



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Εργαστήριο Διαχείρισης Τοξικών και Επικίνδυνων Αποβλήτων

Διπλωματική Εργασία

*"Εξυγίανση υγρών οικιακών αποβλήτων μέσω
ελαιωδών φυτών και παραγωγή βιομάζας"*

Θεοδώρα Μαντζάνα - Πετεινέλλη

Επιβλέποντες:

Prof. Dr. R. Cossu

Prof. Dr. E. Gidakos

Εξεταστική Επιτροπή:

Γιδαράκος Ευάγγελος

Καθηγητής

Ματζαβίνος Διονύσιος

Καθηγητής

Βενιέρη Δανάη

Λέκτορας

Χανιά

Νοέμβριος 2012

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το πείραμα της παρούσας διπλωματικής αφορά στην εξυγίανση υγρών οικιακών αποβλήτων διαμέσου της άρδευσής τους σε φυτά, κατάλληλα τόσο να εξυγιάνουν απόβλητα αντίστοιχων ρυπαντικών φορτίων, όσο και να χρησιμοποιήσουν τα θρεπτικά από τα απόβλητα αυτά για την αύξηση της μάζας τους.

Επιλέχθηκε η συμμετοχή φυτών που στην πορεία θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ενέργειας έπειτα από εκμετάλλευση του θερμικού τους περιεχομένου. Τα φυτά που πήραν μέρος στο πείραμα είναι το ηλιοτρόπιο, η σόγια και η ελαιοκράμβη και βρέθηκαν κάτω από τις ίδιες συνθήκες ανάπτυξης σε εσωτερικό χώρο.

Για την κατανόηση της συμπεριφοράς τους πραγματοποιήθηκαν οι απαραίτητες μετρήσεις κατά τους μήνες διάρκειας του πειράματος, δηλαδή στα αρδευόμενα απόβλητα, στα διηθήματά τους έπειτα από την φυτική επεξεργασία, στην τελική μάζα των πειραματικών φυτών και σε αυτή των αντίστοιχων μαρτύρων τους οι οποίοι αρδεύτηκαν με νερό βρύσης. Η καταγραφή των εισερχόμενων και εξερχόμενων ρύπων για κάθε φυτικό είδος μας παρέχει πληροφορίες σχετικά με τις δυνατότητές του να εξυγιάνει τα υγρά οικιακά απόβλητα.

Με το πέρας του πειράματος η ελαιοκράμβη παρουσιάζει την μεγαλύτερη αύξηση στη μάζα της και πετυχαίνει μεγαλύτερες αποδόσεις απομάκρυνσης των περιεχόμενων στα απόβλητα ρύπων.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Ευχαριστώ τον επιβλέποντα καθηγητή μου Κο Γιδαράκο για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου, αλλά και για την ευκαιρία που μου προσέφερε να διεξάγω το πειραματικό κομμάτι της διπλωματικής μου στην Πάντοβα της Ιταλίας, κερδίζοντας σε εμπειρία.

Ευχαριστώ τον Prof. Dr. Raffaello Cossu, τον αντίστοιχο επιβλέποντά μου, διδάσκοντα του Università degli Studi di Padova.

Για την ψυχολογική -και όχι μόνο- υποστήριξη που μου παρείχαν απλόχερα όλο το διάστημα των σπουδών μου, η οποία με βοήθησε να ξεπεράσω τις αντιξοότητες, ευχαριστώ την οικογένειά μου και ιδίως τους γονείς μου, Πετεινέλλη Ειρήνη και Μαντζάνα Ευθύμιο.

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής είμαι ιδιαίτερα ευγνώμων στις φίλες μου Μανατάκη Μερόπη και Γκίκα Όλγα. Τις ευχαριστώ για τη συμπαράστασή τους, αλλά και την έμπρακτη βοήθειά τους με ουσιαστικές συμβουλές και παρατηρήσεις όλα αυτά τα χρόνια. Ευχαριστώ για την συμπαράσταση καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής, τη Μαρία Γράψα που με στήριξε και μου έδωσε κουράγιο, καθώς και για την παρότρυνσή της για τη βέλτιστη κατάληξή της.

Ευχαριστώ τον Αλέξανδρο Γεωργογιάννη και τον Λευτέρη Ζαμπετάκη για τις πολύτιμες συμβουλές τους.

Ευχαριστώ πολύ ακόμα κόσμο, η γνωριμία μου με τον οποίο μου άνοιξε νέους ορίζοντες και μου έδωσε εφόδια για το μέλλον.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	III
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	IV
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	V
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	VI
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	VII
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ.....	1
1.2 ΣΤΟΧΟΙ.....	1
2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	3
2.1 ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΗ ΕΞΥΓΙΑΝΣΗ (EcoSAN).....	3
2.1.1 Aquanova Project.....	4
2.2 ΦΥΣΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ	5
2.2.1 Φυτοεξυγίανση	6
2.2.2 Τεχνητοί Υγρότοποι.....	7
2.2.3 Εφαρμογές Εξυγίανσης Τεχνητών Υγροτόπων.....	8
2.3 ΕΛΑΙΩΔΗ ΦΥΤΑ	9
2.3.1 Ηλιοτρόπιο.....	10
2.3.2 Σόγια.....	11
2.3.3 Ελαιοκράμβη.....	12
3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ	15
3.1 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ.....	16
3.1.1 Υλικά.....	17
3.1.2 Βλάστηση	18
3.1.3 Έδαφος.....	19
3.1.4 Ρεύματα των Αποβλήτων	20
3.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	21
3.2.1 Φως	21
3.2.2 Θερμοκρασία.....	21
3.2.3 Άρδευση	22
3.3 ΑΡΔΕΥΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	22
3.4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ	24
3.4.1 Συλλογή Δειγμάτων	24
3.4.2 Παράμετροι που αναλύθηκαν	25
3.4.3 Μέθοδοι Ανάλυσης Δειγμάτων	27

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	29
4.1 ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΡΧΙΚΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ.....	29
4.2 ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΡΕΥΜΑΤΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ.....	29
4.3 ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΙΣΡΟΩΝ	32
4.4 ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΚΡΟΩΝ	32
4.5 ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΕΛΙΚΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ.....	35
5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	37
5.1 ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗΣ ΡΥΠΩΝ	37
5.1.1 Ολικά Στερεά.....	37
5.1.2 Ολικός Φώσφορος.....	39
5.1.3 Χημική Απαίτηση σε Οξυγόνο.....	41
5.1.4 Άζωτο	43
5.1.5 Θεϊκά	45
5.1.6 Χλωριόντα.....	47
5.2 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΦΥΤΩΝ	49
5.3 ΙΣΟΖΥΓΙΑ ΜΑΖΑΣ ΑΖΩΤΟΥ ΚΑΙ ΦΩΣΦΟΡΟΥ	52
5.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΦΥΤΩΝ	54
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	57

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1: Σύσταση τελικού μίγματος αποβλήτων και χρονική περίοδος φάσεων.....	24
Πίνακας 3.2: Αναφορά μεθόδων ανάλυσης και εξοπλισμού για υγρά και στερεά δείγματα.....	27
Πίνακας 4.1: Ποιότητα του εδαφικού υποστρώματος.....	30
Πίνακας 4.2: Ποιότητα γκρι νερού και ούρων.....	31
Πίνακας 4.3: Ποιότητα των εισροών στα φυτά.	32
Πίνακας 4.4: Μέγιστες, ελάχιστες και μέσες τιμές των εκροών έπειτα από την εξυγίανση μέσω α) ηλιοτροπίου, β) σόγιας και γ) ελαιοκράμβης.....	33
Πίνακας 4.5: Ενδεικτικές συγκεντρώσεις μετάλλων στις εκροές του ηλιοτροπίου, της σόγιας και της ελαιοκράμβης.	34
Πίνακας 4.6: Βασικά χαρακτηριστικά εδάφους πριν και μετά την εξυγίανση.	36
Πίνακας 5.1 Ανάλυση της ανάπτυξης των πειραματικών φυτών	49
Πίνακας 5.2 Λόγος της ανάπτυξης των πειραματικών φυτών προς τους μάρτυρες (%).	51

Πίνακας 5.3: Ισοζύγιο μάζας αζώτου για κάθε φυτό.	53
Πίνακας 5.4: Ισοζύγιο μάζας φωσφόρου για κάθε φυτό.	53

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1 Διαχωριστική τουαλέτα (Κίτρινο και Καφέ Νερό)	4
Εικόνα 2.2 Σύστημα υδροτόπου FWS	7
Εικόνα 2.3: α) Μίσχος ηλιοτροπίου, β) ηλίανθος και γ) ηλιόσποροι.....	10
Εικόνα 2.4: α) Φασόλια, β) φύλλωμα και γ) όσπριο της σόγιας.....	12
Εικόνα 2.5 Μίσχοι και φύλλωμα ελαιοκράμβης.....	13
Εικόνα 3.1: Διάγραμμα ροής των κλασμάτων των εισροών από την συλλογή ως την ανάλυση.....	15
Εικόνα 3.2: Κάτοψη διάταξης λυόμενου θερμοκηπίου (i) και εσωτερικό (ii).....	16
Εικόνα 3.5: Σχήμα και σύσταση της γλάστρας (i) και η βαλβίδα παροχής των εξόδων (ii).	19
Εικόνα 3.6: Μέσος αρδευτικός όγκος ανά γλάστρα στο χρόνο.	23
Εικόνα 5.1: Εισρέον φορτίο TS, συγκέντρωση εκροών και ικανότητα απομάκρυνσης στο χρόνο.....	38
Εικόνα 5.2: Εισρέον φορτίο TP, συγκέντρωση εκροών και ικανότητα απομάκρυνσης στο χρόνο.....	40
Εικόνα 5.3: Εισρέον COD, συγκέντρωση εκροής και ικανότητα απομάκρυνσης στο χρόνο.	42
Εικόνα 5.4: Συνολικό εισρέον N (TKN και NO ₃ -), συγκέντρωση εκροής και ικανότητα απομάκρυνσης στο χρόνο	44
Εικόνα 5.5: Εισρέοντα SO ₄ ²⁻ , συγκέντρωση εκροής και ικανότητα απομάκρυνσης στο χρόνο.....	46
Εικόνα 5.6: Εισρέοντα Cl ⁻ , συγκέντρωση εκροής και ικανότητα απομάκρυνσης στο χρόνο.	48
Εικόνα 5.7. Συνολική ξηρή βιομάζα, ξηρή μάζα ριζών και μήκος ριζών των φυτών ως προς τους μάρτυρές τους.	50
Εικόνα 5.8. Ελαιοκράμβη έπειτα από 50 ημέρες, (i) με λήψη νερού και (ii) λήψη αποβλήτου.	52

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικές Πληροφορίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά στην εξυγίανση υγρών οικιακών αποβλήτων μέσω της χρήσης κατάλληλων φυτών. Η πειραματική διαδικασία διεξήχθη στις εγκαταστάσεις IMAGE του περιβαλλοντικού τομέα του πανεπιστημίου της Πάντοβα, στην Ιταλία. Οι εγκαταστάσεις βρίσκονται στην περιοχή Valtabarrozzo, νότια της πόλης.

Για το σκοπό της εργασίας αυτής, επιλέχθηκαν για σπορά τρία διαφορετικά είδη φυτών, ενώ στη συνέχεια προμηθεύτηκαν τα λύματα. Το αποτέλεσμα της ανάλυσης των συγκεντρώσεων στις εκροές του συστήματος, μας παρέχουν σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τις ικανότητες εξυγίανσης κάθε φυτικού είδους.

1.2 Στόχοι

Ο στόχος της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη και η αξιολόγηση της χρήσης συγκεκριμένου τύπου φυτών για την εξυγίανση οικιακών υγρών αποβλήτων. Επιπλέον, αποσκοπεί στο να προσδιορίσει ποιοί ρύποι απομακρύνονται με μεγαλύτερη επιτυχία ανάλογα με το είδος του φυτού, καθώς και ποιά από αυτά παρουσιάζει συνολικά μεγαλύτερη απόδοση στην απομάκρυνση των ρύπων.

Η κυρίαρχη ιδέα του εγχειρήματος είναι να εγκαθιδρύσει έναν εναλλακτικό τρόπο επεξεργασίας, πιο προσιτό οικονομικά και φιλικότερο προς το περιβάλλον σε σχέση με τους καθιερωμένους, που να μπορεί να εφαρμοστεί σε μικρές οικιστικές περιοχές. Αυτή η ιδέα συνάδει με τη φιλοσοφία της οικολογικής εξυγίανσης (Ecological Sanitation), η οποία κερδίζει έδαφος τα τελευταία χρόνια στην επιστημονική κοινότητα.

Με το σκεπτικό αυτό, οι ρύποι συμμετέχουν στον κύκλο της ενέργειας και ανακυκλώνονται με λιγότερες ενεργειακές απώλειες. Τα φυτά που συμμετέχουν στην διαδικασία επιλέχθηκαν να είναι ελαιώδη, ώστε να μπορούν με τη σειρά τους να συμμετάσχουν στον κύκλο της ενέργειας, μετατρέπόμενα σε βιοενέργεια (biodiesel).

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2.1 Οικολογική Εξυγίανση (EcoSan)

Η οικολογική εξυγίανση (EcoSan), εισάγει ένα νέο τρόπο εξυγίανσης βασισμένο στην καθολική αντίληψη των ροών της ύλης ως μέρος ενός οικολογικά και οικονομικά βιώσιμου συστήματος διαχείρισης υγρών αποβλήτων, προσαρμοσμένο στις ανάγκες των χρηστών και με σεβασμό στις τοπικές συνθήκες.

Το EcoSan εισάγει μια βασική αρχή ώστε να ελαχιστοποιήσει την υδατική ρύπανση και να καταφέρει να μειώσει την εισαγωγή παθογόνων μικροοργανισμών μέσω ανθρώπινων περιττωμάτων στον κύκλο του νερού. Ο κύριος αυτός στόχος αφορά στο κλείσιμο της θρεπτικής αλυσίδας μεταξύ εξυγίανσης και γεωργίας με τρόπο που θα επιτρέπει την ανάκτηση του οργανικού υλικού, των μικροθρεπτικών και μακροθρεπτικών στοιχείων, του νερού, όπως και της ενέργειας που περιέχεται στα υγρά και οργανικά απόβλητα του νοικοκυριού.

Τα συστήματα EcoSan έχουν θετικό αντίκτυπο στη μείωση του κόστους της πρωτογενούς επεξεργασίας των νερών και στην εξοικονόμηση πόσιμου νερού. Επιπρόσθετα, η ανάκτηση και γεωργική χρήση των οργανικών και των θρεπτικών συστατικών που εμπεριέχονται στα υγρά απόβλητα βελτιώνει την δομή και γονιμότητα του εδάφους, αυξάνοντας παράλληλα την γεωργική παραγωγικότητα.

Η ανάκτηση αυτή θα μπορούσε επίσης να αποτελέσει ένα σημαντικό βήμα προς την αξιοποίηση της αποκτούμενης ενέργειας για μαγείρεμα (ως βιοαέριο) και πιθανώς για παραγωγή ηλεκτρισμού (Tzanakakis et al., 2009).

Προς αυτή την κατεύθυνση και έτσι ώστε να βελτιστοποιήσουμε τον παράγοντα του κόστους, την υψηλή ποιότητα επεξεργασίας και τις προοπτικές ανακύκλωσης, συχνά ακολουθούνται οι παρακάτω αρχές (Panesar & Werner, 2006):

- Τα κλάσματα ροών με διαφορετικά χαρακτηριστικά όπως τα κόπρανα, τα ούρα και το γκρι νερό συλλέγονται χωριστά.
- Αποφεύγονται οι μη απαραίτητες αραιώσεις των κλασμάτων. Με τον τρόπο αυτό ελαχιστοποιείται η κατανάλωση πόσιμου νερού ενώ παράγονται υψηλές συγκεντρώσεις ανακυκλώσιμων υλικών.

2.1.1 Aquanova Project

Το Aquanova Project έχει ως στόχο την ανάκτηση όλων των θρεπτικών και των ιχνοστοιχείων που υπάρχουν στα υγρά απόβλητα του νοικοκυριού και την εν συνεχεία επαναχρησιμοποίησή τους στην γεωργία έπειτα από κατάλληλη επεξεργασία. Ειδικότερα, ο σχεδιασμός αυτός βασίζεται στην διαλογή στην πηγή των διαφόρων ρευμάτων των αποβλήτων για την βέλτιστη χρησιμοποίησή τους. Τα κυριότερα αυτών των ρευμάτων ονομάζονται καφέ νερό, κίτρινο νερό και γκρι νερό. Έτσι μειώνεται η κατανάλωση πολύτιμου πόσιμου νερού και τα ρεύματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως φθηνά υλικά για την αναβάθμιση του εδάφους, ως λίπασμα ή ως άρδευση (Cossu et al.,2001).



Εικόνα 2.1 Διαχωριστική τουαλέτα (Κίτρινο και Καφέ Νερό)

Το Aquanova Project εφαρμόζεται από το 2001 στο τμήμα IMAGE (Ingegneria Idraulica, Marittima, Ambientale e Geotecnica). Για το διαχωρισμό των ρευμάτων των υγρών αποβλήτων, το τμήμα έχει εξοπλιστεί με μια πειραματική τουαλέτα, η οποία με έναν ειδικό σχεδιασμό επιτρέπει τον διαχωρισμό του καφέ και του κίτρινου νερού. Ο διαχωρισμός των ούρων και των κοπράνων απλοποιεί την κατασκευή μιας υγιεινής, άοσμης, χωρίς έντομα και νερό τουαλέτας. Η τουαλέτα αποτελείται από έναν νιπτήρα και μια ειδική τουαλέτα με μηχανισμό διαχωρισμού της πηγής. Ενώ τα ούρα ξεπλένονται και απομακρύνονται στην πρώτη τρύπα, τα κόπρανα και το χαρτί τουαλέτας καταλήγουν στη δεύτερη. Υπάρχουν δύο καζανάκια, ένα για την κάθε τρύπα. Αυτός ο τύπος τουαλέτας υπάρχει και για τα δύο φύλα και απεικονίζεται στην Εικόνα 2.1.

Τα διαφορετικά ρεύματα των αποβλήτων μετά τον διαχωρισμό τους καταλήγουν σε δεξαμενές – βόθρους, όπου φυλάσσονται έως τη χρήση τους για πειραματικούς σκοπούς.

2.2 Φυσικά Συστήματα Επεξεργασίας

Ως φυσικά συστήματα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, θεωρούνται τα συστήματα τα οποία επεξεργάζονται το απόβλητο μέσω μιας σειράς φυσικών μέσων και διεργασιών που συμβαίνουν στο περιβάλλον του εδάφους ή του υπεδάφους. Τέτοιες διεργασίες είναι οι φυσικές, οι χημικές και οι βιολογικές ή ο συνδυασμός τους. Αυτές οι διαδικασίες προκύπτουν από την αλληλεπίδραση του νερού, του εδάφους της ατμόσφαιρας και των μικροοργανισμών .

Στις φυσικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα περιλαμβάνεται η κίνηση των ρύπων, η συγκράτηση των αιωρούμενων στερεών κα. Οι χημικές, σχετίζονται με φαινόμενα ιονταλλαγής, προσρόφησης, κατακρήμνισης και αντιδράσεις οξειδοαναγωγής. Στις βιολογικές διεργασίες ανήκουν η πρόσληψη θρεπτικών ουσιών από τα φυτά καθώς και διάφορες μικροβιακές διασπάσεις (Reed et al., 1998).

Τα διάφορα είδη φυσικών συστημάτων επεξεργασίας για τα αστικά λύματα στο έδαφος είναι: η άρδευση, τα συστήματα βραδείας εφαρμογής, τα συστήματα επιφανειακής απορροής, η χρήση φυσικών ή τεχνητών υγροτόπων και οι λίμνες σταθεροποίησης.

Θεωρείται πως τα φυσικά συστήματα επεξεργασίας καταφέρνουν αποτελεσματική απομάκρυνση των παθογόνων ενώ δίνεται η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης των επεξεργασμένων λυμάτων για άρδευση με αποτέλεσμα την εξοικονόμηση νερού. Απαιτούν από

ελάχιστη έως καθόλου ενέργεια για τη λειτουργία τους. Εντούτοις, απαιτούν την ύπαρξη μεγάλων επιφανειών γης, ενώ η αφομοιωτική ικανότητα του εδάφους είναι πεπερασμένη. Τα φυσικά συστήματα επεξεργασίας είναι κατάλληλα για μικρούς οικισμούς ή οικοδομικά τετράγωνα όπου η λειτουργία συμβατικών μονάδων βιολογικού καθαρισμού είναι οικονομικά ασύμφορη.

Τα επεξεργασμένα υγρά απόβλητα μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν για άρδευση πάρκων και καλλιεργειών, δημιουργία χώρων πράσινου, αποκατάσταση ερημωμένων περιοχών, εμπλουτισμό υπόγειων υδροφορέων. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη βιομηχανία καθώς και για μη πόσιμες αστικές χρήσεις όπως είναι η πυρόσβεση κα. (Πανώρας & Ηλίας, 1999). Έτσι μπορεί να εξοικονομηθεί φρέσκο νερό και λιπάσματα, σημειώνοντας αποτελεσματική προστασία των υδάτινων αποδεκτών.

Για τη διάθεσή του στο έδαφος συνίσταται ο έλεγχος της συγκέντρωσης των ρύπων σύμφωνα με τις υπάρχουσες νομοθεσίες για τις εκροές (Paranychianakis et al., 2006).

