



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΣΧΟΛΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ, ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΩΝ & ΔΙΕΘΝΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών στη «Βιοοικονομία, Κυκλική
Οικονομία και Βιώσιμη Ανάπτυξη»

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΠΡΟΣ ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΘΡΕΠΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΑΤΙΚΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΓΕΩΡΓΙΚΟ ΚΑΙ ΚΤΗΝΟΤΡΟΦΙΚΟ ΤΟΜΕΑ

Παναγιώτα – Μαγδαληνή Ευπολιτίδη

Πειραιάς, Φεβρουάριος 2024


ΒΕΒΑΙΩΣΗ ΕΚΠΟΝΗΣΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

«Δηλώνω υπεύθυνα ότι το έργο που εκπονήθηκε και παρουσιάζεται στην υποβαλλόμενη διπλωματική εργασία, για τη λήψη του μεταπτυχιακού τίτλου σπουδών, στη «Βιοοικονομία, Κυκλική Οικονομία και Βιώσιμη Ανάπτυξη» με τίτλο:

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΠΡΟΣ ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΘΡΕΠΤΙΚΩΝ
ΣΥΣΤΑΤΙΚΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΓΕΩΡΓΙΚΟ ΚΑΙ ΚΤΗΝΟΤΡΟΦΙΚΟ ΤΟΜΕΑ

έχει γραφτεί από εμένα αποκλειστικά στο σύνολό της. Δεν έχει υποβληθεί ούτε εγκριθεί στο πλαίσιο κάποιου άλλου μεταπτυχιακού προγράμματος ή προπτυχιακού τίτλου σπουδών στην Ελλάδα ή στο εξωτερικό, ούτε είναι εργασία ή τμήμα εργασίας ακαδημαϊκού ή επαγγελματικού χαρακτήρα.

Δηλώνω επίσης υπεύθυνα ότι οι πηγές στις οποίες ανέτρεξα για την εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας αναφέρονται στο σύνολό τους, κάνοντάς πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου.»


Υπογραφή Μεταπτυχιακού Φοιτητή

ΠΑΝΑΓΙΩΤΑ - ΜΑΓΔΑΛΗΝΗ ΞΥΠΟΛΙΤΙΔΗ
Ονοματεπώνυμο



UNIVERSITY OF PIRAEUS
SCHOOL OF ECONOMICS, BUSINESS AND INTERNATIONAL STUDIES
DEPARTMENT OF ECONOMICS

DEPARTMENT OF ECONOMICS

MSc. in Bioeconomy, Circular Economy & Sustainable Development

**WASTE MANAGEMENT FOR NUTRIENT
RECOVERY FOR THE AGRICULTURAL AND
LIVESTOCK SECTOR**

Panagiota – Magdalini Xipolitidi

Piraeus, February 2024

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Αθανάσιο Μπαλαφούτη, πρωτίστως για την ιδέα και ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα, αλλά και φυσικά για την καλή επικοινωνία, τις χρήσιμες συμβουλές και την πολύτιμη καθοδήγηση που μου παρείχε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής.

Τέλος, ένα ακόμα μεγάλο ευχαριστώ στους συγγενείς και φίλους μου, για τη στήριξη, τη συμπαράσταση και την κατανόησή τους, καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΠΡΟΣ ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΘΡΕΠΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΑΤΙΚΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΓΕΩΡΓΙΚΟ ΚΑΙ ΚΤΗΝΟΤΡΟΦΙΚΟ ΤΟΜΕΑ

Σημαντικοί όροι: ανάκτηση θρεπτικών συστατικών, μακροθρεπτικά συστατικά, μικροθρεπτικά συστατικά, ορυκτά λιπάσματα, οργανικά λιπάσματα, γεωργικά και κτηνοτροφικά απόβλητα, κυκλική οικονομία, βιώσιμη ανάπτυξη

Περίληψη

Η εξάντληση των πόρων και των πρώτων υλών στην παραγωγή τροφίμων έχει παγκοσμίως δημιουργήσει μια περιβαλλοντική, οικονομική και κοινωνική ανισορροπία, οδηγώντας σε αδιάκοπη εκμετάλλευση των φυσικών πόρων, σε αύξηση του κόστους των προϊόντων διατροφής και σε αύξηση του αριθμού των ανθρώπων που βρίσκονται κάτω από συνθήκες ακραίας πείνας. Ταυτόχρονα, η ανάγκη συνεχούς παραγωγής νέων συνθετικών λιπασμάτων για τη διατήρηση της γεωργικής παραγωγικότητας εγείρει ζητήματα όσον αφορά την ασφάλεια των θρεπτικών συστατικών. Το μοντέλο οικονομίας που ακολουθείται, δηλαδή το γραμμικό μοντέλο, βασίζεται στις αρχές του καταναλωτισμού και στη συνεχή προσφορά προϊόντων, σύντομης διάρκειας ωφέλιμης ζωής. Ο γεωργικός και κτηνοτροφικός τομέας βρίσκονται στο επίκεντρο, καθώς αναζητούνται βιώσιμες λύσεις για την επίτευξη ενός παραγωγικού γεωργικού συστήματος, το οποίο θα βασίζεται στις αρχές ενός κυκλικού μοντέλου οικονομίας. Σε αυτό το σημείο, πρακτικές ανάκτησης και ανακύκλωσης των πολύτιμων θρεπτικών συστατικών αποτελούν το βασικό βήμα για τη βιώσιμη ανάπτυξη, μετριάζοντας τον κίνδυνο επισιτιστικής ασφάλειας από την εξάντληση των περιορισμένων πόρων, των οποίων η ύπαρξη είναι αναγκαία στη φυτική παραγωγή. Με αυτόν τον τρόπο, η έμφαση δίνεται σε καινοτόμες και αποτελεσματικές μεθόδους ανάκτησης θρεπτικών συστατικών από τα ρεύματα αποβλήτων.

Στην παρούσα βιβλιογραφική ανασκόπηση, αναδείχθηκε η σημασία των διαφορετικών θρεπτικών συστατικών για την ανάπτυξη των καλλιεργειών και οι δυνατότητες ανάκτησης αυτών από τα οργανικά γεωργικά και κτηνοτροφικά απόβλητα, για την παραγωγή ανακτημένου οργανικού λιπάσματος μέσω βιολογικών και φυσικοχημικών μεθόδων. Οι διαθέσιμες μέθοδοι που αναλύθηκαν τείνουν να παρουσιάζουν διαφορετικά αποτελέσματα τα οποία εξαρτώνται κάθε φορά από μεταβαλλόμενους παράγοντες, όπως είναι η διαφορετική σύσταση των

αποβλήτων. Ως εκ τούτου, απαιτείται αναλυτική μελέτη και προσεκτικός στρατηγικός σχεδιασμός για την ευρεία και αποτελεσματική εφαρμογή της ιδέας ενός κυκλικού συστήματος παραγωγής τροφίμων σε μεγαλύτερη κλίμακα. Μία τέτοια προσέγγιση ωστόσο, επιφυλάσσει σημαντικά οφέλη τόσο για τους παραγωγούς, όσο και για το περιβάλλον, την οικονομία και την κοινωνία, στο πλαίσιο της βιώσιμης ανάπτυξης και της διαφύλαξης της επισιτιστικής ασφάλειας.

NUTRIENT RECOVERY FROM WASTE MANAGEMENT FOR THE AGRICULTURAL AND LIVESTOCK SECTOR

Keywords: Nutrient recovery, macronutrients, micronutrients, mineral fertilizers, organic fertilizers, agricultural and livestock waste, circular economy, sustainable development

Abstract

The depletion of resources and raw materials in food production worldwide has created an environmental, economic and social imbalance, leading to uninterrupted exploitation of natural resources, an increase in the cost of food products and an increase in the number of people dealing with conditions of extreme hunger. At the same time, the need to continuously produce new synthetic fertilizers, in order to maintain agricultural productivity, raises issues regarding nutrient safety. The economy model followed, the linear model, is based on the principles of consumerism and the continuous supply of products with a short useful life. The agricultural and livestock sectors are in the spotlight, as sustainable solutions are sought to achieve a productive agricultural system, based on the principles of a circular economy model. At this point, practices of recovery and recycling of valuable nutrients are the key step towards sustainable development, mitigating the risk of food security from the depletion of limited resources, whose existence is necessary in plant production. In this way, the emphasis is on innovative and effective methods of nutrient recovery from waste streams.

In this literature review, the importance of different nutrients for crop growth and the possibilities of recovering them from organic agricultural and livestock waste for the production of recovered organic fertilizer through biological and physicochemical methods were highlighted. The available methods analyzed, tend to show different results which depend each time on changing factors, such as the different composition of the waste. Therefore, analytical study and strategic planning are required for the broad and effective implementation of the concept of a circular food production system on a larger scale. However, such an approach holds significant benefits for the producers, the environment, the economy and society, in the context of sustainable development and safeguarding food security.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	v
Περίληψη.....	vii
Abstract	ix
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Διαχείριση Γεωργικών και Κτηνοτροφικών Αποβλήτων	5
2.1 Εισαγωγή.....	5
2.2 Γεωργικά Απόβλητα.....	6
2.3 Κτηνοτροφικά Απόβλητα.....	8
2.4 Μέθοδοι Διαχείρισης Γεωργικών και Κτηνοτροφικών Αποβλήτων.....	11
2.5 Ανακεφαλαίωση	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Ανόργανα Στοιχεία.....	17
3.1 Εισαγωγή.....	17
3.2 Θρεπτικά Συστατικά.....	18
3.2.1 Άζωτο (N).....	18
3.2.2 Φώσφορος (P)	20
3.2.3 Κάλιο (K)	21
3.2.4 Μικροθρεπτικά συστατικά	21
3.3 Βαρέα Μέταλλα	25
3.4 Επιπτώσεις περίσσειας αζώτου (N).....	26
3.4.1 Το φαινόμενο του ευτροφισμού	27
3.4.2 Νιτροποίηση του εδάφους.....	28
3.5 Επιπτώσεις περίσσειας φωσφόρου (P).....	29
3.6 Επιπτώσεις περίσσειας καλίου (K)	29
3.7 Ανακεφαλαίωση	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ανάκτηση Θρεπτικών Συστατικών	33
4.1 Εισαγωγή.....	33
4.2 Προετοιμασία γεωργικών και κτηνοτροφικών αποβλήτων	34
4.3 Βιολογικές Μέθοδοι Ανάκτησης Θρεπτικών Συστατικών.....	35
4.3.1 Αναερόβια Χώνευση	36
4.3.2 Κομποστοποίηση.....	37

4.3.3 Επιφανειακή Επικάλυψη εδάφους	38
4.3.4 Αναερόβια οξείδωση αμμωνίου (ANAMMOX).....	39
4.4 Φυσικοχημικές Μέθοδοι Ανάκτησης Θρεπτικών Συστατικών	40
4.4.1 Κρυστάλλωση φωσφορικών αλάτων	40
4.4.2 Διήθηση μεμβράνης	42
4.4.3 Προσρόφηση και ανταλλαγή ιόντων.....	45
4.4.4 Απογύμνωση Αμμωνίου.....	47
4.5 Ανακεφαλαίωση	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Ανακτημένα θρεπτικά συστατικά για παραγωγή λιπασμάτων	51
5.1 Εισαγωγή.....	51
5.2 Βιομηχανία και Αγορά Λιπασμάτων.....	52
5.3 Βιολιπάσματα	54
5.4 Η ανάκτηση θρεπτικών συστατικών για την ενίσχυση της κυκλικής Οικονομίας και της βιώσιμης ανάπτυξης	56
5.4.1 Ανάκτηση θρεπτικών συστατικών και βιώσιμη ανάπτυξη	56
5.4.2 Σχέδιο Κυκλικής Οικονομίας σε επίπεδο αγροκτήματος.....	60
5.5 Ανακεφαλαίωση	63
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Συμπεράσματα και Συζήτηση	65
Βιβλιογραφία.....	67
Ελληνική Βιβλιογραφία	67
Διεθνής Βιβλιογραφία	67
Διαδικτυακοί Τόποι.....	76

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1 Ποσοστιαία (%) περιεκτικότητα λιγνοκυτταρινούχου περιεχομένου σε γεωργικά απόβλητα φυτικής προέλευσης	7
Πίνακας 2.2 Συνολική περιεκτικότητα (σε mg L ⁻¹) υγρών αποβλήτων σε φώσφορο και άζωτο	10
Πίνακας 3.1 Κυριότερα οφέλη και επιπτώσεις από την ύπαρξη ή ανεπάρκεια μικροθρεπτικών συστατικών.....	22
Πίνακας 4.1 Μέθοδοι ανάκτησης θρεπτικών συστατικών.....	48
Πίνακας 5.1 Κυριότερα οφέλη από την ανάκτηση θρεπτικών συστατικών.....	58
Πίνακας 5.2 Βασικές ενέργειες για την επίτευξη της βιώσιμης διαχείρισης θρεπτικών συστατικών κατά τη λίπανση των καλλιεργειών	59

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1 Κατηγοριοποίηση γεωργικών αποβλήτων και παραδείγματα	6
Σχήμα 4.1 Διεργασία αναερόβιας χώνευσης	37
Σχήμα 4.2 Διαδικασία της εμπρόσθιας όσμωσης	43
Σχήμα 4.3 Ενεργοποιημένο φίλτρο άνθρακα για τη διαδικασία προσρόφησης	46
Σχήμα 5.1 Περιγραφή των τεσσάρων R στη διαχείριση των θρεπτικών συστατικών	61
Σχήμα 5.2 Ενδεικτικό σχέδιο γεωργικής συμβίωσης και κυκλικότητας	63

Κατάλογος Γραφημάτων

Γράφημα 2.1 Κάλυψη χρησιμοποιούμενης γεωργικής γης, κατά κατηγορία καλλιέργειας (σύνολο Χώρας), 2019	13
Γράφημα 5.1 Τιμή φωσφορικών πετρωμάτων σε δολάρια ΗΠΑ ανά μετρικό τόνο (2015 – 2022)	53

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 3.1 Όψη ευτροφικής λίμνης.....	27
---------------------------------------	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εξάντληση των πόρων και των πρώτων υλών στην παραγωγή τροφίμων έχει παγκοσμίως δημιουργήσει μια περιβαλλοντική, οικονομική και κοινωνική ανισορροπία, οδηγώντας σε αδιάκοπη εκμετάλλευση των φυσικών πόρων, σε αύξηση του κόστους των προϊόντων διατροφής και σε αύξηση του αριθμού των ανθρώπων που βρίσκονται κάτω από συνθήκες ακραίας πείνας (Del Rio Osorio et al., 2021). Το μοντέλο οικονομίας που ακολουθείται, δηλαδή το γραμμικό μοντέλο, βασίζεται στις αρχές του καταναλωτισμού και στη συνεχή προσφορά προϊόντων, σύντομης διάρκειας ωφέλιμης ζωής, με αποτέλεσμα να οδηγεί σε αυξημένους ρυθμούς παραγωγής, ώστε να ικανοποιηθούν οι αδιάκοπες «ανάγκες» των καταναλωτών. Ετησίως, περίπου 90 δισεκατομμύρια τόνοι πρωτογενών πόρων εξορύσσονται για παγκόσμια χρήση, με μόνο το 10% αυτών να ανακυκλώνεται (Rodríguez-Espinoza et al., 2023b). Ένα τέτοιο μοντέλο, συνεπώς επιφέρει καταστροφικές συνέπειες, τόσο για το περιβάλλον, όσο και για την κοινωνία, με τα βασικά αποτελέσματα να είναι οι αυξημένες ποσότητες παραγόμενων αποβλήτων και ρυπογόνων υλικών και η εξάντληση των φυσικών πόρων.

Καθώς ο παγκόσμιος πληθυσμός πρόκειται να αυξηθεί μέσα στα επόμενα έτη, η γεωργική παραγωγή θα πρέπει να μπορεί να ανταποκριθεί στην αυξανόμενη ζήτηση σε τρόφιμα, θέτοντας σε κίνδυνο τα αποθέματα ορυκτών και φυσικών πόρων. Με σκοπό να καλυφθεί σε βάθος χρόνου η ανάγκη αυτή του πληθυσμού σε τρόφιμα, ο γεωργικός τομέας αναζητά διαθέσιμα μέσα, μέσω των οποίων θα μπορεί να πετύχει γρήγορη παραγωγή και να συμβαδίσει με τους απαιτητικούς ρυθμούς της αγοράς. Η ούτως ή άλλως μεγάλη χρήση χημικών λιπασμάτων στις καλλιέργειες θα πρέπει να σημειώσει σημαντική αύξηση παγκοσμίως για να επιτευχθεί ο στόχος ενίσχυσης της παραγωγής τροφίμων. Το άζωτο (N), ο φώσφορος (P) και το κάλιο (K), αποτελούν απαραίτητα θρεπτικά συστατικά για την ανάπτυξη των φυτών και συνεπώς για την παραγωγή τροφίμων. Ωστόσο, οι ορυκτοί πόροι που αξιοποιούνται στα λιπάσματα, εντοπίζονται σε περιορισμένες ποσότητες με αποτέλεσμα να διακινδυνεύεται η διαθεσιμότητά τους σε μακροχρόνιο ορίζοντα και συνεπώς να τίθεται ζήτημα επισιτιστικής ασφάλειας. Παράλληλα, η χρήση μεγάλης ποσότητας χημικών λιπασμάτων, επιφέρει μία σειρά αρνητικών επιπτώσεων όπως έκπλυση θρεπτικών συστατικών, ρύπανση του εδάφους και των υδάτων, διαταραχή του οικοσυστήματος και ανισορροπία στα θρεπτικά συστατικά του εδάφους. Επιπλέον, η διαρκής χημική λίπανση των καλλιεργειών, εξαντλεί την οργανική ύλη του εδάφους και υποβαθμίζει την ποιότητα και γονιμότητά του και συνεπώς τείνει να επηρεάζει τη φυτική παραγωγή με το χρόνο. Ως εκ τούτου, γίνεται αντιληπτό πως η ανάγκη αναζήτησης

βιώσιμων πρακτικών με σκοπό το μετριασμό της χημικής λίπανσης και τη διαφύλαξη των απαραίτητων φυσικών πόρων, κρίνεται επιτακτική στο πλαίσιο της διατήρησης της ζωής στον πλανήτη. Σε αυτό το σημείο, πρακτικές ανάκτησης και ανακύκλωσης των πολύτιμων θρεπτικών συστατικών αποτελούν το βασικό βήμα για τη βιώσιμη ανάπτυξη, μετριάζοντας τον κίνδυνο επισιτιστικής ασφάλειας από την εξάντληση των περιορισμένων πόρων, των οποίων η ύπαρξη είναι αναγκαία στη φυτική παραγωγή.

Η ανάπτυξη βιώσιμων συστημάτων παραγωγής τροφίμων, ανθεκτικών στις συνθήκες της κλιματικής αλλαγής, αποτελεί πλέον κέντρο προσοχής. Τα τελευταία χρόνια η βιομηχανία λιπασμάτων ασχολείται με την προμήθεια ιδίως αζώτου (N) και φωσφόρου (P), λόγω της ζήτησής τους σε μεγάλες ποσότητες για την παραγωγή τροφίμων, ενώ την ίδια στιγμή σημαντικές ποσότητες των δύο θρεπτικών συστατικών συναντώνται στις ροές αποβλήτων (Śniatała et al., 2023b). Το γεγονός αυτό, καθιστά μεγάλο μέρος των παραγόμενων αποβλήτων σημαντική πηγή θρεπτικών συστατικών, τα οποία μπορούν να ανακτηθούν και να αξιοποιηθούν ως βελτιωτικά εδάφους. Ένα τέτοιο κυκλικό μοντέλο επιφυλάσσει τεράστια οφέλη, τόσο για το περιβάλλον και τη διαφύλαξη των φυσικών πόρων, όσο για την ανθρώπινη υγεία και τη διασφάλιση της ζωής. Η ανάκτηση των θρεπτικών συστατικών από τα οργανικά απόβλητα, είναι κρίσιμης σημασίας, καθώς ο φώσφορος δεν μπορεί να παραχθεί ή να αντικατασταθεί. Το οργανικό κλάσμα αστικών, βιομηχανικών, γεωργικών και κτηνοτροφικών αποβλήτων, είναι πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά, τα οποία καταλήγουν να μην αξιοποιούνται εξαιτίας της έλλειψης ολοκληρωμένου συστήματος βιώσιμων μεθόδων διαχείρισης των αποβλήτων, ενώ οι πολιτικές και προγράμματα διαχείρισης των οργανικών αποβλήτων διαφέρουν από χώρα σε χώρα.

Η παρούσα διπλωματική εργασία, έχει συνταχθεί με σκοπό να αναλύσει τις δυνατότητες ενός κυκλικού μοντέλου ανάκτησης των θρεπτικών συστατικών από τα γεωργικά και κτηνοτροφικά απόβλητα ως προς την αξιοποίησή τους στη λίπανση των καλλιεργειών και ενίσχυση του γεωργικού κλάδου. Δεδομένου ότι ο κλάδος της γεωργίας είναι ο βασικός πάροχος τροφίμων, βρίσκεται αντιμέτωπος με σοβαρές προκλήσεις. Εκτός αυτού, σύμφωνα με τα στοιχεία της Circle Economy για το 2019, η γεωργία, μαζί με τον κλάδο των τροφίμων, είχε το δεύτερο μεγαλύτερο αποτύπωμα υλικών με 21,3 δισεκατομμύρια τόνους και αποτύπωμα άνθρακα 10 δισεκατομμυρίων τόνων (Rodríguez-Espinoza et al., 2023b). Συνεπώς, ένα εξελιγμένο κυκλικό σύστημα αξιοποίησης των οργανικών γεωργικών και κτηνοτροφικών αποβλήτων για ανάκτηση των κύριων θρεπτικών συστατικών, θα μειώσει σημαντικά τις

ποσότητες των αποβλήτων που καταλήγουν στο περιβάλλον, ενώ ταυτόχρονα θα αποτελέσει το βασικό βήμα προς τη βιώσιμη γεωργία και συνεπώς προς τη διατήρηση των φυσικών πόρων και την ανθεκτικότερη αλυσίδα παραγωγής τροφίμων.

Η συγκεκριμένη μελέτη, βάσει βιβλιογραφικής ανασκόπησης, δίνει έμφαση στη διαχείριση των οργανικών γεωργικών και κτηνοτροφικών αποβλήτων, εξετάζοντας διαθέσιμες μεθόδους ανάκτησης θρεπτικών συστατικών και τα οφέλη που προκύπτουν για τον γεωργό, με την εφαρμογή ενός κυκλικού μοντέλου διαχείρισης. Η μελέτη βασίζεται στην ιδέα της κυκλικότητας, μέσα από μία θεωρητική προσέγγιση και έχει στόχο να προσδώσει κινητοποίηση για περαιτέρω έρευνα και ανάλυση πραγματικών δεδομένων και εναλλακτικών σεναρίων, ικανών να προσφέρουν την απαραίτητη γνώση για εφαρμογή των κατάλληλων και φιλικότερων προς το περιβάλλον μεθόδων επεξεργασίας των αποβλήτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Διαχείριση Γεωργικών και Κτηνοτροφικών Αποβλήτων

2.1 Εισαγωγή

Η ρύπανση του αέρα, του νερού και του εδάφους είναι πλέον πολύ εμφανής, με τεράστιες επιπτώσεις στην υγεία των ζώντων οργανισμών. Μεγάλο μέρος αυτής της ρύπανσης, οφείλεται στην ανεξέλεγκτη παραγωγή αποβλήτων και στην απευθείας απόρριψή τους στο περιβάλλον, δίχως να προηγηθεί η κατάλληλη επεξεργασία. Η μη ορθή διαχείριση των αποβλήτων, αποτελεί σοβαρό κίνδυνο για τον άνθρωπο και το περιβάλλον και συνεπώς εάν τα απόβλητα δεχθούν την απαραίτητη επεξεργασία, όχι μόνο μπορούν να συνεισφέρουν στη μείωση των σοβαρών περιβαλλοντικών επιπτώσεων, αλλά παράλληλα μπορούν να αποτελέσουν σημαντικές ανανεώσιμες πηγές παραγωγής ενέργειας και θρεπτικών συστατικών, ενισχύοντας ταυτοχρόνως την κυκλική οικονομία και βιώσιμη ανάπτυξη.

Ο γεωργικός τομέας, διαρκώς απειλείται από την υπερκατανάλωση φυσικών πόρων και την τοξικότητα και ρύπανση που προκαλείται από τον μεγάλο όγκο αποβλήτων που παράγονται από τις γεωργικές και κτηνοτροφικές δραστηριότητες. Παρά τις αρνητικές επιπτώσεις που προκύπτουν από τη διαρκή απόρριψη αποβλήτων, τα οργανικά γεωργικά και κτηνοτροφικά απόβλητα στην πραγματικότητα περιέχουν πλήθος χρήσιμων στοιχείων τα οποία είναι κρίσιμης σημασίας για τη γεωργική παραγωγή. Η αειφόρος γεωργία και η ενίσχυση ενός κυκλικού μοντέλου, βασισμένου στην κατάλληλη επεξεργασία οργανικών αποβλήτων προς ανάκτηση θρεπτικών συστατικών και μετέπειτα αξιοποίησή τους στην παραγωγή βιώσιμων λιπασμάτων και βελτιωτικών εδάφους, όχι μόνο μπορεί να μειώσει την περιβαλλοντική ζημία, αλλά παράλληλα μπορεί να ενδυναμώσει την παραγωγικότητα και την ποιότητα των γεωργικών και κτηνοτροφικών προϊόντων.

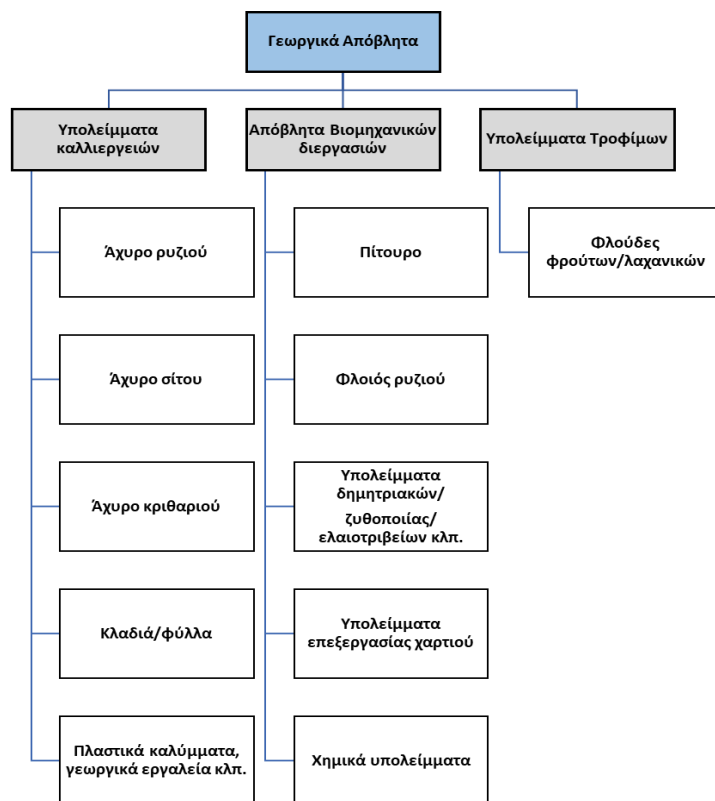
Σκοπός του κεφαλαίου είναι να εισάγει σε γενικότερο πλαίσιο την τρέχουσα κατάσταση, όσον αφορά το μοντέλο διαχείρισης των αποβλήτων, κάνοντας αντιληπτή την ανάγκη για περαιτέρω μελέτη επί του ζητούμενου θέματος και για άμεση υιοθέτηση εναλλακτικών μεθόδων επεξεργασίας και διαχείρισης των αποβλήτων.

Καθώς κέντρο προσοχής της παρούσας εργασίας είναι η αξιοποίηση και διαχείριση των αποβλήτων που παράγουν ο γεωργικός και κτηνοτροφικός τομέας, το κεφάλαιο αυτό εστιάζει στην ανάλυση των χαρακτηριστικών των οργανικών γεωργικών και κτηνοτροφικών αποβλήτων, τα οποία θα αποτελέσουν την κύρια πηγή αποβλήτων προς ανάκτηση πολύτιμων

θρεπτικών συστατικών, ως κύριο θέμα ανάπτυξης. Παράλληλα, θα πραγματοποιηθεί μία επισκόπηση ως προς τις κυριότερες μεθόδους που χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα στο πλαίσιο διαχείρισης των αποβλήτων που παράγονται.

2.2 Γεωργικά Απόβλητα

Ως γεωργικά απόβλητα (Obi et al., 2016) αναφέρονται τα στερεά ή υγρά υπολείμματα, τα οποία προκύπτουν κατά τη παραγωγή, συγκομιδή, αποθήκευση και επεξεργασία ακατέργαστων γεωργικών προϊόντων (Mengqi et al., 2021). Γενικότερα, τα γεωργικά απόβλητα μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις κατηγορίες, δηλαδή, τα υπολείμματα καλλιεργειών, τα απόβλητα της αγροβιομηχανίας, τα κτηνοτροφικά απόβλητα και τα απόβλητα φρούτων και λαχανικών (Σχήμα 2.1). Παραδείγματα γεωργικών αποβλήτων μπορεί να είναι κλαδιά, κορμοί και φύλλα δέντρων, πολτοί, φλούδες και πυρήνες λαχανικών και φρούτων, μίσχοι καλαμποκιού, μη επεξεργασμένα φρούτα και λαχανικά, απόβλητα από επεξεργασία τροφίμων γενικότερα ή ακόμα και επικίνδυνα γεωργικά απόβλητα όπως συσκευασίες από εντομοκτόνα, φυτοφάρμακα και λιπάσματα (Pattanaik et al., 2019).



