



Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας (ΣΘΕΤ)

Διαχείριση Αποβλήτων (ΔΙΑ)

Διπλωματική Εργασία

Διαχείριση στερεών και υγρών αποβλήτων θερμοκηπίου και
υδροπονικών καλλιιεργειών

Βασίλης Θωμόπουλος

Επιβλέπων καθηγητής: Πέτρος Κόκκινος

Πάτρα, Ιούνιος 2023

© Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, 2023

Η παρούσα Εργασία καθώς και τα αποτελέσματα αυτής, αποτελούν συνιδιοκτησία του ΕΑΠ και του φοιτητή, ο καθένας από τους οποίους έχει το δικαίωμα ανεξάρτητης χρήσης, αναπαραγωγής και αναδιανομής τους (στο σύνολο ή τμηματικά) για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, σε κάθε περίπτωση αναφέροντας τον τίτλο και το συγγραφέα της Εργασίας καθώς και το όνομα του ΕΑΠ όπου εκπονήθηκε.



Διαχείριση στερεών και υγρών αποβλήτων θερμοκηπίου και
υδροπονικών καλλιέργειών

Βασίλης Θωμόπουλος

Επιτροπή Επίβλεψης Πτυχιακής / Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:

Πέτρος Κόκκινος

Γεώργιος Κύζας

«Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΑΠ»

«Καθηγητής ΔΙ.ΠΑ.Ε, Μέλος ΣΕΠ ΕΑΠ»

Πάτρα, Ιούνιος 2023

Θέλω να εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς όλους όσους συνέβαλαν άμεσα ή έμμεσα στην επιτυχή ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας και, συνεπώς, των μεταπτυχιακών μου σπουδών.

Καταρχάς, επιθυμώ να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα μου, τον κ. Πέτρο Κόκκινο, Αναπληρωτή Καθηγητή του Ελληνικού Ανοικτού Πανεπιστημίου, για την υποστήριξη και την καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας. Επίσης, τον συνεπιβλέποντα κ. Γεώργιο Κύζα, Μέλος ΣΕΠ του Ελληνικού Ανοικτού Πανεπιστημίου.

Τέλος, δεν μπορώ παρά να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου προς την οικογένειά μου για την αγάπη, την κατανόηση και την αμέριστη υποστήριξή τους. Χωρίς την παρουσία και την συμπαράστασή τους, η ολοκλήρωση αυτής της εργασίας δεν θα ήταν εφικτή.

Περίληψη

Πολλά από τα απόβλητα θερμοκηπίων αντί να ρυπαίνουν το περιβάλλον, θα μπορούσαν μετά από κατάλληλη επεξεργασία να αποτελέσουν νέο οικονομικό πόρο. Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η βιβλιογραφική μελέτη της διαχείρισης των στερεών και υγρών αποβλήτων που προκύπτουν κατά την καλλιέργεια σε κλειστό θερμοκήπιο, καθώς και η διαχείριση των υποπροϊόντων και αποβλήτων από υδροπονικές καλλιέργειες. Θα εξεταστούν οι καινοτόμες τεχνολογίες στη διαχείριση των αποβλήτων (χρήση αισθητήρων, μοντέλων μηχανικής μάθησης, κ.α.). Μεταξύ άλλων, θα μελετηθούν:

- Η διαχείριση των στερεών αποβλήτων θερμοκηπίων (πλαστικά κάλυψης, φυτικό υλικό, κλπ.)
- Οι μέθοδοι αντιμετώπισης νιτρορύπανσης και υψηλής αλατότητας από τα υγρά απόβλητα θερμοκηπίων και
- Η διαχείριση της υψηλής συγκέντρωσης θρεπτικών συστατικών (Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} κ.α.) στα απόβλητα των υδροπονικών καλλιεργειών.

Λέξεις – Κλειδιά: απόβλητα θερμοκηπίου, στερεά απόβλητα θερμοκηπίου, υγρά απόβλητα θερμοκηπίου, νιτρορύπανση, αλατότητα, υδροπονία

Abstract

Much of the greenhouse waste, instead of polluting the environment, could, after proper treatment, become a new economic resource. The subject of this thesis is a literature study of the management of solid and liquid wastes generated during indoor greenhouse cultivation, as well as the management of by-products and wastes from hydroponic crops. Innovative technologies in waste management (use of sensors, machine learning models, etc.) will be considered, including:

- The management of greenhouse solid waste (cover plastics, plant material, etc.)
- Methods of dealing with nitrate pollution and high salinity from greenhouse liquid waste; and
- The management of high concentration of nutrients (Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} etc.) in hydroponic crop wastes.

Keywords: Greenhouse waste, greenhouse solid waste, greenhouse wastewater, nitrate pollution, salinity, hydroponics

Περιεχόμενα

Περίληψη	5
Abstract	6
Περιεχόμενα	7
Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων	9
1. Επισκόπηση της βιβλιογραφίας για στερεά απόβλητα θερμοκηπίων	1
Εισαγωγή	1
Ορισμός και πηγές στερεών αποβλήτων θερμοκηπίου	5
Περιβαλλοντικές επιπτώσεις των στερεών αποβλήτων θερμοκηπίου	11
Τεχνικές διαχείρισης απορριμμάτων για στερεά απόβλητα θερμοκηπίου	13
2. Επισκόπηση της βιβλιογραφίας για υγρά απόβλητα θερμοκηπίων	21
Επισκόπηση των διαφόρων πηγών υγρών αποβλήτων θερμοκηπίου	22
Περιβαλλοντικές επιπτώσεις των υγρών αποβλήτων θερμοκηπίου	25
Τεχνικές επεξεργασίας και διαχείρισης	27
3. Επισκόπηση της βιβλιογραφίας για απόβλητα υδροπονικών καλλιεργειών	36
Τύποι αποβλήτων υδροπονικών καλλιεργειών	37
Περιβαλλοντικές επιπτώσεις υδροπονικών αποβλήτων καλλιεργειών	39
Τεχνικές διαχείρισης αποβλήτων υδροπονικών καλλιεργειών	41
4. Αποτελέσματα και συζήτηση	49
Αποτελέσματα διαχείρισης στερεών αποβλήτων και συζήτηση	49
Αποτελέσματα διαχείρισης υγρών αποβλήτων και συζήτηση	50
Συγκριτική ανάλυση διαχείρισης στερεών και υγρών αποβλήτων	52
Νομοθετικό πλαίσιο για τη διαχείριση αποβλήτων θερμοκηπίου και υδροπονίας	52
Βέλτιστες πρακτικές για τη διαχείριση αποβλήτων θερμοκηπίων και υδροπονίας	54

Χρήση αισθητήρων στη διαχείριση αποβλήτων θερμοκηπίων και υδροπονίας	57
Ερευνητικά προγράμματα για τη διαχείριση αποβλήτων θερμοκηπίων και υδροπονίας	59
Προκλήσεις και μελλοντικές κατευθύνσεις έρευνας	61
Αποτελέσματα και συζήτηση: Διαχείριση απορριμμάτων υδροπονικών καλλιιεργειών	62
5. Συμπεράσματα - Προτάσεις	64
Περίληψη βασικών ευρημάτων	65
Προτάσεις για διαχείριση στερεών αποβλήτων	65
Προτάσεις για τη διαχείριση υγρών αποβλήτων	66
Ενοποίηση διαχείρισης στερεών και υγρών αποβλήτων	67
Συνεργασία, εκπαίδευση και πολιτικές παρεμβάσεις	68
Βιβλιογραφία	70

Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων

Εικόνα 1. Εξέλιξη παραγωγής ΓΚΤ έως το 2030 (πηγή: ΕΣΔΑ)	3
Εικόνα 2. Παραγωγή πλαστικών απορριμμάτων/υποπροϊόντων στην Almeria ανά τύπο πολυμερούς (Castillo-Díaz et.al., 2021)	6
Εικόνα 3. Ετήσια κατανομή απορριμμάτων στα θερμοκήπια της Αλμερία (Sayadi-Gmada et. al., 2019)	9
Εικόνα 4. Βιολογική επεξεργασία και αξιοποίηση φυτικών στερεών αποβλήτων θερμοκηπίου (Cheuk, 2003)	10
Εικόνα 5. Σχηματική επισκόπηση του κύκλου του νερού του θερμοκηπίου (Πηγή: Guidelines for Greenhouse Water - Grodan)	24
Εικόνα 6. (Συγκέντρωση διαφόρων μορφών αζώτου σε απόβλητα υδροπονίας, Bryszewski et.al., 2021)	38
Εικόνα 7. Σχηματική αναπαράσταση του σταθμού επεξεργασίας λυμάτων που κατασκευάστηκε στο Ομοσπονδιακό Πανεπιστήμιο του Σάο Κάρλος (UFSCar) (da Silva Cuba Carvalho et. al., 2018).....	42
Εικόνα 8. Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας απομάκρυνσης θρεπτικών συστατικών από τα φύκη (Πηγή: Kumar & Cho, 2014).....	45
Εικόνα 9. Προτεραιότητες στη διαχείριση αποβλήτων (Πηγή: EPA)	55

1. Επισκόπηση της βιβλιογραφίας για στερεά απόβλητα θερμοκηπίων

Εισαγωγή

Σημαντικό ρόλο στη διαχείριση των αποβλήτων των θερμοκηπίων κατέχουν τα στερεά απόβλητα, όπως εκείνα προκύπτουν από την εκμετάλλευση του θερμοκηπίου και συνιστούν σημαντική πρόκληση σχετικά με τον τρόπο διαχείρισής τους. Είναι γεγονός ότι η αγροτική βιομηχανία χρησιμοποιεί με την πάροδο του χρόνου περισσότερες μεθόδους καλλιέργειας, οι οποίες έχουν ως κέντρο τους τα θερμοκήπια. Αποτέλεσμα είναι να αυξάνεται συνεχώς και η παραγωγή στερεών αποβλήτων σε αυτά τα συστήματα, τα οποία με τη σειρά τους περιλαμβάνουν τύπους από διάφορες οργανικές και ανόργανες ενώσεις και υπολείμματα από φυτικά προϊόντα, καλλιέργειες, υλικά συσκευασίας και λοιπά απόβλητα θερμοκηπίων σε στερεή μορφή (Sayadi-Gmada et. al., 2019)

Επιπλέον, είναι κεντρικής σημασίας η διαχείριση των στερεών αποβλήτων που προκύπτουν από τα θερμοκήπια, καθώς η απουσία αποτελεσματικής αντιμετώπισης των στερεών αποβλήτων μπορεί να οδηγήσει σε μία σειρά από περιβαλλοντικά και οικονομικά προβλήματα. Στα προβλήματα αυτά συγκαταλέγεται η εδαφική υποβάθμιση, η ρύπανση των υδάτων, αλλά και η εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου, ενώ η ύπαρξη στερεών αποβλήτων στα θερμοκήπια δημιουργεί κατάλληλες συνθήκες για αναπαραγωγή παρασίτων και ανάπτυξη ασθενειών, γεγονός που επηρεάζει άμεσα την υγεία και την παραγωγικότητα των καλλιεργειών. (Duque-Acevedo et. al. 2020)

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η επισκόπηση του ζητήματος της διαχείρισης των στερεών αποβλήτων των θερμοκηπίων μέσα από βιβλιογραφική και ερευνητική επισκόπηση. Αφού συνοψιστεί η υπάρχουσα βιβλιογραφία, συζητείται η σημασία της σωστής διαχείρισης των στερεών αποβλήτων των θερμοκηπίων και αναδεικνύεται η σημασία και η αναγκαιότητα ανάπτυξης στρατηγικών που στοχεύουν στην αποτελεσματική τους διαχείριση.

Πιο συγκεκριμένα, ως στόχοι της διπλωματικής εργασίας ορίζονται οι εξής:

- Αξιολόγηση της σημασίας των στερεών αποβλήτων θερμοκηπίου, όπως ορίζεται από τη θερμοκηπιακή γεωργία. Με άξονα την ποσότητα και τα χαρακτηριστικά των

παραγόμενων στερεών αποβλήτων μπορεί να υπολογιστεί η κλίμακα της πρόκλησης διαχείρισης τους.

- Ανάδειξη της αναγκαιότητας αξιοποίησης αποτελεσματικών στρατηγικών διαχείρισης στερεών αποβλήτων θερμοκηπίου. Θα πρέπει να ανιχνευθούν οι πιθανές επιπτώσεις στην υγεία, οι οποίες κατά βάση συνδέονται με ανεπάρκεια στη διαχείριση αποβλήτων.
- Ανασκόπηση της υπάρχουσας έρευνας και βιβλιογραφίας που σχετίζεται με τα στερεά απόβλητα του θερμοκηπίου. Αφού μελετηθεί η βιβλιογραφία, θα προκύψουν τα κενά στους τρόπους διαχείρισης των στερεών αποβλήτων των θερμοκηπίων και θα προταθούν τομείς για περαιτέρω διερεύνηση.
- Επιπρόσθετα, η βιβλιογραφική επισκόπηση έχει ως στόχο να συμβάλει στην ανάδειξη της σημασίας της ανάπτυξης αποτελεσματικών στρατηγικών που αφορούν τη διαχείριση απορριμμάτων στερεών αποβλήτων του θερμοκηπίου. Τα ευρήματα που θα προκύψουν, πρόκειται να είναι βοηθητικά στο γενικότερο πλαίσιο ενημέρωσης των φορέων εκμετάλλευσης των θερμοκηπίων, εφαρμογής βιώσιμων πρακτικών για τη μείωση της παραγωγής αποβλήτων, προώθησης της ανακύκλωσης και τέλος επαναχρησιμοποίησης, με απώτερο σκοπό την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκύπτουν από την μη σωστή διαχείριση των στερεών αποβλήτων θερμοκηπίου.

Θα παρουσιαστούν διαφορετικές πτυχές για τη διαχείριση και αντιμετώπιση των στερεών αποβλήτων θερμοκηπίου. Σε αυτές περιλαμβάνονται ο τρόπος με τον οποίο διατίθενται τα απόβλητα, οι επιπτώσεις που έχουν στο περιβάλλον, οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται, αλλά και οι προσεγγίσεις που υπάρχουν και αφορούν τη διαχείρισή τους. Η εμπειριστατωμένη βιβλιογραφική επισκόπηση έχει στόχο την απόκτηση μιας σφαιρικής αντίληψης για το ζήτημα της διαχείρισης των αποβλήτων και τη σταδιακή συμβολή της προώθησης των πρακτικών βιώσιμης καλλιέργειας θερμοκηπίου.

	2018	2020	2025	2030
Υπολείμματα καλλιεργειών (t)	2.297.336	2.200.526	2.418.190	2.528.985
Αποσυρόμενα φρούτα και λαχανικά (t)	129.138	123.696	135.931	142.159
Απόβλητα κτηνοτροφικής εκμετάλλευσης (t)	10.033.312	9.610.508	10.561.127	11.045.010
Συσκευασίες φυτοπροστατευτικών (t)	800	800	879	919
Πλαστικά γεωργίας (t)	8.500	8.500	9.341	9.769
Συνολική παραγωγή ΓΚΤ (t)	12.469.086	11.944.030	13.125.468	13.726.842

Εικόνα 1. Εξέλιξη παραγωγής ΓΚΤ έως το 2030 (πηγή: ΕΣΔΑ).

Μέχρι το 2050, η βασική πρόκληση για την οικονομία σε παγκόσμια κλίμακα θα είναι ενδεχομένως πώς θα τροφοδοτήσει έναν ολοένα αυξανόμενο πληθυσμό, χρησιμοποιώντας λιγότερες εισροές και υψηλότερη αποδοτικότητα των πόρων. Υπό αυτό το πρίσμα, τα περιβαλλοντικά προβλήματα, μερικά από αυτά παγκόσμιας εμβέλειας, όπως η βιοποικιλότητα, η ρύπανση του εδάφους και των υδάτων και η υπερεκμετάλλευση των πόρων, ελλοχεύουν κινδύνους για τα παγκόσμια οικολογικά συστήματα. Για να διαχειριστούν και να ξεπεραστούν αυτά τα περιβαλλοντικά προβλήματα, καθώς και άλλα κοινωνικού ή οικονομικού τύπου, η έννοια της Κυκλικής Οικονομίας (Circular Economy- CE) έχει αποκτήσει ιδιαίτερο βάρος. Περισσότεροι από 100 ορισμοί έχουν προταθεί για αυτή την έννοια. Ένα οικονομικό σύστημα που στηρίζεται στην κυκλικότητα επιζητά τον επαναπροσδιορισμό της ανάπτυξης, εστιάζοντας σε θετικά οφέλη σε ολόκληρη την κοινωνία ώστε να αποσυνδεθεί η οικονομική δραστηριότητα από την κατανάλωση μη ανανεώσιμων πόρων.

Σύμφωνα με το Ίδρυμα Ellen MacArthur (Ellen MacArthur, 2019), το κυκλικό μοντέλο βασίζεται σε τρεις βασικές αρχές:

- (i) στο σχεδιασμό των αποβλήτων και της ρύπανσης.
- (ii) στη διατήρηση των προϊόντων και των υλικών σε χρήση· και
- (iii) στην αναγέννηση φυσικών συστημάτων.

Επιπροσθέτως, η έννοια αυτή συνδέεται άρρηκτα με αυτή της Βιοοικονομίας, η οποία, σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Επιτροπή (2012) ορίζεται ως «η παραγωγή ανανεώσιμων βιολογικών πόρων και η μετατροπή αυτών των πόρων και των ροών αποβλήτων σε προϊόντα προστιθέμενης αξίας, όπως π.χ. τρόφιμα, ζωοτροφές, προϊόντα βιολογικής βάσης και βιοενέργεια». Κατά συνέπεια, η CE είναι μια ευρύτερη έννοια, καθώς περιλαμβάνει όχι μόνο βιολογικούς πόρους, αλλά είναι ουσιαστικά ένα οικονομικό σύστημα το οποίο αντικαθιστά την έννοια του «τέλους ζωής» με την αποκατάσταση, προωθώντας τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, καταργώντας τη χρήση τοξικών χημικών ουσιών και στοχεύοντας στην εξάλειψη των απορριμμάτων με βελτιωμένο σχεδιασμό υλικών, προϊόντων, συστημάτων και επιχειρηματικών μοντέλων.

Σε γενικές γραμμές, τα υλικά που εξορύσσονται αξιοποιούνται για την παραγωγή υπηρεσιών ή προϊόντων. Τα παραπάνω είδη πωλούνται σε καταναλωτές που αργότερα τα αποβάλλουν (συμπεριλαμβανομένων των απορριμμάτων και των υπολειμμάτων). Κατά μήκος της εφοδιαστικής αλυσίδας, παράγονται απόβλητα και ρύποι με ορισμένους από αυτούς να έχουν δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης ή ανακύκλωσης. Ωστόσο, τις περισσότερες φορές χάνονται, κυρίως στις χωματερές. Έχει αποδειχθεί λοιπόν ότι αυτό το σύστημα παρεμποδίζει την ικανότητα του πλανήτη μας να αναγεννηθεί. Ως εκ τούτου, είναι επιτακτική ανάγκη ένα βιώσιμο οικονομικό σύστημα να προσπαθήσει να μιμηθεί τις φυσικές ροές της βίωσης. Υπό αυτή τη σκοπιά, τα υλικά στους φυσικούς κύκλους κινούνται αδιάκοπα ακολουθώντας κυκλικές ροές ύλης και ενέργειας, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η έννοια των «αποβλήτων». Πράγματι, οι διαδικασίες είναι «κυκλικές». Συνεπώς, η κυκλική οικονομία αντικαθιστά την έννοια των παραδοσιακών γραμμικών αλυσίδων εφοδιασμού με τη χρήση πολύπλοκων δικτύων στα οποία τα υλικά ανακυκλώνονται και η λέξη “απόβλητα” χάνει το κοινό της νόημα ως δυνητικό τρόφιμο ή προϊόν. Έχοντας λοιπόν ως άξονα την έννοια της κυκλικής οικονομίας, πλήθος διαδικασιών μπορεί να μετατρέψει τα απόβλητα σε προϊόντα υψηλότερης αξίας ή ακόμη και σε εισροές για άλλη παραγωγή αλυσίδας αξίας. (Yelboğa, 2022)

Εντούτοις, για να γίνει εφικτή αυτή η στροφή προς τα βιώσιμα συστήματα, απαιτούνται ακόμη αρκετές προκλήσεις ορισμένες από τις οποίες σχετίζονται με την κοινωνία και ειδικότερα με τη συμπεριφορά των καταναλωτών. Σε μια «γραμμική οικονομία» οι καταναλωτές είναι το τελευταίο «βήμα» των αλυσίδων εφοδιασμού. Σε αυτό το σημείο, συχνά έχουν συμπεριφορά παθητική και δεν προβληματίζονται για τη συλλογή των απορριμμάτων

και τη διαχείρισή τους από τους μεσάζοντες μέχρι τους λιανοπωλητές. Η κοινωνία στο σύνολό της οφείλει να αποκτήσει εξοικείωση με τους στόχους και τις αρχές της κυκλικής οικονομίας. Στην πραγματικότητα, υπάρχει επί του παρόντος μια αυξανόμενη ανησυχία για τον αντίκτυπο της γεωργίας στο περιβάλλον, τη δημιουργία αποβλήτων και το οπτικό τοπίο. Συνεπώς, όλοι οι καταναλωτές ως ενεργά μέλη της κοινωνίας πρέπει να συμμετέχουν στην υλοποίηση ενός ολοκληρωμένου συστήματος κυκλικής οικονομίας. (Ayati et. al., 2022)

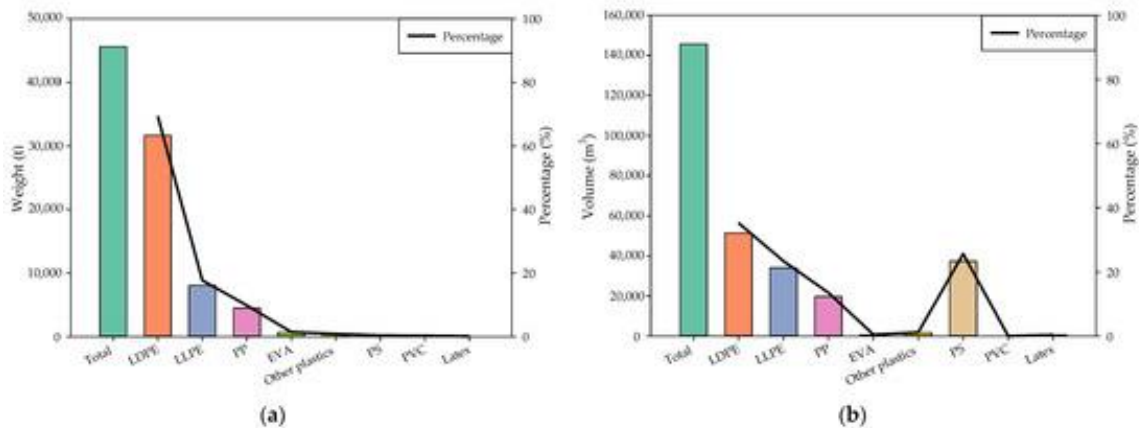
Ορισμός και πηγές στερεών αποβλήτων θερμοκηπίου

Ως στερεά απόβλητα θερμοκηπίου ορίζονται οι διάφοροι παραγόμενοι κατά τις εργασίες θερμοκηπίου τύποι στερεών υλικών, που απαιτούν κατάλληλη διαχείριση για την απόρριψή τους. Στην κατηγορία αυτή, περιλαμβάνεται ένα ευρύ φάσμα από οργανικά και ανόργανα υλικά, όπως είναι λόγω χάριν φυτικά υπολείμματα, υπολείμματα από τις καλλιέργειες, υλικά που σχετίζονται με τη συσκευασία, το πλαστικό και το ξύλο, καθώς και άλλα απορριπτόμενα στερεά αντικείμενα. (Adejumo and Adebisi, 2021)

Ο τρόπος με τον οποίο συντίθενται τα στερεά απόβλητα, εξαρτάται από τις διαφορετικές εργασίες θερμοκηπίου, τις πρακτικές καλλιέργειας και τους τύπους καλλιέργειας. Για το λόγο αυτό, είναι βαρύνουσας σημασίας να αναδειχθεί ότι τα στερεά απόβλητα είναι διαφορετικού τύπου απόβλητα από τα υγρά και τα αέρια και επομένως χρήζουν διαφορετικής προσέγγισης στον τρόπο διαχείρισής τους. (Cheuk, 2003)

Οι κύριοι τύποι ανόργανων αποβλήτων που παράγονται σε θερμοκήπια είναι οι εξής (Sayadi-Gmada, S et. al. 2019):

- Υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή, συντήρηση και αναμόρφωση θερμοκηπίων. Αυτά τα υλικά είναι κυρίως προκατασκευές από σκυρόδεμα, σύρματα, πλαστικά στοιχεία, αγροτικά υφάσματα και στοιχεία αρδευτικών συστημάτων. Τα υλικά που αξιοποιούνται στην κατασκευή τα διαχειρίζεται ο κατασκευαστής. Η αντικατάσταση στοιχείων καλύμματος και κλεισίματος (πλαστικό, σύρματα, πλέγματα) πραγματοποιείται από επαγγελματικό προσωπικό. Ο όγκος των πλαστικών αποβλήτων συλλέγεται χωριστά από σύρματα, χαρτόνια ή πλέγματα τα οποία διαχειρίζονται, χωρίς δυσκολία οι παραγωγοί. (Afxentiou et. al., 2021, Hiskakis et. al. 2008, Vox et. al., 2016)



Εικόνα 2 Παραγωγή πλαστικών απορριμμάτων/υποπροϊόντων στην Almeria ανά τύπο πολυμερούς (Castillo-Díaz et.al., 2021).

- Υλικά για φυσική και χημική προστασία. Κυρίως, προκύπτουν από τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την προστασία της καλλιέργειας, όπως οι σωληνώσεις, τα υλικά εδαφοκάλυψης (mulching), οι θερμοκουρτίνες σε συνδυασμό με το πλαστικό που χρησιμοποιείται για την ηλιοαπολύμανση. Τα απόβλητα αυτά παράγονται και συσσωρεύονται όταν οι καλλιέργειες αντικαθίστανται από άλλες, ειδικά την καλοκαιρινή περίοδο. Τα πλαστικά φορτώνονται σε οχήματα για την αποστολή τους στο πλησιέστερο κέντρο διαχείρισης ή συγκεντρώνονται σε μη παραγωγικούς χώρους μέχρι να μεταφερθούν σε χώρους υγειονομικής ταφής. (Yang et. al., 2017, Nanna et. al. 2017)
- Υλικά που χρησιμοποιούνται στην εφαρμογή της καλλιέργειας. Σε αυτή την ενότητα τα υλικά μεταμόσχευσης που περιέχονται από φυτά που παράγονται σε φυτώρια περιλαμβάνουν:
 - Δίσκους, οι οποίοι συνήθως επιστρέφονται.
 - Καλύμματα, συνήθως μιας χρήσης.
 - Στοιχεία που χρησιμοποιούνται για τη στήριξη φυτών (πάσσαλοι, κλιπς και γάντζοι).
 - Συσκευασίες που περιέχουν λιπάσματα (πλαστικοί σάκοι, χαρτόκουτα, πλαστικές σακούλες και συσκευασίες που κυμαίνονται από 25 gr έως 1000 L).
 - Φυτοπροστατευτικά προϊόντα (χάρτινοι σάκοι, πλαστικές σακούλες σε χάρτινα κουτιά, πλαστικά μπουκάλια που κυμαίνονται από 0,25 έως 25 L) και καταπολέμηση εντόμων (χάρτινα κουτιά, κάρτες, φάκελοι βιοεργοστασίων, χαρτόνι και πλαστικές συσκευασίες που κυμαίνονται από 0,25 έως 1 L).

- Άλλου τύπου στερεά απόβλητα παραγόμενα σε εργασίες θερμοκηπίου, όπως λόγου χάριν δίσκοι, απορριπτόμενα δοχεία, υλικά άρδευσης, φυτοφάρμακα, λιπάσματα, ακόμα και εξαρτήματα εξοπλισμού. Τα αντικείμενα αυτά, είναι πιθανό να είναι παρωχημένα, γεγονός που καθιστά αδύνατη την εκ νέου χρήση τους και επομένως θα πρέπει να διατεθούν ως στερεά απόβλητα.
- Υλικά που χρησιμοποιούνται στη συγκομιδή. Σε αυτή την ενότητα, περιλαμβάνονται συσκευασίες διαφόρων τυπικών μεγεθών, πέλλετ, μιάντες, προστατευτικές σακούλες και φύλλα χαρτιού. Οι αγρότες αξιοποιούν το υλικό που παρέχεται από τα κέντρα διαχείρισης κηπευτικών, βασικά κουτιά αγροτεμαχίων, τα οποία παραχωρούνται στο πλαίσιο ενός συστήματος χρήσης-επιστροφής.
- Γεωργικά μηχανήματα. Με τη χρήση αυτοεργαζόμενων μηχανημάτων, παράγονται λάδια, λίπη, φίλτρα και μπαταρίες κατά την εκτέλεση εργασιών συντήρησης. Η διαχείριση αυτών των απορριμμάτων πραγματοποιείται στα γκαράζ όπου επισκευάζονται. Μόλις ολοκληρωθεί η διάρκεια ζωής τους, ο όγκος αυτός των αποβλήτων αποστέλλεται σε ένα εξουσιοδοτημένο κέντρο διαχείρισης (οι αγρότες μπορούν παράλληλα να επωφεληθούν από προγράμματα για την ανακαίνιση μηχανημάτων).
- Φυτικά υπολείμματα. Στο πλαίσιο των καλλιεργητικών δραστηριοτήτων του θερμοκηπίου περιλαμβάνονται οι δραστηριότητες του κλαδέματος και της συγκομιδής των φυτών, παράγοντες που οδηγούν στη δημιουργία φυτικών υπολειμμάτων, όπως λόγου χάριν φύλλα, ρίζες, μίσχοι, κ.α, τα οποία συμβάλλουν στον κύριο όγκο των στερεών αποβλήτων θερμοκηπίου. (Moreno et. al., 2021)
- Υπολείμματα καλλιεργειών. Μετά τη διαδικασία της συγκομιδής είναι πιθανό να συσσωρευτούν διάφορα υπολείμματα καλλιέργειας. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα υπολείμματα που προκύπτουν από τα φύλλα, τα στελέχη, τα φρούτα και τα λαχανικά μη κατάλληλα προς πώληση ή κατανάλωση. Στην ίδια κατηγορία εμπίπτουν τα κατεστραμμένα ή αντιαισθητικά προϊόντα.
- Υλικά συσκευασίας. Συχνά, για τις εργασίες θερμοκηπίου που περιλαμβάνουν μεταφορά και αποθήκευση των καλλιεργειών που έχουν συλλεγεί, χρειάζονται να χρησιμοποιηθούν υλικά συσκευασίας, όπως είναι μεταξύ άλλων πλαστικά δοχεία, χαρτόνι, μεμβράνες περιτυλίγματος. Η μη ορθή διαχείριση των υλικών συσκευασίας, συμβάλλει αισθητά στη ροή των στερεών αποβλήτων.