2.2.1 Φυτοεξυγίανση

Η φυτοεξυγίανση αποτελεί μια εναλλακτική μορφή επεξεργασίας μολυσμένων εδαφών και αποβλήτων, η οποία υπερέχει σε σχέση με την καθιερωμένη εξυγίανση όντας οικονομικά πιο βιώσιμη, καθώς απαιτεί απλό αγροτικό εξοπλισμό και προμήθειες. Επιπλέον, επιτρέπει την επεξεργασία πεδίων μολυσμένων με περισσότερους από έναν ρύπους. Τέλος, δεν χρειάζονται πεδία απόθεσης και αποφεύγεται η μεταφορά των ρυπασμένων μέσων μειώνοντας έτσι τον κίνδυνο εξάπλωσης της μόλυνσης. Εντούτοις, μειονεκτήματα της μεθόδου συνιστούν η εξάρτηση από τις συνθήκες ανάπτυξης που απαιτούνται από το κάθε φυτό (κλίμα, γεωλογία, συμπεριφορά, θερμοκρασία) και ο χρόνος εξυγίανσης των πεδίων, ο οποίος είναι μακράν μεγαλύτερος απ' ό,τι με άλλες τεχνολογίες. Τέλος, η επιτυχία εξαρτάται από την αντοχή του φυτού στον ρύπο.

Ένα φυτό θεωρείται ιδανικό για φυτοεξυγίανση εάν έχει φαρδύ ριζικό σύστημα, αξιοσημείωτη βιομάζα, ταχεία ανάπτυξη και εμφανίζει ικανοποιητική πρόσβαση από τη ριζόσφαιρα στο εναέριο τμήμα του φυτού (Mc Cutcheon et al., 2003).

2.2.2 Τεχνητοί Υγρότοποι

Οι υγρότοποι αποτελούν τμήματα γης, κατακλυζόμενα με νερό, συνήθως μικρού βάθους έως 60 cm, στα οποία αναπτύσσονται φυτά. Η βλάστηση παρέχει το βασικό υπόστρωμα για τη βακτηριακή ανάπτυξη, βοηθά την φίλτρανση και την απορρόφηση των συστατικών των αποβλήτων, μεταφέρει οξυγόνο στη μάζα του νερού και μειώνει την ανάπτυξη των αλγών λόγω σκίασης (Γιδαράκος και Αϊβαλιώτη, 2005).

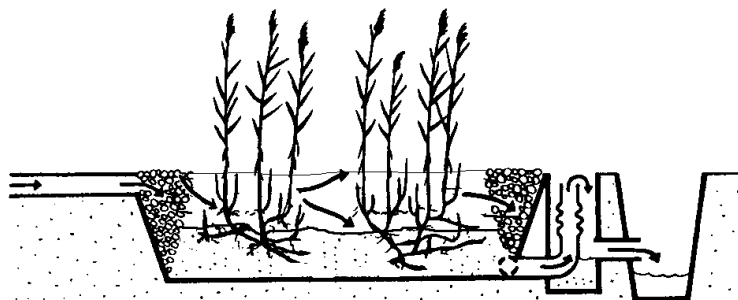
Η επεξεργασία των υγρών αποβλήτων μπορεί να εφαρμοστεί είτε σε φυσικούς είτε σε τεχνητούς υγροτόπους. Επίσης, τα υγρά απόβλητα χρησιμοποιούνται ευρέως για την επανάκτηση κατεστραμμένων ή αποξηραμένων υγροτόπων.

Οι τεχνητοί υγρότοποι έχουν όλες τις δυνατότητες των φυσικών, αλλά δεν υπόκεινται σε περιορισμούς όσον αφορά την διάθεση εκροών σε φυσικά οικοσυστήματα. Επιπλέον παρέχουν την ευχέρεια σχεδίασης της λεκάνης του υγροτόπου για τη βελτιστοποίηση των διεργασιών επεξεργασίας ελέγχοντας κατάλληλα τις υδραυλικές συνθήκες της λεκάνης εφαρμογής και της διαχείρισης της βλάστησης.

Το νερό από την έξοδο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για άρδευση, τροφοδοσία τεχνητών λιμνών κλπ.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι τεχνητών υγροτόπων (Αγγελάκης, 2005):

- i. Ελεύθερης επιφάνειας (Free Water Surface)
- ii. Υποεπιφανειακής ροής (Subsurface Flow Systems)
- iii. Κάθετης ροής (Vertical Flow Systems)
- iv. Υβριδικά συστήματα, τα οποία αποτελούν συνδυασμό των παραπάνω τύπων.



Εικόνα 2.2 Σύστημα υγροτόπου FWS

Στην παρούσα εργασία, οι εφαρμοζόμενες συνθήκες αναφέρονται σε υγροβιότοπο κάθετης ροής. Τα Συστήματα Κάθετης Ροής (Vertical Flow Systems) αναφέρονται και ως συστήματα ριζόσφαιρας (Rhizosphere Systems) και αναπτύσσονται σε κανάλια ροής ή τάφρους με σχετικά στεγανούς πυθμένες, που περιέχουν άμμο ή άλλα πληρωτικά υλικά που βοηθούν την ανάπτυξη της βλάστησης. Η διεργασία συμβαίνει καθώς το υγρό απόβλητο ρέει βραδέως διαμέσου των στελεχών και των ριζών της υπάρχουσας βλάστησης (Hammer, 1989). Η εφαρμογή του αποβλήτου εφαρμόζεται περιοδικά στην επιφάνεια και αφήνεται να φιλτρανθεί μέσω του πορώδους μέσου, ώστε να αυξηθεί το διαθέσιμο οξυγόνο.

2.2.3 Εφαρμογές Εξυγίανσης Τεχνητών Υγροτόπων

Η χρήση φυτών για την επεξεργασία των αποβλήτων ονομάζεται φυτοεξυγίανση και αφορά τους διάφορους τρόπους με τους οποίους μπορούν να χρησιμοποιηθούν φυτά για τον καθαρισμό μολυσμένων εδαφών και νερών. Τα φυτά μπορούν να διασπασουν ή να υποβαθμίσουν τους οργανικούς ρύπους ή να απομακρύνουν και να σταθεροποιήσουν τους μεταλλικούς ρύπους μέσω μίας μεθόδου ή συνδυασμού μεθόδων.

Οι βασικές εφαρμογές εξυγίανσης που χρησιμοποιούνται για τα μολυσμένα υποστρώματα περιλαμβάνουν κυρίως τις διεργασίες της φυτοεκχύλισης, ριζοφίλτρανσης, φυτοσταθεροποίησης, φυτοεξάτμισης και φυτοδιάσπασης (Otte and Jacob, 2006).

Φυτοεκχύλιση είναι η προσρόφηση από τις ρίζες του φυτού των ρύπων που βρίσκονται στο έδαφος, τα καθιζήματα ή το νερό και η προσκόμισή τους στα άνωθεν, υπερεδάφεια τμήματα του φυτού. Αφορά κυρίως στην ανακύκλωση των μετάλλων μέσω μιας διεργασίας που ονομάζεται φυτοεξόρυξη. Η απομάκρυνση των θρεπτικών γίνεται μέσω του θεισμού ή της εξάτμισης μέσω των φυτών για τις αέριες ενώσεις.

Ριζοφίλτρανση ονομάζεται η απορρόφηση, συμπύκνωση και κατακρήμνιση των τοξικών ουσιών ή της περίσσειας των θρεπτικών του υγρού αποβλήτου μέσω των ριζών. Οι ρύποι παραμένουν στο ριζικό σύστημα και απομακρύνονται με το θεισμό.(απομάκρυνση σε μακροθρεπτικά, μέταλλα, βιολογικούς ρύπους, οργανικές ενώσεις, βελτίωση BOD, COD, pH)

Φυτοσταθεροποίηση καλείται η ακινητοποίηση ενός ρύπου στο έδαφος μέσω της απορρόφησης και συσσώρευσης στις ρίζες, την απορρόφηση πάνω στις ρίζες ή κατακρήμνιση

του εντός της ριζικής περιοχής. Επικεντρώνεται κυρίως στη απομόνωση των ρύπων στο έδαφος γύρω από τις ρίζες, μειώνοντας την βιοδιαθεσιμότητά τους.

Φυτοεξάτμιση είναι η απορρόφηση και διαπνοή των ρύπων από το φυτό. Ο ρύπος είτε μεταφέρεται εντός του φυτού είτε τροποποιείται από αυτό και ύστερα ελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα (εξατμίζεται ή εξαχνώνεται).

Φυτοδιάσπαση είναι η διάσπαση των οργανικών ενώσεων από μεταβολικές διεργασίες που οφείλονται στο φυτό και στη συνέχεια, η απορρόφηση, αποθήκευση και διάσπασή τους μέσα στον φυτικό ιστό.

2.3 Ελαιώδη Φυτά

Ελαιώδη ονομάζονται τα φυτά που είναι σαρκώδη αλλά περιέχουν ποσοστό ελαίου. Στο πείραμα αποφασίστηκε να συμμετέχουν ελαιώδη φυτά, ικανά να εξυγιάνουν τα οικιακά υγρά. Συγκεκριμένα επιλέχθηκαν βρώσιμα ελαιώδη φυτά, που χρησιμοποιούνται ευρέως για την παραγωγή βιοντήζελ. Στόχος ήταν να ελεγχθεί η αποδοτικότητά τους με βάση την προσρόφηση θρεπτικών εντός των διαφόρων λυμάτων μας.

Με αυτό τον τρόπο επιλέχθηκαν το ηλιοτρόπιο, η σόγια και η ελαιοκράμβη. Πρόκειται για είδη που ευδοκιμούν στην περιοχή αναφοράς και αναμένονται να έχουν καλές αποδόσεις στην εξυγίανση των υγρών αποβλήτων και την παραγωγή ενέργειας. Η επιλογή των φυτών έγινε με βάση την ικανότητα μετέπειτα χρήσης τους για την παραγωγή βιοενέργειας και τις απαιτήσεις του συστήματος φυτοεξυγίανσης σε μία προσπάθεια διεύρυνσης της ανακύκλωσης των συστατικών των αποβλήτων. Έτσι είναι εφικτή η αξιοποίησή τους ως προς την παραγωγή ενέργειας μέσω της βιομάζας τους, της οποίας την ανάπτυξη ευνοεί η απορρόφηση των θρεπτικών που υπάρχουν στα απόβλητα.

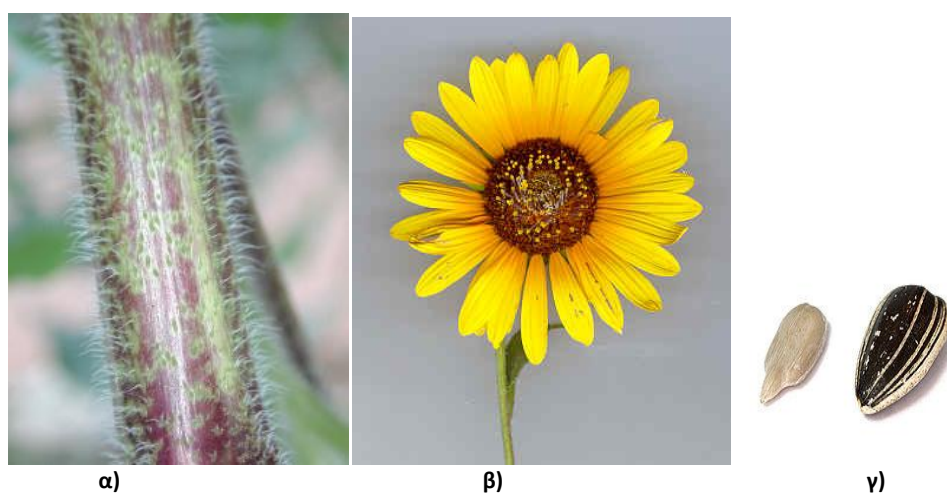
Την τελευταία δεκαετία, έχει δοθεί έμφαση στην παραγωγή βιομάζας, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή βιοενέργειας και άλλους σκοπούς, για οικονομικούς λόγους και για τη συνεισφορά και την αποφόρτιση των κλιματικών αλλαγών (Perttu, 1999). Έτσι, σήμερα μπορούμε να μιλάμε για ενεργειακές καλλιέργειες, για καλλιέργειες δηλαδή με μοναδικό στόχο την χρήση τους για παραγωγή ενέργειας.

2.3.1 Ηλιοτρόπιο

Το κοινό σε όλους ηλιοτρόπιο ή *Helianthus Annuus*, όπως είναι η λατινική του ονομασία, είναι ένα μονοετές φυτό της οικογένειας των *Asteraceae*, ενδημικό της Αμερικής, το οποίο χαρακτηρίζει το πλούσιο άνθος του.

Το τραχύ και τριχωτό κοτσάνι του μπορεί να φτάσει έως και τα 3 m, τα φύλλα του είναι τραχιά και χοντροκομμένα πράσινου χρώματος, και το κεφάλι των λουλουδιών του μπορεί να φτάσει τα 30cm σε διάμετρο (Εικόνα 2.3). Τα άνθη του είναι στρογγυλά και κίτρινα. Κάθε κεφάλι αποτελείται από 1000 - 2000 ανεξάρτητα λουλούδια τα οποία ενώνονται μαζί στη βάση του στήμονα. Το ηλιοτρόπιο είναι ένα φυτό που σημειώνει ταχεία ανάπτυξη με ένα μεγάλο κοτσάνι στο οποίο ενώνονται πλευρικές ρίζες.

Συνηθέστερα συναντάται σε υψόμετρο 1.5 - 3.5 m. Ανθίζει την θερινή περίοδο από τον Ιούλη ως τον Οκτώβριο. Χρειάζεται κλίματα με συνεχή ηλιοφάνεια για μέγιστη ανάπτυξη. Καταναλώνει συνεχώς νερό, αλλά σε περίπτωση έλλειψης, έχει την ικανότητα να απορροφά την υγρασία από τα κατώτερα στρώματα χάρη σε μία αξιοσημείωτη τριχοειδή εξέλιξη του ριζικού μηχανισμού ο οποίος είναι 1.5 - 2 m. Είναι ένα φυτό μέτριων θερμικών αναγκών το οποίο εμφανίζει υψηλή αντίσταση σε χαμηλές θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια της πρώιμης ανάπτυξής του. Η αντοχή του στην CaCO_3 σκληρότητα είναι μέτρια, ενώ το απαιτούμενο έδαφος είναι ξηρή, κατανεμημένη άργιλος ή αργιλώδη εδάφη. Ο κύκλος του είναι σύντομος εαρινός - θερινός και αναβαθμίζει το έδαφος αφήνοντάς το πιο εύφορο χάρη στα άφθονα γεωργικά υπολείμματα.



Εικόνα 2.3: α) Μίσχος ηλιοτροπίου, β) ηλίανθος και γ) ηλιόσποροι.

Το σπέρμα του ηλιοτροπίου, οι ηλιόσποροι, είναι μεγάλοι, συχνά ραβδωτοί σπόροι σε σχήμα δακρύου (Εικόνα 2.3) και βρίσκονται πολλοί μαζί σε μία ταξιανθία. Οι ηλιόσποροι πρωτοήρθαν στην Ευρώπη τον 16^ο αιώνα και σύντομα μαζί με το ηλιέλαιο μετατράπηκαν σε ένα ευρέως διαδεδομένο μαγειρικό συστατικό. Τα φύλλα του ηλιοτροπίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ζωοτροφή, ενώ οι μίσχοι του περιέχουν μία ίνα που χρησιμοποιείται στη χαρτοποιία. Τυπικά, 100 kg ηλιόσπορων σημαίνουν 35 - 40 kg αποκτηθέντος ελαίου.

2.3.2 Σόγια

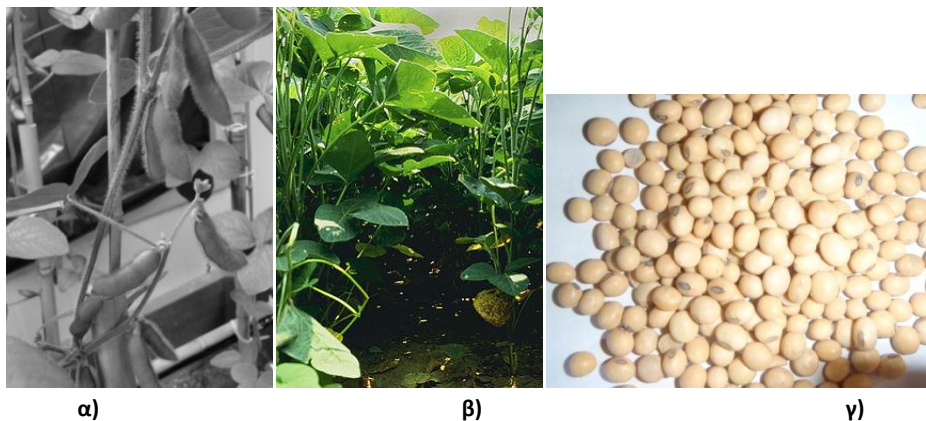
Η σόγια, ή επιστημονικά *Glycine Max*, κατάγεται από την οικογένεια των *Fabriceae*. Είναι ένα είδος οσπρίου ενδημικό της Ανατολικής Ασίας που εισάχθηκε για πρώτη φορά στην Ευρώπη στις αρχές του 18^{ου} αιώνα. Καλλιεργείται ευρύτατα για το βρώσιμο φασόλι του το οποίο έχει αναρίθμητες χρήσεις.

Το περικάρπιο του οσπρίου, οι μίσχοι και τα φύλλα του έχουν ένα ψιλό καφέ ή γκρι τρίχωμα. Το φύλλωμα της σόγιας είναι τρίφυλλο με τρία έως τέσσερα μικρότερα φυλλαράκια να αποτελούν κάθε φύλλο μήκους 6 - 15 cm και 2 - 7 cm πλάτους και το οποίο πέφτει προτού ωριμάσουν οι σπόροι. Τα διακριτικά, αυτογονιμοποιούμενα άνθη του βρίσκονται στις ενώσεις των φύλλων με τον μίσχο και είναι άσπρα, ροζ ή μοβ. Οι καρποί είναι μαλλιαρά περικάρπια οσπρίου τα οποία μεγαλώνουν σε τσαμπί των 3 - 5. Το μήκος κάθε φασολιού είναι από 3 - 8 cm και συνήθως περιέχει δύο με τέσσερα (σπανίως περισσότερα) όσπρια διαμέτρου 5 - 11 mm (Εικόνα 2.4).

Η σόγια ποικίλει σε ανάπτυξη και συμπεριφορές. Το ύψος του φυτού κυμαίνεται από τα 20 cm έως τα 2 m. Οι σπόροι της σόγιας συναντώνται σε θήκες σπόρου διαφόρων χρωμάτων όπως μαύρο, καφέ, μπλε, κίτρινο πράσινο και διάστικτο. Το τσόφλι του ώριμου οσπρίου είναι σκληρό, ανθεκτικό στο νερό και προστατεύει τα κοτυλήδονα και υποκοτυλήδονα (ή «σπέρμα») από τραυματισμούς. Οι σπόροι της σόγιας παράγουν σημαντικά περισσότερη πρωτεΐνη ανά μονάδα επιφάνειας απ' ό,τι οι περισσότερες χρήσεις γης (Εικόνα 2.4). Αξίζει να σημειωθεί, πως σπόροι όπως αυτοί της σόγιας οι οποίοι περιέχουν πολύ υψηλά επίπεδα πρωτεϊνών, όταν υπόκεινται σε ξήρανση μπορούν να επιβιώσουν και να αναζωογονηθούν έπειτα από απορρόφηση νερού.

Η καλλιέργεια της σόγιας είναι επιτυχημένη σε κλίματα με θερμά καλοκαίρια, ενώ οι βέλτιστες θερμοκρασίες για την ανάπτυξή της είναι μεταξύ 20 και 30 °C. Θερμοκρασίες χαμηλότερες των 20 °C και υψηλότερες των 40 °C επιβραδύνουν σημαντικά την ανάπτυξη. Η σόγια μπορεί να

αναπτυχθεί σε αρκετούς τύπους εδάφους, αλλά βέλτιστη ανάπτυξη παρουσιάζει σε υγρά προσχωματικά εδάφη με επαρκές οργανικό περιεχόμενο.



Εικόνα 2.4: α) Φασόλια, β) φύλλωμα και γ) όσπριο της σόγιας.

Οι σπόροι της σόγιας καθώς και τα περισσότερα όσπρια σταθεροποιούν το άζωτο διατηρώντας μια συμβιωτική σχέση με το βακτήριο *Bradyrhizobium japonicum* (Jordan, 1982). Η σύγχρονη καλλιέργεια της συγκεκριμένης σοδειάς γενικά μπορεί να φτάσει περίπου το 1 σε ύψος και χρειάζεται 80 - 120 ημέρες από την σπορά μέχρι την συγκομιδή. Περίπου 85% της παγκόσμιας σοδειάς σόγιας μεταποιείται σε βρώσιμη σόγια και φυτικό λάδι (σογιέλαιο). Το σογιέλαιο βρίσκεται εφαρμογή σε πληθώρα βιομηχανικών εφαρμογών. Το έλαιο και οι πρωτεΐνες αποτελούν το 60% του ξηρού βάρους της σόγιας: 40% πρωτεΐνες και 20% λάδι.

2.3.3 Ελαιοκράμβη

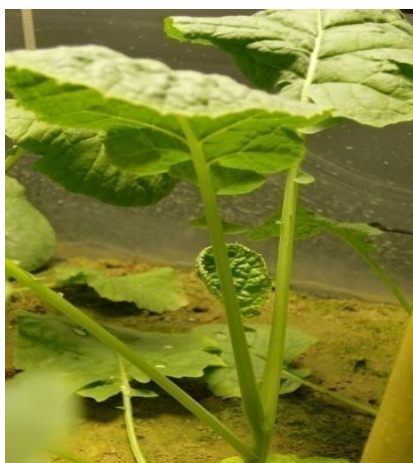
Η ελαιοκράμβη συναντάται με πολλά ονόματα (Rapeseed, Canola, κ.α.), όμως το επιστημονικό της όνομα είναι *Brassica Napus* και προέρχεται από την οικογένεια των *Brassicaceae*. Είναι ενδημικό της Ευρασίας και πιθανότατα επεκτάθηκε στην περιοχή της Μεσογείου, όπου υπάρχουν και όλες οι άγριες μορφές του. Θεωρείται από τα πρώτα φυτά γνωστά στον άνθρωπο που καλλιεργήθηκαν.