Πηγή: Τροποποιήθηκε από Pattanaik et al., 2019

Σχήμα 2.1 Κατηγοριοποίηση γεωργικών αποβλήτων και παραδείγματα

Συχνά τα φυτικά γεωργικά απόβλητα κατηγοριοποιούνται ως πρωτογενή και δευτερογενή. Στην πρώτη κατηγορία κατατάσσονται τα υπολείμματα που απομένουν στους αγρούς μετά τη συγκομιδή, καθώς και τα υπολείμματα από τα κλαδέματα των δέντρων, ενώ στην κατηγορία των δευτερογενών γεωργικών αποβλήτων ανήκουν τα υπολείμματα των μονάδων επεξεργασίας γεωργικών προϊόντων (φλοιοί, πολτοί, κελύφη κτλ.) (Ogbu & Okechukwu, 2023). Η σύνθεση των γεωργικών αποβλήτων μπορεί να είναι σε υγρή ή στερεά μορφή, ή ως πολτός και εξαρτάται από τον τύπο των γεωργικών δραστηριοτήτων που εκτελούνται (Obi et al, 2016). Το μεγαλύτερο μέρος των φυτικών γεωργικών αποβλήτων, αποτελείται από περίπου 80% - 85% λιγνοκυτταρινούχο περιεχόμενο, δηλαδή από κυτταρίνη, ημικυτταρίνη και λιγνίνη, των οποίων οι περιεκτικότητες περιγράφονται πιο αναλυτικά στον Πίνακα 2.1. Τα υπολείμματα καλλιεργειών είναι τα πιο άφθονα και παράλληλα χαμηλότερης αξίας οργανικά απόβλητα, τα οποία μπορούν εύκολα να μετατραπούν σε προϊόντα προστιθέμενης αξίας, αποδίδοντας χρήσιμα στοιχεία για τον άνθρωπο και το περιβάλλον. Βασικό παράδειγμα αποτελεί το άχυρο σίτου, το οποίο παράγεται ετησίως ανά εκατοντάδες εκατομμύρια τόνους παγκοσμίως με εκτιμώμενη ετήσια απόδοση 13 τόνους/στρέμμα (Pattanaik et al., 2019).

Πίνακας 2.1 Ποσοστιαία (%) περιεκτικότητα λιγνοκυτταρινούχου περιεχομένου σε γεωργικά απόβλητα φυτικής προέλευσης

	Λιγνοκυτταρινούχο περιεχόμενο (wt %)		
	κυτταρίνη	ημικυτταρίνη	λιγνίνη
Υπολείμματα Καλλιεργειών	30% - 50%	20% - 38%	7% - 21%
Αγροβιομηχανικά απόβλητα	21% - 45%	15% - 33%	5% - 24%

Πηγή: Τροποποιήθηκε από Pattanaik et al., 2019

Είναι γεγονός ότι, εκατοντάδες εκατομμύρια τόνοι γεωργικών αποβλήτων παράγονται ετησίως σε παγκόσμιο επίπεδο, ενώ περίπου το 9% της παγκόσμιας παραγωγής ενέργειας προέρχεται από επεξεργασία ή απευθείας χρήση γεωργικών αποβλήτων (βιομάζας) ως καύσιμο (Nguyen et al., 2019). Τα γεωργικά απόβλητα είναι πηγή ανάπτυξης και ενίσχυσης των καλλιεργειών, καθώς περιέχουν ανόργανα άλατα, νερό, οργανική ύλη και θρεπτικά συστατικά όπως άζωτο (N), φώσφορο (P), κάλιο (K), μαγνήσιο (Mn), ασβέστιο (Ca) και πυρίτιο (Si) (Mengqi et al., 2021) και συνεπώς μπορούν να αποτελέσουν σημαντική πηγή για την παραγωγή λιπασμάτων και την ενίσχυση της κυκλικής οικονομίας.

Ωστόσο, ένα μεγάλο μέρος των οργανικών και ανόργανων γεωργικών αποβλήτων είναι εξαιρετικά επιβλαβές για το περιβάλλον και τον άνθρωπο. Η παγκόσμια αύξηση του πληθυσμού και συνεπώς της ζήτησης γεωργικών και κτηνοτροφικών προϊόντων, σε συνδυασμό με τις ακραίες κλιματικές συνθήκες και την ανάπτυξη νέων απειλών για το γεωργικό τομέα, ολοένα και συνεπάγουν την αύξηση και απεριόριστη χρήση εντομοκτόνων και ανόργανων λιπασμάτων. Μετά τη χρήση χημικών, μεγάλο πλήθος των συσκευασιών, από όπου προέρχονται, μαζί με υπολείμματα επικίνδυνων χημικών ουσιών τείνουν να καταλήγουν σε λίμνες, ποτάμια και εκτάσεις γης. Ως συνέπεια, τέτοιου είδους απόβλητα μπορεί να επιφέρουν σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως τροφική δηλητηρίαση, μόλυνση των υδάτινων πόρων και τοξικότητα του εδάφους (Obi et al., 2016). Ακόμα, η καύση των γεωργικών αποβλήτων, η οποία χρησιμοποιείται συχνά ως μέθοδος διαχείρισης των φύλλων και των κλαδιών, έχει ως αποτέλεσμα την έκκλιση επιβαρυντικών, για την ατμόσφαιρα, αερίων όπως μονοξείδιο του άνθρακα (CO), διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) και οξειδία του αζώτου (NO_x), ενώ μπορεί να προκαλέσει και την αρχή πυρκαγιάς (Mengqi et al., 2021).

2.3 Κτηνοτροφικά Απόβλητα

Τα κτηνοτροφικά απόβλητα αποτελούν οργανικά ζωικά απόβλητα όπως υπολείμματα κρέατος, υγρή και στερεά κοπριά, σφάγια ζώων, υπολείμματα ζωοτροφών, ή ανόργανα απόβλητα όπως συσκευασίες ζωοτροφών, απολυμαντικά και άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται στα αγροκτήματα, τα οποία προκύπτουν από τις κτηνοτροφικές δραστηριότητες για την παραγωγή ζωικών προϊόντων.

Η κοπριά των ζώων, η οποία αποτελεί το σημαντικότερο μέρος των οργανικών κτηνοτροφικών αποβλήτων, περιέχει μεγάλες ποσότητες σε παθογόνους μικροοργανισμούς, καθιστώντας τη σημαντική πηγή ρύπανσης (Wang et al., 2014). Η ζωική κοπριά αναφέρεται στην κοπριά ζώων της βιομηχανίας πουλερικών και κτηνοτροφίας. Όσον αφορά τη σύστασή της, συγκροτείται από ένα στερεό και ένα υγρό μέρος και αποτελείται συνήθως από τροφή και νερό (έπειτα από τη φυσική διεργασία του ζώου), τρίχωμα ή φτερά, υπολείμματα ξύλου και φυλλωμάτων, άμμο και πριονίδια. Ωστόσο, τα χαρακτηριστικά της κοπριάς διαφέρουν και εξαρτώνται από ποικίλους παράγοντες, όπως είναι το είδος του ζώου, η ηλικία του, η διατροφή του, και το εξωτερικό περιβάλλον στο οποίο εκτρέφεται (Sakar et al., 2009).

Η ζωική κοπριά περιέχει πλήθος ρύπων, παθογόνων μικροοργανισμών και αιωρούμενων στερεών, αλλά και θρεπτικών συστατικών. Οι βλαβερές ουσίες της κοπριάς, αποτελούν μεγάλη

απειλή για το περιβάλλον και τον άνθρωπο και πολλές χώρες έχουν διαμορφώσει τις δικές τους πολιτικές όσον αφορά τη διαχείρισή της και των επιπτώσεων που προκαλεί (Flotats et al., 2009). Πιο συγκεκριμένα, οι αυξημένες ποσότητες των βλαβερών συστατικών της κοπριάς μπορεί να οδηγήσουν σε μόλυνση του εδάφους και των υπόγειων υδάτων, με μετέπειτα κατάληξη σε μόλυνση των υδάτων της επιφάνειας. Τα αέρια του θερμοκηπίου που εκλύονται από τη ζωική κοπριά, όπως διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), μεθάνιο (CH_4) και υποξείδιο του αζώτου (N_2O), μπορούν να προκαλέσουν ρύπανση της ατμόσφαιρας, επηρεάζοντας σημαντικά την υγεία των ζώντων οργανισμών και αντιπροσωπεύουν περίπου το 10% των συνολικών άμεσων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, που εκλύονται κατά τη γεωργική παραγωγή (Khoshnevisan et al., 2021). Ακόμα, η ζωική κοπριά αποτελεί πηγή αέριων ρύπων, όπως αμμωνίας (NH_3) και υδρόθειου (H_2S) των οποίων η περιεκτικότητα εξαρτάται από το στάδιο της διαδικασίας πέψης, από τα οργανικά στοιχεία, το είδος της τροφής και την υγεία των ζώων. Επιπλέον, η ατμοσφαιρική ρύπανση περιλαμβάνει δυσάρεστες οσμές που προέρχονται από τη διαδικασία χώνευσης κτηνοτροφικών αποβλήτων, δηλαδή από την κοπριά και τα ούρα ζώων. Η ένταση της οσμής εξαρτάται από την πυκνότητα των ζώων, τη θερμοκρασία και την υγρασία της περιοχής (Obi et al, 2016).

Ενώ η ζωική κοπριά διαθέτει μεγάλες προοπτικές στην ενίσχυση της γονιμότητας του εδάφους, η απευθείας και χωρίς επεξεργασία χρήση της μπορεί να επιφέρει σοβαρές συνέπειες στην ισορροπία του περιβάλλοντος, οδηγώντας σε μείωση της γονιμότητας του εδάφους, ρύπανση των υδάτινων πόρων και του εδάφους και ευτροφισμό (Sobhi et al., 2023). Επιπλέον, οι βαριές εφαρμογές ζωικής κοπριάς μπορεί να περιλαμβάνουν επιπτώσεις όπως αλάτωση σε ημι-άνυδρες περιοχές, τοξικές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων και μειωμένο αερισμό του εδάφους (Hjorth et al., 2010).

Παρά τα επιβλαβή μικροστοιχεία της, η ζωική κοπριά περιέχει πλήθος μικροθρεπτικών συστατικών, όπως ασβέστιο, μαγνήσιο και θείο (Dadrasnia et al., 2021), αλλά και μακροθρεπτικών συστατικών όπως φώσφορο και άζωτο (βλέπε Πίνακα 2.2), χρήσιμων για τη φυτική παραγωγή και ανάπτυξη, τα οποία έπειτα από κατάλληλη επεξεργασία και διαχείριση μπορούν να συνεισφέρουν στην παραγωγή λιπασμάτων (Khoshnevisan et al., 2021), γεγονός που την καθιστά ως πολύτιμο πόρο προς αξιοποίηση.

Πίνακας 2.2 Συνολική περιεκτικότητα (σε mg L⁻¹) υγρών αποβλήτων σε φώσφορο και άζωτο

Κατηγορία υγρών αποβλήτων	Περιγραφή	Συνολικό P (mg L ⁻¹)	Συνολικό N (mg L ⁻¹)
Αστικά	Λύματα	5–20	15–90
Κτηνοτροφικά	Γαλακτοπαραγωγή	30–727	185–2636
	Πουλερικά	50–446	802–1825
	Χοίρου	310–987	1110–3213
	Κοπριά γαλακτοπαραγωγής	18–250	125–3456
	Κοπριά πουλερικών	370–382	1380–1580
	Λυματολάσπη	134–321	427–467

Πηγή: Τροποποιήθηκε από Cai et al., 2013

Γενικότερα, σημαντικές ποσότητες θρεπτικών συστατικών συναντώνται στα υγρά αστικά, γεωργικά, κτηνοτροφικά και βιομηχανικά απόβλητα, γεγονός που έχει κεντρίσει ιδιαίτερα το ενδιαφέρον τα τελευταία έτη, ειδικά όσον αφορά τη βιώσιμη ανάπτυξη και τις πρακτικές κυκλικής οικονομίας. Συγκριτικά με τα υγρά αστικά απόβλητα, τα υγρά γεωργικά απόβλητα εμφανίζουν υψηλότερη περιεκτικότητα σε άζωτο και φώσφορο, όπως αναλυτικά περιγράφεται στον Πίνακα 2.2. Παράγοντες όπως η διατροφή των ζώων, η ηλικία, η παραγωγικότητα, το είδος και το περιβάλλον στο οποίο ανατρέφονται, τείνουν να επηρεάζουν σημαντικά την περιεκτικότητα των κτηνοτροφικών αποβλήτων σε θρεπτικά συστατικά (Cai et al., 2013). Ως εκ τούτου, οι ποσότητες συστατικών που συναντώνται στα απόβλητα, είναι μεταβλητές και δε χαρακτηρίζονται από σταθερές συγκεντρώσεις.

Όπως προκύπτει και από τον Πίνακα 2.2, η (υγρή) ζωική κοπριά συνήθως είναι πλούσια σε φώσφορο (φωσφορικά άλατα) και κάλιο, με τιμές παρόμοιες με εκείνες των ανόργανων λιπασμάτων, ενώ η περιεκτικότητά της σε άζωτο (N) είναι χαμηλότερη από αυτή των λιπασμάτων του εμπορίου. Το γεγονός αυτό καθιστά την κοπριά σημαντική πηγή ανόργανων στοιχείων, είτε εφαρμόζοντάς την απευθείας στις γεωργικές καλλιέργειες, ή παρέχοντάς της την κατάλληλη επεξεργασία με σκοπό την ανάκτηση των θρεπτικών συστατικών. Ωστόσο, η εντατική απευθείας εφαρμογή της ζωικής κοπριάς ως λίπασμα, επιφέρει σοβαρούς κινδύνους

έκπλυσης και απορροής θρεπτικών συστατικών, οδηγώντας σε μόλυνση των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων (Hjorth et al., 2010).

Συνεπώς, η ζωική κοπριά μπορεί να αποτελέσει σημαντική πηγή θρεπτικών συστατικών και μία βιώσιμη και πιο φιλική, προς το περιβάλλον, εναλλακτική μορφή λίπανσης, μειώνοντας έτσι, τον ρυθμό παραγωγής και εφαρμογής ορυκτών λιπασμάτων. Ο τρόπος διαχείρισης, της ζωικής κοπριάς, επομένως διαθέτει σημαντικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Η αναζήτηση των βέλτιστων πρακτικών αξιοποίησης και επεξεργασίας της κοπριάς, είναι κρίσιμης σημασίας για την μακροπρόθεσμη αποτελεσματικότητα και βιωσιμότητα των γεωργικών οικοσυστημάτων (Dadrasnia et al., 2021) και την προστασία του περιβάλλοντος και ως εκ τούτου μεγάλη έμφαση δίνεται στην μελέτη καινοτόμων τεχνικών ανάκτησης θρεπτικών συστατικών από την κοπριά, οι οποίες θα εμφανίζουν υψηλή αποδοτικότητα ανάκτησης, χαμηλό λειτουργικό κόστος, περιορισμένη απαίτηση σε ενέργεια και ευκολία στη διαχείριση.

2.4 Μέθοδοι Διαχείρισης Γεωργικών και Κτηνοτροφικών Αποβλήτων

Η διαχείριση των αποβλήτων αφορά όλα τα στάδια στα οποία θα βρεθούν τα απόβλητα από την παραγωγή τους έως την τελική κατάληξή τους ή επαναχρησιμοποίησή τους ως προϊόντα προστιθέμενης αξίας. Πιο συγκεκριμένα, η διαχείριση των αποβλήτων αναφέρεται τόσο στην συλλογή, τη μεταφορά και την αποθήκευσή τους, όσο και στην τελική επεξεργασία και αξιοποίηση.

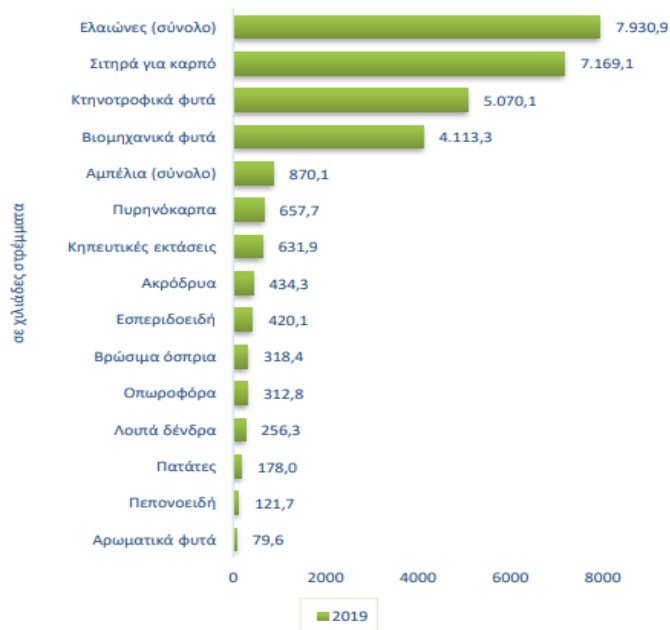
Οι συχνότερες μέθοδοι διαχείρισης που χρησιμοποιούνται για τα γεωργικά και κτηνοτροφικά απόβλητα, αλλά και για τα αστικά απόβλητα γενικότερα, αποτελούν παγκόσμιο ζήτημα, καθώς το μεγαλύτερο μέρος των αποβλήτων καίγεται ή θάβεται στο έδαφος, προκαλώντας σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις όπως ρύπανση του αέρα του εδάφους και των υδάτων. Επιπλέον, η μεταφορά των αποβλήτων απευθείας στους Χώρους Υγειονομικής Ταφής (ΧΥΤΑ) αυξάνει σημαντικά το περιβαλλοντικό αποτύπωμα, καθώς παράλληλα και το κόστος της διαδικασίας διαχείρισης αποβλήτων. Αντιθέτως, η προεπεξεργασία των αποβλήτων, όπως μέσω της ξήρανσης, του τεμαχισμού ή της πολτοποίησης αυτών, θα διευκόλυνε σημαντικά τη διαδικασία διαχείρισής τους, καθώς θα παρήγαγε ένα προϊόν προστιθέμενης αξίας, πιο εύκολα διαχειρίσιμο ως προς την μετέπειτα αξιοποίησή του και τη μεταφορά (Mathioudakis et al., 2022).

Στην πραγματικότητα, μεγάλο μέρος από τα παραγόμενα απόβλητα μπορεί να αξιοποιηθεί έπειτα από ανάλογη επεξεργασία, σε ζωοτροφές, λιπάσματα, βιοενέργεια και βιοκαύσιμα, όπως

βιοαέριο, βιοντίζελ, βιοαιθανόλη και βιουδρογόνο. Ως εκ τούτου, εναλλακτικοί τρόποι διαχείρισης των αποβλήτων θα πρέπει να καθιερωθούν, ώστε τα διάφορα απόβλητα να καταλήγουν ως χρήσιμοι πόροι και όχι ως πόροι που προκαλούν περιβαλλοντική και κοινωνική επιβάρυνση. Κυρίως λιγνοκυτταρινούχα υπολείμματα, μπορούν να αξιοποιηθούν και να αποδώσουν βιώσιμες μορφές ενέργειας και καυσίμων, μειώνοντας τη χρήση των ορυκτών καυσίμων και συνεπώς των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και ταυτόχρονα ενισχύοντας τη βιώσιμη ανάπτυξη, μέσω ενός πιο πράσινου και κυκλικού μοντέλου διαχείρισης. Ακόμα, η βιώσιμη και ορθή διαχείριση των γεωργικών και κτηνοτροφικών αποβλήτων μπορεί να μειώσει τα επιβλαβή συστατικά αυτών και ιδίως της ζωικής κοπριάς, διασφαλίζοντας μεγαλύτερη ασφάλεια στα τρόφιμα και προστατεύοντας τα οικοσυστήματα και την ανθρώπινη υγεία και ασφάλεια (Koul et al., 2022).

Ετησίως, παράγονται τεράστιες ποσότητες γεωργικών και κτηνοτροφικών αποβλήτων σε όλον τον κόσμο, προκαλώντας έντονες περιβαλλοντικές συνέπειες. Επομένως, είναι κρίσιμη η υιοθέτηση μίας ορθής στρατηγικής διαχείρισης, με σκοπό την επαναχρησιμοποίησή τους, την αύξηση της αξίας τους και τη μείωση της ποσότητάς τους, με στόχο ένα πιο καθαρό περιβάλλον. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση μόνο το 38% των αποβλήτων ανακυκλώνεται, καθώς πάνω από το 60% των αστικών αποβλήτων εξακολουθούν να πηγαίνουν σε χώρους υγειονομικής ταφής, ενώ μεγάλο μέρος των γεωργικών αποβλήτων καίγεται ή απορρίπτεται στο περιβάλλον. Λόγω της έλλειψης κατάλληλου θεσμικού και νομοθετικού πλαισίου, το μεγαλύτερο ποσοστό αποβλήτων απορρίπτεται χωρίς επεξεργασία στα περικόρα των πόλεων, με αποτέλεσμα την αύξηση αέριων ρύπων του θερμοκηπίου και μακροπρόθεσμες συνέπειες στην ποιότητα ζωής και στη δημόσια υγεία (Kurniawan, Liang, Singh, et al., 2022).

Στην Ελλάδα, το μεγαλύτερο μέρος της συνολικής έκτασης χρησιμοποιείται για γεωργικές δραστηριότητες και συνεπώς η χώρα παράγει αρκετούς τόνους βιομάζας. Σύμφωνα με στατιστικά δεδομένα του έτους 2019, η μεγαλύτερη ποσότητα χρησιμοποιούμενης γεωργικής γης της χώρας, καλύπτεται από ελαιώνες, σιτηρά για καρπό, κτηνοτροφικά και βιομηχανικά φυτά, όπως διακρίνεται και στο Γράφημα 2.1, με την ετήσια παραγωγή να φτάνει στους 3.771,8 χιλιάδες τόνους σε κτηνοτροφικά φυτά (συνολικά), 3.240,1 χιλιάδες τόνους σε ελαιόκαρπο, 1.283,1 χιλιάδες τόνους σε αραβόσιτο και 1.127,4 χιλιάδες τόνους σε σιτάρι (μαλακό και σκληρό) (ΕΛΣΤΑΤ, 2021).



Πηγή: Ελληνική Στατιστική Αρχή (ΕΛΣΤΑΤ, 2021)

Γράφημα 2.1 Κάλυψη χρησιμοποιούμενης γεωργικής γης, κατά κατηγορία καλλιέργειας (σύνολο Χώρας), 2019

Η μέση ετήσια ποσότητα γεωργικών αποβλήτων, στην Ελλάδα ανέρχεται περίπου στους 49,2 Mt (μετρικούς τόνους) ανά έτος, με πιο αναλυτικά 10 Mt ανά έτος σε γεωργικά υπολείμματα που αφήνονται σε χωράφια, 26 Mt ανά έτος σε ζωική κοπριά και 13,2 Mt ανά έτος σε δευτερογενή γεωργικά απόβλητα (Aravani et al., 2022).

Στο μεγαλύτερο μέρος της, η χώρα διαχειρίζεται τους περισσότερους τύπους στερεών αποβλήτων, με μη βιώσιμες μεθόδους διαχείρισης όπως η υγειονομική ταφή, ενώ στερεά γεωργικά απόβλητα, όπως φύλλα και κλαδέματα, συνήθως καίγονται σε χωράφια εκλύοντας πλήθος αέριων ρύπων και προκαλώντας περιβαλλοντική επιβάρυνση (Aravani et al., 2022). Η καύση αποτελεί μία από τις συχνότερες μεθόδους διαχείρισης των υπολειμμάτων καλλιέργειας (φύλλων, κλαδιών κλπ.), λόγω της αμεσότητας και της ευκολίας που χαρακτηρίζουν τη συγκεκριμένη μέθοδο. Σε παγκόσμιο επίπεδο, χρησιμοποιείται ελάχιστο μέρος των υπολειμμάτων των καλλιεργειών σιταριού, καλαμποκιού και ρυζιού για παραγωγή βιοαιθανόλης ή για ζωοτροφές, με το μεγαλύτερο μέρος να απορρίπτεται ή να καίγεται ανοιχτά στα χωράφια. Κατά τη διαδικασία της καύσης, παράγονται σημαντικές ποσότητες αέριων ρύπων, κυρίως διοξειδίου του άνθρακα, απελευθερώνοντας θερμική και ακτινοβολούμενη ενέργεια (Koul et al., 2022).

Σημαντικές τείνουν να είναι ωστόσο οι προσπάθειες αξιοποίησης των αποβλήτων προς την παραγωγή ενέργειας. Ενώ η Ευρωπαϊκή Ένωση, εστιάζει στην υιοθέτηση και εφαρμογή βιώσιμων μεθόδων επεξεργασίας των αποβλήτων και της βιομάζας και μετατροπής τους σε ενέργεια, η Ελλάδα αξιοποιεί ένα πολύ μικρό μέρος της παραγόμενης βιομάζας της, για την κάλυψη ενεργειακών αναγκών, καθώς η χώρα εξακολουθεί να εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα ορυκτά καύσιμα (Αραβανή Βασιλική, 2023 Πανεπιστήμιο Πατρών). Στον αντίποδα, ευρωπαϊκές χώρες όπως η Γερμανία, η Αυστρία, η Δανία και η Σουηδία ανήκουν στις χώρες με τον μεγαλύτερο αριθμό σύγχρονων μονάδων βιοαερίου (Aravani et al., 2022).

Στην πραγματικότητα, υπάρχουν πολλές διαφορετικές μέθοδοι διαχείρισης των αποβλήτων. Άλλες εμφανίζονται σε πειραματικό στάδιο, ενώ άλλες δεν είναι ευρέως διαδεδομένες και υιοθετημένες από όλες τις χώρες του κόσμου. Σε μεγαλύτερο επίπεδο, η διαχείριση των αποβλήτων χαρακτηρίζεται από το γραμμικό μοντέλο «παράγω – αξιοποιώ – απορρίπτω», δίνοντας έτσι πεπερασμένο χρόνο ζωής προς αξιοποίηση στα παραγόμενα προϊόντα, και οδηγώντας σε εξάντληση των φυσικών πόρων και σε ποικίλες περιβαλλοντικές συνέπειες. Ωστόσο, τα τελευταία έτη έμφαση δίνεται στο μοντέλο κυκλικής οικονομίας «παράγω – αξιοποιώ – ανακυκλώνω ή επαναχρησιμοποιώ», το οποίο βασίζεται στην επέκταση της χρησιμότητας των αγαθών, μετατρέποντας τα «λιγότερο χρήσιμα» απόβλητα σε προϊόντα, υλικά και πόρους προστιθέμενης αξίας. Με αυτόν τον τρόπο, το μοντέλο κυκλικότητας επιτυγχάνει την ελαχιστοποίηση των αποβλήτων, μειώνοντας παράλληλα την εξάρτηση από την εξόρυξη πρώτων υλών, εξοικονομώντας ενέργεια, ενισχύοντας την οικονομική ανάπτυξη και μειώνοντας την περιβαλλοντική ρύπανση.

Ενώ το κλειδί για ένα βιώσιμο μέλλον βασίζεται στην αξιοποίηση των πόρων μέσω της κυκλικότητας, ακόμα δεν έχουν υιοθετηθεί καινοτόμες μέθοδοι αξιοποίησης και επεξεργασίας των αποβλήτων σε ευρύτερη κλίμακα. Είναι γεγονός, πως το κυκλικό μοντέλο οικονομίας δεν ενθαρρύνεται όσο θα έπρεπε από τις υφιστάμενες πολιτικές και κανονισμούς, ενώ η οικονομία στηρίζεται περισσότερο στο άμεσο και βραχυπρόθεσμο κέρδος. Παράλληλα, οι προτιμήσεις του καταναλωτή τείνουν στην γρήγορη και οικονομικότερη επιλογή, οδηγώντας σε αυξημένη κατανάλωση πόρων και συνεπώς σε μεγαλύτερες παραγόμενες ποσότητες αποβλήτων. Την ίδια στιγμή, οι περισσότερες περιφέρειες παρουσιάζουν σημαντικές ελλείψεις σε κατάλληλες τεχνολογίες, καθώς και σε υποδομές που απαιτούνται στο πλαίσιο της αποτελεσματικής ανακύκλωσης ή επεξεργασίας των αποβλήτων.

Για τον γεωργικό τομέα, το κυκλικό μοντέλο αξιοποίησης των πόρων μπορεί να προσδώσει τεράστια οφέλη, τόσο για τον ίδιο το γεωργό όσο και κυρίως για την ανθρωπότητα ευρύτερα. Πιο απλές μέθοδοι επεξεργασίας αποβλήτων, όπως η κομποστοποίηση και η επικάλυψη εδάφους, έχουν σημαντικές προοπτικές στη βελτίωση της ποιότητας των γεωργικών προϊόντων, καθώς και στη μείωση των αποβλήτων που απορρίπτονται στο περιβάλλον. Κατά τις γεωργικές και κτηνοτροφικές δραστηριότητες, παράγονται ποσότητες οργανικών αποβλήτων, οι οποίες με την κατάλληλη επεξεργασία μπορούν να αποτελέσουν πολύτιμους νέους πόρους προς αξιοποίηση. Για παράδειγμα, η ζωική κοπριά και υπολείμματα καλλιεργειών, μπορούν να δώσουν ένα πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά λίπασμα, μετά από τη διαδικασία της κομποστοποίησης, ενώ υπολείμματα όπως κλαδιά και φύλλα είναι χρήσιμα μέσα για την επιφανειακή επικάλυψη του εδάφους, προσφέροντας ένα στρώμα προστασίας στις καλλιέργειες και συμβάλλοντας στη διατήρηση της απαραίτητης υγρασίας, αποτρέποντας από τη χρήση πολυμερών (πλαστικών) καλυμμάτων.

2.5 Ανακεφαλαίωση

Ο γεωργικός και κτηνοτροφικός τομέας, παράγουν ετησίως δισεκατομμύρια τόνους αποβλήτων, προκαλώντας πλήθος περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων και υποβαθμίζοντας την ανθρώπινη υγεία, αλλά και την υγεία όλων των ζώντων οργανισμών γενικότερα. Η ορθή διαχείριση των γεωργικών αποβλήτων είναι ένα κρίσιμο ζήτημα, το οποίο απαιτεί ισχυρό στρατηγικό σχεδιασμό, από χώρα σε χώρα. Η εφαρμογή κατάλληλων μεθόδων διαχείρισης των αποβλήτων αυτών, όχι μόνο μπορεί να μειώσει την ποσότητα, που καταλήγει στους Χώρους Υγειονομικής Ταφής, ή και απευθείας στο φυσικό περιβάλλον, αλλά παράλληλα μπορεί να τα μετατρέψει σε προϊόντα προστιθέμενης αξίας, ενισχύοντας τη βιώσιμη ανάπτυξη και το κυκλικό μοντέλο οικονομίας. Όπως αναφέρθηκε, μεγάλο μέρος των οργανικών γεωργικών και κτηνοτροφικών αποβλήτων μπορεί να αποδώσει, έπειτα από κατάλληλη επεξεργασία, πλήθος θρεπτικών συστατικών τα οποία διαθέτουν μεγάλες δυνατότητες στην ενίσχυση και παραγωγή οργανικών λιπασμάτων, κομμάτι που θα αναλυθεί περαιτέρω στα επόμενα κεφάλαια. Το μοντέλο της κυκλικής οικονομίας είναι πολλά υποσχόμενο για τη διατήρηση των φυσικών πόρων και την παροχή βιώσιμης και αναγεννητικής γεωργίας, καθώς τα κοινά οργανικά απόβλητα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προώθηση της αειφόρου γεωργίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Ανόργανα Στοιχεία

3.1 Εισαγωγή

Το έδαφος είναι ένα πορώδες μέσο του οποίου η σύσταση αποτελείται από μέταλλα, νερό, οργανική ύλη, αέρια και διάφορους μικροοργανισμούς. Θρεπτικά συστατικά όπως το άζωτο (N), ο φώσφορος (P) και το κάλιο (K), είναι απαραίτητα για την γονιμότητα του εδάφους και την ανάπτυξη των καλλιεργειών, αλλά παράλληλα η διαθέσιμη ποσότητά τους είναι περιορισμένη καθώς τα αποθέματα σε φώσφορο ολοένα και μειώνονται, λόγω του αυξανόμενου πληθυσμού.

Καθώς οι γεωργικές δραστηριότητες συνεχώς αυξάνονται, ώστε να καλύψουν τις ανάγκες του διαρκώς αυξανόμενου πληθυσμού, εμφανίζονται σοβαρές προκλήσεις όσον αφορά τη διαχείριση του εδάφους και των θρεπτικών ουσιών για τη διασφάλιση της γονιμότητας του εδάφους, της ποιότητας του αέρα, της ποιότητας των υδάτων, του κλίματος και της βιοποικιλότητας (De Vries et al., 2023). Παράλληλα, τα προβλήματα που μπορούν να προκύψουν από την περίσσεια θρεπτικών συστατικών στο περιβάλλον και ειδικά από την αλόγιστη διασπορά ζωικής κοπριάς η οποία είναι πλούσια σε θρεπτικά συστατικά, είναι ποικίλα (Sobhi et al., 2023). Οι διατροφικές ανισορροπίες μεταξύ των διαφορετικών περιοχών, μπορεί να οδηγήσουν σε πλεόνασμα συγκέντρωσης θρεπτικών συστατικών σε ορισμένες περιοχές και έλλειμμα συγκέντρωσης σε άλλες. Ο ρυθμός συγκέντρωσης φωσφορικού πετρώματος στο περιβάλλον με ρυθμό ταχύτερο από το φυσικό κύκλο, μπορεί να προκαλέσει μόλυνση των υδάτων και ως εκ τούτου, η κατανόηση των ροών και των διαδρομών στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων είναι απαραίτητη για την ανάκτησή του από τα υγρά απόβλητα (Śniatała et al., 2023). Ενώ τα χημικά λιπάσματα είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη των καλλιεργειών και την παραγωγή τροφίμων, δεν αξιοποιούνται όλα τα θρεπτικά συστατικά από τα φυτά και ένα μεγάλο ποσοστό χάνεται στο περιβάλλον, με αποτέλεσμα τέτοιες απώλειες θρεπτικών ουσιών να αυξάνουν το γεωργικό κόστος, να σπαταλούν ενέργεια (Kannan et al., 2023), και να προκαλούν ποικίλα περιβαλλοντικά προβλήματα όπως ευτροφισμό.

Στο παρόν κεφάλαιο, θα αναπτυχθεί η ανάγκη παρουσίας θρεπτικών συστατικών στις γεωργικές καλλιέργειες, με περαιτέρω ανάλυση στις ιδιότητες των κυριότερων και περισσότερο απαιτούμενων θρεπτικών συστατικών για τη φυτική παραγωγή. Ωστόσο, παράλληλα θα αναλυθούν και οι αρνητικές επιπτώσεις που προκύπτουν όταν αυτά τα θρεπτικά συστατικά συναντώνται σε περίσσεια, δικαιολογώντας σε κάθε περίπτωση την ανάγκη

εφαρμογής καινοτόμων μεθόδων ανάκτησης των θρεπτικών συστατικών για την παραγωγή βιώσιμων λιπασμάτων, που αποτελεί το κύριο θέμα των επακόλουθων κεφαλαίων.

3.2 Θρεπτικά Συστατικά

Τα θρεπτικά συστατικά είναι ανόργανα στοιχεία που αποτελούν πολύτιμους πόρους που είναι απαραίτητοι στον μεταβολισμό και στην ανάπτυξη των φυτών και την ενίσχυση της ανθεκτικότητάς τους από ασθένειες. Οι ρίζες των φυτών μπορούν και απορροφούν τα συστατικά και μέταλλα που περιέχονται στο έδαφος, μεταφέροντάς τα στο υπόλοιπο φυτό. Στα ανώτερα φυτά, εντοπίζονται 16 βασικά θρεπτικά συστατικά και πιο συγκεκριμένα επτά μικροθρεπτικά συστατικά (ιχνοστοιχεία) και εννέα μακροθρεπτικά συστατικά. Τα μακροθρεπτικά συστατικά που εντοπίζονται στο έδαφος, απαιτούνται σε μεγαλύτερες ποσότητες για τη φυτική παραγωγή, με τα κυριότερα να είναι το άζωτο (N), ο φώσφορος (P) και το κάλιο (K). Η απουσία κάποιου από τα θρεπτικά αυτά συστατικά, θα επέφερε σημαντικές επιπτώσεις στο σχηματισμό του φυτού, καθυστερώντας την ανάπτυξή του και αυξάνοντας τις πιθανότητες εμφάνισης ελαττωματικών χαρακτηριστικών, όπως μείωση της φωτοσυνθετικής αποτελεσματικότητας, αλλοίωση του χρώματος και κιτρίνισμα των φύλλων (Li et al., 2020). Η ανεπάρκεια αυτή σε θρεπτικά συστατικά, μπορεί να καλυφθεί είτε με χρήση εδαφοβελτιωτικών ή λιπασμάτων και δεν μπορεί να αντικατασταθεί με την προσθήκη διαφορετικού θρεπτικού συστατικού. Συνεπώς σε κάθε περίπτωση, πρέπει να προηγηθεί ορθή ανίχνευση των συστατικών που βρίσκονται σε έλλειμμα, ώστε να πραγματοποιηθεί χρήση του κατάλληλου λιπάσματος που θα προσδώσει στο φυτό τα απαραίτητα θρεπτικά συστατικά.

Σε αυτό το σημείο, είναι συνεπώς χρήσιμο να αναλυθούν τα χαρακτηριστικά των κυριότερων μακροθρεπτικών (N, P, K) και μικροθρεπτικών συστατικών. Τα διαφορετικά συστατικά, προσδίδουν ξεχωριστές αλλά και κοινές ιδιότητες στο φυτό, αλλά παράλληλα η ανεπαρκής ή η αυξημένη ποσότητά τους, μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρές συνέπειες τόσο για την ανάπτυξη του ίδιου του φυτού, όσο και για τα γύρω οικοσυστήματα και τον άνθρωπο αντίστοιχα.

3.2.1 Άζωτο (N)

Το άζωτο αποτελεί απαραίτητο στοιχείο για την ανάπτυξη των φυτών και τον μεταβολισμό τους, καθώς είναι βασικό συστατικό αμινοξέων, πρωτεϊνών, νουκλεϊκών οξέων και χλωροφύλλης, τα οποία συμβάλλουν στη λειτουργία των φυτών. Το ενεργό άζωτο αντιπροσωπεύει όλες τις μορφές οξειδωμένου και μειωμένου αζώτου εκτός από το αέριο άζωτο

(N₂) και περιλαμβάνει αμμωνία (NH₃), υποξείδιο του αζώτου (N₂O) και οξείδια του αζώτου (NO_x), που εκπέμπονται στον αέρα, και νιτρικά (NO₃) και αμμώνιο (NH₄) που χάνονται στα υπόγεια και επιφανειακά ύδατα (De Vries et al., 2023).

Παρότι το άζωτο εμφανίζεται άφθονο στην ατμόσφαιρα, δεν μπορεί να αξιοποιηθεί στην ελεύθερη μορφή του από τους περισσότερους οργανισμούς. Τα φυτά έχουν καθοριστικό ρόλο στον κύκλο του αζώτου, καθώς μπορούν να απορροφούν και να απελευθερώνουν ενώσεις του. Τα φυτά απορροφούν το άζωτο κυρίως με τη μορφή νιτρικών (NO₃⁻) και αμμωνίου (NH₄⁺). Το αμμώνιο πιστεύεται ότι είναι η προτιμώμενη μορφή αζώτου επειδή μια οξειδοαναγωγική αντίδραση δεν εμπλέκεται στην αφομοίωσή του και συνεπώς ελαχιστοποιείται η ενέργεια που απαιτείται για την πρόσληψή του (Cai et al., 2013). Ως εκ τούτου, θα πρέπει μια βιώσιμη προσέγγιση να μπορεί να ανακτήσει το αμμώνιο και το νιτρικό ανιόν από τα απόβλητα, με σκοπό την ενίσχυση παραγωγής οργανικών λιπασμάτων με βάση το άζωτο. Έως σήμερα, η περισσότερο διαδεδομένη διαδικασία παραγωγής αμμωνίας (NH₃) από ατμοσφαιρικό άζωτο (N₂) είναι η διαδικασία Haber – Bosch. Ωστόσο, η διαδικασία χαρακτηρίζεται από ποικίλα αρνητικά στοιχεία όσον αφορά την εκτεταμένη ενεργειακή χρήση και το περιβαλλοντικό της αποτύπωμα (Humphreys et al., 2020).

Όπως αναφέρθηκε και στον Πίνακα 3.1, τα κτηνοτροφικά απόβλητα περιέχουν πολλές πηγές αζώτου. Σχεδόν το ήμισυ του αζώτου στα κτηνοτροφικά απόβλητα έχει τη μορφή αμμωνίου και το υπόλοιπο ήμισυ έχει τη μορφή οργανικού αζώτου (Cai et al., 2013). Η ζωική κοπριά περιέχει πλήθος μακροθρεπτικών συστατικών, συμπεριλαμβανομένου και αζώτου σε οργανική και ανόργανη μορφή (Dadrasnia et al., 2021). Περίπου το 80% της ποσότητας αζώτου που παράγεται από τη ζωική κοπριά απορρίπτεται στο περιβάλλον, ενώ το υπόλοιπο μπορεί να ανακτηθεί και να επαναχρησιμοποιηθεί σε λιπάσματα (Śniatała et al., 2023b). Τα πολύ υψηλά επίπεδα αζώτου μπορεί να εμποδίσουν, ωστόσο, την πρόσληψη άλλων θρεπτικών συστατικών, προκαλώντας ανεπάρκειες θρεπτικών συστατικών ή τοξικότητα. Η αποδοτικότητα χρήσης αζώτου έχει οριστεί ευρέως ως η ποσότητα λιπάσματος με βάση το άζωτο, που αξιοποιείται από τα φυτά (Gao et al., 2022). Η επιλογή του λιπάσματος με βάση το άζωτο εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως ο τύπος του εδάφους, ο τύπος της καλλιέργειας, οι απαιτήσεις σε θρεπτικά συστατικά και οι μέθοδοι εφαρμογής.

3.2.2 Φώσφορος (P)

Ο φώσφορος είναι ένας μη ανανεώσιμος πόρος, που συναντάται στη φύση, ενωμένος με άλλα στοιχεία, και κυρίως ανακτάται από την εξόρυξη φωσφορικών πετρωμάτων, όπως απατίτη και μοναζίτη. Είναι ένα από τα βασικότερα μακροθρεπτικά συστατικά, και είναι απαραίτητο χημικό στοιχείο για όλες τις μορφές ζωής. Ακόμα, χρησιμοποιείται συχνά ως συστατικό λιπασμάτων, εντομοκτόνων και φαρμακευτικών προϊόντων (Kannan et al., 2023). Ο φώσφορος είναι βασικό στοιχείο για την παραγωγικότητα του εδάφους και την ανάπτυξη των φυτών, ενώ η απουσία του παράλληλα επιβραδύνει την ανάπτυξη μικροβίων του εδάφους. Τα φυτά απορροφούν τον φώσφορο από το έδαφος με τη μορφή ανόργανων φωσφορικών ιόντων. Τα όξινα εδάφη έχουν συνήθως υψηλό ολικό φώσφορο, αλλά η συγκέντρωσή του στο εδαφικό διάλυμα είναι συχνά ανεπαρκής για τα φυτά και τους οργανισμούς του εδάφους (Kumar et al., 2021). Ο φώσφορος είναι απαραίτητο στοιχείο στη φωτοσύνθεση και την αναπνοή, ενώ συμβάλλει σημαντικά στην ανάπτυξη των ριζών, την άνθιση και την προστασία των φυτών από ασθένειες. Καθώς ο φώσφορος αποτελεί βασικό κομμάτι των δομών του RNA και DNA, η ανεπαρκής ποσότητά του, θα επιβράδυνε σημαντικά τη φυτική ανάπτυξη, καθιστώντας την καλλιέργεια αδύναμη για παραγωγή (Uchida, R. 2000). Η διαθεσιμότητα και η πρόσληψη του φωσφόρου μπορεί επίσης να επηρεαστεί από παράγοντες όπως είναι το pH του εδάφους, η θερμοκρασία, η υγρασία, και η παρουσία μυκήτων και άλλων μικροοργανισμών. Επομένως, η διατήρηση επαρκούς επιπέδου φωσφόρου στο έδαφος είναι ζωτικής σημασίας για τη βέλτιστη ανάπτυξη και παραγωγικότητα των φυτών. Ωστόσο, η υπερβολική συγκέντρωση του P ευνοεί την ανάπτυξη κυανοβακτηρίων, οδηγώντας σε ευτροφισμό στα υδάτινα σώματα.

Καθώς τα αποθέματα φωσφόρου είναι πολύ περιορισμένα, ο φώσφορος έχει ταξινομηθεί ως μία από τις κρίσιμες πρώτες ύλες, λόγω του κινδύνου εφοδιασμού του, σε συνδυασμό με τη διαρκώς αυξανόμενη ζήτηση προς κατανάλωσή του, η οποία φτάνει τους 20 εκατομμύρια τόνους ετησίως (Śniatała et al., 2023). Συνεπώς, η ανάκτησή του από οργανικά απόβλητα πλούσια σε φωσφορικά άλατα, με την εφαρμογή κατάλληλων τεχνολογικών μεθόδων, και η επαναχρησιμοποίησή τους ως συστατικό στη δημιουργία οργανικού λιπάσματος, θα μπορούσε να μετριάσει την έλλειψή του και παράλληλα να ενισχύσει τη βιώσιμη ανάπτυξη και κυκλική οικονομία, μέσω της ορθής διαχείρισης και μείωσης της ποσότητας των αποβλήτων που καταλήγουν στο φυσικό περιβάλλον.

3.2.3 Κάλιο (K)

Το κάλιο (ή αλλιώς ποτάσιο) προέρχεται από μη ανανεώσιμους πόρους, όπως και ο φώσφορος. Είναι επίσης ένα μακροθρεπτικό συστατικό που συμβάλλει στη φυτική ανάπτυξη και οι καλλιέργειες απαιτούν το κάλιο όσο το άζωτο για το μεταβολισμό τους (Śniatała et al., 2023), ενώ άλατα όπως το ανθρακικό κάλιο (K_2CO_3), το χλωριούχο κάλιο (KCl), το νιτρικό κάλιο (KNO_3) και το θειικό κάλιο (K_2SO_4) χρησιμοποιούνται ευρέως και στην παραγωγή λιπασμάτων (Khatri & Garg, 2022). Επίσης, το K είναι σημαντικό για τη διασφάλιση της βέλτιστης ανάπτυξης των φυτών, καθώς έχει τη δυνατότητα ενεργοποίησης πολλών σημαντικών ενζύμων, συμβάλλοντας στην πρωτεϊνσύνθεση, την παραγωγή Τριφωσφορικής αδενοσίνης ATP, τη μεταφορά σακχάρων και τη φωτοσύνθεση (Xu et al., 2020). Επιπλέον, το κάλιο συμβάλλει στη διαχείριση του νερού από το φυτό, ενώ ελέγχει το άνοιγμα και το κλείσιμο των φύλλων (Uchida, R. 2000). Τυχόν ανεπάρκεια σε κάλιο, καθυστερεί την ανάπτυξη του φυτού, μειώνοντας παράλληλα την απόδοση και την ποσότητα της παραγωγής, καθιστώντας τα φυτά περισσότερο αδύναμα (Uchida, R. 2000).

Το κάλιο στη φύση μπορεί να εντοπιστεί διαλυμένο στο θαλασσινό νερό, αλλά και σε διάφορα ορυκτά, τα οποία συναντώνται σε περιορισμένο αριθμό χωρών στον κόσμο (Arredondo et al., 2017), ενώ η επεξεργασία του ακατέργαστου καλίου απαιτεί μεγάλη έκταση γης και παράλληλα επιδρά αρνητικά όσον αφορά την κλιματική αλλαγή (Khatri & Garg, 2022b). Επιπλέον, το κάλιο που εξορύσσεται δεν μπορεί να αξιοποιηθεί απευθείας, και απαιτεί κατάλληλη επεξεργασία η οποία χρειάζεται μεγάλη έκταση γης και παράλληλα ασκεί σημαντική επιβάρυνση στο περιβάλλον (Khatri & Garg, 2022). Ωστόσο, τα διαθέσιμα αποθέματα καλίου δεν αρκούν για να καλύψουν τη μακροχρόνια ζήτηση και αναμένεται ότι θα έχουν εξαντληθεί σε λιγότερο από 93 χρόνια (Johansson et al., 2018), αυξάνοντας την ανάγκη για ανάκτησή του από στερεά και υγρά απόβλητα.

3.2.4 Μικροθρεπτικά συστατικά

Σε αντίθεση με τα μακροθρεπτικά συστατικά, τα οποία χρειάζονται σε μεγάλες ποσότητες για τη φυτική παραγωγή, η ανάγκη των φυτών σε μικροθρεπτικά συστατικά αφορά μικρότερες ποσότητες. Τα βασικά μικροθρεπτικά συστατικά, των οποίων η παρουσία είναι αναγκαία για την ανάπτυξη του φυτού, είναι το βόριο (B), το χλώριο (Cl), ο χαλκός (Cu), ο σίδηρος (Fe), το μαγγάνιο (Mn), το μολυβδαίνιο (Mo), το νικέλιο (Ni) και ο ψευδάργυρος (Zn). Παρά το γεγονός ότι τα μικροθρεπτικά συστατικά, χρειάζονται σε μικρές ποσότητες, η παρουσία τους

είναι εξίσου σημαντική με αυτή των μακροθρεπτικών συστατικών (Fageria et al., 2002). Τα μικροθρεπτικά συστατικά είναι απαραίτητα για τη φυτική ανάπτυξη, διαθέτοντας κρίσιμο ρόλο σε λειτουργίες όπως στο μεταβολισμό των φυτών, στην αναπαραγωγή και στην άνθιση, στη ρύθμιση των θρεπτικών ουσιών, στη σύνθεση της χλωροφύλλης και στην παραγωγή υδατανθράκων (Tripathi et al., 2015).

Στην πραγματικότητα, η διαθέσιμη ποσότητα θρεπτικών συστατικών στο έδαφος εξαρτάται από ποικίλους παράγοντες, ενώ η ικανότητα των φυτών να προσλαμβάνουν τα συστατικά αυτά, είναι αρκετά μειωμένη λόγω της μη διαλυτής μορφής στην οποία βρίσκονται. Ανεπάρκεια των μικροθρεπτικών συστατικών, εμφανίζεται συχνά κυρίως λόγω της μειωμένης τους εφαρμογής μέσω της διαδικασίας λίπανσης, της μειωμένης εφαρμογής ζωικής κοπριάς και της έκπλυσης των συστατικών αυτών, η οποία οδηγεί σε περαιτέρω απώλειες (Fageria et al., 2002). Η ανεπάρκεια μικροθρεπτικών συστατικών επιφέρει αρνητικές επιπτώσεις στη φυτική παραγωγή μειώνοντας την ανοσολογική ικανότητα των φυτών η οποία τους επιτρέπει να αντιστέκονται σε διάφορες χρόνιες ασθένειες, ενώ παράλληλα αποτελεί απειλή για τη διατήρηση της ποιότητας και της ποσότητας της τροφής (Tripathi et al., 2015). Συχνές επιπτώσεις από την ανεπάρκεια των μικροθρεπτικών συστατικών αποτελούν η ανώμαλη χρώση, οι διαφορές στο μέγεθος και στο σχήμα των φυτικών ιστών και οι μειωμένοι ρυθμοί φωτοσύνθεσης (Fageria et al., 2002).

Τα διαφορετικά μικροθρεπτικά συστατικά προσδίδουν ξεχωριστές ιδιότητες και πολλαπλά οφέλη στα φυτά, ενώ η απουσία τους ή η ύπαρξή τους σε αυξημένες ποσότητες τείνει να συνεπάγει προβλήματα κατά την ανάπτυξη των φυτών. Στον Πίνακα 3.1, αναφέρονται συνοπτικά τα οφέλη των κυριότερων μικροθρεπτικών συστατικών, καθώς και οι αρνητικές επιπτώσεις που μπορεί να προκαλέσει η ανεπάρκεια ή η περίσσειά τους στη φυτική παραγωγή.

Πίνακας 3.1 Κυριότερα οφέλη και επιπτώσεις από την ύπαρξη ή ανεπάρκεια μικροθρεπτικών συστατικών

Μικροθρεπτικό συστατικό	Οφέλη στη φυτική ανάπτυξη	Επιπτώσεις από την ανεπάρκεια/περίσσεια	Πηγή
Βόριο (B)	Απαραίτητο στη βιοσύνθεση του κυτταρικού τοιχώματος, στη διαφοροποίηση των ιστών, στην ανάπτυξη του	Η ανεπάρκεια σε βόριο οδηγεί σε κιτρίνισμα των φύλλων, χλώρωση, αναστολή του μήκους της ρίζας/βλαστών, νεκρωτική κηλίδα	(Tripathi et al., 2015)

	βλαστού, στον μεταβολισμό, στη δέσμευση του αζώτου και των νιτρικών και στην ανάπτυξη των ριζών.	και άλλα προβλήματα στην ανάπτυξη του φυτού.	
Χαλκός (Cu)	Συμμετέχει στην αντίδραση οξειδωσης-αναγωγής ως φορέας ηλεκτρονίων σε χλωροπλάστες και μιτοχόνδρια καθώς και στην αποβολή οξειδωτικού στρες, συμβάλλει σημαντικά στο μεταβολισμό του κυτταρικού τοιχώματος και συμμετέχει ενεργά στην κινητοποίηση του σιδήρου. Ακόμα, δρα ως συμπληρωματικός παράγοντας ενζύμων και παίζει σημαντικό ρόλο στην αναπνοή, τη φωτοσύνθεση, τις λιγνοποιήσεις, το μεταβολισμό της φαινόλης, τη σύνθεση πρωτεϊνών, τη ρύθμιση των αυξινών κλπ.	Η ανεπάρκεια σε χαλκό προκαλεί μεταβολές στον ρυθμό ανάπτυξης, παραμόρφωση ή λεύκανση νεαρών φύλλων, μείωση του σχηματισμού κυτταρικού τοιχώματος και λιγνιτοποίηση σε διάφορους ιστούς. Επίσης, προκαλεί κάμψη των άκρων των φυλλωμάτων και παρεμποδίζει το σχηματισμό φρούτων και σπόρων, την ανάπτυξη γύρης, την παραγωγή ξύλου, τη βιωσιμότητα των σπόρων και την ανάπτυξη των φυτών. Οι υψηλή συγκέντρωση χαλκού οδηγεί σε τοξικότητα και αναστολή της φυτικής ανάπτυξης, σε χλώρωση και νέκρωση.	(Tripathi et al., 2015)
Σίδηρος (Fe)	Συμβάλλει στην εξάλειψη των δυσμενών επιπτώσεων της χλωρόξης, στον μεταβολισμό των φυτών, στην κυτταρική αναπνοή, στη μεταφορά οξυγόνου, στη βιοσύνθεση του DNA, στη φωτοσύνθεση, στη βιοσύνθεση της χλωροφύλλης κλπ.	Η ανεπαρκής ποσότητα σιδήρου οδηγεί σε χλώρωση των νεαρών φύλλων και καθυστερημένη φυτική ανάπτυξη. Η περίσσεια σιδήρου συνεπάγεται τοξικότητα, αναστολή της φυτικής ανάπτυξης, μειωμένη σύνθεση χλωροφύλλης, και αναστολή της φωτοσυνθετικής διαδικασίας.	(Tripathi et al., 2015)
Μαγγάνιο (Mn)	Εμπλέκεται άμεσα ή έμμεσα στον μηχανισμό ανθεκτικότητας στο στρες των ανώτερων φυτών,	Η ανεπάρκεια σε μαγγάνιο μπορεί να προκαλέσει χλώρωση σε νεαρούς ιστούς, νεκρωτικές κηλίδες, πρόωρη πτώση φύλλων κ.α.	(Tripathi et al., 2015)

	<p>χρησιμεύοντας ως συμπαραγόντας διαφόρων αντιοξειδωτικών ενζύμων. Επιπλέον είναι απαραίτητο για τη φωτοσύνθεση και τη βιοσύνθεση του ATP, πρωτεϊνών, λιπιδίων και λιπαρών οξέων.</p>	<p>Οι υψηλές ποσότητες μαγγανίου, μπορούν να παρεμποδίσουν την απορρόφηση άλλων ανόργανων στοιχείων από τα φυτά. Ακόμα επηρεάζουν τον φυτικό μεταβολισμό και τη φωτοσυνθετική διαδικασία, ενώ οδηγούν και σε οξειδωτικό στρες.</p>	
Ψευδάργυρος (Zn)	<p>Συμβάλει στη σταθεροποίηση των υδατανθράκων, στο μεταβολισμό υδατανθράκων, πρωτεϊνών κ.α.. Συμβάλει στο μηχανισμό άμυνας των φυτών έναντι παθογόνων μικροοργανισμών, προστατεύει από το οξειδωτικό στρες.</p>	<p>Η ανεπάρκεια σε ψευδάργυρο μπορεί να προκαλέσει νέκρωση της ρίζας, χλώρωση, αλλοίωση του χρώματος των φυλλωμάτων.</p> <p>Η περίσσεια ψευδαργύρου οδηγεί σε τοξικότητα, υπεροξείδωση λιπιδίων κλπ.</p>	(Tripathi et al., 2015)
Χλώριο (Cl)	<p>Απαραίτητο στη φωτοσύνθεση και την ενεργοποίηση ενζύμων. Συμμετέχει στη διάσπαση του νερού.</p>	<p>Η ανεπάρκεια σε χλώριο συνεπάγει μειωμένο μέγεθος των φύλλων και των ριζών, κιτρίνισμα και νέκρωση των φύλλων.</p> <p>Η περίσσεια σε χλώριο, οδηγεί σε νέκρωση των άκρων των ριζών και των φύλλων, κιτρίνισμα και μειωμένο μέγεθος των φύλλων.</p>	(Fageria et al., 2002)
Μολυβδαίνιο (Mo)	<p>Απαραίτητο στην αφομοίωση αζώτου. Βασικό συστατικό της νιτρικής αναγωγής.</p>	<p>Η ανεπάρκεια σε μολυβδαίνιο συνεπάγει μαρασμό και πιθανή νέκρωση των φύλλων, καθώς και χρωματικές αλλοιώσεις. Ακόμα φτωχαίνει την παραγωγή σπόρων.</p> <p>Η περίσσεια σε μολυβδαίνιο προκαλεί συμπτώματα αρκετά παρόμοια με αυτά της ανεπάρκειας σε φώσφορο.</p>	(Fageria et al., 2002)

3.3 Βαρέα Μέταλλα

Οι τεράστιες ποσότητες αποβλήτων που παράγονται, αποτελούν μεγάλο κίνδυνο για το περιβάλλον και όλους τους οργανισμούς. Πιο συγκεκριμένα, στην Ευρώπη εκτιμάται ότι το κόστος ρύπανσης που προκύπτει από τη διαχείριση της ζωικής κοπριάς, είναι πάνω από 12,3 δισεκατομμύρια ευρώ ετησίως. Ως συνέπεια, οι χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης στοχεύουν στην ενσωμάτωση της διαχείρισης και επεξεργασίας της ζωικής κοπριάς στα γενικά σχέδια διαχείρισης (Dadrasnia et al., 2021). Η άμεση διάθεση των αποβλήτων στο περιβάλλον, οδηγεί σε ποικίλες επιπτώσεις όπως είναι η υψηλή συγκέντρωση βαρέων μετάλλων, η τοξικότητα και η ρύπανση του εδάφους και το φαινόμενο του ευτροφισμού.

Τα βαρέα μέταλλα είναι στοιχεία που μπορούν να βρεθούν στο έδαφος, είτε φυσικά είτε λόγω ανθρωπίνων δραστηριοτήτων. Τέτοια μέταλλα είναι ο χαλκός (Cu), ο ψευδάργυρος (Zn), το κάδμιο (Cd), ο μόλυβδος (Pb), το κοβάλτιο (Co) και άλλα. Παρότι η παρουσία βαρέων μετάλλων όπως χαλκού και ψευδαργύρου είναι θετική στην ανάπτυξη του φυτού, η συγκέντρωση μεγάλης ποσότητας βαρέων μετάλλων μπορεί να προκαλέσει σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα, καθώς προκαλούν τοξικότητα στο έδαφος και συνεπώς η ύπαρξη τους θέτει σε κίνδυνο την υγεία των ανθρώπων αλλά και των ζώων και των μικροοργανισμών (Abdulrazak et al., 2016). Ανθρώπινες δραστηριότητες όπως οι βιομηχανικές διεργασίες και η χρήση ορισμένων γεωργικών πρακτικών οδηγούν σε υψηλότερες συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων στο έδαφος. Η εφαρμογή ορυκτών λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων με βάση τα μέταλλα, καθώς και οι βιομηχανικές εκπομπές, καταλήγουν να μολύνουν τα κοντινά ρέματα, τα ποτάμια και τις λίμνες και σε πολλές περιπτώσεις το νερό άρδευσης και τις γύρω καλλιέργειες.

