



ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΠΜΣ ΔΙΑΧΕΙΡΗΣ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΑΓΡΟΤΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ
ΤΗΣ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ

ΧΑΛΑΖΑ ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΑ

AEM: std166831

EMAIL: std166831@ac.eap.gr

Α' ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΤΗΣ: ΚΑΝΑΤΑΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗ

Β' ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΤΗΣ: ΚΑΡΑΓΙΑΝΝΗΣ ΒΑΙΟΣ

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Κανάτα Παναγιώτη, για την ανάθεση του θέματος και τη συνεργασία κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον άντρα μου και στους γονείς μου για τη διαρκή υποστήριξη, την υπομονή και την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Η ηθική τους συμπαράσταση αποτέλεσε πολύτιμη δύναμη για την ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας.

Τέλος, ευχαριστώ όλους όσους με στήριξαν και με ενθάρρυναν κατά τη διάρκεια της ακαδημαϊκής μου πορείας.

Περίληψη

Η αξιοποίηση των αγροτικών αποβλήτων αποτελεί βασική συνιστώσα της κυκλικής οικονομίας, καθώς συμβάλλει στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, στην αποδοτικότερη χρήση των φυσικών πόρων και στην παραγωγή προϊόντων και ενέργειας με προστιθέμενη αξία. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση των δυνατοτήτων αξιοποίησης των αγροτικών υπολειμμάτων στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας, μέσω της συστηματικής μελέτης της σύγχρονης επιστημονικής βιβλιογραφίας.

Για την επίτευξη του σκοπού αυτής, ακολουθήθηκε βιβλιογραφική μεθοδολογία, βασισμένη στην ανασκόπηση και αξιολόγηση πρόσφατων επιστημονικών δημοσιεύσεων σχετικά με τα χαρακτηριστικά των αγροτικών αποβλήτων, τις διεργασίες αξιοποίησης τους, τα περιβαλλοντικά και τεχνοοικονομικά οφέλη που προκύπτουν από την εφαρμογή τους, καθώς και τις προκλήσεις και τις προοπτικές που σχετίζονται με την ευρύτερη υιοθέτησή τους.

Τα ευρήματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης υποδεικνύουν ότι οι τεχνολογίες αξιοποίησης, όπως η αναερόβια χώνευση, η κομποστοποίηση, η παραγωγή βιοκαυσίμων και οι θερμοχημικές διεργασίες, συμβάλουν ουσιαστικά στην παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας, στην ανάκτηση πολύτιμων πόρων και στην μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, σε σχέση με τη διαχείριση των γεωργικών απορριμμάτων. Παράλληλα, διαπιστώθηκε ότι η αποτελεσματική εφαρμογή αυτών των τεχνολογιών επηρεάζεται από οικονομικούς, τεχνικούς και οργανωτικούς παράγοντες, γεγονός που καθιστά αναγκαία την ενίσχυση της συνεργασίας μεταξύ των εμπλεκόμενων φορέων, την προώθηση της καινοτομίας και την υιοθέτηση κατάλληλων πολιτικών υποστήριξης.

Συμπερασματικά, η αξιοποίηση των αγροτικών αποβλήτων έχει την δυνατότητα να αποτελέσει βασικό εργαλείο για την προώθηση της κυκλικής οικονομίας στον αγροτικό τομέα, συμβάλλοντας τόσο στην προστασία περιβάλλοντος όσο και στη βιώσιμη ανάπτυξη μέσω της αποδοτικότερης αξιοποίησης των διαθέσιμων πόρων.

Λέξεις Κλειδιά

Αγροτικά απόβλητα, Κυκλική οικονομία, Αναερόβια χώνευση, Κομποστοποίηση, Αξιοποίηση αποβλήτων.

Abstract

Agricultural waste valorization has become a key component of the circular economy, contributing to environmental protection, efficient resource utilization, and the production of value-added products and renewable energy. The aim of this thesis is to investigate the potential for agricultural waste valorization within the framework of the circular economy through a systematic review of the recent scientific literature.

To achieve this objective, a literature review methodology was adopted, focusing on recent scientific publications addressing the characteristics of agricultural waste, the main valorization technologies, their environmental and techno-economic benefits, as well as the challenges and future prospects associated with their implementation.

The literature review demonstrated that technologies such as anaerobic digestion, composting, biofuel production, and thermochemical conversion can significantly contribute to renewable energy generation, resource recovery, and the reduction of environmental impacts related to agricultural waste management. Furthermore, the findings indicate that the successful implementation of these technologies depends not only on technological advancement but also on economic feasibility, stakeholder collaboration, knowledge dissemination, and the adoption of supportive policies.

In conclusion, agricultural waste valorization represents an essential strategy for promoting the circular economy in the agricultural sector. By transforming agricultural residues into valuable resources, these practices can support sustainable development, improve resource efficiency, and enhance the environmental and economic sustainability of agricultural production systems.

Keywords

Agricultural waste, Circular economy, Waste valorization, Anaerobic digestion, Composting.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	2
Περίληψη	2
Λέξεις Κλειδιά.....	3
Abstract	3
Keywords.....	4
Περιεχόμενα	4
Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων.....	5
Κατάλογος Πινάκων	5
Εισαγωγή	7
Κεφάλαιο 1: Αγροτικά απόβλητα.....	9
1.1 Ορισμός και ταξινόμηση αγροτικών αποβλήτων.....	9
1.2 Φυτικά Υπολείμματα.....	11
1.3 Κτηνοτροφικά απόβλητα	11
1.4 Αγροτοβιομηχανικά απόβλητα	13
Κεφάλαιο 2: Κυκλική οικονομία και αγροτικός τομέας.....	15
2.1 Βασικές αρχές της κυκλικής οικονομίας.....	15
2.2 Πολιτικές και στρατηγικές της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την κυκλική οικονομία.....	17
2.3 Ο ρόλος των αγροτικών αποβλήτων στα κυκλικά συστήματα.	18
2.4 Περιβαλλοντικά, κοινωνικά και οικονομικά οφέλη της κυκλικής οικονομίας.....	20
Κεφάλαιο 3: Τεχνολογίες αξιοποίησης αγροτικών αποβλήτων.....	21
3.1 Τεχνολογίες μετατροπής βιομάζας	21
3.2 Αναερόβια χώνευση	23

3.2.1 Αρχές και στάδια της διεργασίας	24
3.2.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση	26
3.2.3 Παραγωγή βιοαερίου και ενεργειακή αξιοποίηση.....	28
3.3 Συμπληρωματικές και εναλλακτικές τεχνολογίες	30
3.3.1 Κομποστοποίηση	30
3.3.2 Παραγωγή βιοκαυσίμων	31
3.3.3 Θερμοχημικές διεργασίες.....	32
Κεφάλαιο 4: Περιβαλλοντική και τεχνοοικονομική αξιολόγηση	35
4.1 Περιβαλλοντικά οφέλη από την αξιοποίηση αγροτικών αποβλήτων	35
4.2 Μείωση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.....	37
4.3 Τεχνοοικονομικές παράμετροι αξιοποίησης αγροτικών αποβλήτων	39
Κεφάλαιο 5: Προκλήσεις και περιορισμοί στην αξιοποίηση αγροτικών αποβλήτων	39
5.1 Προκλήσεις για την αξιοποίηση των αγροτικών αποβλήτων στον ελληνικό αγροτικό τομέα	40
5.2 Κοινωνικοί παράγοντες	41
5.3 Προοπτικές και προτάσεις για την ενίσχυση της αξιοποίησης αγροτικών αποβλήτων	42
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα.....	43
6.1 Συμπεράσματα.....	43
6.2 Συμβολή και σημασία της διπλωματικής εργασίας.....	44

Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων

Σχήμα 1.1. Ποσοστιαία κατανομή αγροτικών αποβλήτων στην Ελλάδα το 2013 (Vlyssides et al., 2015). _____ 14

Εικόνα 2.1. Στρατηγικοί στόχοι της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την Κυκλική Οικονομία (European Commission, 2025). _____ 19

Σχήμα 3.1. Στάδια αναερόβιας χώνευσης (Προσαρμογή από Alengebawy et al. 2024). _____ 26

Σχήμα 3.2. Παραγωγή βιοαερίου και αξιοποίηση των προϊόντων της αναερόβιας χώνευσης στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας (Προσαρμογή από Alengebawy et al. 2024 και Rekleitis et al. 2020). _____ 30

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1. Τυπικές συγκεντρώσεις ρυπαντικών παραμέτρων σε αγροτικά απόβλητα (Abo, L et al., 2025) _____ 16

Πίνακας 3.1. Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση της αναερόβιας χώνευσης (Προσαρμογή από Γαλαζούλας (2020) και Alengebawy et al. (2024). _____ 27

Πίνακας 3.2. Σύγκριση των βασικών τεχνολογιών αξιοποίησης αγροτικών αποβλήτων (Προσαρμογή από Waqas et al. 2023, Prado-Acebo et al. 2024, Priyanka et al. 2024 και Ufitikirezi et al. 2024).

35

Πίνακας 4.1. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ανεξέλεγκτης διάθεσης και οφέλη από την αξιοποίηση αγροτικών αποβλήτων (Rekleitis et al. (2020); Alengebawy et al. (2024) και European Commission (2020).

37

Πίνακας 4.2. Κύρια αέρια θερμοκηπίου που σχετίζονται με τα αγροτικά απόβλητα (Alengebawy et al., 2024 και European Commission, 2020).

39

Εισαγωγή

Η μετάβαση προς ένα βιώσιμο μοντέλο ανάπτυξης σγκροτεί μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις της σύγχρονης εποχής, καθώς η αυξανόμενη κατανάλωση φυσικών πόρων και η συνεχής παραγωγή αποβλήτων δημιουργούν σημαντικές περιβαλλοντικές, οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις. Στο πλαίσιο αυτό, η κυκλική οικονομία προωθεί ένα νέο πρότυπο διαχείρισης των πόρων, το οποίο βασίζεται στη μείωση της παραγωγής αποβλήτων, στην επαναχρησιμοποίηση των υλικών και στην αξιοποίηση των υποπροϊόντων, με κύριο στόχο τη διατήρηση της αξίας τους για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Ο αγροτικός τομέας διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη μετάβαση αυτή, καθώς παράγει μεγάλες ποσότητες οργανικών υπολειμμάτων, τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν ως πολύτιμοι πόροι αντι να αντιμετωπίζονται ως απόβλητα.

Η αξιοποίηση των αγροτικών αποβλήτων μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στην παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας, στην ανάκτηση πολύτιμων υλικών, στη βελτίωση

της γονιμότητας των εδαφών και στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκαλεί η ανεξέλεγκτη διάθεσή τους. Ταυτόχρονα, τεχνολογίες όπως η αναερόβια χώνευση, η κομποστοποίηση, η παραγωγή βιοκαυσίμων και οι θερμοχημικές διεργασίες έχουν αναδειχθεί ως βασικά εργαλεία για την αποτελεσματική αξιοποίηση της αγροτικής βιομάζας και την εφαρμογή των αρχών της κυκλικής οικονομίας. Ωστόσο, η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των διαθέσιμων αποβλήτων, τις τεχνικές απαιτήσεις, τις οικονομικές δυνατότητες και τις τοπικές συνθήκες εφαρμογής.

Η πρόσφατη επιστημονική βιβλιογραφία επιβεβαιώνει ότι η αξιοποίηση των αγροτικών αποβλήτων αποτελεί έναν από τους βασικούς πυλώνες της κυκλικής οικονομίας, καθώς συμβάλλει τόσο στη μείωση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης όσο και στην παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας και προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας. Οι Prado-Acebo et al. (2024) υπογραμμίζουν ότι η αξιοποίηση της αγροτικής βιομάζας μέσω κατάλληλων τεχνολογιών μπορεί να μειώσει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και να ενισχύσει την αποδοτικότερη χρήση των φυσικών πόρων, ενώ οι Ufitikirezi et al. (2024) αναδεικνύουν τη σημασία των θερμοχημικών διεργασιών ως αποτελεσματικών λύσεων για την ενεργειακή αξιοποίηση της λιγνοκυτταρινούχας βιομάζας.

Παρότι η διεθνής βιβλιογραφία περιλαμβάνει μεγάλο αριθμό μελετών σχετικά με επιμέρους τεχνολογίες αξιοποίησης ή συγκεκριμένες κατηγορίες αγροτικών αποβλήτων, παρατηρείται περιορισμένος αριθμός εργασιών που προσεγγίζουν το ζήτημα συνολικά, συνδυάζοντας το θεωρητικό υπόβαθρο της κυκλικής οικονομίας, τις διαθέσιμες τεχνολογίες αξιοποίησης, τα περιβαλλοντικά και τεχνοοικονομικά οφέλη τους, καθώς και τις προκλήσεις που εξακολουθούν να επηρεάζουν την εφαρμογή τους. Η ανάγκη για μια ολοκληρωμένη βιβλιογραφική σύνθεση καθίσταται ιδιαίτερα σημαντική, καθώς μπορεί να συμβάλει στη συνολική κατανόηση των δυνατοτήτων και των περιορισμών που σχετίζονται με την αξιοποίηση των αγροτικών αποβλήτων.

Η καινοτομία της παρούσας διπλωματικής εργασίας έγκειται στην ολοκληρωμένη σύνθεση της σύγχρονης επιστημονικής βιβλιογραφίας σχετικά με την αξιοποίηση των αγροτικών αποβλήτων υπό το πρίσμα της κυκλικής οικονομίας. Ειδικότερα, επιχειρείται η συνδυαστική παρουσίαση των κυριότερων τεχνολογιών αξιοποίησης,

των περιβαλλοντικών και τεχνοοικονομικών οφελών που προκύπτουν από την εφαρμογή τους, καθώς και των σημαντικότερων προκλήσεων και προοπτικών που διαμορφώνονται για τον αγροτικό τομέα.

Με βάση τα παραπάνω, το βασικό επιστημονικό ερώτημα που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι κατά πόσο η αξιοποίηση των αγροτικών αποβλήτων, μέσω των διαθέσιμων τεχνολογιών, μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στην εφαρμογή των αρχών της κυκλικής οικονομίας και στη βιώσιμη ανάπτυξη του αγροτικού τομέα.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση των δυνατοτήτων αξιοποίησης των αγροτικών αποβλήτων στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας μέσω της συστηματικής ανασκόπησης της σύγχρονης επιστημονικής βιβλιογραφίας. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού, η εργασία επιδιώκει να παρουσιάσει τις βασικές κατηγορίες αγροτικών αποβλήτων και τα χαρακτηριστικά τους, να αναλύσει τις κυριότερες τεχνολογίες αξιοποίησής τους, να αξιολογήσει τα περιβαλλοντικά και τεχνοοικονομικά οφέλη που προκύπτουν από την εφαρμογή τους και να αναδείξει τις σοβαρές προκλήσεις και προοπτικές που σχετίζονται με την ευρύτερη διαχείριση των αγροτικών αποβλήτων στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας.