Η ελαιοκράμβη είναι μονοετές φυτό, αλλά γίνεται και διετές όταν φυτευτεί αργοπορημένα. Ανθίζει την επόμενη άνοιξη με ισχνή ή χοντρή, σκληρή, μακριά και κονδυλωτή κύρια ρίζα. Οι μίσχοι του είναι αρκετά διακλαδωμένοι και παρουσιάζονται συχνά διογκωμένοι και ιώδεις

κοντά στην βάση, ενώ αποκτούν έως και 1,5 m ύψος (Εικόνα 2.5). Είναι ύψους 10 - 30 cm, άτριχοι ή με περιορισμένες σκληρές τρίχες. Τα φύλλα είναι γλαύκα και εναλλασσόμενα, ενώ τα χαμηλότερα είναι συνήθως οδοντωτά. (Εικόνα 2.5). Η άνθηση είναι πολύ διακλαδωμένη και έως 1 m σε ύψος. Τα λουλούδια έχουν φωτεινό κίτρινο χρώμα, είναι 1.2 - 1.5 cm με τέσσερα πέταλα, τα οποία πέφτουν το τέλος της άνοιξης. Η περίοδος άνθησης κυμαίνεται από τον Απρίλη ως το Σεπτέμβρη. Τα φύλλα και οι μίσχοι της ελαιοκράμβης είναι επίσης βρώσιμα.

Η ελαιοκράμβη αναπτύσσεται καλύτερα σε μέτρια, παραθαλάσσια κλίματα. Χρειάζεται γόνιμο, καλά στραγγισμένο χώμα. Ανταποκρίνεται ευνοϊκά στα λιπάσματα αζώτου και φωσφόρου. Το βάθος της σποράς πρέπει να είναι το πολύ 2.5 cm, αλλά αν το έδαφος δεν έχει κρούστα στην οροφή, μπορεί να αναπτυχθούν φυτάρια από τα 5 cm ή και περισσότερο. Τα φυτάρια αναπτύσσονται αργά και εύκολα καταστρέφονται από το παρασυρόμενο χώμα.

Μεγαλώνει ιδανικά σε αμμώδη εύφορα εδάφη, σε γόνιμα εδάφη με υψηλή οργανική ύλη και σε λασπώδεις άμμους. Τα ελαφρά εδάφη αρμόζουν και ίσως είναι και ιδανικά, με την προϋπόθεση πως επαρκής υγρασία και θρεπτικά είναι διαθέσιμα.



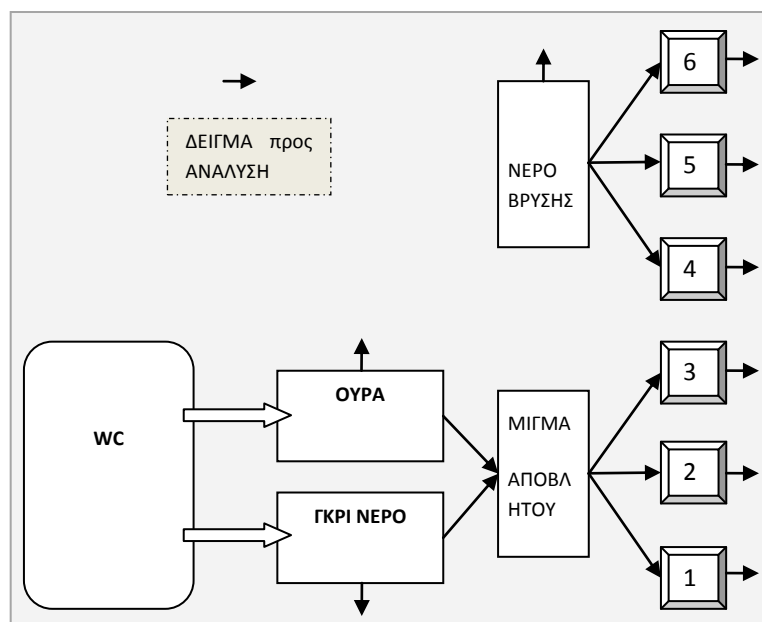
Εικόνα 2.5 Μίσχοι και φύλλωμα ελαιοκράμβης.

Η ικανότητα της ελαιοκράμβης να ανταπεξέρχεται σε χαμηλές θερμοκρασίες εξαρτάται απαραίτητα από την ανάπτυξή του και τον βαθμό σκλήρυνσης που έχει επιτύχει. Η ανάπτυξή της είναι πιο έντονη σε θερμοκρασίες 10 – 30 °C και βέλτιστη κοντά στους 20 °C. Είναι πολύ ευαίσθητη στις υψηλές θερμοκρασίες την περίοδο της άνθησης, ακόμη κι αν υπάρχει άφθονη υγρασία. Μακρές περίοδοι σε θερμοκρασίες άνω των 30 °C μπορεί να οδηγήσουν σε σοβαρή στεριότητα και υψηλές απώλειες σοδειάς.

Στην Ευρώπη, η ελαιοκράμβη καλλιεργείται κυρίως ως τροφή για ζώα (λόγω του υψηλού λιπιδικού και μέσου πρωτεϊνικού περιεχομένου) και για την παραγωγή ελαίου για βιοενέργεια. Είναι μία από τις κυριότερες πηγές φυτικών ελαίων μετά τη σόγια και τον φοίνικα. Το περιεχόμενο σε λάδι αποτελεί το 35 - 45% . Η καλύτερη και αποδοτικότερη σοδειά σε σπόρους δίνεται όταν θεριστεί την άνοιξη, από 1.787 - 2.783 kg/ha, και υψηλότερο περιεχόμενο σε λάδι (42.0 - 44.5%).

3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ

Ακολουθεί το διάγραμμα ροής της πειραματικής διαδικασίας, το οποίο εξηγεί την πορεία των υγρών αποβλήτων από την πηγή ως την εκροή των δοχείων - γλαστρών καθώς και τις περιπτώσεις στις οποίες πάρθηκαν δείγματα προς ανάλυση. (Εικόνα 3.1). Οι αριθμοί 1 - 3 συμβολίζουν τα δοχεία στα οποία τοποθετήθηκαν τα φυτά που υπόκεινται σε επεξεργασία των αποβλήτων, ενώ 4 - 6 είναι οι αριθμοί των δοχείων στα οποία προμηθεύτηκε κοινό νερό βρύσης. Ηλιοτρόπιο, σόγια και ελαιοκράμβη χρησιμοποιήθηκαν διαδοχικά και για τις δύο περιπτώσεις.

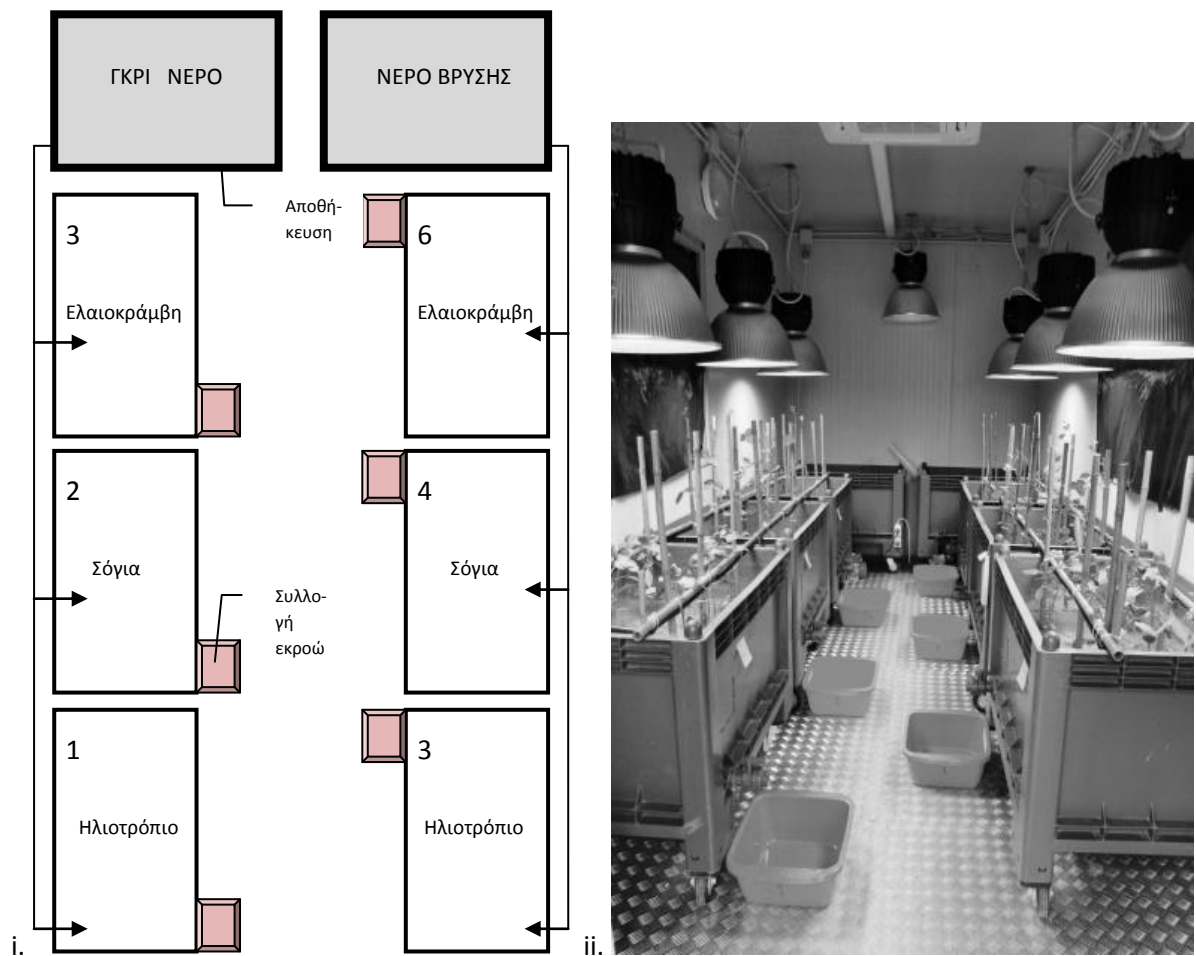


Εικόνα 3.1: Διάγραμμα ροής των κλασμάτων των εισροών από την συλλογή ως την ανάλυση.

Η συλλογή των αποβλήτων γινόταν στην τουαλέτα του εργαστηρίου. Όταν μαζευόταν ικανή ποσότητα, τα απόβλητα μεταφέρονταν στην εγκατάσταση όπου βρίσκονταν και τα φυτά. Εκεί, στη συνέχεια λάμβανε χώρα η δημιουργία του μίγματος των αποβλήτων. Έπειτα τα φυτά αρδεύονταν όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα. Χαρακτηρισμός γινόταν στα δείγματα των εκάστοτε ρευμάτων των αποβλήτων, καθώς και στις εκροές των γλαστρών.

3.1 Εξοπλισμός

Οι ακριβείς απαιτούμενες συνθήκες για τη δημιουργία της παρούσας εργασίας προσομοιάστηκαν στο περιβάλλον ενός προκατασκευασμένου λυόμενου, τοποθετημένου στον εξωτερικό χώρο του εργαστηρίου LISA της Πάντοβα (Laboratorio di Ingegneria Sanitaria Ambientale).

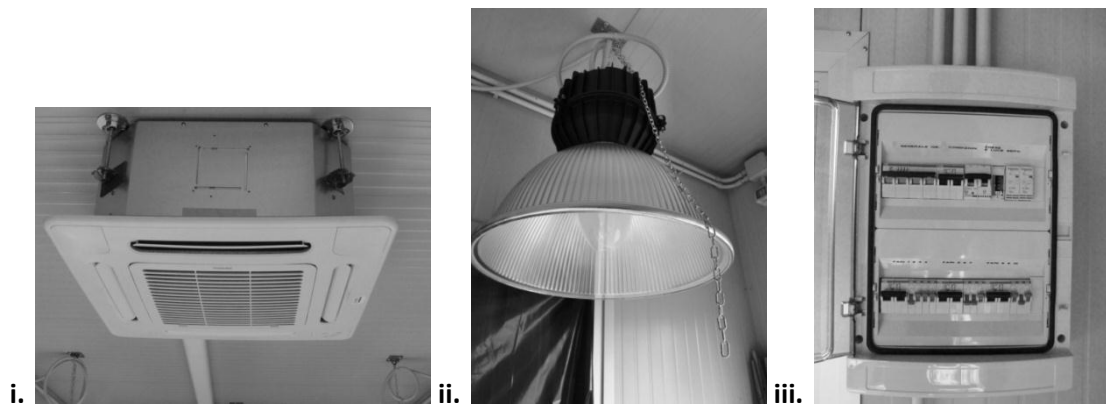


Εικόνα 3.2: Κάτοψη διάταξης λυόμενου θερμοκηπίου (i) και εσωτερικό (ii).

Το λυόμενο διαστάσεων 6 x 2.3 m θεωρήθηκε πως έπρεπε να παρέχει συνθήκες θερμοκηπίου ώστε τα αποτελέσματα να είναι βέλτιστα. Μια διαφωτιστική κάτοψη του λυόμενου και του εσωτερικού του, όπως αυτό εγκαταστάθηκε, παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.2.

3.1.1 Υλικά

Τα υλικά του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκαν τοποθετήθηκαν εντός του λυόμενου και ξεχωρίζουν στην Εικόνα 3.2.



Εικόνα 3.3: Το κλιματιστικό (i), η λάμπα (ii) και ο χρονοδιακόπτης (iii) που χρησιμοποιήθηκαν.

Συγκεκριμένα, πρόκειται για:

- 8 μεγάλα παραλληλεπίπεδα δοχεία (95 x 64 x 50) cm, (μήκος x πλάτος x ύψος), 6 για την φιλοξενία των φυτών και 2 ως αποθηκευτικός χώρος των όγκων των εισροών (νερό βρύσης και υγρά απόβλητα)
- 6 λάμπες (230 V, 50 Hz, 400W), μία πάνω από κάθε δοχείο-γλάστρα (Εικόνα 3.3)
- 1 θερμόμετρο
- 1 κλιματιστικό σύστημα (Εικόνα 3.3)
- 6 μικρά δοχεία ως υποδοχείς των εκροών
- 1 χρονοδιακόπτης ενσωματωμένος στον πίνακα του ηλεκτρικού, για τον έλεγχο της λειτουργίας των λαμπών (Εικόνα 3.3)

3.1.2 Βλάστηση

Τα φυτά που συμμετείχαν στην διαδικασία της εξυγίανσης είναι το ηλιοτρόπιο, η σόγια και η ελαιοκράμβη.

Γονιμοποιήθηκαν και σπάρθηκαν στο τμήμα αγρονομίας της πόλης, στο εργαστήριο της φυτοβιολογίας (Department of Agricultural Biotechnology). Οι φύτες παρέμειναν εκεί για δύο εβδομάδες ώστε να διασφαλιστούν κατά το δυνατό οι απαραίτητες συνθήκες για ομαλή ανάπτυξη. Στη συνέχεια, τα φυτά εισήχθησαν στο πειραματικό περιβάλλον, όπου θα τρέφονταν και αναπτύσσονταν (Εικόνα 3.4).



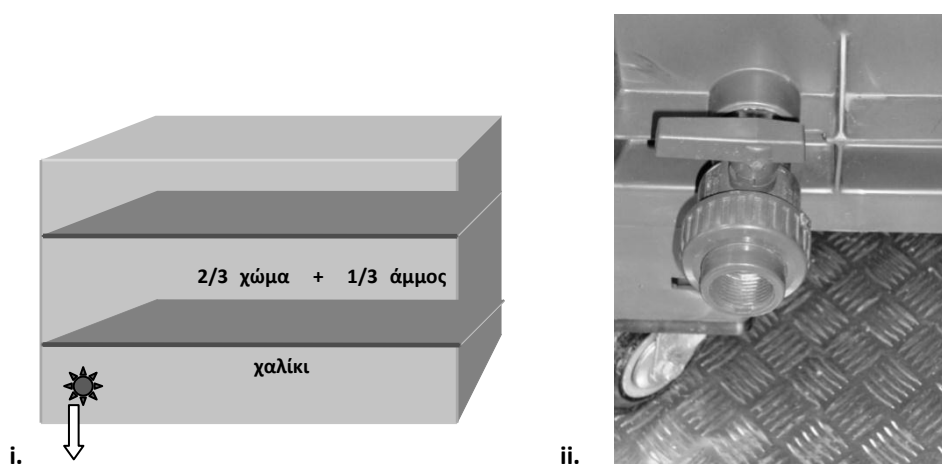
Εικόνα 3.4: Ελαιοκράμβη, ηλιοτρόπιο και σόγια πριν την φύτευση.

Κατά τη φύτευση λήφθηκε υπ' όψη η μελλοντική ανάπτυξή τους κι έτσι τοποθετήθηκαν με 3 cm τουλάχιστον απόσταση από τα τοιχώματα και μεταξύ τους. Σε κάποιες περιπτώσεις τοποθετήθηκαν 2 ή 3 ρίζες στην ίδια τρύπα. Έπειτα τους δόθηκε νερό βρύσης κοντά στις ρίζες.

Περίπου 24 ρίζες ηλιοτροπίων, 16 σόγιας και 28 ελαιοκράμβης χρησιμοποιήθηκαν μοιρασμένα σε 2 γλάστρες για κάθε είδος. Ειδικότερα, 20/m² ηλιοτρόπια, 13/m² σόγιες και 23/m² ελαιοκράμβες φυτεύτηκαν στις γλάστρες.

3.1.3 Έδαφος

Το εδαφικό υπόστρωμα επιλέχθηκε με βάση τα χαρακτηριστικά του. Με αυτό τον τρόπο, επιλέχθηκαν χαλίκι, άμμος και χώμα με χαμηλές συγκεντρώσεις σε θρεπτικά. Στη συνέχεια, τοποθετήθηκαν με τη σειρά μέσα στις γλάστρες των φυτών μας. Τα δοχεία γεμίστηκαν με χαλίκι έως τα 10 cm από τον πυθμένα. Το υπερκείμενο στρώμα ήταν ύψους 23 cm και πληρώθηκε από 2/3 χώματος και 1/3 άμμου καλά αναμεμιγμένων σε διάταξη όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.5(i). Πρακτικά, ο όγκος χώματος που χρησιμοποιήθηκε σε κάθε γλάστρα ήταν περίπου 0.304 m³.



Εικόνα 3.5: Σχήμα και σύσταση της γλάστρας (i) και η βαλβίδα παροχής των εξόδων (ii).

Συνολικά έγινε χρήση 6 δοχείων ως γλάστρες. Κάθε γλάστρα ήταν εφοδιασμένη με μία βαλβίδα εξόδου, 7 cm από τον πυθμένα (Εικόνα 3.5(ii)), η οποία μας επιτρέπει να λαμβάνουμε τις εξόδους των λυμάτων έπειτα από την επεξεργασία τους από τα φυτά για ανάλυση.

Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά, η σύσταση του μίγματος εδάφους καθώς και των αρχικών συνιστωσών καταγράφονται λεπτομερώς στον Πίνακα 4.1.

3.1.4 Ρεύματα των Αποβλήτων

Οι τύποι των ρευμάτων (νερού και αποβλήτων) που χρησιμοποιήθηκαν στο μίγμα του αποβλήτου για άρδευση είναι: το Νερό Βρύσης (Tap Water), το Γκρι Νερό (Grey Water) και τα Ούρα (Urine).

Νερό Βρύσης: Πρόκειται για το κοινό νερό που λαμβάνεται από το δήμο. Υπάρχει ένα εύρος διακύμανσης στις συγκεντρώσεις των χαρακτηριστικών του, τόσο από περιοχή σε περιοχή, όσο και στην ίδια περιοχή μα σε διαφορετικές χρονικές συγκυρίες.

Γκρι Νερό: Αφορά στον ολικό όγκο του νερού που προέρχεται από το πλύσιμο φαγητού, ρούχων, πιάτων καθώς και λουσίματος. Η μόνη διαφορά του από τα οικιακά απόβλητα είναι η έλλειψη κοπράνων και ούρων. Ο παραγόμενος όγκος ενός νοικοκυριού αποτελεί το 60 - 70% των συνολικών αποβλήτων (Butler, 1995). Μπορεί να περιέχει παθογόνους μικροοργανισμούς και περιττώματα καθώς και να αποτελεί τον μεγαλύτερο όγκο αποβλήτου, όμως το Γκρι Νερό θεωρείται αμελητέας ανησυχίας για την υγιεινή. Σχεδόν δεν περιέχει θρεπτικά, αλλά μια μεγάλη ποικιλία ουσιών.

Η μέση παραγωγή του είναι 25 - 100 m³/cap/a. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για φόρτιση του εδάφους, για δημιουργία χώρων αναψυχής και για φυτική ανάπτυξη (Stephenson et al., 2007).

Ούρα: Είναι τα αδιάλυτα ούρα. Θεωρούνται μη κρίσιμα από υγειονομική σκοπιά, αλλά περιέχουν το μεγαλύτερο ποσοστό θρεπτικών διαθεσίμων στα φυτά. Τα ούρα συνίστανται κυρίως από θρεπτικά και σε πολύ μικρότερο βαθμό σε οργανική ύλη. Είναι πιθανό να περιέχουν ορμόνες ή ιατρικά κατάλοιπα. Η μέση παραγωγή είναι 500 L/cap/a.

Αποτελούν ένα πλήρες λίπασμα, πλούσιο σε άζωτο (N). Αδιάλυτα περιέχουν 3 - 7 gN/l, ενώ το ήμισυ αν χρησιμοποιηθεί καζανάκι από διαχωρισμένες τουαλέτες (Vinneras, 2002). Η επίδραση του φωσφόρου (P) είναι το ίδιο καλή με αυτή των χημικών λιπασμάτων (Kirchmann H et al., 1995) και η επίδραση του αζώτου (N) ανέρχεται στο 70 - 100% των χημικών.

Το Γκρι Νερό του πειράματος συλλέχθηκε από τον νιπτήρα της τουαλέτας του εργαστηρίου ενώ τα ούρα που χρησιμοποιήθηκαν παράχθηκαν στο εργαστήριο και συλλέχθηκαν χειρωνακτικά.. Το εύρος της κύμανσης των χαρακτηριστικών τους δίνεται στον Πίνακα 4.2.