Η συγκέντρωση βαρέων μετάλλων στο περιβάλλον έχει αναφερθεί ότι είναι αυξημένη στα βιομηχανικά απόβλητα που παράγονται από διάφορες βιομηχανίες, όπως για παράδειγμα είναι η εξόρυξη, η κλωστοϋφαντουργία, η παραγωγή λιπασμάτων, και η φαρμακοβιομηχανία (Imran-Shaukat et al., 2022). Πέρα από την παρουσία βαρέων μετάλλων στο έδαφος, ποσότητές τους εντοπίζονται και στα γεωργικά και κτηνοτροφικά απόβλητα και ιδιαίτερα στη ζωική κοπριά, γεγονός που αποτελεί μία ακόμα αιτία επικινδυνότητας της απευθείας χρήσης της κοπριάς στις καλλιέργειες ως λίπασμα (Mengqi et al., 2021). Επιπλέον, οι κτηνοτροφικές δραστηριότητες έχουν μετατοπιστεί σε μεγάλη κλίμακα κατά την τελευταία δεκαετία, με αποτέλεσμα να συσσωρεύονται μεγάλες ποσότητες θρεπτικών συστατικών και βαρέων

μετάλλων ειδικότερα σε περιοχές αυξημένης ζωικής παραγωγής (Cai et al., 2013). Ωστόσο, η εξάπλωση των βαρέων μετάλλων στα γεωργικά και κτηνοτροφικά απόβλητα, οφείλεται κυρίως στα βαρέα μέταλλα του εδάφους και στις βιομηχανικές δραστηριότητες, και πιο συγκεκριμένα προκύπτουν από την αρχική πρόσληψη ή απορρόφηση των μετάλλων αυτών από τα φυτά και τα ζώα που εκτρέφονται σε συστήματα εντατικής εκτροφής. Τα βιομηχανικά λιπάσματα και φυτοφάρμακα, συχνά περιέχουν βαρέα μέταλλα τα οποία μπορούν και εισέρχονται στο φυτό, έπειτα από εφαρμογή στις καλλιέργειες, με αποτέλεσμα τα γεωργικά απόβλητα και η κοπριά που θα παραχθούν με το πέρας του χρόνου να μεταφέρουν βαρέα μέταλλα, προκαλώντας ποικίλα περιβαλλοντικά προβλήματα και εισρέοντας στην τροφική αλυσίδα.

Συνεπώς, προκειμένου να αξιοποιηθούν τα απόβλητα και παράλληλα να μην αποτελούν επιπλέον κίνδυνο, λόγω των βαρέων μετάλλων που περιέχουν, θα πρέπει να προηγηθεί εφαρμογή τεχνικών απομάκρυνσης των μετάλλων αυτών. Τέτοιες συμβατικές μέθοδοι για την απομάκρυνση βαρέων μετάλλων από τα απόβλητα, είναι η χημική καθίζηση, η αντίστροφη όσμωση, η διήθηση μεμβράνης, η ηλεκτρόλυση και η εκχύλιση με διαλύτη, οι περισσότερες από τις οποίες ωστόσο χαρακτηρίζονται από το μειονέκτημα του υψηλού λειτουργικού κόστους (Namasivayam & Sangeetha, 2006) και άλλων ζητημάτων, που καθιστούν τη διαδικασία απομάκρυνσής τους δύσκολη στην εφαρμογή της. Ωστόσο, η προσρόφηση αποτελεί μια εναλλακτική μέθοδο, που είναι αποδοτική για απομάκρυνση μικρών συγκεντρώσεων βαρέων μετάλλων, ενώ ταυτοχρόνως είναι οικονομικά αποδοτική, απλή στο σχεδιασμό και φιλικότερη προς το περιβάλλον (Imran-Shaukat et al., 2022).

3.4 Επιπτώσεις περίσσειας αζώτου (N)

Παρά το γεγονός ότι το άζωτο εμφανίζεται άφθονο στην ατμόσφαιρα και είναι απαραίτητο μακροθρεπτικό συστατικό για την ανάπτυξη και απόδοση των καλλιεργειών, μπορεί να οδηγήσει σε πλήθος δυσάρεστων περιβαλλοντικών επιπτώσεων, όταν συναντάται σε υψηλή ποσότητα. Η μεγάλη συγκέντρωση θρεπτικών συστατικών, κυρίως άζωτου και φωσφόρου, συχνά συνεπάγεται αυξημένη παραγωγή φυκιών και υδρόβιων φυτών, οδηγώντας δραστική μείωση του διαλυμένου οξυγόνου που υπάρχει στο νερό και υποβαθμίζοντας έτσι την ποιότητα του νερού στα υδάτινα οικοσυστήματα (Akinpawo, 2023) και αλλοιώνοντας την υδάτινη βιοποικιλότητα. Το φαινόμενο αυτό, είναι γνωστό ως φαινόμενο του ευτροφισμού και αποτελεί σημαντικό περιβαλλοντικό πρόβλημα το οποίο συναντάται σε πολύ μεγάλο αριθμό λιμνών, ποταμών και υδάτων σε όλο τον κόσμο (Cai et al., 2013).

3.4.1 Το φαινόμενο του ευτροφισμού

Το φαινόμενο του ευτροφισμού είναι ένα περιβαλλοντικό φαινόμενο κατά το οποίο η υπέρμετρη αύξηση της συγκέντρωσης θρεπτικών συστατικών, έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του διαλυμένου οξυγόνου στο νερό. Τα θρεπτικά συστατικά που παράγονται και καταλήγουν σε λίμνες και σε κόλπους, αποτελούν τη βασική τροφή υδρόβιων φυτών και του φυτοπλαγκτόν, οι οποίοι αυξάνονται και καταναλώνουν το διαλυμένο οξυγόνο εμποδίζοντας την ανάπτυξη της υδρόβιας ζωής. Ο ευτροφισμός συνοδεύεται από ποικίλες οικολογικές επιπτώσεις όπως είναι η υποβάθμιση της βιοποικιλότητας και ειδικά των φυτικών ειδών του πυθμένα (De Vries et al., 2023), η αύξηση της τοξικότητας των υδάτων και η αυξημένη θολερότητα του νερού (Cai et al., 2013). Οι ανθρώπινες δραστηριότητες έχουν επιταχύνει το ρυθμό και το μέγεθος του ευτροφισμού, προκαλώντας καταστροφικές συνέπειες για τις πηγές πόσιμου νερού, νερού άρδευσης και την υδρόβια ζωή. Ο ευτροφισμός κυρίως προκαλείται από την απορροή νιτρικών και φωσφορικών αλάτων από τις γεωργικές εκτάσεις, τα απόβλητα καλλιεργειών, υδατοκαλλιέργειας, απόβλητα κτηνοτροφικών δραστηριοτήτων, τα λιπάσματα και τα λύματα αποχέτευσης, καθώς και από τις βιομηχανικές απορρίψεις (Akinawo, 2023).



Πηγή: <https://pakagrifarming.blogspot.com/2021/06/introduction-to-eutrophication-101.html>

Εικόνα 3.1 Όψη ευτροφικής λίμνης

Τα γεωργικά απόβλητα, τα λιπάσματα καθώς και η διαχείριση των κτηνοτροφικών αποβλήτων διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στον ευτροφισμό. Η κτηνοτροφία παράγει σημαντικές ποσότητες ζωικής κοπριάς, η οποία περιέχει υψηλά επίπεδα αζώτου και φωσφόρου, όπως παριστάνεται και στον Πίνακα 3.1. Η ακατάλληλη αποθήκευση και διαχείριση της κοπριάς μπορεί να οδηγήσει σε απορροή πλήθους θρεπτικών συστατικών κατά τη διάρκεια

βροχοπτώσεων, τα οποία καταλήγουν να μολύνουν τα υπόγεια ύδατα. Παράλληλα, τα θρεπτικά συστατικά της κοπριάς δεν μπορούν να αποκατασταθούν πλήρως από τις καλλιέργειες λόγω των διαφορετικών απαιτήσεων σε αναλογία N/P. Αυτή η περίσσεια σε θρεπτικά συστατικά, συσσωρεύεται στο έδαφος με αποτέλεσμα να εμποδίζει την απορροή των θρεπτικών, προκαλώντας ευτροφισμό στα ύδατα υποδοχής (Cai et al., 2013).

Η χρήση χημικών λιπασμάτων στη γεωργία, επίσης ευνοεί την υπερβολική συσσώρευση θρεπτικών συστατικών στο έδαφος και στις καλλιέργειες. Η βροχή ή το νερό άρδευσης μπορεί να απομακρύνουν την περίσσεια θρεπτικών συστατικών από τα χωράφια, μεταφέροντας τις ποσότητες αυτές, σε κοντινές υδάτινες πηγές, όπως ποτάμια, λίμνες και παράκτιες περιοχές, ενισχύοντας την ανάπτυξη φυκιών και υδρόβιων φυτών. Τα αυξημένα επίπεδα λίπανσης οδηγούν σε πολύ υψηλές απώλειες ενεργού αζώτου (N), γεγονός που συνεπάγεται την αυξημένη συγκέντρωση στον αέρα, στο έδαφος, στα υπόγεια και στα επιφανειακά ύδατα (De Vries et al., 2023). Η αυξημένη παραγωγή και εφαρμογή λιπασμάτων αζώτου, ενώ είναι απαραίτητη για την αποδοτικότητα των καλλιεργειών και την κάλυψη των αναγκών του πληθυσμού σε τρόφιμα, την ίδια στιγμή είναι παράγοντας εμφάνισης σημαντικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Από τη συνολική χρήση ορυκτών λιπασμάτων αζώτου, πολύ μικρό είναι το ποσοστό που καταλήγει να αξιοποιείται από τις καλλιέργειες, καθώς το μεγαλύτερο μέρος του χάνεται στο περιβάλλον μέσω της εξάτμισης αμμωνίας (NH₃), της νιτροποίησης, της έκπλυσης νιτρικών (NO₃⁻), της απονιτροποίησης και της απορροής (Lam et al., 2022).

3.4.2 Νιτροποίηση του εδάφους

Πέρα από το φαινόμενο του ευτροφισμού, οι γεωργικές δραστηριότητες που οδηγούν σε περίσσεια αζώτου στα εδάφη, μπορούν επίσης να προκαλέσουν νιτροποίηση του εδάφους. Πιο συγκεκριμένα, η νιτροποίηση είναι μία αερόβια διαδικασία κατά την οποία συγκεκριμένες ομάδες μικροοργανισμών (κυρίως βακτήρια), μετατρέπουν τις ενώσεις αμμωνίας (NH₃) σε νιτρικό άλας (NO₃⁻). Η νιτροποίηση διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη ρύθμιση της συγκέντρωσης του ανόργανου αζώτου στο έδαφος, στην έκπλυση νιτρικών αλάτων και στην παραγωγή υποξειδίου του αζώτου (N₂O), ενός πολύ σημαντικού αερίου του θερμοκηπίου (Barnard et al., 2005). Συνεπώς, η νιτροποίηση αυξάνει τον κίνδυνο ρύπανσης των υδάτων, αλλά και της ατμόσφαιρας, διαταράσσοντας παράλληλα τις ποσότητες αζώτου στα οικοσυστήματα και απειλώντας την ανθρώπινη υγεία και ασφάλεια.

3.5 Επιπτώσεις περίσσειας φωσφόρου (P)

Ενώ ο φώσφορος (P) αποτελεί απαραίτητο θρεπτικό συστατικό για την ανάπτυξη των φυτών, ταυτόχρονα η πολύ υψηλή συγκέντρωσή του στο έδαφος μπορεί να οδηγήσει σε αρνητικές επιπτώσεις για το έδαφος, την καλλιέργεια, καθώς και για τα υδάτινα οικοσυστήματα, οδηγώντας μέχρι και στο φαινόμενο του ευτροφισμού (Zhang et al., 2023). Με την ταχεία ανάπτυξη της παγκόσμιας ζήτησης τροφίμων, η εισροή χημικών λιπασμάτων με βάση το φώσφορο έχει σημειώσει τεράστια αύξηση και ιδιαίτερα όσον αφορά τα εντατικά γεωργικά συστήματα (Chen et al., 2022). Παράλληλα, η αλόγιστη εφαρμογή ζωικής κοπριάς στα γεωργικά εδάφη, μπορεί επίσης οδηγήσει σε υπερλίπανση από φώσφορο. Ως αποτέλεσμα, οι μεγάλες συγκεντρώσεις φωσφόρου στο έδαφος, καταλήγουν να προκαλούν κορεσμό του εδάφους, μειώνοντας έτσι την ικανότητα προσρόφησης του ως προς το φώσφορο, αλλά και τα άλλα θρεπτικά συστατικά και αυξάνοντας παράλληλα τον κίνδυνο απώλειας του φωσφόρου στα υδάτινα οικοσυστήματα (Pizzeghello et al., 2011).

3.6 Επιπτώσεις περίσσειας καλίου (K)

Παρότι, όπως αναφέρθηκε, οι μεγάλες συγκεντρώσεις του αζώτου και του φωσφόρου επιφέρουν σημαντικούς περιβαλλοντικούς κινδύνους και επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, η περίσσεια του καλίου στις γεωργικές καλλιέργειες οδηγεί σε λιγότερο σημαντικές συνέπειες. Ωστόσο, η διατήρηση του κατάλληλου επίπεδου συγκέντρωσης καλίου ανά καλλιέργεια, αποδίδει θετικά αποτελέσματα στην ανάπτυξη των φυτών και στην βελτίωση των λειτουργικών διαδικασιών που εκτελούνται, ενώ όταν η συγκέντρωση υπερβαίνει τα επιθυμητά όρια μπορεί να εμφανιστούν δυσλειτουργίες.

Πέρα από τις γενικότερες συνέπειες στον φυτικό μεταβολισμό, τα υψηλά ή χαμηλά επίπεδα καλίου, τείνουν να επηρεάζουν τους μηχανισμούς απορρόφησης αζώτου και νιτρικών. Σε περίπτωση τοξικότητας (περίσσειας) καλίου, ακόμα εμποδίζεται η αφομοίωση του άνθρακα και αναστέλλεται η φωτοχημική απόδοση, καθώς τα προϊόντα της φωτοσύνθεσης αδυνατούν να μεταφερθούν από τα φύλλα των φυτών στις ρίζες τους (Xu et al., 2020).

3.7 Ανακεφαλαίωση

Προκειμένου να είναι ομαλή η φυσιολογική και βιοχημική λειτουργία των φυτών, θα πρέπει να αφομοιώνονται οι κατάλληλες ποσότητες μικροθρεπτικών και μακροθρεπτικών συστατικών. Η τοξικότητα και η ανεπάρκεια σε θρεπτικά συστατικά, είναι ένα σύνηθες

φαινόμενο που χαρακτηρίζει τα εδάφη σε διάφορες περιοχές του κόσμου. Το φαινόμενο αυτό επιφέρει συνεπώς ποικίλες συνέπειες στις λειτουργικές διαδικασίες των φυτών και στην απόδοση των καλλιεργειών.

Η πρόσληψη και η αφομοίωση των θρεπτικών συστατικών, όπως φώσφορος, άζωτο και κάλιο, είναι βασικός παράγοντας για την αύξηση της παραγωγικότητας των καλλιεργειών. Είναι γεγονός, ότι τα οργανικά απόβλητα, περιέχουν μεγάλες ποσότητες θρεπτικών συστατικών, οι οποίες υπολογίζονται περίπου στα 22 εκατομμύρια Mg/έτος για το N και στα 1,3 εκατομμύρια Mg/έτος για το P. Συνεπώς, η ανάκτηση θρεπτικών συστατικών από τα στερεά και υγρά οργανικά απόβλητα, θα απασχολήσει ευρύτερα τη βιομηχανία λιπασμάτων και αποτελεί βιώσιμη επιλογή για την αντιμετώπιση των αυξανόμενων αναγκών.

Ωστόσο, οι αυξημένες ποσότητες θρεπτικών συστατικών και βαρέων μετάλλων, που προκύπτουν κυρίως από τις ανθρώπινες δραστηριότητες, αποτελεί βασικό κίνδυνο τόσο για την γεωργική και κτηνοτροφική παραγωγή, όσο και για την ανθρώπινη υγεία, αλλά και την υγεία όλων των ζώντων οργανισμών. Η αλόγιστη χρήση ορυκτών λιπασμάτων, αποτελεί έναν από τους βασικότερους λόγους υψηλών συγκεντρώσεων μετάλλων και θρεπτικών συστατικών. Τα εδάφη τα οποία χαρακτηρίζονται από διαρκή τροφοδότηση με κομπόστ, λυματολάσπη και βιοστερεά, τείνουν να συσσωρεύουν υψηλές ποσότητες θρεπτικών συστατικών, αυξάνοντας τον κίνδυνο εμφάνισης τοξικότητας (Fageria et al., 2002). Η λίπανση και η καλλιέργεια του εδάφους επίσης επηρεάζουν τη γονιμότητα του εδάφους λόγω της οξίνισης του εδάφους που προκαλείται από άζωτο και τη ρύπανση του εδάφους λόγω συσσώρευσης βαρέων μετάλλων.

Η γεωργική και κτηνοτροφική διαχείριση, συνεπώς, επηρεάζει άμεσα τη βιοποικιλότητα των χερσαίων και υδάτινων οικοσυστημάτων λόγω ευτροφισμού, την ποιότητα του πόσιμου νερού και το κλίμα (De Vries et al., 2023). Ως εκ τούτου, στόχος είναι να διατηρούνται οι κατάλληλες συγκεντρώσεις των βασικών θρεπτικών συστατικών στα εδάφη, ώστε να επιτυγχάνεται η ομαλή φυτική ανάπτυξη και η αποδοτική μακροπρόθεσμη παραγωγή. Συνεπώς, είναι απαραίτητη η μελέτη και εφαρμογή ορθότερων και πιο βιώσιμων πρακτικών διαχείρισης, ειδικά πρακτικών διαχείρισης της ζωικής κοπριάς και των γεωργικών λιπασμάτων, το οποίο συνεπάγει την απομάκρυνση ή την ανάκτηση των θρεπτικών συστατικών από τα απόβλητα, και μετέπειτα χρήση τους στην παραγωγή βιώσιμων λιπασμάτων. Τέλος, είναι κρίσιμο να αξιοποιούνται οι καινοτόμες και πολύπλευρες δυνατότητες της τεχνολογίας, ως προς την παρακολούθηση των συγκεντρώσεων των μακροθρεπτικών και μικροθρεπτικών

συστατικών που συναντώνται στα εδάφη, ώστε να παρέχονται στις καλλιέργειες οι αναγκαίες ποσότητες και το κατάλληλο είδος λίπανσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ανάκτηση Θρεπτικών Συστατικών

4.1 Εισαγωγή

Η εντατικοποίηση των γεωργικών συστημάτων δημιουργεί όλο και μεγαλύτερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο, καθώς οι υψηλές συγκεντρώσεις ζωικού κεφαλαίου σε συνδυασμό με τις αυξανόμενες απαιτήσεις τροφίμων, αυξάνουν τη διάθεση των παραγόμενων αποβλήτων οδηγώντας σε υποβάθμιση των φυσικών πόρων. Παράλληλα, η αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού, σε συνδυασμό με τις δυσμενείς κλιματικές και περιβαλλοντικές συνθήκες και τις προσπάθειες για υιοθέτηση περισσότερο βιώσιμων γεωργικών πρακτικών, ολοένα και δημιουργούν μεγαλύτερη ανάγκη χρήσης ανακτημένων θρεπτικών συστατικών για τη φυτική παραγωγή. Ως εκ τούτου, έχουν δημιουργηθεί εθνικοί και διεθνείς περιβαλλοντικοί κανονισμοί, με σκοπό τη μείωση των αποβλήτων, την προστασία του περιβάλλοντος και την ενίσχυση της κυκλικής οικονομίας (Dadrasnia et al., 2021).

Η αυξημένη εφαρμογή ορυκτών λιπασμάτων, προκαλεί συγκέντρωση μεγάλης ποσότητας θρεπτικών συστατικών και μπορεί να οδηγήσει σε ποικίλες ανεπιθύμητες επιπτώσεις, όπως επισημάνθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο. Παράλληλα, οι καλλιέργειες χρειάζονται τα θρεπτικά συστατικά για την αποτελεσματική ανάπτυξή τους. Ως συνέπεια, είναι απαραίτητο να διασφαλιστεί ότι η απελευθέρωση θρεπτικών συστατικών κατά την αποσύνθεση των οργανικών αποβλήτων, συγχρονίζεται με τις απαιτήσεις σε θρεπτικά συστατικά των καλλιεργειών (Rodríguez-Espinoza et al., 2023). Από τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες και την εφαρμογή ορυκτών λιπασμάτων, τα γεωργικά εδάφη και τα γεωργικά υπολείμματα που προκύπτουν, περιέχουν συχνά αυξημένες ποσότητες θρεπτικών συστατικών, που θα πρέπει να απομακρυνθούν ή να ανακτηθούν, έπειτα από κατάλληλη επεξεργασία. Συνεπώς, παρ' όλη την ύπαρξη των παραδοσιακών τεχνολογιών απομάκρυνσης των θρεπτικών συστατικών που εφαρμόζονται κατά την επεξεργασία των αποβλήτων, η έρευνα και έμφαση πλέον κατευθύνονται προς την υιοθέτηση αποτελεσματικών και καινοτόμων τεχνολογιών και μεθόδων για την ανάκτηση των θρεπτικών αυτών συστατικών αναμένοντας σε πολλά οφέλη για την καταπολέμηση παγκόσμιων προκλήσεων, τη διατήρηση μίας βιώσιμης παραγωγής λιπασμάτων και την υιοθέτηση ενός κυκλικού μοντέλου οικονομίας (Xie et al., 2016).

Γενικότερα, υπάρχουν σημαντικές δυνατότητες για τη χρήση γεωργικών και κτηνοτροφικών αποβλήτων σε επίπεδο εκμετάλλευσης για παραγωγή ενέργειας, βιοκαυσίμων και βιολιπασμάτων, συμβάλλοντας έτσι στην οικονομική και περιβαλλοντική βιωσιμότητα

(Pandey et al., 2019). Η εφαρμογή πρακτικών ανάκτησης θρεπτικών συστατικών μπορεί να συνεισφέρει στην ελαχιστοποίηση της ποσότητας των αποβλήτων, στην απομάκρυνση ρύπων, στην ανακύκλωση μη ανανεώσιμων θρεπτικών συστατικών (Zhang et al., 2023), στη μείωση της ανάγκης για ορυκτά λιπάσματα και στη δημιουργία ενός πιο βιώσιμου γεωργικού συστήματος. Ιδιαίτερα η ζωική κοπριά, αντιπροσωπεύει έναν πολύτιμο πόρο που εάν χρησιμοποιηθεί κατάλληλα με ελάχιστες απώλειες, μπορεί να αντικαταστήσει σημαντικές ποσότητες χημικών λιπασμάτων (Hjorth et al., 2010). Τεχνικές επεξεργασίας της κοπριάς, όπως είναι η αναερόβια χώνευση και η κομποστοποίηση, αποτελούν έως τώρα από τις περισσότερο διαδεδομένες μεθόδους, ωστόσο δεν εφαρμόζονται ακόμα σε αρκετά μεγάλη κλίμακα. Ο προσδιορισμός των καταλληλότερων τεχνολογιών ανάκτησης θρεπτικών συστατικών θεωρείται μία από τις βασικές προκλήσεις στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας, καθώς πολλές τεχνολογίες βρίσκονται ακόμα σε πειραματικό στάδιο και ακόμα αντιμετωπίζουν ζητήματα, όσον αφορά την ενεργειακή κατανάλωση, το κόστος και την αποδοτικότητά της ανάκτησης θρεπτικών συστατικών.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθούν οι κυριότερες μέθοδοι ανάκτησης θρεπτικών συστατικών από επεξεργασία και αξιοποίηση των παραγόμενων γεωργικών αποβλήτων, ενώ παράλληλα θα συζητηθούν και πιο καινοτόμες μέθοδοι οι οποίες φαίνεται να έχουν μεγάλες προοπτικές στην πιο αποτελεσματική ανάκτηση θρεπτικών συστατικών. Η αποτελεσματικότητα αυτή κρίνεται με βάση το ποσοστό ανακτημένων θρεπτικών συστατικών, αλλά και με βάση την ολική συνεισφορά της μεθόδου στη βιώσιμη ανάπτυξη και την κυκλική οικονομία, και από σκοπιά οικονομικού αλλά και ενεργειακού κόστους.

4.2 Προετοιμασία γεωργικών και κτηνοτροφικών αποβλήτων

Η προετοιμασία, ή προ-επεξεργασία των γεωργικών και κτηνοτροφικών αποβλήτων πριν από την ανάκτηση θρεπτικών συστατικών, είναι γενικά σημαντική για τη βελτιστοποίηση της αποδοτικότητας και της αποτελεσματικότητας της διαδικασίας ανάκτησης. Είναι απαραίτητο ορισμένα χαρακτηριστικά και ιδιότητες των αποβλήτων να διατηρούνται στο χρόνο, μέχρι να εφαρμοστεί η βασική μέθοδος επεξεργασίας και ανάκτησης συστατικών. Τα βήματα της προ-επεξεργασίας αυτής, μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με τον συγκεκριμένο τύπο αποβλήτων και τα διαφορετικά θρεπτικά συστατικά που χρειάζεται να ανακτηθούν σε κάθε περίπτωση.

Πέρα από τις μεθόδους προετοιμασίας των αποβλήτων, στη διαδικασία συνολικά συμπεριλαμβάνονται και ο τρόπος μεταφοράς αυτών, καθώς και ο τρόπος και οι συνθήκες

αποθήκευσής τους. Συνεπώς, είναι αναγκαίο να αναζητούνται οι καταλληλότερες και αποτελεσματικότερες μέθοδοι και διαδικασίες που αποσκοπούν στη μεγαλύτερη δυνατή εξοικονόμηση κόστους και ενέργειας, με παράλληλη διατήρηση των απαραίτητων χαρακτηριστικών των αποβλήτων. Για παράδειγμα, το κόστος για τη μεταφορά της ζωικής κοπριάς σε άλλα αγροκτήματα ή σε μονάδες επεξεργασίας, μπορεί να μειωθεί εάν προηγηθεί ο διαχωρισμός του ξηρού κλάσματος και του υγρού κλάσματος (Hjorth et al., 2010), καθώς το υγρό κλάσμα είναι αυτό που τυπικά περιέχει την υψηλότερη συγκέντρωση θρεπτικών συστατικών. Τεχνικές που χρησιμοποιούνται για το διαχωρισμό του στερεού και του υγρού κλάσματος, μπορεί να είναι τεχνικές όπως η καθίζηση, η φυγοκέντρωση και η διήθηση. Διαδικασίες προ-επεξεργασίας των αποβλήτων όπως η μείωση του μεγέθους ή η ομογενοποίηση, μπορεί επίσης να προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα στη διαδικασία ανάκτησης θρεπτικών συστατικών, που θα ακολουθήσει. Ανάλογα με τη μέθοδο ανάκτησης θρεπτικών συστατικών που θα εφαρμοστεί, μπορεί επίσης να είναι απαραίτητη η μείωση της περιεκτικότητας των αποβλήτων σε υγρασία. Οι διαδικασίες ξήρανσης ή αφυδάτωσης μπορούν να βοηθήσουν στη μείωση της υψηλής συγκέντρωσης σε υγρασία και στη διευκόλυνση και μείωση του κόστους μεταφοράς και αποθήκευσης.

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, η απευθείας εφαρμογή της κοπριάς ως λίπασμα, επιφέρει σημαντικές επιπτώσεις όπως εξάτμιση της αμμωνίας, μόλυνση του εδάφους και των υδάτων και έκπλυση θρεπτικών συστατικών. Συνεπώς, στην περίπτωση της απευθείας χρήσης της, ως λίπασμα – βελτιωτικό εδάφους, θα πρέπει να προηγηθεί επεξεργασία της ζωικής κοπριάς, ώστε να αφαιρεθούν οι επιβλαβείς και παθογόνοι μικροοργανισμοί και μέταλλα και να μειωθεί ο συνολικός της όγκος (Dadrasnia et al., 2021).

4.3 Βιολογικές Μέθοδοι Ανάκτησης Θρεπτικών Συστατικών

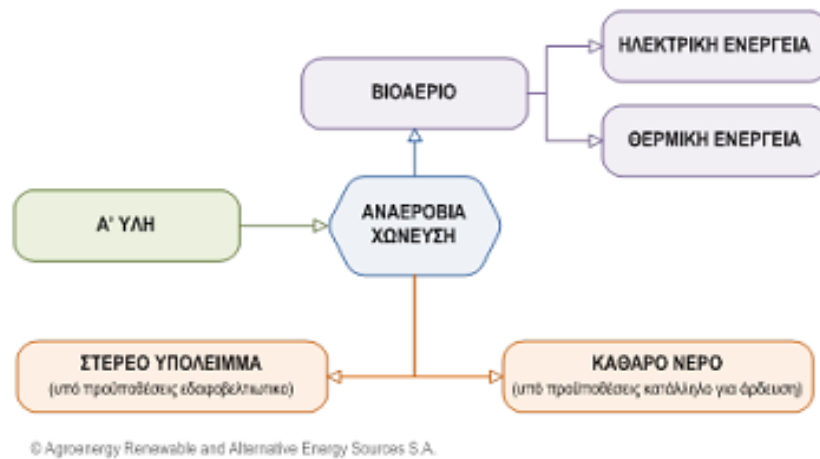
Οι βιολογικές μέθοδοι ανάκτησης θρεπτικών συστατικών, αποτελούν μεθόδους που βασίζονται σε βιολογικούς παράγοντες, όπως μικροοργανισμούς (π.χ. μικροφύκη) και φυτά, για τη φυσική επεξεργασία οργανικών αποβλήτων και ανάκτηση των πολύτιμων συστατικών. Οι βιολογικές μέθοδοι συνήθως είναι περισσότερο φιλικές προς το περιβάλλον, καθώς καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια και παράγουν λιγότερες εκπομπές, ωστόσο μπορεί να έχουν χαμηλότερη και πιο περιορισμένη αποδοτικότητα ανάκτησης θρεπτικών συστατικών και να απαιτούν περισσότερο χρόνο για την υλοποίησή τους, ενώ επιπλέον είναι δυσκολότερη η διατήρηση των κατάλληλων συνθηκών και ο έλεγχος των επιθυμητών παραγόμενων προϊόντων (τύπος και

ποσότητα ανακτημένων θρεπτικών συστατικών). Παρά τα μειονεκτήματα των βιολογικών μεθόδων επεξεργασίας των αποβλήτων, δίνεται μεγάλη έμφαση στην βελτιστοποίηση των μεθόδων αυτών και στην επέκταση της εφαρμογής τους, καθώς αποτελούν μία περισσότερο βιώσιμη επιλογή διαχείρισης των οργανικών αποβλήτων. Παρακάτω, αναλύονται ορισμένες από τις κύριες βιολογικές μεθόδους διαχείρισης αποβλήτων, που είτε εφαρμόζονται σε ευρύτερο επίπεδο, είτε εμφανίζουν πιο αυξημένη αποτελεσματικότητα ανάκτησης θρεπτικών συστατικών.

4.3.1 Αναερόβια Χώνευση

Η αναερόβια χώνευση είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για τη διαχείριση των οργανικών αποβλήτων και την παραγωγή βιοαερίου. Κατά τη συγκεκριμένη διαδικασία, χρησιμοποιείται πλήθος μικροοργανισμών, οι οποίοι αποσυνθέτουν τα οργανικά υλικά, σε συνθήκες απουσίας οξυγόνου, εντός του εγκλωβισμένου χωνευτήρα. Το τυπικό αέριο που παράγεται αποτελείται περίπου από 50% - 70% μεθάνιο (CH_4), 25% - 45% CO_2 , 0,5% - 3% N_2 και 1% - 10% H_2 , με ίχνη H_2S (Obi et al, 2016). Εκτός από την παραγωγή βιοαερίου, κατά τη μετατροπή της οργανικής ύλης αφήνεται ένα χωνεμένο υπόλειμμα πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά, όπως φώσφορο (P) και κάλιο (K). Το θρεπτικό αυτό υπόλειμμα μπορεί να εφαρμοστεί σε γεωργική γη ως βελτιωτικό εδάφους, καθώς βελτιώνει τα χαρακτηριστικά του εδάφους και προσδίδει σε αυτό πλήθος θρεπτικών συστατικών.

Στην αναερόβια χώνευση, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη παράμετροι της οργανικής ύλης όπως είναι η συγκέντρωση αμμωνίας (NH_3) και η περιεκτικότητα σε στερεό περιεχόμενο, υψηλά ποσοστά των οποίων μπορούν να οδηγήσουν σε αναστολή της διαδικασίας. Πιο συγκεκριμένα, η αυξημένη περιεκτικότητα σε στερεό περιεχόμενο, ενώ τείνει να μειώνει τον όγκο του αντιδραστήρα που απαιτείται, παράλληλα οδηγεί σε παραγωγή μειωμένης ποσότητας μεθανίου (CH_4) (Riya et al., 2021). Αναλόγως του τύπου της βιομάζας, δηλαδή εάν είναι στερεάς ή υγρής μορφής, χρησιμοποιείται και ο κατάλληλος αντιδραστήρας για την επεξεργασία της βιομάζας, ενώ επίσης και ο ιδανικός τρόπος μεταφοράς αυτής. Για παράδειγμα, η στερεά βιομάζα συνήθως μεταφέρεται μέσω οχήματος στη μονάδα συμπαραγωγής, ενώ για τη μεταφορά υγρής βιομάζας συνήθως γίνεται χρήση αντλιών και αγωγών, αφού πρώτα δεχτεί την απαραίτητη προ-επεξεργασία ομογενοποίησης (Envima, 2023).



Πηγή: <http://www.agroenergy.gr/>

Σχήμα 4.1 Διεργασία αναερόβιας χώνευσης

Συμπερασματικά, η μέθοδος ακόμα βρίσκεται αντιμέτωπη με πολλά ζητήματα, όπως για παράδειγμα το υψηλό κόστος κεφαλαίου, η αστάθεια της διαδικασίας και ο αφρισμός, τα οποία χρειάζονται ευρύτερη μελέτη και στρατηγικό σχεδιασμό (Xu et al., 2018). Ωστόσο, η αναερόβια χώνευση μπορεί να αποτελέσει μία πολύ αποδοτική, και φιλικότερη προς το περιβάλλον, μέθοδο στη διαχείριση των γεωργικών και κτηνοτροφικών αποβλήτων και ιδιαίτερα της ζωικής κοπριάς, ανακυκλώνοντας τα οργανικά απόβλητα σε ενέργεια και θρεπτικά συστατικά.

4.3.2 Κομποστοποίηση

Η κομποστοποίηση είναι η ρυθμιζόμενη βιοαποικοδόμηση (μεσολάβηση μικροβίων) οργανικών αποβλήτων, μέσω πολυάριθμων μικροοργανισμών. Κατά τη γεωργική αυτή πρακτική, η οργανική ύλη διασπάται σε μικρότερα βιοαποδομήσιμα συστατικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση της ανάπτυξης και της απόδοσης των καλλιεργειών. Οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται συχνότερα, για τη συγκεκριμένη διαδικασία είναι κυρίως φλοιοί, υπολείμματα φρούτων και λαχανικών, άχυρο, οικιακά οργανικά απόβλητα και απόβλητα εστίασης, καθώς και διάφορα είδη κοπριάς, ενώ οι μικροοργανισμοί που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως είδη μυκήτων, ακτινομυκήτων και βακτηριδίων, φύκια και πρωτόζωα. Ο ρυθμός της αποσύνθεσης εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως είναι η θερμοκρασία, η υγρασία, το μέγεθος των σωματιδίων, το pH και η αναλογία άνθρακα – αζώτου (C:N) (Koul et al., 2022). Μετά τη μικροβιολογική διεργασία που πραγματοποιείται κατά τη βιοαποικοδόμηση, το στερεό υπόλειμμα που απομένει, το χούμους ή αλλιώς κομπόστ, είναι

πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά και μπορεί να εφαρμοστεί ως οργανικό λίπασμα το οποίο συμβάλλει στην αύξηση της γονιμότητας του εδάφους.

Στην πραγματικότητα, υπάρχουν διάφορα είδη κομποστοποίησης, και πιο συγκεκριμένα συμβατικές μέθοδοι, όπως το vermicomposting (κομποστοποίηση με γαιοσκώληκες), η αερόβια κομποστοποίηση (κομποστοποίηση με μικροοργανισμούς, με παρουσία οξυγόνου), η αναερόβια κομποστοποίηση (κομποστοποίηση με μικροοργανισμούς, με απουσία οξυγόνου) και αναδυόμενες μέθοδοι, οι οποίες συνδυάζουν είδη συμβατικών μεθόδων σε μία ενιαία διαδικασία (Waqas et al., 2023). Η κομποστοποίηση είναι μία διαδικασία, που μπορεί να αντικαταστήσει άλλες μεθόδους διαχείρισης αποβλήτων, όπως την καύση και την απόρριψη σε χωράφια και χωματερές, καθώς είναι μία εύκολη και οικονομική διαδικασία, φιλική προς το περιβάλλον και αποτελεσματική στην ανάκτηση θρεπτικών συστατικών από τα οργανικά απόβλητα, μειώνοντας παράλληλα τον όγκο και την τοξικότητα των αποβλήτων αυτών. Ωστόσο, η μη ορθή υλοποίηση της διαδικασίας, καθώς και η χρήση ακατάλληλων πρώτων υλών, μπορούν να οδηγήσουν σε μη αποτελεσματικό και ωφέλιμο κομπόστ, μέχρι και σε αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Συνεπώς, η προετοιμασία και η αξιοποίηση, καθώς και το κομπόστ καθ' αυτό, πρέπει να ελέγχονται από διάφορους παράγοντες, ώστε η χρήση του να είναι αποδοτική και να λειτουργήσει ως ένα βιώσιμο υποκατάστατο των χημικών λιπασμάτων.

4.3.3 Επιφανειακή Επικάλυψη εδάφους

Η επικάλυψη του εδάφους ή αλλιώς εδαφοκάλυψη, αφορά την επίστρωση του εδάφους με ένα κάλυμμα οργανικών (όπως φύλλα και υπολείμματα καλλιεργειών) ή ανόργανων αποβλήτων (όπως χαλίκια και πλαστικά στρώματα και μεμβράνες) (Acharya et al., 2018). Η εδαφοκάλυψη με οργανικά γεωργικά απόβλητα, επιτυγχάνει τη διατήρηση της υγρασίας του εδάφους και βοηθά στην ανάπτυξη καλλιεργειών, όπως το σιτάρι, το καλαμπόκι, η πατάτα, κ.α., τα οποία ευνοούνται υπό υγρές συνθήκες (Koul et al., 2022). Συνεπώς, μπορεί να αποτελέσει εναλλακτική λύση σε ξηρές περιοχές, όπου χαρακτηρίζονται από υψηλότερες θερμοκρασίες και ελάχιστες βροχοπτώσεις. Ωστόσο, η συσσώρευση νερού κατά τις περιόδους έντονων βροχοπτώσεων οδηγεί στη δημιουργία αναερόβιου περιβάλλοντος, μη ευνοϊκού στην ανάπτυξη των καλλιεργειών. Πιο συγκεκριμένα, μπορεί να οδηγήσει σε απώλειες αζώτου και προσβολή από παράσιτα και μικροοργανισμούς που αποτελούν απειλή για την καλλιέργεια και επιβραδύνουν την ανάπτυξή της. Συνεπώς, για την εδαφοκάλυψη πρέπει να πραγματοποιείται

ειδική τοποθέτηση, ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες, τη σύνθεση του εδάφους και το είδος την καλλιέργειας.

Επιπροσθέτως, η επικάλυψη του εδάφους αποτρέπει το νερό από την εξάτμιση, διατηρώντας χαμηλότερα τα ποσοστά απώλειας νερού. Το εδαφικό περιβάλλον κάτω από το στρώμα επικάλυψης είναι ευνοϊκό για την παραγωγικότητα της καλλιέργειας και παράλληλα, αποτελεί μέσο προστασίας του εδάφους και της ίδιας της καλλιέργειας, καθώς εμποδίζει την ανάπτυξη ζιζανίων γύρω από αυτήν, ενισχύει τη συσσώρευση του εδάφους και προσδίδει ένα στρώμα θρεπτικών συστατικών, το οποίο δρα ως βελτιωτικό για το έδαφος, καθώς αυξάνει τον οργανικό του άνθρακα.

Για τις πολυετείς καλλιέργειες, είναι αποδοτικότερη η χρήση ενός οργανικού υλικού το οποίο είναι πιο ανθεκτικό στο χρόνο και αποσυντίθεται με πιο αργούς ρυθμούς. Η ταχύτητα αποσύνθεσης των οργανικών γεωργικών αποβλήτων, εξαρτάται από τη σύνθεσή τους, τις κλιματικές συνθήκες και τους διάφορους τύπους μικροοργανισμών, που βρίσκονται στο έδαφος. Το πάχος της επικάλυψης, είναι ακόμα ένας παράγοντας που επηρεάζει την αποτελεσματικότητα της επικάλυψης στην ανάπτυξη των καλλιεργειών.

Πέρα από τη χρήση φυλλωμάτων και υπολειμμάτων καλλιέργειας ως εδαφοκαλυπτικό, συχνά χρησιμοποιούνται και ανόργανα είδη, όπως πετρώματα, χαλίκια, πλαστικά καλύμματα και μεμβράνες. Η χρήση ανόργανων στρωμάτων εδαφοκάλυψης, μπορεί να μην προσδίδει θρεπτικά συστατικά στις καλλιέργειες, σε αντίθεση με τα οργανικά στρώματα, ωστόσο σε πολλές περιπτώσεις δρα προστατευτικά στο έδαφος συνεισφέροντας στη διατήρηση της απαραίτητης υγρασίας και θερμοκρασίας. Τα κατάλληλα επίπεδα θερμοκρασίας, επιτυγχάνονται κατά την απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας η οποία εξαρτάται από το χρώμα του πλαστικού καλύμματος. Ωστόσο, τα πλαστικά καλύμματα, συνεπάγον περιβαλλοντικό κόστος, καθώς μετά το πέρας της χρήσης τους πρέπει να απορριφθούν ή να ανακυκλωθούν, αυξάνοντας έτσι την ποσότητα πλαστικών αποβλήτων (Acharya et al., 2018).

4.3.4 Αναερόβια οξείδωση αμμωνίου (ANAMMOX)

Η διαδικασία της αναερόβιας οξείδωσης αμμωνίου, ή αλλιώς ANAMMOX, είναι μία διαδικασία συνδυασμού αναερόβιων και αερόβιων αντιδράσεων, που περιλαμβάνουν την παρουσία συγκεκριμένων ειδών βακτηρίων και στοχεύει στην απομάκρυνση ή ανάκτηση αζώτου από ροές αποβλήτων. Η διαδικασία ANAMMOX θεωρείται περισσότερο αποτελεσματική στην επεξεργασία αποβλήτων που είναι πλούσια σε άζωτο και αντικαθιστά τη

συμβατική τεχνολογία νιτροποίησης και απονιτροποίησης, καθώς ο ρυθμός απομάκρυνσης του αζώτου είναι υψηλότερος, διατηρώντας παράλληλα χαμηλότερο λειτουργικό και ενεργειακό κόστος και απαιτώντας μικρότερο όγκο αντιδραστήρων (Hasan et al., 2021). Κατά τη συγκεκριμένη διαδικασία, τα αυτότροφα βακτήρια ANAMMOX οξειδώνουν το διαθέσιμο αμμώνιο (NH_4) σε αέριο άζωτο (N) και νερό (H_2O), σε συνθήκες απουσίας οξυγόνου. Καθώς τα αναερόβια βακτήρια είναι αυτότροφα, η διεργασία ANAMMOX δεν απαιτεί εξωτερική πηγή άνθρακα, γεγονός που μειώνει έτσι την παραγωγή λάσπης, το λειτουργικό κόστος και τον αερισμό (Lin et al., 2019). Ωστόσο, η διαδικασία αναερόβιας οξείδωσης αμμωνίου, συνήθως συνδυάζεται με μία αερόβια διαδικασία συσσώρευσης απονιτροποιητικών φωσφορικών, για να ολοκληρωθεί η διαδικασία απομάκρυνσης αζώτου, κατά την οποία αερόβιοι μικροοργανισμοί οξειδώνουν το αμμώνιο σε νιτρικό άλας (NO_3^-) (Mirza et al., 2020). Συνεπώς, ο ταυτόχρονος συνδυασμός μίας αναερόβιας και αερόβιας διαδικασίας, απαιτεί τη διατήρηση των κατάλληλων συνθηκών για τα αναερόβια βακτήρια ANAMMOX, ώστε να επιτευχθεί η διαδικασία της οξείδωσης.

4.4 Φυσικοχημικές Μέθοδοι Ανάκτησης Θρεπτικών Συστατικών

4.4.1 Κρυστάλλωση φωσφορικών αλάτων

Η κρυστάλλωση φωσφορικών αλάτων αναφέρεται στη διαδικασία σχηματισμού στερεών κρυσταλλικών δομών φωσφορικών ενώσεων από ένα υγρό διάλυμα που περιέχει φωσφορικά ιόντα. Αυτή η διαδικασία χρησιμοποιείται συνήθως σε βιομηχανίες παραγωγής λιπασμάτων, ή σε μονάδες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων και στην επεξεργασία ορυκτών. Η κρυστάλλωση των φωσφορικών αλάτων συμβάλλει στην ανάκτηση του φωσφόρου από διάφορες πηγές, με σκοπό την παραγωγή προϊόντων φωσφόρου. Ο φώσφορος στο υγρό κλάσμα της κοπριάς ή του χωνεμένου υλικού, μπορεί να κατακρημνιστεί με την προσθήκη μαγνησίου, δημιουργώντας εναμμώνιο φωσφορικό μαγνήσιο ($\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), γνωστό ως στρουβίτης, ο οποίος αποτελεί ένα λίπασμα βραδείας αποδέσμευσης με βάση το φώσφορο (Mayer et al., 2016).

Κατά τη συγκεκριμένη μέθοδο, η χημική αντίδραση συμβαίνει μετά την προσθήκη ενός παράγοντα καθίζησης στο διάλυμα φωσφόρου. Πιο συγκεκριμένα, τα φωσφορικά ιόντα αντιδρούν με τα προστιθέμενα ιόντα για να σχηματίσουν στερεούς φωσφορικούς κρυστάλλους. Πιο συγκεκριμένα, η προσθήκη $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, ή MgO , ή MgSO_4 , οδηγεί σε κρυστάλλωση στρουβίτη, ενώ η προσθήκη $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ή Ca(OH)_2 οδηγεί στο σχηματισμό υδροξυαπατίτη ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$), δηλαδή μία μορφή ορυκτού φωσφορικού ασβεστίου. Στην αντίδραση

σχηματισμού υδροξυαπατίτη, ιόντα ασβεστίου (Ca^{2+}) και φωσφορικά ιόντα (PO_4^{3-}) συνδυάζονται με ιόντα υδροξειδίου (OH^-) (Śniatała et al., 2023b). Ο σχηματισμός υδροξυαπατίτη είναι ωστόσο πιο επιλεκτικός όσον αφορά την ανάκτηση φωσφόρου, σε αντίθεση με την περίπτωση της καθίζησης του στρουβίτη η οποία οδηγεί σε ανάκτηση φωσφόρου (P) και αμμωνίου (NH_4^+). Η κρυστάλλωση στρουβίτη μπορεί να αφαιρέσει πάνω από 80% του PO_4^{3-} και 25% του NH_4^+ από το υγρό διάλυμα, ενώ γενικότερα η αφαίρεση της περίσσειας θρεπτικών συστατικών οδηγεί σε ένα υπόλειμμα το οποίο είναι λιγότερο επιβλαβές για το περιβάλλον (Mayer et al., 2016). Η καθίζηση υδροξυαπατίτη μπορεί συνεπώς να χρησιμοποιηθεί για την απομάκρυνση του φωσφόρου από τα ρεύματα αποβλήτων, συμβάλλοντας έτσι στον μετριασμό του ευτροφισμού και της περιβαλλοντικής ρύπανσης. Παράγοντες όπως το pH, η αναλογία Mg:P, οι προστιθέμενες χημικές ουσίες, ο χρόνος αντίδρασης και η παρουσία Ca^{2+} , είναι παράγοντες που επηρεάζουν την κατακρήμνιση στρουβίτη ή αλλιώς την πυρήνωση, δηλαδή τον σχηματισμό των κρυσταλλικών ενώσεων.

Τα γεωργικά απόβλητα, όπως η ζωική κοπριά, τα υπολείμματα των καλλιεργειών ή τα υποπροϊόντα επεξεργασίας τροφίμων, συχνά περιέχουν σημαντικές ποσότητες φωσφόρου. Με τη μέθοδο της κρυστάλλωσης φωσφορικών αλάτων, ο διαθέσιμος φώσφορος μπορεί να ανακτηθεί και έπειτα να χρησιμοποιηθεί ως λίπασμα πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά ή ως βελτιωτικό του εδάφους, με απευθείας εφαρμογή σε γεωργικά χωράφια για την αναπλήρωση των επιπέδων φωσφόρου στο έδαφος, τη βελτίωση της γονιμότητας και την ανάπτυξη των καλλιεργειών. Η συγκέντρωση φωσφόρου στο ανακτηθέν προϊόν είναι συνήθως υψηλότερη από αυτή που περιέχεται στα αρχικά γεωργικά απόβλητα, καθιστώντας το μια πιο πλούσια πηγή θρεπτικών συστατικών.

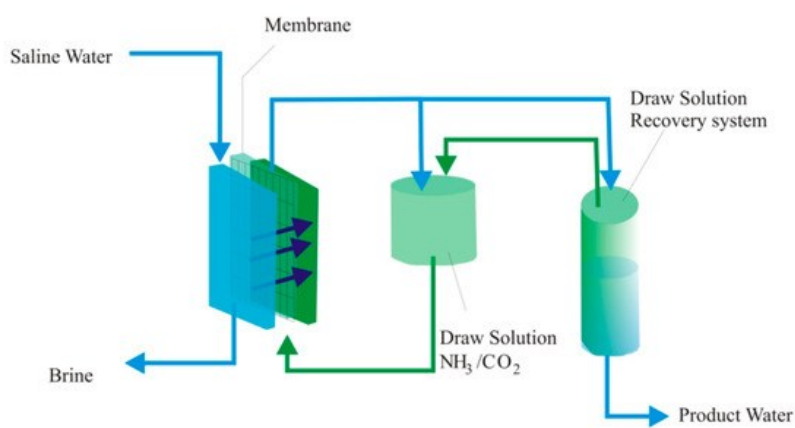
Γενικότερα, η μέθοδος της κρυστάλλωσης παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα, όπως τη δυνατότητα παραγωγής φωσφορικών αλάτων με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, όπως το μέγεθος του κρυσταλλικού προϊόντος, τη μορφολογία του και τη σύνθεσή του, με σκοπό να πληρούν συγκεκριμένες βιομηχανικές απαιτήσεις. Ακόμα, κατά τη συγκεκριμένη διαδικασία, παράγονται προϊόντα φωσφόρου υψηλής καθαρότητας, τα οποία μπορούν να αποτελέσουν λιπάσματα υψηλής απόδοσης. Ωστόσο, η μέθοδος εκτός από την πολυπλοκότητα και το λειτουργικό της κόστος, εστιάζει κυρίως στην ανάκτηση του φωσφόρου και όχι στην ανάκτηση άλλων θρεπτικών συστατικών, όπως άζωτο και κάλιο, που περιέχονται στα γεωργικά απόβλητα. Ως εκ τούτου, προκύπτει πως πρόσθετες διαδικασίες ή μέθοδοι θα πρέπει να εφαρμοστούν για την ανάκτηση των υπόλοιπων θρεπτικών συστατικών.

4.4.2 Διήθηση μεμβράνης

Η διήθηση μεμβράνης, ή αλλιώς φιλτράρισμα με χρήση μεμβράνης, είναι μια διαδικασία διαχωρισμού ουσιών που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάκτηση θρεπτικών συστατικών από τη ροή των υγρών αποβλήτων, συμπεριλαμβανομένων και των γεωργικών αποβλήτων. Για την αποτελεσματική εφαρμογή της μεθόδου, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη παράμετροι, όπως η χημική σύνθεση των αποβλήτων που υποβάλλονται σε επεξεργασία, καθώς και το μέγεθος των πόρων της μεμβράνης και η διαμεμβρανική πίεση. Αναλόγως του μεγέθους και του φορτίου των μορίων και του μεγέθους των πόρων της μεμβράνης, τα σωματίδια του συμπυκνώματος είτε διαπερνούν από τη μεμβράνη (όπως τα μόρια νερού), είτε παραμένουν στο συμπύκνωμα (Logan & Visvanathan, 2019). Διαφορετικές μεμβράνες χρησιμοποιούνται για την επίτευξη διαφορετικών σκοπών. Πιο συγκεκριμένα, οι μεμβράνες μικροδιήθησης και υπερδιήθησης εστιάζουν στην αφαίρεση σωματιδίων, ενώ οι μεμβράνες αντίστροφης όσμωσης και νανοδιήθησης μπορούν να εφαρμοστούν ως τεχνικές ανάκτησης θρεπτικών συστατικών, όπως φώσφορος, άζωτο και κάλιο, τα οποία εντοπίζονται στις ροές των υγρών αποβλήτων (Dadrasnia et al., 2021). Οι διεργασίες νανοδιήθησης και αντίστροφης όσμωσης παρότι είναι αρκετά αποτελεσματικές στην ανάκτηση θρεπτικών συστατικών, είναι παράλληλα επιρρεπείς σε ρύπανση της μεμβράνης, προκαλώντας μείωση της απόδοσης της διήθησης και της διάρκειας ζωής της μεμβράνης, περιορίζοντας με αυτόν τον τρόπο την αποτελεσματικότητα στην ανάκτηση θρεπτικών συστατικών. Το φαινόμενο αυτό συναντάται συχνότερα σε ρεύματα αποβλήτων με υψηλή περιεκτικότητα σε αιωρούμενα στερεά και ως εκ τούτου σε τέτοιες περιπτώσεις θα πρέπει τα απόβλητα να δέχονται προεπεξεργασία και η μεμβράνη να δέχεται τακτικούς καθαρισμούς. Το μειονέκτημα αυτό των μεθόδων, διεγείρει την ανάγκη για περαιτέρω έρευνα προς εύρεση πιο αποτελεσματικών τεχνικών. Ως εκ τούτου, τρεις αναδυόμενες διεργασίες μεμβράνης, η εμπρόσθια όσμωση, η απόσταξη μεμβράνης και η ηλεκτροδιάλυση (Xie et al., 2016), εξετάζονται και αξιολογούνται για μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα στην ανάκτηση θρεπτικών συστατικών, στον καθαρισμό του νερού και στο μετριασμό των προκλήσεων που αντιμετωπίζει η παραδοσιακή μέθοδος διήθησης μεμβράνης.

Για την τεχνική της εμπρόσθιας όσμωσης (Σχήμα 4.2) χρησιμοποιείται ημιπερατή μεμβράνη μεταξύ διαλυμάτων με διαφορετική συγκέντρωση και συγκεκριμένα ενός αραιού και ενός πιο συμπυκνωμένου διαλύματος (Ahmed et al., 2019b). Σε αντίθεση με τις άλλες τεχνικές όσμωσης, η εμπρόσθια όσμωση χρησιμοποιεί μια οσμωτική διαφορά πίεσης για να επιτρέψει

τη διείσδυση του νερού κατά μήκος της μεμβράνης. Ως αποτέλεσμα, η συγκεκριμένη μέθοδος είναι λιγότερο επιρρεπής σε ρύπανση της μεμβράνης. Επιπλέον, η εμπρόσθια όσμωση δείχνει παράλληλα να έχει υψηλότερη αποτελεσματικότητα στην ανάκτηση θρεπτικών συστατικών και κυρίως αμμωνίου και φωσφορικών αλάτων, από σχετικά πειράματα που έχουν υλοποιηθεί με τη χρήση διαλύματος θαλασσινού νερού. Ωστόσο, ιδιαίτερη έμφαση θα πρέπει να δοθεί στην επιλογή της μεμβράνης, όσον αφορά τη διαπερατότητά της αλλά και την επιλεκτικότητα της διαλυμένης ουσίας, παράγοντες οι οποίοι έχουν καθοριστικό ρόλο στην ανάκτηση θρεπτικών συστατικών μέσω της μεθόδου εμπρόσθιας όσμωσης (Xie et al., 2016).



Πηγή: <https://www.mdpi.com/>

Σχήμα 4.2 Διαδικασία της εμπρόσθιας όσμωσης

Η απόσταξη με μεμβράνη είναι μια θερμικά καθοδηγούμενη διεργασία η οποία επιτυγχάνει το διαχωρισμό των ουσιών των διαλυμάτων με τη βοήθεια της θερμότητας και δείχνει ως μία αρκετά αποτελεσματική μέθοδο στην ανάκτηση νερού και θρεπτικών συστατικών από υγρά απόβλητα. Πιο συγκεκριμένα, τα δύο διαλύματα διαχωρίζονται με μία υδρόφοβη, μικροπορώδη μεμβράνη με την κατάλληλη διαπερατότητα ώστε να μην επιτρέπει στο υγρό διάλυμα και τα θρεπτικά συστατικά να διεισδύσουν. Η αύξηση της θερμοκρασίας στο διάλυμα προς επεξεργασία, συνεπάγεται τη δημιουργία ατμών οι οποίοι διαχέονται στους πόρους της μεμβράνης και τη διαπερνούν ως καθαρό νερό. Ως αποτέλεσμα, η μέθοδος απόσταξης με μεμβράνη μπορεί να επιτύχει υψηλή ανάκτηση νερού από τα υγρά απόβλητα, καθώς και θρεπτικών συστατικών και αμμωνίας. Ωστόσο, διαφορετικές συνθέσεις υγρών αποβλήτων μπορούν να προκαλέσουν μόλυνση της μεμβράνης και συνεπώς του ανακτημένου υλικού, ενώ άλλες ουσίες μπορούν να οδηγήσουν σε διόγκωση των πόρων της μεμβράνης αυξάνοντας τη

διαπερατότητα από τα επιβλαβή συστατικά των αποβλήτων και μειώνοντας παράλληλα την αποτελεσματικότητα ανάκτησης θρεπτικών συστατικών. Για το λόγο αυτό, έμφαση δίνεται στην κατασκευή αποτελεσματικότερων και ανθεκτικότερων μεμβρανών με αυξημένο ποσοστό υδροφοβικότητας αυτών με σκοπό την αποτροπή αυτών των επιπτώσεων και την αύξηση της αποδοτικότητας της μεμβράνης (Xie et al., 2016).

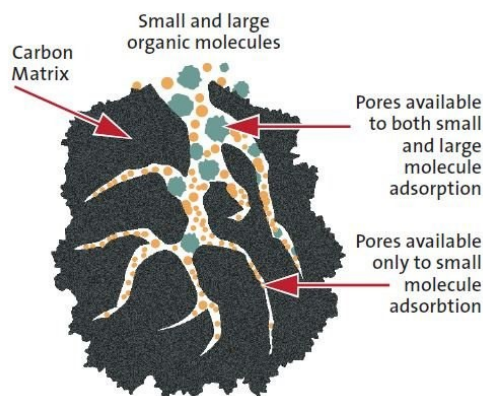
Ακόμα μία εναλλακτική μέθοδος διήθησης με μεμβράνη είναι αυτή της ηλεκτροδιάλυσης, η οποία συχνότερα εφαρμόζεται για βιομηχανική χημική σύνθεση και για τον καθαρισμό του νερού (Shi et al., 2020). Τελευταία, η ηλεκτροδιάλυση ερευνάται ως μία τεχνική ανάκτησης θρεπτικών συστατικών από υγρά απόβλητα μέσω του διαχωρισμού ιόντων (κατιόντων και ανιόντων). Κατά τη συγκεκριμένη μέθοδο, τα ιόντα μεταφέρονται κατά μήκος ειδικών μεμβρανών ανταλλαγής ιόντων υπό την επίδραση διαρκούς ηλεκτρικού πεδίου και διαχωρίζονται αναλόγως του φορτίου τους, μεταφέροντας τα θρεπτικά συστατικά, τα οποία και έτσι διαχωρίζονται από το καθαρό απόσταγμα. Η μέθοδος δείχνει αρκετά θετικά αποτελέσματα στην επιλεκτική ανάκτηση και συγκέντρωση θρεπτικών συστατικών συμπεριλαμβανομένου του αζώτου, του καλίου και του φωσφόρου, ενώ το ανακτημένο διάλυμα μπορεί να αξιοποιηθεί ως υγρό λίπασμα. Ωστόσο, απαιτείται ορθός σχεδιασμός του συστήματος εφαρμογής της και χρήση της μεμβράνης με το κατάλληλο κάθε φορά φορτίο, ώστε να αποφευχθεί η πιθανότητα ρύπανσης αυτής, ενώ ακόμα η συγκεκριμένη μέθοδος δείχνει μη συμφέρουσα όσον αφορά την ενεργειακή κατανάλωση και το υψηλό κόστος εφαρμογής της (Xie et al., 2016).