- Τα πλαστικά που χρησιμοποιούνται στη γεωργία αποτελούν περίπου το 2% του συνόλου των πλαστικών που καταναλώνονται στην Ευρώπη ετησίως, παράγοντας περίπου 700.000 τόνους απορριμμάτων ετησίως και 4% στις ΗΠΑ. Παρά το χαμηλό μερίδιό τους, η χρήση τους είναι συγκεντρωμένη γεωγραφικά εντός της Ευρώπης σε ορισμένες γεωργικές περιοχές υψηλής παραγωγικότητας. Αυτό αποτελεί πρόβλημα έντονης ρύπανσης, αλλά και ευκαιρία, γιατί μπορούν εύκολα να ενοποιηθούν και να υποβληθούν σε επεξεργασία εάν δημιουργηθεί ένα κατάλληλο σύστημα διαχείρισης αποβλήτων. Επιπλέον, κάθε κατηγορία γεωργικών πλαστικών απορριμμάτων (APW) έχει πολύ ομοιογενή σύνθεση, καθιστώντας έτσι την ανακύκλωση της ροής αποβλήτων σχετικά εύκολη. Ένα σχετικά μικρό μέρος των γεωργικών πλαστικών απορριμμάτων ανακυκλώνεται, αλλά αυτό ποικίλλει ευρέως από χώρα σε χώρα και σε περιφερειακό επίπεδο. Η πλειονότητα των γεωργικών πλαστικών απορριμμάτων είτε θάβεται στο έδαφος είτε καίγεται ανεξέλεγκτα στα χωράφια, είτε απορρίπτεται στα χωράφια και το μεγαλύτερο μέρος τους καταλήγει σε χωματερές. (Briassoulis et. al., 2013)

Στο πλαίσιο αυτό, τα σπορόφυτα και οι δίσκοι διαχειρίζονται από τα φυτώρια. Επιπλέον, αγοράζονται φυτοπροστατευτικά προϊόντα, λιπάσματα και οργανισμοί για βιολογικό έλεγχο και επικονίαση από εταιρείες προμηθευτών εισροών. Η συλλογή και διαχείριση της συσκευασίας των φυτοπροστατευτικών προϊόντων γίνεται σε σύστημα το οποίο χρησιμοποιείται για τη συλλογή συσκευασιών φυτοπροστατευτικών προϊόντων. Για να υλοποιηθεί αυτό, τοποθετούνται κοντέινερ σε διάφορες οντότητες του αγροτικού τομέα. Οι αγρότες μπορούν ανεμπόδιστα να έχουν πρόσβαση σε αυτά τα σημεία συλλογής και να αφήνουν τις άδειες συσκευασίες τους σε τακτική βάση.

Function	Weight		Volume	
	t	%	m ³	%
Greenhouses	39,215	43	49,798	27
Substrates	1219	1	1598	1
Water storage	576	1	730	0
Disinfection	21,061	23	24,066	13
Shading	10	0	10	0
Transplanting	698	1	40,714	22
Tunnels	2259	2	2429	1
Padding	4900	5	5065	3

Function	Weight		Volume	
	t	%	m ³	%
Supporting system	6448	7	4891	3
Irrigation	4967	5	20,760	11
Plant protection	4034	4	17,333	9
Pollination	2469	3	26	0
Harvesting	2883	3	19,630	13
Total	90,738	100	187,050	100

Εικόνα 3. Ετήσια κατανομή απορριμμάτων στα θερμοκήπια της Αλμερία (Sayadi-Gmada et. al., 2019).

Οι πηγές από τις οποίες προκύπτουν τα στερεά απόβλητα, έχουν άμεση σχέση με τις πρακτικές που χρησιμοποιούνται στο εκάστοτε θερμοκήπιο, με τον τύπο καλλιέργειας και με τον τρόπο και τις τεχνικές διαχείρισης των θερμοκηπίων. Για την ομαλή και στοχευμένη διαχείριση των αποβλήτων είναι απαραίτητη η πλήρης κατανόηση των πηγών από τις οποίες προκύπτουν τα στερεά απόβλητα, ώστε να γίνει δυνατή η εφαρμογή των κατάλληλων στρατηγικών διαχείρισης.

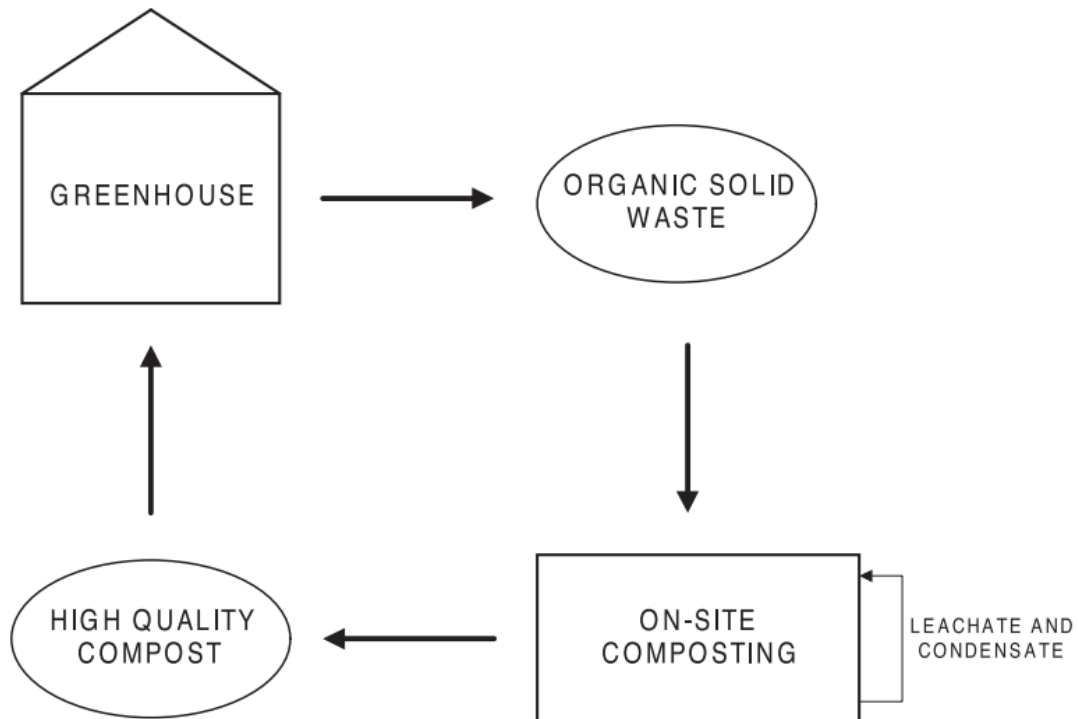
Για να μπορέσουν να αναπτυχθούν στρατηγικές προσαρμοσμένες στη διαχείριση των στερεών αποβλήτων, οι χειριστές θερμοκηπίου και οι επαγγελματίες που είναι υπεύθυνοι για τη διαχείριση των αποβλήτων θα πρέπει να αναγνωρίζουν και να κατηγοριοποιούν τις διαφορετικές πηγές από τις οποίες προκύπτουν τα στερεά απόβλητα. Στόχος τους οφείλει φυσικά να είναι η μείωση, η ανακύκλωση και η διάθεση των αποβλήτων και προκύπτει από τη βαθύτερη αυτή κατανόηση. Επιπρόσθετα, μέσω αυτής της διαδικασίας, είναι πιθανό να εντοπιστούν ιδανικές ευκαιρίες για την ελαχιστοποίηση των αποβλήτων, την ανάκτηση πόρων και την υιοθέτηση βιώσιμων πρακτικών για τη λειτουργία των θερμοκηπίων (Abubakar et. al., 2022). Σε επόμενο στάδιο της βιβλιογραφικής επισκόπησης, πρόκειται να συζητηθούν και άλλες πτυχές που σχετίζονται με τα στερεά απόβλητα και καλύπτουν τη σύνθεσή τους, τεχνικές διαχείρισής τους, περιβαλλοντικές επιπτώσεις, αλλά και πρακτικές βελτίωσης διαχείρισης.

Τα χαρακτηριστικά των στερεών αποβλήτων θερμοκηπίου είναι τα εξής (Theodoraki, 2019):

Οργανική ύλη. Κατά κύριο λόγο είναι το αποτέλεσμα στερεών αποβλήτων, τα οποία προέρχονται από φυτικά υλικά. Είναι πλούσια σε οργανική ουσία γεγονός που βοηθάει στην αποσύνθεση και την κομποστοποίηση, ενώ η αναλογία άνθρακα σε σχέση με το

άζωτο (C/N) είναι ανάλογη με τον τρόπο που έχουν συντεθεί τα απόβλητα υλικά, καθώς και το στάδιο αποσύνθεσης στο οποίο βρίσκονται. (Cheuk, 2003)

●



Εικόνα 4 Βιολογική επεξεργασία και αξιοποίηση φυτικών στερεών αποβλήτων θερμοκηπίου (Cheuk, 2003).

- Ποσοστό περιεκτικότητας σε θρεπτικά συστατικά: Η σύσταση των στερεών αποβλήτων συναρτάται μεταξύ άλλων και από ορισμένα απαραίτητα φυτικά θρεπτικά συστατικά, μεταξύ άλλων το άζωτο (N), το κάλιο (K), το φώσφορο (P), και ιχνοστοιχεία και εξαρτάται από το είδος του φυτού, το στάδιο ανάπτυξης του και τις πρακτικές που έχουν χρησιμοποιηθεί κατά την καλλιέργειά του. Είναι ιδιαίτερως σημαντική η διαχείριση των θρεπτικών συστατικών να γίνεται με τρόπο αποτελεσματικό έτσι ώστε όχι μόνο να μικραίνουν οι πιθανότητες για αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον, αλλά και να προωθείται η αποδοτικότητα των πόρων.
- Περιεκτικότητα σε υγρασία: Το ποσοστό περιεκτικότητας σε υγρασία μπορεί να κυμαίνεται ανάλογα με τον τύπο των αποβλήτων και το βαθμό αποσύνθεσής τους. Αναφορικά με τα φρέσκα φυτικά υπολείμματα, αυτά είναι δυνατό να έχουν υψηλότερη περιεκτικότητα σε υγρασία, ενώ αντίθετα για τα αποξηραμένα υπολείμματα καλλιεργειών ή υλικά συσκευασίας η περιεκτικότητα σε υγρασία είναι πιθανό να είναι αισθητά χαμηλή.

- Φυσικά χαρακτηριστικά: Τα στερεά απόβλητα θερμοκηπίου είναι πιθανό να διαφέρουν ως προς τα φυσικά τους χαρακτηριστικά, αναφορικά με την πυκνότητα, την υφή και το μέγεθος των σωματιδίων, όπως είναι για παράδειγμα τα υπολείμματα που προκύπτουν από τα φυτά και τις καλλιέργειες, τα οποία έχουν ένα εύρος από λεπτά σωματίδια έως και μεγαλύτερα θραύσματα. Αντίστοιχα, και τα υλικά συσκευασίας μπορεί να έχουν μεγάλο όγκο ή και να έχουν διαφορετικά σχήματα και μεγέθη.

Επομένως, είναι ιδιαίτερος σημαντικό να κατανοήσει κανείς σε βάθος τα διαφορετικά χαρακτηριστικά των στερεών αποβλήτων που προκύπτουν από τα θερμοκήπια, έτσι ώστε μακροπρόθεσμα να σχεδιάσουν τις κατάλληλες στρατηγικές για τη διαχείρισή τους. Επίσης, οι διαχειριστές των θερμοκηπίων αν λάβουν υπόψιν την περιεκτικότητα σε θρεπτικά συστατικά και σε οργανική ύλη καθώς και τις φυσικές ιδιότητες των αποβλήτων, είναι ικανοί να λάβουν ολοκληρωμένες αποφάσεις αναφορικά με τον τρόπο που μπορούν να χειριστούν, να επεξεργαστούν και να διαθέσουν τα απορρίμματα των θερμοκηπίων. Μάλιστα, η γνώση αυτή, βοηθά στην εύρεση ευκαιριών για τη μείωση των απορριμμάτων, για την ανακύκλωσή τους και κατ' επέκταση για την ανάπτυξη προϊόντων προστιθέμενης αξίας από στερεά απόβλητα θερμοκηπίου. (Abubakar et. al., 2022)

Περιβαλλοντικές επιπτώσεις των στερεών αποβλήτων θερμοκηπίου

Η μη ορθή διαχείριση των στερεών αποβλήτων θερμοκηπίου, είναι ικανή να έχει άκρως επιζήμιες συνέπειες για το περιβάλλον, γεγονός που καθιστά ακόμα πιο σημαντική τη μελέτη και κατανόηση αυτών των επιπτώσεων. Με βαθύτερο στόχο το μετριασμό των πιθανών μελλοντικών βλαβών είναι επιθυμητή η ανάπτυξη αποτελεσματικών στρατηγικών για τη διαχείριση αποβλήτων. Στην παρούσα ενότητα, διερευνώνται οι περιβαλλοντικές συνέπειες αναφορικά με τα μη επεξεργασμένα ή κακώς διαχειριζόμενα στερεά απόβλητα θερμοκηπίων. (Cheuk et. al. 2003)

Ρύπανση του νερού μέσω έκπλυσης θρεπτικών ουσιών:

- Απορροή θρεπτικών ουσιών: Η μη σωστή διαχείριση και επεξεργασία στερεών αποβλήτων και φυτικών υπολειμμάτων που προκύπτουν από τα θερμοκήπια οδηγεί στην εσφαλμένη απόρριψή τους, γεγονός που συμβάλλει στην απορροή θρεπτικών ουσιών σε περιόδους βροχοπτώσεων ή και άρδευσης. Επίσης, η υπερβολική απορροή θρεπτικών συστατικών, τα οποία είναι πλούσια σε άζωτο και φώσφορο, είναι δυνατό

να οδηγήσει σε ευτροφισμό στα υδάτινα σώματα προκαλώντας υπερβολική άνθηση φυκών με παράλληλη εξάντληση οξυγόνου διαταράσσοντας το υδάτινο οικοσύστημα.

- Ρύπανση των υπόγειων υδάτων: Η εσφαλμένη απόρριψη των στερεών αποβλήτων μπορεί να οδηγήσει στην έκπλυση των θρεπτικών ουσιών, των φυτοφαρμάκων και άλλων χημικών ουσιών στα υπόγεια ύδατα. Με τη σειρά τους, τα υπόγεια ύδατα μεταφέρουν ρυπογόνες ουσίες οι οποίες διαχέονται σε πηγές πόσιμου νερού, οδηγώντας σε μακροπρόθεσμες επιπτώσεις στον άνθρωπο και στο περιβάλλον.

Μείωση της γονιμότητας μέσω της υποβάθμισης του εδάφους.

- Εξάντληση οργανικής ύλης: Μέσω της ανεπαρκούς διαχείρισης των στερεών αποβλήτων θερμοκηπίου, είναι δυνατό η οργανική ύλη του εδάφους να μειωθεί αισθητά σε περιεκτικότητα. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να τονιστεί πόσο σημαντική είναι η οργανική ύλη για το έδαφος, καθώς διατηρεί τη σύστασή του και την υγρασία του στο γενικότερο κύκλο των θρεπτικών συστατικών. Όταν η οργανική ύλη είναι ανεπαρκής σε ποσότητα, το έδαφος υποβαθμίζεται μειώνοντας κατ' επέκταση τη γονιμότητα και τη γεωργική παραγωγικότητα.
- Ανισορροπία στην ποσότητα των θρεπτικών ουσιών: Στην περίπτωση που τα στερεά απόβλητα των θερμοκηπίων δεν απορρίπτονται με σωστές τακτικές, η διαθεσιμότητα των θρεπτικών συστατικών του εδάφους μπορεί να διαταραχθεί προκαλώντας ανισορροπία. Έτσι για παράδειγμα, το έδαφος μπορεί να υπερφορτωθεί με συγκεκριμένα θρεπτικά συστατικά, ενώ παράλληλα να παραμελήσει άλλα επηρεάζοντας την ανάπτυξη των φυτών εξαιτίας της ανεπάρκειας θρεπτικών συστατικών και της τοξικότητας.

Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου.

- Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂): Στην περίπτωση που τα στερεά απόβλητα θερμοκηπίων δεν αποσυντεθούν με τον κατάλληλο τρόπο ή χωρίς να ακολουθηθούν οι κατάλληλες τεχνικές καύσης, είναι δυνατή η έκλυση στην ατμόσφαιρα σημαντικής ποσότητας διοξειδίου του άνθρακα συμβάλλοντας με αυτό τον τρόπο στο γενικότερο φαινόμενο της παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής.
- Εκπομπές μεθανίου (CH₄): Στην περίπτωση που οι συνθήκες διαχείρισης είναι μέσω αναερόβιων διαδικασιών, όπως είναι για παράδειγμα οι χωματερές ή μη ορθά διαχειριζόμενοι σωροί κομποστοποίησης, τότε τα στερεά απόβλητα του θερμοκηπίου

οδηγούνται στην έκλυση αερίου μεθανίου. Το αέριο αυτό, είναι ένα από τα ισχυρότερα αέρια που σχετίζονται με το φαινόμενο του θερμοκηπίου οδηγώντας στην υπερθέρμανση του πλανήτη.

Επιπτώσεις στο οικοσύστημα και τη βιοποικιλότητα.

- Διαταραχή οικοτόπου: Όταν τα στερεά απόβλητα δεν διατίθενται κατάλληλα, επιφέρουν καταστροφή και κατακερματισμό στους οικοτόπους, ιδιαίτερα στην περίπτωση που τα απόβλητα απορρίπτονται σε φυσικές περιοχές ή υδάτινα σώματα, επηρεάζοντας αρνητικά την τοπική χλωρίδα και πανίδα. Επιπλέον, καταστρέφουν αυτόχθονα είδη και ευαίσθητα οικοσυστήματα.
- Ρύπανση εδάφους και νερού: Συχνά τα στερεά απόβλητα των θερμοκηπίων είναι εμπλουτισμένα με διάφορες χημικές ουσίες συμπεριλαμβανομένων φυτοφαρμάκων και ζιζανιοκτόνων. Οι ουσίες αυτές, επηρεάζουν αρνητικά τα φυτά και τους ζωντανούς μικροοργανισμούς που ζουν σε αυτά τα περιβάλλοντα μέσω της ρύπανσης που προκαλούν στο έδαφος και το νερό.

Επομένως, είναι ιδιαίτερος σημαντικό να κατανοηθούν σε βάθος οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που αφορούν μη επεξεργασμένα ή κακώς διαχειριζόμενα στερεά απόβλητα θερμοκηπίου. Στο ίδιο πλαίσιο, είναι σημαντική η εφαρμογή στρατηγικών αντιμετώπισης. Αν καταφέρουν οι χειριστές των θερμοκηπίων να αντιμετωπίσουν αυτές τις επιπτώσεις μέσω της υιοθέτησης τεχνικών βιώσιμης διαχείρισης απορριμμάτων, μπορούν να έχουν μια σειρά από θετικά αποτελέσματα. Σε αυτά συμπεριλαμβάνονται η μείωση των βλαβών προς το περιβάλλον, η προστασία υδάτινων και εδαφικών πόρων και η συμβολή στη βιωσιμότητα της θερμοκηπιακής γεωργίας. Στις ακόλουθες ενότητες, στόχος είναι η εμβάθυνση σε διάφορες τεχνικές διαχείρισης απορριμμάτων, καθώς και η ανασκόπηση των βέλτιστων πρακτικών και των καινοτόμων προσεγγίσεων ώστε ο χειρισμός και η διάθεση των στερεών αποβλήτων να γίνεται με τρόπο υπεύθυνο και ωφέλιμο προς το περιβάλλον.

Τεχνικές διαχείρισης απορριμμάτων για στερεά απόβλητα θερμοκηπίου

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, είναι ιδιαίτερος σημαντική η ορθή διαχείριση των απορριμμάτων, καθώς με αυτό τον τρόπο ελαχιστοποιούνται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που πιθανόν να προκύπτουν από τα στερεά απόβλητα θερμοκηπίων. Στην ενότητα αυτή,

αναφέρονται οι διαφορετικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται για το χειρισμό και τη διάθεση των στερεών αποβλήτων θερμοκηπίου με ευθύνη προς το περιβάλλον.

Ελαχιστοποίηση των απορριμμάτων μέσα από τη μείωση πηγών.

- Διαχωρισμός στην πηγή: Στην περίπτωση αυτοί, οι χειριστές μπορούν να ξεχωρίσουν στην ίδια την πηγή τους διαφορετικούς τύπους των στερεών αποβλήτων ήδη από το στάδιο παραγωγής τους. Μέσω της διαδικασίας αυτής, τίθενται σε εφαρμογή στοχευμένες στρατηγικές διαχείρισης απορριμμάτων διευκολύνοντας την ανακύκλωση ή τη χρήση εκ νέου συγκεκριμένων απορριμμάτων.
- Κομποστοποίηση: Μια από τις πλέον διαδεδομένες και αναγνωρισμένες τεχνικές διαχείρισης στερεών αποβλήτων είναι η διαδικασία της κομποστοποίησης, η οποία μετατρέπει τα φυτικά υπολείμματα, τα υπολείμματα καλλιεργειών και άλλα οργανικά απόβλητα σε κομπόστ, μια ουσία σαν λίπασμα, πλούσια σε θρεπτικά συστατικά. Το λίπασμα αυτό, μπορεί να χρησιμοποιηθεί εκ νέου ως εδαφοβελτιωτικό βελτιώνοντας τη γονιμότητα και τη δομή του εδάφους.

Ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση.

- Υλικά συσκευασίας: Συχνά, κατά τις διάφορες εργασίες του θερμοκηπίου, είναι πιθανό να προκύψουν ποσότητες υλικών συσκευασίας, όπως είναι λόγω χάριν οι πλαστικοί δίσκοι ή και τα δοχεία. Στην περίπτωση αυτή, η εφαρμογή προγραμμάτων ανακύκλωσης, καθώς και η ενθάρρυνση της εκ νέου χρήσης των υλικών συσκευασίας μπορεί να οδηγήσει στην ελαχιστοποίηση των αποβλήτων και στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.
- Διαχείριση νερού: Στα στερεά απόβλητα του θερμοκηπίου (απορροή άρδευσης, νερό αποστράγγισης), περιέχονται πολύτιμα θρεπτικά συστατικά, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν εκ νέου σε πρακτικές άρδευσης ή λίπανσης. Ο τρόπος συλλογής τους γίνεται εφαρμόζοντας τεχνικές ανάκτησης των θρεπτικών αυτών συστατικών μέσω δεξαμενής καθίζησης ή συστημάτων φιλτραρίσματος.

Μετατροπή αποβλήτων σε ενέργεια.

Βιομάζα ως μέσο παραγωγής ενέργειας: Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, τα στερεά απόβλητα του θερμοκηπίου είναι πλούσια σε υψηλή οργανική περιεκτικότητα, γεγονός που τα καθιστά ικανά να παράγουν ενέργεια. Η μετατροπή των οργανικών αποβλήτων σε βιοαέριο, γίνεται μέσα από τεχνολογίες βιομάζας, όπως για παράδειγμα η αναερόβια χώνευση ή η αεριοποίηση, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ποικίλες ενεργειακές εφαρμογές, όπως είναι η θέρμανση, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, κ.α. (Hutchinson, 2018)

Τεχνικές ελεγχόμενης διάθεσης.

- Διαχείριση ΧΥΤΑ: Σε αυτούς του χώρους οι οποίοι είναι χώροι υγειονομικής ταφής, καταλήγουν συνήθως τα στερεά απόβλητα θερμοκηπίου που αδυνατούν να ανακυκλωθούν ή να ανακτηθούν. Παρόλα αυτά, για την ασφαλή απόρριψή τους σε αυτά τα μέρη θα πρέπει να ακολουθούνται οι κατάλληλες τακτικές διαχείρισης των χωματερών ώστε να περιλαμβάνονται τυχόν ρυπάνσεις/μολύνσεις από στραγγίσματα ή ακόμα και εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Επιπρόσθετα, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι δυνατό να μειωθούν με την εφαρμογή συστημάτων διαχωρισμού απορριμμάτων και δέσμευσης των αερίων που προκύπτουν από τις χωματερές.
- Αποτέφρωση: Η αποτέφρωση συνιστά μια ακόμα τεχνική για τη διαχείριση απορριμμάτων για στερεά απόβλητα θερμοκηπίου. Παρόλα αυτά, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται σύγχρονες τεχνολογίες αποτέφρωσης, οι οποίες εξασφαλίζουν ότι η καύση γίνεται αποτελεσματικά χωρίς να προκαλούνται ατμοσφαιρικοί ρύποι. Για το λόγο αυτό, θα πρέπει να υπάρχουν κατάλληλα συστήματα ελέγχου που να αφορούν την πρόληψη των εκπομπών αερίου και τη μείωση της απελευθέρωσης επιβλαβών αερίων και σωματιδίων.

Βέλτιστες τεχνικές διαχείρισης στερεών αποβλήτων θερμοκηπίου.

- Κατάρτιση και εκπαίδευση: Το προσωπικό που εργάζεται σε ένα θερμοκήπιο οφείλει να είναι καταρτισμένο και εκπαιδευμένο αναφορικά με τους τρόπους και τις τεχνικές διαχείρισης των αποβλήτων. Στην κατηγορία αυτή, συμπεριλαμβάνονται τεχνικές, όπως είναι ο διαχωρισμός, η κομποστοποίηση, η ανακύκλωση.

- Κανονιστική συμμόρφωση: Πέραν των εργαζομένων και οι ίδιοι οι φορείς που εκμεταλλεύονται τα θερμοκήπια οφείλουν να ενημερώνονται για τις τρέχουσες εξελίξεις και τους τοπικούς κανονισμούς αναφορικά με τις οδηγίες διαχείρισης απορριμμάτων. Με τον τρόπο αυτό, εξασφαλίζουν τη συμμόρφωση ως προς τις κανονιστικές απαιτήσεις συμβάλλοντας αρχικά στην προστασία του περιβάλλοντος και έπειτα αποφεύγοντας πιθανά νομικά ζητήματα που μπορεί να προκύψουν.
- Συνεχής βελτίωση και καινοτομία: Στο γενικότερο πλαίσιο καινοτομίας της έρευνας, η ανάπτυξη νέων καινοτόμων τεχνολογικών μέσων οφείλει να ενθαρρύνεται με στόχο τη βελτίωση στις τεχνικές διαχείρισης στερεών αποβλήτων θερμοκηπίου. Στις προηγμένες μεθόδους ανήκουν μεταξύ άλλων η τεχνική κομποστοποίησης και οι βιώσιμες λύσεις συσκευασίας, οι οποίες συμβάλλουν σε πιο άμεσες και φιλικές προς το περιβάλλον πρακτικές διαχείρισης απορριμμάτων.

“Πληρώνω όσο ρυπαίνω” (Yelboğa, 2022).

Επομένως, οι φορείς εκμετάλλευσης, μέσω της χρήσης καινοτόμων τεχνικών διαχείρισης και βέλτιστων στρατηγικών, μπορούν να μειώσουν σημαντικά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των στερεών αποβλήτων θερμοκηπίου. Άμεση συνέπεια αυτού θα είναι η αποτελεσματική διαχείριση των απορριμμάτων όχι μόνο για την προστασία του περιβάλλοντος, αλλά και για την υποστήριξη βιώσιμων γεωργικών πρακτικών που διασφαλίζουν τη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα της θερμοκηπιακής καλλιεργητικής πρακτικής.

Βασιζόμενοι στις γνώσεις των ειδικών, παρατίθεται μια λίστα με τις καλύτερες προηγμένες λύσεις, τεχνολογίες ή προϊόντα που διατίθενται σε επίπεδο ΕΕ για τη μείωση ή την αποφυγή ανόργανων αποβλήτων στην παραγωγή κηπευτικών και θερμοκηπίων. Αυτές οι πιθανές λύσεις είναι:

- Φυσική κομποστοποιήσιμη χρωμοτροπική παγίδα: κατασκευασμένη από φυσικές ίνες, βαφές και κόλλες. Ανάμεσα στα σημαντικότερα πλεονεκτήματα αυτού του προϊόντος, είναι η πλήρης εξάλειψη των υπολειμμάτων των χρωμοτροπικών παγίδων τα οποία όσον αφορά την παρούσα στιγμή δεν διαθέτουν φιλικό προς το περιβάλλον τρόπο διαχείρισής τους.

- Χρήση εκπομπού υπερήχων αντί για κολλώδεις παγίδες εντόμων: χρήση εκπομπού υπερήχων για την αποφυγή παρασίτων, αντικατάσταση χημικών φυτοπροστατευτικών προϊόντων ή παγίδων εντόμων. Για παράδειγμα, οι πιλοτικές δοκιμές αποδείχθηκαν αποτελεσματικές ενάντια στις μύγες, ένα πολύ ζημιογόνο παράσιτο για τις καλλιέργειες ντομάτας, αγγουριού ή κολοκυθιού.
- Καινοτομία στη συσκευασία ωφέλιμων εντόμων που χρησιμοποιούνται στη βιολογική καταπολέμηση παρασίτων: μείωση όγκου συσκευασίας και/ή αντικατάσταση από χαρτόνι των πλαστικών δοχείων ωφέλιμων εντόμων.
- Μαύρο βιοαποικοδομήσιμο πλαστικό επικάλυψης: κατασκευασμένο από βιοπολυμερές με βάση βιοαποδομήσιμες και ανανεώσιμες πρώτες ύλες για την επίτευξη βέλτιστου επιπέδου αδιαφάνειας.
- Αντικατάσταση πλαστικού καλύμματος με στρώση άχυρου: γεωργική πρακτική που συνίσταται στην ανάμειξη εδάφους με άμμο και αχυρόστρωση, αποφεύγοντας τη χρήση πλαστικού καλύμματος (εδαφοκάλυψη).
- Στρατηγικές λύσεις μεθόδων καθαρισμού με εφαρμογή ηλιακής ακτινοβολίας και επικάλυψης πλαστικών: δοκιμή διαφορετικών μεθόδων πλύσης, επάλειψης και ξήρανσης για ηλιοαπολύμανση και επικάλυψη πλαστικών σε θερμοκήπια πριν από την ανακύκλωσή τους σε μονάδες επεξεργασίας.
- Μηχάνημα RAFU (Recycling of Used, Agricultural Films): Εξοπλισμός για ανάκτηση ταινιών αγροτικής χρήσης με στόχο την ανακύκλωσή τους ως μέθοδος βελτίωσης των συνθηκών συλλογής και ανάκτησης των φιλμ που έχουν χρησιμοποιηθεί στα αγροκτήματα. Στόχος σε αυτή την περίπτωση είναι η σημαντική μείωση του ποσοστού ρύπανσης με τη χρήση τεχνικών καθαρισμού πιο κοντά στον τόπο χρήσης.
- Εγχειρίδιο για τις βέλτιστες γεωργικές πρακτικές με στόχο βελτιστοποίηση του τρόπου συντήρησης του λειασμένου εδάφους: με σκοπό την καλύτερη συντήρηση του λειασμένου εδάφους στα θερμοκήπια γίνονται οι κατάλληλες δοκιμές για τις βέλτιστες γεωργικές πρακτικές.
- Λευκό κομποστοποιημένο κλιπ: Το είδος αυτού του κλιπ είναι κατάλληλο για βιολογικές καλλιέργειες, ιδιαίτερα όταν συνδυάζεται με βιοαποδομήσιμο σπάγκο, συμβάλλοντας στη μείωση του κόστους διαχείρισης απορριμμάτων.
- Στερέωση φυτών με χρήση μετάλλων: αντί για στερέωση φυτών με πλαστικά, χρησιμοποιείται η εναλλακτική της χρήσης μεταλλικών πασσάλων, η οποία μπορεί να

καθαριστεί και να χρησιμοποιηθεί εκ νέου, αποτρέποντας την παραγωγή πλαστικών αποβλήτων.