3.2 Λειτουργικές Συνθήκες

Οι συνθήκες που εφαρμόστηκαν και ελέγχθηκαν στην εγκατάσταση της φυτοεξυγίανσης περιλαμβάνουν τον φωτισμό, την επιλογή θερμοκρασίας και την συχνότητα της άρδευσης.

3.2.1 Φως

Κάθε γλάστρα εξοπλίστηκε με ειδική λάμπα από πάνω της, ώστε να ελέγχεται ο φωτισμός και να απομονωθούν οι άστατες εξωτερικές συνθήκες. Ένας χρονοδιακόπτης ενεργοποιούσε τις λάμπες για 14 ώρες ημερησίως, 6:00 πμ με 20:00 μμ. Απόλυτο σκοτάδι κατά τις νυχτερινές ώρες επιτεύχθηκε με κάλυψη των φωταγωγών με σκούρο υλικό, για λόγους σωστής ανάπτυξης.

Σε διάφορα στάδια της ανάπτυξης των φυτών έλαβαν χώρα φωτομετρικά τεστ για εξασφάλιση τη σωστής πειραματικής ροής. Αρχικά οι λάμπες τοποθετήθηκαν 60 cm πάνω από τις γλάστρες, αλλά στη συνέχεια που τα φυτά κέρδισαν σε ύψος, η απόσταση μεγάλωσε.

Μερική αστοχία την πρώτη περίοδο του πειράματος, προκάλεσε ένας δυσλειτουργικός χρονοδιακόπτης, που στην συνέχεια όμως αντικαταστάθηκε. Γεγονός είναι πως για τη χρονική περίοδο των 2 πρώτων εβδομάδων, τα φυτά βίωσαν ελάχιστο σκοτάδι.

3.2.2 Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία του αέρα μέσα στην εγκατάσταση ελεγχόταν με θερμόμετρο και ένα κλιματιστικό σύστημα στην οροφή. Το εύρος της κύμανσής της ήταν 27 - 33 °C κατά τη διάρκεια της ημέρας και 23 - 27 °C το βράδυ.

Λόγω του πολύ ζεστού και υγρού εξωτερικού κλίματος, σε ορισμένες περιπτώσεις παρατηρήθηκε δυσκολία στην απομόνωση των συνθηκών από αυτές του εξωτερικού περιβάλλοντος και ίσως επηρέασαν τον χώρο ανάπτυξης των φυτών.

3.2.3 Άρδευση

Η άρδευση γινόταν όταν ήταν απαραίτητο. Αυτό το καθόριζε το επίπεδο του νερού στο έδαφος των φυτών. Η συχνότητα, ο όγκος και η σύσταση του αρδευτικού μέσου, διέφεραν ανάλογα με το χρόνο και τις θρεπτικές ανάγκες που υπέβαλε η ανάπτυξή τους. Τα μείγματα των αποβλήτων ετοιμάζονταν με το χέρι κάθε φορά με διαφορετικό ποσοστό συμμετοχής των αποβλήτων. Η άρδευση έγινε με χειρωνακτικό τρόπο, αργές ταχύτητες και πολλές επαναλήψεις μικρών όγκων, οι οποίες ελαχιστοποίησαν την εξάτμιση του διαλύματος πριν την απορρόφησή του από το έδαφος. Προς αυτή την κατεύθυνση, ένας ογκομετρικός σωλήνας του 1L χρησιμοποιήθηκε ως ποτιστήρι.

Η αρχική πρόθεση να χρησιμοποιηθούν 2 συστήματα αυτόματου ποτίσματος απορρίφθηκε, για λόγους ελέγχου του όγκου της άρδευσης, ο οποίος διέφερε για κάθε είδος φυτού.

3.3 Αρδευτική Διαδικασία

Η αρδευτική περίοδος διήρκησε 3 μήνες. Σε πρώτη φάση και προτού φυτευτούν τα φυτά στις γλάστρες, αυτές ενισχύθηκαν με 35 L νερού βρύσης. Από τότε και ύστερα, οι γλάστρες κατηγοριοποιήθηκαν σε 2 ομάδες, ώστε να περιέχουν μία γλάστρα από κάθε είδος. Η μία ομάδα αποφασίστηκε να τροφοδοτηθεί με τα υγρά απόβλητα ενώ η άλλη με νερό βρύσης. Η τροφοδοσία γινόταν ταυτόχρονα και για τις 2 ομάδες και με ίσους όγκους άρδευσης μεταξύ των γλαστρών του ίδιου είδους. Περιοδικά, ο όγκος και η συχνότητα της τροφοδοσίας αυξήθηκε. Το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα τα φυτά ποτίζονταν 3 φορές την εβδομάδα. Μέσες τιμές για τον όγκο της άρδευσης με το χρόνο παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.6.

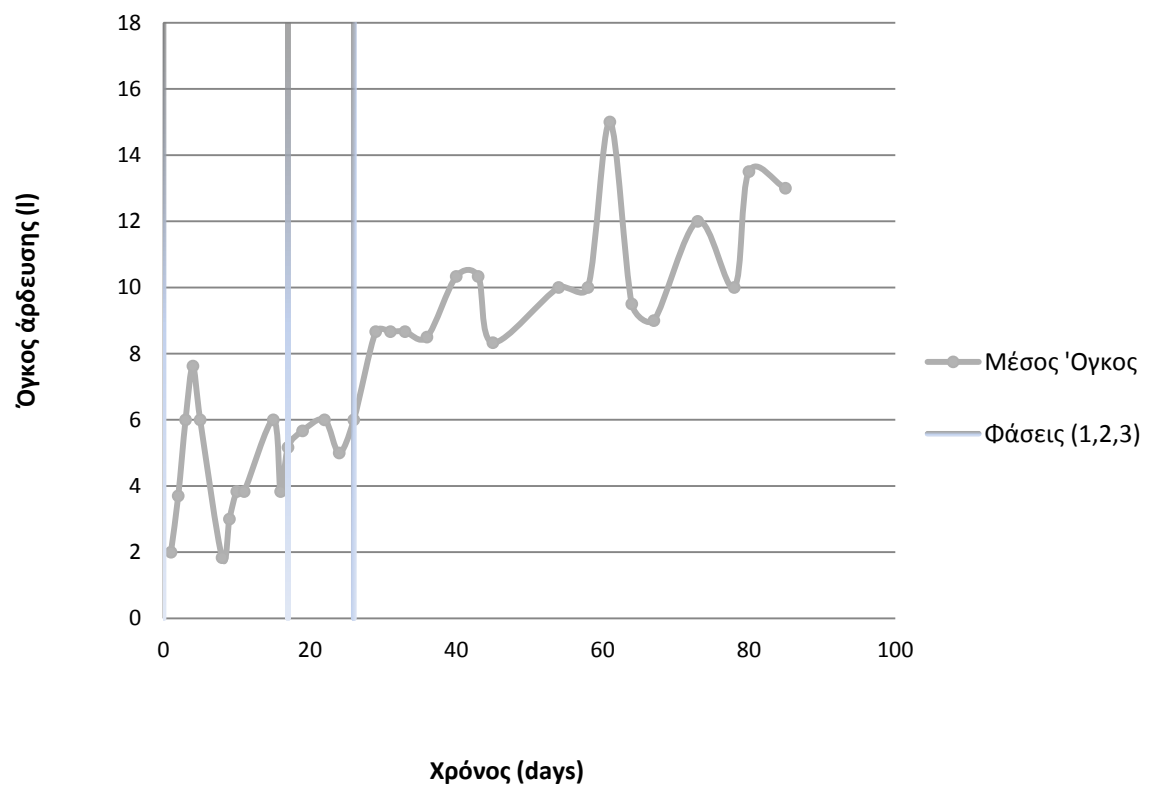
Η ομάδα των φυτών που έλαβε νερό βρύσης, έδρασε σαν ένα σημείο αναφοράς τόσο για την ποιότητα του νερού μετά την εξυγίανσή του, όσο και για το ποσοστό της βιομάζας της σε σχέση με τα φυτά που έλαβαν διάλυμα αποβλήτων. Για αυτό το λόγο από εδώ και στο εξής θα αναφέρονται ως 'μάρτυρες'. Ως 'πειραματικά φυτά' θα αναφέρονται τα φυτά που δέχτηκαν απόβλητα μέσω της άρδευσης. Η διαφορά στην ποιότητα της άρδευσης μεταξύ των δύο ομάδων είναι πως τα πειραματικά φυτά λαμβάνουν όλο και μεγαλύτερο φορτίο θρεπτικών με το χρόνο. Στα πειραματικά φυτά το ποτιστικό διάλυμα διαφέρει σε σύσταση ανάλογα με το είδος των αποβλήτων που συνθέτουν το τελικό διάλυμα και την αναλογία των συνιστωσών τους.

Οι διάφορες τροφοδοτικές φάσεις που έλαβαν χώρα κατά σειρά είναι:

Φάση 1: Γκρι Νερό

Φάση 2: Ούρα + Νερό βρύσης

Φάση 3: Γκρι Νερό + Ούρα



Εικόνα 3.6: Μέσος αρδευτικός όγκος ανά γλάστρα στο χρόνο.

Η τρίτη φάση αποτελείται από επιμέρους φάσεις που καθορίζουν την αναλογία των ούρων στο τελικό μείγμα (Πίνακας 3.1). Το ποσοστό των ούρων αποφασιζόταν με βάση το φορτίο του αζώτου που θέλαμε να προσφέρουμε. Μπορούμε να πούμε πως το άζωτο αποτελεί τον περιοριστικό μας παράγοντα.

Πίνακας 3.1: Σύσταση τελικού μίγματος αποβλήτων και χρονική περίοδος φάσεων.

Φάσεις		Περίοδος (days)	Συνιστώσες Άρδευσης
Φάση 1	(i)	16	Γκρι Νερό 100%
Φάση 2	(ii)	9	Νερό Βρύσης 99,9% + Ούρα 0,1%
Φάση 3	(iii)	5	Γκρι Νερό 99,5% + Ούρα 0,5%
	(iv)	9	Γκρι Νερό 99% + Ούρα 1%
	(v)	21	Γκρι Νερό 98% + Ούρα 2%
	(vi)	19	Γκρι Νερό 97% + Ούρα 3%
	(vii)	7	Γκρι Νερό 96% + Ούρα 4%

Ο όγκος της εκροής της προηγούμενης άρδευσης καθορίζει τον νέο όγκο του διαλύματος. Σε ορισμένες περιπτώσεις δεν είχαμε εκροή ως αποτέλεσμα μη επαρκούς τροφοδοσίας.

3.4 Χαρακτηρισμός Δειγμάτων

Φυσικοχημική ανάλυση υπέστησαν δείγματα από τα ρεύματα του μίγματος εισροών και από τις εκροές των γλαστρών. Κάθε καινούριος όγκος αποβλήτων που προέκυψε υπέστη ανάλυση.

3.4.1 Συλλογή Δειγμάτων

Δείγματα Εισροών: Τόσο το Γκρι Νερό όσο και τα Ούρα συλλεγόντουσαν με το χέρι και συνεχώς. Μετά τη συλλογή τους και τη δημιουργία του μείγματος εισροής, αυτό μεταφερόταν στην αποθηκευτική λεκάνη εντός της προκατασκευασμένης εγκατάστασης. Πριν την τροφοδοσία των φυτών και έπειτα από καλή ανάμιξη, παιρνόταν το δείγμα προς ανάλυση. Στη συνέχεια, το μίγμα διατίθετο στα φυτά. Ο χαρακτηρισμός των αποβλήτων απεικονίζεται στον Πίνακα 4.2.

Δείγματα Εκροών: Ακριβώς πριν την εκάστοτε άρδευση των φυτών, λαμβανόταν όσο νερό μπορούσε να εξέλθει ως εκροή. Η διαδικασία αυτή γινόταν για όλες τις γλάστρες, ανεξάρτητα από το τροφοδοτικό μέσο. Έπειτα από τη συλλογή ικανού δείγματος για ανάλυση, οι εναπομείναντες όγκοι πετιόντουσαν έπειτα από ογκομέτρηση. Στις περιπτώσεις μικρότερου όγκου εκροής, έγινε ανάλυση στα πιο σημαντικά και ευμετάβλητα χαρακτηριστικά. Στις περιπτώσεις για τις οποίες δεν υπήρξαν εκροές προς συλλογή, δεν επιτεύχθηκαν αποτελέσματα.

Ο χαρακτηρισμός των αποβλήτων ως εκροές έπειτα από την επεξεργασία τους διαμέσου των φυτών δίνεται στον Πίνακα 4.3 για τα αμέταλλα στοιχεία και στον Πίνακα 4.4 για τα μέταλλα.

3.4.2 Παράμετροι που αναλύθηκαν

Αναλύθηκαν φυσικοχημικά τα χαρακτηριστικά του εδάφους, τα κλάσματα των υγρών αποβλήτων (Grey Water, Urine) όπως και οι εκροές του συστήματός μας. Στη συνέχεια ακολουθούν οι παράμετροι που αναλύθηκαν κατά περίπτωση.

Ως προς τον προσδιορισμό του εδάφους, αναλύθηκαν τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Ολικά Στερεά (TS)
- Πτητικά Στερεά (VS)
- Total Kjeldal Nitrogen (TKN)
- Αμμωνία (NH_3)
- Νιτρικά (NO_3^-)
- Ολικός φώσφορος (TP)
- Ολικός Οργανικός Άνθρακας (TOC)
- Ανόργανος Άνθρακας (IC)
- Μέταλλα (Na, K, Ca, Mg, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, Zn)

Για τα υγρά απόβλητα, ελέχθησαν οι παρακάτω παράμετροι:

- Ολικά Στερεά (TS)
- Πτητικά Στερεά (VS)
- Ολικά Αιωρούμενα Στερεά(TSS)
- Πτητικά Αιωρούμενα Στερεά (TVS)
- pH
- Χημική Απαίτηση σε Οξυγόνο (COD)
- Total Kjeldal Nitrogen (TKN)
- Αμμωνία (NH_3)
- Νιτρικά (NO_3^-)
- Ολικός φώσφορος (TP)
- Φωσφορικά (PO_4^{2-})
- Χλωριόντα (Cl^-)
- Methylene Blue Active Substances (MBAS)
- Θειικά (SO_4^{2-})
- Μέταλλα (Na, K, Ca, Mg, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, Zn)

Όσων αφορά στις συγκεντρώσεις των φυτοεξυγιασμένων εκροών, προσδιορίστηκαν τα εξής:

- Ολικά Στερεά (TS)
- pH
- Χημική Απαίτηση σε Οξυγόνο (COD)
- Total Kjeldal Nitrogen (TKN)
- Αμμωνία (NH_3)
- Νιτρικά (NO_3^-)
- Ολικός φώσφορος (TP)
- Φωσφορικά (PO_4^{2-})
- Χλωριόντα (Cl^-)

- Θειικά (SO_4^{2-})

- Μέταλλα (Na, K, Ca, Mg, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, Zn)

3.4.3 Μέθοδοι Ανάλυσης Δειγμάτων

Η μεθοδολογία και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκαν για τις φυσικοχημικές αναλύσεις παρουσιάζονται συνοπτικά με την κωδική τους περιγραφή στον Πίνακα 3.2 που ακολουθεί.

Πίνακας 3.2: Αναφορά μεθόδων ανάλυσης και εξοπλισμού για υγρά και στερεά δείγματα.

Παράμετροι	Δείγμα	Αναλυτική Μέθοδος	Σύντομη Περιγραφή
TS	υγρό	IRSA-CNR Q 64/84 vol 2 n. 2 mod.	Εξάτμιση (105 °C)
	στερεό	IRSA-CNR Q 64/84 vol 2 n. 2	
VS	υγρό	IRSA-CNR Q 64/84 vol 2 n. 2 mod.	Εξάτμιση (550 °C)
	στερεό	IRSA-CNR Q 64/84 vol 2 n. 2	
pH	υγρό	IRSA-CNR 29/2003 vol 1 n. 2060	Ποτενσιομετρική Μέθοδος
	στερεό	IRSA-CNR Q 64/84 vol 2 n. 2	
TKN	υγρό	IRSA-CNR 29/2003 vol 2 n. 5030	Μέθοδος Kjeldhal
	στερεό	IRSA-CNR Q 64/85 vol 3 n. 6 mod.	
NH ₃	υγρό	IRSA-CNR 29/2003 vol 2 n. 4030 A2, C	Σπεκτοφωτομετρική Ανάλυση
	στερεό	IRSA-CNR Q 64/86 vol 3 n. 7 mod.	
P _{tot}	υγρό	IRSA-CNR 29/2003 vol 2 n. 4110 A1, A2	Σπεκτοφωτομετρική Ανάλυση
	στερεό	IRSA-CNR Q 64/85 vol 3 n. 9	
TSS	υγρό	IRSA-CNR 29/2003 vol 1 n. 2090 B	Φίλτρωση
TVS	υγρό	IRSA-CNR 29/2003 vol 1 n. 2090 C	Φίλτρωση
COD	υγρό	IRSA-CNR 29/2003 vol 2 n. 5130	Potassium dichromate method
Cl ⁻	υγρό	IRSA-CNR 29/2003 vol 2 n. 4090 A1	Μέθοδος Mohr
NO ₃ ⁻	υγρό	IRSA-CNR 29/2003 vol 2 n. 4040 A1	Σπεκτοφωτομετρική Ανάλυση
PO ₄ ²⁻	υγρό	IRSA-CNR 29/2003 vol 2 n. 4110 A1, A2	Σπεκτοφωτομετρική Ανάλυση
MBAS	υγρό	IRSA-CNR 29/2003 vol 2 n. 5170	Αντιδράσεις με μπλε του μεθυλενίου - χρωματομετρία
TOC	στερεό	UNI EN 13137	Συνδιασμός Μεθόδων
IC	στερεό	UNI EN 13137	Συνδιασμός Μεθόδων
Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, Zn, Na, K, Mg, Ca	στερεό	EPA 1996 n. 6010	Σπεκτοφωτομετρία
	υγρό	IRSA-CNR 29/2003 vol 1 n. 3020	

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Ποιότητα Αρχικού Εδάφους

Ως υπόστρωμα για τα φυτά χρησιμοποιήθηκαν χώμα και άμμος σε αναλογία 2:1. Τα χαρακτηριστικά του τελικού μίγματος εδάφους απορρέουν από τα χαρακτηριστικά του κάθε κλάσματος στην αναλογία που συμμετέχουν σε αυτό. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης για όλες τις παραπάνω περιπτώσεις παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

Το έδαφος επιλέχθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι όσο το δυνατόν φτωχότερο σε θρεπτικά, ούτως ώστε να μην επηρεάσει από τη μεριά του την ανάπτυξη των φυτών. Προέκυψε από ένα μέρος άμμου αναμεμιγμένο καλά με δύο μέρη χώματος χαμηλής ποιότητας για να δημιουργηθούν οι επιθυμητές υδραυλικές συνθήκες. Εξαιρετικά μικρές είναι οι συγκεντρώσεις για το μολύβιο, το κάδμιο, τον Ολικό Οργανικό Άνθρακα καθώς και τα νιτρικά.

4.2 Ποιότητα Ρευμάτων Αποβλήτων

Στον Πίνακα 4.2 εμφανίζονται οι μέσες τιμές και το εύρος κύμανσης των κυρίως ρύπων στο Γκρι Νερό και τα Ούρα. Τα αναγραφόμενα αποτελέσματα προέκυψαν από το σύνολο των αναλύσεων για όλα τα δείγματα του κάθε είδους. Κάθε φορά που συλλέχτηκαν όγκοι αποβλήτων ακολουθήθηκαν από ανάλυση των στοιχείων τους.

Οι παράμετροι που αναλύθηκαν και παρουσιάζουν μεγαλύτερο εύρος στις τιμές τους είναι η Χημική Απαίτηση σε Οξυγόνο (COD) και τα θειϊκά (SO_4^{2-}), καθώς η συγκέντρωσή τους είναι ευμετάβλητη σε σχέση με το χρόνο και την επικρατούσα θερμοκρασία. Επίσης, το αμμωνιακό άζωτο (N-NH_4^+) παρουσίασε μεγάλη διακύμανση κυρίως στα ούρα. Τα εύρη των τιμών που προκύπτουν είναι πιθανό να οφείλονται σε πειραματικές διαφοροποιήσεις ή στην χρονική πάροδο από τη συλλογή έως την ανάλυση των δειγμάτων που διέφερε κάθε φορά ανάλογα με τις εργαστηριακές δυνατότητες.

Επίσης στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται και ενδεικτικές τιμές των συγκεντρώσεων για τις υπόλοιπες παραμέτρους οι οποίες αναλύθηκαν λιγότερες φορές στα δείγματα και θεωρούνται τυπικές για κάθε κατηγορία αποβλήτου καθώς δεν αναμένονται αλλαγές με το χρόνο. Οι τιμές

που είναι ελαφρώς χρωματισμένες αφορούν στο κατώτερο όριο ανίχνευσης των μεθόδων και συνεπώς υποδηλώνουν τιμές μικρότερες των αναγραφόμενων.

Πίνακας 4.1: Ποιότητα του εδαφικού υποστρώματος.

ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΔΑΦΟΥΣ				
Παράμετροι	Μονάδες	Χώμα	Άμμος	Μίγμα Εδάφους
ST	%	84	97,6	88,5
SV	%	2,1	1,2	1,8
P _{tot}	mg/kg	466	173	368,3
N-NO ₃ ⁻	mg/kg	10	10	10
N-NH ₄ ⁺	mg/kg	46,2	100	64,1
TKN	mg/kg	380	77,6	279,2
TOC	%C	1	1	1
IC	%C	2,7	3,29	2,9
Cd	mg/kg	0,5	0,68927	0,56
Cr	mg/kg	14,3	2,82603	10,5
Cu	mg/kg	27,7	8,61594	21,3
Fe	mg/kg	21025	0,01046	14017
Mn	mg/kg	415	4604,36	1811
Mo	mg/kg	0,5	0,68927	0,56
Ni	mg/kg	13	5,67963	10,6
Pb	mg/kg	11,7	5,29363	9,6
Zn	mg/kg	37,3	18,95506	31,2
Na	mg/kg	74,5	0,00026	49,67
K	mg/kg	1229	0,00096	819
Mg	mg/kg	27935	0,03929	18623
Ca	mg/kg	60736	0,11897	40491

*Τα τονισμένα στοιχεία υποδηλώνουν τιμές μικρότερες των αναγραφόμενων, λόγω αδυναμίας ανίχνευσης από το όργανο συγκεντρώσεων κάτω του συγκεκριμένου ορίου.

