1983). 25 years of algal growth kinetics: a personal view. *Bot. Mar.*, **26**: 99–112.
14. Dunbadin, J.S. and Bowmer, K.H. (1992) Potential Use of Constructed Wetlands for Treatment of Industrial Wastewaters Containing Metals. *Science of the Total Environment*, 11, 151-168. [http://dx.doi.org/10.1016/0048-9697\(92\)90353-T](http://dx.doi.org/10.1016/0048-9697(92)90353-T)
15. Falkowski, P.G. (2000). Rationalizing elemental ratios in uni- cellular algae. *J. Phycol.*, **36**: 3–6.
16. Federation WE. Association APH. Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association (APHA): Washington, DC, USA. 2005.
17. Ferreira, R.B., Shaw, N.M., 1989. Effect of osmotic stress on protein turnover in *Lemna minor* fronds. *Planta* 179 (4), 456–465, 1989.
18. Forstner, U and Wittmann, G.T.W. 1983. Metal pollution in the aquatic environment. Springer-Verlag , Berlin m pp, 30-61
19. Gao J, Oloibiri V, Chys M, Audenaert W, Decostere B, He Y, et al. The present status of landfill leachate treatment and its development trend from a technological point of view. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. 2015 Mar 1; 14(1):93–122.
20. Hikosaka, K., Niinemets, U., Anten, N.P., 2015. Canopy Photosynthesis: from Basics to Applications. Springer, pp. 79–83.



21. IOP conference Series: Earth and Environmental Science. Removal Efficiency, Accumulation and Biochemical Response of Lemna minor L. Exposed to Some Heavy Metals,
22. Khellaf, N., Zerdaoui, M., 2009. Growth response of duckweed Lemna minor to heavy metal pollution, Iran. J. Environ. Health Sci. Eng. 6 (3), 161–166.
23. Khvatkov, P., Chernobrovkina, M., Okuneva, A., Dolgov, S., 2019. Creation of culture media for efficient duckweeds micropropagation (Wolffia arrhiza and Lemna minor) using artificial mathematical optimization models. Plant Cell Tissue Organ Cult. 139.
24. Krishna KB, Polprasert C. An integrated kinetic model for organic and nutrient removal by duckweed- based wastewater treatment (DUBWAT) system. ecological engineering. 2008 Oct 6; 34(3):243–50.
25. Kuehdorf, K., Appenroth, K.J., 2012. Influence of salinity and high temperature on turion formation in the duckweed Spirodela polyrhiza. Aquat. Bot. 97 (1), 69–72. February 2012.
26. Landolt E, Kandeler R. Biosystematic investigations in the family of duckweeds (Lemnaceae), Vol. 4: the family of Lemnaceae-a monographic study, Vol. 2 (phytochemistry, physiology, application, bibliog- raphy). Veroeffentlichungen des Geobotanischen Instituts der ETH, Stiftung Ruebel (Switzerland). 1987.
27. Landesman L, Chang J, Yamamoto Y, Goodwin J. Nutritional value of wastewatergrown duckweed for fish and shrimp feed. World Aquaculture. 2002 Dec; 33(4):39–40.
28. Lasfar S, Monette F, Millette L, Azzouz A. Intrinsic growth rate: a new approach to evaluate the effects of temperature, photoperiod and phosphorus–nitrogen concentrations on duckweed growth under con- trolled eutrophication. Water research. 2007 Jun 1; 41(11):2333–40. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.01.059> PMID: 17462697
29. Nielsen, M.V. (1996). Growth and chemical composition of the toxic dinoflagellate *Gymnodinium galatheanum* in relation to irradiance, temperature and salinity. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **136**: 205–211.