- Πλαστικές βιοαποικοδομήσιμες μεμβράνες: τα βιοαποικοδομήσιμα σάπια φύλλα αποτελούν μια εναλλακτική πρόταση έναντι της πλαστικής μεμβράνης στο πλαίσιο προστασίας από τα ζιζάνια. Επίσης, βοηθούν στη συγκράτηση της θερμοκρασίας του εδάφους, στη διατήρηση του νερού, ενώ επιτρέπουν τη βιοαποικοδόμηση και τη βιοαφομοίωση στο χωράφι εφόσον δεν επιτρέπουν τη συλλογή της επικάλυψης στο τέλος της καλλιέργειας.
- Βιοδιασπώμενα και κομποστοποιήσιμα κλιπ. Αυτού του είδους τα κλιπ είναι βιοδιασπώμενα και κομποστοποιήσιμα γεγονός που τα καθιστά ικανά για χρήση ως υποστηρικτικά μέσα διαφορετικών τύπων καλλιέργειών, όπως λόγω χάριν οι πιπεριές, τα αγγούρια και οι ντομάτες, εξασφαλίζοντας στήριξη και προσανατολισμό στο στέλεχος. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να τονιστεί ότι η τακτική αυτή μειώνει το κόστος, καθώς δεν είναι απαραίτητο για το στέλεχος να είναι τυλιγμένο κατά μήκος του σύρματος για να στηριχθεί. Μετά το πέρας της καλλιέργειας, τα κλιπ απορρίπτονται μαζί με τα οργανικά απόβλητα ή διαφορετικά μπορούν να σταλούν για κομποστοποίηση μαζί με την καλλιέργεια, αφού δεν αποτελούν ρυπογόνο στοιχείο για το περιβάλλον.
- Πλαστικό κάλυμμα μακράς διάρκειας: η διαδικασία γίνεται με χρήση θερμικής μεμβράνης με EVA (Συμπολυμερές Αιθυλενίου-οξικού βινυλίου)/EBA (ακρυλικό αιθυλένιο βουτυλεστέρα) και πολυμερή μεταλλοκενίου. Τα συστατικά αυτά, δημιουργούν πολυστρωματική συνεξόθηση ορίζοντας διάφορα πάχη. Οι αγρότες φαίνεται να επιλέγουν ιδιαίτερα αυτή τη μέθοδο, καθώς έχει αρκετές ιδιότητες που διευκολύνουν την εργασία τους, όπως είναι για παράδειγμα η πρόσκρουση στο βέλος, ο τρόπος δηλαδή με τον οποίο αντιστέκονται τα φύλλα στην πίεση που ασκείται σε ένα σημείο. Η διαδικασία αυτή επίσης, δρα ενισχυτικά στα καλύμματα και τις πτυχές του θερμοκηπίου, ενώ έχει χρησιμοποιηθεί επίσης για σήραγγες καλλιέργειών, παρέχοντας αντοχή στον μέγιστο βαθμό, έναντι της ηλιακής ακτινοβολίας και των χημικών επεξεργασιών. (Castillo-Díaz et. al., 2021)
- Συνθετικό λάδι δεύτερης γενιάς: Υγρό καύσιμο που εξάγεται κατά κύριο λόγο από μεγάλο όγκο απορριμμάτων, κυρίως πλαστικών. Εναλλακτικά υγρά καύσιμα που μπορούν να προκύψουν από πλαστικά είναι η πυρόλυση, κατά την οποία τα πλαστικά

αποσυντίθενται και μετασχηματίζονται σε έλλειψη οξυγόνου. Στη διαδικασία αυτή, προκύπτει ένα εμπορευματοποιημένο προϊόν από στερεά αστικά απόβλητα παρά το γεγονός ότι τα καύσιμα που λαμβάνονται από τα πλαστικά της γεωργίας είναι ακόμη σε δοκιμαστικό στάδιο. Ωστόσο, φαίνεται να έχουν χρησιμοποιηθεί για τη θέρμανση θερμοκηπίου.

Συνακόλουθα, άλλες ενδεδειγμένες λύσεις για την καλλιέργεια κηπευτικών ώστε να ελαχιστοποιηθούν και να προληφθούν τα ανόργανα απόβλητα είναι οι φυσικές λιπασματοποιήσιμες χρωμοτροπικές παγίδες (κολλώδεις παγίδες εντόμων). Λοιπές καινοτόμες πρακτικές σε βοηθητικές συσκευασίες εντόμων που χρησιμοποιούνται στη βιολογική καταπολέμηση παρασίτων, αντικατάσταση πλαστικών καλυμμάτων με στρώματα άχυρου ή εφαρμογή άλλων στρατηγικών λύσεων για μεθόδους καθαρισμού ηλιοαπολύμανσης και σάπιας στρώσης. (Dorais, M. and Dubé, Y. 2011)

Στη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας, έχει προταθεί πλήθος πρακτικών βιώσιμης διαχείρισης από ερευνητές και υπηρεσίες επέκτασης. Για την παραγωγή θερμοκηπίου, τρεις κύριοι παράγοντες είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη για τη μείωση των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων: 1) διαχείριση απορριμμάτων, 2) διαχείριση θρεπτικών ουσιών και 3) χρήση ορυκτών καυσίμων για παραγωγή ενέργειας. Τα οργανικά απόβλητα αντιπροσωπεύουν σημαντική πηγή παραγωγής βιομάζας για καλλιέργειες θερμοκηπίων. Απόβλητα όπως βιομάζας φύλλων απορρίπτονται συνήθως σε χώρους υγειονομικής ταφής ή οδηγούνται σε άλλους χώρους διαχείρισης απορριμμάτων - όπως τοποθεσίες κομποστοποίησης - ή συσσωρεύονται κοντά στις εγκαταστάσεις παραγωγής, αποτελώντας έτσι φυτουγειονομικό πρόβλημα. Όταν το νερό αποστράγγισης από τα λαχανικά του θερμοκηπίου δεν ανακυκλώνεται, οι εκπομπές θρεπτικών ουσιών στα υπόγεια ύδατα μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις (έως 3000-4500 m³ ανά εκτάριο σπαταλημένου θρεπτικού διαλύματος ντομάτας που περιέχει 4-10 τόνους θρεπτικών ουσιών, όπως άζωτο και φώσφορο). Η παραγωγή θερμοκηπίου χρησιμοποιεί επίσης αξιοσημείωτη ποσότητα ενέργειας από ορυκτά καύσιμα, με τη μορφή θερμότητας (10-40% του κόστους παραγωγής), εμπλουτισμού με CO₂ και λιπασμάτων. Συνεπώς, η διαχείριση εκτεταμένων ποσοτήτων οργανικών στερεών και υγρών αποβλήτων, τα οποία παράγονται από καλλιέργειες θερμοκηπίου, καθώς και η αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, συνιστούν μια πρόκληση η οποία δύναται εν μέρει να αντιμετωπιστεί με πιο βιώσιμα συστήματα παραγωγής.

Η ολοκληρωμένη διαδικασία κλειστού βρόχου ανακυκλώνει τόσο τα στερεά, όσο και τα υγρά οργανικά απόβλητα μετατρέποντας έτσι τα απόβλητα σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (CH₄, CO₂) και υγρά και στερεά λιπάσματα. Ακολούθως, τα οργανικά απόβλητα και το στραγγισμένο νερό επανεισάγονται στο σύστημα άρδευσης. Η τεχνική αυτή ελαχιστοποιεί τους κινδύνους με τη χρήση βιολογικών διεργασιών, όπως η αναερόβια χώνευση και ο βιοαντιδραστήρας νιτροποίησης, οι τεχνητοί υδροβιότοποι και οι παθητικοί βιοαντιδραστήρες, ώστε να μειωθούν οι θρεπτικοί ρύποι και η περιεκτικότητα σε θειικά άλατα, καθώς και τους κινδύνους που σχετίζονται με παθογόνους μικροοργανισμούς.

2. Επισκόπηση της βιβλιογραφίας για υγρά απόβλητα θερμοκηπίων

Σε αυτή την ενότητα μελετώνται τα υγρά απόβλητα θερμοκηπίου, τα οποία παίζουν σημαντικό ρόλο στη θερμοκηπιακή γεωργία. Για τα υγρά απόβλητα είναι ζωτικής σημασίας οι πρακτικές διαχείρισής τους να είναι αποτελεσματικές και να δρουν με άξονα την αντιμετώπιση των σχετικών περιβαλλοντικών και αγρονομικών προκλήσεων. Ένεκα του ότι η καλλιέργεια των θερμοκηπίων βασίζεται κατά κύριο λόγο σε συστήματα άρδευσης και σε θεραπευτικά διαλύματα και τεχνικές διαχείρισης νερού, η παραγωγή υγρών αποβλήτων είναι αναπόφευκτη. Στο σύνολο των υγρών αποβλήτων, περιλαμβάνεται το νερό αποστράγγισης, η απορροή άρδευσης, καθώς και τα θεραπευτικά διαλύματα που έχουν χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη και τη συντήρηση των φυτών. (Ahdab et. al., 2021)

Συνάμα, η ορθή διαχείριση των υγρών αποβλήτων θερμοκηπίου είναι ιδιαίτερος σημαντική, εξαιτίας κυρίως των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στο άτομο και στη βιώσιμη γεωργία. Συγκεκριμένα, η απουσία κατάλληλου χειρισμού και επεξεργασίας των αποβλήτων συμβάλλει συχνά στην έκλυση θεραπευτικών ουσιών και κατ' επέκταση στη ρύπανση των πηγών νερού με αρνητικά φορτισμένες επιπτώσεις στα γύρω οικοσυστήματα. Επομένως, είναι σημαντικό το ζήτημα της διαχείρισης των υγρών αποβλήτων να μελετηθεί σε όλες τις εκφάνσεις του, ώστε να εντοπιστούν αποτελεσματικές στρατηγικές που να αφορούν τη διαχείριση των υγρών αποβλήτων.

Στην παρούσα ενότητα, ο σκοπός της βιβλιογραφικής ανασκόπησης αφορά τη συζήτηση γύρω από το ζήτημα των υγρών αποβλήτων των θερμοκηπίων και του τρόπου διαχείρισής τους, ενώ απώτερος σκοπός είναι να αναλυθούν σε βάθος τα χαρακτηριστικά των υγρών αποβλήτων θερμοκηπίου, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις, οι διαθέσιμες τεχνικές επεξεργασίας και διαχείρισης και να προταθούν οι βέλτιστες πρακτικές για το βιώσιμο χειρισμό τους. Μέσα από μια ολοκληρωμένη επισκόπηση θα γίνει δυνατή αρχικά η σε βάθος κατανόηση των προκλήσεων και των ευκαιριών που αφορούν τα υγρά απόβλητα θερμοκηπίου και δευτερευόντως ο εντοπισμός των ζητημάτων που χρειάζονται περαιτέρω διερεύνηση και βελτίωση.

Αρχικά, θα συζητηθούν μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί σε διάφορες περιοχές, με άξονα πάντα τα διαφορετικά είδη καλλιέργειας σχετικά με το θερμοκήπιο, κλιματικές παράμετροι, καθώς και τις διαφορετικές προσεγγίσεις διαχείρισης απορριμμάτων. Από το σύνολο της ανασκόπησης θα προκύψουν σημαντικά ευρήματα, τα οποία θα βοηθήσουν σημαντικά αναφορικά με τις πρακτικές συστάσεις προς τους γεωργούς θερμοκηπίου, τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής και τους ερευνητές που στοχεύουν στη βελτίωση πρακτικών διαχείρισης απορριμμάτων με παράλληλη προώθηση της βιώσιμης γεωργίας.

Επισκόπηση των διαφόρων πηγών υγρών αποβλήτων θερμοκηπίου

Τα υγρά απόβλητα του θερμοκηπίου προέρχονται κατά κύριο λόγο από τις πρακτικές άρδευσης, τον τρόπο διαχείρισης θρεπτικών ουσιών και το νερό αποστράγγισης. Περιλαμβάνονται δηλαδή σε μια σειρά από υγρά που παράγονται στα συστήματα καλλιέργειας θερμοκηπίου, γεγονός που καθιστά ιδιαίτερος σημαντική τη σε βάθος κατανόηση των χαρακτηριστικών τους ώστε να καταστεί δυνατή η ανάπτυξη στοχευμένων στρατηγικών διαχείρισης αποβλήτων. Η ενότητα αυτή, αφορά τα υγρά απόβλητα θερμοκηπίου ως έννοια, ενώ ταυτόχρονα σχετίζεται με τις μελέτες που έχουν γίνει για τα υγρά απόβλητα, τη σύνθεση και γενικότερα τα χαρακτηριστικά τους.

Τα υγρά απόβλητα που παράγονται στο θερμοκήπιο προέρχονται από διάφορες πηγές εντός του θερμοκηπίου. Μία από τις κύριες πηγές είναι η άρδευση, η οποία αναφέρεται στο υπερβολικό νερό που ρέει μέσω του καλλιεργητικού υποστρώματος και συλλέγεται μέσω των αποστραγγίσεων. Αυτή η ροή συνήθως περιλαμβάνει νερό που χρησιμοποιείται για την άρδευση, μαζί με διαλυμένες, αιωρούμενες και επιπλέουσες ουσίες από το καλλιεργητικό υπόστρωμα και τη ριζική ζώνη των φυτών. (Ahdab et. al., 2021)

Μία άλλη σημαντική πηγή υγρών αποβλήτων στο θερμοκήπιο είναι τα θρεπτικά διαλύματα. Αυτά τα διαλύματα αποτελούν προσεκτικά σχεδιασμένα μείγματα νερού και θρεπτικών ουσιών που παρέχονται στα φυτά για την υποστήριξη της ανάπτυξης και της ευημερίας τους. Καθώς τα φυτά απορροφούν τα απαραίτητα θρεπτικά συστατικά, το υπόλοιπο διάλυμα εμπλουτίζεται με υπολείμματα θρεπτικών συστατικών, διαλυμένα άλατα και οργανική ύλη. Η απόρριψη αυτών των θρεπτικών διαλυμάτων απαιτεί προσεκτική εξέταση για να αποφευχθούν οι αρνητικές επιπτώσεις τους στο περιβάλλον (Dunets and Zheng, 2015).

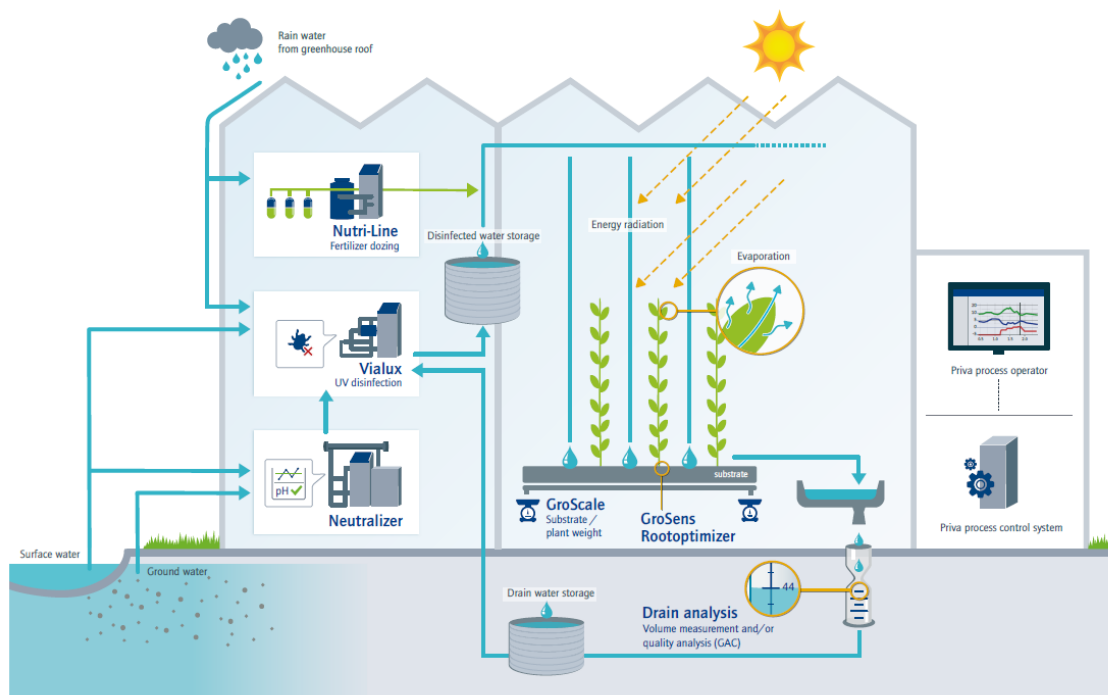
Το υγρό αποβλήτων του θερμοκηπίου περιλαμβάνει τόσο το υπερβολικό νερό από την άρδευση, όσο και τα θρεπτικά διαλύματα που προέρχονται από το νερό αποστράγγισης. Αυτό το υγρό συλλέγεται μέσω συστημάτων αποστράγγισης εντός του θερμοκηπίου και περιέχει διάφορες ουσίες που προέρχονται από το καλλιεργητικό υλικό, τα λιπάσματα και τα εκκρίματα των φυτών. Το νερό αποστράγγισης μπορεί να περιλαμβάνει διάφορα θρεπτικά συστατικά, οργανική ύλη, φυτοφάρμακα και άλλους ρύπους, ανάλογα με τις συγκεκριμένες πρακτικές διαχείρισης του θερμοκηπίου και τις εισροές που χρησιμοποιούνται. (White, 2019)

Η σύνθεση και τα χαρακτηριστικά των υγρών αποβλήτων που παράγονται από θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις εμφανίζουν ποικίλες διαφοροποιήσεις, οι οποίες σχετίζονται με παράγοντες όπως ο τύπος καλλιέργειας, οι πρακτικές διαχείρισης θρεπτικών ουσιών και οι μέθοδοι άρδευσης. Αυτά τα απόβλητα είναι συνήθως υψηλά σε περιεκτικότητα θρεπτικών συστατικών, όπως αζωτούχες ενώσεις (N), φωσφορικές ενώσεις (P) και καλιούχες ενώσεις (K), οι οποίες αποτελούν αναγκαίες προϋποθέσεις για την ανάπτυξη των φυτών. Η παρουσία αυτών των θρεπτικών συστατικών στα υγρά απόβλητα των θερμοκηπίων μπορεί να έχει τόσο οφέλη, όσο και αρνητικές επιπτώσεις. Ενώ μπορούν να λειτουργήσουν ως πολύτιμοι πόροι για ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση, οι υπερβολικές συγκεντρώσεις των θρεπτικών ουσιών μπορούν να προκαλέσουν περιβαλλοντική ρύπανση και ευτροφισμό των υδάτινων σωμάτων (Prystay and Lo, 2001, Salazar et. al., 2023).

Πέρα από τα θρεπτικά συστατικά, τα υγρά αποβλήτων των θερμοκηπίων μπορεί να περιλαμβάνουν οργανική ύλη που προέρχεται από φυτικά υπολείμματα, ριζωματικά εκκρίματα και αποσυντεθειμένα οργανικά υλικά. Η οργανική ύλη διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στη γονιμότητα του εδάφους και στον κύκλο των θρεπτικών συστατικών, ενώ μπορεί επίσης να συμβάλει στην παροχή μέσου για τη μικροβιακή ανάπτυξη και την απελευθέρωση αερίων εντός του θερμοκηπίου.

Ομοίως, τα υγρά απόβλητα που παράγονται από θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις μπορεί να περιλαμβάνουν διάφορους ρύπους, συμπεριλαμβανομένων φυτοφαρμάκων, βαρέων μετάλλων και παθογόνων παραγόντων. Τα φυτοφάρμακα, που χρησιμοποιούνται για την καταπολέμηση παρασίτων και ασθενειών εντός των θερμοκηπίων ενδέχεται να αποκλίνουν στο αποστραγγιζόμενο νερό και να αποτελούν περιβαλλοντικούς κινδύνους εάν δεν διαχειριστούν σωστά. Αντίστοιχα, τα βαρέα μέταλλα (Rouff et. al., 2016), τα οποία μπορούν να μεταφέρονται στα μέσα καλλιέργειας και στο νερό άρδευσης, μπορεί να εντοπίζονται στα

υγρά απόβλητα των θερμοκηπίων. Επιπλέον, παθογόνα, όπως βακτήρια, ιοί και μύκητες, ενδέχεται επίσης να είναι παρόντα σε αυτά τα απόβλητα, προκαλώντας δυνητικούς κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία και την ασθένεια των φυτών εάν δεν αντιμετωπιστούν αποτελεσματικά.



Εικόνα 5. Σχηματική επισκόπηση του κύκλου του νερού του θερμοκηπίου (Πηγή: Guidelines for Greenhouse Water - Grodan).

Η ανεύρεση κατάλληλων στρατηγικών διαχείρισης αποβλήτων απαιτεί την κατανόηση των τύπων και των χαρακτηριστικών των υγρών αποβλήτων που παράγονται στο πλαίσιο των θερμοκηπίων. Μελετώντας τη σύνθεσή τους, την περιεκτικότητά τους σε θρεπτικά συστατικά και την πιθανή παρουσία ρύπων, οι καλλιεργητές θερμοκηπίων και οι επαγγελματίες στον τομέα της διαχείρισης απορριμμάτων μπορούν να αναπτύξουν αποτελεσματικές προσεγγίσεις για την επεξεργασία, ανακύκλωση και υπεύθυνη διάθεση αυτών των αποβλήτων. Επιπλέον, η αναγνώριση των πηγών και των χαρακτηριστικών αυτών των αποβλήτων βοηθά στον εντοπισμό ευκαιριών για τη μείωση των αποβλήτων, την ανάκτηση πόρων και την προώθηση βιώσιμων γεωργικών πρακτικών στα συστήματα καλλιέργειας θερμοκηπίων.

Περιβαλλοντικές επιπτώσεις των υγρών αποβλήτων θερμοκηπίου

Η διαχείριση των υγρών αποβλήτων που προέρχονται από θερμοκήπια αποτελεί ζήτημα κρίσιμης σημασίας για την ελαχιστοποίηση των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων που συνοδεύουν αυτά τα απόβλητα. Σε περίπτωση μη επεξεργασίας ή ανεπαρκούς διαχείρισης, τα εν λόγω απόβλητα μπορεί να προκαλέσουν αρνητικές επιπτώσεις στην ποιότητα του εδάφους, στις υδάτινες πηγές και στα γύρω οικοσυστήματα. Θα εξεταστούν οι περιβαλλοντικές συνέπειες που σχετίζονται με τα μη επεξεργασμένα ή ανεπαρκώς διαχειριζόμενα υγρά απόβλητα θερμοκηπίου, περιλαμβανομένης της έκλυσης θρεπτικών ουσιών, της μόλυνσης των υπόγειων υδάτων και των αρνητικών επιπτώσεων στη βιοποικιλότητα.

Μία από τις κύριες περιβαλλοντικές ανησυχίες που συνδέονται με τα υγρά απόβλητα θερμοκηπίου αφορά την έκλυση θρεπτικών ουσιών. Η υπερβολική παρουσία θρεπτικών ουσιών σε αυτά τα απόβλητα μπορεί να οδηγήσει στην έκλυση αυτών των θρεπτικών ουσιών, με αποτέλεσμα να απομακρύνονται από τα μέσα καλλιέργειας ή το έδαφος και να μεταφέρονται προς τα κάτω μέσω του εδαφικού προφίλ. Η έκλυση αυτή μπορεί να οδηγήσει στην απώλεια πολύτιμων θρεπτικών συστατικών, όπως το άζωτο (N), ο φώσφορος (P) και το κάλιο (K), τα οποία είναι αναγκαία για την ανάπτυξη των φυτών. Οι θρεπτικές ουσίες που εξορύσσονται μπορούν να ρυπάνουν τα υπόγεια και επιφανειακά υδατικά συστήματα, προκαλώντας ευτροφισμό και διαταραχή των υδάτινων οικοσυστημάτων. Οι υψηλές συγκεντρώσεις θρεπτικών ουσιών στα ύδατα μπορούν να προκαλέσουν υπερβολική ανάπτυξη φυκών και άλλων υδρόβιων φυτών, εξαντλώντας τα επίπεδα οξυγόνου και καταστρέφοντας το περιβάλλον για ψάρια και άλλους οργανισμούς.

Η ρύπανση των υπόγειων υδάτων αποτελεί μια άλλη πιθανή περιβαλλοντική συνέπεια που συνδέεται με τα υγρά απόβλητα του θερμοκηπίου. Εάν δεν αντιμετωπιστούν αποτελεσματικά, τα θρεπτικά συστατικά, τα φυτοφάρμακα και άλλοι ρύποι που περιέχουν μπορούν να διεισδύσουν στο έδαφος και να φτάσουν στα υπόγεια ύδατα. Αυτή η ρύπανση ενέχει κινδύνους για την ποιότητα και την ασφάλεια των υπόγειων υδάτινων πόρων, οι οποίοι είναι ζωτικής σημασίας για την παροχή πόσιμου νερού και την υποστήριξη του οικοσυστήματος. Τα υψηλά επίπεδα θρεπτικών ουσιών στα υπόγεια ύδατα μπορούν μακροπρόθεσμα να τα καταστήσουν ακατάλληλα για ανθρώπινη κατανάλωση και να συμβάλουν στην υποβάθμιση των υδρόβιων οικοτόπων.

Οι επιδράσεις των υγρών αποβλήτων θερμοκηπίου στην ποιότητα του εδάφους αναδεικνύονται ως ένα ζήτημα ανησυχίας στην επιστημονική κοινότητα. Η αναπροσαρμογή ή η απαράδεκτη απόρριψη αυτών των αποβλήτων μπορεί να προκαλέσει σημαντικές αλλαγές στις ιδιότητες του εδάφους, όπως το pH, η περιεκτικότητα σε θρεπτικά συστατικά και η μικροβιακή δραστηριότητα. Η υπερβολική συγκέντρωση θρεπτικών ουσιών μπορεί να ανατρέψει την ισορροπία των θρεπτικών συστατικών στο έδαφος και να προκαλέσει ανισορροπίες ή έλλειψη θρεπτικών συστατικών. Επιπλέον, η παρουσία ρύπων, όπως τα φυτοφάρμακα, στα υγρά απόβλητα του θερμοκηπίου, μπορεί να ασκήσει δυσμενή επίδραση στις μικροβιακές κοινότητες του εδάφους, τους ευεργετικούς οργανισμούς και τη συνολική υγεία του εδάφους. Η υποβάθμιση της ποιότητας του εδάφους μπορεί να έχει μακροπρόθεσμες επιπτώσεις στην ανάπτυξη των φυτών, την παραγωγικότητα των καλλιεργειών και τη λειτουργία του ευρύτερου οικοσυστήματος.

Η επιστημονική έρευνα που έχει διερευνήσει την επίδραση των υγρών αποβλήτων του θερμοκηπίου στους υδάτινους πόρους έχει παράσχει σημαντικές γνώσεις σχετικά με τις περιβαλλοντικές συνέπειες. Αυτές οι μελέτες έχουν εξετάσει τις επιπτώσεις της απόρριψης αποβλήτων σε κοντινά υδατικά συστήματα, περιλαμβάνοντας ποταμούς, λίμνες και ρέματα. Η έρευνα έχει αναδείξει τον κίνδυνο ρύπανσης του νερού, την αύξηση των θρεπτικών ουσιών και τις αλλοιωμένες χημικές ιδιότητες του νερού λόγω της παρουσίας υγρών αποβλήτων θερμοκηπίου. Οι πραγματοποιηθείσες έρευνες έχουν εξετάσει τη μεταφορά και την τύχη των ρύπων στα υδάτινα σώματα, αξιολογώντας τη δυνατότητά τους να συσσωρεύονται στα ιζήματα και να επηρεάζουν τα υδάτινα οικοσυστήματα.

Επιπλέον, η βιοποικιλότητα εντός και γύρω από τα συστήματα καλλιέργειας θερμοκηπίου μπορεί να διαταραχθεί από την απελευθέρωση μη επεξεργασμένων ή κακώς διαχειριζόμενων υγρών αποβλήτων θερμοκηπίου. Ο εμπλουτισμός θρεπτικών συστατικών που προκύπτει από την απόρριψη αποβλήτων μπορεί να αλλάξει τη σύνθεση και την ποικιλομορφία των φυτικών και ζωικών κοινοτήτων σε κοντινά υδάτινα σώματα. Οι υδρόβιοι οργανισμοί, συμπεριλαμβανομένων των ψαριών, των αμφιβίων και των ασπόνδυλων, μπορεί να είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι στις αλλαγές στην ποιότητα του νερού και στη διαθεσιμότητα θρεπτικών ουσιών. Επιπλέον, η παρουσία φυτοφαρμάκων και άλλων ρύπων στα υγρά απόβλητα του θερμοκηπίου μπορεί να έχει τοξικές επιδράσεις σε οργανισμούς και να διαταράξει τις οικολογικές αλληλεπιδράσεις.