Πίνακας 4.2: Ποιότητα γκρι νερού και ούρων.

ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΡΕΥΜΑΤΩΝ					
		ΓΚΡΙ ΝΕΡΟ		ΟΥΡΑ	
Παράμετροι	Μονάδες	Εύρος	Μέση Τιμή	Εύρος	Μέση Τιμή
TS	mg/l	196-600	465	36106-39908	38007
VS	mg/l	146-401	240	19696-23709	21702
TKN	mg/l	0-13,4	5.4	9807-10752	10280
N-NH ₄ ⁺	mg/l	0-1,9	1.5	679-819	742
N-NO ₃ ⁻	mg/l	0-2,7	1.2	0-1	1
P	mg/l	0-0,83	0.43	0,61-430	215.3
Cl ⁻	mg/l	41,6-49,6	44	6382-8084	7422
COD	mg/l	30-122	75	10938-14168	12553
SO ₄ ²⁻	mg/l	18,5-74,8	39.2	793,3-2588,6	1549
pH	pH	6,8-8,2	7.7	6,3-6,7	6.5
Ενδεικτικές Τιμές					
MBAS	mg/l	22	-	-	-
TSS	mg/l	23	426	426	426
VSS	mg/l	10	374	374	374
Cd	mg/l	10	20	20	20
Cr	mg/l	10	20	20	20
Cu	mg/l	59	202	202	202
Fe	mg/l	41	550	550	550
Mn	mg/l	10	20	20	20
Mo	mg/l	10	45	45	45
Ni	mg/l	20	40	40	40
Pb	mg/l	38	60	60	60
Zn	mg/l	574	466	466	466
Na	mg/l	31500	4320000	4320000	4320000
K	mg/l	5690	2740000	2740000	2740000
Mg	mg/l	30300	79600	79600	79600
Ca	mg/l	80600	185600	185600	185600

*τα τονισμένα στοιχεία υποδηλώνουν χαμηλότερες συγκεντρώσεις από τις αναγραφόμενες.

4.3 Ποιότητα Εισροών

Η ποιότητα των εισροών στο σύστημα μεταβαλλόταν ανάλογα με τα ποσοστά των ρευμάτων αποβλήτων που χρησιμοποιούνταν στο τελικό μίγμα. Στον Πίνακα 4.3 αναγράφονται το εύρος και η μέση τιμή των κυριότερων στοιχείων του μίγματος αποβλήτων με το οποίο αρδεύτηκαν το ηλιοτρόπιο, η σόγια και η ελαιοκράμβη. Σε αυτές τις συγκεντρώσεις δεχόντουσαν τα φυτά τα διάφορα θρεπτικά πριν την επεξεργασία.

Πίνακας 4.3: Ποιότητα των εισροών στα φυτά.

ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΙΣΡΟΩΝ			
Παράμετροι	Μονάδες	Εύρος	Μέση Τιμή
TS	mg/l	336-1867	1094
VS	mg/l	146-1153	627
TKN	mg/l	4-398	160,0
N-NH ₄ ⁺	mg/l	1,4-39,6	148,0
N-NO ₃ ⁻	mg/l	0,04-3,6	1,3
P	mg/l	0,2-0,8	0,50
Cl ⁻	mg/l	11-319	151
COD	mg/l	32-305	206
SO ₄ ²⁻	mg/l	15-105	68,0
pH	pH	6,8-8,5	7,8

4.4 Ποιότητα Εκροών

Στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζονται οι μέσες, μέγιστες και ελάχιστες τιμές των βασικότερων αμέταλλων στοιχείων των εκροών που αναλύθηκαν. Ως εκροή του συστήματος νοείται το διηθημένο από το έδαφος και το φυτό, απόβλητο. Οι μεγάλες διακυμάνσεις που μπορούν να παρατηρηθούν στις τιμές έχουν άμεση σχέση με το γεγονός πως τα φυτά επέδειξαν καλύτερες αποδόσεις με την πάροδο του χρόνου, λόγω φυσικά της ανάπτυξης που σημείωσαν και ανάλογα με αυτήν.

Πίνακας 4.4: Μέγιστες, ελάχιστες και μέσες τιμές των εκροών έπειτα από την εξυγίανση μέσω α) ηλιοτροπίου, β) σόγιας και γ) ελαιοκράμβης.

ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΚΡΟΩΝ				
Παράμετροι	Τιμές	Ηλιοτρόπιο (mg/l)	Σόγια (mg/l)	Ελαιοκράμβη (mg/l)
TS	max	2432	2316	1512
	mean	989	1031	979
	min	524	629	478
TVS	Max	1288	1396	655
	Mean	573,5	605	345
	Min	257	255	145
COD	Max	100,0	101,0	82,5
	Mean	52,1	39,7	19,8
	Min	9,9	9,8	9,4
Cl ⁻	Max	304,9	308,5	336,8
	Mean	67,4	67,4	51,4
	Min	26,6	23,4	17,7
SO ₄ ²⁻	Max	199,5	218,9	582,0
	Mean	100,5	126,4	101,3
	Min	39,4	58,8	41,0
TKN	Max	5969,3	5571,3	6765,2
	Mean	33,7	21,3	24,4
	Min	2,8	2,8	2,8
N-Nh ₄ ⁺	Max	44,0	37,8	128,3
	Mean	10,6	1,4	1,4
	Min	1,4	1,4	1,4
N-NO ₃ ⁻	Max	182,52	148,58	51,54
	Mean	56,26	37,93	5,99
	Min	0,04	0,08	0,54
P _{tot}	Max	2,2	0,4	0,8
	Mean	0,5	0,2	0,2
	Min	0,2	0,2	0,2
pH	Max	8,3	8,3	8,5
	Mean	8,0	7,9	8,1
	Min	7,2	6,9	7,4

*τα τονισμένα στοιχεία υποδηλώνουν χαμηλότερες συγκεντρώσεις από τις αναγραφόμενες.

Παρατηρούμε πως σε γενικά πλαίσια και τα τρία είδη φυτών ανταποκρίθηκαν στο απόβλητο με παρόμοια αποτελέσματα. Τα χλωριούχα, το TKN, ο ολικός φώσφορος και το pH είναι τα στοιχεία, οι συγκεντρώσεις των οποίων ουσιαστικά δεν διαφέρουν ανάμεσα στα είδη των φυτών, όπως φαίνεται στον πίνακα. Εντούτοις, η ελαιοκράμβη παρουσιάζει μειωμένες συγκεντρώσεις COD, στερεών και νιτρικών σε σχέση με τις εκροές των άλλων δύο φυτών. Αντίθετα, παρουσιάζει τις μέγιστες συγκεντρώσεις σε θειικά, αλλά μόνο όσον αφορά τη μέγιστη τιμή. Επιπλέον, ελαιοκράμβη παρουσιάζει μειωμένες συγκεντρώσεις νιτρικών σε σχέση με τα άλλα δύο, αλλά αρκετά μεγαλύτερες συγκεντρώσεις αμμωνιακού αζώτου από αυτά. Συνολικά και τα τρία φυτά ελευθερώνουν ίδια ποσά αζώτου.

Δεδομένων των συγκεντρώσεων που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.4, η ελαιοκράμβη συνολικά απελευθερώνει τις μικρότερες συγκεντρώσεις ρύπων και συνολικά παρουσιάζει τα καλύτερα αποτελέσματα ενώ ακολουθούν σόγια και ηλιοτρόπιο με ελφρά βέλτιστη τη σόγια κρίνοντας από τις συγκεντρώσεις του αζώτου στις εκροές.

Η συγκέντρωση των μετάλλων ως μέση τιμή δύο δειγματοληψιών καταγράφεται στον Πίνακα 4.5 που ακολουθεί.

Πίνακας 4.5: Ενδεικτικές συγκεντρώσεις μετάλλων στις εκροές του ηλιοτροπίου, της σόγιας και της ελαιοκράμβης.

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΕΚΡΟΩΝ ΣΕ ΜΕΤΑΛΛΑ			
Παράμετροι	Ηλιοτρόπιο	Σόγια	Ελαιοκράμβη
	mg/l	mg/l	mg/l
Cd	10000	10000	10000
Cr	10000	10000	10000
Cu	68250	10000	11950
Fe	143200	171600	347500
Mn	10000	259850	10550
Mo	10000	10000	10000
Ni	20000	20000	20000
Pb	30000	30000	187400
Zn	62200	59000	216550
Na	46	33.05	13.1
K	1.4525	2.03	2.66
Mg	38.55	37.2	25.95
Ca	126	148	236.75

*τα τονισμένα στοιχεία υποδηλώνουν χαμηλότερες συγκεντρώσεις από τις εμφανιζόμενες.

Παρατηρούμε χαμηλές συγκεντρώσεις μετάλλων, όπως ήταν αναμενόμενο από τη φύση των αποβλήτων που χρησιμοποιήθηκαν. Επιπλέον, τα φυτά επεξεργάστηκαν σε μεγάλο βαθμό τα μέταλλα παρουσιάζοντας διαφοροποιήσεις όμως, ανάλογα με το είδος τους. Συγκεκριμένα, η σόγια παρουσίασε μεγαλύτερη αδυναμία στην απομόνωση του Μn. Η ελαιοκράμβη παρουσίασε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις σε μόλυβδο, ψευδάργυρο και ασβέστιο, όπως και στον σίδηρο. Θα πρέπει να σημειωθεί, πως οι συγκεντρώσεις των μετάλλων στις εκροές είναι ενδεικτικές και όχι χαρακτηριστικές της δυνατότητας των φυτών. Αυτό συμβαίνει επειδή συνολικά έλαβαν χώρα δύο χαρακτηρισμοί για κάθε είδος εκροής, ενώ τα φυτά πέτυχαν καλύτερες επεξεργασίες προς το τέλος της περιόδου και ανάλογα με την αποκτηθείσα βιομάζα.

4.5 Ποιότητα Τελικού Εδάφους

Το έδαφος που υπήρχε σε κάθε δοχείο αναλύθηκε έπειτα από την απομάκρυνση των φυτών. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης για τα φυτά που διετελέσαν την φυτοεξυγίανση παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.6 που ακολουθεί.

Παρατηρούμε πως το χώμα έχει πλέον εμπλουτιστεί με θρεπτικά σε σχέση με το προηγούμενο περιεχόμενό του εκτός από την περίπτωση του Μn, το οποίο εμφανίζεται σε συγκεντρώσεις μικρότερες της αρχικής. Έτσι, καταλήγουμε πως αυτό προσροφήθηκε από τα φυτά.

Τα αποτελέσματα παρουσίασαν χαμηλές συγκεντρώσεις σε Κ, Να και Ρ, ενώ υψηλότερες προέκυψαν οι συγκεντρώσεις του Ca και του Mg. Επιπλέον το Μο είχε αμελητέα συγκέντρωση τόσο στο αρχικό, όσο και στο τελικό έδαφος. Στο έδαφος του ηλιοτροπίου εντοπίστηκε ελαφρά αυξημένος σίδηρος και βρέθηκε μεγάλη συγκέντρωση όλων των μορφών του αζώτου και η μεγαλύτερη συγκέντρωση σε ΤΚΝ, ενώ συγκεντρώσεις αντίστοιχου μεγέθους Ν παρατηρήθηκαν και στα εδάφη της σόγιας και της ελαιοκράμβης. Συνολικά, πλουσιότερο σε θρεπτικά διαπιστώθηκε το έδαφος που φιλοξένησε το ηλιοτρόπιο, αναδεικνύοντας την ικανότητα του φυτού και των ριζών του να ακινητοποιούν τους ρύπους στο έδαφος.

Πίνακας 4.6: Βασικά χαρακτηριστικά εδάφους πριν και μετά την εξυγίανση.

Παράμετροι		Αρχικό Έδαφος	Τελικό Έδαφος		
			Ηλιοτρόπιο	Σόγια	Ελαιοκράμβη
SV	%	1,8	3,0	2,6	2,7
P_{tot}	mg/kg	368	485	382	417
TKN	mg/kg	279	687	481	407
N-NH₄⁺	mg/kg	64	158	86	103
N-NO₃⁻	mg/kg	<10	126	108	110
Cr	mg/kg	10,5	12,9	10,0	10,8
Cu	mg/kg	21,3	19,7	14,0	17,0
Fe	mg/kg	14017	19354	13042	14307
Mn	mg/kg	1811	386,3	286,6	302,5
Ni	mg/kg	10,6	13,2	9,9	10,2
Pb	mg/kg	9,6	10,5	7,0	7,8
Zn	mg/kg	31,2	42,7	32,0	38,3
Na	mg/kg	50	375	359	335
K	mg/kg	819	2446	1988	2179
Mg	mg/kg	18623	34266	36255	35024
Ca	mg/kg	40491	80849	90523	98105

5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

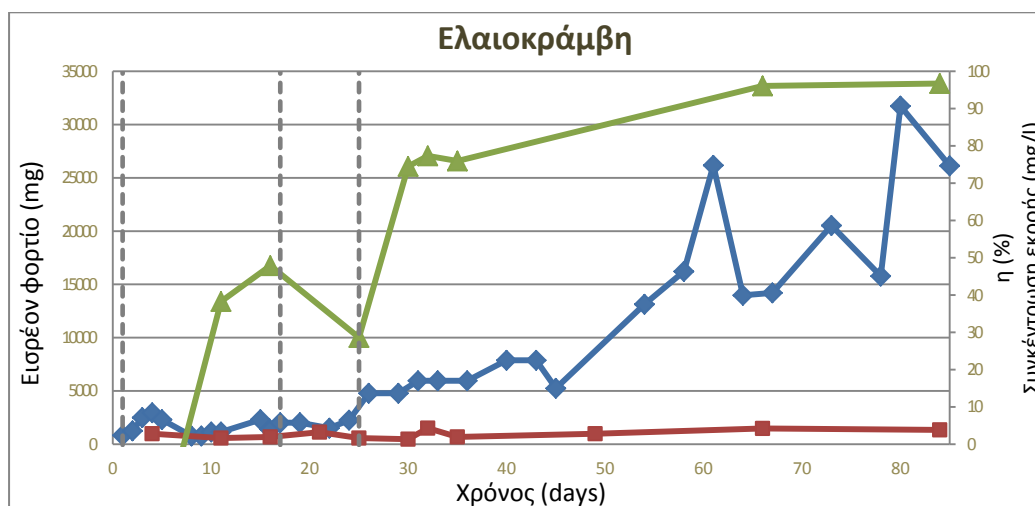
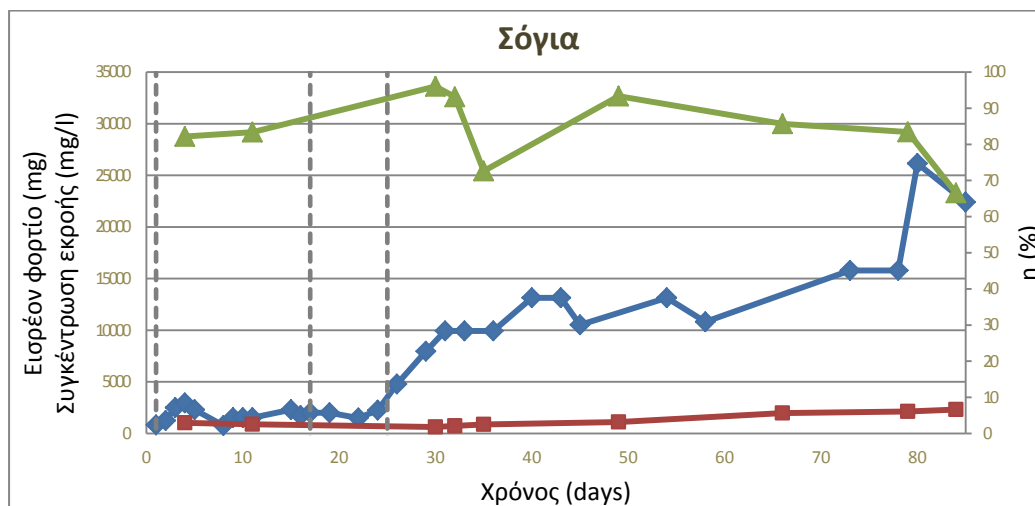
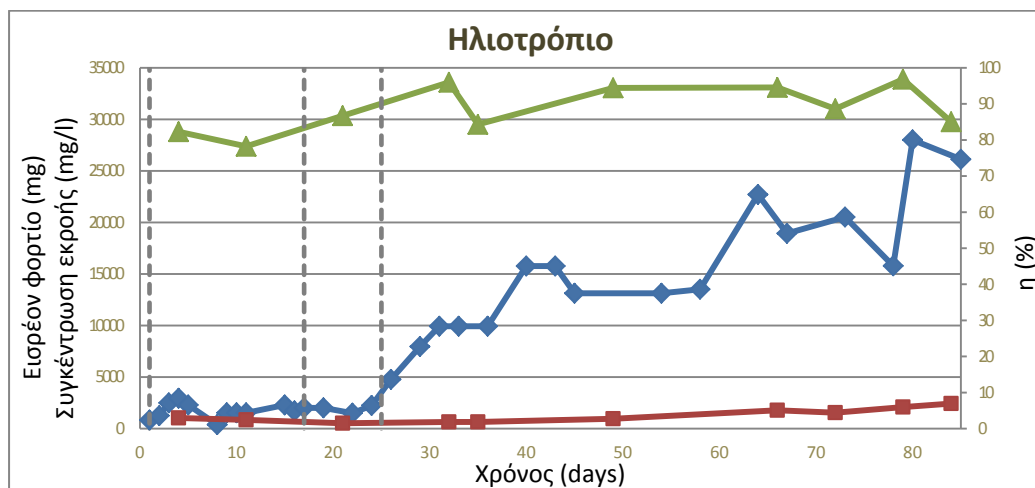
5.1 Ικανότητα Απομάκρυνσης Ρύπων

Οι κυριότεροι ρύποι που χαρακτηρίζουν το μίγμα των αποβλήτων από αυτούς που ελέχθησαν είναι τα ολικά στερεά, ο ολικός φώσφορος, η χημική απαίτηση σε οξυγόνο, το συνολικό άζωτο και τα ιόντα χλωρίου. Στις Εικόνες 5.1 – 5.6 που ακολουθούν, παρουσιάζονται αναλυτικά τα εισερχόμενα φορτία των κυρίως ρύπων που αναλύθηκαν, οι συγκεντρώσεις τους στις εκροές και η ικανότητα απομάκρυνσής τους από τα φυτά, όπως εξελίχθηκαν σε σχέση με τον χρόνο από την αρχή έως την λήξη της πειραματικής διαδικασίας. Τα διαγράμματα προέκυψαν από το σύνολο των αναλύσεων που έγιναν για τα πειραματικά φυτά με σκοπό να συγκριθεί η απόδοση των διαφορετικών φυτών αλλά και ειδικότερα η απόδοση που σημείωσαν για την απομάκρυνση του κάθε ρύπου. Οι επιδόσεις στις περισσότερες περιπτώσεις βελτιώνονται από την 3^η φάση και έπειτα που το αρδευτικό μίγμα είναι πιο φορτισμένο και τα φυτά έχουν αναπτυχθεί επαρκώς.

5.1.1 Ολικά Στερεά

Τα Ολικά Στερεά του μίγματος αποβλήτων διηθούνται μέσω του χώματος και έτσι κυρίως μειώνεται η συγκέντρωσή τους στις εκροές. Η έκλυση στερεών του ίδιου του χώματος είναι αναπόφευκτη κατά την πρώτη περίοδο που το έδαφος δεν είναι στερεοποιημένο. Στην Εικόνα 5.1 παρουσιάζονται τα εισερχόμενα φορτία Ολικών Στερεών, οι συγκεντρώσεις στην έξοδο των αποβλήτων και η ικανότητα απομάκρυνσης σε σχέση με το χρόνο. Όπως προκύπτει από τα διαγράμματα, το ηλιοτρόπιο και η σόγια εμφανίζονται πιο αποτελεσματικά στην απομάκρυνση των ολικών στερεών με υψηλές αποδόσεις απομάκρυνσης.

Η περίπτωση του ηλιοτροπίου παρουσιάζει την μεγαλύτερη σταθερότητα στην απομάκρυνση των στερεών, άσχετα από το ποσό της φόρτισης, αν και δεν διαφέρει πολύ από αυτή της σόγιας. Από την άλλη, η ελαιοκράμβη είναι η πιο αναποτελεσματική στην απομάκρυνση από το απόβλητο, αν και αυτό οφείλεται κυρίως στις επιδόσεις της κατά την πρώτη φάση, καθώς η ικανότητά της αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου και την αύξηση της φόρτισης, όπως και στις περιπτώσεις των άλλων δύο φυτών.



◆ Inflow load
 ■ Outflow concentration
 ▲ Removal efficiency

Εικόνα 5.1: Εισρέον φορτίο TS, συγκέντρωση εκροών και ικανότητα απομάκρυνσης στο χρόνο.

Η ελαιοκράμβη στην αρχή του πειράματος και ιδίως κατά τη διάρκεια της πρώτης φάσης παρουσιάζει χαμηλή απόδοση στην απομάκρυνση των ρύπων σημειώνοντας αυξητικές τάσεις, αφού το φυτό δεν έδειξε ίχνη ανάπτυξης και ουσιαστικά βρέθηκε αναποτελεσματικό στην απομάκρυνση μιας πληθώρας ρύπων. Από την έναρξη της τρίτης, ουσιοδέστερης φάσης και ύστερα αυξάνει προοδευτικά την ικανότητά της για απομάκρυνση των TS, που από τις πρώτες μέρες διπλασιάστηκαν σε ύψος. Με το ίδιο σκεπτικό και εξαιτίας της ταχύτατης ανάπτυξής της κατά το επόμενο στάδιο, ξεπέρασε σε απόδοση απομάκρυνσης τα άλλα δύο είδη πετυχαίνοντας αποδόσεις μεγαλύτερες του 80% κατά το τελευταίο μισό του πειράματος.