30. Gay F.N., "Biology of Wastewater Treatment", Second Edition, Imperial College Press, 2004.
31. Petersen, F., Demann, J., Restemeyer, D.J., Ulbrich, A., Olf, H.-W., Westendarp, H., Appenroth, K.-J., 2021. Influence of the nitrate-N to ammonium-N ratio on relative growth rate and crude protein con
32. Petersen, F., Demann, J., Restemeyer, D., Olf, H.W., Westendarp, H., Appenroth, K.J., Ulbrich, A., 2022. Influence of light intensity and spectrum on duckweed growth and proteins in a small-scale, re-circulating indoor vertical farm. *Plants* 11 (8), 1010.
33. Raven, J.A. (1984). A cost-benefit analysis of photon absorption by photosynthetic cells. *New Phytol.*, **98**: 593–625.
34. Redfield, A.C. (1958). The biological control of chemical factors in the environment. *Am. Sci.*, **46**: 205–221.
35. Singh, P. K., & Tewari, R. K. 2003. Cadmium toxicity induced changes in plant water relations and oxidative metabolism of *Brassica juncea* L. plants. *Journal of Environmental Biology*, 24(1), 107-112.
36. Sood, A., Uniyal, P. L., Prasanna, R., & Ahluwalia, A. S. 2012. Phytoremediation potential of aquatic macrophyte, *Azolla*. *Ambio*, 41(2), 122-137.
37. Stewart, J.J., Adams, W.W., Escobar, C.M., Lopez-Pozo, M., Demmig-Adams, B., 2020. Growth and essential carotenoid micronutrients in *Lemna gibba* as a function of growth light intensity. *Front. Plant Sci.* 11, 480.
38. Tchounwou, P.B., Yedjou, C.G., Patlolla, A.K., Sutton, J.S. 2014. Heavy Metals Toxicity and the Environment, HHS Public Access, Author manuscript
39. Terry, K.L., Laws E.A. and Burns, D.J. (1985). Growth rate variation in the N:P requirement ratio of phytoplankton. *J. Phycol.*, **21**: 323–329.
40. Turner, D and Owens N.J. (1995). A biogeochemical study in the Bellingshausen Sea: Overview of the STERNA 1992 expedition. *Deep-Sea Res. II*, **42**: 907–932.
41. Ueno, K., Ito, S., Oyama, T., 2021. An endogenous basis for synchronisation characteristics of the circadian rhythm in proliferating *Lemna minor* plants. *New Phytol.* Volume233 (Issue5), 2203–2215, 2022.

42. Van Dyck, I., Vanhoudt, N., Battle, J.V., Hormans, N., Nauts, R., Van Gompel, A., Claesen, J., Vangronsveld, J., 2021. Effects of environmental parameters on Lemna minor growth: an integrated experimental and modelling approach. *J. Environ. Manag.* 300, 113705.
43. Villareal, T.A and Carpenter, E.J. (1994). Chemical composition and photosynthetic characteristics of *Ethmodiscus rex* (Bacillario- phyceae): evidence for vertical migration. *J. Phycol.*, **30**: 1–8.
44. Walsh, J.J. (1996). Nitrogen fixation within a tropical upwelling ecosystem: evidence for a Redfield budget of carbon–nitrogen cycling by the total phytoplankton community. *J. Geophys. Res.*, **101**: 20607–20615.
45. Warsi, O.M., Dykhuizen, D.E., 2017. Evolutionary implications of Liebig's law of the minimum: selection under low concentrations of two non-substitutable nutrients. *Ecol. Evol.* 5296–5309. Volume7, Issue14, 201.
46. Wu, H. Zhang J., Li, Fan J., Zou, Y, 2013b. Mass balance study on phosphorus removal in constructed wetland microcosms treating polluted river water, 844-850.
47. Βλυσίδης Α., Γρηγοροπούλου Ε., Λυμπεράτος Γ., "Περιβαλλοντική μηχανική", 2017, Αθήνα.
48. Θεοδόση Παλιμέρη, Δήμητρα, "ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ: Αναερόβια χώνευση υγρών αποβλήτων σε αντιδραστήρα UASB", Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Χημικών Μηχανικών.
49. [https://en.wikipedia.org/wiki/Lemna\\_minor](https://en.wikipedia.org/wiki/Lemna_minor)
50. [https://el.wikipedia.org/wiki/Επεξεργασία\\_λυμάτων](https://el.wikipedia.org/wiki/Επεξεργασία_λυμάτων)
51. <https://chat.openai.com>