Η κατανόηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των υγρών αποβλήτων θερμοκηπίου είναι ζωτικής σημασίας για την εφαρμογή αποτελεσματικών πρακτικών διαχείρισης αποβλήτων και το μετριασμό των πιθανών κινδύνων. Με την ανασκόπηση των υπαρχόντων μελετών για την ποιότητα του εδάφους, των υδάτινων πόρων και τη βιοποικιλότητα, είναι δυνατή η απόκτηση γνώσεων για τις συνέπειες της ανεπαρκούς διαχείρισης απορριμμάτων και ο εντοπισμός ευκαιριών για βιώσιμες προσεγγίσεις που ελαχιστοποιούν τις περιβαλλοντικές βλάβες. Η εφαρμογή κατάλληλων μεθόδων επεξεργασίας και διάθεσης, η βελτιστοποίηση πρακτικών διαχείρισης θρεπτικών ουσιών και η υιοθέτηση φιλικών προς το περιβάλλον εναλλακτικών λύσεων μπορούν να συμβάλλουν στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των υγρών αποβλήτων θερμοκηπίου και στην προώθηση βιώσιμων συστημάτων καλλιέργειας θερμοκηπίου.

Τεχνικές επεξεργασίας και διαχείρισης

Στην προσπάθεια αντιμετώπισης των προκλήσεων που συνδέονται με τα υγρά απόβλητα του θερμοκηπίου, έχουν αναπτυχθεί και εφαρμοστεί διάφορες τεχνικές επεξεργασίας και διαχείρισης. Ο σκοπός αυτών των τεχνικών είναι η μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των αποβλήτων, η ανάκτηση πολύτιμων θρεπτικών συστατικών, η προώθηση της επαναχρησιμοποίησης του νερού και η απομάκρυνση των ρύπων. Σε αυτή την ενότητα, θα εξεταστούν διάφορες προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία και τη διαχείριση των υγρών αποβλήτων του θερμοκηπίου, συμπεριλαμβανομένων φυσικών, χημικών και βιολογικών μεθόδων. Θα αναλυθεί η αποτελεσματικότητα, η αποδοτικότητα και οι πιθανές εφαρμογές τους, επισημαίνοντας περιπτώσεις μελέτης και καινοτόμες τεχνολογίες που εφαρμόζονται στο συγκεκριμένο τομέα.

Μέθοδοι φυσικής διαχείρισης:

Οι μέθοδοι φυσικής επεξεργασίας αντιπροσωπεύουν μια προσέγγιση που βασίζεται στη χρήση φυσικών διεργασιών για το διαχωρισμό, την αφαίρεση ή την τροποποίηση των χαρακτηριστικών των υγρών αποβλήτων που προέρχονται από τις εγκαταστάσεις θερμοκηπίου. Μέσω της εφαρμογής τεχνικών όπως η καθίζηση, η διήθηση και η φυγοκέντρωση, είναι δυνατή η απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών, οργανικής ύλης και άλλων σωματιδιακών υλικών από τα ρεύματα αποβλήτων. Επιπλέον, οι φυσικές διεργασίες

μπορούν να συνδράμουν στο διαχωρισμό υγρών και στερεών κλασμάτων, προκειμένου να ανακτηθούν θρεπτικά συστατικά και να χρησιμοποιηθούν εκ νέου τα υγρά και τα στερεά συστατικά για κατάλληλους σκοπούς. Ένα παράδειγμα αυτής της προσέγγισης είναι οι τεχνικές διαχωρισμού στερεού-υγρού, όπως η καθίζηση και η μηχανική αφυδάτωση, που μπορούν να επιτρέψουν την ανάκτηση στερεών υλικών πλούσιων σε θρεπτικά συστατικά, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για κομποστοποίηση ή άλλες ευεργετικές εφαρμογές. Η εφαρμογή των μεθόδων φυσικής διαχείρισης αποτελεί σημαντική συνεισφορά στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των υγρών αποβλήτων θερμοκηπίου και στην προώθηση βιώσιμων συστημάτων καλλιέργειας θερμοκηπίου. (Dunets and Zhen, 2014)

Μέθοδοι χημικής επεξεργασίας:

Οι μέθοδοι χημικής επεξεργασίας αποτελούν μια αποτελεσματική προσέγγιση για τη διαχείριση των υγρών αποβλήτων θερμοκηπίου, καθώς επιτρέπουν την τροποποίηση της σύνθεσης και των ιδιοτήτων τους μέσω της εφαρμογής χημικών ουσιών. Συγκεκριμένα, οι διαδικασίες πήξης και κροκιδώσης αποτελούν συνήθεις μεθόδους για τον ενισχυμένο διαχωρισμό των στερεών και υγρών συστατικών, καθώς και για την απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών και της οργανικής ύλης. Η χρήση χημικών πρόσθετων, όπως πηκτικά και κροκιδωτικά, συμβάλλει στην καθίζηση των μικροσωματιδίων, επιτρέποντας έτσι την απομάκρυνσή τους από τα ρεύματα αποβλήτων. Επιπλέον, οι χημικές επεξεργασίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη ρύθμιση των επιπέδων pH, την ενίσχυση της απομάκρυνσης των θρεπτικών συστατικών ή τη διευκόλυνση της καθίζησης συγκεκριμένων ρύπων. Ωστόσο, είναι απαραίτητο να ληφθεί ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή και τη δοσολογία των χημικών ουσιών προκειμένου να εξασφαλιστεί η αποτελεσματικότητά τους και να ελαχιστοποιηθούν οι πιθανές αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Η βέλτιστη εφαρμογή των μεθόδων χημικής επεξεργασίας απαιτεί τη συνεχή έρευνα και ανάπτυξη, καθώς και την εφαρμογή αυστηρών πρωτοκόλλων και προτύπων για την ασφαλή και βιώσιμη διαχείριση των υγρών αποβλήτων του θερμοκηπίου. (Ahdab et. al., 2021, Chen et. al. 2009)

Μέθοδοι βιολογικής επεξεργασίας:

Οι μέθοδοι βιολογικής επεξεργασίας αποτελούν αποδοτικές πρακτικές για τη διαχείριση των υγρών αποβλήτων του θερμοκηπίου. Αυτές οι μέθοδοι βασίζονται στη χρήση μικροοργανισμών ή βιολογικών διεργασιών για την αποικοδόμηση ή το μετασχηματισμό της οργανικής ύλης, των θρεπτικών ουσιών και των ρύπων που περιέχονται στα υγρά απόβλητα.

Μία από τις ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνικές βιολογικής επεξεργασίας είναι η αερόβια ή αναερόβια χώνευση. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει τη δραστηριότητα μικροοργανισμών που αποσυνθέτουν την οργανική ύλη και μετατρέπουν τα απόβλητα σε βιοαέριο και χωνεμένα υπόλειμμα, τα οποία είναι πλούσια σε θρεπτικά συστατικά. Αυτή η διαδικασία μειώνει το οργανικό φορτίο των αποβλήτων και παράλληλα παράγει ανανεώσιμη ενέργεια σε μορφή βιοαερίου.

Επιπλέον, οι τεχνητοί υδροβιότοποι και τα βιοφίλτρα αποτελούν επιπρόσθετες επιλογές για την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων του θερμοκηπίου. Αυτές οι τεχνολογίες βασίζονται στην εκμετάλλευση των φυσικών διεργασιών των φυτών, των μικροοργανισμών και των υλικών υποστρώματος για την απομάκρυνση των ρύπων και τη βελτίωση της ποιότητας του νερού. Αυτή η ολοκληρωμένη προσέγγιση συμβάλλει στη μείωση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης και στην αειφόρο διαχείριση των υγρών αποβλήτων του θερμοκηπίου. Για την επιτυχή υλοποίηση των μεθόδων βιολογικής επεξεργασίας, απαιτείται συνεχής έρευνα και ανάπτυξη, καθώς και η τήρηση αυστηρών πρωτοκόλλων και προτύπων για την ασφαλή και αποτελεσματική διαχείριση των υγρών αποβλήτων του θερμοκηπίου. (Berghage et. al., 1999, Seo et. al., 2009)

Ανάκτηση και εκ νέου χρήση θρεπτικών συστατικών:

Από τους πλέον κεντρικούς άξονες που αφορούν τη διαχείριση των υγρών αποβλήτων του θερμοκηπίου, είναι το γεγονός ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν εκ νέου τα θρεπτικά συστατικά. Πιο συγκεκριμένα, τα απόβλητα περιέχουν συχνά ποικίλα πολύτιμα θρεπτικά συστατικά, τα οποία μέσω της ανακύκλωσης είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν εκ νέου για γεωργικές ή και άλλες εφαρμογές. Με τον τρόπο αυτό, προωθείται η διατήρηση των πόρων και υιοθετούνται οι βασικές αρχές της κυκλικής οικονομίας. Στην παρούσα ενότητα αναλύονται διάφορες τεχνολογίες και πρακτικές που βοηθούν στην ανάκτηση θρεπτικών ουσιών από υγρά απόβλητα θερμοκηπίου.

Αναερόβια Χώνευση:

Ως αναερόβια χώνευση, ορίζεται η βιολογική διαδικασία που στόχο έχει τη διάσπαση της οργανικής ύλης απουσία οξυγόνου. Η διαδικασία αυτή μειώνει αισθητά τον όγκο του οργανικού φορτίου των αποβλήτων παράγοντας ταυτόχρονα ενός είδους ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, το βιοαέριο, καθώς και πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά χωνεμένο υπόλειμμα. Με

τη σειρά του το υπόλειμμα αυτό, είναι δυνατό να υποστεί εκ νέου επεξεργασία και να χρησιμοποιηθεί ως λίπασμα στα διάφορα γεωργικά συστήματα, ολοκληρώνοντας από τη μια πλευρά τον κύκλο των θρεπτικών συστατικών και μειώνοντας από την άλλη την εξάρτηση από συνθετικά λιπάσματα.

Κομποστοποίηση:

Ως κομποστοποίηση ορίζεται η φυσική διαδικασία αποσύνθεσης οργανικών αποβλήτων σε βελτιωτικό εδάφους, το κομπόστ που είναι πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά. Συνδυάζοντας τα οργανικά απόβλητα με άλλου είδους οργανικά υλικά (λόγου χάριν άχυρο, ροκανίδια), η κομποστοποίηση δρα σταθεροποιητικά με την έννοια ότι μειώνει τον όγκο των απορριμμάτων, μετατρέποντας τα σε πολύτιμο προϊόν που μπορεί να βελτιώσει την υγεία γεωργικών και κηπευτικών χωραφιών, καθώς και τη γονιμότητα του εδάφους.

Εκχύλιση θρεπτικών συστατικών:

Στις τεχνικές εξαγωγής θρεπτικών ουσιών περιλαμβάνονται μεταξύ άλλων ο διαχωρισμός και η ανάκτηση συγκεκριμένων ποικίλων θρεπτικών συστατικών, όπως για παράδειγμα ο φώσφορος, το άζωτο, το κάλιο. Οι τεχνικές αυτές βασίζονται σε φυσικές, χημικές ή βιολογικές διεργασίες για να μπορέσουν να εξάγουν και παράλληλα να συμπυκνώσουν τα θρεπτικά τους συστατικά ώστε να είναι έτοιμα για επαναχρησιμοποίηση. Στην περίπτωση αυτή, τα συστατικά τα οποία προκύπτουν από τη διαδικασία χρησιμοποιούνται ως πρώτες ύλες, για λίπασμα ή ακόμα δύνανται να αποτελέσουν μέρος από εξειδικευμένα θρεπτικά διαλύματα αναφορικά με υδροπονικά συστήματα ή συστήματα λίπανσης.

Μελέτες περίπτωσης και καινοτόμες τεχνολογίες:

Υπάρχουν πολλές μελέτες γύρω από το ζήτημα των καινοτόμων τεχνολογιών αναφορικά με την επεξεργασία και τη διαχείριση των υγρών αποβλήτων θερμοκηπίου, παρουσιάζοντας ρεαλιστικές εφαρμογές και εξελίξεις στον τομέα. Τέτοιες είναι λόγου χάριν οι πάρα πολύ καινοτόμες διεργασίες οξειδωσης τύπου οζονισμού και απολύμανσης με υπεριώδη ακτινοβολία (UV). Οι διεργασίες αυτές, έχουν δείξει υποσχόμενα αποτελέσματα όσον αφορά την απομάκρυνση παθογόνων μικροοργανισμών και ρύπων από τα ρεύματα υγρών αποβλήτων. Από την άλλη πλευρά, υπάρχουν και οι τεχνολογίες φιλτραρίσματος μεμβράνης, στις οποίες περιλαμβάνεται και εκείνη της αντίστροφης ώσμωσης (Jamal-Uddin

et. al., 2022), καθώς και της νανοδιήθησης, οι οποίες κατά βάση έχουν βοηθήσει στο να διαχωριστεί και να καθαριστεί κατά περιπτώσεις το νερό από τα απόβλητα του θερμοκηπίου. Η ικανότητά τους αυτή, έχει επιτρέψει την εκ νέου χρήση του νερού και την ανάκτηση των θρεπτικών του συστατικών. Επιπρόσθετα, διαδικασίες όπως μικροβιακές κυψέλες καυσίμου, ηλεκτροπήξη, κ.α που είναι αναδύομενες, διερευνώνται για τις παροχές τους στον τρόπο επεξεργασίας αποβλήτων, στην ανάκτηση θρεπτικών συστατικών και στην παραγωγή ενέργειας. (Candra, 2022)

Μέσω της εξέτασης των διαφόρων τεχνικών επεξεργασίας και διαχείρισης, τον τρόπο με τον οποίο λειτουργούν και εφαρμόζονται, το ποσοστό αποτελεσματικότητάς τους σε πραγματικές συνθήκες, είναι δυνατή η εμβάθυνση στην αναζήτηση ρεαλιστικών λύσεων αναφορικά με τη διαχείριση υγρών αποβλήτων θερμοκηπίου. Αυτό συνεπάγεται ότι η εφαρμογή κατάλληλων μεθόδων επεξεργασίας, οι οποίες έχουν προσαρμοστεί κατάλληλα στα ειδικά χαρακτηριστικά των υγρών αποβλήτων, είναι ικανή να βοηθήσει σε μια σειρά από ενέργειες, όπως είναι για παράδειγμα η ανάκτηση θρεπτικών συστατικών, η μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και η προώθηση της αποδοτικότητας των πόρων. Τέλος, η συνολική αποτελεσματικότητα των τεχνικών διαχείρισης υγρών αποβλήτων θερμοκηπίου ενισχύεται μέσα από την ενσωμάτωση πολλαπλών προσεγγίσεων επεξεργασίας και την υιοθέτηση καινοτόμων τεχνολογιών.

Βέλτιστες πρακτικές διαχείρισης:

Με στόχο τη διασφάλιση της αποτελεσματικής διαχείρισης υγρών αποβλήτων, θα πρέπει να γίνει εφαρμογή μιας σειράς από βέλτιστες πρακτικές διαχείρισης, οι οποίες θα σχετίζονται με συγκεκριμένους παράγοντες. Τέτοιοι είναι η τοποθεσία, ο τύπος της καλλιέργειας, οι συνθήκες του κλίματος, κ.α. Παρακάτω τίθενται κάποια κεντρικά στοιχεία που αφορούν τις βέλτιστες πρακτικές διαχείρισης:

Διαχείριση απορριμμάτων και αποθήκευση:

Αναφορικά με τις πρακτικές διαχείρισης και τις συνθήκες και πρακτικές αποθήκευσης των απορριμμάτων θα πρέπει να ακολουθούνται ορισμένες τακτικές. Απώτερος στόχος αυτής της διαχείρισης απορριμμάτων είναι η μείωση του κινδύνου έκπλυσης θρεπτικών ουσιών, σε συνδυασμό με την παραγωγή οσμών και τη μόλυνση του περιβάλλοντος. Κάτι τέτοιο φυσικά

προϋποθέτει την ορθή συλλογή των υγρών αποβλήτων, τον περιορισμό και την αποθήκευσή τους με βάση καλοσχεδιασμένα συστήματα που δεν επιτρέπουν διαρροές ή και υπερχειλίσεις.

Με την αρμόζουσα τακτική εφαρμογής των κατάλληλων διεργασιών διαχείρισης και επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, κυρίως με βάση τα χαρακτηριστικά τους, είναι πιθανό να μειωθούν σημαντικά μελλοντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Στο σχεδιασμό αυτό, περιλαμβάνονται μεταξύ άλλων φυσικές, χημικές ή βιολογικές μέθοδοι επεξεργασίας που απομακρύνουν τους περιττούς ρύπους, ενώ συνάμα διευκολύνουν την ανάκτηση των θρεπτικών συστατικών.

Ο γεωργικός τομέας είναι ο πρώτος ανάμεσα στους τομείς που ευθύνεται για τη χρήση του μεγαλύτερου όγκου του νερού, φτάνοντας σε ποσοστό κατανάλωσης έως και 69% του γλυκού νερού. Παράλληλα, οι θερμοκηπιακές εκμεταλλεύσεις συνιστούν μια από τις τρέχουσες λύσεις που χρησιμοποιείται για τις αρδευτικές ανάγκες μειώνοντας τη χρήση νερού και γης για αρδευόμενη γεωργία. Επίσης, οι θερμοκηπιακές εκμεταλλεύσεις αυξάνουν τον έλεγχο που απαιτείται για τη δημιουργία κατάλληλων συνθηκών για καλλιέργεια, χωρίς εκείνες να εξαρτώνται από περιβαλλοντικούς παράγοντες, επιτρέποντας μάλιστα τον περιορισμό των γεωργικών ρύπων.

Ένας από τους κεντρικούς στόχους της βελτιστοποίησης αναφορικά με τις λειτουργίες ενός θερμοκηπίου είναι η ελάχιστη απόρριψη υγρών (Ahdab et. al., 2021). Ιδιαίτερα, υπάρχουν θερμοκήπια σε ευρωπαϊκές χώρες όπως λόγω χάριν στην Ολλανδία, που έχουν ήδη αρχίσει να χρησιμοποιούν συστήματα άρδευσης Minimal liquid discharge (MLD) με στόχο τη μείωση τόσο του περιβαλλοντικού τους αποτυπώματος, όσο και του λειτουργικού κόστους. Το MLD ως σύστημα, έχει ως στόχο να ελαχιστοποιεί τον όγκο των υγρών αποβλήτων θερμοκηπίου που διατίθενται στο περιβάλλον, ενώ παράλληλα μεγιστοποιεί τον όγκο του νερού που χρησιμοποιείται εκ νέου για την ανάπτυξη καλλιεργειών.

Για την επίτευξη του συστήματος MLD, τα θερμοκήπια πρέπει να διοχετεύουν εκ νέου τα υγρά απόβλητα εφόσον έχουν περάσει το στάδιο απολύμανσης ένεκα της σχετικής με την εξάπλωση ασθενειών στις καλλιέργειες πρόληψης και της ανάπτυξης βιοφίλμ. Μάλιστα, είναι συχνό φαινόμενο να επεξεργάζονται προτού αναμειχθούν με το γλυκό νερό για να απομακρυνθούν μέχρι και τα τελευταία συστατικά που μπορεί να βλάπτουν την ανάπτυξη των καλλιεργειών.

Υπάρχουν δύο κεντρικά ζητήματα αναφορικά με την ανακύκλωση του νερού στα θερμοκήπια. Αρχικά η ανακυκλοφορία του νερού, η οποία συχνά είναι ικανή να οδηγήσει σε αναδιοργάνωση της διαδικασίας σχετικά με την ποιότητα του νερού της πηγής. Τα επίπεδα συγκέντρωσης του λιπάσματος που απομένει είναι κυμαινόμενα, γεγονός που καθιστά αδύνατη τη διατήρηση μιας σταθερής σύνθεσης νερού άρδευσης χωρίς αναπροσαρμογές στο ρυθμό που προστίθεται το λίπασμα, σε συνδυασμό πάντα και με την ανάμειξη τους με το γλυκό νερό ενισχυμένο με το λίπασμα.

Δεύτερον, τα ιόντα που βρίσκονται στο νερό και αδυνατούν να απορροφηθούν από τις καλλιέργειες συγκεντρώνονται στο βρόχο επαναχρησιμοποίησης. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι ένα ακόμα κύριο εμπόδιο στα συστήματα ανακυκλοφορίας θερμοκηπίου είναι η συσσώρευση του νατρίου, καθώς υπάρχουν καλλιέργειες που είναι δυσανεκτικές σε αυτό.

Είναι συχνό φαινόμενο τα θερμοκήπια να εφαρμόζουν πλέον ένα είδος πιλοτικού προγράμματος αντίστροφης ώσμωσης (RO), με στόχο τη μείωση στα επίπεδα νατρίου και τη δημιουργία επαναχρησιμοποιούμενου νερού σταθερής ποιότητας. Η διαδικασία αυτή, είναι μια χρησιμοποιούμενη τεχνολογία αφαλάτωσης, που λειτουργεί στο βρόχο ανακυκλοφορίας τους αφαιρώντας όλα τα ιοντικά συστατικά από τη ροή των λυμάτων, μεταξύ των οποίων και το μονοσθενές νάτριο. Το συστατικό αυτό είναι άκρως επιβλαβές για τις καλλιέργειες. Επίσης, αφαιρεί διάφορα φυτικά θρεπτικά συστατικά που είναι μονοσθενή (K^+ , NO_3^-) ή και πολυσθενή (Ca_2^+ , Mg_2^+ , SO_4^{2-} , PO_4^{3-}). Επίσης, οι απαιτήσεις για λίπασμα αυξάνονται μετά την απομάκρυνση των θρεπτικών συστατικών που υπάρχουν στο επαναχρησιμοποιούμενο νερό, καθώς αυξάνονται οι ανάγκες για τη μετατροπή του νερού πηγής σε νερό άρδευσης.

Μια εναλλακτική διεργασία μεμβράνης για αφαλάτωση είναι η μονοσθενής επιλεκτική ηλεκτροδιάλυση (Monovalent selective electro dialysis - MSED), η οποία ταιριάζει περισσότερο στις ανάγκες των θερμοκηπίων. Πιο συγκεκριμένα, η MSED βοηθά στην επιλεκτική απομάκρυνση μονοσθενών ιόντων, όπως λόγω χάριν το νάτριο, ενώ παράλληλα διατηρεί πολυσθενείς διαλυμένες ουσίες σε διάλυμα. Άμεσο αποτέλεσμα αυτού είναι, η MSED να εφαρμόζεται στην έξοδο του νερού του θερμοκηπίου με στόχο την αποτροπή της συσσώρευσης νατρίου στα απόβλητα για να μην υπάρχει μεγάλη απώλεια υδάτων, προτού την ανακυκλοφορία. Αντίστοιχα με την αντίστροφη ώσμωση (RO), η MSED, εξάγει μονοσθενή θρεπτικά συστατικά πλην του νατρίου, συνεχίζει να διατηρεί τεχνολογία με πολυσθενή

θεραπευτικά συστατικά. Από την άλλη πλευρά, η MSED αντίθετα με το RO, έχει χαμηλότερες απαιτήσεις σε λίπασμα, αλλά μεγαλύτερη εξοικονόμηση κόστους. Στον κατάλογο με τα πλεονεκτήματα της MSED, περιλαμβάνονται η χαμηλότερη ευαισθησία στη ρύπανση της μεμβράνης, η μεγαλύτερη διάρκεια ζωής της μεμβράνης ακόμη και η χαμηλότερη παραγωγή άλμης, ενώ μάλιστα η MSED λειτουργεί με ανάκτηση πάνω από 90% συγκριτικά με το 80% της RO.

Σε θερμοκήπια που δεν έχουν επιτύχει MLD, μια άλλη βιώσιμη εφαρμογή της MSED είναι η απομάκρυνση των νιτρικών, του πρωτογενούς γεωργικού ρύπου, από τα λύματα του θερμοκηπίου που είναι προς διάθεση. Σε όλο τον κόσμο υπάρχουν αυστηροί κανονισμοί για τη μείωση των επιπέδων νιτρικών αλάτων στα γεωργικά λύματα, συμπεριλαμβανομένης της Οδηγίας της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τα νιτρικά άλατα και του Εθνικού Συστήματος Εξάλειψης Ρύπων στη Βόρεια Αμερική. Η MSED διαχωρίζει τα λύματα θερμοκηπίου σε δύο ρεύματα εξόδου: ένα ρεύμα εκροής χαμηλής περιεκτικότητας σε μονοσθενή νιτρικά και νάτριο που είναι έτοιμο για διάθεση και ένα ρεύμα άλμης χαμηλού όγκου που υφίσταται συμβατική απονιτροποίηση πριν από την απόρριψη. Η συμβατική διεργασία περιλαμβάνει βιολογική απονιτροποίηση των λυμάτων σε μεγάλες λεκάνες αντίδρασης, φίλτρα που ρέουν ή τεχνητούς υδροβιότοπους. Αυτή η επεξεργασία αυξάνει τόσο το κόστος κεφαλαίου, όπως η χρήση γης, όσο και το λειτουργικό κόστος, όπως οι άδειες και η συνεχής παρακολούθηση και αναφορά των λυμάτων. Η εφαρμογή της MSED μπορεί να μειώσει σημαντικά το σχετικό κόστος απονιτροποίησης με τη μείωση άνω του 90% στην ποσότητα του νερού που υπόκειται σε απονιτροποίηση. Επιπλέον, η υιοθέτηση της MSED για την απομάκρυνση αζώτου από τα αστικά λύματα, μέσω της μείωσης των επιπέδων αμμωνίου, αποτελεί λιγότερο δαπανηρή λύση σε σχέση με τις υπάρχουσες τεχνολογίες απονιτροποίησης, τόσο σε κεφαλαιουχικά, όσο και σε λειτουργικά έξοδα. Επιπλέον, το ρεύμα συμπυκνωμένου νιτρικού που παράγεται από το σύστημα MSED παρέχει την ευκαιρία ανάκτησης νιτρικών για χρήση στην παραγωγή λιπασμάτων.

Σχεδιασμός για συγκεκριμένο χώρο:

Κάθε λειτουργία θερμοκηπίου παρουσιάζει μοναδικά χαρακτηριστικά και οι προσεγγίσεις για τη διαχείριση αποβλήτων πρέπει να προσαρμόζονται ανάλογα με τις ειδικές συνθήκες της τοποθεσίας, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες, όπως η διαθέσιμη έκταση, η προσέγγιση προς υδάτινα σώματα και οι τοπικοί κανονισμοί. Ο ειδικός σχεδιασμός της

τοποθεσίας εξασφαλίζει την αρμονία των πρακτικών διαχείρισης αποβλήτων με τους γενικούς περιβαλλοντικούς στόχους και την αειφορία της επιχείρησης.

Εκπαίδευση και κατάρτιση:

Η προώθηση της ευαισθητοποίησης, της εκπαίδευσης και της εκπαιδευτικής προετοιμασίας ανάμεσα στους χειριστές και το προσωπικό του θερμοκηπίου είναι ζωτικής σημασίας για την επιτυχή εφαρμογή των βέλτιστων πρακτικών διαχείρισης. Αυτό περιλαμβάνει την παροχή εκπαίδευσης σχετικά με το χειρισμό των απορριμμάτων, τις τεχνικές επεξεργασίας και τη συμμόρφωση προς τους κανονισμούς. Η τακτική επικοινωνία και η ανταλλαγή γνώσεων μπορούν να αναπτύξουν μια κουλτούρα υπεύθυνης διαχείρισης απορριμμάτων στον τομέα των θερμοκηπίων.

Παρεμβάσεις πολιτικής:

Οι παρεμβάσεις πολιτικής διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην προώθηση πρακτικών βιώσιμης διαχείρισης απορριμμάτων στις θερμοκηπιακές εκμεταλλεύσεις. Οι κυβερνήσεις και οι ρυθμιστικοί φορείς μπορούν να θεσπίσουν κατευθυντήριες γραμμές, πρότυπα και κίνητρα για να ενθαρρύνουν την υιοθέτηση βέλτιστων πρακτικών διαχείρισης, να προωθήσουν την έρευνα και την καινοτομία και να διασφαλίσουν τη συμμόρφωση με τους περιβαλλοντικούς κανονισμούς.

Ενσωματώνοντας αυτές τις βέλτιστες πρακτικές διαχείρισης στο χειρισμό, την επεξεργασία και τη διάθεση υγρών αποβλήτων θερμοκηπίου, οι φορείς εκμετάλλευσης θερμοκηπίου μπορούν να ελαχιστοποιήσουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, να βελτιώσουν την αποδοτικότητα των πόρων και να συμβάλλουν στη βιώσιμη ανάπτυξη του κλάδου.

3. Επισκόπηση της βιβλιογραφίας για απόβλητα υδροπονικών καλλιεργειών

Η υδροπονική γεωργία κερδίζει ολοένα και μεγαλύτερη προσοχή ως βιώσιμη και αποτελεσματική μέθοδος φυτικής παραγωγής. Περιλαμβάνει την καλλιέργεια φυτών σε υδάτινα διαλύματα πλούσια σε θρεπτικά συστατικά, εξαλείφοντας την ανάγκη για χώμα. Ενώ η υδροπονία προσφέρει πολλά οφέλη, όπως η εξοικονόμηση νερού και η βελτιωμένη απόδοση των καλλιεργειών, παράγει επίσης απόβλητα υλικά που απαιτούν προσεκτική διαχείριση για την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Σε αυτό το υποκεφάλαιο, θα διερευνηθεί η σημασία των αποβλήτων υδροπονικών καλλιεργειών στο ευρύτερο πλαίσιο της υδροπονικής γεωργίας. Θα συνοψιστεί η ανάγκη για αποτελεσματικές πρακτικές διαχείρισης αποβλήτων για την αντιμετώπιση των προκλήσεων που σχετίζονται με τη διάθεση απορριμμάτων από υδροπονικές καλλιέργειες και τις πιθανές περιβαλλοντικές συνέπειες.

Ο πρωταρχικός σκοπός αυτής της βιβλιογραφικής ανασκόπησης είναι να παρέχει μια εις βάθος κατανόηση της υπάρχουσας έρευνας και των ευρημάτων που σχετίζονται με τα απόβλητα υδροπονικών καλλιεργειών. Εξετάζοντας τη διαθέσιμη βιβλιογραφία, γίνεται επισκόπηση των χαρακτηριστικών των υδροπονικών αποβλήτων, των περιβαλλοντικών επιπτώσεών τους, των υπάρχουσών τεχνικών διαχείρισης αποβλήτων και τους τομείς για περαιτέρω έρευνα.