Κεφάλαιο 1: Αγροτικά απόβλητα

Τις τελευταίες δεκαετίες, η εντατικοποίηση της γεωργικής και κτηνοτροφικής παραγωγής έχει οδηγήσει σε σημαντική αύξηση των γεωργικών αποβλήτων. Εάν δεν τύχουν σωστής διαχείρισης, τα απόβλητα αυτά μπορούν να προκαλέσουν περιβαλλοντική ρύπανση (εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, ρύπανση των υδάτων και του εδάφους). Ωστόσο, στο πλαίσιο μιας κυκλικής οικονομίας, τα γεωργικά απόβλητα έχουν επαναπροσδιοριστεί ως δευτερογενής πόρος με δυνατότητα παραγωγής ενέργειας, βιοκαυσίμων και βιοπροϊόντων (Rekleitis et al.,2020). Η αξιοποίηση τεχνολογιών όπως η αναερόβια χώνευση για την επεξεργασία γεωργικών αποβλήτων αποτελεί μέρος της έννοιας της βιοδιύλισης, στην οποία τα οργανικά υπολείμματα μετατρέπονται σε βιοαέριο, βιομεθάνιο, λιπάσματα και άλλα προϊόντα υψηλής προστιθέμενης αξίας.

1.1 Ορισμός και ταξινόμηση αγροτικών αποβλήτων

Ως αγροτικά απόβλητα, ορίζονται τα οργανικά υπολείμματα που προκύπτουν από γεωργικές, κτηνοτροφικές και αγροτοβιομηχανικές δραστηριότητες. Πιο συγκεκριμένα, είναι αποτελέσματα από τις απορροές καλλιεργήσιμων εκτάσεων, κτηνοτροφικών μονάδων και από εγκαταστάσεις επεξεργασίας γεωργικών προϊόντων. Οι κατηγορίες των αγροτικών προϊόντων είναι οι εξής: Φυτικά απόβλητα, κτηνοτροφικά απόβλητα και αγροτοβιομηχανικά απόβλητα (Rekleitis et al.,2020). Η ταξινόμηση αυτών των υπολειμμάτων γίνεται με βάση την σύστασή τους, την προέλευσή, το περιεχόμενο της οργανικής τους ύλης και την αξιοποίησή τους σε ενέργεια. Κάποια παραδείγματα αγροτικών αποβλήτων είναι τα υπολείμματα από ελαιοτριβεία, από οينوποιεία, η χρήση φυτοφαρμάκων κ.ο.κ. (Mehmet Melikoglu and Tekin,2024). Ωστόσο, αυτά τα απόβλητα περιλαμβάνουν μια ποικιλία παραπροϊόντων, όπως για παράδειγμα τα νιτρικά άλατα, τα φωσφορικά άλατα, βαρέα μέταλλα, πτητικές οργανικές ενώσεις, ενδεικτικές τιμές αυτών των παραμέτρων παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.1., με αντίκτυπο οι συγκεντρώσεις αυτές να αποτελέσουν κύριο παράγοντα στην ρύπανση υδάτινων πόρων, μέσω της απορροής λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων, στην επιβάρυνση του φαινομένου του θερμοκηπίου και στην υποβάθμιση της ποιότητας του εδάφους.

Τα αγροτικά απόβλητα χαρακτηρίζονται από μεγάλη ετερογένεια ως προς τη σύστασή και την προέλευσή τους, γεγονός που επηρεάζει άμεσα τον τρόπο διαχείρισης και αξιοποίησής τους. Η ποσότητα και τα χαρακτηριστικά τους διαφοροποιούνται ανάλογα με το είδος της παραγωγικής δραστηριότητας, τις καλλιεργητικές πρακτικές και τις τοπικές συνθήκες. Για τον λόγο αυτό, η ταξινόμησή τους αποτελεί βασική προϋπόθεση για την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου επεξεργασίας. Τα φυτικά υπολείμματα μπορούν να αξιοποιηθούν για κομποστοποίηση ή παραγωγή ενέργειας, τα κτηνοτροφικά απόβλητα για παραγωγή βιοαερίου, ενώ τα αγροτοβιομηχανικά απόβλητα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ανάκτηση πολύτιμων συστατικών και προϊόντων προστιθέμενης αξίας.

Η ανεξέλεγκτη διάθεση των γεωργικών υπολειμμάτων έχει την δυνατότητα να προκαλέσει πολλές επιπτώσεις στο οικοσύστημα και στη δημόσια υγεία, καθιστώντας αναγκαία την εφαρμογή ολοκληρωμένων πρακτικών διαχείρισης. Στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας, τα αγροτικά απόβλητα δεν αντιμετωπίζονται πλέον

ως άχρηστα υλικά προς απόρριψη, αλλά ως δευτερογενείς πόροι που μπορούν να επανενταχθούν στον παραγωγικό κύκλο, συμβάλλοντας στην εξοικονόμηση φυσικών πόρων και στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος.

1.2 Φυτικά Υπολείμματα

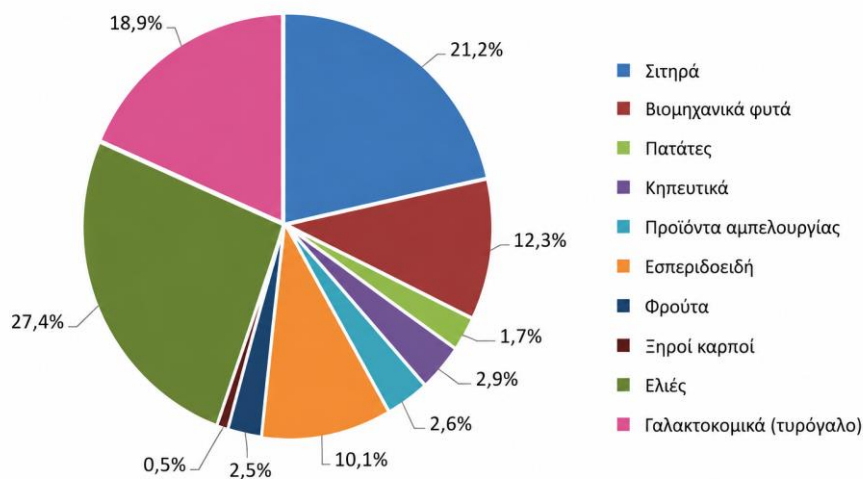
Τα φυτικά απόβλητα αποτελούν μια από τις σημαντικότερες κατηγορίες αγροτικών αποβλήτων, όπου προκύπτουν από την πρωτογενή γεωργική παραγωγή, είναι δηλαδή αυτά όπου προέρχονται από καλλιεργητικές δραστηριότητες και αποτελούνται από άχυρο σιτηρών, υπολείμματα από καλαμπόκι, φύλλα, απορρίμματα βαμβακιού και λαχανικών, κλάδεμα δενδρωδών καλλιεργειών κ.α. Τα απόβλητα αυτά χαρακτηρίζονται με μεγάλη πηγή λιγνοκυτταρινούχας βιομάζας, όπως είναι η κυτταρίνη, ημικυτταρίνη και λιγνίνη, γεγονός που τα καθιστά βιοαποδομήσιμα υλικά και υλικά που μπορούν να μετατραπούν σε βιοαέριο, ενώ η λιγνίνη είναι ανθεκτική στην μικροβιακή αποδόμηση, γεγονός σημαντικό για την αναερόβια χώνευση (Alengebawy et al., 2024). Η ποσότητα των φυτικών αποβλήτων που παράγεται παγκοσμίως είναι ιδιαίτερα μεγάλη, καθώς συνδέεται άμεσα με την ένταση και την έκταση της γεωργικής δραστηριότητας. Η παραγωγή τους παρουσιάζει εποχικότητα και διαφοροποιείται ανάλογα με το είδος της καλλιέργειας, τις κλιματικές συνθήκες και τις εφαρμοζόμενες γεωργικές πρακτικές. Παράλληλα, τα φυτικά υπολείμματα αποτελούν σημαντική δεξαμενή οργανικής ύλης και θρεπτικών στοιχείων, όπως άνθρακα, αζώτου, φωσφόρου και καλίου, τα οποία διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη γονιμότητα των εδαφών και στη λειτουργία των αγροτικών οικοσυστημάτων. Η αποτελεσματική διαχείριση των φυτικών αποβλήτων αποτελεί αντικείμενο ιδιαίτερου επιστημονικού ενδιαφέροντος, καθώς η συσσώρευσή τους ή η ανεξέλεγκτη διάθεσή τους μπορεί να προκαλέσει περιβαλλοντικά προβλήματα. Για τον λόγο αυτό, η κατανόηση των χαρακτηριστικών και της σύστασής τους είναι απαραίτητη για τον σχεδιασμό κατάλληλων στρατηγικών διαχείρισης και αξιοποίησης.

1.3 Κτηνοτροφικά απόβλητα

Τα κτηνοτροφικά απόβλητα αποτελούν μία από τις σημαντικότερες κατηγορίες αγροτικών αποβλήτων και παράγονται κατά τη διαδικασία εκτροφής ζώων σε

κτηνοτροφικές και πτηνοτροφικές μονάδες. Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται κυρίως οι ακαθαρσίες και τα ούρα των ζώων, τα λύματα ζωοτροφών, καθώς και τα υγρά απόβλητα που προκύπτουν από τον καθαρισμό των εγκαταστάσεων. Η σύσταση και η ποσότητα των παραγόμενων αποβλήτων εξαρτώνται από το είδος του ζώου, το σύστημα εκτροφής, τη διατροφή και τις συνθήκες διαχείρισης της μονάδας. Τα κτηνοτροφικά απόβλητα χαρακτηρίζονται από υψηλή περιεκτικότητα σε οργανική ύλη, υγρασία και θρεπτικά στοιχεία, όπως άζωτο, φώσφορο και κάλιο. Τα χαρακτηριστικά αυτά τα καθιστούν σημαντική πηγή οργανικών πόρων, αλλά παράλληλα δημιουργούν κινδύνους για το περιβάλλον όταν η διαχείρισή τους δεν πραγματοποιείται με κατάλληλο τρόπο. Η ανεξέλεγκτη διάθεσή τους μπορεί να οδηγήσει σε ρύπανση επιφανειακών και υπόγειων υδάτων, υποβάθμιση της ποιότητας του εδάφους, καθώς και εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, όπως το μεθάνιο (CH_4) και το υποξείδιο του αζώτου (N_2O) (Γαλαζούλας, 2020).

Η αποτελεσματική διαχείριση των κτηνοτροφικών αποβλήτων αποκτά ολοένα και μεγαλύτερη σημασία, καθώς συνδυάζει την προστασία του περιβάλλοντος με τη δυνατότητα αξιοποίησης πολύτιμων φυσικών πόρων. Η υψηλή περιεκτικότητά τους σε οργανική ύλη και θρεπτικά στοιχεία δημιουργεί σημαντικές προοπτικές για την παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας και οργανικών εδαφοβελτιωτικών μέσω κατάλληλων τεχνολογιών επεξεργασίας. Με τον τρόπο αυτό, τα κτηνοτροφικά απόβλητα μπορούν να ενταχθούν στον κύκλο της παραγωγής, μειώνοντας τις περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις και ενισχύοντας την εφαρμογή των αρχών της κυκλικής οικονομίας στον πρωτογενή τομέα.



Σχήμα 1.1. Ποσοστιαία κατανομή αγροτικών αποβλήτων στην Ελλάδα το 2013 (Vlyssides et al., 2015).

1.4 Αγροτοβιομηχανικά απόβλητα

Τα αγροτοβιομηχανικά λύματα προέρχονται από διάφορες διεργασίες μεταποίησης γεωργικών και κτηνοτροφικών προϊόντων και θεωρούνται μια από τις βασικότερες κατηγορίες οργανικών αποβλήτων παγκοσμίως. Τα υπολείμματα που ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία είναι στερεά και υγρά, όπου παράγονται κατά την επεξεργασία φρούτων, λαχανικών, σταφυλιών, ελαιοκάρπων, δημητριακών, γάλακτος και κρέατος. Ένα ενδεικτικό παράδειγμα αγροτοβιομηχανικών αποβλήτων αποτελούν τα απόβλητα από ελαιοτριβείο, οινοποιείο, καθώς και τα οργανικά υπολείμματα της βιομηχανίας φρούτων και λαχανικών (Prado-Acebo et al., 2024). Τα απόβλητα αυτά αποτελούνται από υψηλή περιεκτικότητα οργανικής ύλης, υγρασία και βιοαποδομήσιμα συστατικά, ενώ ταυτόχρονα περιέχουν σημαντικές ποσότητες υδατανθράκων, πρωτεϊνών, λιπιδίων και φαινολικών ενώσεων. Η σύστασή τους αλλάζει ανάλογα με την πρώτη ύλη και τη μέθοδο επεξεργασίας που χρησιμοποιείται. Λόγω του υψηλού οργανικού φορτίου τους, η ανεξέλεγκτη διάθεση τους, έχει την δυνατότητα να προκαλέσει σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως είναι η ρύπανση των επιφανειακών και των υπόγειων υδάτων, η αύξηση εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου και η αλλοίωση της ποιότητας του εδάφους (Prado-Acebo et al., 2024).

Η ορθολογική διαχείριση των αγροτοβιομηχανικών αποβλήτων μπορεί να συμβάλει σημαντικά στην ενίσχυση της κυκλικής οικονομίας, καθώς προωθεί την επαναχρησιμοποίηση των παραπροϊόντων και τη μείωση της κατανάλωσης πρωτογενών πρώτων υλών. Η αξιοποίησή τους δημιουργεί νέες δυνατότητες για την ανάπτυξη καινοτόμων παραγωγικών διαδικασιών, στις οποίες τα υπολείμματα μιας βιομηχανικής δραστηριότητας μπορούν να αποτελέσουν πρώτη ύλη για μια άλλη. Με τον τρόπο αυτό περιορίζεται η παραγωγή αποβλήτων, ενισχύεται η αποδοτική χρήση των διαθέσιμων πόρων και δημιουργούνται πρόσθετα οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη για τον αγροδιατροφικό τομέα.

Αναφορικά με πρόσφατες μελέτες, η κατηγορία αυτών των αποβλήτων δεν πρέπει να αντιμετωπίζεται αποκλειστικά ως υλικά προς απόρριψη, αλλά ως πολύτιμες δευτερογενείς πρώτες ύλες, με δυνατότητες αξιοποίησης, καθώς πολλά από τα συστατικά τους έχουν την δυνατότητα να ανακτηθούν και να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή βιοενέργειας, βιοκαυσίμων και άλλων προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας (Prado-Acebo et al., 2024). Με κύριο στόχο η μείωση των αποβλήτων και η αποτελεσματικότερη αξιοποίηση φυσικών πόρων. Η σωστή ταξινόμηση και ο χαρακτηρισμός αυτών των αποβλήτων είναι από τις βασικές προϋποθέσεις για την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου επεξεργασίας και αξιοποίησής τους, διότι η φυσικοχημική τους σύσταση, η περιεκτικότητα σε υγρασία και η παρουσία οργανικών ενώσεων καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τις δυνατότητες επεξεργασίας τους σε χρήσιμα προϊόντα και ενέργεια (Priyanka et al., 2024)

Πίνακας 1.1. Τυπικές συγκεντρώσεις ρυπαντικών παραμέτρων σε αγροτικά απόβλητα (Abo, L et al., 2025)

Παράμετρος	Συγκέντρωση
Νιτρικά Άλατα	10 – 100 mg/L
BOD	10 – 500 mg/L
COD	50 – 5000 mg/L
Φαινολικές Ενώσεις	0,1 – 100 mg/L
Φωσφορικά Άλατα (PO^{3-}_4)	0,1 – 20 mg/L
Φυτοφάρμακα	0,01 – 10 $\mu\text{g/L}$
Αιωρούμενα Σωματίδια	10 – 1000 mg/L
Βαρέα Μέταλλα	0,01 – 10 mg/L
Πτητικές Οργανικές Ενώσεις	0,1 – 100 mg/L

Κεφάλαιο 2: Κυκλική οικονομία και αγροτικός τομέας

2.1 Βασικές αρχές της κυκλικής οικονομίας

Η αυξανόμενη χρήση φυσικών πόρων, η παραγωγή τεράστιων ποσοτήτων αποβλήτων και οι επιπτώσεις της για την περιβαλλοντική εξέλιξη οδήγησαν στο να δοθεί δημόσια προσοχή στην εφαρμογή βιώσιμων τρόπων παραγωγής και κατανάλωσης. Σε αυτό το πλαίσιο, η κυκλική οικονομία “δημιουργήθηκε” ως εναλλακτικό αναπτυξιακό μοντέλο που στοχεύει στην επίτευξη της πιο αποτελεσματικής χρήσης των πόρων και στη μείωση της παραγωγής αποβλήτων αναπτύχθηκε (Kirchherr et al., 2017).