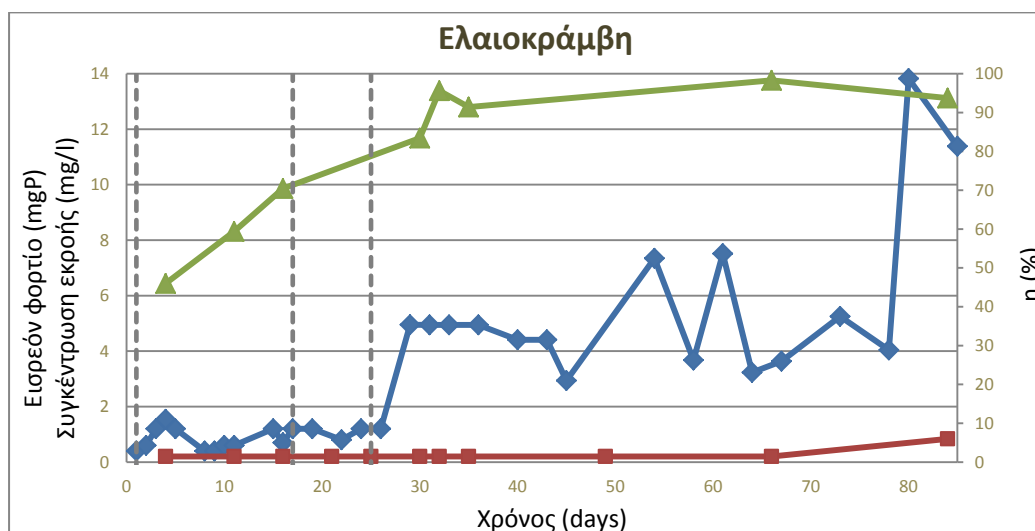
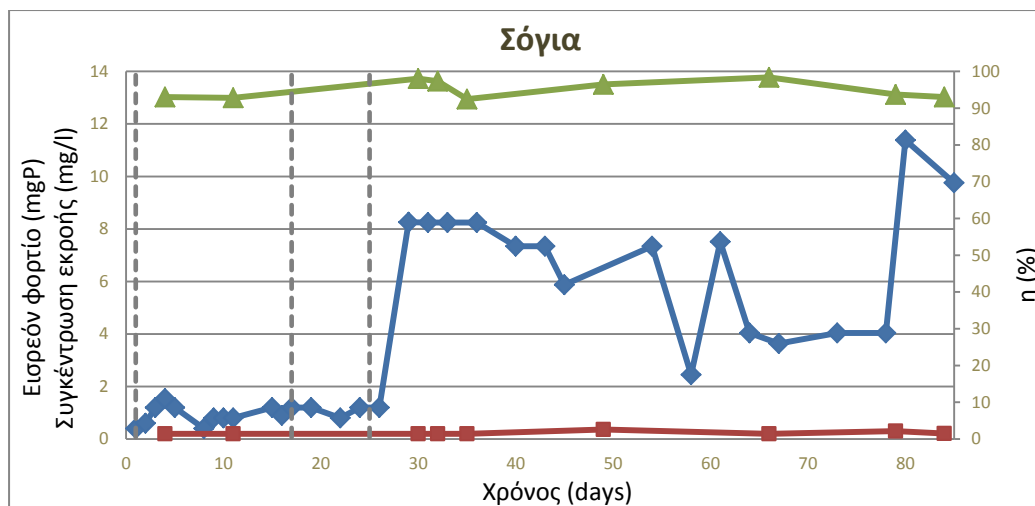
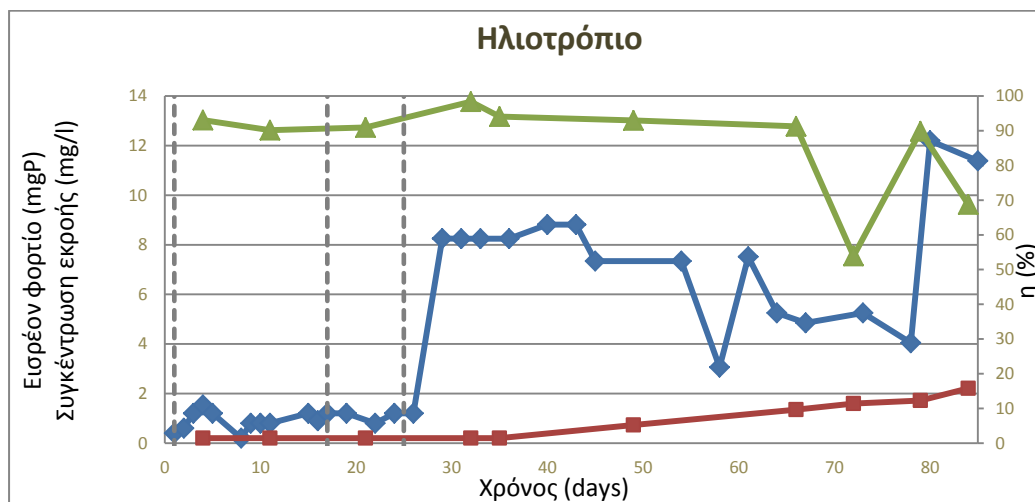
5.1.2 Ολικός Φώσφορος

Ο φώσφορος είναι ένα από τα βασικά θρεπτικά που ήταν απαραίτητα για τα τρία είδη φυτών ώστε να αναπτυχθούν. Για το λόγο αυτό παρατηρούμε στην Εικόνα 5.2 που περιγράφει την απομάκρυνσή του πως τα διηθήματα των φυτών αποβαίνουν φτωχά σε φώσφορο με συγκεντρώσεις μικρότερες ή ίσες με 2 mg/l. Η συνεχής αύξηση της φόρτισης σε ολικό φώσφορο δε φαίνεται να επηρεάζει την ικανότητα απομάκρυνσης από τα φυτά, η οποία αυξάνεται με το χρόνο. Η αύξηση αυτή ωστόσο, είναι μικρή και σταδιακή και τα φυτά ανταποκρίνονται θετικά στο ρυθμό παροχής του φωσφόρου.

Όπως εξάλλου διακρίνεται στην Εικόνα 5.2, τα υψηλότερα ποσοστά απομάκρυνσης του φωσφόρου από το απόβλητο ανήκουν στη σόγια, σημειώνοντας ποσοστά μεγαλύτερα του 90%. Η σόγια παρουσιάζει σταθερές αποδόσεις σε όλη τη διάρκεια της διαδικασίας, χωρίς να επηρεάζεται από την αύξηση του φορτίου και λαμβάνει τις χαμηλότερες συγκεντρώσεις στην έξοδό της.

Η ελαιοκράμβη δεν καταφέρνει ανάλογη αποτελεσματικότητα στις πρώτες φάσεις της διαδικασίας, παρά έπειτα από 30 ημέρες, στην 3^η αρδευτική φάση, που αποτελείται από μίγμα Γκρι Νερού και Ούρων. Πάραυτα, καθώς αυξάνει τη βιομάζα της με το χρόνο, γίνεται αποτελεσματικότερη στην απομάκρυνση του ολικού φωσφόρου σε σχετικά μικρό χρόνο. Παρουσιάζει εκθετική αύξηση της απόδοσής της από την αρχή έως το τέλος της άρδευσης με το απόβλητο όσον αφορά στην απομάκρυνση του φωσφόρου, πετυχαίνοντας υψηλά εκατοστιαία ποσοστά.

Το ηλιοτρόπιο ακολουθεί παρόμοια συμπεριφορά με αυτή της σόγιας, μόνο που κατά το τέλος της 3^{ης} φάσης σημειώνει αστοχία με σημαντικές μεταβολές στην απόδοσή του και αυξημένες συγκεντρώσεις εξόδου σε σχέση με τα άλλα φυτά. Το ηλιοτρόπιο παρουσιάζει συνολικά τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις φωσφόρου στην έξοδο. Αυτό παρατηρείται έπειτα από την έναρξη της 3^{ης} φάσης που συνολικά μεγαλύτερα ποσά ρύπου εισέρχονται στο σύστημα.



◆ Inflow load
 ■ Outflow concentration
 ▲ Removal efficiency

Εικόνα 5.2: Εισρέον φορτίο TP, συγκέντρωση εκροών και ικανότητα απομάκρυνσης στο χρόνο.

Προκύπτει λοιπόν ότι το ηλιοτρόπιο παρουσιάζει περιορισμένες δυνατότητες για την απομάκρυνση του φωσφόρου σε σχέση με τη σόγια και την ελαιοκράμβη, οι οποίες παραμένουν ανεπηρέαστες από την αύξηση των φορτίων.

5.1.3 Χημική Απαίτηση σε Οξυγόνο

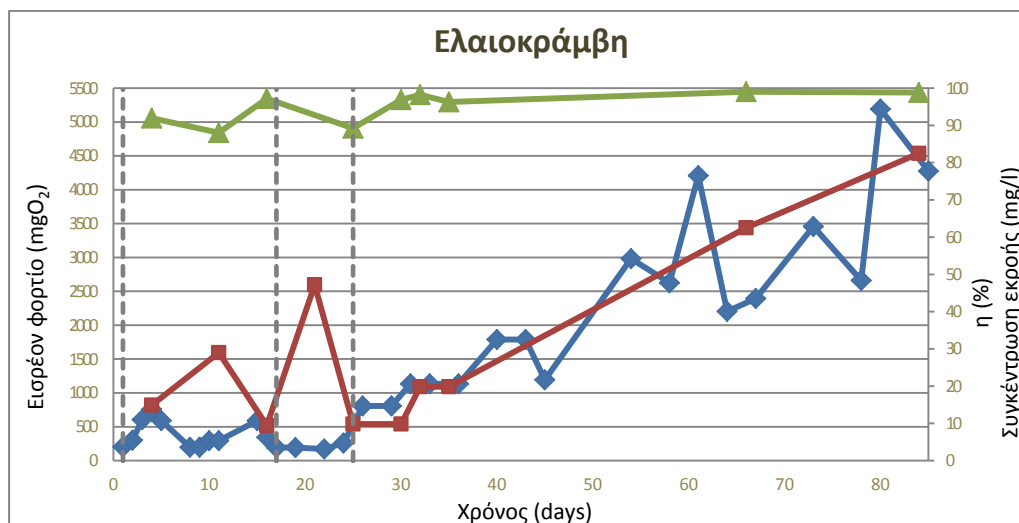
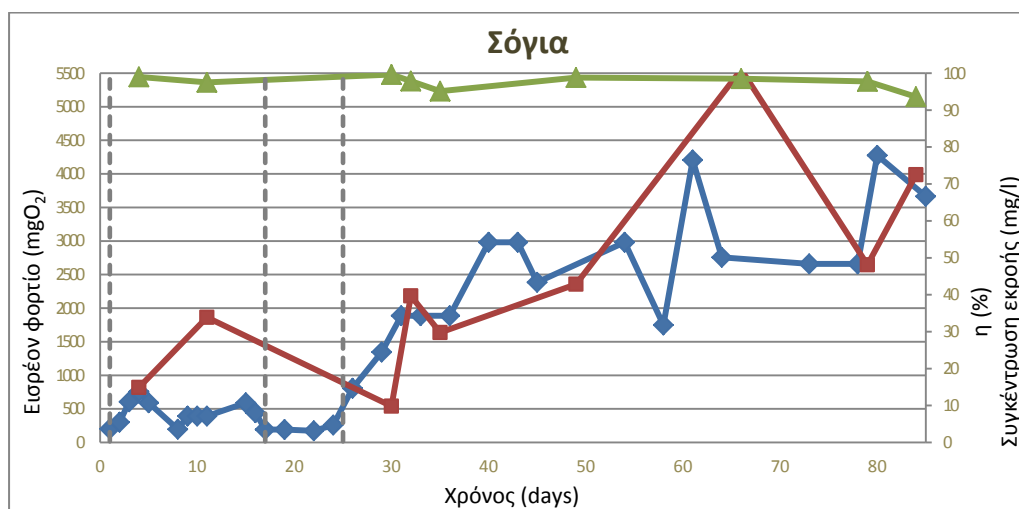
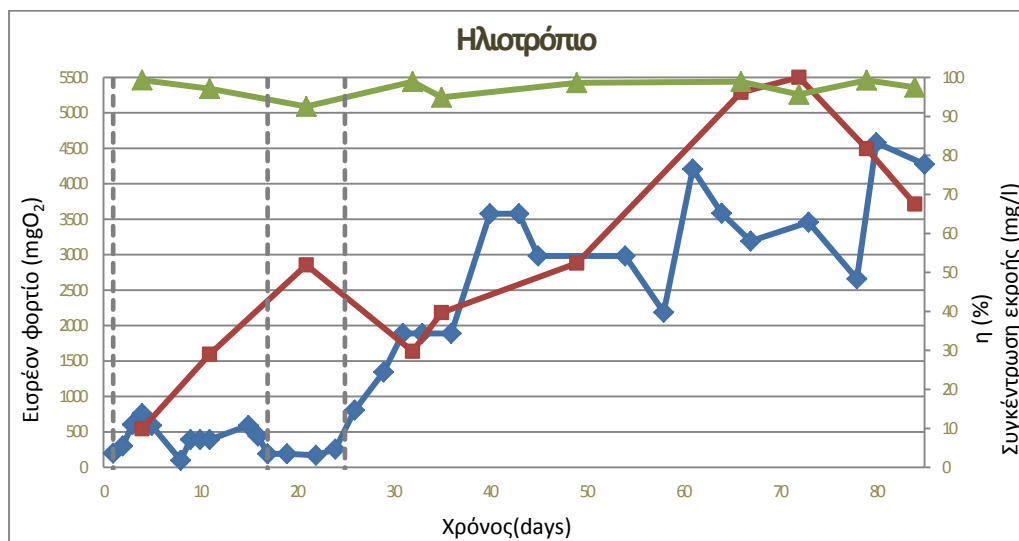
Η ύπαρξη του COD στο μίγμα των αποβλήτων είναι φυσική εφόσον είναι αρκετά μεγάλο το οργανικό φορτίο στα ρεύματα των αποβλήτων. Σύμφωνα με την Εικόνα 5.3 στην οποία περιγράφεται η απομάκρυνση του οργανικού φορτίου, τα φυτά προμηθεύονται με όλο και μεγαλύτερα οργανικά φορτία όσο αυξάνει η φόρτιση στην άρδευση. Παράλληλα, βελτιώνεται η απόδοση απομάκρυνσης του COD με το χρόνο, πράγμα λογικό καθώς το οργανικό φορτίο, ιδίως κατά την αρχή, καθυστερεί να εμφανιστεί στην έξοδο παρουσιάζοντας μειωμένες αρχικά αποδόσεις. Οι συγκεντρώσεις των εκροών αυξάνονται ανάλογα με το εισερχόμενο φορτίο.

Η περίπτωση της απομάκρυνσης του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου από τα φυτά είναι >90% επιτυχής για το ηλιοτρόπιο και τη σόγια καθόλη τη διαδικασία. Τα διαγράμματα των δύο φυτών ταυτίζονται αρκετά. Μετά τη μέγιστη φόρτισή τους ελευθερώνουν μεγάλες συγκεντρώσεις και στο τέλος ελλιώνεται ελάχιστα η απόδοσή τους.

Η συγκέντρωση στο διηθημένο απόβλητο των δύο φυτών κινείται στα ίδια πλαίσια με μέγιστο κοντά στα 100 mg/l.

Η ελαιοκράμβη κατά την 1^η περίοδο παρουσιάζει αυξομειώσεις στην επί τοις % απομάκρυνση του οργανικού φορτίου, κι έτσι δεν είναι αξιόπιστη για τις πρώτες φάσεις του πειράματος. Τριάντα μέρες μετά τη φύτευση, η απόδοσή της σταθεροποιείται και σημειώνει απομάκρυνση μεγαλύτερη του 85% ενώ στη συνέχεια αυξάνεται ξεπερνώντας τη σόγια και τα ηλιοτρόπιο στη συνέχεια. Η ελαιοκράμβη εμφάνισε εντέλει τις χαμηλότερες συγκεντρώσεις του ρύπου μετά την επεξεργασία του από το φυτό με μέγιστη τιμή τα 80 mg/l.

Και στις τρεις περιπτώσεις φυτών, αυτά παρουσιάζουν αυξημένα αντανακλαστικά στην απομάκρυνση, παρά τις συνεχείς αυξήσεις στην συγκέντρωση των εισροών. Και τα τρία φυτά κινούνται στα ίδια επίπεδα απομάκρυνσης, επομένως θεωρούνται το ίδιο ικανά για φυτοεξυγίανση τέτοιου μεγέθους φορτίσεων.



◆ Inflow load
 ■ Outflow concentration
 ▲ Removal efficiency

Εικόνα 5.3: Εισρέον COD, συγκέντρωση εκροής και ικανότητα απομάκρυνσης στο χρόνο.

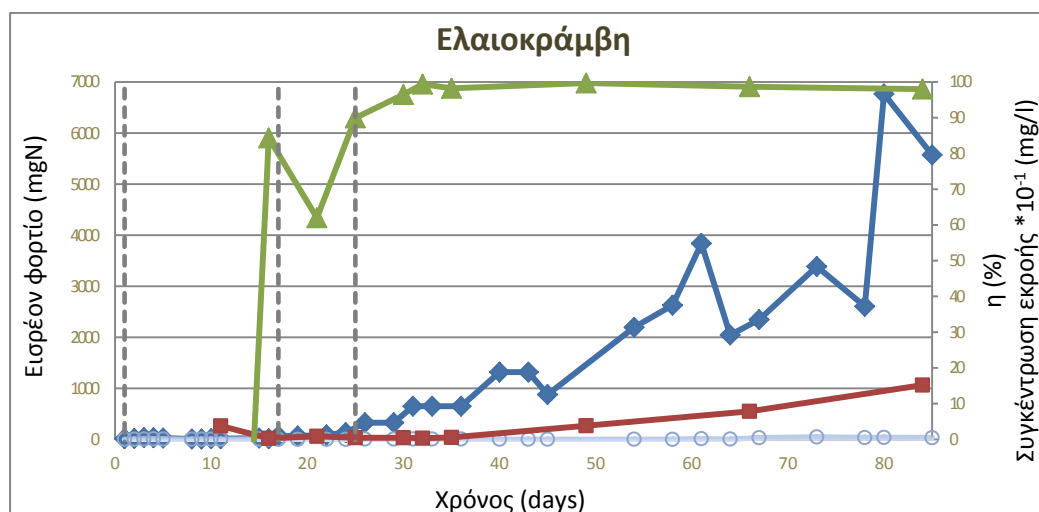
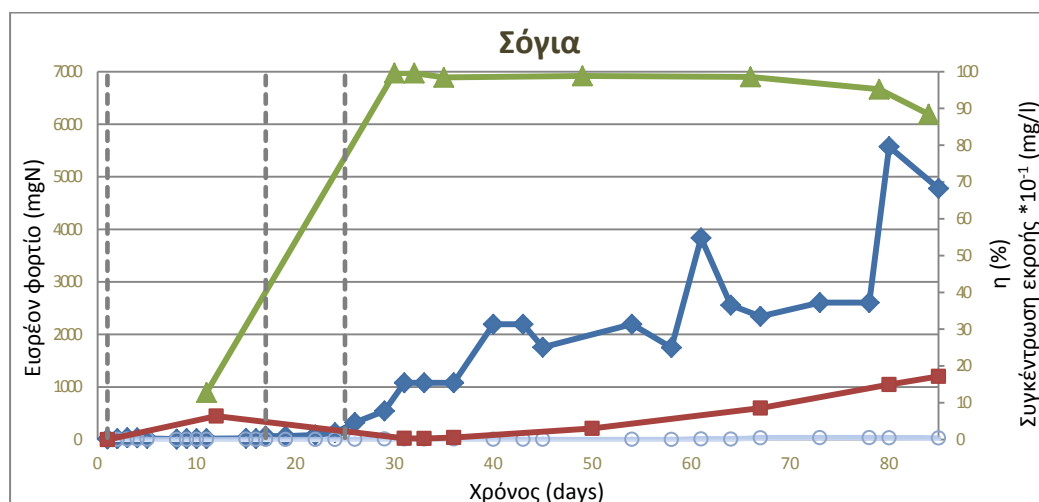
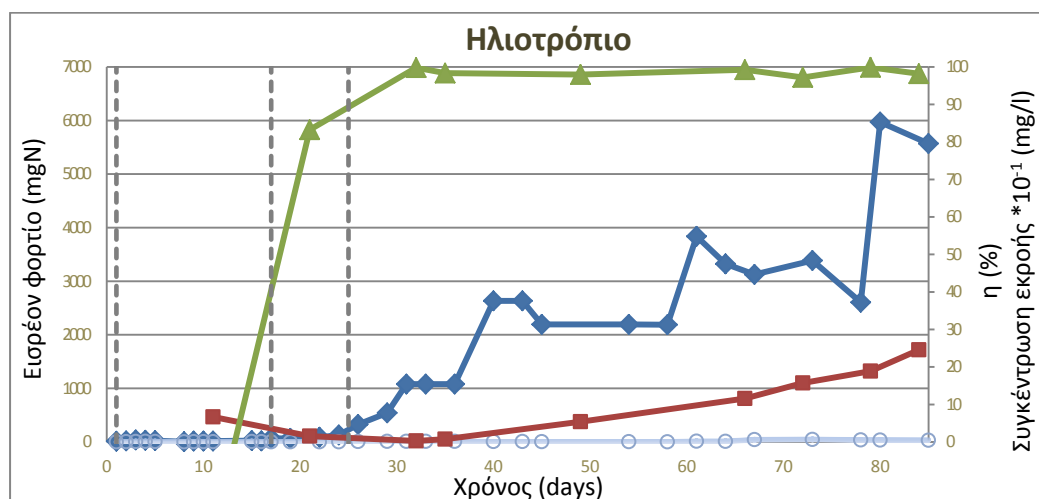
5.1.4 Άζωτο

Το άζωτο αποτελεί τον πιο περιοριστικό παράγοντα ανάμεσα στα θρεπτικά σχετικά με την ανάπτυξη των φυτών. Το άζωτο περιέχεται κυρίως στα ούρα, ενώ προέρχεται και από την αποδόμηση της οργανικής ύλης στο έδαφος. Στην Εικόνα 5.4 παρουσιάζονται τα διαγράμματα για τα εισερχόμενα φορτία TKN και NO_3^- για το διάστημα των 85 ημερών. Οι συγκεντρώσεις των εκροών έχουν πολλαπλασιαστεί με 10^{-1} προκειμένου να παρασταθούν στο σχετικό διάγραμμα.