Για να επιτευχθεί αυτό, η ανασκόπηση της βιβλιογραφίας θα εμβαθύνει σε διάφορες ερευνητικές μελέτες, επιστημονικά άρθρα και δημοσιεύσεις που αφορούν τα απόβλητα υδροπονικών καλλιεργειών. Αναλύοντας και συνθέτοντας τις πληροφορίες που παρουσιάζονται σε αυτές τις πηγές, θα παρουσιαστεί μια ολοκληρωμένη επισκόπηση των τρεχουσών κενών γνώσης και έρευνας στο πεδίο.

Η δομή αυτού του κεφαλαίου θα οργανωθεί σε ενότητες που επικεντρώνονται σε συγκεκριμένες πτυχές των αποβλήτων υδροπονικών καλλιεργειών. Αυτές οι ενότητες θα περιλαμβάνουν μια ανασκόπηση των τύπων και της σύνθεσης των υδροπονικών αποβλήτων, των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, των τεχνικών διαχείρισης αποβλήτων και των ευκαιριών για ανάκτηση θρεπτικών συστατικών. Κάθε ενότητα θα παρέχει μια κριτική ανάλυση της

υπάρχουσας βιβλιογραφίας, επισημαίνοντας βασικά ευρήματα, μεθοδολογίες και περιορισμούς προηγούμενων μελετών (Richa et al., 2020).

Τα υδροπονικά συστήματα μπορούν να χωριστούν σε ανοιχτά συστήματα, όπου το πλεονάζον θρεπτικό διάλυμα δεν ανακυκλώνεται και σε κλειστά συστήματα, όπου η περίσσεια ροή των θρεπτικών ουσιών από τις ρίζες συλλέγεται και ανακυκλώνεται πίσω στο σύστημα (Mohammed 2018). Η καλλιέργεια θερμοκηπιακών καλλιέργειών σε κλειστά υδροπονικά συστήματα μπορεί να μειώσει ουσιαστικά τη ρύπανση των υδάτινων πόρων από νιτρικά και φωσφορικά άλατα στα λύματα λίπανσης, ενώ συμβάλλει σε αισθητή μείωση της κατανάλωσης νερού και λιπασμάτων (Rufi-Salis et al. 2020).

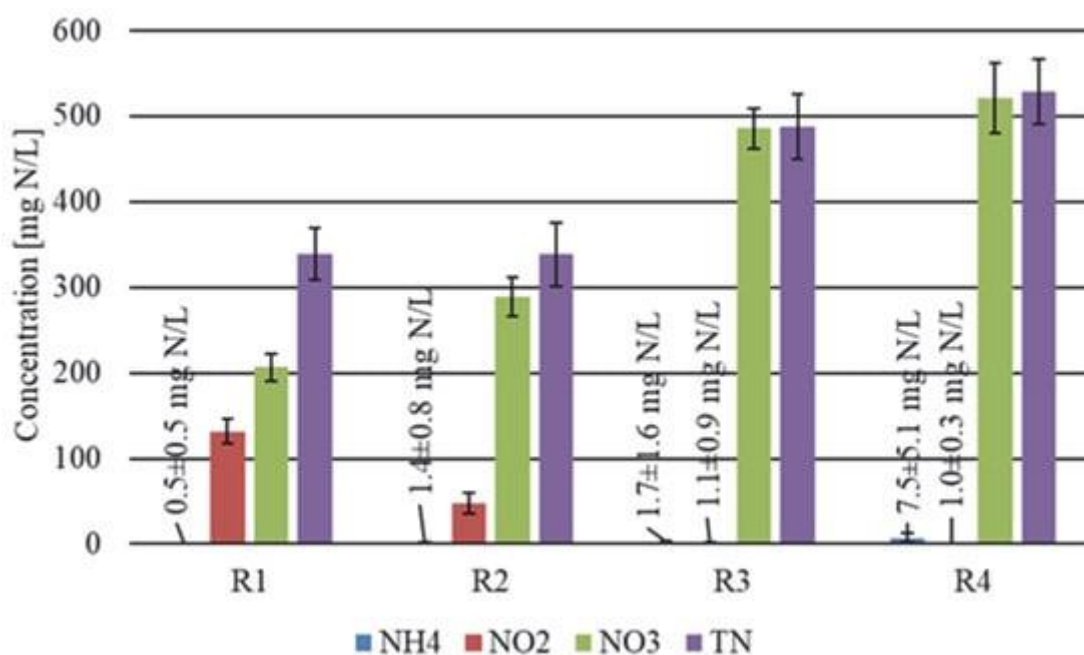
Από την άλλη πλευρά, ένας από τους κύριους παράγοντες που εμποδίζουν τη χρήση αυτού του συστήματος είναι η αλατότητα του νερού άρδευσης (η συσσώρευση ιόντων αλατιού στο ανακυκλωμένο θρεπτικό διάλυμα, δηλαδή υψηλές συγκεντρώσεις NaCl) (Savvas et al. 2007). Πράγματι, έχουν προταθεί αρκετά μοντέλα για την προσομοίωση της συσσώρευσης αλατότητας και της πρόσληψης θρεπτικών συστατικών στα φυτά σε υδροπονικό σύστημα με ανακύκλωση θρεπτικών ουσιών που μπορεί να αυξήσει σημαντικά την ακρίβεια των λειτουργιών, αποτρέποντας έτσι αποτελεσματικά την εξάντληση των θρεπτικών συστατικών, ενώ ταυτόχρονα ελαχιστοποιεί τη συνολική συγκέντρωση αλάτων (Carmassi et al. 2005).

Πρόσφατα, υπάρχουν πολλές εξειδικευμένες ανασκοπήσεις που περιγράφουν τη χρήση του υδροπονικού συστήματος ως αποκεντρωμένου συστήματος για την επεξεργασία λυμάτων από διαφορετικές πηγές (Magwaza et al. 2020). Ωστόσο, η υπάρχουσα βιβλιογραφία για την επεξεργασία των υδροπονικών λυμάτων πριν από την απελευθέρωσή τους στο περιβάλλον είναι εξαιρετικά περιορισμένη.

Τύποι αποβλήτων υδροπονικών καλλιέργειών

Τα οργανικά απόβλητα που προέρχονται από υδροπονικές καλλιέργειες αποτελούνται από διάφορα στοιχεία, όπως φυτικά υπολείμματα, ριζικά συστήματα και αχρησιμοποίητα φυτικά υλικά. Επιπλέον, τα θρεπτικά διαλύματα αποτελούνται από υπερβολικά κορεσμένα ή εξαντλημένα θρεπτικά συστατικά που απαιτούν κατάλληλη διαχείριση. Τέλος, το νερό αποστράγγισης αναφέρεται στο νερό που περιέχει διαλυμένα θρεπτικά συστατικά και άλλους ρύπους.

Η σύνθεση αυτών των υδροπονικών φυτικών αποβλήτων περιλαμβάνει οργανική ύλη, φυτική βιομάζα, υπολείμματα ριζών και οργανικές ενώσεις, καθώς και θρεπτικά συστατικά, όπως άζωτο, φώσφορο, κάλιο και άλλα στοιχεία που είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη των φυτών.



Εικόνα 6. Συγκέντρωση διαφόρων μορφών αζώτου σε απόβλητα υδροπονίας, (Bryszewski et.al., 2021).

Επίσης, οι προσμείξεις μπορεί να περιλαμβάνουν φυτοφάρμακα, ζιζανιοκτόνα και άλλα χημικά υπολείμματα.

Τα φυτά χρειάζονται 16 στοιχεία για να μπορέσουν να αναπτυχθούν. Αυτά τα στοιχεία είναι ο άνθρακας (C), το υδρογόνο (H), το οξυγόνο (O), το άζωτο (N), ο φώσφορος (P), το κάλιο (K), το ασβέστιο (Ca), το μαγνήσιο (Mg), το θείο (S), ο σίδηρος (Fe), το μαγγάνιο (Mn), το βόριο (B), ο ψευδάργυρος (Zn), ο χαλκός (Cu), το μολυβδαίνιο (Mo) και το χλώριο (Cl). Το φυτό είναι σε θέση να προσλαμβάνει άνθρακα και οξυγόνο από τον περιβάλλοντα αέρα και υδρογόνο από το νερό άρδευσης. Τα άλλα δεκατρία στοιχεία πρέπει να προστεθούν στο νερό άρδευσης. Τα στοιχεία μπορούν να προστεθούν μέσω ενός υδροπονικού διαλύματος θρεπτικών συστατικών, στο οποίο τα διάφορα στοιχεία είναι παρόντα στις σωστές αναλογίες. Είναι σημαντικό να είναι γνωστός ποιος είναι ο ρόλος του κάθε στοιχείου στην ανάπτυξη των φυτών που έχουν επιλεγεί για καλλιέργεια, προκειμένου να προσαρμοστεί το μείγμα θρεπτικών συστατικών στις ανάγκες του φυτού. (Groda)

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη δημιουργία απορριμμάτων περιλαμβάνουν την επιλογή καλλιέργειών με διαφορετικούς ρυθμούς παραγωγής απορριμμάτων και σύνθεσης, τη διαχείριση των θρεπτικών ουσιών που μπορεί να επηρεάσει την ποσότητα των αποβλήτων, το σχεδιασμό του συστήματος υδροπονικής καλλιέργειας που επηρεάζει την παραγωγή απορριμμάτων, καθώς και τον κύκλο ζωής της καλλιέργειας που οδηγεί σε ποικίλες ποσότητες και είδη απορριμμάτων.

Παρά το γεγονός ότι η παραγωγή και η συσσώρευση απορριμμάτων είναι αναπόφευκτη λόγω των συνεχών κύκλων ανάπτυξης και συγκομιδής στα υδροπονικά συστήματα, ένα μέρος αυτών των αποβλήτων μπορεί να ανακυκλωθεί ή να επαναχρησιμοποιηθεί εντός του συστήματος με σκοπό τη μείωση της παραγωγής και της συσσώρευσης απορριμμάτων (Prazeres et. al., 2017, Mielcarek et. al., 2019).

Η κατανόηση των τύπων και της σύνθεσης των αποβλήτων που προέρχονται από υδροπονικές καλλιέργειες είναι ζωτικής σημασίας για την ανάπτυξη αποτελεσματικών στρατηγικών διαχείρισης αποβλήτων. Οι ερευνητές και οι επαγγελματίες μπορούν, μέσω της ανάλυσης και της χαρακτηριστικής περιγραφής αυτών των αποβλήτων υλικών, να αναγνωρίσουν τις βέλτιστες προσεγγίσεις για την επεξεργασία, ανακύκλωση ή ασφαλή απόρριψή τους.

Επιπλέον, η γνώση των παραγόντων που επηρεάζουν την παραγωγή αποβλήτων μπορεί να συμβάλει στη βελτιστοποίηση των υδροπονικών συστημάτων με σκοπό την ελαχιστοποίηση της παραγωγής αποβλήτων. Μέσω της προσαρμογής της διαχείρισης των θρεπτικών ουσιών, της επιλογής καλλιέργειών και του σχεδιασμού του συστήματος, είναι δυνατό να μειωθεί η ποσότητα και ο αντίκτυπος των αποβλήτων που προκύπτουν από υδροπονικές καλλιέργειες.

Περιβαλλοντικές επιπτώσεις υδροπονικών αποβλήτων καλλιέργειών

Η ενότητα εστιάζει στις πιθανές συνέπειες των μη επεξεργασμένων ή κακοδιαχειριζόμενων αποβλήτων που παράγονται σε υδροπονικά συστήματα. Ερευνά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τις προκλήσεις που σχετίζονται με τα απόβλητα υδροπονικών καλλιέργειών και διερευνά τις επιπτώσεις τους στο έδαφος, τους υδάτινους πόρους και τα γύρω οικοσυστήματα.

Ένας από τους κύριους παράγοντες που επηρεάζουν το περιβάλλον είναι η έκπλυση των θρεπτικών ουσιών και η απορροή. Η υπερβολική εφαρμογή ή η κακή διαχείριση των θρεπτικών συστατικών μπορεί να οδηγήσει στην έκπλυση τους, με αποτέλεσμα τη ρύπανση των υπόγειων και επιφανειακών υδάτων. Αυτό μπορεί να συμβάλει στον ευτροφισμό και την άνθηση των φυκών, με αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον.

Επίσης, η μη σωστή διαχείριση των υδροπονικών αποβλήτων μπορεί να οδηγήσει στη ρύπανση των υδάτων. Το νερό αποστράγγισης, πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά, μπορεί να μεταφέρει ρύπους σε κοντινές πηγές νερού, επηρεάζοντας τα υδάτινα οικοσυστήματα.

Η ακατάλληλη διάθεση ή ενσωμάτωση των αποβλήτων υδροπονικών καλλιεργειών στο έδαφος μπορεί να οδηγήσει στην υποβάθμιση του εδάφους. Η συσσώρευση οργανικής ύλης και θρεπτικών ουσιών μπορεί να αλλοιώσει τη σύνθεση του εδάφους και να επηρεάσει τη γονιμότητα του και τη μικροβιακή δραστηριότητα.

Τέλος, οι ανεπαρκείς πρακτικές διαχείρισης αποβλήτων μπορούν να έχουν αρνητικές επιπτώσεις στη βιοποικιλότητα των περιοχών υδροπονικής καλλιέργειας και του περιβάλλοντος γενικότερα. Η απορροή θρεπτικών ουσιών και η ρύπανση μπορούν να προκαλέσουν βλάβες στους υδρόβιους οργανισμούς και να διαταράξουν την οικολογική ισορροπία (Singh et. al., 2011). Η αποσύνθεση οργανικών αποβλήτων μπορεί να οδηγήσει στην έκλυση αερίων του θερμοκηπίου, συμβάλλοντας στην κλιματική αλλαγή (Kong et. al., 2012).

Η κατανόηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των αποβλήτων υδροπονικών καλλιεργειών είναι απαραίτητη για την εφαρμογή αποτελεσματικών στρατηγικών διαχείρισης αποβλήτων. Αντιμετωπίζοντας αυτές τις επιπτώσεις, οι καλλιεργητές μπορούν να ελαχιστοποιήσουν το οικολογικό τους αποτύπωμα και να εξασφαλίσουν τη βιωσιμότητα των εργασιών τους.

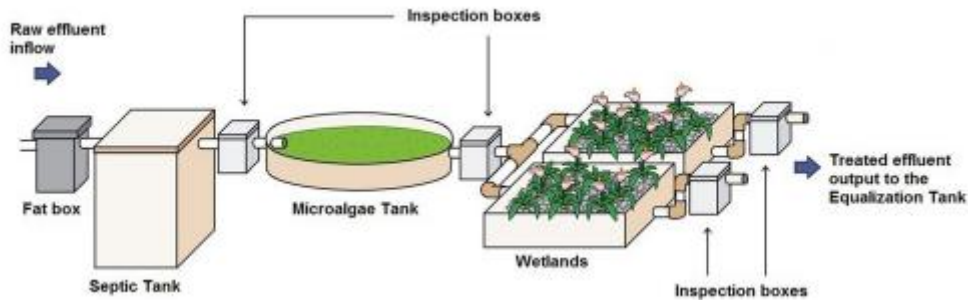
Ο μετριασμός των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των αποβλήτων υδροπονικών καλλιεργειών απαιτεί την υιοθέτηση κατάλληλων πρακτικών διαχείρισης απορριμμάτων. Αυτό περιλαμβάνει την εφαρμογή στρατηγικών για τη δέσμευση και την επεξεργασία του νερού αποστράγγισης, τη βελτιστοποίηση της εφαρμογής και της ανακύκλωσης θρεπτικών ουσιών και τη χρήση καινοτόμων τεχνολογιών για την επεξεργασία αποβλήτων και την ανάκτηση πόρων.

Λαμβάνοντας υπόψη τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των αποβλήτων υδροπονικών καλλιιεργειών, οι ερευνητές, οι καλλιιεργητές και οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής μπορούν να συνεργαστούν για να αναπτύξουν και να προωθήσουν βιώσιμες πρακτικές που ελαχιστοποιούν τις αρνητικές επιπτώσεις στο έδαφος, το νερό και τη βιοποικιλότητα. Με την υιοθέτηση προσεγγίσεων υπεύθυνης διαχείρισης απορριμμάτων, η υδροπονική βιομηχανία μπορεί να συμβάλει σε ένα πιο περιβαλλοντικά συνειδητό, ανθεκτικό και αειφόρο γεωργικό σύστημα.

Τεχνικές διαχείρισης αποβλήτων υδροπονικών καλλιιεργειών

Η υδροπονική γεωργία κερδίζει δημοτικότητα λόγω της αποτελεσματικής χρήσης των πόρων και των υψηλών αποδόσεων των καλλιιεργειών. Ωστόσο, όπως κάθε γεωργικό σύστημα, η υδροπονία παράγει απόβλητα που απαιτούν σωστή διαχείριση. Αυτό το κεφάλαιο παρέχει μια σε βάθος διερεύνηση των τεχνικών διαχείρισης απορριμμάτων για απόβλητα υδροπονικών καλλιιεργειών. Εφαρμόζοντας αποτελεσματικές στρατηγικές διαχείρισης απορριμμάτων, οι καλλιιεργητές μπορούν να ελαχιστοποιήσουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, να βελτιστοποιήσουν τη χρήση των πόρων και να συμβάλουν στη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα των υδροπονικών συστημάτων.

Η αποτελεσματική διαχείριση των απορριμμάτων είναι μια κρίσιμη πτυχή της αειφόρου υδροπονικής γεωργίας. Ο ακατάλληλος χειρισμός και η απόρριψη των απορριμμάτων μπορεί να οδηγήσει σε περιβαλλοντική ρύπανση, ανισορροπίες θρεπτικών ουσιών και μειωμένη απόδοση του συστήματος. Αυτό το κεφάλαιο εστιάζει στον εντοπισμό και την εφαρμογή βέλτιστων πρακτικών για τη διαχείριση των υδροπονικών αποβλήτων. Ακολουθώντας αυτές τις πρακτικές, οι καλλιιεργητές μπορούν να ελαχιστοποιήσουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, να βελτιστοποιήσουν τη χρήση των πόρων και να ενισχύσουν τη συνολική βιωσιμότητα των δραστηριοτήτων τους (Prystay and Lo, 2001).



Εικόνα 7. Σχηματική αναπαράσταση του σταθμού επεξεργασίας λυμάτων που κατασκευάστηκε στο Ομοσπονδιακό Πανεπιστήμιο του Σάο Κάρλος (UFSCar) (da Silva Cuba Carvalho et. al., 2018)

Τα υδροπονικά απόβλητα καλλιεργειών αποτελούνται από διάφορα συστατικά, όπως φυτικά υπολείμματα, ριζικό υλικό, θρεπτικά διαλύματα και απορροή άρδευσης. Η κατανόηση της σύνθεσης και των χαρακτηριστικών αυτών των αποβλήτων είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη κατάλληλων τεχνικών διαχείρισης αποβλήτων. Η ανάλυση της περιεκτικότητας σε θρεπτικά συστατικά, της περιεκτικότητας σε οργανική ύλη και πιθανών ρύπων στα υδροπονικά απόβλητα βοηθά στον προσδιορισμό των μεθόδων επεξεργασίας και απόρριψής τους.

Ένας από τους πρωταρχικούς στόχους της διαχείρισης απορριμμάτων είναι η ελαχιστοποίηση της παραγωγής απορριμμάτων. Οι τεχνικές μείωσης της πηγής στα υδροπονικά συστήματα περιλαμβάνουν τη βελτιστοποίηση της παροχής θρεπτικών ουσιών για την ελαχιστοποίηση της υπερβολικής απορροής, την εφαρμογή άρδευσης ακριβείας για τη μείωση της σπατάλης νερού και την αποτελεσματική διαχείριση των υπολειμμάτων των καλλιεργειών. Εστιάζοντας στην αποτελεσματική χρήση των πόρων, οι καλλιεργητές μπορούν να μειώσουν τον όγκο και τον αντίκτυπο των αποβλήτων υδροπονικών καλλιεργειών.

Η ανακύκλωση και η επαναχρησιμοποίηση αποβλήτων υδροπονικών καλλιεργειών μπορεί να συμβάλει σημαντικά στη μείωση των απορριμμάτων και στη διατήρηση των πόρων. Τα θρεπτικά διαλύματα μπορούν να φιλτραριστούν, να αποστειρωθούν και να ανανεωθούν για να διατηρηθεί η ποιότητά τους και να επαναχρησιμοποιηθούν σε επόμενους κύκλους καλλιέργειας. Τα επεξεργασμένα απόβλητα μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως υποστρώματα ή οργανικά λιπάσματα, παρέχοντας βασικά θρεπτικά συστατικά στα φυτά και ελαχιστοποιώντας τη διάθεση των απορριμμάτων (Bryszewski et. al., 2022, da Silva Cuba Carvalho et. al., 2018).

Η κομποστοποίηση είναι τεχνική βιώσιμης διαχείρισης απορριμμάτων που μπορεί να εφαρμοστεί σε απόβλητα υδροπονικών καλλιεργειών. Μέσω ελεγχόμενης αποσύνθεσης, τα οργανικά απόβλητα μπορούν να μετατραπούν σε λίπασμα πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά, το οποίο μπορεί να βελτιώσει την ποιότητα του εδάφους και να ενισχύσει την ανάπτυξη των φυτών. Αυτές οι τεχνικές βοηθούν επίσης στη μείωση του όγκου των απορριμμάτων και στην εκτροπή της οργανικής ύλης από τους χώρους υγειονομικής ταφής.

Η αναερόβια χώνευση είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνική διαχείρισης αποβλήτων που χρησιμοποιεί μικροοργανισμούς για τη διάσπαση των οργανικών αποβλήτων απουσία οξυγόνου. Αυτή η διαδικασία παράγει βιοαέριο, μια πολύτιμη πηγή ενέργειας, και παράγει χωνεμένο υπόλειμμα πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βιολίπασμα. Η εφαρμογή συστημάτων αναερόβιας χώνευσης σε υδροπονικές εκμεταλλεύσεις μπορεί να επιτρέψει την ανάκτηση ενέργειας και θρεπτικών ουσιών από τα απόβλητα υλικά.

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέθοδοι χημικής και βιολογικής επεξεργασίας για την αποτελεσματική επεξεργασία των αποβλήτων υδροπονικών καλλιεργειών. Οι τεχνικές πήξης, κροκίδωσης και καθίζησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την απομάκρυνση θρεπτικών συστατικών, μειώνοντας τον κίνδυνο ρύπανσης του νερού (Drikas et. al., 2001). Οι μέθοδοι βιολογικής επεξεργασίας, όπως οι μικροβιακές διεργασίες, βοηθούν στη διάσπαση των οργανικών ενώσεων και στην αποδόμηση των ρύπων που υπάρχουν στα απόβλητα (Rajasulochana & Preethy 2016).

Απονιτροποίηση υδροπονικών αποβλήτων.

Την τελευταία δεκαετία, οι τεχνολογίες απονιτροποίησης έδειξαν να είναι ελπιδοφόρες για την επεξεργασία διαφόρων τύπων λυμάτων, όπως τα αστικά λύματα. Ως εκ τούτου, η υψηλή συγκέντρωση νιτρικών και ανόργανων αλάτων στα υδροπονικά λύματα οδήγησε τους ερευνητές στην εφαρμογή βιολογικής απονιτροποίησης ως αποτελεσματικής διαδικασίας για την απομάκρυνση αζώτου από υδροπονικά λύματα, όπου τα νιτρώδη και τα νιτρικά ως οξειδωμένη ανόργανη ένωση αζώτου μετατρέπονται σε άζωτο (N_2), χρησιμοποιώντας αναερόβιους μικροοργανισμούς με δότες ηλεκτρονίων που προέρχονται είτε από οργανικές, είτε από ανόργανες πηγές (ετερότροφη απονιτροποίηση ή αυτοτροφική απονιτροποίηση) (Van Rijn et al. 2006). Περίπου το 90% της αναλογίας απομάκρυνσης αζώτου επιτεύχθηκε από τα υδροπονικά λύματα με αυτοτροφική απονιτροποίηση χρησιμοποιώντας θειοθειικό (thiosulfate) ως δότη ηλεκτρονίων μέσω αντιδραστήρα βιολογικού φίλτρου ανόδου. Σε αυτή

τη μελέτη, βρέθηκε ότι η δραστηριότητα απονιτροποίησης χρησιμοποιώντας κόκκους θείου ήταν επίσης υψηλή (Yamamoto-Ikemoto et al. 2000). Όσον αφορά την ετερότροφη απονιτροποίηση, το κόστος των χρησιμοποιούμενων πηγών άνθρακα, όπως η μεθανόλη, η αιθανόλη και το οξικό οξύ, αποτελεί σημαντικό μέρος του συνολικού κόστους επεξεργασίας (Castellar et al. 2019). Κατά συνέπεια, βιομηχανικά λύματα, εγκαταστάσεις απορριμμάτων κ.λπ., έχουν προταθεί να αξιοποιηθούν ως πηγή αποβλήτων άνθρακα. Οι Park et al., (2008a) έδειξαν ότι επιτυγχάνεται 85% και 90,5% απομάκρυνση νιτρικών και φωσφορικών με την αναλογία δόσης οργανικού άνθρακα:αζώτου 2C:N, χρησιμοποιώντας υγρό προεπεξεργασμένο φυτικό υλικό ως πηγή οργανικού άνθρακα. Ωστόσο, αυτή η ικανότητα απομάκρυνσης P δεν θα ήταν βιώσιμη επ' αόριστον, επειδή τα φωσφορικά δεν μπορούν να συσσωρευτούν επ' αόριστον μέσα στο φίλτρο απονιτροποίησης. Για την απομάκρυνση νιτρικών και φωσφόρου από τα υδροπονικά λύματα και τη μείωση του συνολικού αποτυπώματος του συστήματος επεξεργασίας, αναπτύχθηκε υβριδικό φίλτρο απονιτροποίησης που συνδυάζει μια ζώνη χωνεύσεως για την απελευθέρωση οργανικού άνθρακα από τα απόβλητα φυτών και μια ζώνη φίλτρου απονιτροποίησης σε μια ενιαία μονάδα.

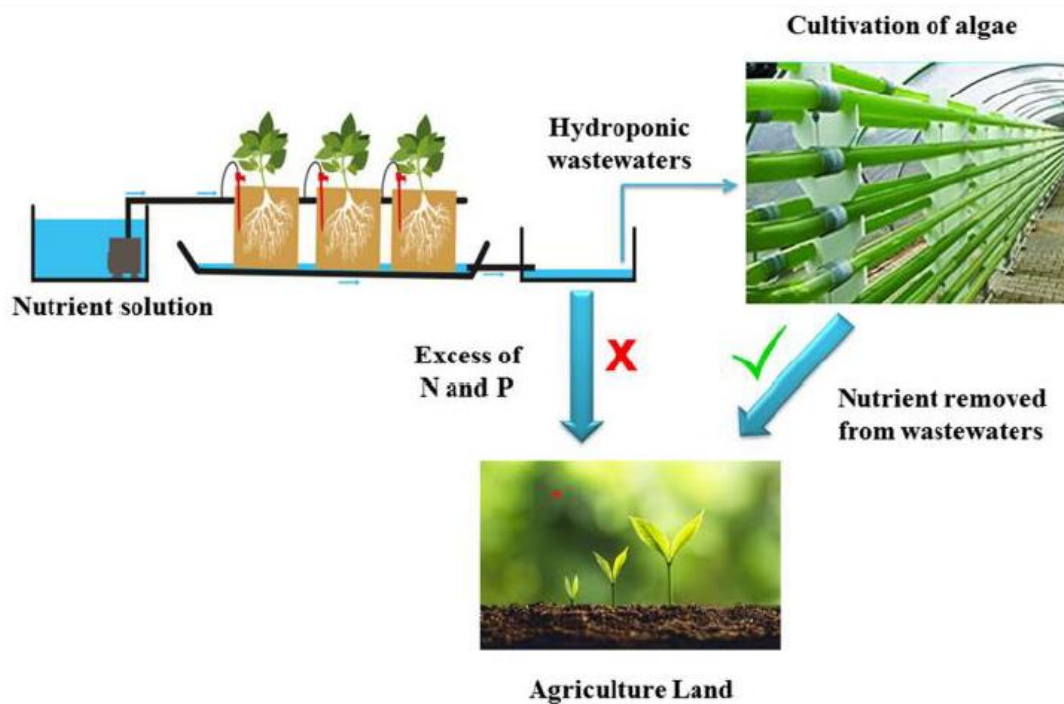
Επεξεργασία υδροπονικών αποβλήτων θρεπτικών ουσιών με βάση τεχνητούς υδροβιότοπους.

Οι τεχνητοί υδροβιότοποι (Constructed Wetlands - CWs) που έχουν φυτευτεί με κοινό καλάμι (*Phragmites australis*) ή άλλα φυτά βάλτων (*Scirpus lacustris*), αφαιρούν άζωτο και φώσφορο, ενσωματώνοντάς τα απευθείας στη φυτική βιομάζα (Zubair et al. 2020). Έχουν ελάχιστες απαιτήσεις συντήρησης, ενέργειας και κόστους, είναι παθητικά συστήματα και εύκολα στην κατασκευή. Χρησιμοποιούνται σε τεχνικές διαχείρισης αστικών, βιομηχανικών και πιο ειδικά γεωργικών λυμάτων (δηλαδή υδροπονικά απόβλητα) (Grasselly et al. 2004; Seo et al. 2010; Vrhovšek et al. 1996). Με αυτά τα πλεονεκτήματα, οι εφαρμογές των κατασκευασμένων υγροτόπων για υδροπονικά λύματα έχουν αυξηθεί ραγδαία. Οι διεργασίες που διέπουν την απομάκρυνση και τη συγκράτηση του αζώτου κατά την επεξεργασία των λυμάτων σε κατασκευασμένους υγροτόπους είναι πολλές και περιλαμβάνουν την απονιτροποίηση (Seo et al. 2008). Πρόσφατα, διάφορες μελέτες έχουν αποδείξει την αποτελεσματικότητα της πηγής οργανικού άνθρακα που υποστηρίζεται από υγροτόπους στην απομάκρυνση των θρεπτικών ουσιών από τα υδροπονικά λύματα. Επιλέχθηκαν άφθονα αμπελουργικά λύματα ως πηγή άνθρακα για να υποστηρίξουν τη βιολογική απονιτροποίηση με υγροβιότοπους οριζόντιας υπόγειας ροής λυμάτων υδροπονικών καλλιεργειών τομάτας. Το

επίπεδο του νιτρικού αζώτου μειώθηκε κατά 70-100% στην αναλογία οργανικού άνθρακα: αζώτου 2C:4N (Grasselly et al. 2004, Gagnon et. al., 2010).

Επεξεργασία υδροπονικών αποβλήτων θρεπτικών ουσιών με βάση μικροφύκη.