Ένα γραμμικό οικονομικό μοντέλο βασισμένο στη λογική του «λήψη– κατασκευή– χρήση – απόρριψη», κατά το οποίο οι πρώτες ύλες εξορύσσοντας, μετατρέπονται σε προϊόντα και απορρίπτονται μετά το τέλος της ωφέλιμης ζωής τους. Η αύξηση της

ζήτησης για φυσικούς πόρους μαζί με τα απόβλητα που παράγονται από αυτούς καθιστούν αυτό το μοντέλο μη βιώσιμο σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα, σύμφωνα με την ΕΕ (European Commission, 2025). Για αυτό η κυκλική οικονομία συμπεριφέρεται ως ένα νέο παραγωγικό μοντέλο που στοχεύει στη διατήρηση και αποθήκευση αξίας προϊόντων, υλικών και πόρων για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα (Γαλαζούλας, 2020).

Σύμφωνα με τους Geissdoerfer (Geissdoerfer et al., 2017), η κυκλική οικονομία ορίζεται ως ένα σύστημα στο οποίο οι ροές υλικών και ενέργειας οργανώνονται ώστε να ελαχιστοποιείται η εξαγωγή πόρων, η παραγωγή αποβλήτων και να συνεισφέρει στην αειφόρο ανάπτυξη (Γαλαζούλας, 2020). Στόχος είναι η σύνδεση της οικονομικής ανάπτυξης με την περιβαλλοντική προστασία και παράλληλα την δημιουργία κοινωνικής και οικονομικής αξίας.

Ένα από τα βασικά δομικά στοιχεία της κυκλικής οικονομίας είναι η αρχή «3R» (Reduce, Reuse, Recycle), δηλαδή η Μείωση αφορά τον περιορισμό της χρήσης πρώτων υλών και ενέργειας, η Επαναχρησιμοποίηση αφορά την παράταση της ωφέλιμης ζωής των αγαθών, ενώ η Ανακύκλωση λειτουργεί ως τρόπος ώστε τα υλικά να εισέρχονται εκ νέου στον κύκλο παραγωγής. Στη νεότερη, ωστόσο, βιβλιογραφία, οι πρακτικές αυτές συμπληρώνονται με άλλες στρατηγικές, συμπεριλαμβανομένης της επισκευής ή της ανακαίνισης προϊόντων, καθώς και της ανάκτησης υλικών και ενέργειας στο τέλος του κύκλου ζωής μέσω ανακύκλωσης (Priyanka et al., 2024; European Commission, 2025; EFS Consulting, 2025)

Η έννοια της κυκλικής οικονομίας στηρίζεται σε τρεις θεμελιώδεις αρχές, την εξαφάνιση των αποβλήτων και της ρύπανσης μέσω κατάλληλου σχεδιασμού, την χρήση προϊόντων και υλικών για όσο τον δυνατόν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα και την αναγέννηση των φυσικών συστημάτων (Ellen MacArthur Foundation, 2023). Οι τρεις αυτές αρχές συμβάλλουν στη μετάβαση από ένα σύστημα συνεχούς κατανάλωσης πόρων, σε ένα σύστημα όπου οι πόροι θα επαναχρησιμοποιούνται και θα εντάσσονται συνεχόμενα στον παραγωγικό κύκλο.

Ως αναφορά τον αγροτικό τομέα, η εφαρμογή της κυκλικής οικονομίας παρουσιάζει σημαντικές προοπτικές εξέλιξης. Τα αγροτικά υπολείμματα έχουν την δυνατότητα να αξιοποιηθούν ως δευτερογενείς πρώτες ύλες για την παραγωγή βιοενέργειας, οργανικών λιπασμάτων και άλλων προϊόντων υψηλής προστιθέμενης

αξίας, με σημαντικό αποτέλεσμα μείωσης της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης λόγω της αδιάκοπης διάθεσης τους, ενώ παράλληλα αυξάνεται η αποδοτικότητα των πόρων και η βιωσιμότητα των γεωργικών συστημάτων (Kirchherr et al., 2017).

Τέλος, η κυκλική οικονομία δεν θεωρείται μόνο μια στρατηγική διαχείρισης αποβλήτων, αλλά ταυτόχρονα και ένα ολοκληρωμένο αναπτυξιακό μοντέλο που έχει στόχο την οικονομική ευημερία, ακολουθούμενη από την περιβαλλοντική ποιότητα. (Kirchherr et al., 2017). Την σημασία της έννοιας της κυκλικής οικονομίας, έχει αναπτύξει η Ευρωπαϊκή Ένωση, η οποία έχει υιοθετήσει ένα ολοκληρωμένο πλάνο δράσεων για τη μετάβαση προς ένα κυκλικό μοντέλο ανάπτυξης.

2.2 Πολιτικές και στρατηγικές της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την κυκλική οικονομία

Η υιοθέτηση αρχών κυκλικής οικονομίας αποτελεί μια από τις βασικότερες προτεραιότητες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, καθώς συνδέεται άμεσα με τη βιώσιμη ανάπτυξη, την αποδοτικότερη χρήση των φυσικών πόρων και υλικών, καθώς και την αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών προκλήσεων (Geissdoerfer et al., 2017). Η αύξηση της παραγωγής των αποβλήτων και τα περιβαλλοντικά ζητήματα που αναπτύχθηκαν από την ανεξέλεγκτη διάθεση αυτών, αποτέλεσαν βασικές προτεραιότητες για την Ευρωπαϊκή Ένωση. Στο πλαίσιο αυτό, έχουν αναπτυχθεί στρατηγικές και μέτρα που ενθαρρύνουν τη διατήρηση της αξίας των προϊόντων και των υλικών στην οικονομία για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, συμβάλλοντας παράλληλα στην αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και της αυξανόμενης παραγωγής αποβλήτων (European Commission, 2025).

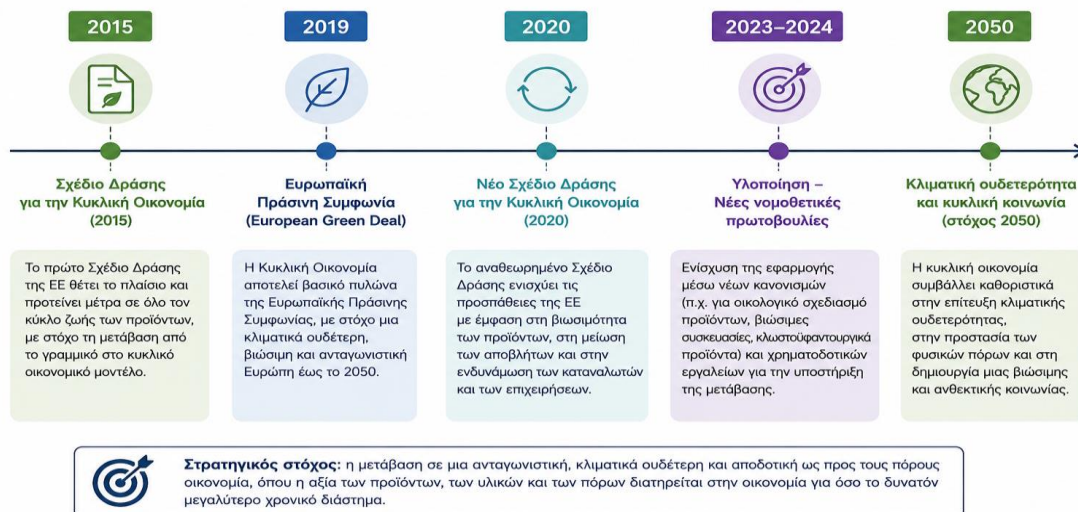
Το 2015 η Ευρωπαϊκή Ένωση ξεκίνησε την ενσωμάτωση του πρώτου Σχεδίου Δράσης για την κυκλική οικονομία, με κύριο σκοπό δράσεις που αφορούν τον σχεδιασμό προϊόντων, την αύξηση της απόδοσης της διαχείρισης αποβλήτων, την ενίσχυση της ανακύκλωσης και την αποτελεσματικότερη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων. Στόχος της ΕΕ ήταν η σταδιακή μετάβαση σε ένα οικονομικό σύστημα με ικρότερη εξάρτηση από πρωτογενείς πρώτες ύλες και χαμηλότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα (European Commission, 2025).

Το 2020 υπήρξε σημαντική εξέλιξη με το νέο Σχέδιο Δράσης για την Κυκλική Οικονομία, το οποίο εντάχθηκε στην Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία (European

Green Deal). Το σχέδιο αυτό δίνει ιδιαίτερη έμφαση στη βιωσιμότητα των προϊόντων, στην αύξηση της διάρκειας ζωής τους, στη δυνατότητα επισκευής και επαναχρησιμοποίησης, καθώς και στην μείωση της παραγωγής αποβλήτων σε όλους τους παραγωγικούς τομείς, όπως για παράδειγμα στον αγροτικό τομέα (European Commission, 2025).

Ο αγροτικός τομέας είναι ένα κατάλληλο υπόδειγμα και κατέχει ιδιαίτερη θέση στις ευρωπαϊκές στρατηγικές για την κυκλική οικονομία, διότι παράγει σημαντικές ποσότητες οργανικών υπολειμμάτων και βιομάζας. Η αξιοποίηση αυτών των υλικών μπορεί να ενισχύει στην μείωση των υπολειμμάτων, στην παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας και στην ανάκτηση θρεπτικών στοιχείων, όπως θα αναλύσουμε και παρακάτω. Για τον λόγο αυτό, η ΕΕ επιδιώκει και ενθαρρύνει την ανάπτυξη τεχνολογιών για την επαναχρησιμοποίηση των αγροτικών πόρων και την μετατροπή των αποβλήτων σε υποπροϊόντα με αξία (Βετζανάκης, 2024).

Συνοπτικά, η θέση και οι πολιτικές της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την κυκλική οικονομία δημιουργούν το απαραίτητο θεσμικό πλαίσιο για την εξέλιξη και προώθηση βιώσιμων μορφών παραγωγής και κατανάλωσης, ενώ παράλληλα, ενισχύει τις δυνατότητες αξιοποίησης των αγροτικών αποβλήτων, τα οποία μπορούν να λειτουργήσουν ως σημαντικοί πόροι στο πλαίσιο ενός κυκλικού και περιβαλλοντικά φιλικού μέλλοντος.



Πηγή: European Commission (2015, 2019, 2020, 2023).

Εικόνα 2.1. Στρατηγικοί στόχοι της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την Κυκλική Οικονομία (European Commission, 2025).

2.3 Ο ρόλος των αγροτικών αποβλήτων στα κυκλικά συστήματα.

Τα αγροτικά απόβλητα θεωρούνται από τα πιο κεντρικά τμήματα της παραγόμενης βιομάζας και έχουν την δυνατότητα να αποτελέσουν καθοριστικό ρόλο στην εφαρμογή των στόχων της κυκλικής οικονομίας. Παλαιότερα, τα αγροτικά απόβλητα των γεωργικών και κτηνοτροφικών δραστηριοτήτων αντιμετωπίζονταν ως ανεπιθύμητα παραπροϊόντα και διαχειρίζονταν με τρόπο ο να δημιουργούν περιβαλλοντικά ζητήματα. Σήμερα, έχει εξελιχθεί σε μεγάλο βαθμό η αντίληψη των αγροτικών υπολειμμάτων, καθώς πλέον θεωρούνται πολύτιμοι πόροι, με γνώμονα την ένταξή τους στον παραγωγικό κύκλο μέσω κατάλληλων τεχνολογιών αξιοποίησης (Kirchherr et al., 2017).

Η κυκλική οικονομία στοχεύει στην διατήρηση των υλικών και των πόρων σε χρήση για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Στο πλαίσιο αυτό, τα αγροτικά απόβλητα έχουν την δυνατότητα να αξιοποιηθούν ως δευτερογενείς πρώτες ύλες για την παραγωγή ενέργειας, λιπασμάτων και άλλων προϊόντων, με αποτέλεσμα να μειώνεται η ανάγκη για χρήση νέων φυσικών πόρων και να μειώνεται η ποσότητα των αποβλήτων που καταλήγουν στο περιβάλλον (Ellen MacArthur Foundation, 2023).

Τα φυτικά υπολείμματα, όπως τα άχυρα, τα κλαδέματα και τα υπολείμματα καλλιεργειών, καθώς και τα κτηνοτροφικά απόβλητα, όπως οι κοπριές και τα υγρά απόβλητα εκτροφών, περιέχουν σημαντικές ποσότητες οργανικής ύλης και θρεπτικών στοιχείων. Η αξιοποίηση αυτών των υπολειμμάτων παίζει καθοριστικό ρόλο για την ανάκτηση της ενέργειας και για την επιστροφή θρεπτικών συστατικών στο έδαφος, ενισχύοντας την βιωσιμότητα των αγροτικών συστημάτων παραγωγής (Rekleitis et al., 2020).

Ιδιαίτερη θέση στα κυκλικά συστήματα κατέχει η παραγωγή βιοενέργειας μέσω αναερόβιας χώνευσης. Η διαδικασία αυτή μετατρέπει τα οργανικά απόβλητα σε βιοαέριο, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας, ενώ ταυτόχρονα τα υπολείμματα που προκύπτουν από την διεργασία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως οργανικό λίπασμα, με σκοπό την ανακύκλωση των θρεπτικών στοιχείων και στη μείωση χημικών λιπασμάτων (Alengebawy et al., 2024). Ταυτόχρονα εκτός από την αναερόβια χώνευση, αναντικατάστατες δυνατότητες αξιοποίησης κατέχουν η κομποστοποίηση, η

παραγωγή βιοκαυσίμων και οι θερμοχημικές διεργασίες, όπως η πυρόλυση και η αεριοποίηση. Οι τεχνολογίες αυτές επιτρέπουν τη μετατροπή των αγροτικών αποβλήτων σε χρήσιμα προϊόντα, ενισχύοντας την ανάκτηση υλικών και ενέργειας και στη μείωση της εξάρτησης από συμβατικούς πόρους (Alengebawy et al., 2024).

Η αξιοποίηση των αγροτικών αποβλήτων μέσω κυκλικών πρακτικών προάγει την επανένταξη πολύτιμων πόρων στον παραγωγικό κύκλο και ενισχύει τη βιωσιμότητα του αγροτικού τομέα. Στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας, τα αγροτικά απόβλητα παύουν να θεωρούνται υλικά προς απόρριψη και αντιμετωπίζονται ως δευτερογενείς πόροι, οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ενέργειας, λιπασμάτων και άλλων προϊόντων προστιθέμενης αξίας (Rekleitis et al., 2020).

Η ενσωμάτωση των αγροτικών αποβλήτων σε κυκλικά συστήματα παραγωγής δεν περιορίζεται μόνο στη μείωση των αποβλήτων, αλλά διευκολύνει και τη δημιουργία ενός περισσότερο αποδοτικού και ανθεκτικού αγροδιατροφικού συστήματος. Η αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων εντός της ίδιας παραγωγικής αλυσίδας μειώνει τις απώλειες υλικών και ενέργειας, ενισχύει την αποδοτικότητα των εκμεταλλεύσεων και δημιουργεί νέες δυνατότητες οικονομικής ανάπτυξης για τον αγροτικό τομέα. Τέλος, η εφαρμογή κυκλικών πρακτικών καθιστά εφικτή την επίτευξη των στόχων της βιώσιμης ανάπτυξης και της προστασίας του περιβάλλοντος.

2.4 Περιβαλλοντικά, κοινωνικά και οικονομικά οφέλη της κυκλικής οικονομίας

Η εφαρμογή της κυκλικής οικονομίας συνεισφέρει σημαντικά στην βιώσιμη διαχείριση των φυσικών πόρων και στην μείωση περιβαλλοντικών προβλημάτων που έχουν άμεση σχέση με την ανεξέλεγκτη αγροτική δραστηριότητα και κατανάλωση. Μέσω των διαδικασιών της επαναχρησιμοποίησης, της ανακύκλωσης και την αξιοποίησης των αποβλήτων, μειώνεται ιδανικά η κατανάλωση πρώτων υλών και περιορίζεται η παραγωγή απορριμμάτων (European Commission, 2020). Η αξιοποίηση των γεωργικών, κτηνοτροφικών και άλλων απορριμμάτων, που προέρχονται από τον αγροτικό τομέα, επιδρά στη μείωση της περιβαλλοντικής ρύπανσης, καθώς περιορίζεται η ανεξέλεγκτη διάθεσης τους και επιπρόσθετα μειώνονται οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Επιπλέον, ενισχύεται η αποδοτικότερη χρήση των διαθέσιμων πόρων από την διαδικασία παραγωγής βιοενέργειας και οργανικών λιπασμάτων από τα απόβλητα αυτά (Rekleitis et al.,

2020). Εκτός από τα περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα, η κυκλική οικονομία δημιουργεί και κοινωνικά οφέλη, καθώς ενισχύει στη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας, που σχετίζονται με τη διαχείριση και αξιοποίηση αποβλήτων και στην ανάπτυξη των αγροτικών περιοχών. Ακόμη, προάγει την περιβαλλοντική ευαισθητοποίηση και προωθεί πιο βιώσιμες πρακτικές (European Commission, 2025). Ως αναφορά τα οικονομικά οφέλη, η αξιοποίηση των αγροτικών υπολειμμάτων έχει την δυνατότητα να μειώνεται το κόστος διαχείρισης αποβλήτων, την εξοικονόμηση πόρων και την δημιουργία νέων πηγών εισοδήματος μέσα από την παραγωγή ενέργειας και προϊόντων προστιθέμενης αξίας από αγροτικά υπολείμματα (Βετζανάκης, 2024). Συνεπώς, η κυκλική οικονομία αποτελεί ένα ολοκληρωμένο μοντέλο βιώσιμης ανάπτυξης που συνδυάζει περιβαλλοντικά, κοινωνικά και οικονομικά οφέλη, αναδεικνύοντας τα αγροτικά απόβλητα ως πολύτιμους πόρους με δυνατότητες πολλαπλής αξιοποίησης.

Κεφάλαιο 3: Τεχνολογίες αξιοποίησης αγροτικών αποβλήτων

3.1 Τεχνολογίες μετατροπής βιομάζας

Η αυξανόμενη παραγωγή αγροτικών και αγροτοβιομηχανικών αποβλήτων δημιουργεί κρίσιμες περιβαλλοντικές και διαχειριστικές προκλήσεις, αλλά ταυτόχρονα προσφέρει καίριες ευκαιρίες ανάκτησης πόρων και στην δημιουργία προϊόντων προστιθέμενης αξίας. Η αξιοποίηση της βιομάζας που προέρχεται από γεωργικές δραστηριότητες αποτελεί βασικό στοιχείο της κυκλικής οικονομίας, καθώς επιτρέπει τη μετατροπή των αποβλήτων σε χρήσιμα προϊόντα, συμβάλλοντας παράλληλα στη μείωση της κατανάλωσης φυσικών πόρων και στην προστασία του περιβάλλοντος (Geissdoerfer et al., 2017; Kirchherr et al., 2017). Στο πλαίσιο αυτό, η εφαρμογή κατάλληλων τεχνολογιών μετατροπής βιομάζας επιτρέπει την ενεργειακή αξιοποίηση των αποβλήτων και τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων λόγω της διάθεσής τους.

Τα απόβλητα αυτά ποικίλουν ως προς τη χημική τους σύσταση, την περιεκτικότητα σε υγρασία και το οργανικό τους φορτίο. Με αποτέλεσμα, η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας για επεξεργασία εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της πρώτης ύλης, τις

τεχνικές απαιτήσεις της διεργασίας και το επιθυμητό τελικό προϊόν. Σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες, τα αγροτοβιομηχανικά υπολείμματα μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ενέργειας, βιοκαυσίμων, οργανικών λιπασμάτων και άλλων προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας, συμβάλλοντας στην ανάπτυξη πιο βιώσιμων συστημάτων παραγωγής (Prado-Acebo et al., 2024; Priyanka et al., 2024).

Μια από τις κομβικές διεργασίες αξιοποίησης γεωργικών αποβλήτων είναι η αναερόβια χώνευση. Η διεργασία αυτή εφαρμόζεται κυρίως σε οργανικά υποστρώματα με υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία, όπως ζωικά απόβλητα, αγροτοβιομηχανικά υπολείμματα και οργανικά κλάσματα γεωργικών αποβλήτων. Μέσω της διεργασίας αυτής δημιουργείται βιοαέριο, το οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί για την παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και χωνεμένο υπόλειμμα (digestate), το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως οργανικό λίπασμα ή εδαφοβελτιωτικό υλικό. Η αξιοποίηση αυτή συμβάλλει στη μείωση της συσσώρευσης αποβλήτων, ενισχύει την ενεργειακή ασφάλεια και περιορίζει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, αποτελώντας μια σημαντική προσέγγιση στο πλαίσιο της κυκλικής βιοοικονομίας (Alengebawy et al., 2024; Rekleitis et al., 2020).

Ταυτόχρονα με την αναερόβια χώνευση, σημαντική τεχνολογία αξιοποίησης αγροτικών αποβλήτων αποτελεί η κομποστοποίηση. Πρόκειται για μία αερόβια βιολογική διεργασία κατά την οποία η οργανική ύλη αποδομείται μέσω της δράσης μικροοργανισμών, οδηγώντας στην παραγωγή ενός σταθεροποιημένου προϊόντος γνωστού ως κομπόστ. Το παραγόμενο κομπόστ είναι πλούσιο σε οργανική ουσία και θρεπτικά συστατικά και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό υλικό στη γεωργία, συμβάλλοντας στη βελτίωση της γονιμότητας και της δομής του εδάφους. Ταυτόχρονα, η εφαρμογή της κομποστοποίησης μειώνει τις ποσότητες οργανικών αποβλήτων που οδηγούνται σε τελική διάθεση και προάγει την ανακύκλωση των θρεπτικών στοιχείων στο αγροτικό περιβάλλον (Παρλαβάντζας, 2021).

Εκτός από τις βιολογικές διεργασίες, η αξιοποίηση της βιομάζας μπορεί να πραγματοποιηθεί και μέσω θερμοχημικών τεχνολογιών. Οι τεχνολογίες αυτές εφαρμόζονται κυρίως σε πρώτες ύλες με χαμηλότερη περιεκτικότητα σε υγρασία και βασίζονται στη μετατροπή της οργανικής ύλης μέσω της επίδρασης υψηλών θερμοκρασιών. Η καύση αποτελεί την απλούστερη και πιο διαδεδομένη θερμοχημική διεργασία, κατά την οποία η βιομάζα οξειδώνεται πλήρως για την παραγωγή

θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται ευρέως για την ενεργειακή αξιοποίηση γεωργικών υπολειμμάτων, ωστόσο απαιτεί αποτελεσματικά συστήματα ελέγχου εκπομπών για τον περιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Priyanka et al., 2024).

Μια επιπλέον βασική θερμοχημική διεργασία είναι η πυρόλυση, η οποία πραγματοποιείται με την απουσία ή την παρουσία πολύ περιορισμένων ποσοτήτων οξυγόνου. Κατά τη διεργασία αυτή παράγονται τρία κύρια προϊόντα, το βιοέλαιο (bio-oil), ο βιοάνθρακας (biochar) και τα αέρια προϊόντα. Ο βιοάνθρακας παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω της δυνατότητάς του να χρησιμοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό υλικό, βελτιώνοντας τη γονιμότητα του εδάφους και συμβάλλοντας στη δέσμευση άνθρακα. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι το παραγόμενο βιοέλαιο μπορεί να αποτελέσει εναλλακτική ανανεώσιμη πηγή ενέργειας ή πρώτη ύλη για περαιτέρω επεξεργασία (Prado-Acebo et al., 2024).

Η αεριοποίηση αποτελεί μία ακόμη θερμοχημική τεχνολογία μετατροπής βιομάζας, κατά την οποία η οργανική ύλη μετατρέπεται σε συνθετικό αέριο (syngas) μέσω μερικής οξειδωσης σε υψηλές θερμοκρασίες. Το παραγόμενο αέριο περιλαμβάνεται κυρίως από μονοξείδιο του άνθρακα, υδρογόνο και μικρές ποσότητες μεθανίου και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, θερμότητας ή χημικών προϊόντων. Η τεχνολογία αυτή παρουσιάζει καθοριστικές δυνατότητες για την ενεργειακή αξιοποίηση γεωργικών υπολειμμάτων, ιδιαίτερα σε περιοχές με μεγάλες ποσότητες διαθέσιμης βιομάζας (Prado-Acebo et al., 2024; Priyanka et al., 2024).

Συνολικά, οι τεχνολογίες μετατροπής βιομάζας συγκροτούν βασικό εργαλείο για τη βιώσιμη διαχείριση των αγροτικών αποβλήτων και την προώθηση της κυκλικής οικονομίας. Μέσω της παραγωγής ενέργειας, βιοκαυσίμων, οργανικών λιπασμάτων και άλλων προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας, οι τεχνολογίες αυτές συμβάλλουν στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, στην εξοικονόμηση φυσικών πόρων και στη δημιουργία ενός πιο βιώσιμου παραγωγικού μοντέλου (Geissdoerfer et al., 2017; Kirchherr et al., 2017; Zorpas, 2024).

3.2 Αναερόβια χώνευση

Η αναερόβια χώνευση είναι μια από τις πιο κομβικές τεχνολογίες βιολογικής επεξεργασίας οργανικών αποβλήτων και εφαρμόζεται ευρέως για την αξιοποίηση γεωργικών, κτηνοτροφικών και αγροτοβιομηχανικών υπολειμμάτων. Η διεργασία αυτή πραγματοποιείται με απουσία οξυγόνου και βασίζεται στη συνεργατική δράση διαφόρων ομάδων μικροοργανισμών, οι οποίοι μετατρέπουν την οργανική ύλη σε βιοαέριο και χωνεμένο υπόλειμμα (digestate). Η διεργασία αυτή συμβάλλει τόσο στη διαχείριση των οργανικών αποβλήτων όσο και στην παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας, ενώ παράλληλα υποστηρίζει τις αρχές της κυκλικής οικονομίας με την ανάκτηση πόρων και με την μείωση περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Alengebawy et al., 2024; Rekleitis et al., 2023). Η τεχνολογία της αναερόβιας χώνευσης χρησιμοποιείται ως αποτελεσματική μέθοδος μετατροπής της βιομάζας σε ενέργεια και αποτελεί μια από τις πιο βιώσιμες επιλογές για την αξιοποίηση αγροτικών και κτηνοτροφικών λυμάτων. Η αναερόβια χώνευση πραγματοποιείται μέσω τεσσάρων διαδοχικών βιοχημικών σταδίων, κατά τα οποία η οργανική ύλη μετατρέπεται σταδιακά σε βιοαέριο. Τα στάδια αυτά είναι η υδρόλυση, η οξεογένεση, η ακετογένεση και η μεθανογένεση (Alengebawy et al., 2024).

3.2.1 Αρχές και στάδια της διεργασίας

Η αναερόβια διεργασία θεωρείται μια σύνθετη βιολογική διεργασία κατά την οποία η οργανική ύλη των αποβλήτων, όπως οι πρωτεΐνες, οι υδατάνθρακες, τα λιπίδια και άλλες σύνθετες οργανικές ενώσεις, αποσυντίθενται με απουσία οξυγόνου μέσω της δράσης διαφορετικών ομάδων μικροοργανισμών και μετατρέπεται σε βιοαέριο και χωνεμένο υπόλειμμα. Η μετατροπή αυτή πραγματοποιείται μέσω διαδοχικών βιοχημικών σταδίων, τα οποία λειτουργούν αλληλοσυμπληρωματικά και οδηγούν τελικά στην παραγωγή βιοαερίου. Τα βασικά στάδια της αναερόβιας χώνευσης είναι η υδρόλυση, η οξεογένεση, η ακετογένεση και η μεθανογένεση (Alengebawy et al., 2024; Γαλαζούλας, 2020). Η αποτελεσματικότητα της αναερόβιας χώνευσης εξαρτάται από την ομαλή εξέλιξη και τη συνεργασία όλων των σταδίων της διεργασίας. Κάθε στάδιο επιτελεί έναν διαφορετικό ρόλο στη σταδιακή διάσπαση της οργανικής ύλης και στη μετατροπή της σε ενώσεις που μπορούν να αξιοποιηθούν από τους μικροοργανισμούς του επόμενου σταδίου. Για τον λόγο αυτό, η διατήρηση

κατάλληλων συνθηκών λειτουργίας είναι απαραίτητη για τη σταθερή παραγωγή βιοαερίου και τη βέλτιστη απόδοση της διεργασίας. Τα βασικά χαρακτηριστικά των σταδίων της αναερόβιας χώνευσης παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 3.1.



Σχήμα 3.1. Στάδια αναερόβιας χώνευσης (Προσαρμογή από Alengebawy et al. 2024).

Η αναερόβια χώνευση είναι μια ολοκληρωμένη βιολογική διεργασία, κατά την οποία η οργανική ύλη μετατρέπεται σταδιακά σε βιοαέριο μέσω της συνεργασίας διαφορετικών ομάδων μικροοργανισμών. Η επιτυχής ολοκλήρωση όλων των σταδίων είναι απαραίτητη για τη σταθερότητα της διεργασίας και τη μεγιστοποίηση της παραγωγής βιοαερίου. Παράγοντες όπως η θερμοκρασία, το ασία, το ταση του υποστρώματος και ο χρόνος παραμονής επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση της διεργασίας και απαιτούν συνεχή παρακολούθηση και έλεγχο κατά τη λειτουργία των μονάδων αναερόβιας χώνευσης (Alengebawy et al., 2024). Η ορθή λειτουργία της διεργασίας οδηγεί όχι μόνο στην αποτελεσματική επεξεργασία των οργανικών αποβλήτων, αλλά και στην παραγωγή βιοαερίου, το οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας. Παράλληλα, το χωνεμένο

υπόλειμμα (digestate) μπορεί, μετά από κατάλληλη διαχείριση, να χρησιμοποιηθεί ως οργανικό εδαφοβελτιωτικό, συμβάλλοντας στην επιστροφή θρεπτικών στοιχείων στο έδαφος. Για τον λόγο αυτό, η αναερόβια χώνευση θεωρείται μία από τις σημαντικότερες τεχνολογίες αξιοποίησης αγροτικών αποβλήτων, καθώς συνδυάζει την παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας με την ανάκτηση πόρων και τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, υποστηρίζοντας έμπρακτα τις αρχές της κυκλικής οικονομίας.

3.2.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση

Η απόδοση της αναερόβιας χώνευσης επηρεάζεται από διάφορους λειτουργικούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες, οι οποίοι καθορίζουν τη δραστηριότητα των μικροοργανισμών και την αποτελεσματικότητα της παραγωγής βιοαερίου. Η διατήρηση κατάλληλων συνθηκών λειτουργίας είναι απαραίτητη για τη σταθερότητα της διεργασίας, καθώς ακόμη και μικρές μεταβολές ορισμένων παραμέτρων μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά την αποδόμηση της οργανικής ύλης και την παραγωγή μεθανίου. Οι σημαντικότεροι παράγοντες περιλαμβάνουν τη θερμοκρασία, το pH, τον λόγο άνθρακα προς άζωτο (C/N), τον χρόνο παραμονής του υποστρώματος στον χωνευτήρα, το οργανικό φορτίο και την περιεκτικότητα σε υγρασία (Γαλαζούλας, 2020; Alengebawy et al., 2024).

Πίνακας 3.1. Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση της αναερόβιας χώνευσης (Προσαρμογή από Γαλαζούλας (2020) και Alengebawy et al. (2024)).

Παράγοντας	Περιγραφή	Επίδραση στην απόδοση
Θερμοκρασία	Καθορίζει τη δραστηριότητα και τον ρυθμό ανάπτυξης των μικροοργανισμών.	Επηρεάζει άμεσα την αποδόμηση της οργανικής ύλης και την παραγωγή βιοαερίου.
pH	Επηρεάζει τη λειτουργία των μικροβιακών πληθυσμών και ιδιαίτερα των μεθανογόνων μικροοργανισμών.	Ακραίες τιμές μπορούν να μειώσουν σημαντικά την παραγωγή μεθανίου.

Λόγος C/N	Εκφράζει την αναλογία άνθρακα προς άζωτο στο υποστρώμα.	Η ισορροπημένη αναλογία ευνοεί τη μικροβιακή ανάπτυξη και τη σταθερότητα της διεργασίας.
Χρόνος παραμονής	Χρονικό διάστημα παραμονής του υποστρώματος στον χωνευτήρα.	Επηρεάζει τον βαθμό αποδόμησης της οργανικής ύλης.
Οργανικό φορτίο	Ποσότητα οργανικής ύλης που τροφοδοτείται στο σύστημα.	Υπερβολικές τιμές μπορούν να προκαλέσουν αστάθεια στη διεργασία.
Περιεκτικότητα σε υγρασία	Σχετίζεται με τη μεταφορά θρεπτικών συστατικών και τη μικροβιακή δραστηριότητα.	Επηρεάζει την αποτελεσματικότητα της βιοαποδόμησης.

Σύμφωνα με τον Πίνακα 3.1, η θερμοκρασία και το pH θεωρούνται ιδιαίτερα σημαντικά για τη σταθερή λειτουργία της αναερόβιας χώνευσης. Η θερμοκρασία επηρεάζει άμεσα τον μεταβολισμό και την ανάπτυξη των μικροοργανισμών, ενώ το pH καθορίζει την αποτελεσματικότητα των βιοχημικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό του χωνευτήρα. Η αναερόβια χώνευση μπορεί να πραγματοποιηθεί σε ψυχρόφιλες, μεσόφιλες και θερμόφιλες συνθήκες, με τις μεσόφιλες θερμοκρασίες να εφαρμόζονται συχνότερα λόγω της μεγαλύτερης σταθερότητας της διεργασίας. Αντίθετα, οι θερμόφιλες συνθήκες επιτρέπουν ταχύτερη αποδόμηση της οργανικής ύλης και αυξημένη παραγωγή βιοαερίου, απαιτούν όμως μεγαλύτερη ενεργειακή κατανάλωση και αυξημένο έλεγχο των συνθηκών λειτουργίας (Γαλαζούλας, 2020).

Παράλληλα, το pH θεωρείται κρίσιμος παράγοντας για τη λειτουργία των μεθανογόνων μικροοργανισμών, οι οποίοι είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι στις μεταβολές του. Η διατήρηση σχεδόν ουδέτερων συνθηκών ευνοεί την παραγωγή μεθανίου και συμβάλλει στη σταθερότητα της διεργασίας, ενώ σημαντικές αποκλίσεις μπορούν να περιορίσουν τη μικροβιακή δραστηριότητα και να μειώσουν την απόδοση του συστήματος (Alengebawry et al., 2024).

Εκτός από τις λειτουργικές παραμέτρους, σημαντικό ρόλο στην απόδοση της αναερόβιας χώνευσης παίζουν και τα χαρακτηριστικά της πρώτης ύλης. Η περιεκτικότητα του υποστρώματος σε οργανική ύλη, η υγρασία, η

βιοαποδομησιμότητα και η παρουσία πιθανών ανασταλτικών ενώσεων επηρεάζουν άμεσα την αποτελεσματικότητα της διεργασίας και την ποσότητα του παραγόμενου βιοαερίου. Για τον λόγο αυτό, η κατάλληλη επιλογή και προ επεξεργασία των αγροτικών και αγροτοβιομηχανικών αποβλήτων θεωρείται καθοριστικής σημασίας για τη βελτίωση της απόδοσης του συστήματος (Prado-Acebo et al., 2024; Priyanka et al., 2024).

Συνεπώς, η βελτιστοποίηση των συνθηκών λειτουργίας και η σωστή επιλογή του υποστρώματος αποτελούν βασικές προϋποθέσεις για την αποδοτική παραγωγή βιοαερίου και τη βιώσιμη αξιοποίηση αγροτικών και αγροτοβιομηχανικών αποβλήτων στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας (Rekleitis et al., 2020; Prado-Acebo et al., 2024).

3.2.3 Παραγωγή βιοαερίου και ενεργειακή αξιοποίηση

Η αναερόβια χώνευση αποτελεί μια από τις σημαντικότερες τεχνολογίες αξιοποίησης αγροτικών αποβλήτων, καθώς επιτρέπει την μετατροπή της οργανικής ύλης σε ανανεώσιμη ενέργεια και χρήσιμα παραπροϊόντα. Το κύριο προϊόν της διεργασίας είναι το βιοαέριο, το οποίο παράγεται κατά το στάδιο της μεθανογένεσης μέσω της δράσης εξειδικευμένων μικροοργανισμών. Η παραγωγή βιοαερίου συμβάλλει τόσο στη μείωση των αποβλήτων, όσο και στην ανάκτηση ενέργειας από υλικά που διαφορετικά θα κατέληγαν στο περιβάλλον, ενισχύοντας έτσι το "φαινόμενο" της κυκλικής οικονομίας (Rekleitis et al., 2020; Alengebawy et al., 2024).

Το βιοαέριο αποτελείται κυρίως από μεθάνιο (CH_4) και διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), ενώ σε μικρότερες ποσότητες περιέχει υδρατμούς, υδρόθειο και ίχνη άλλων αερίων. Η ακριβής σύστασή του εξαρτάται από το είδος του υποστρώματος, τις συνθήκες λειτουργίας του χωνευτήρα και τα χαρακτηριστικά της οργανικής ύλης που χρησιμοποιείται. Η υψηλή περιεκτικότητα σε μεθάνιο προσδίδει στο βιοαέριο σημαντική θερμογόνο δύναμη, γεγονός που το καθιστά πολύτιμη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας (Alengebawy et al., 2024).

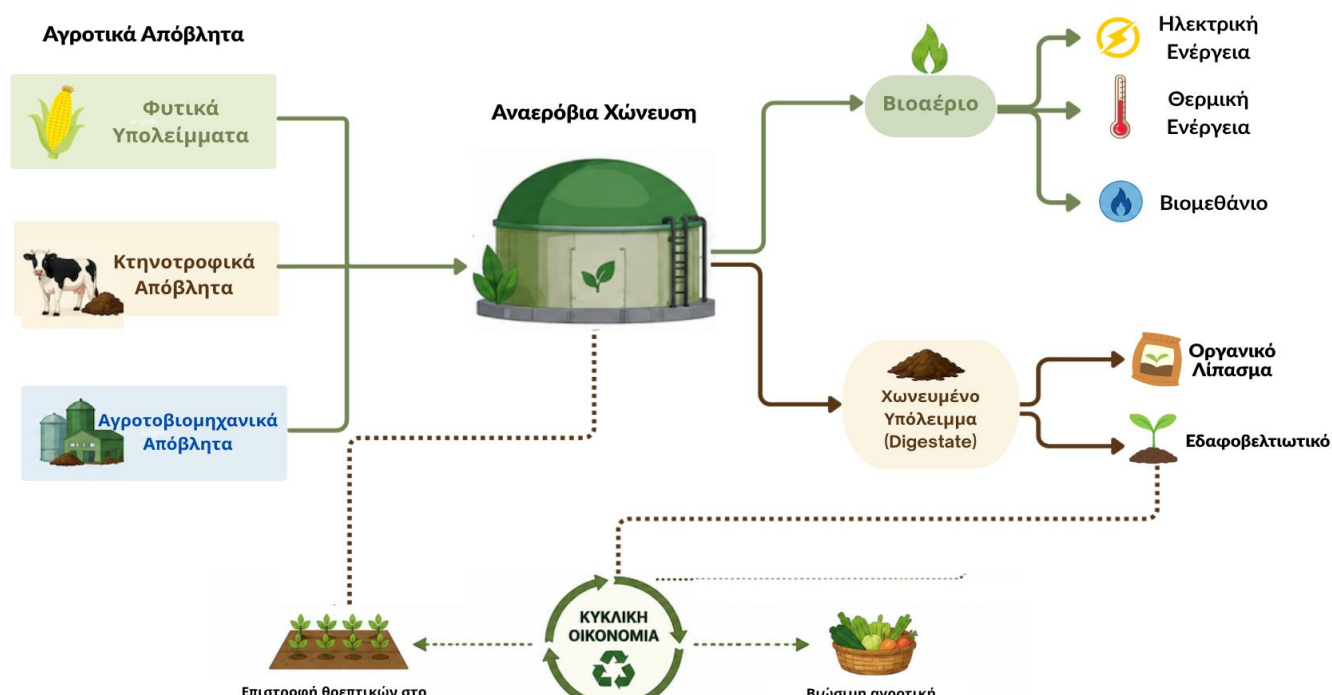
Η ενεργειακή αξιοποίηση του βιοαερίου πραγματοποιείται με διάφορους τρόπους. Η πιο σύνηθες εφαρμογή είναι η παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας μέσω μονάδων συμπαραγωγής, όπου το βιοαέριο χρησιμοποιείται ως καύσιμο για την

παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας. Η παραγόμενη θερμότητα έχει την δυνατότητα να αξιοποιηθεί για τη λειτουργία της ίδιας της μονάδας αναερόβιας χώνευσης ή για άλλες αγροτικές και βιομηχανικές χρήσεις, αυξάνοντας τη συνολική ενεργειακή απόδοση του συστήματος (Rekleitis et al., 2020).

Επιπλέον, μέσω κατάλληλων τεχνολογιών καθαρισμού και αναβάθμισης, το βιοαέριο έχει την δυνατότητα να μετατραπεί σε βιομεθάνιο. Το βιομεθάνιο έχει παρόμοια χαρακτηριστικά με το φυσικό αέριο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο οχημάτων ή να διοχετευθεί σε δίκτυα φυσικού αερίου. Η δυνατότητα αυτή συμβάλλει στη μείωση της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα και ενισχύει τη μετάβαση προς πιο βιώσιμα ενεργειακά συστήματα (Prado-Acebo et al., 2024).

Παράλληλα με την παραγωγή βιοαερίου, η αναερόβια χώνευση οδηγεί στη δημιουργία χωνεμένου υπολείμματος (digestate), το οποίο περιέχει σημαντικές ποσότητες οργανικής ύλης και θρεπτικών στοιχείων. Το υλικό αυτό μπορεί να αξιοποιηθεί ως οργανικό λίπασμα ή εδαφοβελτιωτικό, επιστρέφοντας πολύτιμα θρεπτικά συστατικά στο έδαφος και μειώνοντας την ανάγκη χρήσης χημικών λιπασμάτων. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η ανακύκλωση των πόρων και επανένταξη τους στον αγροτικό παραγωγικό κύκλο (Priyanka et al., 2024).

Συνεπώς, η αναερόβια χώνευση δεν αποτελεί μόνο μια τεχνολογία διαχείρισης αποβλήτων, αλλά και ένα ολοκληρωμένο σύστημα ανάκτησης ενέργειας και πόρων. Η παραγωγή βιοαερίου και η αξιοποίηση του digestate συμβάλλουν στη δημιουργία ενός κυκλικού μοντέλου διαχείρισης, στο οποίο τα αγροτικά απόβλητα μετατρέπονται σε προϊόντα υψηλής προστιθέμενης αξίας, ενισχύοντας την βιωσιμότητα του αγροτικού τομέα και την προστασία του περιβάλλοντος (Rekleitis et al., 2020; Prado-Acebo et al., 2024).



Σχήμα 3.2. Παραγωγή βιοαερίου και αξιοποίηση των προϊόντων της αναερόβιας χώνευσης στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας (Προσαρμογή από Alengebawy et al. 2024 και Rekleitis et al. 2020).

3.3 Συμπληρωματικές και εναλλακτικές τεχνολογίες

Παρότι η αναερόβια χώνευση θεωρείται μία από τις σημαντικότερες τεχνολογίες αξιοποίησης αφροτικών αποβλήτων, υπάρχουν και άλλες μέθοδοι επεξεργασίας αγροτικών αποβλήτων, που μπορούν να συμβάλλουν στην ανάκτηση πολύτιμων πόρων και στην παραγωγή προϊόντων προστιθέμενης αξίας. Η επιλογή της κατάλληλης διεργασίας εξαρτάται από τη σύσταση της βιομάζας, την περιεκτικότητα της σε υγρασία, καθώς και από το επιθυμητό τελικό προϊόν. Μεταξύ των σημαντικότερων συμπληρωματικών τεχνολογιών περιλαμβάνονται η κομποστοποίηση, η παραγωγή βιοκαυσίμων και οι θερμοχημικές διεργασίες, όπως είναι η πυρόλυση και η αεριοποίηση. Οι τεχνολογίες αυτές συμβάλλουν στη μείωση των αποβλήτων, στην ανάκτηση υλικών και ενέργειας και στην προώθηση της κυκλικής οικονομίας, προσφέροντας εναλλακτικές λύσεις για την βιώσιμη διαχείριση της αγροτικής βιομάζας (Prado-Acebo et al., 2024; Priyanka et al., 2024).

3.3.1 Κομποστοποίηση

Η κομποστοποίηση είναι μια από τις σημαντικότερες βιολογικές μεθόδους αξιοποίησης των αγροτικών αποβλήτων και βασίζεται στην αερόβια αποδόμηση της οργανικής ύλης από μικροοργανισμούς, με παρουσία οξυγόνου. Κατά την διαδικασία της κομποστοποίησης, φυτικά υπολείμματα, ζωικά απόβλητα και άλλα βιοαποικοδομήσιμα υλικά, μετατρέπονται σταδιακά σε ένα σταθεροποιημένο προϊόν, γνωστό ως κομποστ, το οποίο είναι πλούσιο σε οργανική ουσία και θρεπτικά

στοιχεία. Το κομποστ μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως οργανικό λίπασμα ή εδαφοβελτιωτικό, συμβάλλοντας στη βελτίωση της γονιμότητας, της δομής και της βιολογικής δραστηριότητας του εδάφους (Waqas et al., 2023).

Η διεργασία της κομποστοποίησης πραγματοποιείται μέσω της δράσης βακτηρίων, μυκήτων και άλλων μικροοργανισμών, ο οποίοι διασπούν την οργανική ύλη και παράγουν θερμότητα. Η τεχνολογία αυτή εξελίσσεται σε διαδοχικές φάσεις, από τη μεσόφιλη στη θερμόφιλη και στη συνέχεια στη φάση της ωρίμανσης, κατά την οποία σταθεροποιείται το τελικό προϊόν. Η αποτελεσματικότητα της κομποστοποίησης επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως η θερμοκρασία, η περιεκτικότητα σε υγρασία, η επάρκεια οξυγόνου, το μέγεθος των σωματιδίων και ο λόγος άνθρακα προς το άζωτο (C/N), η οποίοι καθορίζουν τη τη μικροβιακή δραστηριότητα και τον ρυθμό αποδόμησης της οργανικής ύλης (Waqas et al., 2023).

Η κομποστοποίηση αποτελεί μια φιλική προς το περιβάλλον τεχνολογία διαχείρισης αγροτικών αποβλήτων, καθώς μειώνει την ποσότητα των οργανικών υπολειμμάτων που οδηγούνται προς διάθεση και επιτρέπει την ανακύκλωση των θρεπτικών στοιχείων μέσω της επιστροφής τους στο έδαφος. Παράλληλα, περιορίζει την ανάγκη χρήσης ανόργανων λιπασμάτων, συμβάλλει στην γονιμότητα των γεωργικών εδαφών και ενισχύει τη βιώσιμη γεωργική παραγωγή. Στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας, η κομποστοποίηση μετατρέπει τα αγροτικά υπολείμματα σε έναν πολύτιμο πόρο, προωθώντας την αποδοτικότερη αξιοποίηση των φυσικών πόρων και την μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της γεωργικής δραστηριότητας (Oued Lhaj et al., 2024).

3.3.2 Παραγωγή βιοκαυσίμων

Η αξιοποίηση των αγροτικών αποβλήτων για την παραγωγή βιοκαυσίμων αποτελεί μια σύγχρονη προσέγγιση διαχείρισης της βιομάζας, καθώς επιτρέπει τη μετατροπή οργανικών υπολειμμάτων σε ανανεώσιμες μορφές ενέργειας, μειώνοντας παράλληλα την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που συνδέονται με τη χρήση τους. Ως πρώτες ύλες μπορούν να χρησιμοποιηθούν φυτικά υπολείμματα, αγροτοβιομηχανικά απόβλητα, ενεργειακές καλλιέργειες και άλλα λιγνοκυτταριχούχα υλικά, τα οποία, μέσω κατάλληλων βιομηχανικών ή

θερμοχημικών διεργασιών, μετατρέπονται σε βιοκαύσιμα υψηλής ενεργειακής αξίας (Prado-Acebo et al., 2024).

Τα κυριότερα βιοκαύσιμα που παράγονται από αγροτικά απόβλητα είναι η βιοαιθανόλη, το βιοντίζελ και το βιοαέριο. Η βιοαιθανόλη παράγεται κυρίως μέσω της ζύμωσης σακχαρούχων ή λιγνοκυτταρινούχων πρώτων υλών, ενώ το βιοντίζελ παράγεται από φυτικά ή χρησιμοποιημένα έλαια μέσω κατάλληλης χημικής επεξεργασίας. Αντίστοιχα, το βιοαέριο παράγεται με αναερόβια χώνευση οργανικών αποβλήτων και αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες μορφές ενεργειακής αξιοποίησης της αγροτικής βιομάζας. Η ανάπτυξη των τεχνολογιών αυτών διευρύνει τις δυνατότητες αξιοποίησης των αγροτικών υπολειμμάτων και ενισχύει την παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας (Prado-Acebo et al., 2024; Priyanka et al., 2024).

Η παραγωγή βιοκαυσίμων από αγροτικά απόβλητα εντάσσεται στις αρχές της κυκλικής οικονομίας, καθώς μετατρέπει υλικά χαμηλής οικονομικής αξίας σε χρήσιμα ενεργειακά προϊόντα. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται η ποσότητα των αποβλήτων που απορρίπτονται στο περιβάλλον, αξιοποιούνται αποτελεσματικότερα οι διαθέσιμοι βιολογικοί πόροι και δημιουργούνται νέες προοπτικές για τη βιώσιμη ανάπτυξη του αγροτικού τομέα. Παράλληλα, η ενσωμάτωση της παραγωγής βιοκαυσίμων σε ολοκληρωμένα συστήματα βιοδιύλισης επιτρέπει την ταυτόχρονη παραγωγή ενέργειας και άλλων προϊόντων βιολογικής προέλευσης, ενισχύοντας τη μετάβαση προς μια περισσότερο κυκλική και βιώσιμη βιοοικονομία (Prado-Acebo et al., 2024; Lu Feng et al., 2023).

3.3.3 Θερμοχημικές διεργασίες

Οι θερμοχημικές διεργασίες αποτελούν μία εναλλακτική τεχνολογία αξιοποίησης των αγροτικών αποβλήτων, ιδιαίτερα εκείνων που χαρακτηρίζονται από χαμηλή περιεκτικότητα σε υγρασία και υψηλή περιεκτικότητα σε λιγνοκυτταρινούχα συστατικά, όπως το άχυρο, τα στελέχη καλλιεργειών, τα κλαδέματα και άλλα ξυλώδη υπολείμματα. Σε αντίθεση με τις βιολογικές διεργασίες, όπως η αναερόβια χώνευση και η κομποστοποίηση, οι θερμοχημικές μέθοδοι βασίζονται στη θερμική μετατροπή της βιομάζας υπό ελεγχόμενες συνθήκες, οδηγώντας στην παραγωγή στερεών, υγρών και αέριων προϊόντων με ενεργειακή και βιομηχανική αξία. Οι σημαντικότερες θερμοχημικές διεργασίες είναι η πυρόλυση και η αεριοποίηση, οι οποίες συμβάλλουν

στην αποτελεσματική αξιοποίηση της αγροτικής βιομάζας και στην παραγωγή προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας (Ufitikirezi et al., 2024; Prado-Acebo et al., 2024).

Η πυρόλυση είναι μια διεργασία κατά την οποία η βιομάζα θερμαίνεται σε υψηλές θερμοκρασίες, χωρίς ή με ελάχιστη παρουσία οξυγόνου. Κατά τη διαδικασία αυτή παράγονται τρία κύρια προϊόντα: το βιοεξανθράκωμα (biochar), το βιοέλαιο (bio-oil) και τα καύσιμα αέρια. Τα προϊόντα αυτά μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ενέργειας, ενώ το βιοεξανθράκωμα χρησιμοποιείται και ως εδαφοβελτιωτικό, συμβάλλοντας στη βελτίωση των ιδιοτήτων του εδάφους και στην αποθήκευση άνθρακα (Ufitikirezi et al., 2024).

Η αεριοποίηση αποτελεί επίσης μια θερμοχημική διεργασία, κατά την οποία η βιομάζα μετατρέπεται, παρουσία περιορισμένης ποσότητας οξυγόνου ή ατμού, σε αέριο σύνθεσης (syngas). Το αέριο αυτό αποτελείται κυρίως από μονοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας ή ως πρώτη ύλη για την παραγωγή άλλων καυσίμων και χημικών προϊόντων. Η αεριοποίηση παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την ενεργειακή αξιοποίηση ξηρών αγροτικών υπολειμμάτων, καθώς επιτρέπει την αποδοτική μετατροπή της βιομάζας σε χρήσιμη μορφή ενέργειας (Ufitikirezi et al., 2024).

Οι θερμοχημικές διεργασίες παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την αξιοποίηση ξηρών αγροτικών υπολειμμάτων, τα οποία δεν είναι πάντοτε κατάλληλα για βιολογικές διεργασίες, όπως η αναερόβια χώνευση. Η δυνατότητα μετατροπής της λιγνοκυτταρινούχας βιομάζας σε καύσιμα και προϊόντα υψηλής προστιθέμενης αξίας διευρύνει τις επιλογές αξιοποίησης των αγροτικών αποβλήτων και συμβάλλει στη μείωση της εξάρτησης από συμβατικές πηγές ενέργειας. Παράλληλα, η αξιοποίηση αυτών των υπολειμμάτων περιορίζει την ανεξέλεγκτη απόρριψη ή καύση τους, μειώνοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και προωθώντας τη βιώσιμη διαχείριση της αγροτικής βιομάζας (Ufitikirezi et al., 2024).

Η εφαρμογή των θερμοχημικών τεχνολογιών συμβάλλει στη μείωση της ποσότητας των αγροτικών αποβλήτων που παραμένουν αναξιοποίητα, ενώ παράλληλα ενισχύει την παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας και την ανάκτηση προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας. Για τον λόγο αυτό, οι τεχνολογίες αυτές αποτελούν σημαντικό

μέρος των σύγχρονων στρατηγικών αξιοποίησης της βιομάζας και υποστηρίζουν τη μετάβαση προς ένα περισσότερο κυκλικό και βιώσιμο μοντέλο διαχείρισης των αγροτικών αποβλήτων (Ufitikirezi et al., 2024; Prado-Acebo et al., 2024).

Οι τεχνολογίες αξιοποίησης των αγροτικών αποβλήτων που παρουσιάστηκαν στο παρόν κεφάλαιο προσφέρουν διαφορετικές δυνατότητες διαχείρισης και αξιοποίησης της βιομάζας, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της πρώτης ύλης και τον επιδιωκόμενο σκοπό. Κάθε τεχνολογία εμφανίζει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και περιορισμούς, γεγονός που καθιστά αναγκαία τη συγκριτική αξιολόγησή τους. Στον Πίνακα 3.2 παρουσιάζονται συνοπτικά τα βασικά χαρακτηριστικά των τεχνολογιών που αναλύθηκαν, με στόχο τη διευκόλυνση της σύγκρισής τους.

Πίνακας 3.2. Σύγκριση των βασικών τεχνολογιών αξιοποίησης αγροτικών αποβλήτων (Προσαρμογή από Waqas et al. 2023, Prado-Acebo et al. 2024, Priyanka et al. 2024 και Ufitikirezi et al. 2024)

Τεχνολογία	Κύρια προϊόντα	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
<i>Αναερόβια χώνευση</i>	Βιοαέριο, χωνεμένο υπόλειμμα	Παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας, ανάκτηση θρεπτικών στοιχείων, μείωση οργανικών αποβλήτων.	Υψηλό κόστος εγκατάστασης, ανάγκη συνεχούς παρακολούθησης των συνθηκών λειτουργίας
<i>Κομποστοποίηση</i>	Κομποστ	Παραγωγή οργανικού λιπάσματος, βελτίωση της γονιμότητας του εδάφους, χαμηλό κόστος εφαρμογής	Μεγάλος χρόνος ωρίμανσης, ανάγκη ελέγχου θερμοκρασίας, υγρασίας και αερισμού
<i>Παραγωγή βιοκαυσίμων</i>	Βιοαιθανόλη, βιοντίζελ, βιοαέριο	Παραγωγή ανανεώσιμων καυσίμων, αξιοποίηση αγροτικών υπολειμμάτων, μείωση	Ανάγκη κατάλληλης πρώτης ύλης και εξειδικευμένων τεχνολογιών παραγωγής

χρήσης ορυκτών καυσίμων			
Πυρόλυση	Biochar, bio-oil, καύσιμα αέρια	Παραγωγή προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας, αξιοποίηση ξηρής βιομάζας	Υψηλές απαιτήσεις σε θερμοκρασία και εξοπλισμό, αυξημένο επενδυτικό κόστος
Αεριοποίηση	Syngas	Υψηλή ενεργειακή απόδοση, παραγωγή αερίου σύνθεσης για πολλαπλές χρήσεις	Πολύπλοκος εξοπλισμός, ανάγκη προεπεξεργασίας της βιομάζας και ελέγχου της διεργασίας

Κεφάλαιο 4: Περιβαλλοντική και τεχνοοικονομική αξιολόγηση

4.1 Περιβαλλοντικά οφέλη από την αξιοποίηση αγροτικών αποβλήτων

Η αξιοποίηση των αγροτικών αποβλήτων θεωρείται ένα ιδανικό εργαλείο για τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με τη γεωργική και κτηνοτροφική δραστηριότητα. Η ανεξέλεγκτη διάθεση φυτικών υπολειμμάτων, κτηνοτροφικών αποβλήτων και αγροτοβιομηχανικών παραπροϊόντων μπορεί να οδηγήσει σε ρύπανση των εδαφών και των υδάτινων πόρων, καθώς και σε αυξημένες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Για τον λόγο αυτό, η εφαρμογή κατάλληλων πρακτικών διαχείρισης και αξιοποίησης θεωρείται αναγκαία για την προστασία του περιβάλλοντος και τη βιώσιμη ανάπτυξη του αγροτικού τομέα (Rekleitis et al., 2020). Η περιβαλλοντική αξία της αξιοποίησης των αγροτικών αποβλήτων έγκειται κυρίως στην δυνατότητα πρόληψης στα φαινόμενα περιβαλλοντικής ρύπανσης, εξαιτίας της ανεξέλεγκτης συσσώρευσης ή διάθεσής τους, καθώς η παραμονή μεγάλων ποσοτήτων οργανικών αποβλήτων στο έδαφος μπορεί να επιφέρει υποβάθμιση της ποιότητας του εδάφους, σε επιβάρυνση των υδάτων και στην ανάπτυξη των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου. Αντίθετα, μέσω της εφαρμογής κατάλληλων τεχνολογιών επεξεργασίας και διαχείρισης, μειώνονται οι εδαφικές και οι υδάτινες επιβαρύνσεις και βελτιώνεται η περιβαλλοντική επίδοση των γεωργικών δραστηριοτήτων (Alengebawy et al., 2024; European Commission, 2020).

Η μη διαχείριση των οργανικών αυτών αποβλήτων μπορεί να προκαλέσει αυξημένες συγκεντρώσεις αζώτου και φωσφόρου στα επιφανειακά και υπόγεια ύδατα, οδηγώντας σε φαινόμενα ευτροφισμού και υποβάθμισης της ποιότητας του νερού. Όμως, μέσω της κατάλληλης επεξεργασίας και αξιοποίησης των γεωργικών λυμάτων, οι επιπτώσεις αυτές περιορίζονται σημαντικά, συμβάλλοντας στη διατήρηση της περιβαλλοντικής ισορροπίας των αγροτικών οικοσυστημάτων. Παράλληλα, η αξιοποίηση των αγροτικών αποβλήτων συμβάλλει στην προστασία των υδάτινων πόρων. Η ανεπαρκής διαχείριση οργανικών αποβλήτων μπορεί να προκαλέσει αυξημένες συγκεντρώσεις αζώτου και φωσφόρου στα επιφανειακά και υπόγεια ύδατα, οδηγώντας σε φαινόμενα ευτροφισμού και υποβάθμισης της ποιότητας του νερού. Μέσω της κατάλληλης επεξεργασίας και αξιοποίησης των αποβλήτων, οι κίνδυνοι αυτοί περιορίζονται σημαντικά, συμβάλλοντας στη διατήρηση της περιβαλλοντικής ισορροπίας των αγροτικών οικοσυστημάτων (European Commission, 2020).

Συνοπτικά, η περιβαλλοντική αξιοποίηση των αγροτικών λυμάτων, αποδεικνύει ότι η εφαρμογή σύγχρονων πρακτικών διαχείρισης μπορεί να επιφέρει κύριο πυλώνα για την μείωση της ρύπανσης, την προστασία των φυσικών πόρων και την ενίσχυση της βιωσιμότητας του αγροτικού κλάδου.

Οι σημαντικότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ανεξέλεγκτης διάθεσης αγροτικών αποβλήτων και τα αντίστοιχα οφέλη που προκύπτουν από την αξιοποίησή τους παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ανεξέλεγκτης διάθεσης και οφέλη από την αξιοποίηση αγροτικών αποβλήτων (Rekleitis et al. (2020); Alengebawy et al. (2024) και European Commission (2020).

Περιβαλλοντική παράμετρος	Ανεξέλεγκτη διάθεση αγροτικών αποβλήτων	Αξιοποίηση αγροτικών αποβλήτων
Ποιότητα Υδάτων	Ρύπανση επιφανειακών και υπόγειων υδάτων από οργανικό φορτίο, άζωτο και φώσφορο.	Περιορισμός της ρύπανσης μέσω κατάλληλης επεξεργασίας και διαχείρισης.

Ποιότητα Εδάφους	Υποβάθμιση εδαφικών χαρακτηριστικών και συσσώρευση ρύπων.	Βελτίωση της γονιμότητας του εδάφους, μέσω επιστροφής οργανικής ύλης και θρεπτικών στοιχείων.
Οργανικά Απόβλητα	Συσσώρευση υπολειμμάτων και αύξηση περιβαλλοντικού φορτίου.	Μείωση του όγκου των αποβλήτων μέσω αξιοποίησης και ανάκτησης πόρων.
Φυσικοί Πόροι	Απώλεια πολύτιμων θρεπτικών στοιχείων και βιομάζας.	Αποδοτικότερη διαχείριση και αξιοποίηση διαθέσιμων πόρων.
Περιβαλλοντική διαχείριση	Αυξημένος κίνδυνος περιβαλλοντικής ρύπανσης.	Ενίσχυση βιώσιμων τεχνολογιών διαχείρισης στον αγροτικό τομέα.

4.2 Μείωση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου

Η διαχείριση των αγροτικών λυμάτων αποτελεί από τους κυριότερους παράγοντες στον περιορισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, γεγονός που συμβάλει στην κλιματική αλλαγή του πλανήτη. Η ανεξакρίβωτη αποθήκευση ή διάθεση φυτικών και κτηνοτροφικών αποβλήτων οδηγεί στην απελευθέρωση σημαντικών ποσοτήτων μεθανίου (CH_4) και υποξείδιο του αζώτου (N_2O), αέρια τα οποία παρουσιάζουν υψηλό δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη σε σύγκριση με το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) (Alengebawy et al., 2024).

Τα κτηνοτροφικά λύματα ιδιαίτερα, όταν παραμένουν σε συνθήκες αποσύνθεσης, συνιστούν πηγή εκπομπής μεθανίου, ενώ παράλληλα η υπερβολική και ακατάλληλη διάθεση οργανικών αποβλήτων στο έδαφος μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλες ποσότητες εκπομπής υποξειδίου του αζώτου, λόγω μικροβιακών διεργασιών που σχετίζονται με τον κύκλο του αζώτου (Rekleitis et al. (2020); Alengebawy et al. (2024) και European Commission (2020).

Η αξιοποίηση των αγροτικών υπολειμμάτων σε διαδικασίες όπως η αναερόβια χώνευση, όπως αναλύσαμε παραπάνω, συμβάλλει σημαντικά στην μείωση των εκπομπών αυτών των αερίων, καθώς μέσα από αυτήν την τεχνολογία το παραγόμενο βιοαέριο συλλέγεται και χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενέργειας, αποτρέποντας

την αδιάκοπη απελευθέρωση μεθανίου στην ατμόσφαιρα. Επιπλέον, η παραγωγή ενέργειας μπορεί να υποκαταστήσει μέρος της ενέργειας που παράγεται από ορυκτά καύσιμα, συμβάλλοντας στην ελάττωση των συνολικών εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου (Rekleitis et al., 2020).

Επομένως, η εφαρμογή κατάλληλων πρακτικών αξιοποίησης των αγροτικών ρυπαντικών αποβλήτων θεωρείται σημαντικό “βήμα” για τον περιορισμό των αερίων του θερμοκηπίου και την υποστήριξη των στόχων βιώσιμης ανάπτυξης και κλιματικής αλλαγής, που έχουν τεθεί σε ευρωπαϊκό και διεθνές επίπεδο. Όπως φαίνεται και στον συνοπτικό Πίνακα 4.2, η διαχείριση αυτών των λυμάτων συνδέεται άμεσα με τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, για αυτό τον λόγο η υιοθέτηση δραστικών τεχνολογιών αξιοποίησής τους, όπως η αναερόβια χώνευση, συμβάλει σημαντικά στην καταστολή ρύπανσης και προστασίας κλιματικού και περιβαλλοντικού οικοσυστήματος.

Πίνακας 4.2. Κύρια αέρια θερμοκηπίου που σχετίζονται με τα αγροτικά απόβλητα (Alengebawy et al., 2024 και European Commission, 2020).

Αέριο	Πηγή εκπομπής	Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις
CO ₂	Καύση ορυκτών καυσίμων για γεωργικές εργασίες, μεταφορές και επεξεργασία.	Επιβάρυνση της κλιματικής αλλαγής και αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη.
CH ₄	Αποσύνθεση οργανικών αποβλήτων από την ανεξέλεγκτη παραγωγή κτηνοτροφικών αποβλήτων, αποθήκευση κοπριάς και οργανικών υπολειμμάτων.	Υψηλά επίπεδα υπερθέρμανσης του πλανήτη.
N ₂ O	Βιολογικές διεργασίες αζώτου στο έδαφος, εφαρμογή οργανικών και ανόργανων λιπασμάτων.	Ισχυρό αέριο του θερμοκηπίου και συμβάλει στην υποβάθμιση της στρατοσφαιρικής στιβάδας του όζοντος.

4.3 Τεχνοοικονομικές παράμετροι αξιοποίησης αγροτικών αποβλήτων

Η αξιοποίηση των αγροτικών αποβλήτων δεν παρουσιάζει μόνο περιβαλλοντικό ενδιαφέρον, αλλά και σπουδαίες οικονομικές προοπτικές. Η τεχνοοικονομική αξιολόγηση αποτελεί βασικό εργαλείο για την εκτίμηση της βιωσιμότητας των τεχνολογιών διαχείρισης, καθώς εξετάζει τόσο τις τεχνικές απαιτήσεις όσο και τα οικονομικά δεδομένα που επηρεάζουν την εφαρμογή τους (Melikoglu & Tekin, 2024).

Η οικονομική αποδοτικότητα των συστημάτων αξιοποίησης των αποβλήτων εξαρτάται από την διαθεσιμότητα και την σύνθεση της πρώτης ύλης, καθώς η ύπαρξη επαρκούς ποσότητας λυμάτων σε μικρή γεωγραφική περιοχή, μπορεί να μειώσει το κόστος συλλογής και μεταφοράς, το οποίο συχνά είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες κόστους της βιοενέργειας (Vlyssides et al., 2015).

Η ανταγωνιστικότητα του αγροτικού τομέα βελτιώνεται και ενισχύεται η οικονομική απόδοση, λόγω της ανάπτυξης δραστηριοτήτων μετατροπής αποβλήτων σε ενέργεια. Η δυνατότητα αυτής της αξιοποίησης επιφέρει κομβικές και ακραίες ιδέες ανάπτυξης και εξέλιξης του αγροτικού κλάδου (Prado-Acebo et al., 2024).

Ένας ακόμη πρωταρχικός παράγοντας είναι οι τεχνικές προδιαγραφές λειτουργίας των εγκαταστάσεων. Το κόστος του εξοπλισμού, το κόστος της συντήρησης, οι ενεργειακές απαιτήσεις και η τεχνογνωσία, απαιτούν οικονομική βιωσιμότητα της επιχείρησης, για την σωστή λειτουργία της (Rekleitis et al., 2020).

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, η επιτυχής εφαρμογή πρακτικών μετατροπής των αγροτικών αποβλήτων προϋποθέτει την ισορροπία μεταξύ τεχνικής αποτελεσματικότητας και οικονομικής βιωσιμότητας. Η αξιολόγηση των παραγόντων αυτών είναι ουσιαστική για τον σχεδιασμό και την ανάπτυξη συστημάτων που μπορούν να λειτουργήσουν αποδοτικά και μακροχρόνια.

Κεφάλαιο 5: Προκλήσεις και περιορισμοί στην αξιοποίηση αγροτικών αποβλήτων

5.1 Προκλήσεις για την αξιοποίηση των αγροτικών αποβλήτων στον ελληνικό αγροτικό τομέα

Η αξιοποίηση των αγροτικών αποβλήτων μέσω σύγχρονων τεχνολογιών είναι μια ζωτική ευκαιρία για την παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας, τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και την προώθηση της κυκλικής οικονομίας. Παρά τα εξέχον οφέλη που προσφέρουν τεχνολογίες όπως η αναερόβια χώνευση, η κομποστοποίηση, η παραγωγή βιοκαυσίμων και οι θερμοχημικές διεργασίες, η εφαρμογή τους στον ελληνικό αγροτικό τομέα παραμένει περιορισμένη. Η περιορισμένη αξιοποίησή τους οφείλεται σε ένα σύνολο οικονομικών, τεχνικών και οργανωτικών παραγόντων, οι οποίοι δυσχεραίνουν την ανάπτυξη αντίστοιχων επενδύσεων και τη μακροχρόνια λειτουργία τους (Rekleitis et al., 2020; Ufitikirezi et al., 2024).

Κάποια από τα πρωτεύον εμπόδια είναι το υψηλό αρχικό κόστος εγκατάστασης των μονάδων αξιοποίησης αγροτικών αποβλήτων. Η κατασκευή των απαραίτητων υποδομών, η αξία εξειδικευμένου εξοπλισμού και η κάλυψη του λειτουργικού κόστους απαιτούν σημαντικές οικονομικές επενδύσεις, οι οποίες συχνά δεν μπορούν να στηριχθούν από μικρές ή οικογενειακές αγροτικές εκμεταλλεύσεις. Ομοίως, η περιορισμένη πρόσβαση σε χρηματοδοτικά εργαλεία και επενδυτικά προγράμματα λειτουργεί αποτρεπτικά για την ανάπτυξη νέων έργων (Ufitikirezi et al., 2024).

Εξίσου αισθητή πρόκληση θεωρείται η συλλογή και η διαχείριση της πρώτης ύλης. Στην Ελλάδα τα αγροτικά απόβλητα παράγονται σε διαφορετικές περιοχές και η διαθεσιμότητά τους εξαρτάται από την εποχή, γεγονός που δυσχεραίνει τη σταθερή τροφοδοσία των μονάδων αξιοποίησης. Επιπλέον, η μεταφορά και η αποθήκευση των υπολειμμάτων αυξάνουν το λειτουργικό κόστος, ιδιαίτερα όταν οι αποστάσεις μεταξύ των σημείων παραγωγής και των εγκαταστάσεων επεξεργασίας είναι μεγάλες (Rekleitis et al., 2020; European Environment Agency, 2020).

Συγχρόνως, οι διεργασίες επεξεργασίας των αγροτικών αποβλήτων προϋποθέτουν εξειδικευμένη τεχνογνωσία και κατάλληλη τεχνική υποστήριξη και κατάλληλη τεχνική υποστήριξη. Για την επιτυχή λειτουργία των μονάδων απαιτείται συνεχή

παρακολούθηση των διεργασιών, σωστή διαχείριση της πρώτης ύλης και κατάλληλη συντήρηση του εξοπλισμού. Ωστόσο, η περιορισμένη εμπειρία στην εφαρμογή αντίστοιχων τεχνολογιών και η έλλειψη εξειδικευμένου προσωπικού αποτελούν σημαντικούς ανασταλτικούς παράγοντες, ιδιαίτερα στις μικρότερες αγροτικές εκμεταλλεύσιμες περιοχές (Ufitikirezi et al., 2024).

Ο κατακερματισμός των γεωργικών εκμεταλλεύσεων συνιστά διαχρονικό χαρακτηριστικό του ελληνικού αγροτικού τομέα και συνιστά έναν από τους καθοριστικούς περιοριστικούς παράγοντες για την ανάπτυξη ολοκληρωμένων συστημάτων αξιοποίησης αγροτικών αποβλήτων. Η μικρή κλίμακα παραγωγής και η γεωγραφική διασπορά των εκμεταλλεύσεων αυξάνουν το κόστος συλλογής, μεταφοράς και διαχείρισης της βιομάζας, επηρεάζοντας αρνητικά τη βιωσιμότητα των σχετικών επενδύσεων. Για τον λόγο αυτό, η ενίσχυση συνεργατικών σχημάτων και συλλογικών δράσεων μεταξύ των παραγωγών θεωρείται καθοριστικής σημασίας για τη βελτίωση της αποδοτικότητας των συστημάτων αξιοποίησης αγροτικών αποβλήτων (Rekleitis et al., 2020).

Συνοπτικά, η αντιμετώπιση των παραπάνω προκλήσεων θεωρείται βασική προϋπόθεση για την ευρύτερη εφαρμογή των τεχνολογιών αξιοποίησης αγροτικών αποβλήτων στην Ελλάδα. Η ενίσχυση των επενδύσεων, η βελτίωση της οργάνωσης της εφοδιαστικής αλυσίδας, η ανάπτυξη συνεργασιών μεταξύ των παραγωγών και η αξιοποίηση των διαθέσιμων χρηματοδοτικών εργαλείων μπορούν να συμβάλουν ουσιαστικά στην δραστική αξιοποίηση της αγροτικής βιομάζας και στην ενίσχυση της μετάβασης προς ένα πιο βιώσιμο και κυκλικό μοντέλο ανάπτυξης (Rekleitis et al., 2020; Ufitikirezi et al., 2024).

5.2 Κοινωνικοί παράγοντες

Η επιτυχής εφαρμογή των διεργασιών αξιοποίησης των αγροτικών αποβλήτων δεν εξαρτάται μόνο από την τεχνική τους αποδοτικότητα ή την οικονομική τους βιωσιμότητα, αλλά και από την αποδοχή τους από τους παραγωγούς και τις τοπικές κοινωνίες. Η ενημέρωση, η ανάπτυξη κατάλληλης τεχνογνωσίας και η ενεργός συμμετοχή όλων των φορέων αποτελούν βασικές προϋποθέσεις για την ευρύτερη υιοθέτηση πρακτικών που προάγουν την κυκλική οικονομία και τη βιώσιμη διαχείριση των αγροτικών αποβλήτων (Iannantuono et al., 2025).

Τόσο η έλλειψη, όσο και η περιορισμένη ενημέρωση σε σχέση με τα περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη των τεχνολογιών αξιοποίησης των αγροτικών αποβλήτων αποτελούν από τις τους ιδιαίτερα χρήσιμους παράγοντες που επηρεάζουν την αποδοχή τους. Σε πολλές περιπτώσεις, οι παραγωγοί εμφανίζονται επιφυλακτικοί απέναντι στην εφαρμογή νέων τεχνολογιών, κυρίως λόγω της έλλειψης γνώσεων, περιορισμένης εμπειρίας και αβεβαιότητας ως προς τα αναμενόμενα οφέλη. Για τον λόγο αυτό, η παροχή έγκυρης πληροφόρησης και η διάδοση καλών πρακτικών μπορούν να ενισχύσουν την εμπιστοσύνη προς τις τεχνολογίες αυτές και να διευκολύνουν την υιοθέτησή τους (Iannantuono et al., 2025).

μετάβαση προς ένα βιώσιμο και κυκλικό μοντέλο ανάπτυξης.

5.3 Προοπτικές και προτάσεις για την ενίσχυση της αξιοποίησης αγροτικών αποβλήτων

Παρά τις προκλήσεις που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα, οι προοπτικές για την αξιοποίηση των αγροτικών αποβλήτων στην Ελλάδα παραμένουν ιδιαίτερα θετικές. Η αυξανόμενη έμφαση στη μετάβαση προς ένα μοντέλο κυκλικής οικονομίας, σε συνδυασμό με την ανάπτυξη καινοτόμων τεχνολογιών και την προώθηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, δημιουργεί νέες δυνατότητες για την ωφέλιμη διαχείριση της αγροτικής βιομάζας. Η αξιοποίηση των αγροτικών αποβλήτων μπορεί να συμβάλει τόσο στη περικοπή των περιβαλλοντικών επιπτώσεων όσο και στην παραγωγή προϊόντων προστιθέμενης αξίας, ενισχύοντας παράλληλα την ανταγωνιστικότητα του αγροτικού τομέα (Ufitikirezi et al., 2024).

Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων απαιτείται η υιοθέτηση συντονισμένων δράσεων που θα διευκολύνουν την ευρύτερη εφαρμογή των διαθέσιμων τεχνολογιών. Ιδιαίτερη σημασία έχει η ενίσχυση των χρηματοδοτικών εργαλείων και των επενδυτικών κινήτρων, ώστε να μειωθεί το υψηλό αρχικό κόστος εγκατάστασης και να ενθαρρυνθούν νέες επενδύσεις. Παράλληλα, η συνεχής ενημέρωση και εκπαίδευση των παραγωγών μπορεί να ενισχύσει την εξοικείωσή τους με σύγχρονες πρακτικές αξιοποίησης των αγροτικών αποβλήτων, διευκολύνοντας την υιοθέτηση καινοτόμων λύσεων και την επιτυχής διαχείριση της διαθέσιμης βιομάζας.

Εξίσου σοβαρή είναι η ανάπτυξη συνεργασιών μεταξύ παραγωγών, συνεταιρισμών, ερευνητικών ιδρυμάτων και δημόσιων φορέων. Η ανταλλαγή τεχνογνωσίας, η

αξιοποίηση των προϊόντων της έρευνας και η εφαρμογή συλλογικών πρακτικών μπορούν να βελτιώσουν την αποδοτικότητα των συστημάτων αγροτικών αποβλήτων και να ενισχύσουν την οικονομική βιωσιμότητα των σχετικών επενδύσεων.

Η ευρύτερη αξιοποίηση των αγροτικών αποβλήτων προϋποθέτει μια ολοκληρωμένη προσέγγιση που δεν περιορίζεται μόνο στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών, αλλά περιλαμβάνει και την ενίσχυση της συνεργασίας μεταξύ όλων των εμπλεκόμενων φορέων. Η σύνδεση της επιστημονικής γνώσης με την αγροτική παραγωγή, η αξιοποίηση των διαθέσιμων χρηματοδοτικών εργαλείων και η σταδιακή υιοθέτηση καινοτόμων πρακτικών μπορούν να δημιουργήσουν τις προϋποθέσεις για μια περισσότερο βιώσιμη και ανταγωνιστική αγροτική οικονομία. Παράλληλα, η αντιμετώπιση των αγροτικών αποβλήτων ως πολύτιμων πόρων και όχι ως υλικών προς απόρριψη συνιστά βασική προϋπόθεση για την ικανή εφαρμογή των αρχών της κυκλικής οικονομίας στον πρωτογενή τομέα.

Συμπερασματικά, η επιτυχημένη αξιοποίηση της αγροτικής βιομάζας μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στην προστασία του περιβάλλοντος, στην παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας και στην ενίσχυση της κυκλικής οικονομίας δημιουργώντας παράλληλα νέες αναπτυξιακές προοπτικές για τον ελληνικό αγροτικό τομέα (Ufitikirezi et al., 2024).

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα

6.1 Συμπεράσματα

Η αξιοποίηση των αγροτικών αποβλήτων είναι μια από τις ζωτικές προϋποθέσεις για τη μετάβαση του αγροτικού τομέα προς ένα πιο βιώσιμο και αποδοτικό παραγωγικό μοντέλο. Η εφαρμογή των αρχών της κυκλικής οικονομίας επιτρέπει τη μετατροπή υλικών που μέχρι πρότινος αντιμετωπίζονταν ως απόβλητα σε πολύτιμους δευτερογενείς πόρους, συμβάλλοντας στην εξοικονόμηση φυσικών πόρων, στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και στην παραγωγή προϊόντων και ενέργειας υψηλής προστιθέμενης αξίας.

Η μελέτη των διεργασιών αξιοποίησης ανέδειξε ότι η αποδοτική διαχείριση των αγροτικών αποβλήτων δεν βασίζεται σε μια μόνο μέθοδο, αλλά στην επιλογή της

κατάλληλης τεχνολογίας ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της διαθέσιμης βιομάζας και τον επιδιωκόμενο σκοπό. Η αναερόβια χώνευση, η κομποστοποίηση, η παραγωγή βιοκαυσίμων και οι θερμοχημικές διεργασίες αποτελούν συμπληρωματικές λύσεις, οι οποίες μπορούν να συμβάλουν στην ανάκτηση ενέργειας και υλικών, ενισχύοντας την κυκλικότητα των αγροτικών συστημάτων.

Παράλληλα, προέκυψε ότι η ευρύτερη αξιοποίηση των αγροτικών αποβλήτων δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τη διαθεσιμότητα κατάλληλων τεχνολογιών. Η οικονομική βιωσιμότητα των επενδύσεων, η ενημέρωση και η εκπαίδευση των παραγωγών, η ανάπτυξη συνεργασιών και η ενίσχυση της καινοτομίας αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες για την δραστική εφαρμογή των σχετικών διεργασιών, ιδιαίτερα στον ελληνικό αγροτικό τομέα.

Συνολικά, η αξιοποίηση των αγροτικών υπολειμμάτων περιλαμβάνει βασικό πυλώνα της κυκλικής οικονομίας, καθώς συνδυάζει την προστασία του περιβάλλοντος με την αποδοτικότερη χρήση των φυσικών πόρων και τη δημιουργία νέων αναπτυξιακών δυνατοτήτων για τον πρωτογενή τομέα. Η αντιμετώπιση των αγροτικών αποβλήτων ως πολύτιμων πόρων και όχι ως υλικών προς απόρριψη και ανθεκτικού συστήματος αγροτικής παραγωγής. Από την ανάλυση προκύπτει ότι η επιτυχής αξιοποίηση των αγροτικών αποβλήτων δεν εξαρτάται μόνο από την από την τεχνολογική πρόοδο, αλλά και από τη δημιουργία ενός ευνοϊκού πλαισίου που θα ενισχύει την εφαρμογή σχετικών πρακτικών. Η ανάπτυξη συνεργασιών μεταξύ παραγωγών, ερευνητικών φορέων και δημόσιων οργανισμών, σε συνδυασμό με την παροχή κινήτρων, την ενημέρωση και την εκπαίδευση των εμπλεκόμενων μερών, μπορεί να συμβάλει καθοριστικά στην ευρύτερη υιοθέτηση λύσεων κυκλικής οικονομίας στον αγροτικό τομέα.

Η σύνθεση της σύγχρονης επιστημονικής βιβλιογραφίας ανέδειξε ότι η αξιοποίηση των αγροτικών αποβλήτων συγκροτεί μία ρεαλιστική και πολλά υποσχόμενη επιλογή για τη μετάβαση του αγροτικού τομέα σε ένα περισσότερο βιώσιμο και κυκλικό μοντέλο ανάπτυξης.

6.2 Συμβολή και σημασία της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία συμβάλλει στη συστηματική συγκέντρωση, οργάνωση και σύνθεση της σύγχρονης επιστημονικής γνώσης σχετικά με την

αξιοποίηση των αγροτικών αποβλήτων στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας. Μέσα από την ανάλυση της βιβλιογραφίας παρουσιάστηκαν οι κυριότερες κατηγορίες αγροτικών αποβλήτων, οι βασικές τεχνολογίες αξιοποίησης τους, καθώς και τα περιβαλλοντικά, ενεργειακά και οικονομικά οφέλη που προκύπτουν από την εφαρμογή τους.

Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην ανάδειξη του ρόλου των τεχνολογιών αξιοποίησης, όπως η αναερόβια χώνευση, η κομποστοποίηση, η παραγωγή βιοκαυσίμων και οι θερμοχημικές διεργασίες, ως μέσων που μπορούν να συμβάλουν στην ορθολογική διαχείριση των αγροτικών αποβλήτων και στη μετάβαση προς πιο βιώσιμα πρότυπα παραγωγής. Ταυτόχρονα, αναδείχθηκαν οι βασικές προκλήσεις που εξακολουθούν να περιορίζουν την ευρύτερη εφαρμογή των τεχνολογιών αυτών, καθώς και οι προοπτικές για την ενίσχυση της αξιοποίησης των αγροτικών αποβλήτων στον ελληνικό αγροτικό τομέα.

Επιπλέον, η παρούσα εργασία επιχειρεί να συνδέσει τη θεωρητική προσέγγιση της κυκλικής οικονομίας με τις πρακτικές δυνατότητες αξιοποίησης των αγροτικών αποβλήτων, αναδεικνύοντας τη σημασία της εφαρμογής σύγχρονων τεχνολογιών στον πρωτογενή τομέα. Η συγκριτική παρουσίαση των διαθέσιμων τεχνολογιών, καθώς και η ανάλυση των πλεονεκτημάτων, των περιορισμών και των προοπτικών τους, συμβάλλουν στην καλύτερη κατανόηση των παραγόντων που επηρεάζουν την αποτελεσματική διαχείριση της αγροτικής βιομάζας.

Η συμβολή της εργασίας έγκειται στη σύνθεση των διαθέσιμων επιστημονικών δεδομένων και στην ολοκληρωμένη προσέγγιση του θέματος, παρέχοντας μια συνολική εικόνα των δυνατοτήτων και των προκλήσεων που συνδέονται με την αξιοποίηση των αγροτικών αποβλήτων. Με τον τρόπο αυτό, η εργασία μπορεί να συνιστά χρήσιμο σημείο αναφοράς για φοιτητές, ερευνητές και επαγγελματίες που ενδιαφέρονται για τη βιώσιμη διαχείριση των αγροτικών αποβλήτων και την εφαρμογή των αρχών της κυκλικής οικονομίας στον αγροτικό τομέα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

Abo, L. D., Jayakumar, M., Jeyapaul, A. S., Rangaraju, M., Areti, H. A., & AssefaAdugna, A. (2025). Comprehensive Review on Co-integration of Conventional Systems and Advanced Oxidation Processes for Industrial and Agricultural Wastewater Treatment Applications. *Environmental Advances*, 100638. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2025.100638>

Alengebawy, A., Ran, Y., Osman, A. I., Jin, K., Samer, M., & Ai, P. (2024). Anaerobic digestion of agricultural waste for biogas production and sustainable

bioenergy recovery: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 22. <https://doi.org/10.1007/s10311-024-01789-1>

Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy - a New Sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143(1), 757–768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>

Iannantuono, D., Spada, A., & Lombardi, M. (2025). Social Acceptance for the Sustainability of the Agri-Biomethane Supply Chain: A PLS-SEM Analysis. *Sustainability*, 17(18), 8386. <https://doi.org/10.3390/su17188386>

Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the Circular economy: an Analysis of 114 Definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127(1), 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>

Majda Oued Lhaj, Rachid Moussadek, Abdelmjid Zouahri, Hatim Sanad, Saafadi, L., Alaoui, M. M., & Latifa Mouhir. (2024). Sustainable Agriculture Through Agricultural Waste Management: A Comprehensive Review of Composting's Impact on Soil Health in Moroccan Agricultural Ecosystems. *Agriculture*, 14(12), 2356–2356. <https://doi.org/10.3390/agriculture14122356>

Mehmet Melikoglu, & Tekin, A. (2024). “Biohydrogen production from food and agricultural wastes: A global review and a techno-economic evaluation for Turkey.” *International Journal of Hydrogen Energy*, 62, 913–924. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.03.173>

Prado-Acebo, I., Cubero-Cardoso, J., Lu-Chau, T. A., & Eibes, G. (2024). Integral multi-valorization of agro-industrial wastes: A review. *Waste Management*, 183, 42–52. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.05.001>

Priyanka, G., et al. (2024). Detailed analysis of agro-industrial byproducts/wastes to enable efficient sorting for various agro-industrial applications. *Bioresources and Bioprocessing*, 11, 45. <https://doi.org/10.1186/s40643-024-00763-7>

Rekleitis, G., Haralambous, K.-J., Loizidou, M., & Aravossis, K. (2020). Utilization of Agricultural and Livestock Waste in Anaerobic Digestion (A.D): Applying the Biorefinery Concept in a Circular Economy. *Energies*, 13(17), 4428. <https://doi.org/10.3390/en13174428>

- Ufitikirezi, J. d. D. M., Filip, M., Ghorbani, M., Zoubek, T., Olšan, P., Bumbálek, R., Strob, M., Bartoš, P., Umurungi, S. N., Murindangabo, Y. T., Heřmánek, A., Tupý, O., Havelka, Z., Stehlík, R., Černý, P., & Smutný, L. (2024). *Agricultural waste valorization: Exploring environmentally friendly approaches to bioenergy conversion. Sustainability, 16*(9), 3617. <https://doi.org/10.3390/su16093617>
- Vlyssides, A., Mai, S., & Barampouti, E. M. (2015). Energy Generation Potential in Greece From Agricultural Residues and Livestock Manure by Anaerobic Digestion Technology. *Waste and Biomass Valorization, 6*(5), 747–757. <https://doi.org/10.1007/s12649-015-9400-5>
- 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>
- Zorpas, A. A. (2024). The hidden concept and the beauty of multiple “R” in the framework of waste strategies development reflecting to circular economy principles. *The Science of the Total Environment, 952*, 175508–175508. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175508>

Ελληνόγλωσση Βιβλιογραφία

- Βετζανάκης, Μ. (2024). Κυκλική οικονομία. Αγρότης και Έρευνα, (28), 7–9. ΕΛΓΟ-ΔΗΜΗΤΡΑ. https://www.elgo.gr/images/ioanna/periodiko/Teyxos_28/7-9_KYKLIKH_OIKONOMIA.PDF
- Γαλαζούλας, Χ. (2020, September 12). *Αναερόβια επεξεργασία κτηνοτροφικών αποβλήτων για την παραγωγή βιοαερίου και την μετατροπή του σε ηλεκτρισμό. Μελέτη περίπτωσης πάνω στην μονάδα παραγωγής “SIVISTA A.E.” στην περιοχή Μεγάλη Χώρα Αργινίου*. Apothesis.eap.gr. <https://apothesis.eap.gr/archive/item/82132>

Ιστοσελίδες

Circular Economy. (2025). Environment.

https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy_en

Ellen MacArthur Foundation. (2023). *What Is a Circular economy?* Ellen MacArthur Foundation. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview>

R-Principles of the Circular Economy - EFS Consultin. (2025, November 27). EFS Consulting. <https://efs.consulting/en/insights/article/circular-economy/r-strategies-circular-economy/>