Είναι εμφανές πως το άζωτο εισέρχεται κυρίως με τη μορφή του αμμωνίου, ενώ ελευθερώνεται στη συνέχεια από το φυτό ως νιτρικά (Glass et al., 2002). Η καμπύλη της απόδοσης ακολουθεί την ίδια μορφή και για τα τρία φυτικά είδη. Οι χαμηλές αποδόσεις που αποτυπώνονται κατά τις δύο πρώτες φάσεις του πειράματος δικαιολογούνται καθώς στην πρώτη φάση τα ποσά του αζώτου ήταν πολύ μικρότερα στο αρδευτικό μίγμα.

Από την 3^η φάση και έπειτα που έγινε η προσθήκη των ούρων σε αυτό, οι αποδόσεις εκτοξεύονται για τα φυτά ξεπερνώντας το 90%. Από εκείνο το σημείο και ύστερα παρατηρούμε πως τα φορτία TKN αυξάνονται ενώ οι τιμές του N-NO_3^- κινούνται σε σταθερά χαμηλά επίπεδα. Διακρίνουμε πως οι αυξομειώσεις της απόδοσης ακολουθούν τις αυξομειώσεις στα φορτία εισαγωγής.

Το ηλιοτρόπιο παρουσίασε τη μέγιστη συγκέντρωση εξόδου, η οποία ξεπέρασε τα 250 mg/l.. Αντίστοιχα, η ελαιοκράμβη παρουσίασε τη χαμηλότερη συγκέντρωση N στις εξόδους της σε σχέση με τα άλλα φυτά και πέτυχε τις μέγιστες απομακρύνσεις μετά την 3^η φάση. Σε γενικές γραμμές τα φυτά ανταποκρίθηκαν άμεσα στη φόρτιση με N σημειώνοντας μεγάλες αποδόσεις αν και θα λέγαμε πως η ελαιοκράμβη είναι το φυτό που φάνηκε να απομακρύνει αποτελεσματικότερα το άζωτο από το απόβλητο.



◆ Inflow load
 ■ Outflow concentration
 ▲ Removal efficiency

Εικόνα 5.4: Συνολικό εισρέον N (TKN και NO₃-), συγκέντρωση εκροής και ικανότητα απομάκρυνσης στο χρόνο.

5.1.5 Θεικά

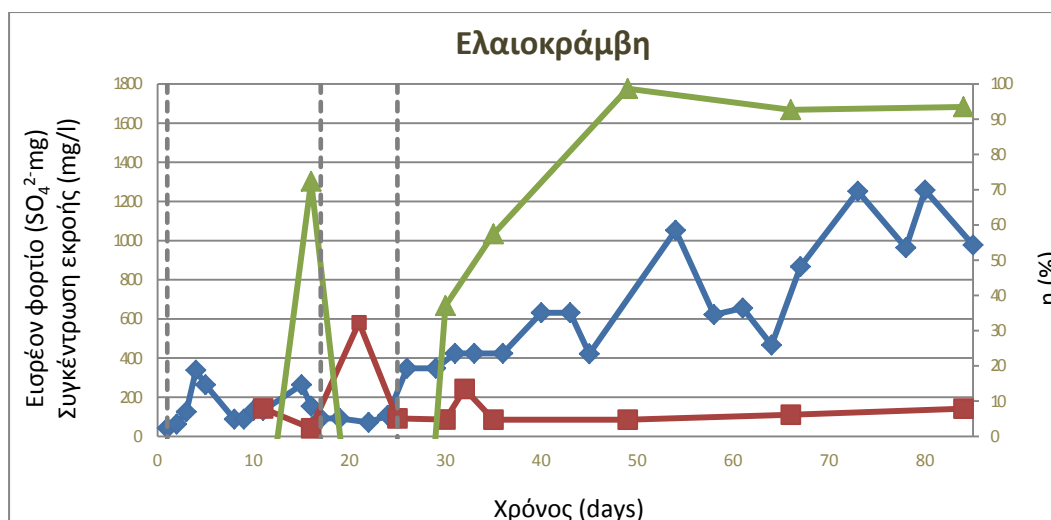
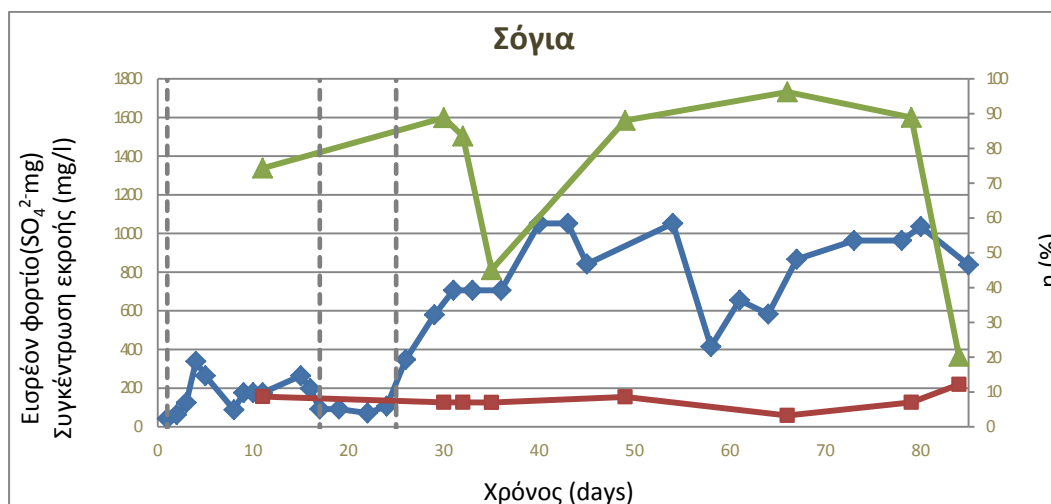
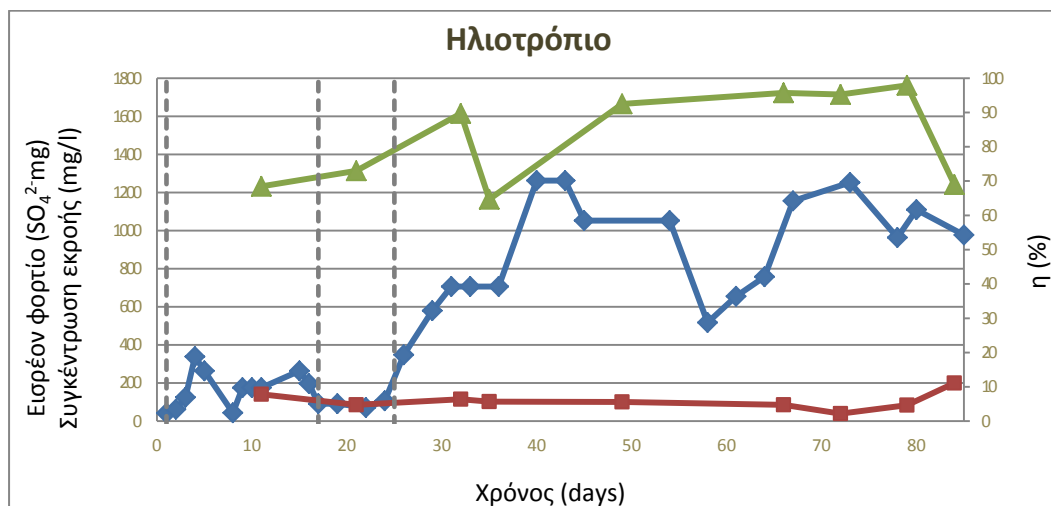
Στην Εικόνα 5.5 παρουσιάζονται τα διαγράμματα της συμπεριφοράς των φυτών όσον αφορούν στην επεξεργασία των θεικών που εισήλθαν διαμέσου του αποβλήτου. Η ύπαρξη SO_4^{2-} ευνοεί την ανάπτυξη των φυτών ιδιαιτέρως της ελαιοκράμβης.

Παρατηρούμε πως και σε αυτή την περίπτωση συμπίπτουν οι συμπεριφορές του ηλιοτροπίου και της σόγιας, τόσο στην ικανότητα απομάκρυνσης, όσο και στις συγκεντρώσεις που λαμβάνουμε από την έξοδο του αποβλήτου από τις γλάστρες. Αυτές κινούνται με μέγιστη τιμή τα 200 mg/l και φαίνονται ανεπηρέαστες από τις αυξομειώσεις του φορτίου κατά την πάροδο του χρόνου. Εντούτοις, μετά το πέρας της δεύτερης φάσης της άρδευσης, η απόδοσή τους πέφτει πρόσκαιρα. Το γεγονός αυτό οφείλεται στα μικρά εισερχόμενα φορτία το προηγούμενο διάστημα και στην απότομη αύξησή τους.

Η ελαιοκράμβη από την άλλη, παρουσιάζει αρκετά “άστατα” αποτελέσματα όσον αφορά τα θεικά. Μια σχετική σταθερότητα επιτυγχάνεται μόνο μετά την έναρξη της 3^{ης} περιόδου, οπότε και αυξάνεται το εισερχόμενο φορτίο.

Η ελαιοκράμβη στη συνέχεια αυξάνει συνεχώς την απόδοσή της ως προς την απομάκρυνση των θεικών και λαμβάνει τη μέγιστη τιμή με το πέρας του πειράματος. Η αντίδραση της ελαιοκράμβης στα εισερχόμενα φορτία θεικών κατά τις δύο πρώτες φάσεις του πειράματος μπορεί εύκολα να εξηγηθεί από την καθυστέρηση του φυτού να προσαρμοστεί στις υποβαλλόμενες συνθήκες και λόγω της υποτονικής συμπεριφοράς της κατά τις πρώτες δύο εβδομάδες της αρδευτικής διαδικασίας. Η ύπαρξη θεικών θεωρείται μέγιστης σημασίας για τα πρώτα στάδια της ανάπτυξης του συγκεκριμένου φυτού και πιθανώς επηρέασε την ανάπτυξη και σε αυτή την περίπτωση. Σε κάθε περίπτωση, προοδευτικά και αναπτυσσόμενη, η ελαιοκράμβη παρουσιάζεται ικανότερη των άλλων ειδών ως προς την επεξεργασία των θεικών. Επιπρόσθετα, οι συγκεντρώσεις του αποβλήτου στις εκροές της ελαιοκράμβης είναι χαμηλότερες των άλλων.

Λόγω των αποκλίσεων που παρουσιάζονται στα αποτελέσματα και των τριών φυτικών ειδών, υπάρχει σχετική αδυναμία στον χαρακτηρισμό του ικανότερου να απομακρύνει το συγκεκριμένο ρύπο.



◆ Inflow load
 ■ Outflow concentration
 ▲ Removal efficiency

Εικόνα 5.5: Εισρέοντα SO_4^{2-} , συγκέντρωση εκροής και ικανότητα απομάκρυνσης στο χρόνο.

5.1.6 Χλωριόντα

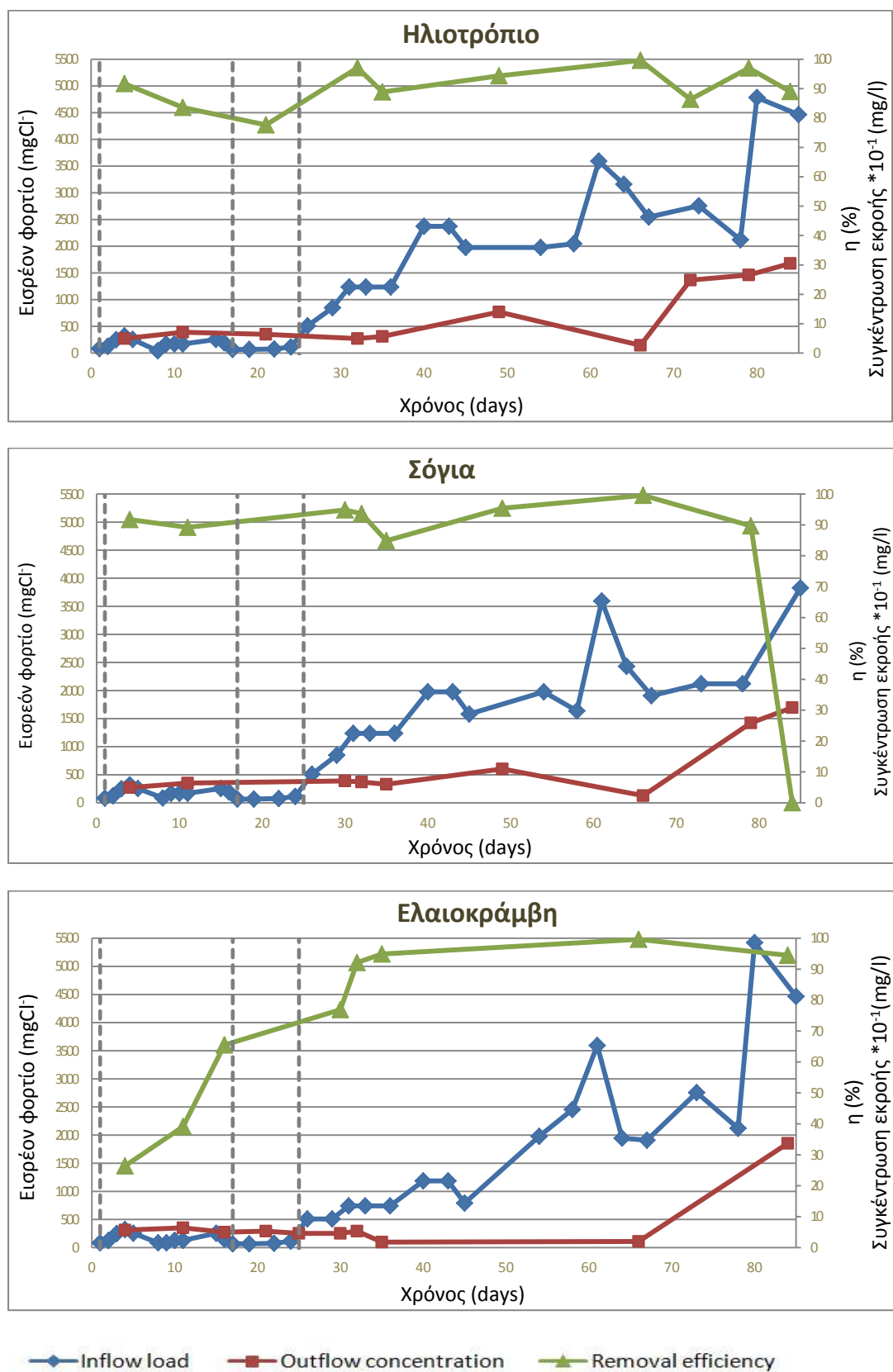
Στην Εικόνα 5.6 παρουσιάζονται τα διαγράμματα του εισερχόμενου φορτίου σε ιόντα χλωρίου, της συγκέντρωσης στα διηθήματα των φυτών και συνεκδοχικά της ικανότητας απομάκρυνσής του από το ηλιοτρόπιο, τη σόγια και την ελαιοκράμβη. Οι συγκεντρώσεις των εκροών παρουσιάζονται πολλαπλασιασμένες με 10^{-1} ώστε να μπορέσουν να αποτυπωθούν στο συγκριτικό διάγραμμα. Τα τρία φυτά παρουσιάζουν ορισμένες διαφοροποιήσεις στις καμπύλες τους, καταφέροντας ωστόσο να κινούνται στα ίδια επίπεδα.

Συγκεκριμένα, το ηλιοτρόπιο είναι το φυτό το οποίο φαίνεται να ανταπεξέρχεται καλύτερα στην απομάκρυνση του συγκεκριμένου ρύπου, σημειώνοντας μεγαλύτερες και πιο σταθερές αποδόσεις κατά την 3^η φάση της άρδευσης. Πρόκειται για απομάκρυνση της τάξης 80 - 100% με πολλές όμως αυξομειώσεις. Η συγκέντρωση στο διήθημα είναι χαμηλή ενώ τις τελευταίες μέρες αυξάνεται με μέγιστη τιμή τα 300 mg/l.

Η σόγια ακολουθεί αντίστοιχη συμπεριφορά με αυτή του ηλιοτροπίου, παρουσιάζοντας όμως αδικαιολόγητα απότομη πτώση της απόδοσής της τις τελευταίες μέρες του πειράματος. Παρατηρώντας πως κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει για τα υπόλοιπα φυτά, η συγκεκριμένη μέτρηση θεωρείται αβάσιμη και δεν μπορούμε να την χρησιμοποιήσουμε για να αποφανθούμε για τη συμπεριφορά του φυτού εν γένει. Η μέγιστη συγκέντρωση στην έξοδό της είναι 300 mg/l.

Το διάγραμμα της ελαιοκράμβης κινείται στο ίδιο μοτίβο με αυτό για τους υπόλοιπους ρύπους: χαμηλά επίπεδα απομάκρυνσης κατά τις δύο πρώτες φάσεις και στη συνέχεια ανάκαμψη με αποδόσεις υψηλότερες των υπόλοιπων φυτών, οι οποίες μειώνονται ελαφρά προς το τέλος της διαδικασίας. Παρέχει τη μεγαλύτερη συγκέντρωση στις εκροές της κοντά στα 350 mg/l.

Οι αυξημένες συγκεντρώσεις σε χλωριόντα στις εκροές και των τριών φυτών αποτελούν ένδειξη της αδυναμίας τους να μεταβολίσουν υψηλά φορτία τουλάχιστον έπειτα από το δεδομένο χρόνο ζωής και την ανάπτυξη που σημείωσαν σε αυτόν.



Εικόνα 5.6: Εισρέοντα Cl⁻, συγκέντρωση εκροής και ικανότητα απομάκρυνσης στο χρόνο.

5.2 Ανάπτυξη Φυτών

Η ανάπτυξη των φυτών εκτιμήθηκε υπολογίζοντας τη συνολική ξηρή μάζα των φυτών και των ριζών τους σε gr TS ανά μονάδα επιφάνειας (t/ha_{DRY}), το μήκος των κυρίως ριζών (cm) και το βάρος των ριζών ως gr TS ανά μονάδα επιφάνειας (t/ha_{DRY}), αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1. Τα αποτελέσματα αφορούν το σύνολο των επιμέρους φυτών ανά είδος και επομένως αποτελούν αθροίσματα..

Η κεντρική ρίζα κάθε φυτού, είναι χαρακτηριστικής σημασίας καθώς είναι αυτή που ξεκινάει από τη βάση του βλαστού και αναπτύσσεται κατακόρυφα μέσα στο έδαφος. Κύριος ρόλος της κεντρικής ρίζας είναι να μεταφέρει τις θρεπτικές ουσίες στο εναέριο τμήμα του φυτού αλλά και να του προσδίδει σταθερότητα. Οι πλευρικές ή δευτερεύουσες ρίζες αναπτύσσονται οριζόντια με αφετηρία την κεντρική ρίζα με αποτέλεσμα το φυτό να σταθεροποιείται μέσα στο έδαφος. Αυτή η διακλάδωση των ριζών συνεισφέρει στην πρόσληψη νερού και την εξαγωγή θρεπτικών απαραίτητων για την ανάπτυξη του φυτού.

Πίνακας 5.1 Ανάλυση της ανάπτυξης των πειραματικών φυτών

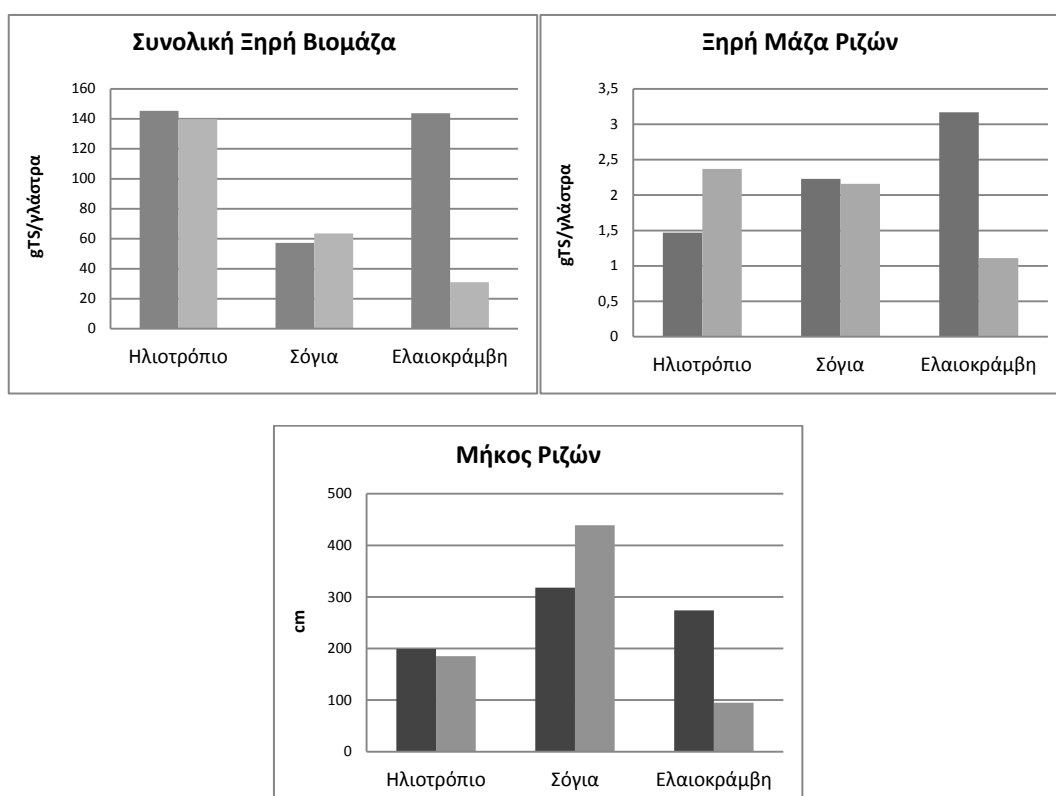
Ανάλυση Ανάπτυξης Φυτών			
Είδος Φυτού	Συνολική Βιομάζα (t/ha_{DRY})	Μάζα Ριζών (t/ha_{DRY})	Μήκος Κυρίως Ριζών (cm)
Ηλιοτρόπιο	2.39	0.02	79
Σόγια	0.94	0.04	178
Ελαιοκράμβη	2.36	0.05	219

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.1, παρατηρούμε πως το ηλιοτρόπιο και η ελαιοκράμβη έχουν επιτύχει ίδια επίπεδα συνολικής βιομάζας, σε αντίθεση με τη σόγια που έχει αποκτήσει 2,5 φορές χαμηλότερη. Εντούτοις, το ριζικό σύστημα της σόγιας εμφανίζεται πιο ανεπτυγμένο από αυτό του ηλιοτροπίου τόσο σε μήκος όσο και σε βάρος. Ωστόσο, μεγαλύτερες σε μάζα και μήκος ρίζες έχει σχηματίσει η ελαιοκράμβη.

Μπορεί να παρατηρηθεί διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων μεταξύ των ειδών, αλλά και στις διαφορετικές περιπτώσεις πρόσληψης θρεπτικών. Εντούτοις, το ηλιοτρόπιο φαίνεται

να επηρεάζεται λιγότερο από τα άλλα δύο είδη από αυτή τη μεταβολή. Αντιθέτως, στην περίπτωση της ελαιοκράμβης, η μάζα που αποκτείται από τα πειραματικά φυτά είναι σχεδόν πέντε φορές μεγαλύτερη.

Η σύγκριση της ανάπτυξης της βιομάζας των φυτών με εκείνη των αντίστοιχων μαρτύρων μας προσφέρει ένδειξη και για την απόδοση του κάθε είδους σε σχέση με τα επιπλέον θρεπτικά που έλαβε μέσω του αποβλήτου. Αυτό έγινε δια μέσου των λόγων των δύο τύπων φυτών ως προς την ολική τους μάζα, τη ριζική μάζα και το μήκος του συνόλου των ριζών. Η γνώση του μεγέθους και του εύρους των ριζών μέσα στο χώμα μας παρέχει μια ένδειξη της ικανότητας που έχει κάθε φυτό στην φυτοεξυγίανση. Στον Πίνακα 5.2 εμφανίζονται οι λόγοι της βιομάζας των φυτών ως προς αυτή των μαρτύρων τους, ενώ στην Εικόνα 5.7 παρουσιάζεται σχηματικά η σύγκριση των φυτών με τους μάρτυρές τους ως προς τη συνολική ξηρή βιομάζα, την ξηρή μάζα των ριζών και το μήκος των ριζών τους. Οι στήλες που προηγούνται αναφέρονται στα φυτά που αρδεύτηκαν με απόβλητο, ενώ εκείνες που ακολουθούν στους μάρτυρες, οι οποίοι αρδεύτηκαν με νερό βρύσης.



Εικόνα 5.7. Συνολική ξηρή βιομάζα, ξηρή μάζα ριζών και μήκος ριζών των φυτών ως προς τους μάρτυρές τους.

Βάσει του Πίνακα 5.2 που ακολουθεί, το ηλιοτρόπιο σημείωσε ελαφρώς μεγαλύτερη ανάπτυξη σε σχέση με τον μάρτυρά του όσον αφορά τη συνολική βιομάζα. Το μήκος των ριζών του είναι αυξημένο σε σχέση με του μάρτυρα, αλλά παρουσιάζει αξιοσημείωτα μικρότερη μάζα στις ρίζες του. Αυτό σημαίνει πως οι ρίζες αναπτύχθηκαν αρκετά καλά παρόλο που υστερούν σε μάζα. Συγκεκριμένα το φυτό παρουσιάζει τουλάχιστον μιάμιση φορά μικρότερη μάζα από αυτή του αντίστοιχου μάρτυρα. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα πως αντίστοιχο ποσό επιπλέον βιομάζας κέρδισε το άνω μέρος του φυτού.

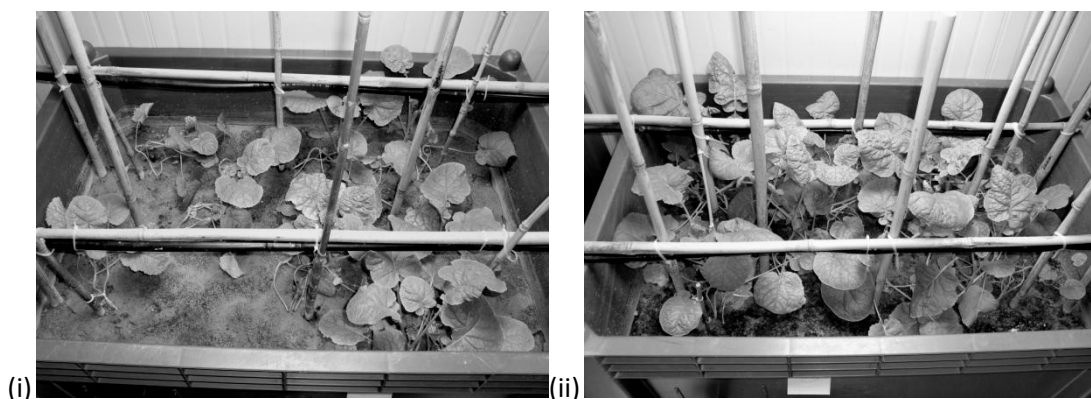
Η σόγια παρουσίασε μικρότερη ολική μάζα, αν και στην πραγματικότητα η διαφορά αυτή είναι μικρή, δεδομένου πως και η μάζα των ριζών της κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα με αυτή του μάρτυρα. Αισθητά μικρότερο είναι ωστόσο το μήκος των ριζών. Συμπερασματικά, ενισχύεται η άποψη πως η βιομάζα δεν έχει επηρεαστεί ιδιαίτερα, αλλά οι ρίζες έχουν περιορισμένη ανάπτυξη ως προς το μήκος τους.

Πίνακας 5.2 Λόγος της ανάπτυξης των πειραματικών φυτών προς τους μάρτυρες (%).

Είδος Φυτού	Πειραματικά φυτά / Μάρτυρες (%)		
	Ανάπτυξη Συνολικής Βιομάζας	Ανάπτυξη Ριζών	
		Μάζα	Μήκος
Ηλιοτρόπιο	104	62	122
Σόγια	90	103	60
Ελαιοκράμβη	463	286	292

Η ελαιοκράμβη παρουσίασε τα πιο ευδιάκριτα αποτελέσματα όσον αφορά το προφίλ της αντίδρασής της στο απόβλητο. Η συνολική ανάπτυξη της βιομάζας της ξεπέρασε τουλάχιστον τέσσερις φορές αυτή του μάρτυρά της, ενώ και το ριζικό της σύστημα βρέθηκε σχεδόν τρεις φορές πιο μεγάλο από αυτό του μάρτυρα τόσο σε μάζα όσο και σε μήκος. Ως εκ τούτου παρατηρούμε μία αρμονική ανάπτυξη των ριζών που αναλογικά συνάδει με αυτή του μάρτυρα.

Συγκρίνοντας την ανάπτυξη της βιομάζας των διαφόρων ειδών μπορούμε να καταλήξουμε πως περισσότερο από τα άλλα εκμεταλλεύτηκε τα θρεπτικά που της αρδεύτηκαν η ελαιοκράμβη, σημειώνοντας μεγάλη απόδοση έναντι της σόγιας και του ηλιοτροπίου. Αξίζει να σημειωθεί πως ενώ τις πρώτες εβδομάδες του πειράματος φαινόταν να μειονεκτεί σε ανάπτυξη μάζας σε σχέση με τη σόγια και το ηλιοτρόπιο και να μην ανταποκρίνεται στα θρεπτικά, στη συνέχεια σημείωσε ταχεία ανάπτυξη σε σχέση με τα άλλα φυτά. Έπειτα από 50 μέρες πειραματικής διαδικασίας, προέκυψε ξεκάθαρα το προβάδισμα της ελαιοκράμβης έναντι στον μάρτυρά της (Εικόνα 5.8).



Εικόνα 5.8. Ελαιοκράμβη έπειτα από 50 ημέρες, (i) με λήψη νερού και (ii) λήψη αποβλήτου.

5.3 Ισοζύγιο Μάζας Αζώτου και Φωσφόρου

Το ισοζύγιο της μάζας για τα θρεπτικά πραγματοποιήθηκε για τα πειραματικά φυτά, δηλαδή τα φυτά που αρδεύτηκαν με το μίγμα του αποβλήτου. Το ισοζύγιο προκύπτει από το σύνολο των εισροών και των εκροών του αζώτου και του φωσφόρου για τις γλάστρες. Συγκεκριμένα, οι εισροές προέρχονται από τη μάζα των θρεπτικών που υπήρχε αρχικά στο χώμα και το εισερχόμενο ολικό φορτίο μέσω της άρδευσης, ενώ οι εκροές αποτελούνται από τη μάζα των θρεπτικών που υπολογίστηκαν στο σύνολο των εκροών, στον φυτικό ιστό και στο έδαφος που προέκυψε στο τέλος της διαδικασίας.

Ο Πίνακας 5.3 παρουσιάζει το ισοζύγιο της μάζας του N για κάθε φυτό συνυπολογίζοντας τις εισροές και εκροές μέσω του εδάφους και του αποβλήτου, καθώς και την αποκτηθείσα μάζα από το φυτό. Το συνολικό βάρος του αζώτου στο έδαφος κάθε μιας γλάστρας που αναγράφεται, είναι υπολογιζόμενου όγκου $0,14 \text{ m}^3$ και βάρους περίπου 300 kg. Οι τιμές που είναι σχετικές με το έδαφος αφορούν στο δείγμα επί ξηρού.

Ο Πίνακας που αφορά στο ισοζύγιο της μάζας του αζώτου για κάθε γλάστρα μας δείχνει πως το μεγαλύτερο μέρος του αζώτου παρέμεινε στο έδαφος αλλά και στο φυτό. Ένα πολύ μικρότερο μέρος του συνολικού φορτίου σε άζωτο εξήρθε μέσω των εκροών. Υψηλά ποσά αζώτου παρουσιάζουν εντέλει το ηλιοτρόπιο και η ελαιοκράμβη. Το φαινόμενο αυτό συνδέεται με το γεγονός πως τα φυτά αυτά αναπτύχθηκαν περισσότερο από τους μάρτυρές τους, ενώ η σόγια που απαιτεί λιγότερο άζωτο από τα άλλα, όχι. Ενώ το ηλιοτρόπιο κατάφερε να συγκρατήσει το μεγαλύτερο μέρος του αζώτου στο έδαφός της, η ελαιοκράμβη χρησιμοποίησε πολύ μεγαλύτερο μέρος του θρεπτικού στην ανάπτυξή της, γι αυτό και ένα αξιόλογο ποσό σε σχέση με το ολικό βρέθηκε στον φυτικό της ιστό.

Πίνακας 5.3: Ισοζύγιο μάζας αζώτου για κάθε φυτό.

ΤΝ (mg/γλάστρα)	Ηλιοτρόπιο		Σόγια		Ελαιοκράμβη	
	IN	OUT	IN	OUT	IN	OUT
Απόβλητο	44681	1275	39375	1375	38336	859
Έδαφος	82001	246087	82001	165656	82001	149062
Φυτό	-	8871	-	19839	-	63383
Σύνολο	126682	256234	121376	186869	120337	213304

Στον Πίνακα 5.4 παρουσιάζεται το ισοζύγιο της μάζας του συνολικού φωσφόρου που βρέθηκε σύμφωνα με τις αναλύσεις. Ο όγκος του χώματος που υπήρχε σε κάθε δοχείο ήταν 0,14 m³ περίπου και βάρους 300 kg. Οι τιμές που είναι σχετικές με το έδαφος αφορούν στο δείγμα επί ξηρού.

Πίνακας 5.4: Ισοζύγιο μάζας φωσφόρου για κάθε φυτό.

ΤΡ (mg/γλάστρα)	Ηλιοτρόπιο		Σόγια		Ελαιοκράμβη	
	IN	OUT	IN	OUT	IN	OUT
Απόβλητο	134	13	123	5	106	10
Έδαφος	108170	141295	108170	111760	108170	121843
Φυτό	-	4752	-	1214	-	7994
Σύνολο	108304	146060	108293	112979	108276	129847

Η περίπτωση του φωσφόρου είναι πιο ξεκάθαρη. Παρατηρούμε στον Πίνακα 5.4 πως το μεγαλύτερο ποσό του εισερχόμενου φωσφόρου από το απόβλητο παραμένει μεταξύ του εδάφους και του φυτικού ιστού. Τα ποσά του φωσφόρου που ελευθερώθηκαν στις εκροές είναι πολύ μικρά και συγκεκριμένα μικρότερα από τα τελικώς αναγραφόμενα που χρησιμεύουν μόνο ως προσέγγιση των οργάνων μέτρησης. Τα συνολικά ποσά φωσφόρου που εισήρθαν και εξήρθαν σε κάθε δοχείο συμπίπτουν σε τάξεις μεγέθους και σε κάθε περίπτωση η μάζα του φωσφόρου που έχει εξέρθει είναι μεγαλύτερη της εισερχόμενης σύμφωνα με τον πίνακα. Η μεγαλύτερη απόκλιση ανάμεσα στα υπολογισμένα εισερχόμενα και εξερχόμενα φορτία συμβαίνει στο ηλιοτρόπιο. Επίσης το χώμα του ηλιοτροπίου εμπλουτίστηκε περισσότερο από αυτό της σόγιας και της ελαιοκράμβης. Οι δύο τελευταίες εμφάνισαν παρόμοια ποσά του στοιχείου τόσο πριν, όσο και μετά. Το μεγαλύτερο ποσό φωσφόρου στον φυτικό ιστό της βρέθηκε να περιέχει η ελαιοκράμβη, διπλάσιο από αυτό του ηλιοτροπίου και τετραπλάσιο από το αντίστοιχο της σόγιας. Πρόκειται για αναμενόμενο φαινόμενο άλλωστε, καθώς είναι το μοναδικό φυτό που αύξησε τη βιομάζα του τόσο πολύ στο δεδομένο χρονικό διάστημα των 85 ημερών.

5.4 Σύγκριση Απόδοσης Φυτών

Και τα τρία φυτικά είδη καταφέρνουν να απομακρύνουν τους ρύπους σε ικανοποιητικά ποσοστά. Το ηλιοτρόπιο και η σόγια παρουσιάζουν το ίδιο επίπεδο αποτελεσματικότητας σε όλα τα θρεπτικά που κλήθηκαν να απομακρύνουν. Βέβαια, σαν φυτά έχουν πολύ πιο κοινά χαρακτηριστικά απ' ότι με την ελαιοκράμβη, ενώ απαιτούν και τα δύο όμοιες συνθήκες για να αναπτυχθούν.

Η ελαιοκράμβη απ' την άλλη, αποδεικνύεται ανεπαρκής να απομακρύνει τα θρεπτικά στις πρώτες περιόδους του πειράματος. Αν και δεν παρουσίασε σημάδια ανάπτυξης κατά τις δύο πρώτες εβδομάδες του πειράματος, σε αντίθεση με το ηλιοτρόπιο και την σόγια, εντούτοις, σημειώνει συνεχώς αύξηση της απομάκρυνσης το επόμενο χρονικό διάστημα με αποτέλεσμα την αυξημένη απόδοσή της. Δεδομένων των συγκεντρώσεων που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3, η ελαιοκράμβη συνολικά απελευθερώνει τις μικρότερες συγκεντρώσεις ρύπων και συνολικά παρουσιάζει τα καλύτερα αποτελέσματα και παράλληλα την μεγαλύτερη ανάπτυξη της μάζας ως προς το μάρτυρά της όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.7.

Το γεγονός της υπανάπτυξης της ελαιοκράμβης κατά την 1^η περίοδο σε συνάρτηση με την μικρή περίοδο της πειραματικής εφαρμογής καθώς και τις αραιές εκροές των αποβλήτων από τις γλάστρες μας οδηγούν στο συμπέρασμα πως αν είχαν χρησιμοποιηθεί πιο ώριμα ηλικιακά φυτά, ίσως τα αποτελέσματα να ήταν ενδεικτικότερα. Ιδιαίτερα η ελαιοκράμβη

χρειαζόταν να ωριμάσει για διπλάσιο χρόνο από το ηλιοτρόπιο και τη σόγια, προτού της παράσχουμε το απόβλητο.

Αξίζει να σημειωθεί πως εάν είχαν επιτευχθεί καλύτερες συνθήκες παροχής του αποβλήτου, θα υπήρχε καλύτερος έλεγχος της εξάτμισης του αποβλήτου στα δοχεία φύλαξης και συνεπώς μικρότερη αλλοίωσή τους έως να χρησιμοποιηθούν. Επίσης δύο εβδομάδες μετά την έναρξη της μελέτης, παρατηρήθηκε ελαττωματικός φωτισμός εξαιτίας της δυσλειτουργίας του χρονοδιακόπτη, γεγονός που θα μπορούσε να έχει επηρεάσει την ανάπτυξη των φυτών εκείνη την περίοδο.

Προτείνεται η μελλοντική διερεύνηση μη βρώσιμων φυτικών ειδών όπως ο μίσκανθος, που θα μπορούσαν να εξυγιάνουν οικιακά απόβλητα παρόμοιου τύπου με αντίστοιχες επιδόσεις όπως αυτές της ελαιοκράμβης, του ηλιοτροπίου και της σόγιας και στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή βιοεθανόλης. Κάτι τέτοιο θα ήταν πολύ ενδιαφέρον και θα αποτελούσε απάντηση και σε ηθικά ζητήματα που προκύπτουν από την εκμετάλλευση βρώσιμων ειδών και την εκτίναξη της αξίας τους όταν χρησιμοποιηθούν για μαζική παραγωγή βιομάζας. Επιπλέον, ενδιαφέρον θα είχε η καταγραφή αντίστοιχων μελετών που θα δοκιμάζουν την εξυγίανση του αποβλήτου μέσω συνδυασμού διαφορετικών φυτών για βέλτιστες αποδόσεις. Κάτι τέτοιο θα μας παρείχε πρόσθετες πληροφορίες ως προς τις δυνατότητες απομάκρυνσης των ρύπων λόγω της από κοινού επεξεργασία τους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Butler, David, Eran Friedler, και Kevin Gatt. 1995. 'Characterising the quantity and quality of domestic wastewater inflows'. *Water Science and Technology* 31 (7): 13–24. doi:10.1016/0273-1223(95)00318-H.
- Cossu, R., M Borin, και M.C. Lavagnolo. 2001. 'A new approach to intergrated wastewater and solid waste managment'. Στο , 5:237–246. Sardinia.
- Glass, Anthony D. M., Dev T. Britto, Brent N. Kaiser, James R. Kinghorn, Herbert J. Kronzucker, Anshuman Kumar, Mamoru Okamoto, κ.ά. 2002. 'The Regulation of Nitrate and Ammonium Transport Systems in Plants'. *Journal of Experimental Botany* 53 (370) (Απρίλιος 15): 855–864. doi:10.1093/jexbot/53.370.855.
- McCutcheon, Steven C., και Jerald L. Schnoor. 2003. *Phytoremediation: Transformation and Control of Contaminants*. 1ος έκδ. Wiley-Interscience.
- Miller, Amy E., William D. Bowman, και Katharine Nash Suding. 2007. 'PLANT UPTAKE OF INORGANIC AND ORGANIC NITROGEN: NEIGHBOR IDENTITY MATTERS'. *Ecology* 88 (7): 1832–1840. doi:10.1890/06-0946.1.
- Otte, Marinus, και Donna Jacob. 2006. 'Constructed Wetlands for Phytoremediation: Rhizofiltration, Phytostabilisation and Phytoextraction'. Στο *Phytoremediation Rhizoremediation*, επιμέλ. Martina Mackova, David Dowling, και Thomas Macek, 57–67. Springer Netherlands.
- Reed, Sherwood C., Ronald W. Crites, και E. Joe Middlebrooks. 1998. *Natural Systems for Waste Management and Treatment*. McGraw-Hill Prof Med/Tech.
- Stephenson, T., M. Pidou, B. Jefferson, P. Jeffrey, και F. A. Memon. 2007. 'Greywater recycling: treatment options and applications'. *Proceedings of the ICE - Engineering Sustainability* 160 (3) (Ιανουάριος 9): 119–131. doi:10.1680/ensu.2007.160.3.119.

- Tzanakakis, V.A., N.V. Paranychianakis, και A.N. Angelakis. 2009. 'Nutrient removal and biomass production in land treatment systems receiving domestic effluent'. *Ecological Engineering* 35 (10): 1485–1492. doi:10.1016/j.ecoleng.2009.06.009.
- Αγγελάκης, Α.Ν. 1994. 'Φυσικά Συστήματα Επεξεργασίας Αστικών Υγρών Αποβλήτων-Αρχές Σχεδιασμού και Λειτουργίας'. *Τεχνολογικά Χρονικά* 14 (4): 125–139.
- Γιδαράκος, Ε., και Μ. Αϊβαλιώτη. 2005. *Τεχνολογίες Αποκατάστασης Εδαφών*. ΖΥΓΟΣ.
- Πανώρας Α. και Ηλίας Κ., 1997. Αρδευση με αστικά επεξεργασμένα λύματα. Μια διεθνής πρακτική. *Γεωτεχνική Ενημέρωση*, 98: 45-48.