Η διαδικασία επεξεργασίας λυμάτων που βασίζεται σε μικροφύκη θεωρείται ως η πιο υποσχόμενη τεχνολογία για την προηγμένη επεξεργασία και ανάκτηση θρεπτικών ουσιών των λυμάτων (Li et al. 2019; Santos and Pires 2018). Συνεπώς, σημαντική ερευνητική προσοχή στράφηκε προς την καλλιέργεια φυκών σε θρεπτικά διαλύματα υδροπονικών αποβλήτων ως δευτερογενή και τριτογενή επεξεργασία λυμάτων, η οποία αποδείχθηκε καλή στρατηγική και εναλλακτική χρήση για υδροπονικά θρεπτικά διαλύματα προκειμένου να αποφευχθεί η απελευθέρωσή τους στα επιφανειακά ύδατα και η επιδείνωση του προβλήματος του ευτροφισμού. (Lee et al. 2018)



Εικόνα 8. Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας απομάκρυνσης θρεπτικών συστατικών από τα φύκη (Πηγή: Kumar & Cho, 2014).

Με τον ίδιο τρόπο, όπως οι τεχνητοί υδροβιότοποι, τα φύκια μπορούν επίσης να αφαιρέσουν N και P από τα θρεπτικά διαλύματα. Τα φύκια συνήθως καλλιεργούνται σε διαφανείς σωλήνες, όπου διατρέχεται το απόβλητο θρεπτικό διάλυμα. Τα φύκια μπορούν να είναι πολύ αποτελεσματικά στην απομάκρυνση αυτών των θρεπτικών συστατικών, αν και δεν

θα είναι πολύ αποτελεσματικά στην αφαίρεση ορισμένων μικροθρεπτικών συστατικών από το διάλυμα. Στην ακαδημαϊκή βιβλιογραφία έχουν επιτευχθεί αποδόσεις μεγαλύτερες από 90% για την αφαίρεση τόσο του N, όσο και του P. Αυτοί οι οργανισμοί μπορούν επίσης να συλλεχθούν για να ληφθεί ένα πρόσθετο προϊόν για την υδροπονική εγκατάσταση, το οποίο δίνει σε αυτή τη διαδικασία τη μοναδική ευκαιρία να προσθέσει αξία αντί να είναι απλώς ένα επιπλέον κόστος για τον καλλιεργητή. Το *Chlorella vulgaris* και το *Dunaliella salina* είναι τα δύο πιο μελετημένα είδη φυκιών για την επεξεργασία αποβλήτων με υδροπονικό θρεπτικό διάλυμα. (Kumar & Cho, 2014)

Διαχείριση με βάση τον ενεργό άνθρακα για την απομάκρυνση των εκκρινμάτων της ρίζας.

Γενικά, οι περισσότερες από τις παραπάνω τεχνικές, επικεντρώνονται στην επεξεργασία υδροπονικών λυμάτων σε ανοιχτό σύστημα που δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε κλειστό υδροπονικό σύστημα όπου το θρεπτικό διάλυμα επαναχρησιμοποιείται. Η συσσώρευση τοξικών εκκρινμάτων από τις ίδιες τις ρίζες στο θρεπτικό διάλυμα σε κλειστό σύστημα οδηγεί σε αυτοτοξικότητα των φυτών. Τα σάκχαρα, τα οργανικά οξέα και τα αμινοξέα είναι οι πιο οργανικές ουσίες από τις ρίζες των φυτών που θεωρείται ότι απελευθερώνονται σε μεγάλες ποσότητες (Farrar et al. 2003). Μερικά από τα πιο σημαντικά οργανικά οξέα που ανιχνεύθηκαν σε επαναχρησιμοποιημένα θρεπτικά διαλύματα είναι το γαλακτικό οξύ, το βενζοϊκό οξύ, το στεατικό οξύ, το ηλεκτρικό και το αδιπικό οξύ (Asaduzzaman and Asao, 2020). Σύμφωνα με τα δεδομένα της βιβλιογραφίας, τα οργανικά οξέα που εντοπίστηκαν στο δείγμα είναι το γαλακτικό οξύ, το βενζοϊκό οξύ, το στεατικό οξύ, το σουκινικό οξύ και το αδιπικό οξύ (Hosseinzadeh et al. 2017).

Οι Προηγμένες Διεργασίες Οξειδωσης (Advanced Oxidation Processes - AOPs) έχουν προσελκύσει σημαντική προσοχή των ερευνητών λόγω της αποτελεσματικής οργανικής αποσύνθεσης από διαλύματα υδροπονικών αποβλήτων (Liu et al. 2019). Λίγες προσπάθειες έχουν γίνει σχετικά με τη φωτοκαταλυτική επεξεργασία του υγρών αποβλήτων χρησιμοποιώντας TiO_2 (Miyama et al. 2013) και οζονισμό (ozonation). Οι τεχνικές αντιμετώπισης με όζον δείχνουν καλή απόδοση. Ωστόσο, οι επενδύσεις στην επεξεργασία του όζοντος είναι πολύ υψηλές, με αποτέλεσμα υψηλό ετήσιο κόστος (Maucieri et al. 2019).

Η ελαχιστοποίηση χρήσης πόρων στην πηγή αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση της παραγωγής απορριμμάτων από την αρχή. Εφαρμόζονται πρακτικές όπως η ακριβής δοσολογία των θρεπτικών ουσιών, η διαχείριση της άρδευσης και η διαχείριση των υπολειμμάτων των

καλλιεργειών για τη μείωση της παραγωγής απορριμμάτων. Η υπερβολική τροφοδοσία των φυτών με θρεπτικά συστατικά πρέπει να αποφεύγεται. Αποδοτικά συστήματα άρδευσης και αποτελεσματικές τεχνικές διαχείρισης της ριζικής ζώνης πρέπει να χρησιμοποιούνται, για να ελαχιστοποιείται η απορροή θρεπτικών ουσιών και η δημιουργία αποβλήτων.

Η κατανόηση της σύνθεσης και της ποσότητας των υδροπονικών αποβλήτων είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη ενός αποτελεσματικού σχεδίου διαχείρισης αποβλήτων. Απαιτείται η τακτική παρακολούθηση και ανάλυση των ροών αποβλήτων για να αξιολογούνται οι συγκεντρώσεις θρεπτικών ουσιών, τα επίπεδα pH, η περιεκτικότητα σε οργανική ύλη και πιθανοί ρύποι. Αυτές οι πληροφορίες βοηθούν στην προσαρμογή των στρατηγικών διαχείρισης απορριμμάτων και στην προσαρμογή της παροχής θρεπτικών συστατικών για την ελαχιστοποίηση της παραγωγής απορριμμάτων.

Ο τομέας της διαχείρισης απορριμμάτων εξελίσσεται διαρκώς και αναδύονται νέες τεχνολογίες και καινοτομίες. Η υδροθερμική επεξεργασία, οι ηλεκτροχημικές μέθοδοι και άλλα προηγμένα συστήματα επεξεργασίας δείχνουν πολλά υποσχόμενα για την αποτελεσματική διαχείριση των απορριμμάτων υδροπονικών καλλιεργειών. Αυτές οι καινοτόμες προσεγγίσεις προσφέρουν πιθανά οφέλη, όπως ενισχυμένη ανάκτηση θρεπτικών συστατικών, βελτιωμένη αποτελεσματικότητα επεξεργασίας αποβλήτων και μειωμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. (Sigrimis, 2001)

Είναι σημαντικό οι κάτοχοι υδροπονικών εκμεταλλεύσεων να είναι ενημερωμένοι για τις αναδυόμενες τεχνολογίες, να τηρούν τα ρυθμιστικά πλαίσια και να εφαρμόζουν βέλτιστες πρακτικές για την επίτευξη στόχων διαχείρισης αποβλήτων. Μέσω πρακτικών υπεύθυνης διαχείρισης απορριμμάτων, οι υδροπονικοί καλλιεργητές μπορούν να ελαχιστοποιήσουν τις περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις και να συμβάλλουν σε ένα πιο βιώσιμο γεωργικό μέλλον.

Απαιτείται η εφαρμογή συστημάτων ανάκτησης θρεπτικών συστατικών για τη συλλογή και επαναχρησιμοποίηση πολύτιμων θρεπτικών συστατικών από ροές αποβλήτων. Τεχνολογίες όπως η ανάκτηση μεμβράνης θρεπτικών συστατικών, η ανταλλαγή ιόντων και η διήθηση μεμβράνης μπορούν να βοηθήσουν στην ανάκτηση θρεπτικών συστατικών για επαναχρησιμοποίηση στο υδροπονικό σύστημα. Η επαναχρησιμοποίηση διαλυμάτων πλούσιων σε θρεπτικά συστατικά μειώνει την ανάγκη για φρέσκες εισροές, ελαχιστοποιεί τη διάθεση των απορριμμάτων και προάγει τη διατήρηση των πόρων. (Delrue, 2021)

Απαιτείται επίσης παροχή εκπαίδευσης και κατάρτισης στους καλλιεργητές και στο προσωπικό, σχετικά με τις σωστές πρακτικές διαχείρισης αποβλήτων. Αυτό περιλαμβάνει την ευαισθητοποίηση σχετικά με τη σημασία της διαχείρισης αποβλήτων, τη διδασκαλία των εργαζομένων σχετικά με τα πρωτόκολλα διαχείρισης αποβλήτων και την προώθηση μιας κουλτούρας υπεύθυνης διαχείρισης. Οι εκπαιδευτικές συνεδρίες μπορούν να καλύπτουν θέματα όπως ο διαχωρισμός των απορριμμάτων, οι τεχνικές ανάκτησης θρεπτικών συστατικών και η συμμόρφωση με τους κανονισμούς. Η συνεχής εκπαίδευση, η συνεργασία και η αξιολόγηση ενθαρρύνουν μια κουλτούρα βελτίωσης και καινοτομίας στη διαχείριση αποβλήτων.

Οποιαδήποτε διαδικασία επεξεργασίας αποβλήτων θα επιφέρει πρόσθετο κόστος σε μια υδροπονική καλλιέργεια. Ωστόσο, αυτό μπορεί να μην είναι προαιρετικό στο μέλλον, καθώς οι ρυθμιστικές αρχές στις ΗΠΑ και την Ευρώπη εντείνουν την παρακολούθηση των υδροπονικών αποβλήτων και περιορίζουν την ποσότητα των ρύπων που ενδέχεται να απορρίπτονται στο σύστημα αποχέτευσης. Έχοντας αυτό κατά νου, θα πρέπει να δίνεται βάση στον τρόπο αντιμετώπισης των υδροπονικών αποβλήτων και στην εξεύρεση της μεθόδου με το χαμηλότερο κόστος. Εάν υπάρχουν σημαντικές εκτάσεις, τότε ένας τεχνητός υδροβιότοπος μπορεί να είναι η καλύτερη μέθοδος, ενώ εάν υπάρχει περιορισμός χώρου, τα φύκη μπορούν να προσφέρουν την καλύτερη μέθοδο για την αντιμετώπιση των αποβλήτων με ένα μικρό αποτύπωμα. Ωστόσο, τα φύκη έχουν επίσης ανάγκες φωτός, πράγμα που σημαίνει ότι μπορεί να χρειαστεί να παρέχεται τεχνητό φως εάν δεν υπάρχει εξωτερικός χώρος για να τοποθετηθεί η εγκατάσταση.

Η καλλιέργεια της συνεργασίας μεταξύ των υδροπονικών καλλιεργητών, των επαγγελματιών του κλάδου και των ερευνητών για την ανταλλαγή εμπειριών, γνώσεων και βέλτιστων πρακτικών θα ήταν πολύ ωφέλιμη. Όπως και η συμμετοχή των παραγωγών σε ενώσεις του κλάδου, συνέδρια και εργαστήρια για τη συνεχή ενημέρωση για τις τελευταίες εξελίξεις στη διαχείριση απορριμμάτων. Η συνεργασία προωθεί την καινοτομία, διευκολύνει την επίλυση προβλημάτων και προωθεί την υιοθέτηση πρακτικών βιώσιμης διαχείρισης απορριμμάτων. Δίνοντας προτεραιότητα στις βέλτιστες πρακτικές, οι υδροπονικοί καλλιεργητές μπορούν να συμβάλλουν σε έναν πιο βιώσιμο γεωργικό τομέα και να ανοίξουν το δρόμο για ένα πιο πράσινο μέλλον.

4. Αποτελέσματα και Συζήτηση

Η διαχείριση στερεών και υγρών αποβλήτων σε συστήματα θερμοκηπίου και υδροπονικών καλλιεργειών διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στη διασφάλιση βιώσιμων γεωργικών πρακτικών και στην ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Αυτή η ενότητα παρουσιάζει τα αποτελέσματα της έρευνας που διεξήχθη με θέμα τη διαχείριση των στερεών και υγρών απορριμμάτων στη θερμοκηπιακή και αποβλήτων στην υδροπονική φυτική παραγωγή, ακολουθούμενη από μια περιεκτική συζήτηση των ευρημάτων.

Αποτελέσματα διαχείρισης στερεών αποβλήτων και συζήτηση

Η βιβλιογραφική επισκόπηση σχολίασε την τρέχουσα κατάσταση αναφορικά με τη διαχείριση στερεών αποβλήτων θερμοκηπίου, μέσα από την οπτική τρεχόντων επιστημονικών άρθρων και ερευνών. Επίσης, συνοψίστηκαν τρόποι παραγωγής αποβλήτων, περιβαλλοντικές επιπτώσεις, τεχνικές διαχείρισης αποβλήτων, βέλτιστες πρακτικές και καινοτόμες προσεγγίσεις διαχείρισης.

Τα ευρήματα που προέκυψαν από την παρούσα έρευνα αποκαλύπτουν την ποικιλομορφία των στερεών αποβλήτων που παράγονται σε συστήματα θερμοκηπίου και υδροπονικών καλλιεργειών, κυρίως αποτελούμενα από φυτικά υπολείμματα, υπολείμματα καλλιεργειών και υλικά συσκευασίας. Η σύνθεση και η ποσότητα αυτών των στερεών αποβλήτων διαφέρουν ανάλογα με παράγοντες όπως ο τύπος της καλλιέργειας, οι καλλιεργητικές πρακτικές και τα χρησιμοποιούμενα υλικά συσκευασίας. Η ανάλυση της σύνθεσης αυτών των στερεών αποβλήτων έχει αποδείξει την ύπαρξη σημαντικού ποσοστού οργανικής ύλης, παρέχοντας έτσι ευκαιρίες για ανακύκλωση και ανάκτηση πόρων.

Η μελέτη εξέτασε επίσης διάφορες τεχνικές διαχείρισης αποβλήτων που χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση των στερεών αποβλήτων σε συστήματα θερμοκηπίου. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν την αποτελεσματικότητα των στρατηγικών διαχωρισμού από την πηγή και μείωσης των αποβλήτων στη μείωση του συνολικού όγκου των παραγόμενων στερεών αποβλήτων. Ειδικότερα, η κομποστοποίηση έχει αποδειχθεί ως μια βιώσιμη επιλογή για τη διαχείριση των οργανικών αποβλήτων, καθώς το παραγόμενο κομπόστ μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πολύτιμη τροποποίηση του εδάφους. Επιπλέον, τα προγράμματα

ανακύκλωσης και η επαναχρησιμοποίηση υλικών συσκευασίας συνεισφέρουν σημαντικά στη μείωση των απορριμμάτων και στη διατήρηση των πόρων.

Τα ευρήματα αυτής της έρευνας υπογραμμίζουν τη σημασία της σωστής διαχείρισης των στερεών αποβλήτων για τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η κακή διαχείριση των στερεών αποβλήτων μπορεί να οδηγήσει σε ζητήματα όπως η μόλυνση του εδάφους, η ρύπανση των υδάτων και οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου. Με την εφαρμογή αποτελεσματικών τεχνικών διαχείρισης απορριμμάτων, όπως η κομποστοποίηση και η ανακύκλωση, τα συστήματα θερμοκηπίων και υδροπονικών καλλιεργειών μπορούν να μειώσουν το περιβαλλοντικό αποτύπωμα που σχετίζεται με την παραγωγή στερεών αποβλήτων. Η βιώσιμη χρήση των οργανικών αποβλήτων μέσω της κομποστοποίησης ενισχύει επίσης τη γονιμότητα του εδάφους και προωθεί μια προσέγγιση κυκλικής οικονομίας.

Αποτελέσματα διαχείρισης υγρών αποβλήτων και συζήτηση

Η ανασκόπηση της βιβλιογραφίας για τα υγρά απόβλητα του θερμοκηπίου παρέχει πολύτιμες γνώσεις σχετικά με τη σημασία της αποτελεσματικής διαχείρισης αποβλήτων στη γεωργία θερμοκηπίου και τις πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με τα μη επεξεργασμένα ή κακώς διαχειριζόμενα απόβλητα. Καταρχήν, τα υγρά απόβλητα των θερμοκηπίων, περιλαμβανομένων των απορροών άρδευσης, των θρεπτικών διαλυμάτων και του αποστραγγιστικού νερού, μπορούν να προκαλέσουν πιθανούς κινδύνους για το περιβάλλον εάν δεν διαχειρίζονται σωστά. Αυτά τα απόβλητα περιέχουν πολύτιμα θρεπτικά συστατικά, οργανική ύλη και πιθανούς ρύπους που μπορούν να επηρεάσουν την ποιότητα του εδάφους, τους υδάτινους πόρους και τα γύρω οικοσυστήματα. Έχουν γίνει διάφορες έρευνες για την αξιολόγηση φυσικών, χημικών και βιολογικών μεθόδων, οι οποίες έχουν αποδειχθεί αποτελεσματικές στην ανάκτηση θρεπτικών συστατικών, την ανακύκλωση του νερού και την απομάκρυνση των ρύπων. Τεχνολογίες όπως η αναερόβια αποσύνθεση, η κομποστοποίηση και η ανάκτηση θρεπτικών συστατικών παρέχουν ευκαιρίες για την εξαγωγή πολύτιμων θρεπτικών συστατικών από τα υγρά απόβλητα των θερμοκηπίων και την επαναχρησιμοποίησή τους στα γεωργικά συστήματα, με στόχο τη μείωση της εξάρτησης από συνθετικά λιπάσματα και την προώθηση της βιοποικιλότητας και της αειφορίας των πόρων.

Οι έρευνες που διεξήχθησαν αναφορικά με τα υγρά απόβλητα σε συστήματα θερμοκηπίου και υδροπονικών καλλιεργειών παρουσίασαν ενδιαφέροντα ευρήματα. Ανακαλύφθηκε ότι αυτά τα απόβλητα περιλαμβάνουν κυρίως την απορροή άρδευσης, θρεπτικά διαλύματα και νερό αποστράγγισης. Μέσω της ανάλυσης της σύνθεσής τους, προέκυψε ότι περιέχουν σημαντικές ποσότητες θρεπτικών συστατικών, όπως αζωτούχες ουσίες, φώσφορο και κάλιο, καθώς και οργανική ύλη και πιθανούς ρύπους. Η κατανόηση της σύνθεσής τους αποτελεί κρίσιμη παράμετρο για το σχεδιασμό αποτελεσματικών στρατηγικών διαχείρισης αποβλήτων, με στόχο την ανακύκλωση των θρεπτικών ουσιών και την προστασία του περιβάλλοντος.

Στο πλαίσιο της έρευνας, εξετάστηκαν διάφορες τεχνικές διαχείρισης των υγρών αποβλήτων σε συστήματα θερμοκηπίου και υδροπονικών καλλιεργειών. Τα αποτελέσματα τόνισαν τη δυνατότητα ανάκτησης των θρεπτικών συστατικών και την επαναχρησιμοποίησή τους από τα υγρά απόβλητα, χρησιμοποιώντας τεχνολογίες όπως δεξαμενές καθίζησης, συστήματα φιλτραρίσματος και διαδικασίες εξαγωγής θρεπτικών ουσιών. Αυτές οι τεχνικές επιτρέπουν τη διατήρηση και την επαναχρησιμοποίηση πολύτιμων θρεπτικών ουσιών σε πρακτικές άρδευσης ή λίπανσης, μειώνοντας την εξάρτηση από εξωτερικές εισροές και ελαχιστοποιώντας την έκπλυση θρεπτικών ουσιών στο περιβάλλον.

Τα ευρήματα της έρευνας υπογράμμισαν τη σπουδαιότητα της διαχείρισης των υγρών αποβλήτων προκειμένου να αποτραπεί η περιβαλλοντική υποβάθμιση. Μη επεξεργασμένα ή κακώς διαχειριζόμενα υγρά απόβλητα μπορούν να οδηγήσουν σε έκπλυση θρεπτικών ουσιών, μόλυνση των υπόγειων υδάτων και αρνητικές επιπτώσεις στην ποιότητα του εδάφους και στη βιοποικιλότητα. Η χρήση κατάλληλων τεχνικών διαχείρισης αποβλήτων για τα υγρά απόβλητα είναι αναγκαία προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν αυτές οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η αποτελεσματική ανάκτηση και επαναχρησιμοποίηση των θρεπτικών ουσιών από τα υγρά απόβλητα συντελεί στη διατήρηση των πόρων, την προστασία της ποιότητας του νερού και τη συνολική βιωσιμότητα της παραγωγής σε συστήματα θερμοκηπίου και υδροπονικών καλλιεργειών.

Συγκριτική ανάλυση διαχείρισης στερεών και υγρών αποβλήτων

Η διεξαγόμενη έρευνα είχε ως αντικείμενο μια συγκριτική ανάλυση της διαχείρισης των στερεών και υγρών αποβλήτων σε συστήματα θερμοκηπίου και υδροπονικών καλλιεργειών. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτή την ανάλυση υπογραμμίζουν την ανάγκη για προσαρμοσμένες προσεγγίσεις στη διαχείριση αυτών των δύο ειδών αποβλήτων, λόγω των ξεχωριστών χαρακτηριστικών και των περιβαλλοντικών επιπτώσεών τους. Ειδικότερα, ενώ η διαχείριση των στερεών αποβλήτων επικεντρώνεται στη διαχείριση από την πηγή, την κομποστοποίηση και την ανακύκλωση, η διαχείριση των υγρών αποβλήτων επιδιώκει την ανάκτηση των θρεπτικών ουσιών, την επαναχρησιμοποίηση του νερού και την πρόληψη της ρύπανσης.

Η συγκριτική ανάλυση αναδεικνύει τη σημασία της εφαρμογής στρατηγικών ολοκληρωμένης διαχείρισης αποβλήτων που λαμβάνουν υπόψη τόσο τα στερεά, όσο και τα υγρά συστατικά των αποβλήτων, απορρίπτοντας έτσι την αποσπασματική προσέγγιση. Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των δύο κατηγοριών αποβλήτων, όπως η χρήση οργανικών στερεών αποβλήτων για την κομποστοποίηση και η αξιοποίηση των υγρών αποβλήτων ως πηγή θρεπτικών ουσιών για την άρδευση, μπορούν να οδηγήσουν σε πιο βιώσιμες και αποτελεσματικές πρακτικές διαχείρισης των αποβλήτων.

Νομοθετικό πλαίσιο για τη διαχείριση αποβλήτων θερμοκηπίου και υδροπονίας

Το νομικό πλαίσιο που διέπει τη διαχείριση των αποβλήτων στην Ελλάδα καθορίζεται από το Ν. 2939/2001 (ΦΕΚ 179/Α/06.08.2001) «Συσκευασίες και εναλλακτική διαχείριση των συσκευασιών άλλων προϊόντων – Ίδρυση Εθνικού Οργανισμού Εναλλακτικής Διαχείρισης Συσκευασιών και άλλων Προϊόντων (ΕΟΕΔΣΑΠ) και άλλες διατάξεις», όπως τροποποιήθηκε με το Ν.4042/2012 (ΦΕΚ 24/Α/13-2-2012) «Ποινική Προστασία του περιβάλλοντος – Εναρμόνιση με την Οδηγία 2008/99/ΕΚ – Πλαίσιο παραγωγής και διαχείρισης αποβλήτων – Εναρμόνιση με την Οδηγία 2008/98/ΕΚ – Ρύθμιση θεμάτων Υπουργείου Περιβάλλοντος

Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής¹ ². Επιπλέον, έχουν εκδοθεί σειρά κοινών υπουργικών αποφάσεων για τη ρύθμιση επιμέρους θεμάτων, όπως η ΚΥΑ με αρ. 50910/2727/2003 «Μέτρα και Όροι για τη Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων. Εθνικός και Περιφερειακός Σχεδιασμός Διαχείρισης». Ο Κανονισμός (ΕΕ) 1306/2013 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 17^{ης} Δεκεμβρίου 2013 σχετικά με τη χρηματοδότηση, τη διαχείριση και την καταπολέμηση της καταστροφής των αποβλήτων, καθώς και η Υπουργική Απόφαση 2639/2018, αναφέρονται στη διαχείριση των αποβλήτων γενικότερα. Επιπλέον, ο Κανονισμός 2021/1056 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 24^{ης} Ιουνίου 2021 για τη θέσπιση του Ταμείου Δίκαιης Μετάβασης αναφέρεται στη χρηματοδότηση της μετάβασης σε βιώσιμες πρακτικές διαχείρισης αποβλήτων.

Το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας έχει σημαντικό ρόλο στη διαχείριση αποβλήτων γενικότερα στην Ελλάδα. Συγκεκριμένα, το Υπουργείο εκπονεί οδηγούς, μελέτες και πρότυπα για την υποστήριξη των υπηρεσιών, οργανισμών και φορέων που εμπλέκονται στο σχεδιασμό, υλοποίηση και λειτουργία δικτύων και υποδομών διαχείρισης αποβλήτων. Επιπλέον, οι Φορείς Διαχείρισης Αποβλήτων (ΦΟΔΣΑ) είναι αρμόδιοι για τη διαχείριση αποβλήτων γενικά. Αναφέρεται μια γενικότερη καθυστέρηση της Ελλάδας να επιτύχει τους ευρωπαϊκούς στόχους τόσο για τα αστικά απόβλητα, όσο και για τα απόβλητα συσκευασίας. (European Commission, DGE)

Σύμφωνα με το Εθνικό Σχέδιο Διαχείρισης Αποβλήτων (ΕΣΔΑ) 2020 – 2030, για το ρεύμα των Γεωργοκτηνοτροφικών Αποβλήτων (ΓΚΤ) τίθενται οι ακόλουθοι στόχοι διαχείρισης:

1. Πλήρης ανάπτυξη δικτύου συλλογής βιοαποδομήσιμων αποβλήτων γεωργοκτηνοτροφικής προέλευσης για την ανάκτηση επ' ωφελεία της γεωργίας, την παραγωγή προϊόντων (όπως ζωοτροφών) ή την παραγωγή ενέργειας από βιοαέριο/βιομάζα
2. Χωριστή συλλογή και ανάκτηση των πλαστικών γεωργοκτηνοτροφικής προέλευσης, με έμφαση στα πλαστικά θερμοκηπίου και τις συσκευασίες.

¹<https://ypen.gov.gr/diacheirisi-apovliton/sterea-apovlita/nomothesia/>

²<https://ypen.gov.gr/wp-content/uploads/legacy/Files/Perivallon/Diacheirisi%20Apovlitwn/Nomothesia/Nomothetikoplasio.pdf>

3. Χωριστή συλλογή και κατάλληλη διαχείριση των πλαστικών συσκευασίας που περιέχουν επικίνδυνες ουσίες.

Ωστόσο, από την αναζήτηση που έγινε, δεν βρέθηκαν πιο συγκεκριμένες αναφορές στο νομοθετικό πλαίσιο για τη διαχείριση υγρών και στερεών αποβλήτων θερμοκηπίου, καθώς και υδροπονίας³.

Βέλτιστες πρακτικές για τη διαχείριση αποβλήτων θερμοκηπίων και υδροπονίας

Οι βέλτιστες πρακτικές για τη διαχείριση αποβλήτων θερμοκηπίων και υδροπονίας περιλαμβάνουν την πρόληψη παραγωγής αποβλήτων, την επαναχρησιμοποίηση και ανακύκλωση των υλικών, καθώς και την αποτέφρωση και απόθεση σε κατάλληλους χώρους των αποβλήτων που δεν μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν. Η ορθή διαχείριση των αποβλήτων μειώνει την πιθανότητα λάθους και ρύπανσης του περιβάλλοντος και πραγματοποιείται με τη λήψη μέτρων και κατευθυντήριων γραμμών που έχουν οριστεί ως καλύτερες πρακτικές. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή συνιστά δράσεις για την αύξηση της επαναχρησιμοποίησης και της ανακύκλωσης των αποβλήτων, καθώς και τη μείωση των μη ανακυκλώσιμων αποβλήτων. Τέλος, η περιβαλλοντική διαχείριση μπορεί να γίνει μέρος των γενικότερων πρακτικών διαχείρισης, καθώς αυτή συνεισφέρει στην εξοικονόμηση ενέργειας.

³<https://environment.ec.europa.eu/system/files/2022-09/Greece%20-%20EIR%20Country%20Report%202022%20%28EL%29.PDF>



Εικόνα 9. Προτεραιότητες στη διαχείριση αποβλήτων (Πηγή: EPA).

Αν και οι βέλτιστες πρακτικές συνιστώνται σχεδόν παγκοσμίως σε εγχειρίδια καθοδήγησης ή απαιτούνται από κανονισμούς σε ορισμένες περιπτώσεις, λίγες πληροφορίες είναι διαθέσιμες που συνδέουν συγκεκριμένες πρακτικές με την επιστημονική βιβλιογραφία που υποστηρίζει τη χρήση τους και ποσοτικοποιεί την αποτελεσματικότητά τους (Mack et. al., 2019).

Βέλτιστες πρακτικές διαχείρισης αποβλήτων θερμοκηπίου και υδροπονίας

Οι παραπάνω πρακτικές προέρχονται από τον Κώδικα Διαχείρισης Αποβλήτων Θερμοκηπίου της Νέας Ζηλανδίας και αποσκοπούν στη βέλτιστη διαχείριση των αποβλήτων από συστήματα θερμοκηπίου και υδροπονίας. Ο στόχος είναι να ελαχιστοποιηθεί η περιβαλλοντική επίπτωση και να διασφαλιστεί η βέλτιστη αξιοποίηση των θρεπτικών συστατικών, ενώ παράλληλα διατηρείται η υγεία των φυτών και το περιβάλλον.

Οι βέλτιστες πρακτικές που περιγράφονται περιλαμβάνουν τα ακόλουθα βήματα:

1. **Ελαχιστοποίηση Απορρίψεων Θρεπτικών Συστατικών:** Η αποφυγή της υπερβολικής απόρριψης των θρεπτικών συστατικών είναι ο στόχος. Συστήματα χωρίς έδαφος μπορούν να βοηθήσουν στην επίτευξη αυτού του στόχου, καθώς επιτρέπουν καλύτερο έλεγχο της απορρόφησης των θρεπτικών από τα φυτά.