Συμπερασματικά, αν και η μέθοδος διήθησης μεμβράνης ευνοεί την ανάκτηση θρεπτικών συστατικών, μόνο μια περιορισμένη ποσότητα του χωνεμένου υπολείμματος τελικά θα μετατραπεί σε καθαρό νερό. Επιπλέον, η μέθοδος αποτελεί μία αρκετά δαπανηρή διαδικασία, καθώς απαιτεί σημαντική ποσότητα ενέργειας (Logan & Visvanathan, 2019) και ιδιαίτερα για διαδικασίες όπως η αντίστροφη όσμωση που λειτουργούν σε υψηλότερες πιέσεις. Ωστόσο, η μέθοδος της διήθησης μεμβράνης, πέρα από την αποτελεσματική ανάκτηση θρεπτικών συστατικών από τα απόβλητα, παρέχει τη δυνατότητα καθαρισμού του νερού, το οποίο μπορεί έπειτα να ανακυκλωθεί και να χρησιμοποιηθεί για άλλες δραστηριότητες, όπως είναι η άρδευση των καλλιεργειών, ευνοώντας έτσι το κυκλικό μοντέλο οικονομίας. Συνεπώς, ενώ η συγκεκριμένη μέθοδος εμφανίζει σημαντικές προοπτικές στην ανάκτηση θρεπτικών συστατικών και στην απομάκρυνση επικίνδυνων ρύπων από τις ροές των αποβλήτων, θα πρέπει να εξετασθεί περαιτέρω για την καταπολέμηση των διαφόρων προκλήσεων που τη συνοδεύουν,

διερευνώντας περισσότερο τις εναλλακτικές τεχνικές διήθησης (εμπρόσθια όσμωση, απόσταξη μεμβράνης, ηλεκτροδιάλυση).

4.4.3 Προσρόφηση και ανταλλαγή ιόντων

Η προσρόφηση είναι ακόμα μία μέθοδος που διερευνάται ως προς την αποτελεσματικότητά της στην ανάκτηση θρεπτικών συστατικών, κυρίως αζώτου και φωσφόρου, από τα απόβλητα. Γενικότερα, κατά τη μέθοδο προσρόφησης τα διάφορα συστατικά, οι ρύποι και τα μέταλλα που βρίσκονται στο διάλυμα που υποβάλλεται για καθαρισμό, προσκολλώνται σε ένα πορώδες υλικό, το προσροφητικό, με αποτέλεσμα η συγκέντρωσή τους στο διάλυμα να μειώνεται. Συνήθως, τα προσροφητικά που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν ενεργό υδρογονάνθρακα, φυσικούς και συνθετικούς ζεόλιθους, βιοκάρβουνο και φυσικά αργιλικά ορυκτά. Διαφορετικά προσροφητικά, εφαρμόζονται για διαφορετικούς τύπους αποβλήτων (Śniatała et al., 2023b), καθώς η ικανότητα προσρόφησης του καθορίζεται σημαντικά από τη δομή και τα χαρακτηριστικά τους, όπως από το μέγεθος της επιφάνειας και το μέγεθος και το σχήμα των πόρων και άλλες ιδιότητες του προσροφητικού (Rodríguez-Espinosa et al., 2023). Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζεται ενδεικτικά ένα ενεργοποιημένο φίλτρο άνθρακα, το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί στη μέθοδο προσρόφησης. Πρόσφατες μελέτες έδειξαν ότι ο μεσολίτης, ένας συνθετικά παραγόμενος ζεόλιθος, έχει υψηλή ικανότητα προσρόφησης αμμωνίας, ενώ η χρήση υβριδικών ρητινών ως προσροφητικό, εμφανίζουν αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα στην ανάκτηση φωσφόρου (Huang et al., 2020). Στην περίπτωση αφαίρεσης περίσσειας θρεπτικών συστατικών από τις καλλιέργειες, η χρήση βιοκάρβουνο αντί του ζεόλιθου, μπορεί να θεωρηθεί ως βέλτιστη επιλογή προσροφητικού, καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας σε γεωργικά εδάφη, χωρίς να πρέπει να προηγηθεί εκρόφηση (T. Xie et al., 2014).



Πηγή: <https://lahinchtaavernandgrill.com/the-benefits-of-an-active-charcoal-filter-improving-the-quality-of-air-and-water-in-your-home/>

Σχήμα 4.3 Ενεργοποιημένο φίλτρο άνθρακα για τη διαδικασία προσρόφησης

Παρόλο που ενώ η διαδικασία προσρόφησης (ειδικά με χρήση ενεργού άνθρακα) έχει πολύ υψηλά ποσοστά επιτυχίας στην προσρόφηση διαφόρων οργανικών ρύπων και συστατικών, δεν είναι κατάλληλη στην περίπτωση προσρόφησης μετάλλων και διαλυμένων ιόντων. Στην περίπτωση αυτή, η εφαρμογή της μεθόδου προσρόφησης ανταλλαγής ιόντων είναι η πλέον κατάλληλη (Karrī et al., 2018). Πιο ειδικά, κατά τη διαδικασία προσρόφησης με ιόντα, οι ουσίες αυτές και τα συστατικά, έλκονται και έπειτα προσκολλώνται στην επιφάνεια ενός στερεού και πορώδους προσροφητικού υλικού, συνήθως ιοντοανταλλακτικής ρητίνης, το οποίο είναι φορτισμένο με αντίθετο φορτίο από αυτό των θρεπτικών συστατικών που επιλέχθηκαν προς ανάκτηση.

Ωστόσο, για να ενισχυθεί η ικανότητα προσρόφησης ενός μέσου, χρειάζεται αυτό να αναγεννά τις ιδιότητές του, γεγονός που οδηγεί σε υψηλότερα λειτουργικά κόστη (Śniatała et al., 2023b), καθώς, ενδέχεται να απαιτεί πρόσθετους πόρους, όπως χημικά ή και ενέργεια. Κατά τη διάρκεια εφαρμογής της μεθόδου, είτε της προσρόφησης ή της ανταλλαγής ιόντων, το μέσο τείνει να φορτώνεται από τα προσκολλημένα συστατικά, μειώνοντας έτσι την ικανότητα απορρόφησής τους. Συνεπώς, το προσροφητικό θα πρέπει, αφού πρώτα καθαριστεί από τα προσκολλημένα συστατικά, να αναγεννάται περιοδικά, το οποίο επιτυγχάνεται με μεθόδους, όπως είναι η ρύθμιση του pH ή της θερμοκρασίας, η χρήση ατμού, η χρήση εκροφητικών υλικών και άλλες τεχνικές, οι οποίες εφαρμόζονται αναλόγως του προσροφητικού που χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση. Ιδιαίτερα, τα φορτισμένα προσροφητικά ανταλλαγής ιόντων, με την πάροδο του χρόνου και έπειτα από τις περιοδικές επαναφορτίσεις που

υφίστανται, καταλήγουν να χάνουν τις ιδιότητές τους και να πρέπει να απορριφθούν και να αντικατασταθούν πλήρως από ένα νέο προσροφητικό, γεγονός που αποτελεί σημαντική πρόκληση για τη διαδικασία (Karrī et al., 2018), καθώς οδηγεί σε υψηλότερα κόστη και δημιουργεί επιπλέον ποσότητες ανόργανων αποβλήτων. Ως εκ τούτου, για τις τεχνικές αναγέννησης των στερεών υλικών διεξάγονται περαιτέρω έρευνες και πειραματισμοί, ιδιαίτερα όσον αφορά τις ιδιότητες των προσροφητικών και τις διαδικασίες αναγέννησής του, με σκοπό να καταστεί η διαδικασία αναγέννησης πιο αποτελεσματική και βιώσιμη (Omorogie et al., 2014), απαλλάσσοντας τη διαδικασία από επιπλέον κόστη.

Γενικότερα, η μέθοδος προσρόφησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αφαίρεση και ανάκτηση του διαθέσιμου φωσφόρου ή του αζώτου στο διάλυμα αποβλήτων, αλλά δεν είναι αποτελεσματική και κατάλληλη στην περίπτωση ανάκτησης των θρεπτικών συστατικών υψηλής συγκέντρωσης, λόγω της περιορισμένης ικανότητας προσρόφησης του προσροφητικού υλικού (Zhang et al., 2023). Παρότι η προσρόφηση δεν έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων, η διαδικασία μπορεί να παρέχει σημαντικές δυνατότητες επιλεκτικής ανάκτησης και απομάκρυνσης θρεπτικών συστατικών και καλύτερη ποιότητα εκροών, εάν αντιμετωπιστούν οι βασικότερες προκλήσεις της και κυρίως το μειονέκτημα της περιορισμένης ικανότητας προσρόφησης του προσροφητικού υλικού, το οποίο συνεπάγεται αυξημένο κόστος της διαδικασίας.

4.4.4 Απογύμνωση Αμμωνίου

Η αμμωνία είναι ο πιο κοινός ρύπος που απορρίπτεται, κυρίως από τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες στα υδάτινα ρεύματα, με αποτέλεσμα η συγκέντρωση ανεπιθύμητων ποσοτήτων να προκαλεί υψηλή περιβαλλοντική ζημία και κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία (Karrī et al., 2018). Ως εκ τούτου, η απογύμνωση αμμωνίου (ammonium stripping), είναι ακόμα μία φυσικοχημική μέθοδος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απομάκρυνση και ανάκτηση αζώτου (N) από ρεύματα υγρών αποβλήτων, το οποίο στη συνέχεια μπορεί να αξιοποιηθεί σε χρήσιμα προϊόντα, όπως λιπάσματα. Η συγκεκριμένη διαδικασία ουσιαστικά απομακρύνει το άζωτο από τα ρεύματα αποβλήτων, μετατρέποντάς το ιόν αμμωνίου σε αέρια μορφή, δηλαδή σε αμμωνία (NH_3), η οποία διαχέεται στην επιφάνεια του διαλύματος και έπειτα μπορεί να απελευθερωθεί στον αέρα. Στη συνέχεια, η ανακτημένη αμμωνία μπορεί να απορροφηθεί από θειικό οξύ (H_2SO_4) σε μια μονάδα καθαρισμού αέρα, με σκοπό τη δημιουργία θειικού

αμμωνίου ((NH₄)₂SO₄) ως τελικό προϊόν (Śniatała et al., 2023b), το οποίο μπορεί να συντελέσει στην παραγωγή συμπυκνωμένου λιπάσματος, κατάλληλο για αλκαλικά εδάφη.

Η συγκεκριμένη μετατροπή, επιτυγχάνεται μέσω ρύθμισης του pH, το οποίο θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από 11. Παρόλα αυτά, η μέθοδος δεν μπορεί να ανακτήσει το διαθέσιμο φώσφορο (P) που υπάρχει στο διάλυμα, ακόμη και με υψηλές τιμές αλκαλικού pH (Shi et al., 2020), με αποτέλεσμα βάσει των τωρινών δεδομένων, να μην αποτελεί την καταλληλότερη μέθοδο για την ανάκτηση θρεπτικών συστατικών από τις ροές γεωργικών αποβλήτων. Ωστόσο, η τεχνολογία της απογύμνωσης αμμωνίου, μπορεί να φανεί αποτελεσματικότερη όταν συνδυάζεται με άλλες μεθόδους, όπως με τη διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης με την οποία επιτυγχάνει υψηλότερη οικονομική απόδοση για τη ρύθμιση της συγκέντρωσης της αμμωνίας στον χωνευτήρα (Dadrasnia et al., 2021).

Στον παρακάτω πίνακα αναφέρονται όλες οι μέθοδοι ανάκτησης θρεπτικών συστατικών που αναλύθηκαν πιο πάνω.

Πίνακας 4.1 Μέθοδοι ανάκτησης θρεπτικών συστατικών

Μέθοδος	Τύπος	Κύρια Εφαρμογή	Πηγή
Αναερόβια χώνευση	βιολογική	Παραγωγή ενέργειας, Ανάκτηση P, N, K	(Dadrasnia et al., 2021)
Κομποστοποίηση	βιολογική	Παραγωγή κομπόστ	
Αναερόβια οξειδωση αμμωνίου (ANAMMOX)	βιολογική	Απομάκρυνση/Ανάκτηση N	(Hasan et al., 2021)
Πυρόλυση	θερμοχημική	Παραγωγή βιοκάρβουνου (biochar)	(Lee et al., 2017)
Χημική Καθίζηση	φυσικοχημική	Απομάκρυνση/Ανάκτηση P	(Lin et al., 2019)
Κρυστάλλωση φωσφορικών αλάτων δημιουργία στρουβίτη	φυσικοχημική	Απομάκρυνση/Ανάκτηση P (σε μορφή κρυστάλλων)	(Johansson et al., 2018)
Διήθηση μεμβράνης	φυσικοχημική	Απομάκρυνση/Ανάκτηση P, N, K	(Dadrasnia et al., 2021)
Προσρόφηση και ανταλλαγή ιόντων	φυσικοχημική	Απομάκρυνση/Ανάκτηση P (σε στερεά μορφή – biochar)	(Hasan et al., 2021)
Απογύμνωση αμμωνίου	φυσικοχημική	Απομάκρυνση/Ανάκτηση N	(Kurniawan et al., 2021)

4.5 Ανακεφαλαίωση

Η υιοθέτηση μίας παγκόσμιας στρατηγικής ανάκτησης θρεπτικών συστατικών για την κάλυψη των περιβαλλοντικών, οικονομικών και συνολικών αναγκών της αγοράς, αποτελεί πλέον

βασικό στόχο, καθώς το άζωτο (N), ο φώσφορος (P) και το κάλιο (K) είναι κρίσιμα θρεπτικά συστατικά για την εντατική γεωργική παραγωγή, αλλά η μακροπρόθεσμη διαθεσιμότητά τους αποτελεί σημαντική ανησυχία για το μέλλον (Ahmed et al., 2019). Με βάση τα τωρινά δεδομένα, δεν έχει καθιερωθεί ποια μέθοδος ή τεχνολογία θεωρείται πιο αποτελεσματική και παράλληλα βιώσιμη, για την ανάκτηση θρεπτικών συστατικών από τα απόβλητα, συμπεριλαμβανομένων των γεωργικών αποβλήτων. Γενικότερα, η επιλογή της μεθόδου εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της ροής αποβλήτων, τις διαθέσιμες τεχνολογίες και τους επιθυμητούς στόχους ανάκτησης θρεπτικών συστατικών. Για τη δημιουργία λειτουργικών και αποδοτικών στρατηγικών για την επίτευξη των στόχων αυτών, απαιτείται έρευνα και αξιολόγηση αποτελεσματικών και βιώσιμων στρατηγικών που προάγουν την κυκλική οικονομία (Dadrasnia et al., 2021). Οι διάφορες μέθοδοι πρέπει να κρίνονται με βάση την κλίμακα των δαπανών εισροής, των λειτουργικών δαπανών και των δαπανών συντήρησης, των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που δύναται να προκαλούν, της διατήρησης της ασφάλειας (Karrī et al., 2018), του τελικού προϊόντος και του ποσοστού ανάκτησης θρεπτικών συστατικών. Πιθανότατα, συνδυαστική εφαρμογή των κατάλληλων μεθόδων να προσέδιδε υψηλότερα ποσοστά ανακτημένων συστατικών, ωστόσο κάτι τέτοιο θα πρέπει να διερευνηθεί περαιτέρω και κυρίως ως προς το οικονομικό και ενεργειακό κόστος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Ανακτημένα θρεπτικά συστατικά για παραγωγή λιπασμάτων

5.1 Εισαγωγή

Οι όλο και πιο περιορισμένοι πόροι του πλανήτη έχουν προκαλέσει μεγάλη ανησυχία ως προς την επισιτιστική ασφάλεια, ενώ η εξάντληση κρίσιμων πόρων όπως ο φώσφορος οδηγεί στην ανάγκη ανεύρεσης πηγών θρεπτικών συστατικών για την παραγωγή λιπασμάτων (Śniatała et al., 2023c) και την κάλυψη των μακροχρόνιων αναγκών της ανθρωπότητας. Ο γεωργικός και κτηνοτροφικός τομέας βρίσκονται στο επίκεντρο, καθώς αναζητούνται βιώσιμες λύσεις για την επίτευξη ενός παραγωγικού γεωργικού συστήματος, το οποίο θα βασίζεται στις αρχές ενός κυκλικού μοντέλου οικονομίας. Με αυτόν τον τρόπο, η έμφαση δίνεται σε καινοτόμες και αποτελεσματικές μεθόδους ανάκτησης θρεπτικών ουσιών από τα ρεύματα αποβλήτων. Ως εκ τούτου, έχει μεγάλη στρατηγική σημασία να αναλυθούν και να καθοριστούν οι κατάλληλες μέθοδοι επεξεργασίας των γεωργικών αποβλήτων για την προστασία του περιβάλλοντος και την αειφόρο ανάπτυξη της γεωργίας, των γεωργικών περιοχών και των γεωργικών εκμεταλλεύσεων (Mengqi et al., 2021b). Ζητούμενο είναι η μέγιστη δυνατή μείωση της ποσότητας οργανικών γεωργικών και κτηνοτροφικών αποβλήτων που απορρίπτεται στο περιβάλλον, μέσω της αξιοποίησης αυτών για την παραγωγή λιπασμάτων και τη βελτίωση της αποδοτικότητας των καλλιεργειών.

Οι αυξημένες απαιτήσεις σε τρόφιμα, συνεπάγονται την όλο και περισσότερο αυξημένη χρήση λιπασμάτων στις καλλιέργειες, με σκοπό τη γρηγορότερη και αποτελεσματικότερη φυτική παραγωγή. Παράλληλα, η υπερλίπανση των καλλιεργειών με ορυκτά λιπάσματα, αποτελεί απειλή για το περιβάλλον. Συνεπώς, για να μπορούμε να αναφερόμαστε σε ένα αειφόρο γεωργικό σύστημα, πέρα από την παραγωγή λιπασμάτων από ανακτημένα θρεπτικά συστατικά, είναι επίσης απαραίτητο να δοθεί έμφαση στην ορθή εφαρμογή αυτών, ώστε να παρέχονται οι αναγκαίες ποσότητες θρεπτικών συστατικών στις φυτικές καλλιέργειες και παράλληλα να εμποδίζεται η πιθανότητα εμφάνισης περιβαλλοντικών κινδύνων που απορρέουν από την αλόγιστη ή λανθασμένη χρήση των παραγόμενων λιπασμάτων.

Στο παρόν κεφάλαιο, θα προηγηθεί μία σύντομη επισκόπηση και ανάλυση της αγοράς και βιομηχανίας λιπασμάτων, ενώ στη συνέχεια θα διερευνηθεί εκτενέστερα η συνεισφορά της ανάκτησης θρεπτικών συστατικών, στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας. Στόχος του κεφαλαίου, είναι να προάγει προτάσεις προς περαιτέρω διερεύνηση, προωθώντας ένα

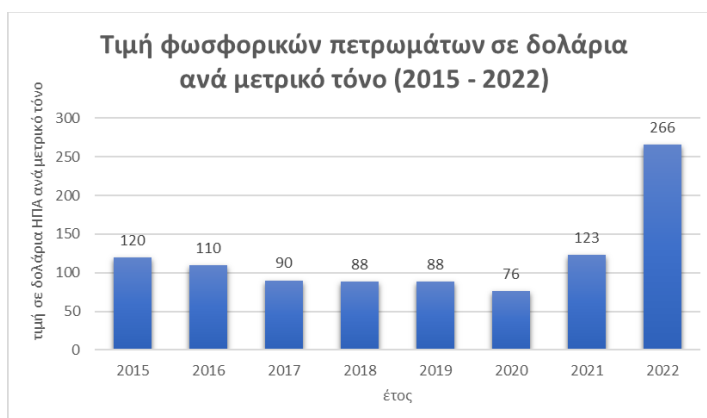
αποτελεσματικό και βιώσιμο μοντέλο γεωργικής παραγωγής, που θα προσδίδει αξία τόσο σε επίπεδο αγροκτήματος, όσο και στην παγκόσμια οικονομία.

5.2 Βιομηχανία και Αγορά Λιπασμάτων

Τα χημικά λιπάσματα είναι βιομηχανικά παρασκευασμένες ουσίες που αποτελούνται κυρίως από σταθερές ποσότητες μακροθρεπτικών συστατικών, δηλαδή αζώτου, φωσφόρου και καλίου (Itelima, 2018) οι οποίες είναι απαραίτητες για τις καλλιέργειες και για τη βελτίωση της γεωργικής παραγωγής (Śniatała et al., 2023c). Η εφαρμογή λιπασμάτων, είναι αναγκαία για να καλυφθεί η παγκόσμια ζήτηση σε τρόφιμα, ενώ η απουσία τους θα επέφερε σημαντικές ελλείψεις στην παραγωγή τους και θα οδηγούσε μέχρι και σε αύξηση της πείνας. Η βιομηχανία λιπασμάτων στην ουσία αποτελείται από ολόκληρη την αλυσίδα εφοδιασμού, δηλαδή από την παραγωγή, τη διανομή, έως και τη λιανική (The Fertilizer Institute, 2023). Η αγορά επικεντρώνεται γύρω από την παραγωγή λιπασμάτων με βάση το άζωτο, το φώσφορο και το κάλιο, τα οποία είναι τα κύρια μακροθρεπτικά συστατικά για την ανάπτυξη των φυτών. Τα λιπάσματα με βάση το άζωτο (N), ωστόσο, καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος της ζήτησης, με τη μέση παγκόσμια ζήτηση αζωτούχων λιπασμάτων από το 2012 έως το 2023 να είναι περίπου το 58% της συνολικής παγκόσμιας ζήτησης λιπασμάτων με βάση τα κύρια μακροθρεπτικά συστατικά (Statista, 2023). Παράλληλα, η ετήσια παραγωγή αμμωνίας (NH₃) κυμαίνεται περίπου στους 160 εκατομμύρια τόνους, με περίπου το 80% αυτής να χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή λιπασμάτων (Faria, 2021). Με βάση τα στατιστικά δεδομένα, στις αρχές της δεκαετίας του 2000 η παγκόσμια παραγωγή λιπασμάτων με βάση το άζωτο ανερχόταν σε περίπου 95 εκατομμύρια μετρικούς τόνους, ενώ μέχρι το 2019, σημειώθηκε αύξηση σε περίπου 123 εκατομμύρια τόνους, πριν αρχίσει πάλι να μειώνεται φτάνοντας τους 118.55 εκατομμύρια μετρικούς τόνους το 2021. Αύξηση παρατηρήθηκε επίσης στην παραγωγή φωσφορικών λιπασμάτων από περίπου 38 εκατομμύρια μετρικούς τόνους το 2005, σε πάνω από 48 εκατομμύρια μετρικούς τόνους το 2021, ενώ παρόμοια αύξηση παρατηρήθηκε και στην παραγωγή λιπασμάτων καλίου.

Παρά το γεγονός ότι η εφαρμογή λιπασμάτων είναι αναγκαία βάσει των συνθηκών του αυξανόμενου πληθυσμού και της ανάγκης παραγωγής τροφίμων, η εκτεταμένη εφαρμογή τους στις καλλιέργειες συνεπάγει πλήθος περιβαλλοντικών συνεπειών. Η παγκόσμια κατανάλωση σε λιπάσματα το 2020 παρατηρείται αυξημένη κατά 32% σε σχέση με το 2000, ξεπερνώντας τους 200 εκατομμύρια μετρικούς τόνους, με την Κίνα να αποτελεί τον μεγαλύτερο καταναλωτή

λιπασμάτων στον κόσμο (Statista, 2023). Οι επιπτώσεις των ορυκτών ή χημικών λιπασμάτων στη γονιμότητα του εδάφους αφορούν κυρίως τη συμπεριφορά του αζώτου (N) και του φωσφόρου (P) στο έδαφος, καθώς αυτά αποτελούν τα κύρια θρεπτικά συστατικά που περιορίζουν τις αποδόσεις των καλλιεργειών και επίσης προκαλούν ιδιαίτερη ανησυχία για την ποιότητα του περιβάλλοντος, καθώς μεγάλες ποσότητές τους καταλήγουν σε υδάτινα ρεύματα, προκαλώντας ευτροφισμό. Η περιεκτικότητα των μακροθρεπτικών συστατικών στα λύματα που προέρχονται από λιπάσματα, υπολογίζεται σε περίπου 22 εκατομμύρια μετρικούς τόνους αζώτου το χρόνο και 1,3 εκατομμύρια μετρικούς τόνους το χρόνο σε φώσφορο (Śniatała et al., 2023c), ζήτημα που αιτιολογεί την ανάγκη για άμεση αξιοποίηση της διαθέσιμης αυτής ποσότητας θρεπτικών συστατικών. Παράλληλα, η τιμή του φωσφόρου έχει σημειώσει σημαντική αύξηση τα τελευταία έτη και ιδίως το 2022 με πάνω από τη διπλάσια τιμή σε σχέση με το 2021, όπως φαίνεται και στο Γράφημα 5.1, γεγονός που οφείλεται στη πεπερασμένη διαθέσιμη ποσότητα και την υψηλή ζήτηση του ορυκτού πόρου.



Πηγή: <https://www.statista.com/>

Γράφημα 5.1 Τιμή φωσφορικών πετρωμάτων σε δολάρια ΗΠΑ ανά μετρικό τόνο (2015 – 2022)

Συνεπώς, η περιορισμένη αυτή ποσότητα των θρεπτικών συστατικών στα εδάφη, σε συνδυασμό με τις σοβαρές επιπτώσεις της περίσσειας των συστατικών αυτών στο περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία, τα τελευταία έτη ωθεί τις βιομηχανίες λιπασμάτων στην αναζήτηση εναλλακτικών πηγών ανάκτησης των περιορισμένων αυτών πόρων, για την ενίσχυση της παραγωγής λιπασμάτων μακροπρόθεσμα και παράλληλα στη δημιουργία οργανικών λιπασμάτων, τα οποία θα είναι πιο φιλικά και λιγότερο ζημιογόνα προς το περιβάλλον.

Η βιομηχανία λιπασμάτων ήδη επενδύει σημαντικά σε Έρευνα και Ανάπτυξη, με σκοπό την αναζήτηση και προώθηση καινοτόμων προϊόντων και τεχνολογιών που θα επιτύχουν να βελτιώσουν τη διαδικασία λίπανσης των καλλιεργειών, χωρίς παράλληλα να επιβαρύνεται το περιβάλλον και η ανθρώπινη υγεία. Ως εκ τούτου, μεγάλη έμφαση έχει τελευταία δοθεί σε εφαρμογή λιπασμάτων ενισχυμένης απόδοσης (Enhanced Efficiency Fertilisers - EEF), τα οποία προσδίδουν σημαντικά οφέλη μέσω της ελαχιστοποίησης της απώλειας σε άζωτο, επιτυγχάνοντας έτσι διατήρηση της παραγωγικότητας. Ωστόσο, παρά τις σημαντικές προοπτικές που έχει η συνδυαστική εφαρμογή των λιπασμάτων ενισχυμένης απόδοσης με τα ορυκτά λιπάσματα, ακόμα τα EEF αποτελούν λιγότερο προτιμώμενη επιλογή, λόγω του υψηλότερου κόστους τους. Στην πραγματικότητα, ωστόσο, είναι αναγκαίο να κατανοηθεί πως το κόστος της κοινωνικής και περιβαλλοντικής ζημίας, που οφείλεται στις εκροές θρεπτικών συστατικών και στην εκτεταμένη χρήση ορυκτών λιπασμάτων, είναι σημαντικά υψηλότερο (Lam et al., 2022).

5.3 Βιολιπάσματα

Η εκτεταμένη χρήση των ορυκτών λιπασμάτων, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που συνεπάγονται και παράλληλα οι περιορισμένες συγκεντρώσεις των θρεπτικών συστατικών, σε συνδυασμό με το αυξημένο κόστος παραγωγής, όπως αναφέρθηκε έχουν οδηγήσει στην ανάγκη εύρεσης εναλλακτικών στρατηγικών μεθόδων, φιλικότερων ως προς το περιβάλλον για τη βιώσιμη ενίσχυση της παραγωγικότητας των καλλιεργειών. Τέτοιες μέθοδοι, για παράδειγμα, αποτελούν η λίπανση ακριβείας, η εφαρμογή διαχωρισμένης ή τοπικής λίπανσης, η λίπανση μέσω συστημάτων άρδευσης και η χρήση βιολιπασμάτων ή οργανικών λιπασμάτων (Jiao et al., 2018). Ιδιαίτερη έμφαση έχει συνεπώς δοθεί στην αναζήτηση αποτελεσματικής εφαρμογής φιλικών προς το περιβάλλον λιπασμάτων, όπως βιολιπασμάτων, για τη βελτιωμένη γεωργική παραγωγή και την ταυτόχρονη διατήρηση της υγείας του εδάφους και εξασφάλιση της βιωσιμότητας.

Συχνά ο όρος «βιολίπασμα» συγγέεται με τον όρο «οργανικό λίπασμα», ενώ στην ουσία, τα βιολιπάσματα είναι οργανικά λιπάσματα με τη διαφορά ότι περιέχουν μικροβιακά στελέχη (όπως βακτήρια, μύκητες, συμβιωτικούς μικροοργανισμούς κ.λπ.), με σκοπό την αφομοίωση και παροχή θρεπτικών συστατικών στις καλλιέργειες (Jaffri et al., 2021). Αναλόγως του τύπου καλλιέργειας και της ανάγκης συγκεκριμένων θρεπτικών συστατικών, εφαρμόζονται τα βιολιπάσματα με τους κατάλληλους μικροβιακούς παράγοντες που μπορούν και

προσλαμβάνουν τα απαραίτητα συστατικά και τα παρέχουν έπειτα στη φυτική καλλιέργεια σε διαλυτή μορφή. Πιο συγκεκριμένα, οι μηχανισμοί πρόσληψης μπορούν να αναφέρονται στη δέσμευση του αζώτου, στη διαλυτοποίηση του φωσφόρου ή του καλίου, ή και άλλων μακροθρεπτικών και μικροθρεπτικών συστατικών ή και παραγωγή διάφορων ενζύμων (Singh et al., 2021). Τα θρεπτικά συστατικά αποδεσμεύονται βραδέως από τα βιολιπάσματα, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται σταθερή συγκέντρωσή τους στο έδαφος, εξαλείφοντας τον κίνδυνο υπερλίπανσης και περίσσειας θρεπτικών συστατικών στα εδάφη και στα υδάτινα σώματα (Itelima, 2018).

Συνεπώς, τα βιολιπάσματα μπορούν να αποτελέσουν σημαντικό κομμάτι ενός ολοκληρωμένου συστήματος διαχείρισης θρεπτικών συστατικών, καθώς δρουν ανακυκλώνοντας τα διαθέσιμα θρεπτικά συστατικά, διατηρώντας τις απαραίτητες ποσότητες αυτών στο έδαφος και εξασφαλίζοντας τη μακροπρόθεσμη γονιότητά του (Singh et al., 2021). Με αυτόν τον τρόπο, αποτρέπουν από την εκχύλιση θρεπτικών συστατικών στο έδαφος, μειώνοντας έτσι τον κίνδυνο επιμολύνσεων του περιβάλλοντος (Jiao et al., 2018) και εμφάνισης ευτροφισμού στα υδάτινα οικοσυστήματα. Πέρα από τη συμμετοχή στον κύκλο αφομοίωσης θρεπτικών συστατικών από τις φυτικές καλλιέργειες, ορισμένοι μικροοργανισμοί που χρησιμοποιούνται στα βιολιπάσματα, μπορούν επίσης να αποτρέψουν από την τοξικότητα του εδάφους και να συμβάλλουν στην αποικοδόμηση χημικών ουσιών, που εντοπίζονται σε αυτό (Jaffri et al., 2021). Τα βιολιπάσματα έχουν σημαντικές δυνατότητες στη διατήρηση της επισιτιστικής ασφάλειας και της βιοποικιλότητας του εδάφους, καθώς μπορούν να παρέχουν ενισχυμένη προστασία στα συστατικά και στους μικροοργανισμούς που είναι κρίσιμοι για την ανάπτυξη των καλλιεργειών και την προστασία τους από πλήθος απειλών και ασθενειών (Itelima, 2018).

Παρά το γεγονός ότι τα βιολιπάσματα διαθέτουν σημαντικές δυνατότητες στην ενίσχυση της αειφόρου γεωργίας και της βιώσιμης παραγωγής τροφίμων, βρίσκονται ακόμα αντιμέτωπα με προκλήσεις, που αποτελούν τροχοπέδη στην καθιέρωσή τους ως βέλτιστη επιλογή για την κάλυψη των αυξημένων απαιτήσεων του ανθρώπινου πληθυσμού. Πιο συγκεκριμένα, τα βιολιπάσματα διαθέτουν χαμηλότερη περιεκτικότητα σε θρεπτικά συστατικά συγκριτικά με τα περισσότερα χημικά λιπάσματα, γεγονός που αποτελεί περιοριστικό παράγοντα στην αποδοτικότητά τους ως προς την παραγωγικότητα των καλλιεργειών. Επιπλέον, ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δίνεται στο μέρος και στον τρόπο αποθήκευσής τους, με παράλληλη διατήρηση των κατάλληλων θερμοκρασιών φύλαξης, αποφεύγοντας αυστηρά την έκθεσή τους

στον ήλιο και σε υψηλές θερμοκρασίες (Itelima, 2018). Με βάση τις πρόσφατες μελέτες και δοκιμές, υποστηρίζεται ότι η συνδυαστική χρήση βιολιπασμάτων με τα χημικά λιπάσματα, μπορεί να επιφέρει περισσότερο βελτιωμένα αποτελέσματα, καθώς έτσι αυξάνεται η αποδοτικότητα των βιολιπασμάτων και την ίδια στιγμή μειώνονται οι αρνητικές επιπτώσεις που προκύπτουν από τη χρήση των ορυκτών λιπασμάτων. Επιπροσθέτως, θετικά αποτελέσματα μπορεί να παρουσιάζει η ενίσχυση του βιολιπασματος με προσθήκη συγκεκριμένων οργανικών αποβλήτων, που περιέχουν ποσότητες θρεπτικών συστατικών (Itelima, 2018). Η εναλλακτική αυτή, να μεν απαιτεί περαιτέρω μελέτη και συνυπολογίζει τις ανάγκες της καλλιέργειας, μέσω ανάλυσης του εδάφους, αλλά παράλληλα προωθεί το κυκλικό μοντέλο οικονομίας, καθώς μπορεί να αξιοποιεί σημαντικές ποσότητες των γεωργικών ή κτηνοτροφικών αποβλήτων. Ωστόσο, για να ενισχυθεί η αποτελεσματικότητα εφαρμογής των βιολιπασμάτων και ταυτοχρόνως η βιώσιμη γεωργία, χρειάζεται να υιοθετηθούν από τους γεωργούς οι κατάλληλες στρατηγικές λίπανσης των καλλιεργειών με, φιλικές προς το περιβάλλον, μεθόδους. Σημαντικό είναι να παρέχεται η κατάλληλη εκπαίδευση και ενημέρωση των γεωργών, ως προς τις συνέπειες της αυξημένης χρήσης ορυκτών λιπασμάτων και τα οφέλη και τρόπο εφαρμογής και αποθήκευσης των βιολιπασμάτων. Όλα τα παραπάνω, θα επωφελούνται από την αξιοποίηση των συστημάτων έξυπνης γεωργίας, η οποία συμβάλει στην ευρύτερη και ακριβέστερη κατανόηση των καλλιεργειών, με σκοπό την ορθή χρήση του κατάλληλου λιπάσματος και την αποτροπή από τυχόν περιβαλλοντικούς κινδύνους.

5.4 Η ανάκτηση θρεπτικών συστατικών για την ενίσχυση της κυκλικής Οικονομίας και της βιώσιμης ανάπτυξης

5.4.1 Ανάκτηση θρεπτικών συστατικών και βιώσιμη ανάπτυξη

Η κλιματική αλλαγή, οι ενεργειακές και οι οικονομικές προκλήσεις και η διαρκής αύξηση του πληθυσμού και συνεπώς της ανάγκης παραγωγής τροφίμων, θέτουν το ζήτημα της επισιτιστικής ασφάλειας στο επίκεντρο. Παράλληλα, γίνονται προσπάθειες για την επίτευξη των 17 στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης του ΟΗΕ, ενώ η τρέχουσα κατάσταση γεννά επιπλέον δυσκολίες στην επίτευξη των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης (ΣΒΑ) και συγκεκριμένα του στόχου 2 «Μηδενική Πείνα» και στόχου 12 «Υπεύθυνη κατανάλωση και παραγωγή». Λόγω της ανάγκης για ενίσχυση της παραγωγής τροφίμων, η παγκόσμια εξάρτηση από τα ορυκτά λιπάσματα ολοένα και αυξάνεται, προκειμένου να καλύψει την παγκόσμια ζήτηση σε τρόφιμα (Śniatała et al., 2023b). Ωστόσο, η σταδιακή εξάντληση των ορυκτών πόρων, ιδίως του φωσφόρου, που απαιτούνται για τη διατήρηση της γεωργικής παραγωγικότητας και

τροφοδότησης του αυξανόμενου πληθυσμού, αποτελεί κρίσιμη απειλή για την παραγωγή τροφίμων και άρα για τη μακροχρόνια διατήρηση της ανθρώπινης ζωής και βιώσιμης ανάπτυξης. Ως εκ τούτου, τα επόμενα έτη έμφαση θα δοθεί σε στην υιοθέτηση βιώσιμων γεωργικών πρακτικών, με την παραγωγή τροφίμων να βασίζεται μέσα από ένα κυκλικό μοντέλο οικονομίας, όπου θα συνεισφέρει στη διατήρηση των σημαντικών πόρων. Η ανάκτηση του φωσφόρου από τα απόβλητα που είναι εμπλουτισμένα με φωσφορικά άλατα και η αξιοποίησή του στην παραγωγή λιπάσματος, θα μπορούσε να μετριάσει τις σοβαρές επιπτώσεις που μπορεί να προκαλέσει η πεπερασμένη διαθέσιμη ποσότητα του ορυκτού πόρου. Σε αυτό το σημείο είναι φανερό, πως η αναζήτηση και εφαρμογή των κατάλληλων μεθόδων ανάκτησης θρεπτικών συστατικών από τα οργανικά αστικά και γεωργικά απόβλητα και λύματα, αποτελεί ύψιστης σημασίας για την ενίσχυση των καλλιεργειών και για το μετριασμό του ζητήματος της έλλειψης ορυκτών λιπασμάτων και της επισιτιστικής ασφάλειας.

Τα τελευταία χρόνια, η ανθεκτικότητα της αλυσίδας εφοδιασμού τροφίμων δοκιμάζεται σοβαρά, αντιμετωπίζοντας κρίσιμες απειλές από τις διαταραχές που προκαλούνται από τις κλιματικές επιπτώσεις στην Ευρώπη (Keuter et al., 2021). Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει αναθεωρήσει για τη λίστα των κρίσιμων πρώτων υλών (Critical raw materials) που είχε αναπτύξει το 2014, και έχει προχωρήσει σε αναδιαμόρφωση της λίστας αυτής, καθώς και σε ανάπτυξη ενός στρατηγικού σχεδίου με στόχο τον μετριασμό των κινδύνων εφοδιαστικής αλυσίδας και την εξασφάλιση της ασφαλούς και βιώσιμης πρόσβασης στις κρίσιμες πρώτες ύλες. Ορυκτοί πόροι, όπως τα φωσφορικά πετρώματα που είναι απαραίτητα για τη γεωργική παραγωγή, συναντώνται στη λίστα των κρίσιμων πρώτων υλών (Ανακτήθηκε από: <https://single-market-economy.ec.europa.eu/>), όπου πρέπει να τεθούν υπό προστασία και αποτελεσματική αξιοποίηση, μέσα από ένα σχέδιο κυκλικότητας. Επομένως, η πράξη αποσκοπεί στην αύξηση της ανθεκτικότητας της Ευρωπαϊκής Ένωσης, μέσω της μείωσης της εξάρτησης από τις κρίσιμες πρώτες ύλες, της μείωσης των εισαγωγών τους από τρίτες χώρες και της προώθησης της βιωσιμότητας και της κυκλικότητας στην αλυσίδα εφοδιασμού. Ως εκ τούτου, προκύπτει πως η εφαρμογή ενός στρατηγικού σχεδίου αξιοποίησης των οργανικών αποβλήτων προς ανάκτηση διαθέσιμης ποσότητας φωσφόρου, θα είναι πλέον απαραίτητη στη συμμόρφωση με το νόμο των κρίσιμων πρώτων υλών και στην επίτευξη των παραπάνω στόχων, καθώς η ανακύκλωση των πρώτων υλών θα αποτελεί παράλληλα ένα βασικό κομμάτι του νόμου.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η υιοθέτηση ενός κυκλικού συστήματος, διασύνδεσης της επεξεργασίας των παραγόμενων αποβλήτων με τα γεωργικά συστήματα, θα αποδώσει σημαντικά οφέλη στην επίτευξη του στόχου όσον αφορά τη διαχείριση των πολύτιμων πόρων. Επιπλέον, καθώς το όραμα βασίζεται στη συγκρότηση ανθεκτικών και βιώσιμων αστικών περιοχών, μεγάλη έμφαση θα δοθεί στον κλάδο της γεωργίας, από τον οποίο θα προέρχεται ο εφοδιασμός σε τρόφιμα των πόλεων του μέλλοντος. Η βιώσιμη ανάπτυξη, στηρίζεται σημαντικά στην ανάκτηση θρεπτικών συστατικών και άλλων πολύτιμων πόρων από τα παραγόμενα οργανικά απόβλητα, είτε αυτά προέρχονται από τον γεωργικό τομέα, τις βιομηχανίες, ή τις αστικές περιοχές. Η διαρκής αύξηση των αποβλήτων, όπως αναλύθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, αποτελεί σοβαρό ζήτημα που ταλανίζει τον πλανήτη. Σε αυτό το σημείο, η ανάκτηση θρεπτικών συστατικών και η μετατροπή των αποβλήτων σε πολύτιμους πόρους, είναι απαραίτητα στοιχεία για την επέκταση της ζωής των αποβλήτων, τη μετάδοση αξίας μέσω της δημιουργίας νέων προϊόντων και τη συνολική μείωση των οργανικών αποβλήτων που απορρίπτονται στο περιβάλλον.

Πίνακας 5.1 Κυριότερα οφέλη από την ανάκτηση θρεπτικών συστατικών

Μείωση όγκου αποβλήτων και δυσμενών επιπτώσεών τους στο περιβάλλον (ρύπανση υδάτων, τοξικότητα εδάφους, περίσσεια θρεπτικών συστατικών, κ.ο.κ)
Διατήρηση κλειστού κύκλου - επέκταση διαθεσιμότητας των πεπερασμένων ορυκτών πόρων, που είναι απαραίτητοι για την παραγωγή τροφίμων και παράλληλα διατήρηση της επισιτιστικής ασφάλειας
Αποτροπή από τις σοβαρές επιπτώσεις που προκαλούνται από την περίσσεια θρεπτικών συστατικών
Πρόωθηση κυκλικής οικονομίας, επίτευξη Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης
Προστασία περιβάλλοντος και ανθρώπινης υγείας και ασφάλειας
Εξοικονόμηση κόστους και ενέργειας, που απαιτούνται κατά την αξιοποίηση των ορυκτών πόρων στην παραγωγή ορυκτών λιπασμάτων

Πέρα από όλα τα προαναφερόμενα οφέλη που προσφέρει η ανάκτηση θρεπτικών συστατικών, το αυξημένο κόστος της διαδικασίας παραγωγής ορυκτού λιπάσματος, είναι ακόμα ένας σημαντικός παράγοντας που θέτει την υιοθέτηση μίας εναλλακτικής διαδικασίας παραγωγής λιπάσματος, ως προτεραιότητα. Παρά το γεγονός ότι το άζωτο συναντάται άφθονο

στη φύση, η μετατροπή του σε λίπασμα, αποτελεί δαπανηρή και συνεπώς μη βιώσιμη διαδικασία (Śniatała et al., 2023b). Το γεγονός αυτό, έχει ως αποτέλεσμα την ανάγκη για αναζήτηση και εφαρμογή περισσότερο βιώσιμων μεθόδων παραγωγής λιπάσματος, όπου θα σέβονται το περιβάλλον και ταυτόχρονα θα απαιτούν χαμηλότερη κατανάλωση πόρων και ενέργειας, ξεκινώντας από την ελαχιστοποίηση των εξορύξεων των ορυκτών πόρων που χρησιμοποιούνται. Ακόμα, διεξάγονται σημαντικές μελέτες όσον αφορά την αναζήτηση βιώσιμων μεθόδων ανάκτησης αζώτου, με σκοπό τη μείωση των λειτουργικών και κεφαλαιουχικών δαπανών της διεργασίας. Ενώ η ευρέως γνωστή διαδικασία Haber - Bosch (HB) που χρησιμοποιείται στην περίπτωση πρόσληψης αζώτου, επέτρεψε την παραγωγή λιπασμάτων με βάση το άζωτο σε μεγάλη κλίμακα, βρίσκεται αντιμέτωπη με απαιτητικά ζητήματα ενεργειακής κατανάλωσης, που οφείλονται στις υψηλές θερμοκρασίες που πρέπει να επιτευχθούν. Σε αυτό το πλαίσιο, πρόσφατες μελέτες δείχνουν πως η ανάπτυξη οικονομικών, σταθερών και ενεργών καταλυτών, για τη μείωση του αζώτου σε χαμηλή θερμοκρασία, αποτελεί κύριο κομμάτι για τη περισσότερο βιώσιμη ανάκτηση αμμωνίας συμβάλλοντας στην μακροπρόθεσμη αποθήκευση ενέργειας και παραγωγή λιπασμάτων (Faria, 2021).

Πίνακας 5.2 Βασικές ενέργειες για την επίτευξη της βιώσιμης διαχείρισης θρεπτικών συστατικών κατά τη λίπανση των καλλιεργειών

Ανάκτηση θρεπτικών συστατικών από οργανικά απόβλητα, για την παραγωγή εδαφοβελτιωτικών
Επεξεργασία οργανικών αποβλήτων για την παραγωγή οργανικού (φιλικού προς το περιβάλλον) λιπάσματος
Χρήση βιολιπασμάτων και μετριασμός χρήσης ορυκτού λιπάσματος
Υιοθέτηση βιώσιμων μεθόδων παραγωγής λιπάσματος, με γνώμονα την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης πόρων και ενέργειας και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων
Μελετημένη οργάνωση κυκλικού συστήματος συλλογής και επεξεργασίας των γεωργικών και κτηνοτροφικών αποβλήτων, με στόχο τη μείωση του κόστους μεταφοράς, ενέργειας, λειτουργίας, των πόρων και των εκπομπών ή ρύπων που προκύπτουν
Μελετημένη εφαρμογή του κατάλληλου τύπου λιπάσματος στις καλλιέργειες (AI εργαλεία, ψηφιοποίηση γεωργίας, εφαρμογή 4R)
Συνεργατική αξιοποίηση εισροών και εκροών μεταξύ αγροκτημάτων/ βιομηχανιών κοντινών περιοχών (Agricultural and Industrial symbiosis)

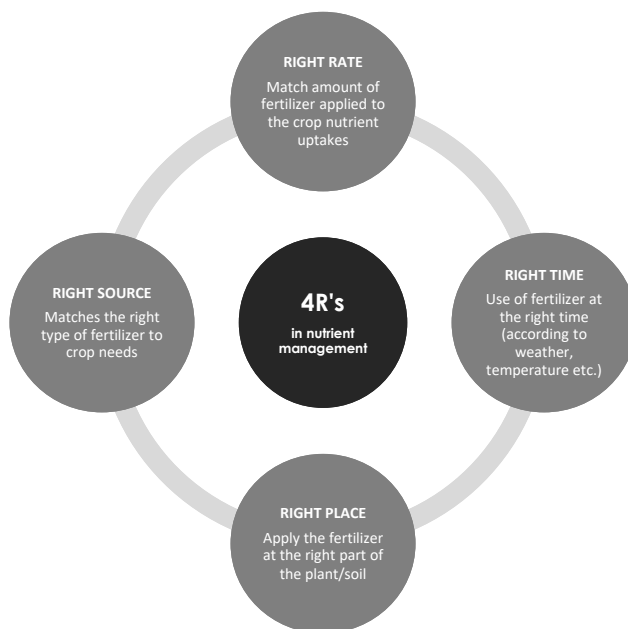
Ωστε να γίνουν σημαντικά βήματα βιώσιμης ανάπτυξης, συνεπώς θα πρέπει η παραγωγή ορυκτών λιπασμάτων αζώτου ή λιπασμάτων με βάση την ποτάσα ή φωσφορικά πετρώματα, που προκύπτουν έπειτα από εξόρυξη, να αντικατασταθεί από την παραγωγή λιπασμάτων που βασίζεται σε ανακτημένα θρεπτικά συστατικά από ροές αποβλήτων ή στερεά οργανικά απόβλητα. Παράλληλα, από την επεξεργασία των γεωργικών και κτηνοτροφικών οργανικών αποβλήτων, χρειάζεται να ευνοείται και η παραγωγή οργανικών λιπασμάτων, τα οποία αποτελούν φιλικότερη επιλογή προς το περιβάλλον και στόχος είναι η ευρύτερη εφαρμογή τους, με σκοπό την ελαχιστοποίηση της ποσότητας των ορυκτών λιπασμάτων που εφαρμόζονται στις καλλιέργειες και συνεπώς των αρνητικών επιπτώσεων που επιφέρουν. Με βάση τα παραπάνω, στον Πίνακα 5.2 αναφέρονται συνοπτικά μερικές από τις απαραίτητες ενέργειες που χρειάζεται να εφαρμοστούν στο πλαίσιο διαχείρισης των θρεπτικών συστατικών για τον κλάδο της γεωργίας.

5.4.2 Σχέδιο Κυκλικής Οικονομίας σε επίπεδο αγροκτήματος

Σε προηγούμενο κεφάλαιο αναλύθηκαν ορισμένοι από τους τρόπους ανάκτησης θρεπτικών συστατικών, που μπορούν να εφαρμοστούν στα συλλεγμένα οργανικά απόβλητα και υγρά λύματα. Για να βελτιωθεί η παγκόσμια ασφάλεια των ορυκτών πόρων και να μετριαστεί η ρύπανση που προκαλούν στα υδάτινα σώματα, θα πρέπει να διερευνηθούν καλύτερα οι κατάλληλες μέθοδοι ανάκτησης θρεπτικών συστατικών από οργανικά απόβλητα, όπως από υπολείμματα καλλιιεργειών και τροφίμων και κοπριά ζώων και ανθρώπων, για επαναχρησιμοποίησή τους στη γεωργική παραγωγή (Harder et al., 2021). Θα πρέπει συνεπώς να υιοθετηθεί ένα σύστημα κυκλικότητας των θρεπτικών συστατικών είτε σε τοπικό επίπεδο, είτε σε επίπεδο αγροκτήματος, όπου σε επίπεδο αγροκτήματος σημαντικό μέρος των οργανικών γεωργικών και κτηνοτροφικών αποβλήτων θα συλλέγεται για την αξιοποίησή του σε προϊόντα προστιθέμενης αξίας και για την ανάκτηση θρεπτικών συστατικών.

Στόχος, σε επίπεδο αγροκτήματος είναι η μείωση των παραγόμενων αποβλήτων που καταλήγουν στο περιβάλλον, μέσω μίας στρατηγικής κατά την οποία αυτά θα αξιοποιούνται στην παραγωγή προϊόντων προστιθέμενης αξίας, χρήσιμων για τη γεωργική παραγωγή. Η μελέτη πρέπει να εφαρμοστεί αναλυτικά για ολόκληρο τον κύκλο ζωής των αποβλήτων, δηλαδή από τη στιγμή που παράγονται, μέχρι και τη συλλογή, τη μεταφορά, την αποθήκευση, την προ-επεξεργασία, έως και το τελικό προϊόν και τη διανομή και εφαρμογή του. Πιο αναλυτικά, τα οργανικά γεωργικά και κτηνοτροφικά απόβλητα θα συλλέγονται και θα

μεταφέρονται απευθείας σε μονάδες επεξεργασίας ή θα αποθηκεύονται και θα φυλάσσονται κατάλληλα, μέχρι τη στιγμή που θα δεχθούν επεξεργασία, με τέτοιο τρόπο ώστε να διατηρούνται οι απαραίτητες ιδιότητες που τα καθιστούν χρήσιμες πηγές θρεπτικών συστατικών. Απόβλητα όπως η ζωική κοπριά ενδεχομένως να αποξηραίνονται ή να φυλάσσονται κατάλληλα, ώστε παράλληλα να αποτρέπουν από τυχόν κίνδυνο για τη δημόσια υγεία ή για τα γύρω οικοσυστήματα. Κατά τη μεταφορά των αποβλήτων, τα απόβλητα θα μεταφέρονται στις μονάδες επεξεργασίας όπου αναλόγως του τύπου τους και των θρεπτικών συστατικών που μπορούν να προσδώσουν, θα δέχονται την ιδανική επεξεργασία, με σκοπό την ανάκτηση των θρεπτικών συστατικών. Τα ανακτημένα θρεπτικά συστατικά, έπειτα θα αξιοποιούνται για την παραγωγή λιπασμάτων, τα οποία θα εφαρμόζονται στις καλλιέργειες, με βάση την αρχή των τεσσάρων R - “Right fertilizer source at the Right rate, at the Right time and in the Right place” - δηλαδή χρήση του κατάλληλου λιπάσματος, με το σωστό ρυθμό, τη σωστή χρονική περίοδο και στην κατάλληλη καλλιέργεια (Σχήμα 5.1). Όταν χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με ενός γεωργικές πρακτικές, τα 4R μειώνουν την απώλεια θρεπτικών συστατικών στο περιβάλλον και αυξάνουν την απόδοση της χρήσης λιπάσματος (The Fertilizer Institute, 2023), επιτυγχάνοντας αυξημένη παραγωγικότητα και κερδοφορία για τον αγρότη.

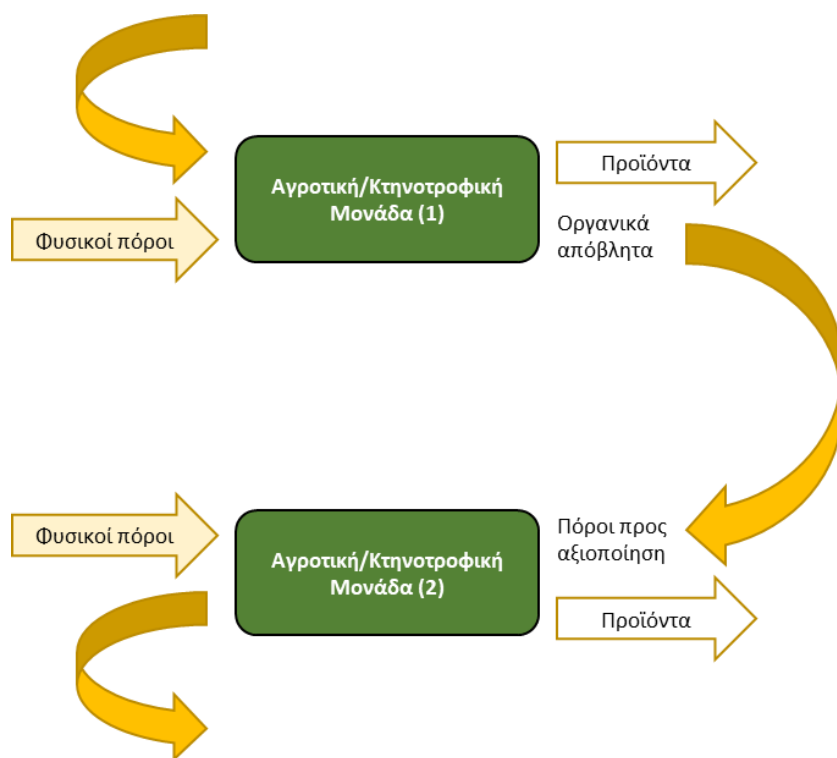


Σχήμα 5.1 Περιγραφή των τεσσάρων R στη διαχείριση των θρεπτικών συστατικών

Είναι επομένως αντιληπτό, πως η ανάκτηση θρεπτικών συστατικών επιτρέπει στους γεωργούς να ανακτούν πολύτιμα θρεπτικά συστατικά για τις καλλιέργειες από πηγές

αποβλήτων, μειώνοντας την εξάρτησή τους από εμπορικά ορυκτά λιπάσματα και εξοικονομώντας έτσι σημαντικό κόστος. Παράλληλα, με τη μείωση εφαρμογής των χημικών λιπασμάτων και την αύξηση εφαρμογής οργανικών λιπασμάτων που προκύπτουν έπειτα από βιολογικές επεξεργασίες των παραγόμενων αποβλήτων, όπως η κομποστοποίηση και η αναερόβια χώνευση, θα μειώσουν τις σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις και θα συμβάλλουν στην εξοικονόμηση ενέργειας, βελτιώνοντας την ίδια στιγμή τη γονιμότητα και την υγεία του εδάφους, αλλά και την ποιότητα του τελικού παραγόμενου προϊόντος που καταλήγει στην αλυσίδα διατροφής του ανθρώπου. Η ανάκτηση των θρεπτικών συστατικών, έχει ως αποτέλεσμα το μειωμένο περιβαλλοντικό αντίκτυπο, που μπορεί να προκύψει από την περίσσεια θρεπτικών συστατικών στο έδαφος, εξαιτίας της συσσώρευσης των γεωργικών και κτηνοτροφικών αποβλήτων. Επομένως, η διαχείριση των θρεπτικών συστατικών, στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας, προσδίδει σημαντικά μακροπρόθεσμα οφέλη τόσο για έναν γεωργό, όσο και για την ανθρωπότητα και το περιβάλλον γενικότερα.

Σε αυτό το σημείο, είναι απαραίτητο να αναφερθούμε σε ένα βασικό κομμάτι για τη διατήρηση και εξοικονόμηση των πόρων που αξιοποιούνται στην γεωργική ή κτηνοτροφική μονάδα, το οποίο είναι η εφαρμογή συνεργατικών πρακτικών συμβίωσης (agricultural symbiosis) μέσω ενός μοντέλου κυκλικότητας (Σχήμα 5.2). Γενικότερα, η διαδικασία συμβίωσης αναπτύσσεται μέσω συστημάτων συνεργασίας και συνεργειών μεταξύ διαφορετικών βιομηχανικών επιχειρήσεων, καθώς και μέσω μηχανισμών ανταλλαγής και μεταφοράς πόρων σε τοπική κλίμακα, έτσι ώστε τα απόβλητα και τα υποπροϊόντα μιας επιχείρησης να μπορούν να αποτελέσουν εισροή μιας άλλης (Hamam et al., 2023). Το σύστημα αυτό συχνά συναντάται με τον όρο «Βιομηχανική Συμβίωση» (Industrial Symbiosis). Ένα παρόμοιο συνεργατικό σύστημα θα μπορούσε να υιοθετηθεί από αγροτικές και κτηνοτροφικές μονάδες κοντινών περιοχών, οι οποίες θα μπορούν να ανταλλάσσουν ή να μεταφέρουν, κατόπιν συμφωνίας, τους υπολειπόμενους πόρους τους, όπως οργανικά απόβλητα, ροές ενέργειας ή περισευδούμενο νερό, σε γειτονικά αγροκτήματα ή μονάδες για τις οποίες θα αποτελούν πολύτιμους πόρους προς αξιοποίηση για την παραγωγή των προϊόντων τους. Ένα τέτοιο σύστημα, θα επέφερε πολλαπλά οφέλη στα ίδια τα αγροκτήματα/μονάδες, αλλά και στην οικολογία γενικότερα, καθώς συμβάλλει σε σημαντική εξοικονόμηση πόρων και κόστους και δραστική μείωση των παραγόμενων αποβλήτων.



Σχήμα 5.2 Ενδεικτικό σχέδιο γεωργικής συμβίωσης και κυκλικότητας

Τέλος, μέθοδοι ψηφιακής γεωργίας, καθώς και η τεχνητή νοημοσύνη (AI), θα αποτελέσουν σημαντικό εργαλείο στην ορθή εφαρμογή των γεωργικών πρακτικών. Ήδη η βοήθεια καινοτόμων τεχνολογιών έχει προσδώσει σημαντικά πλεονεκτήματα στον κλάδο της γεωργίας, δίνοντας πρόσβαση σε πολύτιμα δεδομένα που προσδίδουν την απαραίτητη γνώση στο γεωργό, για την καλύτερη κατανόηση του γεωργικού συστήματος και συνεπώς ορθότερη εφαρμογή των γεωργικών πρακτικών, πετυχαίνοντας την ίδια στιγμή περισσότερο αποδοτική αξιοποίηση των πόρων. Όλα τα παραπάνω, θα πρέπει παράλληλα να εφαρμόζονται με γνώμονα την ελάχιστη ενεργειακή κατανάλωση, το χαμηλότερο λειτουργικό κόστος, τη μειωμένη εκπομπή αέριων ρύπων, ή απόρριψη ρυπογόνων ουσιών στο περιβάλλον, διαφυλάσσοντας ταυτοχρόνως την ανθρώπινη υγεία και τη διατήρηση της περιβαλλοντικής ισορροπίας.

5.5 Ανακεφαλαίωση

Για την επίτευξη των στόχων βιωσιμότητας και την πρόληψη από αναδυόμενες απειλές, η ανθρωπότητα πρέπει να εστιάσει στην ενίσχυση των παγκόσμιων συστημάτων παραγωγής τροφίμων, μέσα από την υιοθέτηση ενός κυκλικού μοντέλου οικονομίας. Η ανάκτηση θρεπτικών συστατικών αποτελεί σημαντική πτυχή της βιώσιμης διαχείρισης αποβλήτων, διότι επιτρέπει την επαναχρησιμοποίηση των πολύτιμων θρεπτικών συστατικών στη γεωργία ή σε

άλλες εφαρμογές, μειώνοντας την ανάγκη για νέα εξόρυξη πόρων και μετριάζοντας τη ρύπανση του περιβάλλοντος. Η εφαρμογή του μοντέλου σε επίπεδο αγροκτήματος μέσω δηλαδή της αξιοποίησης των παραγόμενων γεωργικών και κτηνοτροφικών αποβλήτων, μπορεί να επιφέρει αξιοσημείωτα οφέλη για τη βιώσιμη γεωργία, ενισχύοντας την ποιότητα των τελικών προϊόντων και συνεπώς της ανθρώπινης υγείας, ενώ η υιοθέτηση του μοντέλου σε ευρύτερο επίπεδο, συμπεριλαμβανομένης της αξιοποίησης των αστικών και βιομηχανικών αποβλήτων, θα αποτελέσει το μεγάλο βήμα προς την επίτευξη ενός βιώσιμου μέλλοντος.

Παράλληλα, η γεωργική συμβίωση αποτελεί βασικό στοιχείο για την προώθηση της κυκλικής οικονομίας και τη μείωση των αποβλήτων που καταλήγουν αναξιοποίητα στο περιβάλλον, επιφέροντας σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η εφαρμογή του κυκλικού μοντέλου μεταξύ διαφορετικών παραγωγών θα συμβάλλει σημαντικά στην εξοικονόμηση των πόρων, δίνοντας ελπίδα στη διατήρηση της διαθεσιμότητάς τους στο χρόνο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Συμπεράσματα και Συζήτηση

Για τη διαφύλαξη των φυσικών πόρων, την προστασία του περιβάλλοντος αλλά και τη διατήρηση της ζωής στον πλανήτη, η ανάκτηση και η επαναχρησιμοποίηση πόρων αποτελεί αναγκαία πρακτική. Το κυκλικό μοντέλο οικονομίας είναι πολλά υποσχόμενο στην προώθηση της αναγεννητικής και βιώσιμης γεωργίας, καθώς προσθέτει εμπορική αξία στη ροή των παραγόμενων αποβλήτων. Ένα κυκλικό σύστημα αξιοποίησης των γεωργικών και κτηνοτροφικών αποβλήτων προς ανάκτηση θρεπτικών συστατικών, μπορεί να προσφέρει πολλαπλά οφέλη τόσο για έναν γεωργό, όσο και για τις τοπικές οικονομίες.

Στην παρούσα ανασκόπηση, αναδείχθηκε η σημασία των διαφορετικών θρεπτικών συστατικών για την ανάπτυξη των καλλιεργειών και οι δυνατότητες ανάκτησης αυτών από τα οργανικά γεωργικά και κτηνοτροφικά απόβλητα, για την παραγωγή ανακτημένου οργανικού λιπάσματος. Μία τέτοια προσέγγιση, κατέδειξε σημαντικά οφέλη στο πλαίσιο της βιώσιμης ανάπτυξης και της επισιτιστικής ασφάλειας. Οι φυσικοχημικές ιδιότητες και η οργανική ύλη του εδάφους διαδραματίζουν ζωτικό ρόλο για τη μετατροπή των θρεπτικών ουσιών και τη μακροπρόθεσμη παραγωγικότητα του εδάφους, η οποία ενισχύεται από την ισορροπημένη εφαρμογή θρεπτικών ουσιών και κοπριάς (Bhatt et al., 2019). Ωστόσο, σύμφωνα με τη συγκεκριμένη θεωρητική μελέτη, προκύπτει πως έως σήμερα δεν υπάρχει μεμονωμένη μέθοδος ανάκτησης η οποία να κρίνεται ως καταλληλότερη και περισσότερο αποτελεσματική. Οι διαθέσιμες μέθοδοι που αναλύθηκαν τείνουν να παρουσιάζουν διαφορετικά αποτελέσματα τα οποία εξαρτώνται κάθε φορά από μεταβαλλόμενους παράγοντες, όπως είναι η διαφορετική σύσταση των αποβλήτων, η οποία εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της καλλιέργειας ή του ζώου από τα οποία προέρχονται. Επιπλέον, οι μέθοδοι ανάκτησης δεν είναι ικανές να ανακτούν όλα τα διαφορετικά θρεπτικά συστατικά που συναντώνται στα απόβλητα και συνεπώς χρειάζεται να χρησιμοποιούνται οι ιδανικές τεχνικές αναλόγως του θρεπτικού συστατικού που χρειάζεται να ανακτηθεί.

Παράλληλα, οι μέθοδοι, πέρα από την αποτελεσματικότητά τους στην ανάκτηση συστατικών και δημιουργία νέων προϊόντων προστιθέμενης αξίας, χρειάζεται να εξετάζονται από πολλές σκοπιές, όπως ως προς τα απαιτούμενα μέσα που χρειάζονται για την υλοποίησή τους (μηχανήματα, εξοπλισμός, χημικά), τους οικονομικούς πόρους και την κατανάλωση ενέργειας και νερού, τον απαιτούμενο χώρο εφαρμογής και τις περιβαλλοντικές ή κοινωνικές επιπτώσεις που μπορεί να επιφέρουν. Ως εκ τούτου, η εφαρμογή των εργαλείων της Ανάλυσης

Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment - LCA) και της Κοστολόγησης Κύκλου Ζωής (Life Cycle Costing - LCC), σε πραγματικά δεδομένα ίσως αποτελεί το κλειδί για την αξιολόγηση των διαφορετικών μεθόδων επεξεργασίας των αποβλήτων και ανάκτησης θρεπτικών συστατικών κάτω από διαφορετικά πειραματικά σενάρια, καθώς συμβάλλουν σημαντικά στην εκτίμηση των περιβαλλοντικών και οικονομικών επιπτώσεων.

Οι εφαρμογές οργανικής λίπανσης, έπειτα από αξιοποίηση του οργανικού κλάσματος των αποβλήτων που παράγονται σε ένα αγρόκτημα, είναι επίσης μία ωφέλιμη επιλογή. Η κομποστοποίηση αποτελεί μία εύκολη πρακτική η οποία μπορεί να ενισχύσει τη γονιμότητα του εδάφους στο χρόνο και επομένως τη φυτική παραγωγή, συμβάλλοντας παράλληλα στη βιώσιμη γεωργική ανάπτυξη και οικονομία. Τέτοιες βιώσιμες πρακτικές, μπορεί να μην επιφέρουν σε σύντομο χρόνο τα αποτελέσματα που προσφέρει η χημική λίπανση, ωστόσο αποτρέπουν από την εξασθένηση του εδάφους και παρέχουν μακροπρόθεσμα οφέλη για τις καλλιέργειες, ενώ δεν απαιτούν κατανάλωση σε ενέργεια για την εφαρμογή τους.

Παρά τις προκλήσεις που παρουσιάζονται, η ανάκτηση των θρεπτικών συστατικών από τα οργανικά απόβλητα, αποτελεί αναγκαιότητα στο πλαίσιο διασφάλισης της επισιτιστικής ασφάλειας και συνεπώς της επίτευξης των στόχων βιώσιμης ανάπτυξης του ΟΗΕ. Η υλοποίηση ενός τέτοιου κυκλικού συστήματος απαιτεί προσεκτική ανάλυση και στρατηγικό σχεδιασμό, σε συνδυασμό με χαρτογράφηση των ροών θρεπτικών συστατικών ανά γεωγραφική περιοχή. Παράλληλα, στην πράξη η εφαρμογή ενός τέτοιου συστήματος απαιτεί συμπληρωματική ανάλυση, ως προς θέματα ευαισθητοποίησης και κοινωνικής αποδοχής, οικονομικής ανάπτυξης και διαθεσιμότητας σε καινοτόμες τεχνολογίες. Στόχος και ταυτοχρόνως πρόκληση είναι, η ανάπτυξη ενός κυκλικού συστήματος το οποίο να είναι ικανό να ανταποκρίνεται με θετικά αποτελέσματα, ανεξαρτήτως της γεωγραφικής περιοχής που εφαρμόζεται, ή των εισροών και εκροών των συστατικών. Ξεκινώντας ωστόσο από μικρότερη κλίμακα, με εφαρμογή βιολογικών μεθόδων ανάκτησης των θρεπτικών συστατικών μέσω ανακύκλωσης των αποβλήτων που παράγονται εσωτερικά από τα αγροκτήματα, και σταδιακά υιοθετώντας ένα μελετημένο κυκλικό σύστημα παραγωγής τροφίμων σε ευρύτερη κλίμακα, δείχνει να αποτελεί ένα αισιόδοξο σενάριο το οποίο επιφυλάσσει σημαντικά οφέλη για τη διαφύλαξη του περιβάλλοντος και της ανθρώπινης υγείας και ζωής γενικότερα.

Βιβλιογραφία

Ελληνική Βιβλιογραφία

Αραβανή Βασιλική (2023 Πανεπιστήμιο Πατρών) Ολοκληρωμένη διαχείριση και αξιοποίηση αγροτικών υπολειμμάτων: εφαρμογή στην παραγωγή ενέργειας. (n.d). <https://freader.ekt.gr/eadd/index.php?doc=54347&lang=el#p=32>

Διεθνής Βιβλιογραφία

Abdulrazak, S., Hussaini, K. M., & Sani, H. (2016). Evaluation of removal efficiency of heavy metals by low-cost activated carbon prepared from African palm fruit. *Applied Water Science*, 7(6), 3151–3155. <https://doi.org/10.1007/s13201-016-0460-x>

Acharya, C., Bandyopadhyay, K., & Hati, K. M. (2018). Mulches: Role in climate resilient agriculture. *In Elsevier eBooks*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409548-9.11654-9>

Ahmed, M., Ahmad, S., Fayyaz-UI-Hassan, Qādir, G., Hayat, R., Shaheen, F. A., & Raza, M. A. (2019). Innovative Processes and Technologies for Nutrient Recovery from Wastes: A Comprehensive Review. *Sustainability*, 11(18), 4938. <https://doi.org/10.3390/su11184938>

Akinnawo, S. O. (2023). Eutrophication: Causes, consequences, physical, chemical and biological techniques for mitigation strategies. *Environmental Challenges*, 12, 100733. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100733>

Aravani, V. P., Sun, H., Yang, Z., Liu, G., Wen, W., Anagnostopoulos, G., Syriopoulos, G., Charisiou, N. D., Goula, M. A., Kornaros, M., & Papadakis, V. G. (2022, February 1). Agricultural and livestock sector's residues in Greece & China: Comparative qualitative and quantitative characterization for assessing their potential for biogas production. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 154. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111821>

Arredondo, M. R., Kuntke, P., Ter Heijne, A., Hamelers, H., & Buisman, C. J. (2017). Load ratio determines the ammonia recovery and energy input of an electrochemical system. *Water Research*, 111, 330–337. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.12.051>

- Barnard, R. L., Leadley, P., & Hungate, B. A. (2005). Global change, nitrification, and denitrification: A review. *Global Biogeochemical Cycles*, 19(1). <https://doi.org/10.1029/2004gb002282>
- Bhatt, M., Labanya, R., & Joshi, H. C. (2019). Influence of Long-term Chemical fertilizers and Organic Manures on Soil Fertility - A Review. *Universal Journal of Agricultural Research*, 7(5), 177–188. <https://doi.org/10.13189/ujar.2019.070502>
- Cai, T., Park, S. Y., & Li, Y. (2013). Nutrient recovery from wastewater streams by microalgae: Status and prospects. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 19, 360–369. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.030>
- Chen, X., Yan, X., Wang, M., Cai, Y., Weng, X., Su, D., Guo, J., Wang, W., Hou, Y., Ye, D., Zhang, S., Liu, D., Tong, L., Xu, X., Zhou, S., Wu, L., & Zhang, F. (2022). Long-term excessive phosphorus fertilization alters soil phosphorus fractions in the acidic soil of pomelo orchards. *Soil & Tillage Research*, 215, 105214. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105214>
- Dadrasnia, A., De Bona Muñoz, I., Hernández, E., Lamkaddam, I. U., Mora, M., Ponsá, S., Ahmed, M., Argelaguet, L. L., Williams, P., & Oatley-Radcliffe, D. L. (2021). Sustainable nutrient recovery from animal manure: A review of current best practice technology and the potential for freeze concentration. *Journal of Cleaner Production*, 315, 128106. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128106>
- De Vries, W., Kros, J., Voogd, J., & Ros, G. H. (2023). Integrated assessment of agricultural practices on large scale losses of ammonia, greenhouse gases, nutrients and heavy metals to air and water. *Science of the Total Environment*, 857, 159220. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159220>
- Del Rio Osorio, L. L., Flórez-López, E., & Grande-Tovar, C. D. (2021). The potential of selected Agri-Food loss and Waste to contribute to a circular Economy: applications in the food, cosmetic and pharmaceutical industries. *Molecules*, 26(2), 515. <https://doi.org/10.3390/molecules26020515>
- F. O. Obi, B. O. Ugwuishiwu, J. N. Nwakaire. (2016). Agricultural waste concept, generation, utilization and management. *Nigerian Journal of Technology*, 35(4):957-964

- Fageria, N. K., Baligar, V. C., & Clark, R. B. (2002). Micronutrients in crop production. *In Advances in Agronomy* (pp. 185–268). [https://doi.org/10.1016/s0065-2113\(02\)77015-6](https://doi.org/10.1016/s0065-2113(02)77015-6)
- Faria, J. (2021). Renaissance of ammonia synthesis for sustainable production of energy and fertilizers. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 29, 100466. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2021.100466>
- Flotats, X., Blasi, A. B., Fernández, B., & Magrí, A. (2009, November 1). Manure treatment technologies: On-farm versus centralized strategies, NE Spain as case study. *Bioresource Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.12.050>
- Gao, Y., Fang, Z., Van Zwieten, L., Bolan, N., Dong, D., Quin, B. F., Meng, J., Li, F., Wu, F., Wang, H., & Chen, W. (2022). A critical review of biochar-based nitrogen fertilizers and their effects on crop production and the environment. *Biochar*, 4(1). <https://doi.org/10.1007/s42773-022-00160-3>
- Hamam, M., Spina, D., Raimondo, M., Di Vita, G., Zanchini, R., Chinnici, G., Tóth, J., & D'Amico, M. (2023). Industrial symbiosis and agri-food system: Themes, links, and relationships. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.1012436>
- Harder, R., Giampietro, M., & Smukler, S. (2021). Towards a circular nutrient economy. A novel way to analyze the circularity of nutrient flows in food systems. *Resources, Conservation and Recycling*, 172, 105693. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105693>
- Hasan, M. M., Altaf, M., Khan, N. A., Khan, A. H., Khan, A. A., Ahmed, S., Kumar, P., Naushad, M., Rajapaksha, A. U., Iqbal, J., Tirth, V., & Islam, S. (2021). Recent technologies for nutrient removal and recovery from wastewaters: A review. *Chemosphere*, 277, 130328. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130328>
- Hjorth, M., Christensen, K. V., Christensen, M. L., & Sommer, S. G. (2010). Solid—liquid separation of animal slurry in theory and practice. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 30(1), 153–180. <https://doi.org/10.1051/agro/2009010>
- Huang, X., Guida, S., Jefferson, B., & Soares, A. (2020). Economic evaluation of ion-exchange processes for nutrient removal and recovery from municipal wastewater. *Npj Clean Water*, 3(1). <https://doi.org/10.1038/s41545-020-0054-x>

- Humphreys, J., Lan, R., & Tao, S. (2020). Development and recent progress on ammonia synthesis catalysts for Haber–Bosch process. *Advanced Energy and Sustainability Research*, 2(1). <https://doi.org/10.1002/aesr.202000043>
- Imran-Shaukat, M., Wahid, R., & Ngaini, Z. (2022). The application of agricultural wastes for heavy metals adsorption: A meta-analysis of recent studies. *Bioresource Technology Reports*, 17, 100902. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100902>
- Itelima. (2018). Bio-fertilizers as key player in enhancing soil fertility and crop productivity: A Review.
- Jaffri, S. B., Ahmad, K. S., & Jabeen, A. (2021). Biofertilizers' functionality in organic agriculture entrenching sustainability and ecological protection. In *Elsevier eBooks* (pp. 211–219). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-821667-5.00015-4>
- Jiao, C., Lü, S., Zhang, Z., Zhao, X., Li, X., Ning, P., & Liu, M. (2018). Environmentally friendly fertilizers: A review of materials used and their effects on the environment. *Science of the Total Environment*, 613–614, 829–839. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.186>
- Johansson, S., Rusalleda, M., Saerens, B., & Colprim, J. (2018). Potassium recovery from centrate: taking advantage of autotrophic nitrogen removal for multi-nutrient recovery. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 94(3), 819–828. <https://doi.org/10.1002/jctb.5828>
- Kannan, A. D., Dillavou, J., Gamage, K. H., Randig, E., Hettiarachchi, G. M., & Parameswaran, P. (2023). Recovery of high-quality calcium phosphate fertilizer products from anaerobic membrane bioreactor treated swine wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 453, 139539. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.139539>
- Karri, R. R., Sahu, J., & Venkateswarlu, C. (2018). Critical review of abatement of ammonia from wastewater. *Journal of Molecular Liquids*, 261, 21–31. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.03.120>
- Keuter, V., Deck, S., Giesenkamp, H., Gonglach, D., Katayama, V. T., Liesegang, S. L., Petersen, F., Schwindenhammer, S., Steinmetz, H., & Ulbrich, A. (2021). Significance and Vision of Nutrient Recovery for Sustainable city food Systems in Germany by 2050. *Sustainability*, 13(19), 10772. <https://doi.org/10.3390/su131910772>

- Khatri, I., & Garg, A. (2022). Potash recovery from synthetic potassium rich wastewater and biomethanated distillery effluent using tartaric acid as a recyclable precipitant. *Environmental Technology and Innovation*, 28, 102841. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102841>
- Khatri, I., & Garg, A. (2022b). Potash recovery from synthetic potassium rich wastewater and biomethanated distillery effluent using tartaric acid as a recyclable precipitant. *Environmental Technology and Innovation*, 28, 102841. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102841>
- Khoshnevisan, B., Duan, N., Tsapekos, P., Awasthi, M. K., Liu, Z., Mohammadi, A., Angelidaki, I., Tsang, D. C., Zhang, Z., Pan, J., Ma, L., Aghbashlo, M., Tabatabaei, M., & Liu, H. (2021, January 1). A critical review on livestock manure biorefinery technologies: Sustainability, challenges, and future perspectives, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110033>
- Koul, B., Yakoob, M. Y., & Shah, M. P. (2022, April 1). Agricultural waste management strategies for environmental sustainability. *Environmental Research*. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112285>
- Kumar, A., Dinkar, A., Basak, N., Dixit, A., Das, S., Dev, I., Sundha, P., Chandra, P., & Kumar, S. (2021). Phosphorus nutrition of oats genotypes in acidic soils: Exploiting responsive plant-microbe partnership. *Applied Soil Ecology*, 167, 104094. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104094>
- Kurniawan, T. A., Liang, X., Singh, D., Othman, M. H. D., Goh, H. H., Gikas, P., Kern, A. O., Kusworo, T. D., & Shoqeir, J. (2022). Harnessing landfill gas (LFG) for electricity: A strategy to mitigate greenhouse gas (GHG) emissions in Jakarta (Indonesia). *Journal of Environmental Management*, 301, 113882. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113882>
- Kurniawan, T. A., Singh, D., Xue, W., Avtar, R., Othman, M. H. D., Goh, H. H., Setiadi, T., Albadarin, A. B., & Shirazian, S. (2021). Resource recovery toward sustainability through nutrient removal from landfill leachate. *Journal of Environmental Management*, 287, 112265. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112265>
- Lam, S. K., Wille, U., Hu, H., Caruso, F., Mumford, K. A., Xia, L., Pan, B., Malcolm, B., Roessner, U., Suter, H., Stevens, G. W., Walker, C. K., Tang, C., He, J., & Chen, D. (2022). Next-generation enhanced-efficiency fertilizers for sustained food security. *Nature Food*, 3(8), 575–580. <https://doi.org/10.1038/s43016-022-00542-7>

- Lee, J., Yang, X., Cho, S. H., Kim, J. K., Lee, S. S., Tsang, D. C., Ok, Y. S., & Kwon, E. E. (2017, January 1). Pyrolysis process of agricultural waste using CO₂ for waste management, energy recovery, and biochar fabrication. *Applied Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.10.092>
- Li, C., Li, D., Yao, Y., Li, M., & Liu, L. (2020). Modern imaging techniques in plant nutrition analysis: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 174, 105459. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105459>
- Lin, L., Zhang, Y., Beckman, M., Cao, W., Ouyang, T., Wang, S., & Li, Y. Y. (2019). Process optimization of anammox-driven hydroxyapatite crystallization for simultaneous nitrogen removal and phosphorus recovery. *Bioresource Technology*, 290, 121779. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121779>
- Logan, M., & Visvanathan, C. (2019). Management strategies for anaerobic digestate of organic fraction of municipal solid waste: Current status and future prospects. *Waste Management & Research*, 37(1_suppl), 27–39. <https://doi.org/10.1177/0734242x18816793>
- Mathioudakis, D., Karageorgis, P., Παπαδοπούλου, Astrup, T. F., & Lyberatos, G. (2022, August 5). Environmental and Economic Assessment of Alternative Food Waste Management Scenarios. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su14159634>
- Mayer, B. K., Baker, L. A., Boyer, T. H., Drechsel, P., Gifford, J., Hanjra, M. A., Parameswaran, P., Stoltzfus, J., Westerhoff, P., & Rittmann, B. E. (2016). Total value of phosphorus recovery. *Environmental Science & Technology*, 50(13), 6606–6620. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b01239>
- Mengqi, Z., Shi, A., Ajmal, M., Ye, L., & Awais, M. (2021). Comprehensive review on agricultural waste utilization and high-temperature fermentation and composting. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(7), 5445–5468. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01438-5>
- Mengqi, Z., Shi, A., Ajmal, M., Ye, L., & Awais, M. (2021, March 16). Comprehensive review on agricultural waste utilization and high-temperature fermentation and composting. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(7046):1-24. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01438-5>

- Mengqi, Z., Shi, A., Ajmal, M., Ye, L., & Awais, M. (2021b). Comprehensive review on agricultural waste utilization and high-temperature fermentation and composting. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(7), 5445–5468. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01438-5>
- Mirza, M. W., D’Silva, T. C., Gani, K. M., Afsar, S. S., Gaur, R. Z., Mutiyar, P. K., Khan, A. A., Diamantis, V., & Lew, B. (2020). Cultivation of anaerobic ammonium oxidizing bacteria (AnAOB) using different sewage sludge inoculums: process performance and microbial community analysis. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 96(2), 454–464. <https://doi.org/10.1002/jctb.6560>
- Namasivayam, C., & Sangeetha, D. (2006). Recycling of agricultural solid waste, coir pith: Removal of anions, heavy metals, organics and dyes from water by adsorption onto ZnCl₂ activated coir pith carbon. *Journal of Hazardous Materials*, 135(1–3), 449–452. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.11.066>
- Nguyen, H., Moghadam, M. J., & Moayedi, H. (2019, May 23). Agricultural wastes preparation, management, and applications in civil engineering: a review. *Journal of Material Cycles and Waste Management*; Springer Science+Business Media. <https://doi.org/10.1007/s10163-019-00872-y>
- Ogbu, C. C., & Okechukwu, S. N. (2023). Agro-Industrial Waste Management: The Circular and Bioeconomic Perspective. In *IntechOpen eBooks*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.109181>
- Omorogie, M. O., Babalola, J. O., & Unuabonah, E. I. (2014). Regeneration strategies for spent solid matrices used in adsorption of organic pollutants from surface water: a critical review. *Desalination and Water Treatment*, 57(2), 518–544. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.967726>
- Pandey, D. S., Katsaros, G., Lindfors, C., Leahy, J. J., & Tassou, S. (2019). Fast pyrolysis of poultry litter in a bubbling fluidised bed reactor: energy and nutrient recovery. *Sustainability*, 11(9), 2533. <https://doi.org/10.3390/su11092533>
- Pattanaik, L., Pattnaik, F., Saxena, D. K., & Naik, S. (2019, January 1). Biofuels from agricultural wastes. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815162-4.00005-7>

- Pizzeghello, D., Berti, A., Nardi, S., & Morari, F. (2011). Phosphorus forms and P-sorption properties in three alkaline soils after long-term mineral and manure applications in north-eastern Italy. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 141(1–2), 58–66. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.02.011>
- Riya, S., Meng, L., Wang, Y., Lee, C. G., Zhou, S., Toyota, K., & Hosomi, M. (2021). Dry anaerobic digestion for agricultural waste recycling. In *IntechOpen eBooks*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.91229>
- Rodríguez-Espinosa, T., Papamichael, I., Voukkali, I., Gimeno, A. P., Candel, M. B. A., Pedreño, J. N., Zorpas, A. A., & Lucas, I. G. (2023). Nitrogen management in farming systems under the use of agricultural wastes and circular economy. *Science of the Total Environment*, 876, 162666. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162666>
- Rodríguez-Espinosa, T., Papamichael, I., Voukkali, I., Gimeno, A. P., Candel, M. B. A., Pedreño, J. N., Zorpas, A. A., & Lucas, I. G. (2023b). Nitrogen management in farming systems under the use of agricultural wastes and circular economy. *Science of the Total Environment*, 876, 162666. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162666>
- Sakar, S., Yetilmezsoy, K., & Koçak, E. (2009, February 1). Anaerobic digestion technology in poultry and livestock waste treatment — a literature review. *Waste Management & Research*. <https://doi.org/10.1177/0734242x07079060>
- Shi, L., Xiao, L., Hu, Z., & Zhan, X. (2020). Nutrient recovery from animal manure using bipolar membrane electrodialysis: Study on product purity and energy efficiency. *Water Cycle*, 1, 54–62. <https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2020.06.002>
- Singh, D., Thapa, S., Geat, N., Mehriya, M. L., & Rajawat, M. V. S. (2021). Biofertilizers: Mechanisms and application. In Elsevier eBooks (pp. 151–166). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-821667-5.00024-5>
- Śniatała, B., Kurniawan, T. A., Sobotka, D., Małkinia, J., & Othman, M. H. D. (2023). Macro-nutrients recovery from liquid waste as a sustainable resource for production of recovered mineral fertilizer: Uncovering alternative options to sustain global food security cost-effectively. *Science of the Total Environment*, 856, 159283. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159283>

- Sobhi, M., Zheng, J., Li, B., Gaballah, M. S., Aboagye, D., Guo, J., & Dong, R. (2023, February 1). Carbon footprint of dairy manure management chains in response to nutrient recovery by aerobic pre-treatment. *Journal of Environmental Management*. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116975>
- Tripathi, D. K., Singh, S., Singh, V. P., Mishra, S., Chauhan, D. K., & Dubey, N. K. (2015). Micronutrients and their diverse role in agricultural crops: advances and future prospective. *Acta Physiologiae Plantarum*, 37(7). <https://doi.org/10.1007/s11738-015-1870-3>
- Uchida, R. (2000) Essential Nutrients for Plant Growth Nutrient Functions and Deficiency Symptoms. *Plant Nutrient Management in Hawaii's Soils*, 4, 31-55.
- Wang, K., Li, X., He, C., Chen, C. L., Bai, J., Ren, N., & Wang, J. (2014, September 1). Transformation of dissolved organic matters in swine, cow and chicken manures during composting, *Bioresource Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.03.129>
- Waqas, M., Hashim, S., Humphries, U. W., Ahmad, S., Noor, R., Shoaib, M., Naseem, A., Hlaing, P. T., & Lin, H. A. (2023). Composting Processes for Agricultural Waste Management: A Comprehensive review. *Processes*, 11(3), 731. <https://doi.org/10.3390/pr11030731>
- Xie, M., Shon, H. K., Gray, S., & Elimelech, M. (2016). Membrane-based processes for wastewater nutrient recovery: Technology, challenges, and future direction. *Water Research*, 89, 210–221. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.11.045>
- Xie, T., Reddy, K. R., Wang, C., & Xu, K. (2014). Effects of Amendment of Biochar Produced from Woody Biomass on Soil Quality and Crop Yield. *Geoenvironmental Engineering*. <https://doi.org/10.1061/9780784413432.018>
- Xu, F., Li, Y., Ge, X., Yang, L., & Li, Y. (2018, January 1). Anaerobic digestion of food waste – Challenges and opportunities, *Bioresource Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.020>
- Xu, X., Du, X., Wang, F., Sha, J., Chen, Q., Tian, G., Zhu, Z., Ge, S., & Jiang, Y. (2020). Effects of potassium levels on plant growth, accumulation and distribution of carbon, and nitrate metabolism in apple dwarf rootstock seedlings. *Frontiers in Plant Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00904>

Zhang, Y., Qin, J., Chen, Z., Chen, Y., Zheng, X., Guo, L., & Wang, X. (2023). Efficient removal and recovery of phosphorus from industrial wastewater in the form of vivianite. *Environmental Research*, 228, 115848. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115848>

Διαδικτυακοί Τόποι

ΕΛΣΤΑΤ, 2021. Ανακτήθηκε από: <https://www.statistics.gr/documents/20181/96929c5c-54d8-ccca-22fe-1c7af02f8bf3>

Agroenergy Renewable and Alternative Energy sources S.A. <http://www.agroenergy.gr/>

Envima 2023. Ανακτήθηκε από: <https://www.envima.gr/>

Shaukat, M. S. (2021, June 6). Introduction to eutrophication: causes, effects and possible solutions. *PakAgriFarming*. <https://pakagrifarming.blogspot.com/2021/06/introduction-to-eutrophication-101.html>

Statista 2023. <https://www.statista.com/>

Statista 2023. Ανακτήθηκε από: <https://www.statista.com/statistics/438967/fertilizer-consumption-globally-by-nutrient/>

The Fertilizer Institute 2023. Ανακτήθηκε από: <https://www.tfi.org/our-industry/state-of-industry/about-the-industry>

Ted, H. (Feb 21, 2023). Ανακτήθηκε από: <https://lahinchtavernandgrill.com/the-benefits-of-an-active-charcoal-filter-improving-the-quality-of-air-and-water-in-your-home/>