2. **Συλλογή και Αποθήκευση:** Στα συστήματα χωρίς έδαφος, το μεγαλύτερο μέρος του διαλύματος επιστρέφεται στις δεξαμενές ανάμειξης για ανακύκλωση. Η ορθή συλλογή και αποθήκευση του διαλύματος είναι απαραίτητη για την επαναχρησιμοποίηση του.
3. **Εφαρμογή στο Έδαφος:** Η εφαρμογή του διαλύματος στο έδαφος πρέπει να γίνεται με προσοχή, λαμβάνοντας υπόψη την ικανότητα των φυτών να απορροφήσουν τα θρεπτικά. Πρέπει επίσης να αποφεύγονται οι υπερβολικές εφαρμογές που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε αποστράγγιση και μόλυνση των υδάτων.

Επίσης, σύμφωνα με το (UMass Amherst), οι οργανικές ύλες, προερχόμενες από διάφορες πηγές όπως φυτικά υπολείμματα, ζωικά υπολείμματα και κοπριά, αποτελούν πολύτιμους πόρους για τη δημιουργία κομπόστ. Το κομπόστ μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως λίπασμα, βελτιώνοντας την ποιότητα του εδάφους και μειώνοντας τη χρήση χημικών λιπασμάτων. Οι πληροφορίες που παρέχονται αναδεικνύουν την αποτελεσματικότητα της διαχείρισης οργανικών αποβλήτων σε θερμοκήπια. Εξετάζονται διάφορες μέθοδοι, όπως η κομποστοποίηση, η βιοαερίωση και η χρήση σηπτικών δεξαμενών. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εξαρτάται από παράγοντες, όπως το μέγεθος του θερμοκηπίου και το κόστος της μεθόδου. Η σωστή διαχείριση οργανικών αποβλήτων έχει σημαντικά οφέλη. Συμβάλλει στην προστασία του περιβάλλοντος με τη μείωση των απορριμμάτων που καταλήγουν σε χώρους υγειονομικής ταφής. Ταυτόχρονα, βελτιώνει την ποιότητα του εδάφους και εξοικονομεί χρήματα που θα δαπανηθούν για την αγορά χημικών λιπασμάτων. Με βάση τις πληροφορίες είναι δυνατόν να επιλεγεί η κατάλληλη μέθοδος διαχείρισης οργανικών αποβλήτων για κάθε θερμοκήπιο. Η εν λόγω πρακτική αποτελεί βήμα προς τη βιώσιμη γεωργία και τη διατήρηση του φυσικού περιβάλλοντος. Τα ανόργανα απόβλητα, όπως πλαστικά, γυαλί, μέταλλο και χαρτί, αναδεικνύονται ως πηγές προβλημάτων για το περιβάλλον, εάν δεν διαχειρίζονται επαρκώς. Στο εγχειρίδιο βέλτιστων πρακτικών παρέχονται επίσης πληροφορίες για τις διάφορες μεθόδους διαχείρισης των ανόργανων αποβλήτων σε θερμοκήπια. Ανάμεσα στις πιο κοινές μεθόδους εντοπίζονται η ανακύκλωση, η επαναχρησιμοποίηση και η διάθεση. Η επιλογή της βέλτιστης προσέγγισης για ένα δεδομένο θερμοκήπιο εξαρτάται από παράγοντες, όπως ο τύπος των ανόργανων αποβλήτων που παράγονται, το μέγεθος του θερμοκηπίου και το κόστος των επιλογών. Η διαχείριση των ανόργανων αποβλήτων στα θερμοκήπια αποτελεί βασική πτυχή για την περιβαλλοντική διατήρηση και την οικονομία πόρων. Η πληροφορία που παρέχεται εδώ λειτουργεί ως κατευθυντήριο εργαλείο για τους καλλιεργητές, βοηθώντας τους

να επιλέξουν την πλέον κατάλληλη μέθοδο διαχείρισης ανόργανων αποβλήτων για το θερμοκήπιό τους.

Προκειμένου να διευκολύνεται η κατανόηση του θέματος, παρατίθενται περαιτέρω πληροφορίες:

- Η ανακύκλωση αποτελεί την αρχική επιλογή για τη διαχείριση των ανόργανων αποβλήτων. Αυτή η πρακτική συμβάλλει στη μείωση της ποσότητας των απορριμμάτων που καταλήγουν σε χώρους υγειονομικής ταφής, προστατεύοντας ταυτόχρονα τους φυσικούς πόρους.
- Η επαναχρησιμοποίηση αποτελεί αξιόλογη εναλλακτική λύση. Η επαναχρησιμοποίηση συνδράμει στη μείωση της κατανάλωσης υλικών και μειώνει την περιβαλλοντική επιβάρυνση.
- Η διάθεση αποτελεί την τελευταία λύση και εφαρμόζεται όταν άλλες εναλλακτικές δεν είναι εφαρμόσιμες.

Χρήση αισθητήρων στη διαχείριση αποβλήτων θερμοκηπίων και υδροπονίας

Η χρήση αισθητήρων στη διαχείριση αποβλήτων θερμοκηπίων και υδροπονίας αποτελεί μια αναδυόμενη τεχνολογία που μπορεί να βελτιώσει την αποτελεσματικότητα και τη βιωσιμότητα των συστημάτων διαχείρισης αποβλήτων και καλλιέργειών υδροπονίας. Στην Ελλάδα, έχουν πραγματοποιηθεί πιλοτικά προγράμματα για την τοποθέτηση αισθητήρων σε κάδους απορριμμάτων. Σε άλλες χώρες, η χρήση αισθητήρων έχει εφαρμοστεί στην παρακολούθηση και στον έλεγχο των περιβαλλοντικών παραμέτρων σε συστήματα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων.

Στη διαχείριση αποβλήτων θερμοκηπίων, έχουν πραγματοποιηθεί πιλοτικά προγράμματα για την τοποθέτηση αισθητήρων. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι αισθητήρες θερμοκρασίας, υγρασίας, pH, οξυγόνου και άλλων παραμέτρων που σχετίζονται με τη διαχείριση αποβλήτων θερμοκηπίων και υδροπονίας. Επιπλέον, η χρήση αισθητήρων στην υδροπονία έχει εφαρμοστεί για την παρακολούθηση των παραμέτρων του νερού και της θερμοκρασίας, καθώς και για τον έλεγχο της κατανάλωσης νερού και θρεπτικών στοιχείων. Συνολικά, η χρήση αισθητήρων αποτελεί μια υποσχόμενη τεχνολογία για τη

βελτίωση της διαχείρισης αποβλήτων θερμοκηπίων και υδροπονίας, με πολλές εφαρμογές σε διάφορες χώρες.

Στη μελέτη των Parra et. al., (2008), χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της μονομερούς αξιολόγησης (contingent valuation method - CVM), έχει επαληθευτεί ότι οι αγρότες ενδέχεται να είναι διατεθειμένοι να πληρώσουν περισσότερα από ό,τι κάνουν σήμερα για τη διαχείριση των αποβλήτων, εάν τα υπολείμματα θα επαναχρησιμοποιηθούν και έχουν αξιολογηθεί δύο διαφορετικές χρήσεις: (1) ένα εργοστάσιο κομποστοποίησης και (2) μια διαδικασία ανακύκλωσης ενέργειας για την αφαλάτωση θαλασσινού νερού για γεωργική άρδευση. Η μεθοδολογία έχει επιτρέψει να αποδοθεί χρηματική αξία στο συνολικό περιβαλλοντικό όφελος. Επιπλέον, ένα Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών (GIS) έχει χρησιμοποιηθεί για να εντοπίσει μια βέλτιστη περιοχή για ένα εργοστάσιο κομποστοποίησης. Η λύση που επιτεύχθηκε λαμβάνει υπόψη όλους τους περιβαλλοντικούς περιορισμούς που εξετάστηκαν και, ταυτόχρονα, ελαχιστοποιεί το κόστος μεταφοράς οργανικών αποβλήτων από τις περιοχές παραγωγής στη μονάδα επεξεργασίας. Η επακόλουθη ενσωμάτωση των αποτελεσμάτων σε μια γενικευμένη ανάλυση κόστους-οφέλους υποδηλώνει ότι το έργο κομποστοποίησης είναι η καλύτερη εναλλακτική λύση όταν το περιβαλλοντικό όφελος της ανακύκλωσης των φυτικών αποβλήτων ενσωματώθηκε οικονομικά. Η ανακύκλωση των φυτικών αποβλήτων είναι η καλύτερη λύση για τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τη διαχείριση των αποβλήτων από θερμοκήπια. Η κομποστοποίηση είναι η πιο αποτελεσματική μέθοδος ανακύκλωσης των φυτικών αποβλήτων και μπορεί να αποφέρει οικονομικά οφέλη.

Στη μελέτη των Lanorte et. al., (2017), γίνεται εκτίμηση και χαρτογράφηση των αποβλήτων από πλαστικά στη γεωργία χρησιμοποιώντας δορυφορικές εικόνες. Τα απορρίμματα αξιολογούνται με τη χρήση δεικτών που σχετίζονται με την παραγωγή απορριμμάτων με τον τύπο της καλλιέργειας και την εφαρμογή πλαστικού, όπως ορίζεται από το χάρτη χρήσης γης που πραγματοποιήθηκε με την ταξινόμηση της εικόνας Landsat 8. Η ταξινόμηση της εικόνας πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας Support Vector Machines (SVMs) και η αξιολόγηση ακρίβειας έδειξε ότι η συνολική ακρίβεια ήταν 94,54%. Τα δεδομένα σχετικά με τα πλαστικά απόβλητα που ελήφθησαν από το δορυφορικό χάρτη χρήσης γης συγκρίθηκαν με τα δεδομένα που ελήφθησαν με τη χρήση του χάρτη χρήσης γης και εντοπίστηκε διαφορά 1,74% στη συνολική ποσότητα απορριμμάτων. Σύμφωνα με τους Lanorte et. al., (2017), η χρήση δορυφορικών εικόνων μπορεί να είναι μια αποτελεσματική

μέθοδος για την εκτίμηση και τη χαρτογράφηση των απορριμμάτων από πλαστικά στη γεωργία. Η μέθοδος αυτή μπορεί να βοηθήσει στην ανάπτυξη αποτελεσματικών σχεδίων διαχείρισης αποβλήτων και στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τα πλαστικά απόβλητα.

Το πλαστικό εδαφοκάλυψης (mulching) είναι μια σημαντική τεχνολογία στην αγροτική παραγωγή σε όλο τον κόσμο. Παρά το όφελός της στην αύξηση των αποδόσεων των καλλιεργειών, η ραγδαία επέκταση της εδαφοκάλυψης και χρήσης πλαστικού έχει αλλάξει τα μοτίβα του τοπίου και επηρεάζει το περιβάλλον. Η ακριβής και αποτελεσματική χαρτογράφηση των καλλιεργειών με mulching μπορεί να παρέχει χρήσιμες πληροφορίες για την αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων της. Εξακολουθεί να αποτελεί πρόκληση λόγω των μεταβαλλόμενων φασματικών χαρακτηριστικών της με την ανάπτυξη των καλλιεργειών και τη γεωγραφική χωρική διαίρεση. Η μελέτη των Hasituya et. al., (2017), υποδεικνύει ότι η χρήση δεδομένων από δορυφόρους (Radarsat-2) για τη χαρτογράφηση των καλλιεργειών που αξιοποιούν εδαφοκάλυψη είναι μια πολλά υποσχόμενη προσέγγιση.

Οι Jiménez-Lao et. al., (2020) προβλέπουν ότι τα επόμενα χρόνια θα ενισχυθεί μια τάση προς γραμμές έρευνας στην Τηλεπισκόπηση Γεωργικών Θερμοκηπίων και καλλιεργειών με εδαφοκάλυψη που σχετίζονται με τη συνδυασμένη χρήση δεδομένων από διαφορετικούς αισθητήρες τηλεπισκόπησης (π.χ., οπτικές εικόνες, SAR, LiDAR και υπερφασματικές) και την ανίχνευση και ταξινόμηση των καλλιεργειών που βρίσκονται κάτω από θερμοκήπια.

Ερευνητικά προγράμματα για τη διαχείριση αποβλήτων θερμοκηπίων και υδροπονίας

Υπάρχουν ερευνητικά προγράμματα για τη διαχείριση αποβλήτων θερμοκηπίων και υδροπονίας στην Ελλάδα. Παραδείγματα είναι το πρόγραμμα "Ολοκληρωμένη Διαχείριση Οργανικών Υπολειμμάτων και Αποβλήτων (Αστικών και Αγροτικών) με Έμφαση στην Χρήση των Προϊόντων" και το πρόγραμμα "Εισαγωγή και Εφαρμογές σε Καινοτόμες υδροπονικές καλλιέργειες σε θερμοκήπια: Διαχείριση και Παραγωγή λαχανοκομικών Προϊόντων".

Το 2020, μέσω του προγράμματος «Νέα Γεωργία για τη Νέα Γενιά» ξεκίνησε μια εθνική προσπάθεια για την υπεύθυνη διαχείριση των αποβλήτων από τα πλαστικά γεωργίας. Στόχοι του είναι:

- η υποστήριξη των νέων αγροτών, ώστε να εξασφαλίσουν τη μελλοντική επιχειρηματική τους ανταγωνιστικότητα υιοθετώντας πρακτικές ορθής διαχείρισης,
- η όσο το δυνατό μεγαλύτερη συμβολή του αγροτικού τομέα, ως μέρος της λύσης για το περιβάλλον.

Ακολουθεί ενδεικτικός κατάλογος με διάφορα εθνικά και ευρωπαϊκά έργα, σχετικά με την ανακύκλωση στερεών και υγρών αποβλήτων θερμοκηπίων και υδροπονίας:

- FERTIPLUS4 (FERTIPLUS - Μείωση ορυκτών λιπασμάτων και αγροχημικών μέσω ανακύκλωσης επεξεργασμένων οργανικών αποβλήτων ως κομπόστ και προϊόντα βιοάνθρακα). Το FERTIPLUS προσδιορίζει τα αστικά και αγροτικά οργανικά απόβλητα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανακύκλωση θρεπτικών ουσιών και την επιστροφή αυτών των θρεπτικών συστατικών που περιέχονται στα απόβλητα στη γεωργία ως βιοκάρβουνο, κομπόστ ή συνδυασμούς και των δύο. Τα οργανικά υπολείμματα αστικών και αγροτικών εκμεταλλεύσεων αποτελούν μεγάλη πηγή θρεπτικών συστατικών και επί του παρόντος δεν χρησιμοποιούνται στο μέγιστο των δυνατοτήτων τους.
- National greenhouse waste-water recycling project⁵ (Αυστραλία). Το εθνικό έργο ανακυκλοφορίας λυμάτων θερμοκηπίου σχεδιάστηκε για να παρέχει τις απαραίτητες δεξιότητες στους καλλιεργητές λαχανικών θερμοκηπίου για τη μετατροπή των συστημάτων τους ελεύθερης αποστράγγισης (ανοικτά) σε πλήρους ανακύκλωσης (κλειστά). Η γνώση που αποκτήθηκε παραδόθηκε σε βασικές περιοχές ανάπτυξης της Αυστραλίας μέσω μιας σειράς θεωρητικών μαθημάτων και πρακτικών εργαστηρίων.
- Turning greenhouse waste into energy⁶ (Καναδάς). Η χρήση ορυκτών καυσίμων για τη θέρμανση θερμοκηπίων είναι δαπανηρή και περιβαλλοντικά μη βιώσιμη. Ένα τέτοιο καύσιμο ονομάζεται βιοάνθρακας. Είναι φτιαγμένο από φυτική ύλη - φύλλα, μίσχους

⁴ <https://cordis.europa.eu/project/id/289853>

⁵ <https://www.horticulture.com.au/growers/help-your-business-grow/research-reports-publications-fact-sheets-and-more/vg09073/>

⁶ <https://www.uoguelph.ca/alliance/news/2018/01/turning-greenhouse-waste-energy>

από υπολείμματα θερμοκηπίου - που υπάρχει σε αφθονία στα θερμοκήπια, είναι δαπανηρή η απόρριψή του και δεν έχει αξία μεταπώλησης.

Προκλήσεις και μελλοντικές κατευθύνσεις έρευνας

Τα ευρήματα της πραγματοποιηθείσας έρευνας αναδεικνύουν αρκετές προκλήσεις και πεδία που απαιτούν μελλοντική έρευνα σχετικά με τη διαχείριση στερεών και υγρών αποβλήτων σε συστήματα θερμοκηπίου και υδροπονικών καλλιεργειών. Ανάμεσα σε αυτές περιλαμβάνονται η βελτιστοποίηση των τεχνικών διαχείρισης αποβλήτων για διαφορετικούς τύπους καλλιεργειών και αγροτικών πρακτικών, η ανάπτυξη προηγμένων τεχνολογιών για την ανάκτηση και ανακύκλωση θρεπτικών ουσιών, καθώς και η αξιολόγηση των μακροπρόθεσμων περιβαλλοντικών επιπτώσεων των πρακτικών διαχείρισης αποβλήτων. Τα ευρήματα υπογραμμίζουν επίσης την ανάγκη για παρεμβάσεις σε επίπεδο πολιτικής, εκπαιδευτικών προγραμμάτων και εκστρατειών ευαισθητοποίησης με σκοπό την προώθηση βιώσιμων πρακτικών διαχείρισης αποβλήτων μεταξύ των φορέων που δραστηριοποιούνται στους τομείς των θερμοκηπίων και των υδροπονικών καλλιεργειών.

Συμπερασματικά, τα ευρήματα και η συζήτηση που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο αυτής της έρευνας καταδεικνύουν την αναγκαιότητα μιας αποτελεσματικής διαχείρισης αποβλήτων στην παραγωγή θερμοκηπίου και υδροπονικής καλλιέργειας. Τα ευρήματα αυτά υπογραμμίζουν τη σημασία της υιοθέτησης προσαρμοσμένων τεχνικών διαχείρισης αποβλήτων για τα στερεά και υγρά απόβλητα, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις, να προωθηθεί η αειφορία των πόρων και να υποστηριχθούν βιώσιμες γεωργικές πρακτικές. Μέσω μιας συγκριτικής ανάλυσης, επισημαίνεται η αναγκαιότητα ολοκληρωμένων στρατηγικών διαχείρισης αποβλήτων που θα λαμβάνουν υπόψη τα μοναδικά χαρακτηριστικά και των δύο ροών αποβλήτων. Συνεπώς, η μελλοντική έρευνα πρέπει να επικεντρωθεί στην αντιμετώπιση των προκλήσεων που έχουν προσδιοριστεί και στην προώθηση των τεχνολογιών διαχείρισης αποβλήτων, προκειμένου να διασφαλιστεί η μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα και περιβαλλοντική βιωσιμότητα των συστημάτων θερμοκηπίου και υδροπονικών καλλιεργειών.

Αποτελέσματα και συζήτηση: Διαχείριση απορριμμάτων υδροπονικών καλλιεργειών

Στην παρούσα βιβλιογραφική ανασκόπηση, έχουν προκύψει αρκετά βασικά ευρήματα σχετικά με τη διαχείριση των αποβλήτων υδροπονικών καλλιεργειών. Η έρευνα έχει επισημάνει τη σημασία της διαχείρισης απορριμμάτων σε υδροπονικά συστήματα και την ανάγκη για αποτελεσματικές στρατηγικές για την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η ανασκόπηση παρέχει πληροφορίες για τους τύπους και τα χαρακτηριστικά των αποβλήτων υδροπονικών καλλιεργειών, τις περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις και διάφορες τεχνικές διαχείρισης αποβλήτων που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία. Υιοθετώντας πρακτικές βιώσιμης διαχείρισης απορριμμάτων, οι υδροπονικοί καλλιεργητές μπορούν να εξασφαλίσουν τη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα και την οικολογική βιωσιμότητα των δραστηριοτήτων τους. Η συνεχής έρευνα και η καινοτομία είναι ζωτικής σημασίας για τη συνεχή βελτίωση των στρατηγικών διαχείρισης αποβλήτων, τη βελτίωση της αποδοτικότητας και τη μείωση των περιβαλλοντικών αποτυπωμάτων στα υδροπονικά συστήματα. Εφαρμόζοντας τις βέλτιστες πρακτικές που περιγράφονται σε αυτή την εργασία, οι υδροπονικοί καλλιεργητές μπορούν να συμβάλλουν σε μια πιο φιλική προς το περιβάλλον και αποδοτική ως προς τους πόρους γεωργική βιομηχανία.

Η διαχείριση των απορριμμάτων σε συστήματα υδροπονικών καλλιεργειών είναι μια κρίσιμη πτυχή για τη διασφάλιση βιώσιμων γεωργικών πρακτικών και την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η ανάλυση αυτή αποτελεί κρίσιμη πτυχή για την επίτευξη βιώσιμων γεωργικών πρακτικών και την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Παρουσιάζονται επίσης μια περιεκτική συζήτηση των ευρημάτων και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Η έρευνα παρουσιάζει πληροφορίες σχετικά με τη σύνθεση και τα χαρακτηριστικά των αποβλήτων που παράγονται στα υδροπονικά συστήματα καλλιεργειών. Προκύπτει ότι οι κυρίαρχοι τύποι αποβλήτων περιλαμβάνουν μη καταναλωμένα θρεπτικά διαλύματα, φυτικά υπολείμματα και υπολείμματα ρίζας. Επιπλέον, η σύνθεση των απορριμμάτων μπορεί να διαφέρει ανάλογα με παράγοντες όπως ο τύπος καλλιέργειας, οι πρακτικές διαχείρισης θρεπτικών ουσιών και ο σχεδιασμός του συστήματος. Η κατανόηση αυτών των συνιστωσών είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη αποτελεσματικών στρατηγικών διαχείρισης των αποβλήτων.

Η έρευνα εξέτασε διάφορες τεχνικές διαχείρισης αποβλήτων που χρησιμοποιούνται σε υδροπονικά συστήματα καλλιεργειών για την αντιμετώπιση των προκλήσεων που συνδέονται με την παραγωγή απορριμμάτων. Τα αποτελέσματα έδειξαν την αποτελεσματικότητα πολλών βασικών τεχνικών. Πρώτον, η ανακύκλωση και η επαναχρησιμοποίηση των αναλωμένων θρεπτικών διαλυμάτων αποδείχθηκαν πολύτιμες προσεγγίσεις για τη μείωση των αποβλήτων και τη βελτιστοποίηση της χρήσης των πόρων. Με την επεξεργασία και την αναπλήρωση των θρεπτικών διαλυμάτων, οι καλλιεργητές μπορούν να ελαχιστοποιήσουν τον όγκο των αποβλήτων που παράγονται, διατηρώντας παράλληλα τα βέλτιστα επίπεδα θρεπτικών συστατικών για την ανάπτυξη των φυτών.

Δεύτερον, η χρήση φυτικών υπολειμμάτων και ριζικών υλικών ως εισροών οργανικής ύλης στα συστήματα κομποστοποίησης αποδείχθηκε αποτελεσματική στρατηγική διαχείρισης αποβλήτων. Η κομποστοποίηση όχι μόνο μειώνει τον όγκο των αποβλήτων, αλλά παράγει επίσης κομπόστ πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό σε υδροπονικά ή παραδοσιακά γεωργικά συστήματα με βάση το έδαφος.

Επιπλέον, η εφαρμογή συστημάτων αναερόβιας χώνευσης βρέθηκε να είναι μια βιώσιμη προσέγγιση για τη διαχείριση των οργανικών αποβλήτων στην υδροπονία. Η αναερόβια χώνευση μπορεί να μετατρέψει τα οργανικά απόβλητα σε βιοαέριο, μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, ενώ παράλληλα παράγει υπολείμματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως λίπασμα πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά.

Τα ευρήματα της έρευνας τόνισαν τη σημασία των πρακτικών βιώσιμης διαχείρισης απορριμμάτων σε συστήματα υδροπονικών καλλιεργειών για την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η ακατάλληλη διαχείριση των απορριμμάτων μπορεί να οδηγήσει σε έκπλυση θρεπτικών ουσιών, ρύπανση του νερού και πιθανή βλάβη στα γύρω οικοσυστήματα. Υιοθετώντας αποτελεσματικές τεχνικές διαχείρισης απορριμμάτων, οι υδροπονικοί καλλιεργητές μπορούν να μειώσουν το περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα και να συμβάλλουν στη διατήρηση των πόρων.

Η μελέτη εξέτασε επίσης τις οικονομικές πτυχές της διαχείρισης απορριμμάτων σε συστήματα υδροπονικών καλλιεργειών. Διαπιστώθηκε ότι η εφαρμογή αποτελεσματικών στρατηγικών διαχείρισης αποβλήτων μπορεί να οδηγήσει σε εξοικονόμηση κόστους μειώνοντας την ανάγκη για εξωτερικές εισροές και βελτιώνοντας τη συνολική χρήση των πόρων. Για παράδειγμα, η ανακύκλωση και η ανακαίνιση διαλυμάτων θρεπτικών συστατικών

μπορεί να μειώσει τα έξοδα που σχετίζονται με την αγορά νέων θρεπτικών διαλυμάτων, ενώ η κομποστοποίηση οργανικών απορριμμάτων μπορεί να μειώσει την εξάρτηση από εμπορικά λιπάσματα.

Η έρευνα εντόπισε αρκετές προκλήσεις και τομείς για μελλοντική έρευνα στη διαχείριση απορριμμάτων σε συστήματα υδροπονικών καλλιεργειών. Αυτά περιλαμβάνουν τη βελτιστοποίηση τεχνικών διαχείρισης απορριμμάτων για διαφορετικούς τύπους καλλιεργειών και σχεδιασμούς συστημάτων, την αξιολόγηση των μακροπρόθεσμων επιπτώσεων των πρακτικών διαχείρισης αποβλήτων στην υγεία και την παραγωγικότητα των φυτών και την ανάπτυξη ολοκληρωμένων προσεγγίσεων για την ανάκτηση και την ανακύκλωση θρεπτικών συστατικών.

Επιπλέον, απαιτείται περαιτέρω έρευνα για την αξιολόγηση της οικονομικής σκοπιμότητας και επεκτασιμότητας διάφορων τεχνικών διαχείρισης απορριμμάτων σε διαφορετικά πλαίσια υδροπονικής γεωργίας. Αυτό περιλαμβάνει την αξιολόγηση της πιθανής αγοραίας αξίας υποπροϊόντων όπως το κομπόστ ή το χωνεμένο υπόλειμμα και τη διερεύνηση καινοτόμων τεχνολογιών για την επεξεργασία και τη χρήση αποβλήτων.

Συνοψίζοντας, η έρευνα για τη διαχείριση αποβλήτων στην υδροπονική φυτική παραγωγή παρουσίασε σημαντικές προσεγγίσεις για τη μείωση του όγκου των αποβλήτων και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης των συστημάτων καλλιέργειας. Η ανακύκλωση θρεπτικών διαλυμάτων, η κομποστοποίηση οργανικών υλικών και η αναερόβια χώνευση αποτελούν αποδοτικές και βιώσιμες προσεγγίσεις για την αντιμετώπιση των αποβλήτων και την προώθηση της κυκλικής οικονομίας στη γεωργία.

5. Συμπεράσματα - Προτάσεις

Το κεφάλαιο "Συμπεράσματα - Προτάσεις" παρέχει μια συνοπτική ανασκόπηση των κύριων ευρημάτων και γνώσεων που προέκυψαν από την έρευνα σχετικά με τη διαχείριση των στερεών και υγρών αποβλήτων σε θερμοκήπια και υδροπονικά συστήματα καλλιέργειας. Επιπλέον, προσφέρονται προτάσεις και συστάσεις για τη βελτίωση των πρακτικών διαχείρισης απορριμμάτων σε αυτούς τους γεωργικούς τομείς. Ο σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι να

παρέχει μια συνολική επισκόπηση των αποτελεσμάτων της έρευνας και να παράσχει πρακτικές κατευθύνσεις για τους καλλιεργητές και τους ενδιαφερόμενους στον τομέα.

Περίληψη βασικών ευρημάτων

Τα ευρήματα της έρευνας έχουν φωτίσει διάφορες πτυχές που σχετίζονται με τη διαχείριση των απορριμμάτων στον τομέα της θερμοκηπιακής και υδροπονικής καλλιέργειας. Η συγκεκριμένη μελέτη αναγνώρισε τους διάφορους τύπους αποβλήτων, τόσο στερεών όσο και υγρών, που παράγονται σε αυτά τα συστήματα, αξιολόγησε τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις τους και διερεύνησε διάφορες τεχνικές διαχείρισης αποβλήτων. Τα αποτελέσματα της έρευνας επισήμαναν την ουσιώδη σημασία των πρακτικών βιώσιμης διαχείρισης απορριμμάτων, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η περιβαλλοντική ρύπανση, να βελτιστοποιηθεί η αποτελεσματική χρήση των πόρων και να διασφαλιστεί η μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα των θερμοκηπιακών και υδροπονικών καλλιεργειών.

Προτάσεις για τη διαχείριση στερεών αποβλήτων

Με βάση τα ευρήματα που προέκυψαν από την έρευνα, έχουν διατυπωθεί πολλές προτάσεις για τη βελτίωση της διαχείρισης των στερεών αποβλήτων σε συστήματα θερμοκηπίου και υδροπονικών καλλιεργειών. Προτείνεται η υιοθέτηση πρακτικών διαχωρισμού και ταξινόμησης των αποβλήτων για τη διευκόλυνση της αποτελεσματικής διαχείρισής τους. Αυτό περιλαμβάνει την εγκατάσταση συστημάτων που θα επιτρέπουν το διαχωρισμό των διαφορετικών τύπων στερεών αποβλήτων, όπως φυτικά υπολείμματα, υπολείμματα καλλιεργειών και υλικά συσκευασίας. Με αυτό τον τρόπο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν πιο στοχευμένες και εξειδικευμένες μέθοδοι επεξεργασίας ή ανακύκλωσης των αποβλήτων.

- Προτείνεται η προώθηση της κομποστοποίησης ως βιώσιμης επιλογής για τη διαχείριση των αποβλήτων. Η κομποστοποίηση αποτελεί μια αποδοτική μέθοδο μείωσης του όγκου των στερεών αποβλήτων, ενώ παράγει οργανική ύλη πλούσια σε θρεπτικά συστατικά. Οι καλλιεργητές θα πρέπει να ενθαρρύνονται να υιοθετήσουν πρακτικές κομποστοποίησης και να χρησιμοποιούν το παραγόμενο κομπόστ ως πολύτιμη τροποποίηση του εδάφους στις γεωργικές τους δραστηριότητες.
- Επιπλέον, προτείνεται η διερεύνηση εναλλακτικών χρήσεων για τα στερεά απόβλητα των θερμοκηπίων. Μια προοπτική είναι η χρήση των υπολειμμάτων καλλιεργειών για

την παραγωγή βιοενέργειας. Μπορεί επίσης να εξεταστεί η ανάπτυξη προϊόντων προστιθέμενης αξίας από υλικά συσκευασίας. Με αυτό τον τρόπο, ενισχύεται η αποδοτικότητα των πόρων και προωθείται η ενσωμάτωση των στερεών αποβλήτων σε ένα κυκλικό οικονομικό μοντέλο στον τομέα των θερμοκηπίων.

Οι παραπάνω προτάσεις αποτελούν σημαντικά βήματα προς την επίτευξη μιας πιο βιώσιμης και οικολογικά υπεύθυνης διαχείρισης των αποβλήτων στον τομέα της γεωργίας και της καλλιέργειας σε θερμοκήπια. Είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψη αυτές οι προτάσεις κατά το σχεδιασμό και την υλοποίηση των συστημάτων διαχείρισης αποβλήτων, προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη απόδοση και προστασία του περιβάλλοντος.

Προτάσεις για τη διαχείριση υγρών αποβλήτων

Η αποτελεσματική διαχείριση των υγρών αποβλήτων σε συστήματα θερμοκηπίου και υδροπονικών καλλιεργειών είναι ζωτικής σημασίας για την ελαχιστοποίηση της περιβαλλοντικής ρύπανσης και τη βελτιστοποίηση της χρήσης του νερού και των θρεπτικών συστατικών. Για τη βελτίωση της διαχείρισης υγρών αποβλήτων προσφέρονται οι ακόλουθες προτάσεις:

- Πρώτον, προτείνεται η εφαρμογή συστημάτων ανάκτησης και ανακύκλωσης θρεπτικών συστατικών. Με τη χρήση τεχνολογιών, όπως το φιλτράρισμα μεμβράνης, η ανταλλαγή ιόντων και η βιολογική επεξεργασία, μπορούν να ανακτηθούν και να ανακυκλωθούν πολύτιμα θρεπτικά συστατικά από τα ρεύματα αποβλήτων, μειώνοντας έτσι την απώλεια αυτών των ουσιών και προωθώντας την αποδοτική χρήση των πόρων.
- Δεύτερον, είναι σημαντικό να βελτιστοποιηθούν οι πρακτικές άρδευσης και διαχείρισης των θρεπτικών συστατικών. Η εφαρμογή τεχνικών άρδευσης ακριβείας, η συνεχής παρακολούθηση των επιπέδων υγρασίας του εδάφους και η υιοθέτηση προηγμένων στρατηγικών διαχείρισης των θρεπτικών συστατικών θα βοηθήσουν στη βελτιστοποίηση της χρήσης του νερού και των θρεπτικών συστατικών, μειώνοντας ταυτόχρονα τον όγκο των παραγόμενων υγρών αποβλήτων.
- Τέλος, προωθείται η επαναχρησιμοποίηση του νερού και η εφαρμογή συστημάτων κλειστού βρόχου. Με την αυξημένη ανησυχία για τη λειψυδρία, η επαναχρησιμοποίηση του νερού αποκτά ζωτική σημασία στη βιώσιμη γεωργία.

Ενθαρρύνοντας τη χρήση συστημάτων κλειστού βρόχου, όπως η ανακυκλοφορία θρεπτικών διαλυμάτων και η δέσμευση και επεξεργασία του νερού αποστράγγισης, μπορεί να ελαχιστοποιηθεί η σπατάλη νερού και να μειωθεί η ανάγκη για εισροές γλυκού νερού.

Οι παραπάνω προτάσεις αποτελούν κρίσιμα βήματα προς την επίτευξη μιας βιώσιμης και περιβαλλοντικά φιλικής διαχείρισης των υγρών αποβλήτων σε συστήματα θερμοκηπίου και υδροπονικών καλλιεργειών. Με τη σωστή υλοποίηση και εφαρμογή τους, μπορεί να ελαχιστοποιηθεί η περιβαλλοντική ρύπανση, να βελτιστοποιηθεί η χρήση των πόρων και να προωθηθεί μια πιο αειφόρος και αποδοτική πρακτική στη γεωργία.

Ενοποίηση διαχείρισης στερεών και υγρών αποβλήτων

Για να επιτευχθεί μια ολοκληρωμένη προσέγγιση διαχείρισης αποβλήτων, είναι απαραίτητο να ενσωματωθούν ολιστικές στρατηγικές διαχείρισης στερεών και υγρών αποβλήτων. Μερικές προτάσεις για την ενοποίηση αυτών των δύο ροών αποβλήτων περιλαμβάνουν:

- Σχεδιασμός συστημάτων διαχείρισης αποβλήτων με γνώμονα τη συνέργεια: Όταν σχεδιάζονται υποδομές διαχείρισης αποβλήτων, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι τυχόν διασυνδέσεις μεταξύ ροών στερεών και υγρών αποβλήτων. Αντίστοιχα, πρέπει να σχεδιαστούν ολοκληρωμένα συστήματα που επιτρέπουν τη δέσμευση, την επεξεργασία και την ανακύκλωση και των δύο τύπων αποβλήτων, βελτιστοποιώντας την ανάκτηση των πόρων και ελαχιστοποιώντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.
- Διεξαγωγή αξιολογήσεων κύκλου ζωής: Πρέπει να εκτελούνται τακτικά αξιολογήσεις κύκλου ζωής, για να αξιολογείται ολιστικά ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος διαφορετικών στρατηγικών διαχείρισης αποβλήτων. Αυτή η προσέγγιση λαμβάνει υπόψη ολόκληρο τον κύκλο ζωής της διαχείρισης αποβλήτων, από τη δημιουργία αποβλήτων έως την επεξεργασία και διάθεση, βοηθώντας στον εντοπισμό των πιο βιώσιμων επιλογών και στην αποφυγή μετατόπισης των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων από το ένα στάδιο στο άλλο.

Συνεργασία, εκπαίδευση και πολιτικές παρεμβάσεις

Στο πλαίσιο της προώθησης των πρακτικών διαχείρισης απορριμμάτων σε θερμοκηπιακή και υδροπονική καλλιέργεια, απαιτείται στενή συνεργασία μεταξύ των ενδιαφερομένων φορέων, πρωτοβουλιών στον εκπαιδευτικό τομέα και υποστηρικτικών παρεμβάσεων σε πολιτικό επίπεδο. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, παρατίθενται ορισμένες προτάσεις που μπορούν να προωθήσουν τις προαναφερθείσες προσπάθειες:

- Ενθάρρυνση της συνεργασίας μεταξύ καλλιεργητών, ερευνητών και επαγγελματιών διαχείρισης απορριμμάτων: Ένας τρόπος επίτευξης αυτού είναι η προώθηση της ανταλλαγής γνώσεων, των συνεργασιών και των συναντήσεων μεταξύ διαφορετικών ενδιαφερομένων, προκειμένου να ανταλλάσσονται βέλτιστες πρακτικές, εμπειρίες και καινοτόμες λύσεις για τη διαχείριση απορριμμάτων.
- Παροχή εκπαιδευτικών πόρων και προγραμμάτων κατάρτισης: Απαιτείται η ανάπτυξη εκπαιδευτικών πόρων και προγραμμάτων κατάρτισης, με στόχο την ενίσχυση της ευαισθητοποίησης και της γνώσης των καλλιεργητών σχετικά με τις βιώσιμες πρακτικές διαχείρισης απορριμμάτων. Οι πόροι αυτοί μπορούν να καλύπτουν θέματα, όπως η χαρακτηριστική περιγραφή των αποβλήτων, οι τεχνολογίες επεξεργασίας και οι κανονιστικές απαιτήσεις, προσφέροντας στους καλλιεργητές τη δυνατότητα λήψης ενημερωμένων αποφάσεων.
- Θέσπιση υποστηρικτικών πολιτικών και κανονισμών: Οι κυβερνήσεις και οι ρυθμιστικοί φορείς πρέπει να αναπτύξουν πολιτικές και κανονισμούς που προωθούν βιώσιμες πρακτικές διαχείρισης απορριμμάτων σε συστήματα θερμοκηπίου και υδροπονικών καλλιεργειών. Αυτό περιλαμβάνει τον καθορισμό προτύπων για το χαρακτηρισμό των αποβλήτων, την προώθηση της χρήσης περιβαλλοντικά φιλικών τεχνολογιών επεξεργασίας αποβλήτων και την παροχή κινήτρων για την υιοθέτηση βιώσιμων πρακτικών διαχείρισης αποβλήτων.

Συμπερασματικά, η έρευνα που διεξήχθη για τη διαχείριση στερεών και υγρών αποβλήτων σε συστήματα θερμοκηπίου και υδροπονικών καλλιεργειών παρέχει πολύτιμες γνώσεις και προτάσεις για τη βελτίωση των πρακτικών διαχείρισης απορριμμάτων. Με την εφαρμογή των προτεινόμενων στρατηγικών και συστάσεων, οι καλλιεργητές θερμοκηπίου και υδροπονίας μπορούν να μειώσουν την περιβαλλοντική ρύπανση, να βελτιστοποιήσουν τη χρήση των πόρων και να συμβάλουν στη βιωσιμότητα της γεωργικής παραγωγής. Είναι ζωτικής σημασίας

για τα ενδιαφερόμενα μέρη, συμπεριλαμβανομένων των καλλιεργητών, των ερευνητών και των υπευθύνων χάραξης πολιτικής, να συνεργαστούν και να εργαστούν από κοινού προκειμένου να δημιουργήσουν ένα πιο βιώσιμο μέλλον για τη διαχείριση των απορριμμάτων σε συστήματα θερμοκηπίου και υδροπονικών καλλιεργειών.

Βιβλιογραφία

- Abu Taher Jamal, Treatments and Recycle of Greenhouse Solid Waste and Nutrient Feed Water, 2023
- Abubakar IR, Maniruzzaman KM, Dano UL, AlShihri FS, AlShammari MS, Ahmed SMS, Al-Gehlani WAG, Alrawaf TI. Environmental Sustainability Impacts of Solid Waste Management Practices in the Global South. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022; 19(19):12717. <https://doi.org/10.3390/ijerph191912717>
- Adejumo, Oluseun I., & Adebukola Adebisi, O. (2021). Agricultural Solid Wastes: Causes, Effects, and Effective Management. In *Strategies of Sustainable Solid Waste Management*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.93601>
- Afxentiou, N., Georgali, P.-Z. M., Kylili, A., & Fokaides, P. A. (2021). Greenhouse agricultural plastic waste mapping database. In *Data in Brief* (Vol. 34, p. 106622). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.106622>
- Ahdab, Y. D., Schücking, G., Rehman, D., & Lienhard, J. H., V. (2021). Treatment of greenhouse wastewater for reuse or disposal using monovalent selective electro dialysis. In *Desalination* (Vol. 507, p. 115037). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115037>
- Asaduzzaman M, Asao T (2020) Autotoxicity in strawberry under recycled hydroponics and its mitigation methods. *Hortic J* 89:124–137
- Ayati, S. M., Shekarian, E., Majava, J., & Wæhrens, B. V. (2022). Toward a circular supply chain: Understanding barriers from the perspective of recovery approaches. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 359, p. 131775). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131775>
- Berghage, R. D., MacNeal, E. P., Wheeler, E. F., & Zachritz, W. H. (1999). “Green” water treatment for the green industries: opportunities for biofiltration of greenhouse and nursery irrigation water and runoff with constructed wetlands. *HortScience*, 34(1), 50-54.
- Briassoulis, D., Babou, E., Hiskakis, M., Scarascia, G., Picuno, P., Guarde, D., & Dejean, C. (2013). Review, mapping and analysis of the agricultural plastic waste generation and consolidation in Europe. In *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable*

Circular Economy (Vol. 31, Issue 12, pp. 1262–1278). SAGE Publications.
<https://doi.org/10.1177/0734242x13507968>

Bryszewski KŁ, Rodziewicz J, Janczukowicz W. Effect of Bio-Electrochemical Treatment of Hydroponic Effluent on the Nutrient Content. *Applied Sciences*. 2022; 12(19):9540.
<https://doi.org/10.3390/app12199540>

Candra, I. D. P., Taufik, I., & Muktingrum, T. (2022). Design of Wastewater Filtration System for Microcontroller and Smartphone-Based Hydroponic Agriculture. *East Asian Journal of Multidisciplinary Research*, 1(3), 457-470.

Carmassi, G., Incrocci, L., Maggini, R., Malorgio, F., Tognoni, F., & Pardossi, A. (2005). Modeling salinity build-up in recirculating nutrient solution culture. *Journal of plant nutrition*, 28(3), 431-445.

Castellar, J. A. C., Formosa, J., Fernández, A. I., Jové, P., Bosch, M. G., Morató, J., ... & Arias, C. A. (2019). Cork as a sustainable carbon source for nature-based solutions treating hydroponic wastewaters—Preliminary batch studies. *Science of the total environment*, 650, 267-276.

Castillo-Díaz FJ, Belmonte-Ureña LJ, Camacho-Ferre F, Tello-Marquina JC. The Management of Agriculture Plastic Waste in the Framework of Circular Economy. Case of the Almeria Greenhouse (Spain). *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021; 18(22):12042. <https://doi.org/10.3390/ijerph182212042>

Chen, Y., Bracy, R. P., Owings, A. D., & Merhaut, D. J. (2009). Nitrogen and phosphorous removal by ornamental and wetland plants in a greenhouse recirculation research system. *HortScience*, 44(6), 1704-1711.

Cheuk, W., Lo, K. V., Branion, R. M. R., & Fraser, B. (2003). Benefits of Sustainable Waste Management in the Vegetable Greenhouse Industry. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 38(6), 855–863. doi:10.1081/pfc-120025565

da Silva Cuba Carvalho, R., Bastos, R. G., & Souza, C. F. (2018). Influence of the use of wastewater on nutrient absorption and production of lettuce grown in a hydroponic system. In *Agricultural Water Management* (Vol. 203, pp. 311–321). Elsevier BV.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.03.028>

Delrue F, Ribeiro de Jesus Cerqueira M, Compadre A, Alvarez P, Fleury G, Escoffier C, Sassi J-F. Hydroponic Farm Wastewater Treatment Using an Indigenous Consortium. *Processes*. 2021; 9(3):519. <https://doi.org/10.3390/pr9030519>

Dorais, M. and Dubé, Y. (2011). MANAGING GREENHOUSE ORGANIC WASTES: A HOLISTIC APPROACH. *Acta Hortic.* 893, 183-197 DOI: 10.17660/ActaHortic.2011.893.12 <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2011.893.12>

Drikas, M., Chow, C. W. K., House, J., & Burch, M. D. (2001). Using Coagulation, Flocculation, and Settling to Remove Toxic cyanobacteria. In *Journal - American Water Works Association* (Vol. 93, Issue 2, pp. 100–111). Wiley. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2001.tb09130.x>

Dunets, C. S., & Zheng, Y. (2014). Removal of phosphate from greenhouse wastewater using hydrated lime. In *Environmental Technology* (Vol. 35, Issue 22, pp. 2852–2862). Informa UK Limited. <https://doi.org/10.1080/09593330.2014.924567>

Dunets, C. S., & Zheng, Y. (2015). Combined Precipitation/Flocculation Method for Nutrient Recovery from Greenhouse Wastewater, *HortScience*, 50(6), 921-926. Retrieved Jun 29, 2023, from <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.50.6.921>

Duque-Acevedo M, Belmonte-Ureña LJ, Plaza-Úbeda JA, Camacho-Ferre F. The Management of Agricultural Waste Biomass in the Framework of Circular Economy and Bioeconomy: An Opportunity for Greenhouse Agriculture in Southeast Spain. *Agronomy*. 2020; 10(4):489. <https://doi.org/10.3390/agronomy10040489>

Ellen McArthur Foundation. Towards the Circular Economy: Accelerating the Scale-up Across Global Supply Chains. Διαθέσιμο online: <http://reports.weforum.org/toward-the-circular-economy-accelerating-the-scale-up-across-global-supply-chains/> (πρόσβαση στις 7/3/2023).

EPA, Sustainable Materials Management: Non-Hazardous Materials and Waste Management Hierarchy, <https://www.epa.gov/smm/sustainable-materials-management-non-hazardous-materials-and-waste-management-hierarchy> Ανακτήθηκε την 23/08/2023.

European Commission, Directorate-General for Environment, Ελλάδα, Πορεία επίτευξης των στόχων της ΕΕ για την ανακύκλωση αποβλήτων έως το 2025, Publications Office of the European Union, 2023, <https://data.europa.eu/doi/10.2779/218973>

Farrar J, Hawes M, Jones D, Lindow S (2003) How roots control the flux of carbon to the rhizosphere. *Ecology* 84:827–837

Gagnon V, Maltais-Landry G, Puigagut J, Chazarenc F, Brisson J (2010) Treatment of hydroponics wastewater using constructed wetlands in winter conditions. *Water Air Soil Pollut* 212:483–490

Grasselly D, Merlin G, Sédilot C, Vanel F, Dufour G, Rosso L (2004) Denitrification of soilless tomato crops run-off water by horizontal subsurface constructed wetlands. In: International conference on sustainable greenhouse systems-Greensys2004, vol 691, pp 329–332

Groda, Best Practice Guidelines for Greenhouse Water Management, https://hortamericas.com/wp-content/uploads/2018/09/grodan_best-practice-water-management.pdf Ανακτήθηκε στις 23/08/2023

Hasituya, Chen Z, Li F, Hongmei. Mapping Plastic-Mulched Farmland with C-Band Full Polarization SAR Remote Sensing Data. *Remote Sensing*. 2017; 9(12):1264. <https://doi.org/10.3390/rs9121264>

Hiskakis, M., Briassoulis, D., Babou, E., & Liantzas, K. (2007, October). Agricultural plastic waste mapping in Greece. In International Symposium on High Technology for Greenhouse System Management: Greensys2007 801 (pp. 351-358).

HORTNZ. A Code of Practice for The Management of Greenhouse Nutrient Discharges, <https://www.hortnz.co.nz/assets/Compliance/CoP-Managing-GH-Nutrient-Discharges-2nd-edition.pdf> Ανακτήθηκε στις 23/08/2023.

Hosseinzadeh S, Verheust Y, Bonarrigo G, Van Hulle S (2017a) Closed hydroponic systems: operational parameters, root exudates occurrence and related water treatment. *Rev Environ Sci Bio/Technol* 16:59–79

Hutchinson A., Ontario Agri-Food Innovation Alliance, Turning greenhouse waste into energy, 2018, <https://www.uoguelph.ca/alliance/news/2018/01/turning-greenhouse-waste-energy>, accessed 29/05/2023

Jamal-Uddin A-T, Matsuura T, Al-Daoud F, Zytner RG. Treatment and Recycle of Greenhouse Nutrient Feed Water Applying Hydrochar and Activated Carbon Followed by Reverse Osmosis. *Water*. 2022; 14(21):3573. <https://doi.org/10.3390/w14213573>

- Jiménez-Lao R, Aguilar FJ, Nemmaoui A, Aguilar MA. Remote Sensing of Agricultural Greenhouses and Plastic-Mulched Farmland: An Analysis of Worldwide Research. *Remote Sensing*. 2020; 12(16):2649. <https://doi.org/10.3390/rs12162649>
- Kong D, Shan J, Iacoboni M, Maguin SR. Evaluating greenhouse gas impacts of organic waste management options using life cycle assessment. *Waste Management & Research*. 2012;30(8):800-812. doi:10.1177/0734242X12440479
- Kumar, R. R., & Cho, J. Y. (2014). Reuse of hydroponic waste solution. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(16), 9569–9577. doi:10.1007/s11356-014-3024-3
- Lanorte, A., De Santis, F., Nolè, G., Blanco, I., Loisi, R. V., Schettini, E., & Vox, G. (2017). Agricultural plastic waste spatial estimation by Landsat 8 satellite images. In *Computers and Electronics in Agriculture* (Vol. 141, pp. 35–45). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.07.003>
- Lee JY, Rahman A, Behrens J, Brennan C, Ham B, Kim HS, Nho CW, Yun S-T, Azam H, Kwon MJ (2018) Nutrient removal from hydroponic wastewater by a microbial consortium and a culture of *Paracercomonas saepenatans*. *New Biotechnol* 41:15–24
- Li K, Liu Q, Fang F, Luo R, Lu Q, Zhou W, Huo S, Cheng P, Liu J, Addy M (2019) Microalgae-based wastewater treatment for nutrients recovery: a review. *Bioresour Technol* 291:121934
- Liu Z, Hosseinzadeh S, Wardenier N, Verheust Y, Chys M, Hulle SV (2019) Combining ozone with UV and H₂O₂ for the degradation of micropollutants from different origins: lab-scale analysis and optimization. *Environ Technol* 40:3773–3782
- Mack, R., Owen, J. S., Niemiera, A. X., & Latimer, J. (2017). Virginia Nursery and Greenhouse Grower Survey of Best Management Practices. In *HortTechnology* (Vol. 27, Issue 3, pp. 386–392). American Society for Horticultural Science. <https://doi.org/10.21273/horttech03664-17>
- Magwaza, S. T., Magwaza, L. S., Odindo, A. O., & Mditshwa, A. (2020). Hydroponic technology as decentralised system for domestic wastewater treatment and vegetable production in urban agriculture: A review. *Science of the Total Environment*, 698, 134154.
- Maucieri C, Nicoletto C, Van Os E, Anseeuw D, Van Havermaet R, Junge R (2019) Hydroponic technologies. In: Goddek S, Joyce A, Kotzen B, Burnell G (eds) *Aquaponics food production systems*. Springer, Berlin, pp 77–110

Mencet Yelboğa, M. N., Sayın, C., & Metin, F. D. (2022). The Current Issues About Waste Prevention and Willingness to Pay: A Case Study of Greenhouse Production in Turkey. In Polish Journal of Environmental Studies. HARD Publishing Company. <https://doi.org/10.15244/pjoes/153913>

Mielcarek, A.; Rodziewicz, J.; Janczukowicz, W.; Dobrowolski, A. Analysis of Wastewater Generated in Greenhouse Soilless Tomato Cultivation in Central Europe. *Water* 2019, 11, 2538. <https://doi.org/10.3390/w11122538>

Miyama Y, Kawashima Y, Ogawa J, Uekusa H, Okamoto T, Kita N, Sunada K, Hashimoto K (2013) Inactivation of bacterial wilt in closed soilless cultivation by photocatalytic treatment and silver. *Environ Control Biol* 51:173–178

Mohammed, Stephanie. *Tomorrow's Agriculture: " NFT Hydroponics"-Grow Within Your Budget*. Berlin/Heidelberg, Germany: Springer International Publishing, 2018.

Moreno AD, Duque A, González A, Ballesteros I, Negro MJ. Valorization of Greenhouse Horticulture Waste from a Biorefinery Perspective. *Foods*. 2021 Apr 9;10(4):814. doi: 10.3390/foods10040814. PMID: 33918610; PMCID: PMC8070379.

Nanna, M., Batista, M. T., Baptista, F. D. J., Schettini, E., & Vox, G. (2017, August). Mapping greenhouse plastic wastes in the west region of Portugal. In *International Symposium on New Technologies for Environment Control, Energy-Saving and Crop Production in Greenhouse and Plant* 1227 (pp. 257-264).

Park, J. B. K., Craggs, R. J., & Sukias, J. P. S. (2008). Treatment of hydroponic wastewater by denitrification filters using plant prunings as the organic carbon source. *Bioresource technology*, 99(8), 2711-2716.

Parra, S., Aguilar, F. J., & Calatrava, J. (2008). Decision modelling for environmental protection: The contingent valuation method applied to greenhouse waste management. *Biosystems Engineering*, 99(4), 469-477. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.11.016>

Prazeres, A. R., Albuquerque, A., Luz, S., Jerónimo, E., & Carvalho, F. (2017). Hydroponic System: A Promising Biotechnology for Food Production and Wastewater Treatment. In *Food Biosynthesis* (pp. 317–350). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811372-1.00011-7>

- Prystay, W., & Lo, K. V. (2001). TREATMENT OF GREENHOUSE WASTEWATER USING CONSTRUCTED WETLANDS. In *Journal of Environmental Science and Health, Part B* (Vol. 36, Issue 3, pp. 341–353). Informa UK Limited. <https://doi.org/10.1081/pfc-100103574>
- Rajasulochana, P., & Preethy, V. (2016). Comparison on efficiency of various techniques in treatment of waste and sewage water – A comprehensive review. In *Resource-Efficient Technologies* (Vol. 2, Issue 4, pp. 175–184). National Research Tomsk Polytechnic University. <https://doi.org/10.1016/j.refffit.2016.09.004>
- Richa, A., Touil, S., Fizir, M. et al. Recent advances and perspectives in the treatment of hydroponic wastewater: a review. *Rev Environ Sci Biotechnol* 19, 945–966 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09555-9>
- Rouff, A. A., Ramlogan, M. V., & Rabinovich, A. (2016). Synergistic Removal of Zinc and Copper in Greenhouse Waste Effluent by Struvite. In *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* (Vol. 4, Issue 3, pp. 1319–1327). American Chemical Society (ACS). <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.5b01348>
- Rufi-Salís, Martí, et al. "Recirculating water and nutrients in urban agriculture: An opportunity towards environmental sustainability and water use efficiency?." *Journal of Cleaner Production* 261 (2020): 121213.
- Salazar, J., Santana-Sánchez, A., Näkkilä, J., Sirin, S., & Allahverdiyeva, Y. (2023). Complete N and P removal from hydroponic greenhouse wastewater by *Tetradismus obliquus*: A strategy for algal bioremediation and cultivation in Nordic countries. In *Algal Research* (Vol. 70, p. 102988). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.102988>
- Santos FM, Pires JC (2018) Nutrient recovery from wastewaters by microalgae and its potential application as bio-char. *Biores Technol* 267:725–731
- Savvas, D., Mantzos, N., Barouchas, P. E., Tsirogiannis, I. L., Olympios, C., & Passam, H. C. (2007). Modelling salt accumulation by a bean crop grown in a closed hydroponic system in relation to water uptake. *Scientia horticultrae*, 111(4), 311-318.
- Sayadi-Gmada, S., Rodríguez-Pleguezuelo, C. R., Rojas-Serrano, F., Parra-López, C., Parra-Gómez, S., García-García, M. del C., García-Collado, R., Lorbach-Kelle, M. B., & Manrique-Gordillo, T. (2019). Inorganic Waste Management in Greenhouse Agriculture in Almeria (SE

Spain): Towards a Circular System in Intensive Horticultural Production. In Sustainability (Vol. 11, Issue 14, p. 3782). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/su11143782>

Singh, Jiwan, and Ajay S. Kalamdhad. "Effects of heavy metals on soil, plants, human health and aquatic life." *Int J Res Chem Environ* 1.2 (2011): 15-21.

Seo DC, DeLaune RD, Park WY, Lim JS, Seo JY, Lee DJ, Cho JS, Heo JS. Evaluation of a hybrid constructed wetland for treating domestic sewage from individual housing units surrounding agricultural villages in South Korea. *J Environ Monit.* 2009 Jan;11(1):134-44. doi: 10.1039/b806017g. Epub 2008 Oct 21. PMID: 19137149.

Seo D-C, Park J-H, Cheon Y-S, Park S-K, Kim A-R, Lee W-G, Lee S-W, Lee S-T, Cho J-S, Heo J-S (2010) Treatment efficiency of pollutants in constructed wetlands under different hydroponic wastewater injection methods and characteristic of filter media. *Korean J Environ Agric* 29:146–151

Sigrimis, N., Arvanitis, K. G., Pasgianos, G. D., & Ferentinos, K. (2001). Hydroponics water management using adaptive scheduling with an on-line optimiser. *Computers and Electronics in Agriculture*, 31(1), 31-46.

Theodoraki Maria (2019). Investigation on the application of biological and physicochemical methods for solid greenhouse waste treatment. Technical University of Crete. <https://doi.org/10.26233/HEALLINK.TUC.81118>

University of Massachusetts Amherst, Center for Agriculture, Food, and the Environment, UMass Extension Greenhouse Crops and Floriculture Program, Greenhouse Best Management Practices (BMP) Manual. <https://ag.umass.edu/greenhouse-floriculture/greenhouse-best-management-practices-bmp-manual> Ανακτήθηκε στις 23/08/2023.

Van Rijn, J., Tal, Y., & Schreier, H. J. (2006). Denitrification in recirculating systems: theory and applications. *Aquacultural engineering*, 34(3), 364-376.

Vox, G., Loisi, R. V., Blanco, I., Mugnozza, G. S., & Schettini, E. (2016). Mapping of agriculture plastic waste. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 8, 583-591.

Vrhovšek D, Kukanja V, Bulc T (1996) Constructed wetland (CW) for industrial waste water treatment. *Water Res* 30:2287–2292

White, S. A., Owen, J. S., Majsztrik, J. C., Oki, L. R., Fisher, P. R., Hall, C. R., Lea-Cox, J. D., & Fernandez, R. T. (2019). Greenhouse and Nursery Water Management Characterization and Research Priorities in the USA. In *Water* (Vol. 11, Issue 11, p. 2338). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/w11112338>

William Cheuk, Kwang Victor Lo, Richard M.R. Branion & Bud Fraser (2003) Benefits of Sustainable Waste Management in the Vegetable Greenhouse Industry, *Journal of Environmental Science and Health, Part B: Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes*, 38:6, 855-863, DOI: 10.1081/PFC-120025565

Yamamoto-Ikemoto, R., Komori, T., Nomuri, M., Ide, Y., & Matsukami, T. (2000). Nitrogen removal from hydroponic culture wastewater by autotrophic denitrification using thiosulfate. *Water Science and Technology*, 42(3-4), 369-376.

Yang, D., Chen, J., Zhou, Y., Chen, X., Chen, X., & Cao, X. (2017). Mapping plastic greenhouse with medium spatial resolution satellite data: Development of a new spectral index. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 128, 47-60.

Zubair, M., Wang, S., Zhang, P., Ye, J., Liang, J., Nabi, M., ... & Cai, Y. (2020). Biological nutrient removal and recovery from solid and liquid livestock manure: Recent advance and perspective. *Bioresource technology*, 301, 122823.

Εθνικό Σχέδιο Διαχείρισης Αποβλήτων (ΕΣΔΑ) 2020 – 2030, https://www.elinyae.gr/sites/default/files/2023-04/94A_2023.pdf Ανακτήθηκε στις 24/08/2023.

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν. 1599/1986 και τα άρθρα 2,4,6 παρ. 3 του Ν. 1256/1982, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον.