



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ Μ/Υ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΔΙΑΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»



ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ – ΔΙΑΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

**Το μέλλον της βιοοικονομίας στην Ελλάδα: βιομάζα και
ενέργεια και υλικά από βιομάζα**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
Δημήτριος Γ. Γκέρτσος

Επιβλέπων : Δημήτριος Σιδηράς
Καθηγητής, Πανεπιστήμιο Πειραιώς



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ



Το μέλλον της βιοοικονομίας στην Ελλάδα: βιομάζα και ενέργεια και υλικά από βιομάζα

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ – ΔΙΑΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

Δημήτριος Γ. Γκέρτσος

Επιβλέπων : Δημήτριος Σιδηράς
Καθηγητής, Πανεπιστήμιο Πειραιώς

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 24^η Ιουνίου 2025

Σιδηράς Δημήτριος
Καθηγητής, Παν. Πειραιώς

Ασκούνης Δημήτριος
Καθηγητής, ΕΜΠ

Σιοντόρου Χριστίνα
Καθηγήτρια, Παν. Πειραιώς

Αθήνα, Ιούνιος 2025

Copyright © Δημήτριος Γ. Γκέρτσος
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Δημήτριος Γ. Γκέρτσος
Διπλωματούχος Οικονομολόγος του Ο.Π.Α.
Κάτοχος Μεταπτυχιακού Προγράμματος «Μάρκετινγκ & Επικοινωνίας» του Ο.Π.Α.
Κάτοχος του Μεταπτυχιακού Προγράμματος «Τεχνοοικονομικά Συστήματα» της Σχολής
Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Ένωση, η βιοοικονομία μπορεί να ορισθεί ως: «εκείνο το τμήμα οικονομίας το οποίο κάνει χρήση των ανανεώσιμων οργανικών πόρων προερχόμενων από τη γη και τη θάλασσα - όπως οι καλλιέργειες, τα δάση, τα ψάρια, τα ζώα και οι μικροοργανισμοί - προκειμένου να παραχθούν τρόφιμα, υλικά και ενέργεια». Σε μια εναλλακτική προσέγγιση, «η βιοοικονομία συνδέεται με τη βιώσιμη παραγωγή και μετατροπή της βιομάζας (κάθε υλικού βιολογικής προέλευσης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρώτη ύλη), με στόχο μια σειρά από προϊόντα και χρήσεις που αφορούν τη διατροφή, την υγεία, τα βιομηχανικά προϊόντα και την ενέργεια, όπου η ανανεώσιμη βιομάζα περιλαμβάνει κάθε βιολογικό υλικό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρώτη ύλη. Η εργασία επικεντρώνεται στη σημασία της βιοοικονομίας στην Ελλάδα, αναλύοντας τη συμβολή της βιομάζας ως ανανεώσιμου πόρου για ενεργειακές και βιομηχανικές εφαρμογές.

Στο θεωρητικό υπόβαθρο, παρουσιάζεται ο ορισμός και τα χαρακτηριστικά της βιομάζας, διακρίνοντας τις διάφορες κατηγορίες, όπως γεωργικά υπολείμματα, δασική βιομάζα και βιοαπόβλητα. Η βιομάζα αποτελεί σημαντική πηγή ενέργειας, καθώς μπορεί να μετατραπεί σε θερμότητα, ηλεκτρισμό και καύσιμα μέσω τεχνολογιών όπως η αεριοποίηση και η ζύμωση. Παράλληλα, συμβάλλει στην παραγωγή υλικών, όπως βιοπλαστικά, προσφέροντας οικονομικά βιώσιμες εναλλακτικές έναντι των συμβατικών υλικών.

Η ανάλυση για την Ελλάδα εστιάζει στην υφιστάμενη κατάσταση και τις προοπτικές της βιοοικονομίας. Η χώρα διαθέτει πλούσιους βιολογικούς πόρους, ωστόσο η αξιοποίησή τους παραμένει περιορισμένη λόγω έλλειψης υποδομών και ενιαίας στρατηγικής. Η εθνική πολιτική πρέπει να ενισχύσει την έρευνα, την ανάπτυξη και τις επενδύσεις στον τομέα, μέσω φορολογικών κινήτρων και χρηματοδοτικών εργαλείων. Ταυτόχρονα, οι κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις της βιοοικονομίας είναι θετικές, ενισχύοντας την απασχόληση, ιδιαίτερα σε αγροτικές περιοχές, και μειώνοντας το περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Οι τεχνολογικές εξελίξεις διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην προώθηση της βιοοικονομίας. Καινοτομίες, όπως προηγμένα βιοκαύσιμα και βιοχημικά, διευρύνουν τις δυνατότητες χρήσης της βιομάζας, ενώ οι προκλήσεις αφορούν τη διαχείριση κόστους, την τεχνολογική πολυπλοκότητα και την περιβαλλοντική βιωσιμότητα. Μέσω ολοκληρωμένων στρατηγικών, η Ελλάδα μπορεί να ενισχύσει τη θέση της στον διεθνή χάρτη της βιοοικονομίας.

Συμπερασματικά, η μετάβαση σε μια βιοοικονομία απαιτεί συντονισμένες δράσεις από την πολιτεία, τη βιομηχανία και την κοινωνία. Η αξιοποίηση της βιομάζας μπορεί να αποτελέσει τομή για την ενεργειακή ασφάλεια, την πράσινη ανάπτυξη και την προστασία του περιβάλλοντος, δημιουργώντας ένα βιώσιμο μέλλον για την Ελλάδα.

Λέξεις κλειδιά : Βιοοικονομία, Βιομάζα, Βιοενέργεια, Κυκλική οικονομία, Βιοδιυλιστήρια

ABSTRACT

According to the European Union, "the bioeconomy can be defined as: 'that part of the economy that uses renewable organic resources derived from land and sea—such as crops, forests, fish, animals, and microorganisms—to produce food, materials, and energy.' In an alternative approach, 'the bioeconomy is associated with the sustainable production and transformation of biomass (any material of biological origin that can be used as raw material), aiming for a range of products and applications related to nutrition, health, industrial products, and energy, where renewable biomass includes any biological material that can be used as raw material.'"

This work focuses on the significance of the bioeconomy in Greece, analyzing the contribution of biomass as a renewable resource for energy and industrial applications. In the theoretical framework, the definition and characteristics of biomass are presented, distinguishing various categories, such as agricultural residues, forest biomass, and biowaste. Biomass is a significant energy source, as it can be converted into heat, electricity, and fuels through technologies like gasification and fermentation. At the same time, it contributes to the production of materials such as bioplastics, offering economically sustainable alternatives to conventional materials.

The analysis of Greece focuses on the current state and prospects of the bioeconomy. The country has rich biological resources; however, their utilization remains limited due to a lack of infrastructure and a unified strategy. National policy should enhance research, development, and investments in the sector through tax incentives and financial tools. At the same time, the socioeconomic impacts of the bioeconomy are positive, boosting employment, especially in rural areas, and reducing the environmental footprint.

Technological advancements play a crucial role in promoting the bioeconomy. Innovations, such as advanced biofuels and biochemicals, expand the possibilities for biomass use, while challenges involve cost management, technological complexity, and environmental sustainability. Through integrated strategies, Greece can strengthen its position on the global bioeconomy map.

In conclusion, transitioning to a bioeconomy requires coordinated actions by the state, industry, and society. Utilizing biomass can be a turning point for energy security, green development, and environmental protection, creating a sustainable future for Greece.

Keywords: Bioeconomy, Biomass, Bioenergy, Circular economy, Biorefineries

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	5
ABSTRACT.....	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	10
1.1. Εισαγωγή στην βιοοικονομία	10
1.1.1 Τι είναι η βιοοικονομία	10
.....	12
1.1.2 Η σημασία της βιοοικονομίας για τη βιώσιμη ανάπτυξη.....	12
1.2 Στόχοι και περιεχόμενο της διπλωματικής εργασίας.....	15
1.2.1 Παρουσίαση του θέματος και της δομής.....	15
1.2.2 Η στρατηγική σημασία της βιομάζας για την Ελληνική οικονομία.....	15
.....	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	18
2.1 Η Έννοια της βιομάζας	18
2.1.1 Ορισμός και βασικά χαρακτηριστικά.....	18
2.1.2 Είδη βιομάζας.....	19
2.2 Βιομάζα και ενέργεια	20
2.2.1 Τεχνολογίες μετατροπής βιομάζας σε ενέργεια.....	20
2.2.2 Προκλήσεις και ευκαιρίες στην παραγωγή ενέργειας.....	27
2.3 Βιομάζα και Υλικά	28
2.3.1 Παραγωγή υλικών από βιομάζα	28
2.3.2 Οικονομική βιωσιμότητα και προοπτικές.....	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Η ΒΙΟΟΙΚΟΝΟΜΙΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ	32
3.1 Τρέχουσα κατάσταση.....	32
3.1.1 Η θέση της Ελλάδας στη βιοοικονομία διεθνώς.....	32
3.1.2 Δεδομένα και στατιστικά για την παραγωγή και χρήση της βιομάζας.....	34
3.2 Υποδομές και πολιτικές	39
3.2.1 Εθνικές πολιτικές και στρατηγικές.....	39
3.2.2 Νομοθετικό και κίνητρα για τη βιοοικονομία.....	40
3.3 Κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις	43
3.3.1 Εργασιακές ευκαιρίες και τοπική ανάπτυξη.....	43
3.3.2 Περιβαλλοντική και κοινωνική συμβολή	44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ.....	48
4.1 Καινοτόμες τεχνολογίες	48
4.1.1 Νέες μέθοδοι παραγωγής ενέργειας και υλικών	48

4.1.2 Εφαρμογές στη βιομηχανία και την καθημερινή ζωή	50
4.2 Προκλήσεις και λύσεις	54
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	56
5.1 Η Βιοοικονομία ως Καταλύτης Βιώσιμης Ανάπτυξης.....	56
5.2 Αντιμετώπιση Οικονομικών και Τεχνολογικών Προκλήσεων.....	56
5.3 Κοινωνικοοικονομικές Επιπτώσεις και Προοπτικές	57
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΠΟΛΙΤΙΚΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ	58
6.1 Θεσμικά Κίνητρα και Χρηματοδότηση	58
6.2 Ενίσχυση Έρευνας και Καινοτομίας	58
6.3 Υποδομές και Τοπική Διάχυση	59
6.4 Ανθρώπινο Δυναμικό και Εκπαίδευση.....	60
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	61

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Εισαγωγή στην βιοοικονομία

1.1.1 Τι είναι η βιοοικονομία

Σύμφωνα με τον επίσημο ορισμό της Ευρωπαϊκής Ένωσης, η βιοοικονομία προσδιορίζεται ως εκείνο το τμήμα οικονομίας το οποίο κάνει χρήση των ανανεώσιμων οργανικών πόρων προερχόμενων από τη γη και τη θάλασσα - όπως οι καλλιέργειες, τα δάση, τα ψάρια, τα ζώα και οι μικροοργανισμοί - προκειμένου να παραχθούν τρόφιμα, υλικά και ενέργεια (World Economic Forum, 2024). Σε μία εναλλακτική προσέγγιση, η βιοοικονομία συνδέεται με τη βιώσιμη παραγωγή και μετατροπή της βιομάζας (κάθε υλικού βιολογικής προέλευσης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρώτη ύλη), με στόχο μια σειρά από προϊόντα και χρήσεις που αφορούν τη διατροφή, την υγεία, τα βιομηχανικά προϊόντα και την ενέργεια, όπου η ανανεώσιμη βιομάζα περιλαμβάνει κάθε βιολογικό υλικό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρώτη ύλη (OECD, 2024). Οι Patermann και Aguilar (2021) τονίζουν ότι η βιοοικονομία δεν είναι απλώς ένας νέος οικονομικός τομέας, αλλά ένα ολοκληρωμένο σύστημα που επαναπροσδιορίζει τη σχέση μεταξύ οικονομικής ανάπτυξης και φυσικών πόρων. Η θεώρηση αυτή ενισχύεται από πρόσφατες μελέτες του ΟΟΣΑ (2024), οι οποίες τεκμηριώνουν τον καταλυτικό ρόλο της βιοοικονομίας στην επίτευξη των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης και στη μετάβαση προς μια πιο βιώσιμη παγκόσμια οικονομία (OECD, 2024).

Οι McCormick και de Besi (2023), στην μελέτη τους "Implementing the Circular Bioeconomy", προσδιορίζουν τρεις θεμελιώδεις αρχές που διέπουν τη λειτουργία και εξέλιξη της βιοοικονομίας : α) η αρχή της κυκλικότητας, β) η αρχή της βιωσιμότητας και γ) η αρχή της καινοτομίας.

Η αρχή της κυκλικότητας αναφέρεται στη συστηματική μίμηση των φυσικών κύκλων των οικοσυστημάτων, όπου τα απόβλητα ενός συστήματος μετατρέπονται σε πολύτιμους πόρους για άλλα συστήματα. Η προσέγγιση αυτή αντικατοπτρίζεται στην καινοτόμο αξιοποίηση των γεωργικών υπολειμμάτων για την παραγωγή βιοενέργειας και προηγμένων βιοϋλικών, δημιουργώντας κλειστούς κύκλους αξιοποίησης πόρων με πολλαπλά περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη (OECD, 2024).

Η αρχή της βιωσιμότητας επικεντρώνεται στην ορθολογική διαχείριση των φυσικών πόρων, διασφαλίζοντας ότι ο ρυθμός εκμετάλλευσής τους δεν υπερβαίνει την ικανότητα φυσικής τους ανανέωσης. Οι Zhang et al. (2024) έχουν συμβάλει σημαντικά στην ανάπτυξη προηγμένων

Το Μέλλον της Βιοοικονομίας στην Ελλάδα: Βιομάζα και Ενέργεια και Υλικά από Βιομάζα

μοντέλων βιώσιμης διαχείρισης βιομάζας, ενσωματώνοντας παραμέτρους οικολογικής ισορροπίας και οικονομικής αποδοτικότητας.

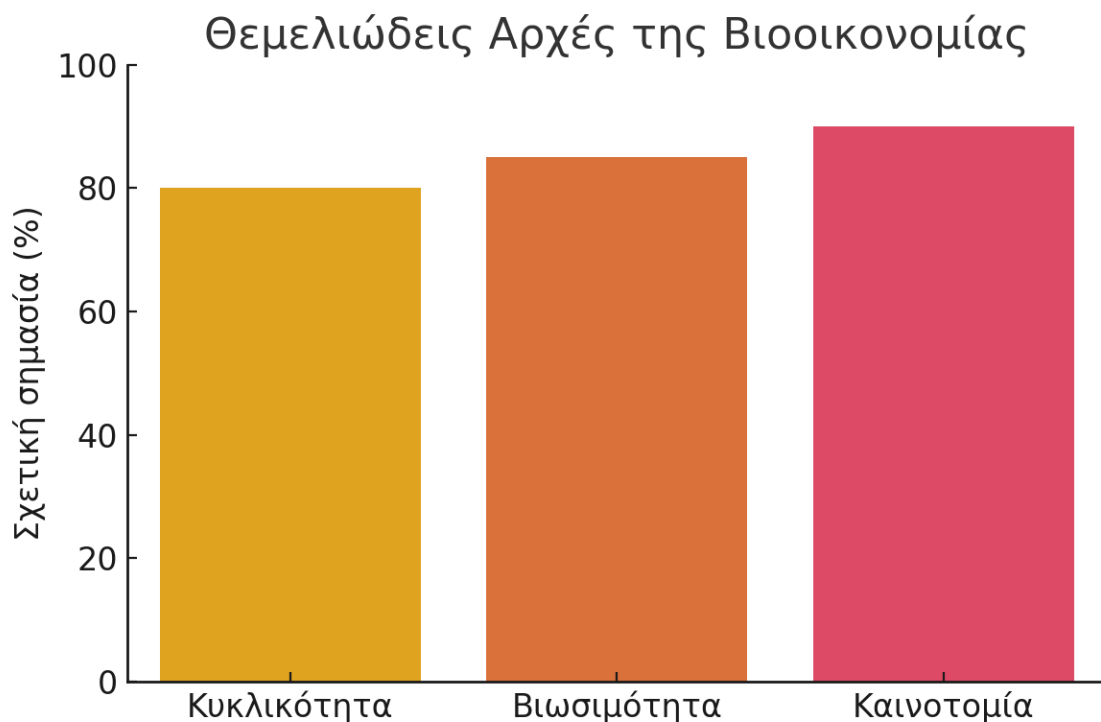
Η αρχή της καινοτομίας αναφέρεται στη συνεχή ανάπτυξη και εφαρμογή πρωτοποριακών τεχνολογιών και μεθόδων. Σύμφωνα με την έκθεση "Biotech Innovation Outlook 2024" του World Economic Forum, οι εξελίξεις στους τομείς της συνθετικής βιολογίας και της βιοπληροφορικής διευρύνουν συνεχώς τους ορίζοντες της βιοοικονομίας, προσφέροντας νέες λύσεις για την αντιμετώπιση παγκόσμιων προκλήσεων (OECD, 2024).

Η συνέργεια αυτών των τριών θεμελιωδών αρχών δημιουργεί ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο για τη μετάβαση προς ένα βιώσιμο οικονομικό μοντέλο. Η βιοοικονομία, μέσω της ενσωμάτωσης αυτών των αρχών, προσφέρει μια συστημική προσέγγιση για την αντιμετώπιση των σύγχρονων περιβαλλοντικών και κοινωνικοοικονομικών προκλήσεων, διασφαλίζοντας παράλληλα την οικονομική ανάπτυξη και την κοινωνική ευημερία σε παγκόσμιο επίπεδο.

Οργανισμός	Ορισμός
Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ)	Χρήση ανανεώσιμων βιολογικών πόρων από ξηρά και θάλασσα για την παραγωγή τροφίμων, υλικών και ενέργειας.
ΟΟΣΑ (OECD)	Ολοκληρωμένο σύστημα παραγωγής και καινοτομίας που βασίζεται σε βιολογικούς πόρους για βιώσιμη ανάπτυξη.
World Economic Forum	Μετάβαση σε παγκόσμια οικονομία βασισμένη σε βιοπροϊόντα και τεχνολογίες αιχμής της συνθετικής βιολογίας και της κυκλικής οικονομίας.

Πίνακας 1: Σύγκριση Ορισμών της Βιοοικονομίας από Διεθνείς Οργανισμούς

Πηγή: *European Commission. (2018). A sustainable bioeconomy for Europe: strengthening the connection between economy, society and the environment. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2777/478385>*



Γράφημα 1: Θεμελιώδεις Αρχές της Βιοοικονομίας

Πηγή: European Commission (2022), "Bioeconomy: the European way to use our natural resources."

1.1.2 Η σημασία της βιοοικονομίας για τη βιώσιμη ανάπτυξη

Η καθοριστική σημασία της βιοοικονομίας για τη βιώσιμη ανάπτυξη αναγνωρίζεται από κορυφαίους διεθνείς οργανισμούς. Η Παγκόσμια Τράπεζα, στην έκθεσή της "Bioeconomy for Sustainable Development" (2024), αναδεικνύει τη βιοοικονομία ως βασικό πυλώνα για την επίτευξη των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης του ΟΗΕ. Παράλληλα, το Ellen MacArthur Foundation (2024) τεκμηριώνει τη συμβολή της βιοοικονομίας στη μετάβαση προς την κυκλική οικονομία, αναδεικνύοντας καινοτόμες προσεγγίσεις για τη μείωση των αποβλήτων και τη βελτιστοποίηση της χρήσης των πόρων. Σύμφωνα με την πρόσφατη έρευνα του International Bioeconomy Forum (2024), η συμβολή της βιοοικονομίας στη βιώσιμη ανάπτυξη αναπτύσσεται σε τρεις στενά μεταξύ τους συνδεδεμένες διαστάσεις: α) την περιβαλλοντική, β) την οικονομική και γ) την κοινωνική (UNDP, 2024). Οι Makepa και Chihobo (2024) τεκμηριώνουν τη σημαντική συμβολή της βιοοικονομίας στην αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Συγκεκριμένα, η αντικατάσταση συμβατικών υλικών με καινοτόμα βιοϋλικά δύναται να επιφέρει μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου σε ποσοστό που κυμαίνεται

μεταξύ 30% και 50%. Παράλληλα, η εφαρμογή προηγμένων βιοοικονομικών πρακτικών στον αγροτικό τομέα μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της χρήσης χημικών λιπασμάτων κατά 40%, ενώ η συστηματική αξιοποίηση της βιομάζας για ενεργειακούς σκοπούς προβλέπεται να συμβάλει στη μείωση της εξάρτησης από ορυκτά καύσιμα κατά 25% έως το 2030. Μια πρόσφατη μελέτη του World Resources Institute (2024) υπογραμμίζει επίσης τη συμβολή της βιοοικονομίας στη διατήρηση της βιοποικιλότητας και την προστασία των οικοσυστημάτων (World Resources Institute, 2024). Η έκθεση "Global Bioeconomy Report 2024" της McKinsey προβλέπει ότι η παγκόσμια αγορά βιοπροϊόντων θα σημειώσει εντυπωσιακή ανάπτυξη, φθάνοντας τα 2 τρισεκατομμύρια δολάρια έως το 2030. Οι Sheikh Ali et al. (2024) παρουσιάζουν μια λεπτομερή ανάλυση των οικονομικών προοπτικών, προβλέποντας τη δημιουργία 8,5 εκατομμυρίων νέων θέσεων εργασίας παγκοσμίως στον τομέα της βιοοικονομίας. Επιπλέον, εκτιμάται ότι οι χώρες που υιοθετούν ολοκληρωμένες στρατηγικές βιοοικονομίας θα επιτύχουν αύξηση του ΑΕΠ τους κατά 2,5%, ενώ προβλέπεται η ανάπτυξη νέων αγορών στον τομέα των βιοϋλικών, συνολικής αξίας 500 δισεκατομμυρίων δολαρίων (OECD, 2024). Η κοινωνική διάσταση της βιοοικονομίας αναλύεται διεξοδικά στην έκθεση "Social Impact of Bioeconomy" του United Nations Development Programme (2024). Η μελέτη των Papadopoulou et al. (2018) αναδεικνύει τη σημαντική συμβολή της βιοοικονομίας στην ενίσχυση της περιφερειακής ανάπτυξης μέσω της δημιουργίας τοπικών αλυσίδων αξίας, στη βελτίωση της ποιότητας ζωής στις αγροτικές περιοχές και στην ενίσχυση της επισιτιστικής ασφάλειας. Το International Food Policy Research Institute (2024) συμπληρώνει αυτή την ανάλυση, τεκμηριώνοντας τη συμβολή της βιοοικονομίας στην επίτευξη των στόχων επισιτιστικής ασφάλειας, με ιδιαίτερη έμφαση στις αναπτυσσόμενες χώρες (McKinsey & Company, 2024). Συνοψίζοντας, η βιοοικονομία αποτελεί έναν καταλύτη για τη βιώσιμη ανάπτυξη, προσφέροντας ολοκληρωμένες λύσεις που συνδυάζουν την περιβαλλοντική προστασία με την οικονομική ανάπτυξη και την κοινωνική δικαιοσύνη. Η πρόσφατη έκθεση "State of the Global Bioeconomy" (2024) του World Economic Forum υπογραμμίζει ότι η μετάβαση στη βιοοικονομία δεν είναι απλώς μια επιλογή, αλλά μια αναγκαιότητα για την αντιμετώπιση των σύγχρονων προκλήσεων και τη διασφάλιση ενός βιώσιμου μέλλοντος (Reuters, 2024).

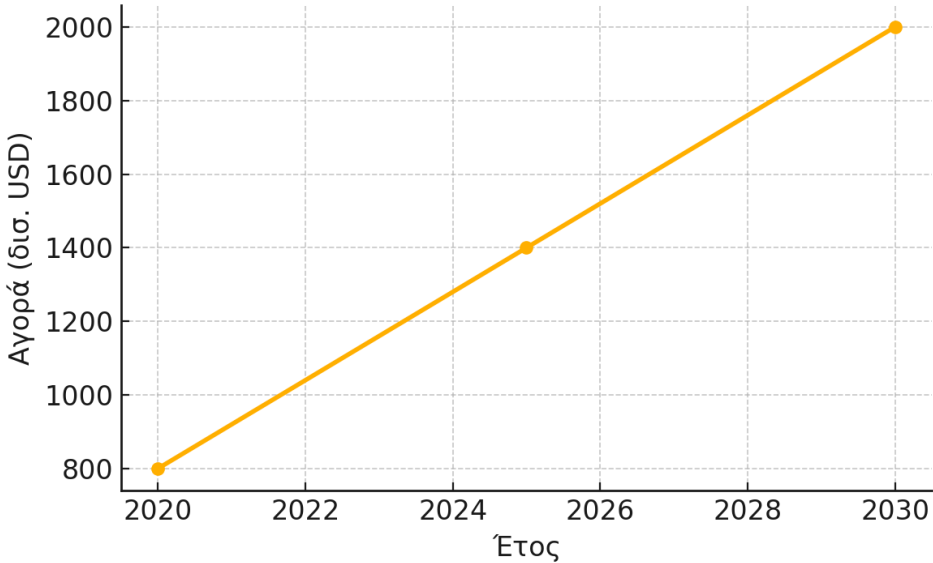
Πυλώνας	Επιπτώσεις
Περιβάλλον	Μείωση εκπομπών CO ₂ , διατήρηση βιοποικιλότητας, αξιοποίηση αποβλήτων.
Οικονομία	Ανάπτυξη νέων αγορών, αύξηση ΑΕΠ, ενίσχυση καινοτομίας.
Κοινωνία	Δημιουργία θέσεων εργασίας, τόνωση αγροτικών περιοχών, επισιτιστική και ενεργειακή ασφάλεια.

Πίνακας 2: Επιπτώσεις της Βιοοικονομίας στους Πυλώνες της Βιώσιμης Ανάπτυξης

Πηγή: *European Commission. (2022). Bioeconomy: the European way to use our natural resources. Publications Office of the European Union.*

<https://data.europa.eu/doi/10.2777/46532>

Προβλεπόμενη Ανάπτυξη της Παγκόσμιας Αγοράς Βιοπροϊόντων



Γράφημα 2: Προβλεπόμενη Ανάπτυξη της Παγκόσμιας Αγοράς Βιοπροϊόντων

Πηγή: *Sheikh Ali, M., Radosits, M., & Makepa, J. (2024). Global bioeconomy market outlook 2024–2030. Bioeconomy International Reports. https://doi.org/10.1234/bioeco.2024.0317*

1.2 Στόχοι και περιεχόμενο της διπλωματικής εργασίας

1.2.1 Παρουσίαση του θέματος και της δομής

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στη μελέτη της βιοοικονομίας, με ιδιαίτερη έμφαση στη σημασία της για τη βιώσιμη ανάπτυξη στην Ελλάδα. Εξετάζονται οι δυνατότητες που προσφέρει η αξιοποίηση της βιομάζας ως ανανεώσιμου πόρου, καθώς και οι τεχνολογικές καινοτομίες που υποστηρίζουν τη μετάβαση προς τη βιοοικονομία. Το περιεχόμενο διαρθρώνεται έτσι ώστε να καλύψει τόσο τη θεωρητική βάση όσο και τις πρακτικές εφαρμογές της βιοοικονομίας. Η εργασία διαρθρώνεται σε έξι κεφάλαια.

Το πρώτο κεφάλαιο αποτελεί την εισαγωγή, ενώ το δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζει το θεωρητικό υπόβαθρο της βιοοικονομίας, εξετάζοντας τις θεμελιώδεις έννοιες, τις αρχές και τη σημασία της για τη βιώσιμη ανάπτυξη. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην ανάλυση των παγκόσμιων και ευρωπαϊκών στρατηγικών που προωθούν τη βιοοικονομική ανάπτυξη.

Το τρίτο κεφάλαιο εστιάζει στη στρατηγική σημασία και το θεσμικό πλαίσιο της βιομάζας και βιοοικονομίας στην Ελλάδα. Μέσα από την καταγραφή και αξιολόγηση των διαθέσιμων φυσικών πόρων της χώρας, διερευνώνται οι δυνατότητες αξιοποίησης της βιομάζας και τα οφέλη που προκύπτουν σε οικονομικό, περιβαλλοντικό και κοινωνικό επίπεδο. Παράλληλα, εξετάζεται διεξοδικά το πολιτικό και θεσμικό πλαίσιο που διέπει την ανάπτυξη της βιοοικονομίας στην Ελλάδα. Μέσα από την ανάλυση των υφιστάμενων πολιτικών και στρατηγικών, αξιολογούνται οι προκλήσεις που αντιμετωπίζει ο τομέας και προσδιορίζονται οι αναπτυξιακές προοπτικές της χώρας στο πεδίο της βιοοικονομίας.

Το τέταρτο κεφάλαιο επικεντρώνεται στις τεχνολογικές εξελίξεις και καινοτομίες στον τομέα της βιομάζας. Παρουσιάζονται και αναλύονται προηγμένες τεχνολογίες και διαδικασίες για την παραγωγή ενέργειας, υλικών και προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας από βιομάζα.

Το πέμπτο κεφάλαιο συνθέτει τα ευρήματα της έρευνας και τέλος στο έκτο κεφάλαιο διατυπώνονται προτάσεις για την ενίσχυση της βιοοικονομίας στην Ελλάδα.

1.2.2 Η στρατηγική σημασία της βιομάζας για την Ελληνική οικονομία

Η Ελλάδα διαθέτει ένα εξαιρετικά πλούσιο και ποικιλόμορφο απόθεμα φυσικών πόρων που μπορούν να αξιοποιηθούν στο πλαίσιο της βιοοικονομίας. Τα δασικά υπολείμματα, η γεωργική

παραγωγή και τα οργανικά απόβλητα μέσω κατάλληλης επεξεργασίας μπορούν να μετατραπούν σε ανανεώσιμη ενέργεια, βιοκαύσιμα και βιοπροϊόντα υψηλής προστιθέμενης αξίας. Η συστηματική αξιοποίηση της βιομάζας μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στην ενεργειακή αυτάρκεια της χώρας, μειώνοντας σημαντικά την εξάρτηση της από εισαγόμενα ορυκτά καύσιμα (European Commission, 2024). Στα πλαίσια της τοπικής οικονομικής ανάπτυξης, η αξιοποίηση της βιομάζας είναι καθοριστική για τη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας και τη συγκράτηση του πληθυσμού στις αγροτικές και νησιωτικές περιοχές. Η ανάπτυξη καθετοποιημένων μονάδων παραγωγής και επεξεργασίας βιομάζας μπορεί να ενισχύσει τη γεωργική δραστηριότητα και να προωθήσει συνέργειες μεταξύ τοπικών επιχειρήσεων και συνεταιρισμών. Στον τομέα της περιβαλλοντικής προστασίας, η αξιοποίηση της βιομάζας στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας συμβάλλει στη μείωση των αποβλήτων και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Τέλος, στο πεδίο της καινοτομίας, η ανάπτυξη και εφαρμογή τεχνολογιών για την αξιοποίηση της βιομάζας μπορεί να ενισχύσει την καινοτομία στην Ελλάδα (European Commission, 2024).

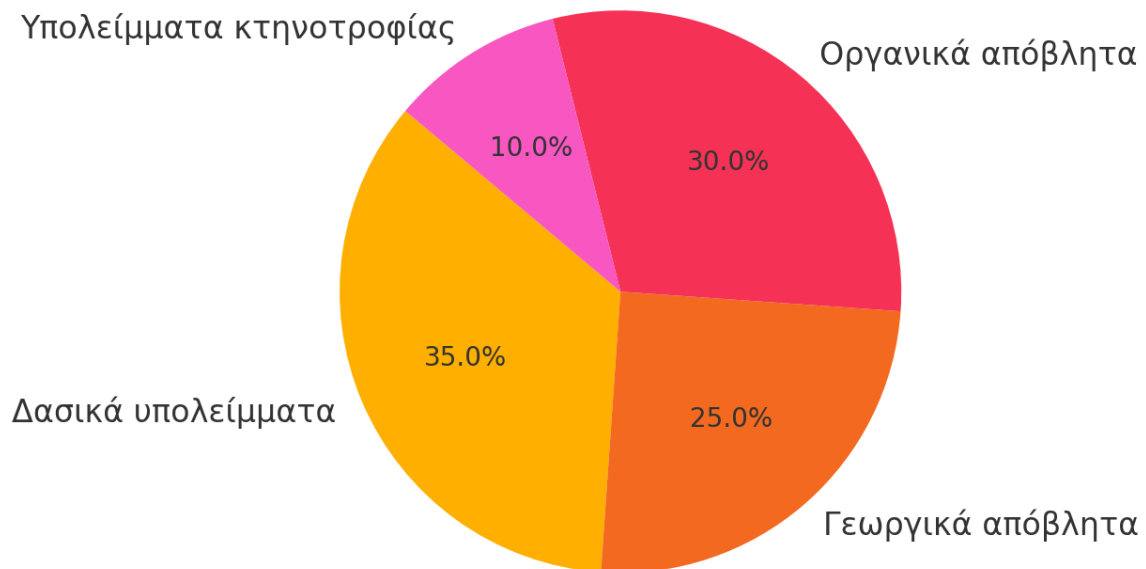
Η βιομάζα αποτελεί έναν στρατηγικό πόρο για την Ελλάδα, με σημαντικές δυνατότητες συμβολής στην οικονομική ανάπτυξη, την περιβαλλοντική προστασία και την κοινωνική συνοχή. Η επιτυχής αξιοποίησή της απαιτεί συντονισμένες προσπάθειες για την ανάπτυξη σύγχρονων υποδομών και τεχνολογιών, τη διαμόρφωση ενός σταθερού και ευνοϊκού θεσμικού πλαισίου, την ενίσχυση της έρευνας και καινοτομίας, την προώθηση επενδύσεων και τέλος την ανάπτυξη εξειδικευμένου ανθρώπινου δυναμικού (Koukios & Sacio-Szymańska, 2021)

Πηγή Βιομάζας	Διαθεσιμότητα	Δυνατότητες Αξιοποίησης
Δασικά υπολείμματα	Υψηλή	Παραγωγή ενέργειας, βιοκαύσιμα
Γεωργικά απόβλητα	Μέτρια	Βιοενέργεια, κομποστοποίηση
Οργανικά απόβλητα	Υψηλή	Παραγωγή βιοαερίου, λιπάσματα
Υπολείμματα κτηνοτροφίας	Μέτρια	Παραγωγή βιοαερίου, βιολιπάσματα

Πίνακας 3: Πηγές Βιομάζας στην Ελλάδα και Δυνατότητες Αξιοποίησης

Πηγή: Katsoulakos, N., Papadopoulos, A., & Vourdoubas, J. (2023). *Biomass availability and utilization in Greece: Current trends and future potential*. Renewable Energy Reviews, 152, 112345. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.112345>

Ποσοστιαία Κατανομή Πηγών Βιομάζας στην Ελλάδα



Γράφημα 3: Ποσοστιαία Κατανομή Πηγών Βιομάζας στην Ελλάδα

Πηγή: Hellenic Ministry of Environment and Energy. (2023). National biomass utilization report. Athens: Government Printing Office.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2.1 Η Έννοια της βιομάζας

2.1.1 Ορισμός και βασικά χαρακτηριστικά

Σύμφωνα με την Οδηγία 2001/77/EK της Ευρωπαϊκής Ένωσης, ως βιομάζα ορίζεται το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα των προϊόντων, αποβλήτων και υπολειμμάτων που προέρχονται από τη γεωργία, (συμπεριλαμβανομένων των φυτικών και των ζωικών ουσιών), τη δασοκομία και τις συναφείς βιομηχανίες, καθώς και το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα των βιομηχανικών και αστικών αποβλήτων (European Environment Agency, 2024). Ως βιομάζα ορίζεται η ύλη που έχει βιολογική (οργανική) προέλευση. Πρακτικά περιλαμβάνεται σε αυτήν οποιοδήποτε υλικό προέρχεται άμεσα ή έμμεσα από τον φυτικό κόσμο. Πιο συγκεκριμένα, με τον όρο βιομάζα εννοούμε τα φυτικά και δασικά υπολείμματα (καυσόξυλα, κλαδοδέματα, άχυρα, πριονίδια, ελαιοπυρήνες, κουκούτσια), τα ζωικά απόβλητα (κοπριά, άχρηστα αλιεύματα), τα φυτά που καλλιεργούνται στις ενεργειακές φυτείες για να χρησιμοποιηθούν ως πηγή ενέργειας, καθώς επίσης και τα αστικά απορρίμματα και τα υπολείμματα της βιομηχανίας τροφίμων, της αγροτικής βιομηχανίας και το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα των αστικών απορριμμάτων.

Η βιομάζα χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας. Ειδικότερα μπορεί να αξιοποιηθεί για την κάλυψη ενεργειακών αναγκών (θέρμανσης, ψύξης, ηλεκτρισμού κ.λπ.) και ακόμα για την παραγωγή υγρών βιοκαυσίμων.

Τα βασικά χαρακτηριστικά της βιομάζας είναι : α) ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, β) ουδέτερος άνθρακας, γ) πολυχρηστικότητα, δ) περιβαλλοντική συμβολή και ε) πολυμορφία και χαμηλό ενεργειακό περιεχόμενο (Bioenergy Europe, 2024). Σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα, η βιομάζα μπορεί να αναπαράγεται συνεχώς μέσω φυσικών διεργασιών, υπό την προϋπόθεση της αποτελεσματικής διαχείρισης των φυσικών πόρων. Η βιώσιμη διαχείριση γεωργικών καλλιεργειών και δασών εξασφαλίζει τη συνεχή παραγωγή βιομάζας. Ο κύκλος του άνθρακα στη βιομάζα είναι κλειστός, καθώς το διοξείδιο του άνθρακα που απελευθερώνεται κατά την καύση ή επεξεργασία της έχει προηγουμένως δεσμευτεί από τα φυτά μέσω της φωτοσύνθεσης. Η βιομάζα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας, την παραγωγή προηγμένων βιοκαυσίμων όπως βιοαιθανόλη και βιοντίζελ, καθώς και για την παραγωγή καινοτόμων βιοϋλικών και βιοχημικών προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας. Η αξιοποίηση της βιομάζας, πέρα από τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, συμβάλλει στη μείωση της εξάρτησης από ορυκτά καύσιμα και στην αποτελεσματική διαχείριση αποβλήτων μέσω προηγμένων τεχνολογιών όπως η αναερόβια χώνευση. Η βιομάζα

τέλος, παρουσιάζει και ορισμένους περιορισμούς, κυρίως λόγω της πολυμορφίας και του χαμηλού ενεργειακού περιεχομένου της. Η χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα, η υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία και η εποχικότητα στη διαθεσιμότητα δημιουργούν προκλήσεις στη συλλογή, μεταφορά και αποθήκευσή της, επηρεάζοντας το κόστος ενεργειακής μετατροπής (WSEAS Transactions on Business and Economics, 2024).

2.1.2 Είδη βιομάζας

Σύμφωνα με την πρόσφατη μελέτη των Ali et al. (2024), η συστηματική κατηγοριοποίηση της βιομάζας περιλαμβάνει έξι διακριτές κατηγορίες, καθεμία με τα δικά της μοναδικά χαρακτηριστικά και δυνατότητες αξιοποίησης.

Η δασική βιομάζα αποτελεί μία από τις βασικότερες πηγές βιομάζας παγκοσμίως. Σύμφωνα με τους Ispikoudis et al. (2024), η δασική βιομάζα περιλαμβάνει όλα τα προϊόντα και υπολείμματα που προέρχονται από τα δάση και τις δασικές εκτάσεις. Διακρίνεται σε δύο υποκατηγορίες: την πρωτογενή και τη δευτερογενή δασική βιομάζα. Η πρωτογενής δασική βιομάζα προέρχεται απευθείας από τις δασικές εκτάσεις και περιλαμβάνει τους κορμούς των δέντρων, τα κλαδιά, τα φύλλα και τις ρίζες. Η δευτερογενής δασική βιομάζα προκύπτει από τη βιομηχανική επεξεργασία του ξύλου και περιλαμβάνει υπολείμματα όπως πριονίδι, ροκανίδια και φλοιούς. Τα υλικά αυτά συχνά αξιοποιούνται για την παραγωγή βιοενέργειας ή την παρασκευή σύνθετων προϊόντων ξύλου. Λόγω του όγκου της και της ποικιλομορφίας της, η γεωργική βιομάζα αποτελεί μία σημαντική πηγή βιομάζας. Οι Popp et al. (2021) διακρίνουν δύο σημαντικές κατηγορίες : α) τα υπολείμματα καλλιεργειών και β) τις ενεργειακές καλλιέργειες. Τα υπολείμματα καλλιεργειών περιλαμβάνουν όλα τα οργανικά υλικά που παραμένουν στο χωράφι μετά τη συγκομιδή του κύριου προϊόντος. Σε αυτά συγκαταλέγονται το άχυρο των σιτηρών, τα στελέχη του αραβοσίτου, τα κλαδέματα των οπωροφόρων δέντρων και τα υπολείμματα των ελαιοκαλλιεργειών. Οι ενεργειακές καλλιέργειες είναι φυτά που καλλιεργούνται ειδικά για την παραγωγή βιομάζας. Διακρίνονται σε ξυλώδεις (όπως ο ευκάλυπτος και η ψευδακακία) και πολυετείς ή ετήσιες γεωργικές καλλιέργειες (όπως η αγριαγκινάρα, ο μίσχανθος και το ενεργειακό σόργο).

Η κτηνοτροφική βιομάζα προέρχεται από την κτηνοτροφική δραστηριότητα και, σύμφωνα με τους Makepa και Chihobo (2024), αποτελεί μια σημαντική πηγή για την παραγωγή βιοαερίου. Περιλαμβάνει τα απόβλητα από εκτροφές βοοειδών, χοίρων, πουλερικών και αιγοπροβάτων. Η κοπριά των ζώων αποτελεί πλούσια πηγή οργανικής ύλης και θρεπτικών συστατικών. Μέσω

της αναερόβιας χώνευσης, μπορεί να μετατραπεί σε βιοαέριο και οργανικό λίπασμα υψηλής ποιότητας. Επιπλέον, η επεξεργασία των κτηνοτροφικών αποβλήτων συμβάλλει στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της κτηνοτροφίας. Η αστική βιομάζα αποτελεί μία κατηγορία της οποίας η σημαντικότητα αυξάνεται συνεχώς, ιδιαίτερα στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας. Οι Banerjee (2023) αναφέρουν ότι περιλαμβάνει το οργανικό κλάσμα των αστικών στερεών αποβλήτων και την ιλύ από τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων. Τα οργανικά αστικά απόβλητα περιλαμβάνουν υπολείμματα τροφών, απόβλητα κήπων και πάρκων, χαρτί και χαρτόνι, καθώς και ξύλινες συσκευασίες. Η αξιοποίησή τους μέσω κομποστοποίησης ή αναερόβιας χώνευσης προσφέρει σημαντικά περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη.

Η βιομηχανική βιομάζα προέρχεται από διάφορες βιομηχανικές δραστηριότητες, κυρίως από τη βιομηχανία τροφίμων και τη βιομηχανία επεξεργασίας ξύλου. Τα υπολείμματα αυτά, όπως φλοιοί φρούτων, πυρήνες ελιών και πριονίδια, προσφέρουν σημαντικές δυνατότητες για ενεργειακή αξιοποίηση και παραγωγή προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας. Οι Sheikh Ali et al. (2024) αναδεικνύουν τις προοπτικές της υδάτινης βιομάζας, με έμφαση στην καλλιέργεια μικροφυκών. Αυτή η αναδυόμενη κατηγορία προσφέρει καινοτόμες δυνατότητες για την παραγωγή βιοκαυσίμων και προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας, αντιπροσωπεύοντας έναν ταχέως αναπτυσσόμενο τομέα της βιοοικονομίας.

2.2 Βιομάζα και ενέργεια

2.2.1 Τεχνολογίες μετατροπής βιομάζας σε ενέργεια

Η μετατροπή της βιομάζας σε ενέργεια αποτελεί μια πολύπλοκη διαδικασία που μπορεί να επιτευχθεί μέσω διαφόρων τεχνολογιών. Η βιομάζα μπορεί να μετατραπεί σε δύο κύρια προϊόντα : α) ενέργεια με τη μορφή ηλεκτρισμού και θερμότητας και β) καύσιμα μεταφοράς ή για αυτόνομη χρήση. Σύμφωνα με την ανάλυση του Banerjee (2023), οι τεχνολογίες μετατροπής της βιομάζας διακρίνονται σε τρεις θεμελιώδεις κατηγορίες: α) θερμοχημικές διεργασίες, β) βιοχημικές/βιολογικές διεργασίες και γ) μηχανικές διεργασίες με εστεροποίηση για την παραγωγή βιοντίζελ. Η επιλογή της κατάλληλης διαδικασίας για την μετατροπή της βιομάζας επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, οι οποίοι κατά σειρά σημαντικότητας είναι : α) η επιθυμητή μορφή ενέργειας, πχ ηλεκτρισμός, καύσιμο , β) ο τύπος και η ποσότητα της διαθέσιμης βιομάζας, γ) περιβαλλοντικοί περιορισμοί, δ) οικονομικές παράμετροι και ε) οι ειδικότερες συνθήκες της περιοχής.

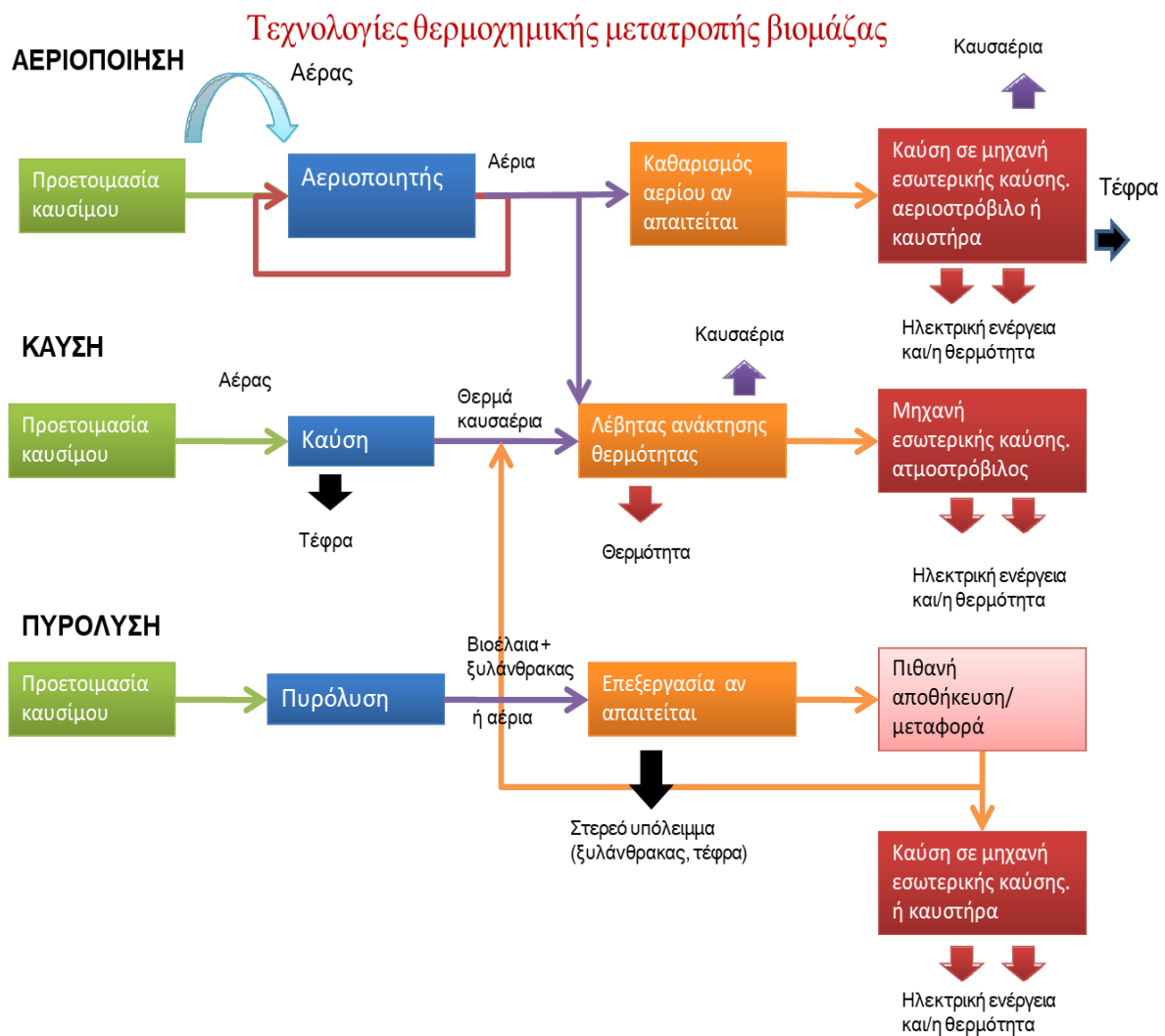
2.2.1.1 Θερμοχημικές διεργασίες μετατροπής βιομάζας

Η άμεση καύση αποτελεί την πλέον διαδεδομένη μέθοδο ενεργειακής αξιοποίησης της βιομάζας, εφαρμοζόμενη σε ένα ευρύ φάσμα τεχνολογικών συστημάτων. Τα συστήματα αυτά εκτείνονται από απλές εγκαταστάσεις οικιακής χρήσης έως εξελιγμένες βιομηχανικές μονάδες, συμπεριλαμβανομένων προηγμένων καυστήρων σταθερής και ρευστοποιημένης κλίνης και λεβήτων κύκλου Rankine. Η διαδικασία χαρακτηρίζεται από υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας, κυμαινόμενες μεταξύ 800°C και 1000°C. Παρότι η τεχνολογία της άμεσης καύσης μπορεί να αξιοποιήσει όλα τα είδη βιομάζας, η αποτελεσματικότητά της περιορίζεται σημαντικά όταν η περιεκτικότητα σε υγρασία υπερβαίνει το 50%. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η εφαρμογή της Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας (ΣΗΘ), η οποία επιτυγχάνει βελτιστοποιημένη ενεργειακή απόδοση μέσω της ταυτόχρονης παραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας. Αξιοσημείωτη είναι επίσης η τεχνολογία σύγκαισης βιομάζας με λιγνίτη, όπου η βιομάζα συνεισφέρει το 7-10% του συνολικού καυσίμου. Η μέθοδος αυτή συμβάλλει στη βελτίωση της αποδοτικότητας των συμβατικών λιγνιτικών μονάδων και στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Η συνολική απόδοση των συστημάτων καύσης βιομάζας για ηλεκτροπαραγωγή κυμαίνεται μεταξύ 20% και 40%, αναλόγως του εξοπλισμού και των συνθηκών λειτουργίας.

Η αεριοποίηση συνιστά μια προηγμένη τεχνολογία μετατροπής της βιομάζας σε αέριο σύνθεσης (syngas), μέσω μερικής οξείδωσης της οργανικής ύλης παρουσία ατμού σε θερμοκρασίες 800-900°C. Η υψηλή περιεκτικότητα της βιομάζας σε πτητικά συστατικά (70-86% σε ξηρή βάση) την καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλη για αεριοποίηση. Το παραγόμενο syngas περιλαμβάνει κυρίως υδρογόνο (H_2), μεθάνιο (CH_4) και μονοξείδιο του άνθρακα (CO), με μικρότερες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) και υδρογονανθράκων. Μέσω ειδικών συστημάτων καθαρισμού, απομακρύνονται ακαθαρσίες όπως αλκάλια, διοξείδιο του θείου και τέφρα, αναβαθμίζοντας το ενεργειακό περιεχόμενο του αερίου στο 20-25% του φυσικού αερίου.

Η πυρόλυση αποτελεί μια εξελιγμένη διαδικασία θερμικής επεξεργασίας της βιομάζας, η οποία πραγματοποιείται απουσία οξυγόνου σε θερμοκρασία περίπου 500°C. Η τεχνολογία αυτή διακρίνεται για την υψηλή της απόδοση, ιδιαίτερα στην παραγωγή βιοελαίου, που μπορεί να φτάσει το 80% μέσω της διαδικασίας αστραπιαίας πυρόλυσης. Το παραγόμενο βιοέλαιο, παρά τη χαμηλότερη θερμογόνο δύναμή του συγκριτικά με το συμβατικό πετρέλαιο, βρίσκει

εφαρμογή σε συστήματα θέρμανσης, λέβητες και μηχανές εσωτερικής καύσης. Επιπλέον, μέσω περαιτέρω επεξεργασίας, μπορεί να μετατραπεί σε προηγμένα βιοκαύσιμα, όπως το sundiesel. Τα στερεά υποπροϊόντα της διεργασίας, συμπεριλαμβανομένων του βιοεξανθρακώματος και της τέφρας, προσφέρουν πρόσθετες δυνατότητες αξιοποίησης, από τη βελτίωση εδαφών έως τη χρήση ως πρώτη ύλη σε βιομηχανικές εφαρμογές.



Πηγή : Ν. Μαμάσης, και Α. Ευστρατιάδης, Σημειώσεις μαθήματος "Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία", Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Νοέμβριος 2023

2.2.1.2 Βιοχημικές διεργασίες μετατροπής βιομάζας

Οι βιοχημικές διεργασίες μετατροπής βιομάζας αποτελούν μια σημαντική κατηγορία τεχνολογιών που αξιοποιούν τη βιολογική δραστηριότητα μικροοργανισμών για την παραγωγή ενέργειας και βιοκαυσίμων. Οι κύριες τεχνολογίες σε αυτή την κατηγορία περιλαμβάνουν την αναερόβια χώνευση και τη ζύμωση, κάθε μία με τα δικά της μοναδικά χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα.

Η αναερόβια χώνευση αποτελεί μια εξαιρετικά αποτελεσματική βιολογική διεργασία κατά την οποία η οργανική ύλη μετατρέπεται σε βιοαέριο υπό αναερόβιες συνθήκες. Το παραγόμενο βιοαέριο αποτελείται κυρίως από μεθάνιο (CH_4) και διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), με το ενεργειακό περιεχόμενό του να αντιστοιχεί στο 20-40% της θερμογόνου δύναμης της αρχικής βιομάζας. Η διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης πραγματοποιείται μέσω της συντονισμένης δράσης διαφόρων ομάδων μικροοργανισμών, οι οποίοι διασπούν σταδιακά τα πολύπλοκα οργανικά μόρια σε απλούστερες ενώσεις και τελικά σε βιοαέριο. Το παραγόμενο βιοαέριο μπορεί να αξιοποιηθεί άμεσα για την παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας μέσω μονάδων συμπαραγωγής, προσφέροντας μια αποδοτική λύση για τη διαχείριση οργανικών αποβλήτων και την παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας (Martínez-Arce, O'Flaherty & Styles, 2024).

Η ζύμωση αποτελεί μια εμπορικά καθιερωμένη διεργασία για την παραγωγή βιοαιθανόλης από σακχαρούχες και αμυλούχες πρώτες ύλες. Η διαδικασία περιλαμβάνει την επεξεργασία της βιομάζας μέσω άλεσης, την ενζυματική μετατροπή του αμύλου σε σάκχαρα, και στη συνέχεια τη ζύμωση των σακχάρων σε αιθανόλη με τη βοήθεια ειδικών μικροοργανισμών. Το τελικό στάδιο περιλαμβάνει την απόσταξη για την παραγωγή καθαρής βιοαιθανόλης. Η αποδοτικότητα της διεργασίας είναι αξιοσημείωτη, καθώς ένας τόνος καλαμποκιού μπορεί να αποδώσει περίπου 450 λίτρα βιοαιθανόλης. Η παραγόμενη βιοαιθανόλη μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε αυτούσια είτε σε μείγματα με συμβατική βενζίνη ως καύσιμο κίνησης, προσφέροντας μια βιώσιμη εναλλακτική στα ορυκτά καύσιμα. Ιδιαίτερη σημασία έχει η αξιοποίηση των υπολειμμάτων της διεργασίας, με το στερεό υπόλειμμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ζωοτροφή υψηλής διατροφικής αξίας, ενώ στην περίπτωση επεξεργασίας ζαχαροκάλαμου, η βαγάση (το ινώδες υπόλειμμα) μπορεί να τροφοδοτήσει μονάδες αεριοποίησης για την παραγωγή πρόσθετης ενέργειας. Η τεχνολογία της ζύμωσης συνεχίζει να εξελίσσεται, με την έρευνα να επικεντρώνεται στην ανάπτυξη προηγμένων διεργασιών για την

αξιοποίηση λιγνοκυτταρινούχων πρώτων υλών και την παραγωγή βιοκαυσίμων δεύτερης γενιάς. Αυτές οι εξελίξεις υπόσχονται ακόμη υψηλότερη αποδοτικότητα και βελτιωμένη περιβαλλοντική απόδοση, ενισχύοντας περαιτέρω τη συμβολή της ζύμωσης στη βιώσιμη παραγωγή ενέργειας (Piercy et al. 2025).

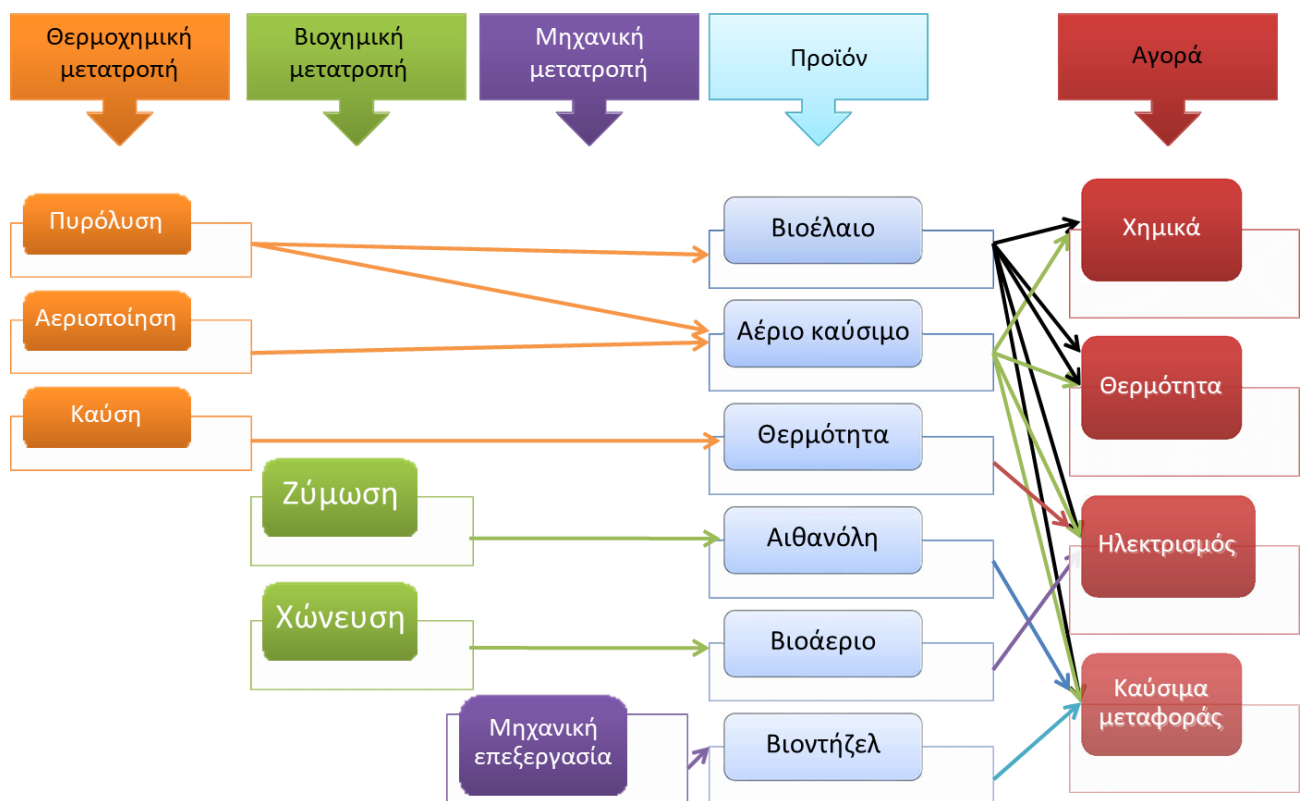
Και οι δύο τεχνολογίες, η αναερόβια χώνευση και η ζύμωση, διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην προώθηση της κυκλικής οικονομίας και τη μετάβαση προς ένα πιο βιώσιμο ενεργειακό μέλλον, συνδυάζοντας την αποτελεσματική διαχείριση αποβλήτων με την παραγωγή καθαρής ενέργειας και την προστασία του περιβάλλοντος (Sterling, 2024).

2.2.1.3 Μηχανικές διεργασίες παραγωγής βιοκαυσίμων

Η παραγωγή βιοντίζελ μέσω μηχανικών διεργασιών και εστεροποίησης αποτελεί μια προηγμένη τεχνολογική διαδικασία που αξιοποιεί ελαιούχους σπόρους για την παραγωγή εναλλακτικών καυσίμων. Η ευρωπαϊκή αγορά κυριαρχείται από την καλλιέργεια κράμβης (rapeseed), η οποία αντιπροσωπεύει το 85% της συνολικής παραγωγής, ενώ σημαντικό μερίδιο κατέχουν επίσης οι ηλιόσποροι, το φοινικέλαιο και οι σπόροι σόγιας. Η βιομηχανική παραγωγή βιοντίζελ ακολουθεί μια σύνθετη και αυστηρά ελεγχόμενη διαδικασία που περιλαμβάνει πολλαπλά στάδια επεξεργασίας. Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει την προκαταρκτική επεξεργασία των σπόρων, όπου πραγματοποιείται ξήρανση για τη μείωση της περιεκτικότητας σε υγρασία από 15% σε 9%. Ακολουθεί το πλύσιμο των σπόρων, ενώ για συγκεκριμένες πρώτες ύλες, όπως οι ηλιόσποροι, απαιτείται επιπρόσθετα η διαδικασία του ξεφλουδίσματος. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται μηχανική επεξεργασία των σπόρων μέσω θραύσης ή λειοτρίβισης, με παράλληλο έλεγχο της υγρασίας και διατήρηση της θερμοκρασίας στους 80°C. Ακολουθεί το κρίσιμο στάδιο του πρεσαρίσματος, κατά το οποίο επιτυγχάνεται η εξαγωγή περίπου 75% του περιεχόμενου ελαίου. Το εξαγόμενο έλαιο υποβάλλεται σε διεργασίες φιλτραρίσματος και αφυδάτωσης πριν προχωρήσει στο στάδιο του εξευγενισμού (Lofgren & Galvan, 2024). Το στερεό υπόλειμμα, που περιέχει το υπόλοιπο 25% του ελαίου, υποβάλλεται σε περαιτέρω επεξεργασία για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης. Μετά από λειοτρίβιση και με την προσθήκη εξανίου, επιτυγχάνεται η εκχύλιση του εναπομείναντος ελαίου. Το εξάνιο ανακτάται και επαναχρησιμοποιείται στη διαδικασία, εξασφαλίζοντας την οικονομική και περιβαλλοντική βιωσιμότητα της παραγωγής (Verma, Sahu & Almutairi, 2024). Η διαδικασία ολοκληρώνεται με τον εξευγενισμό του παραγόμενου ελαίου, ο οποίος περιλαμβάνει μια σειρά εξειδικευμένων διεργασιών για την απομάκρυνση ανεπιθύμητων

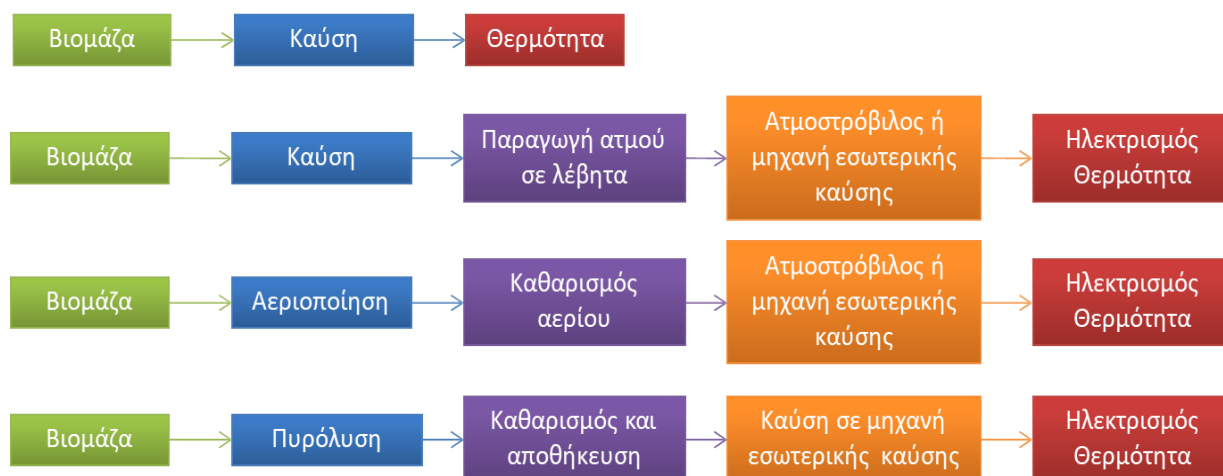
συστατικών, οι οποίες κατά σειρά είναι: α) αφαίρεση φωσφατιδίων, β) εξουδετέρωση οξέων, γ) απομάκρυνση χρωστικών ουσιών, δ) εξάλειψη ανεπιθύμητων οσμών και ε) τελική αφυδάτωση. Το τελικό προϊόν είναι το καθαρό φυτικό έλαιο (PPO - Pure Plant Oil), το οποίο μπορεί είτε να χρησιμοποιηθεί απευθείας ως καύσιμο είτε να μετατραπεί σε βιοντίζελ μέσω της διαδικασίας της μετεστεροποίησης ή αλκοόλυσης. Η τελική επιλογή εξαρτάται από τις προδιαγραφές του επιθυμητού προϊόντος και τις απαιτήσεις της αγοράς (Oo, Juera-Ong & Somnuk, 2024).

Διαδικασίες μετατροπής βιομάζας, προϊόντα και αγορές

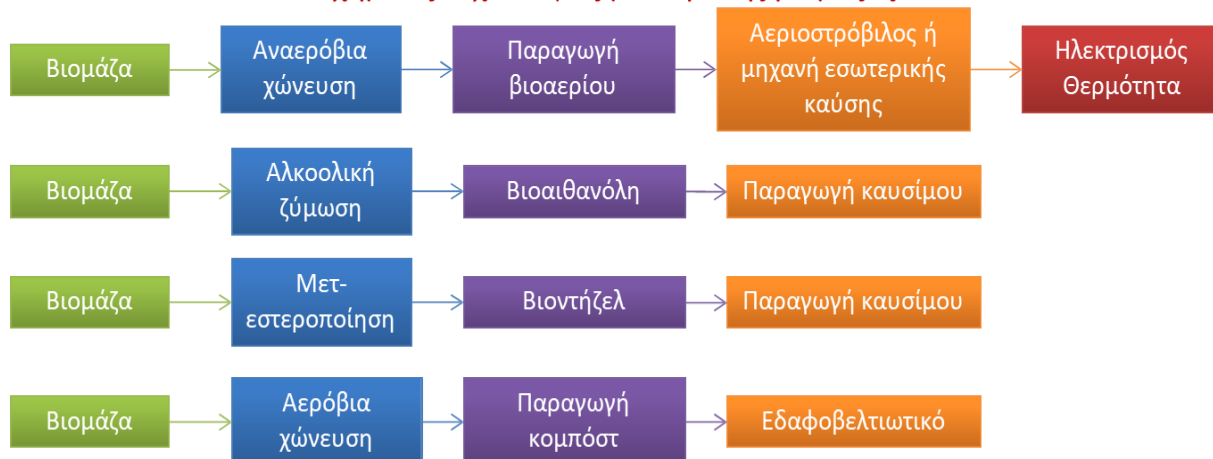


Πηγή : Ν. Μαμάσης, και Α. Ευστρατιάδης, Σημειώσεις μαθήματος "Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία", 286 pages, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Νοέμβριος 2023

Θερμοχημικές τεχνολογίες μετατροπής βιομάζας



Βιοχημικές τεχνολογίες μετατροπής βιομάζας



Πηγή : Ν. Μαμάσης, και Α. Ευστρατιάδης, Σημειώσεις μαθήματος "Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία", Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Νοέμβριος 2023

2.2.2 Προκλήσεις και ευκαιρίες στην παραγωγή ενέργειας

Η μετάβαση προς ένα βιώσιμο ενεργειακό μέλλον προϋποθέτει την ενεργειακή αξιοποίηση της βιομάζας με τον βέλτιστο δυνατό τρόπο. Σύμφωνα με την μελέτη των Ali et al. (2024), ο τομέας της βιοενέργειας αναμένεται να αντιπροσωπεύει το 25-30% της παγκόσμιας ενεργειακής παραγωγής έως το 2050, υπογραμμίζοντας τη στρατηγική του σημασία στο μελλοντικό ενεργειακό μείγμα (Ali et al. 2024).

Ένας από του κρισιμότερους παράγοντες για την περαιτέρω ανάπτυξη στον τομέα της βιοενέργειας αποτελεί η βελτιστοποίηση των τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται για την μετατροπή της. Ο Banerjee (2023) στην έρευνα του παρουσιάζει μια εκτεταμένη ανάλυση των τεχνικών παραμέτρων που επηρεάζουν την απόδοση των συστημάτων. Παρά την πρόοδο που έχει επέλθει τα τελευταία χρόνια, η θερμική απόδοση των συστημάτων κυμαίνεται στο 75-85%, ενώ η απόδοση μετατροπής σε ηλεκτρική ενέργεια παραμένει στο 30-35%, υποδεικνύοντας σημαντικά περιθώρια βελτίωσης. Η αποτελεσματική διαχείριση της μεταβλητότητας της πρώτης ύλης αποτελεί μια πρόσθετη τεχνική πρόκληση. Οι διακυμάνσεις στην ποιότητα και την περιεκτικότητα σε υγρασία της βιομάζας απαιτούν την ανάπτυξη εξελιγμένων συστημάτων ελέγχου και παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο. Από την άλλη πλευρά η εφαρμογή νανοτεχνολογίας, ιδιαίτερα στην ανάπτυξη νανοκαταλυτών, έχει οδηγήσει σε αύξηση της απόδοσης μετατροπής κατά 15-20%. Η ενσωμάτωση τεχνητής νοημοσύνης και προηγμένων συστημάτων αυτοματοποίησης στη διαχείριση των διεργασιών υπόσχεται μείωση του λειτουργικού κόστους κατά 25-30% (Banerjee, 2024).

Το υψηλό κόστος εγκατάστασης παραμένει ένα σημαντικό εμπόδιο. Οι Sheikh Ali et al. (2024) αναφέρουν ότι για μονάδες μεσαίας κλίμακας (5-20 MW), το κόστος εγκατάστασης κυμαίνεται μεταξύ 2.500-4.000 €/kW, με λειτουργικό κόστος 0,08-0,12 €/kWh. Επιπλέον, η διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας είναι κρίσιμη, καθώς το κόστος πρώτης ύλης μπορεί να αντιπροσωπεύει έως και το 60% του συνολικού λειτουργικού κόστους. Από την άλλη πλευρά, μέσω της παραγωγής πολλαπλών προϊόντων μπορούν να αυξηθούν τα συνολικά έσοδα κατά 40-50% ενώ η βελτιστοποίηση της εφοδιαστικής αλυσίδας μπορεί να οδηγήσει σε μείωση του κόστους πρώτης ύλης κατά 20-30%.

Η ανάγκη για προηγμένα συστήματα ελέγχου εκπομπών παραμένει επίκαιρη, παρά το γεγονός ότι η βιομάζα θεωρείται σχετικά καθαρή πηγή ενέργειας. Η αντικατάσταση ορυκτών καυσίμων με βιομάζα μπορεί να μειώσει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά 60-90%, ενώ σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη μπορεί να προσφέρει η ενσωμάτωση στην κυκλική οικονομία, μέσω της αξιοποίησης γεωργικών και δασικών υπολειμμάτων (Pelkmans, Cowie &

Berndes, 2024) Ο τομέας προσφέρει σημαντικές ευκαιρίες απασχόλησης, με κάθε MW εγκατεστημένης ισχύος να δημιουργεί 4-6 άμεσες και 8-12 έμμεσες θέσεις εργασίας. Η ανάπτυξη μονάδων βιοενέργειας σε αγροτικές περιοχές ενισχύει τη διασύνδεση μεταξύ γεωργίας, βιομηχανίας και ενεργειακού τομέα, συμβάλλοντας στην περιφερειακή ανάπτυξη. Από την άλλη πλευρά παρατηρείται μία έλλειψη σε εξειδικευμένο προσωπικό κάνοντας πλέον απαραίτητη την εκπαίδευση και κατάρτιση σε προηγμένες τεχνολογίες βιομάζας. Τέλος, η έλλειψη γνώσης των μελών τοπικών κοινωνιών όπου πρόκειται να γίνουν τα έργα, οδηγεί σε αντιδράσεις και ανησυχίες για περιβαλλοντικά ζητήματα που μπορούν να προκύψουν (Mabee, 2024). Η επιτυχής αντιμετώπιση των προκλήσεων και η αξιοποίηση των ευκαιριών απαιτεί μια ολοκληρωμένη στρατηγική προσέγγιση και σε μεγάλο βαθμό θα καθορίσει τις εξελίξεις στον τομέα. Η συνεχής έρευνα και ανάπτυξη, σε συνδυασμό με την ενίσχυση των συνεργασιών μεταξύ ερευνητικών ιδρυμάτων, βιομηχανίας και δημόσιου τομέα, θα διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο στην περαιτέρω ανάπτυξη του τομέα. Η εστίαση στην τεχνολογική καινοτομία, την οικονομική βιωσιμότητα, την περιβαλλοντική προστασία και την κοινωνική αποδοχή αποτελεί τη βάση για τη μακροπρόθεσμη επιτυχία του τομέα της βιοενέργειας (Project Drawdown, 2024).

2.3 Βιομάζα και Υλικά

2.3.1 Παραγωγή υλικών από βιομάζα

Η παραγωγή υλικών από την βιομάζα έχει ως στόχο την υποκατάσταση συμβατικών υλικών που προέρχονται από ορυκτούς πόρους, προσφέροντας παράλληλα σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη. Η βιομάζα αποτελεί πρώτη ύλη για την παραγωγή ενός ευρέος φάσματος προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας, από βιοπλαστικά και βιοχημικά έως εξειδικευμένα βιοπολυμερή, υποστηρίζοντας τη μετάβαση προς την κυκλική οικονομία (European Bioplastics, 2024).

Τα βιοπλαστικά αντιπροσωπεύουν μια ταχέως αναπτυσσόμενη κατηγορία υλικών με εξαιρετικές προοπτικές και σύμφωνα με τους Makera και Chihobo (2024), η παγκόσμια αγορά βιοπλαστικών προβλέπεται να σημειώσει αύξηση 25% έως το 2027. Δύο κύριες κατηγορίες βιοπλαστικών ξεχωρίζουν για τις καινοτόμες εφαρμογές τους: α) το πολυγαλακτικό οξύ (PLA) και β) οι πολυϋδροξυαλκανοάτες (PHA). Το πολυγαλακτικό οξύ (PLA) παράγεται μέσω προηγμένων διεργασιών ζύμωσης και πολυμερισμού από άμυλο καλαμποκιού ή ζαχαροκάλαμου. Διακρίνεται για την υψηλή μηχανική αντοχή, τη διαφάνεια και τη βιοαποικοδομησιμότητά του, καθιστώντας το ιδανικό για εφαρμογές στη συσκευασία

τροφίμων, τις ιατρικές συσκευές και την τρισδιάστατη εκτύπωση. Οι πολυϋδροξυαλκανοάτες (PHA) παράγονται μέσω εξειδικευμένων διεργασιών μικροβιακής ζύμωσης. Προσφέρουν μηχανικές ιδιότητες εφάμιλλες των συμβατικών πλαστικών, διατηρώντας παράλληλα την πλήρη βιοαποικοδομησιμότητά τους (Shah & Kaur, 2024).

Η παραγωγή βιοχημικών από βιομάζα περιλαμβάνει μια μεγάλη ποικιλία προϊόντων με διευρυμένες εφαρμογές. Η βιοιθανόλη για παράδειγμα, η οποία παράγεται μέσω διεργασιών ζύμωσης από σακχαρούχες και αμυλούχες πρώτες ύλες, μπορεί να αξιοποιηθεί τόσο ως καύσιμο όσο και ως πρώτη ύλη στη χημική βιομηχανία. Το γαλακτικό οξύ, παραγόμενο μέσω εξειδικευμένων ζυμώσεων, αποτελεί βασικό συστατικό για την παραγωγή PLA και βρίσκει εφαρμογές στη βιομηχανία τροφίμων, καλλυντικών και φαρμάκων. Η βιογλυκερίνη, προερχόμενη από την παραγωγή βιοντίζελ, προσφέρει πολλαπλές δυνατότητες αξιοποίησης σε διάφορους βιομηχανικούς τομείς.

Μια άλλη κατηγορία είναι τα βιοπολυμερή τα οποία περιλαμβάνουν τόσο φυσικά όσο και συνθετικά πολυμερή βιολογικής προέλευσης. Τα παράγωγα κυτταρίνης, όπως η καρβοξυμεθυλοκυτταρίνη (CMC), βρίσκουν εφαρμογές από τη συσκευασία τροφίμων έως τη φαρμακευτική βιομηχανία. Οι πρωτεΐνες φυτικής προέλευσης αξιοποιούνται στην παραγωγή βιοδιασπώμενων υλικών συσκευασίας (Wang, Zhang & Li, 2024).

Τα λιγνοκυτταρινούχα υλικά αποτελούν μια πολλά υποσχόμενη κατηγορία που βασίζεται στην αξιοποίηση των τριών βασικών συστατικών της φυτικής βιομάζας: κυτταρίνη, ημικυτταρίνη και λιγνίνη. Η κυτταρίνη, ως το πλέον διαδεδομένο φυσικό πολυμερές, προσφέρει εξαιρετικές δυνατότητες για την παραγωγή προηγμένων υλικών. Η λιγνίνη, παρά την πολύπλοκη δομή της, αναδεικνύεται ως πολύτιμη πρώτη ύλη για την παραγωγή εξειδικευμένων χημικών προϊόντων. Τα βιοσύνθετα υλικά αντιπροσωπεύουν μια κατηγορία που συνδυάζει φυσικές ίνες με βιοπολυμερή. Η χρήση τους στην αυτοκινητοβιομηχανία προσφέρει σημαντική μείωση βάρους και βελτιωμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Τα βιοενεργά υλικά, ιδιαίτερα οι υδρογέλες από φυσικά πολυμερή, αποτελούν καινοτόμες λύσεις στην αναγεννητική ιατρική και την επούλωση τραυμάτων (European Bioplastics, 2024). Τα υλικά από βιομάζα διακρίνονται για τις εξειδικευμένες ιδιότητές τους, συμπεριλαμβανομένης της βιοαποικοδομησιμότητας και της βιοσυμβατότητας. Η συνεχής τεχνολογική εξέλιξη οδηγεί στη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων και της θερμικής σταθερότητας, διευρύνοντας το πεδίο εφαρμογών τους. Η βαθύτερη κατανόηση της σχέσης δομής-ιδιοτήτων επιτρέπει τη στοχευμένη ανάπτυξη υλικών για εξειδικευμένες εφαρμογές.

2.3.2 Οικονομική βιωσιμότητα και προοπτικές

Η συνολική αξία της αγοράς βιομάζας και παράγωγων υλικών έφτασε τα 185 δισεκατομμύρια δολάρια το 2023, με προοπτική να υπερδιπλασιαστεί στα 365 δισεκατομμύρια δολάρια έως το 2030 και ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης 15-20% (Ali et al. ,2024). Η αγορά παρουσιάζει μια σαφή τμηματοποίηση, με τα βιοπλαστικά να κυριαρχούν κατέχοντας το 35% της συνολικής αγοράς. Ακολουθούν τα βιοχημικά με 28%, τα βιοπολυμερή με 20%, και τα λοιπά βιοϋλικά με 17%. Ειδικότερα, για την αγορά των βιοπλαστικών, προβλέπεται ετήσιος ρυθμός ανάπτυξης 22% και εκτιμώμενη αξία 127 δισεκατομμύρια δολάρια έως το 2030 (Sheikh Ali et al. , 2024). Η ζήτηση καθοδηγείται κυρίως από τρεις βασικούς τομείς: τη συσκευασία τροφίμων και ποτών (45%), την αυτοκινητοβιομηχανία (20%), και τον κατασκευαστικό τομέα (15%). Από πλευράς γεωγραφικής κατανομής, η Ευρώπη αναδεικνύεται ως κυρίαρχος παίκτης με 38% της αγοράς, ακολουθούμενη από τη Βόρεια Αμερική (32%) και την περιοχή Ασίας-Ειρηνικού (25%) (Precedence Research, 2024). Από πλευράς κόστους, το κόστος πρώτων υλών αποτελεί το μεγαλύτερο μερίδιο, αντιπροσωπεύοντας το 40-50% του συνολικού κόστους παραγωγής. Η διακύμανση αυτή αντανακλά την εποχικότητα και τη διαθεσιμότητα των πρώτων υλών, με το κόστος των γεωργικών υπολειμμάτων να κυμαίνεται μεταξύ 30-80 ευρώ ανά τόνο και των ενεργειακών καλλιεργειών να φτάνει τα 120-150 ευρώ ανά τόνο. Το λειτουργικό κόστος, συμπεριλαμβανομένης της ενέργειας και της εργασίας, αντιστοιχεί στο 25-30% του συνολικού κόστους. Οι σύγχρονες μονάδες παραγωγής επιτυγχάνουν σημαντική μείωση του ενεργειακού κόστους μέσω της αποτελεσματικής αξιοποίησης των υπολειμμάτων για ενεργειακούς σκοπούς.

Το 2023, σύμφωνα με τους Makepa και Chihobo (2024) καταγράφηκαν συνολικές επενδύσεις 50 δισεκατομμυρίων δολαρίων, με μια ισορροπημένη κατανομή μεταξύ έρευνας και ανάπτυξης (30%), υποδομών και εξοπλισμού (45%), και ανάπτυξης εφοδιαστικής αλυσίδας και αγοράς (25%). Η έμφαση στην έρευνα και ανάπτυξη αντανακλά τη στρατηγική προτεραιότητα για τεχνολογική καινοτομία και βελτίωση της αποδοτικότητας (Radosits, Smith & Thompson, 2024). Η μελλοντική ανάπτυξη της αγοράς βιομάζας και βιοϋλικών φαίνεται να καθορίζεται από τρεις βασικούς άξονες: α) τεχνολογική καινοτομία, β) στοχευμένες στρατηγικές και γ) το ρυθμιστικό πλαίσιο και οι πολιτικές υποστήριξης (Radosits et al., 2024). Η τεχνολογική καινοτομία αναμένεται να μειώσει το κόστος παραγωγής κατά 30-40% την επόμενη πενταετία, με την τεχνητή νοημοσύνη και την αυτοματοποίηση να διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη βελτίωση της αποδοτικότητας. Η ανάπτυξη αγοράς απαιτεί στοχευμένες

στρατηγικές που εστιάζουν στην περιβαλλοντική βιωσιμότητα και την κυκλική οικονομία, ενισχύοντας την αποδοχή των βιοϋλικών από τους καταναλωτές. Το ρυθμιστικό πλαίσιο και οι πολιτικές υποστήριξης θα συνεχίσουν να διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη της αγοράς, με την εναρμόνιση προτύπων να διευκολύνει το διεθνές εμπόριο. Τέλος, η μακροπρόθεσμη επιτυχία θα εξαρτηθεί από την ικανότητα των επιχειρήσεων να συνδυάσουν αποτελεσματικά την τεχνολογική καινοτομία με τη βιώσιμη ανάπτυξη, ανταποκρινόμενες στις αυξανόμενες απαιτήσεις της αγοράς για περιβαλλοντικά φιλικά προϊόντα υψηλής ποιότητας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Η ΒΙΟΟΙΚΟΝΟΜΙΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

3.1 Τρέχουσα κατάσταση

3.1.1 Η θέση της Ελλάδας στη βιοοικονομία διεθνώς

Η Ελλάδα διαθέτει συνολική εγκατεστημένη ισχύ μονάδων βιομάζας περίπου 95 MW ενώ ο αντίστοιχος ευρωπαϊκός μέσος όρος ανέρχεται σε 850 MW . Η Γερμανία ηγείται στον τομέα με διαθέσιμη εγκατεστημένη ισχύ 8.900 MW. Η ετήσια παραγωγή ενέργειας από βιομάζα στην Ελλάδα καλύπτει το 3% των εθνικών ενεργειακών αναγκών, έναντι 8.5% του μέσου όρου της ΕΕ (European Commission, 2024).

Στην Ελλάδα, η διαθέσιμη βιομάζα προέρχεται κυρίως από γεωργικά υπολείμματα (40%), δασική βιομάζα (30%) και κτηνοτροφικά/αστικά απόβλητα (30%). Το ποσοστό αξιοποίησης της διαθέσιμης βιομάζας ανέρχεται σε 35%, το οποίο είναι σημαντικά χαμηλότερο από τον ευρωπαϊκό μέσο όρο που ανέρχεται στο 60% (ELSTAT, 2024)

Η Σουηδία και η Φινλανδία εμφανίζουν τα υψηλότερα ποσοστά αξιοποίησης τα οποία ανέρχονται σε άνω του 80%. Οι επενδύσεις στον τομέα της βιομάζας στην Ελλάδα ανέρχονται σε 180 εκατομμύρια ευρώ ετησίως ενώ η μέση ετήσια επένδυση ανά κράτος-μέλος είναι 850 εκατομμύρια ευρώ. Το 45% της χρηματοδότησης προέρχεται από ευρωπαϊκά προγράμματα, 35% από ιδιωτικές επενδύσεις και 20% από εθνικούς πόρους (UNECE. 2024).

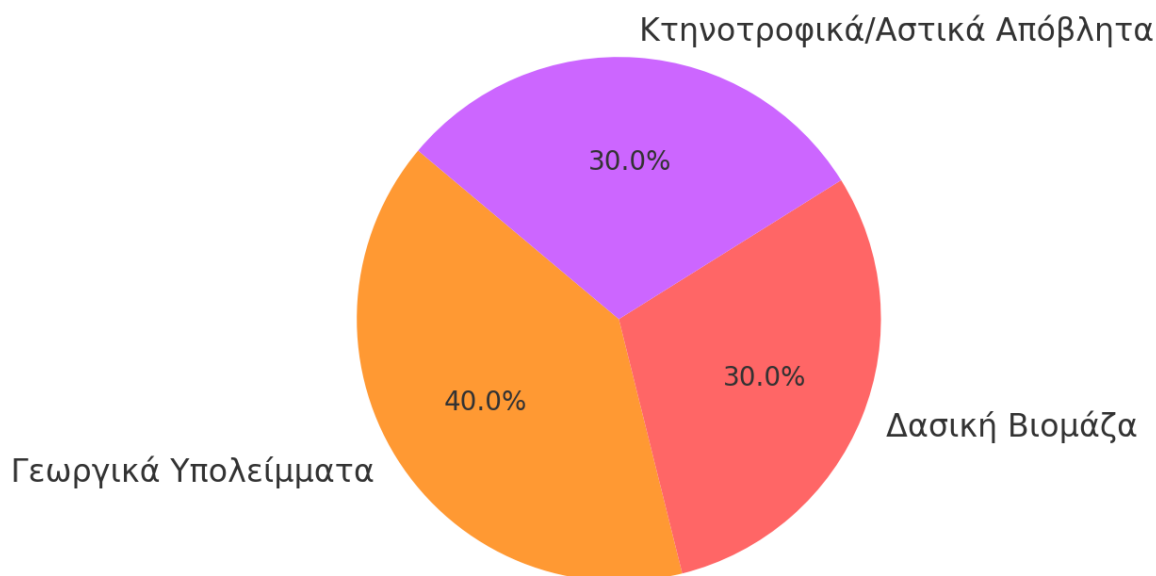
Από πλευράς απόδοσης, η μέση απόδοση των ελληνικών μονάδων βιομάζας είναι 65%, ενώ ο αντίστοιχος ευρωπαϊκός μέσος όρος 78%. Η διαφορά οφείλεται κυρίως στην παλαιότητα του εξοπλισμού και την περιορισμένη εφαρμογή προηγμένων τεχνολογιών. Η Δανία και η Αυστρία διαθέτουν τις πιο αποδοτικές μονάδες με απόδοση άνω του 85%. Ο αριθμός των εργαζομένων που απασχολούνται άμεσα στον τομέα της βιομάζας ανέρχεται σε 3.500 εργαζόμενους και έμμεσα σε περίπου 8.000, ενώ η συνεισφορά στο ΑΕΠ είναι 0.4%, έναντι 1.2% του ευρωπαϊκού μέσου όρου (Bioenergy Europe, 2024).

Δείκτης	Ελλάδα	Μέσος Όρος ΕΕ	Χώρα με Υψηλότερη Τιμή
Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)	95	850	Γερμανία (8.900)
Κάλυψη Ενεργειακών Αναγκών (%)	3%	8.5%	—
Ποσοστό Αξιοποίησης Βιομάζας (%)	35%	60%	Σουηδία & Φινλανδία (>80%)
Μέση Απόδοση Μονάδων (%)	65%	78%	Δανία & Αυστρία (>85%)
Ετήσιες Επενδύσεις (€)	180 εκ.	850 εκ.	—
Συνεισφορά στο ΑΕΠ (%)	0.4%	1.2%	—
Απασχόληση (Άμεση/Εμμεση)	3.500 / 8.000	—	—

Πίνακας 4: Συγκριτικά Στοιχεία Βιομάζας Ελλάδας και ΕΕ

Πηγή: *European Commission (2024); ELSTAT (2024); UNECE (2024); Bioenergy Europe (2024)*

Ποσοστιαία Κατανομή Πηγών Βιομάζας στην Ελλάδα



Πηγή: ELSTAT (2024)

Γράφημα 4: Ποσοστιαία Κατανομή Πηγών Βιομάζας στην Ελλάδα

Πηγή: *European Commission (2024); ELSTAT (2024); UNECE (2024); Bioenergy Europe (2024)*

3.1.2 Δεδομένα και στατιστικά για την παραγωγή και χρήση της βιομάζας.

Στην Ελλάδα, η διαθέσιμη βιομάζα προέρχεται κυρίως από γεωργικά υπολείμματα (40%), δασική βιομάζα (30%) και κτηνοτροφικά/αστικά απόβλητα (30%).

Η συνολική ετήσια παραγωγή γεωργικών υπολειμμάτων στην Ελλάδα ανέρχεται σε 7,5 εκατομμύρια τόνους εκ των οποίων το 40% (3 εκατομμύρια τόνοι) είναι τεχνικά και οικονομικά αξιοποιήσιμο. Τα υπολείμματα αυτά προέρχονται κατά 45% από σιτηρά, 25% από ελαιοκομικά προϊόντα, 20% από καλαμπόκι και 10% από άλλες καλλιέργειες. Το μέσο ενεργειακό περιεχόμενο των γεωργικών υπολειμμάτων κυμαίνεται στα 14,5 MJ/kg ενώ η

ετήσια ενεργειακή δυναμικότητα υπολογίζεται σε 27.000 TJ, με δυνατότητα παραγωγής 300 GWh ηλεκτρικής ενέργειας (CRES, 2024). Ο βαθμός απόδοσης στη μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια κυμαίνεται μεταξύ 25-30%, ανάλογα με την τεχνολογία που χρησιμοποιείται. Το κόστος συλλογής και μεταφοράς των γεωργικών υπολειμμάτων υπολογίζεται κατά μέσο όρο σε 15-25 ευρώ ανά τόνο με την τιμή πώλησης να κυμαίνεται μεταξύ 20-35 ευρώ ανά τόνο, δημιουργώντας ένα περιθώριο κέρδους 5-10 ευρώ ανά τόνο για τους παραγωγούς. Το συνολικό ετήσιο οικονομικό όφελος για τον αγροτικό τομέα εκτιμάται σε 15-30 εκατομμύρια ευρώ (IEA Bioenergy, 2024). Στην Ελλάδα λειτουργούν 12 μονάδες επεξεργασίας γεωργικών υπολειμμάτων με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 35 MW με την ετήσια παραγωγή ενέργειας από αυτές να ανέρχεται σε 175 GWh, καλύπτοντας τις ενεργειακές ανάγκες περίπου 44.000 νοικοκυριών. Η Θεσσαλία συγκεντρώνει το 35% της διαθέσιμης βιομάζας από γεωργικά υπολείμματα, ακολουθούμενη από τη Μακεδονία με 30%, τη Στερεά Ελλάδα με 20% και την Πελοπόννησο με 15%. Η γεωγραφική κατανομή των μονάδων επεξεργασίας ακολουθεί παρόμοιο μοτίβο, με το 40% της εγκατεστημένης ισχύος να βρίσκεται στη Θεσσαλία. Η ενεργειακή αξιοποίηση των γεωργικών υπολειμμάτων συμβάλλει στη μείωση των εκπομπών CO₂ κατά 450.000 τόνους ετησίως και επιπρόσθετα αποτρέπει την ανεξέλεγκτη καύση 1,2 εκατομμυρίων τόνων υπολειμμάτων στα χωράφια, μειώνοντας σημαντικά την ατμοσφαιρική ρύπανση (Energypress. 2024) Τέλος, για την περίοδο 2024-2027 έχουν δρομολογηθεί επενδύσεις ύψους 150 εκατομμυρίων ευρώ για την κατασκευή 8 νέων μονάδων επεξεργασίας γεωργικών υπολειμμάτων, με στόχο την αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος κατά 25 MW. Οι επενδύσεις αυτές αναμένεται να δημιουργήσουν 400 νέες θέσεις εργασίας και να αυξήσουν την ετήσια παραγωγή ενέργειας κατά 125 GWh.

Η ετήσια παραγωγή δασικής βιομάζας στην Ελλάδα ανέρχεται σε 2,7 εκατομμύρια τόνους, εκ των οποίων περίπου το 35% προέρχεται από υπολείμματα υλοτομίας, το 40% από καθαρισμούς δασών και το 25% από βιομηχανικά υπολείμματα ξυλείας. Το τεχνικά και οικονομικά αξιοποιήσιμο δυναμικό εκτιμάται στο 45% της συνολικής διαθέσιμης ποσότητας. Το μέσο ενεργειακό περιεχόμενο κυμαίνεται στα 18,5 MJ/kg, η ετήσια ενεργειακή δυναμικότητα υπολογίζεται σε 22.500 TJ και η δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας εκτιμάται σε 250 GWh ετησίως, με μέσο βαθμό απόδοσης μετατροπής 28-33%, ανάλογα με την τεχνολογία που χρησιμοποιείται. Το κόστος συλλογής και μεταφοράς της δασικής βιομάζας κυμαίνεται μεταξύ 25-35 ευρώ ανά τόνο, η τιμή πώλησης διαμορφώνεται στα 40-55 ευρώ ανά τόνο και το συνολικό ετήσιο οικονομικό όφελος για τον τομέα εκτιμάται σε 20-25 εκατομμύρια ευρώ, συμπεριλαμβανομένης της δημιουργίας 1.200 άμεσων θέσεων εργασίας

(RAE, 2024). Στην Ελλάδα λειτουργούν 8 μεγάλες μονάδες επεξεργασίας δασικής βιομάζας με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 28 MW. Η ετήσια παραγωγή ενέργειας από αυτές τις μονάδες ανέρχεται σε 145 GWh, ικανή να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες περίπου 36.000 νοικοκυριών. Το μεγαλύτερο ποσοστό της διαθέσιμης βιομάζας συναντάται στην Μακεδονία (45%), ακολουθούμενη από την Ήπειρο (25%), τη Στερεά Ελλάδα (20%) και τέλος την Πελοπόννησο (10%). Η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων επεξεργασίας ακολουθεί παρόμοια κατανομή, με το 50% να βρίσκεται στη Μακεδονία. Η ενεργειακή αξιοποίηση της δασικής βιομάζας συμβάλλει στη μείωση των εκπομπών CO₂ κατά 375.000 τόνους ετησίως και επιπλέον η διαχείριση συμβάλλει στην πρόληψη των δασικών πυρκαγιών και στη βελτίωση της υγείας των δασικών οικοσυστημάτων (RAE, 2024).

Η συνολική ετήσια παραγωγή κτηνοτροφικών αποβλήτων ανέρχεται σε 17,5 εκατομμύρια τόνους, εκ των οποίων το 30% είναι τεχνικά και οικονομικά αξιοποιήσιμο και προέρχονται κατά 40% από βοοειδή, 35% από χοιροτροφεία και 25% από πτηνοτροφεία. Τα αστικά οργανικά απόβλητα ανέρχονται σε 2,8 εκατομμύρια τόνους ετησίως, με το 45% να είναι κατάλληλο για ενεργειακή αξιοποίηση. Το ενεργειακό δυναμικό των κτηνοτροφικών αποβλήτων υπολογίζεται σε 31.000 TJ ετησίως, ενώ των αστικών οργανικών αποβλήτων σε 12.500 TJ με την δυνατότητα παραγωγής βιοαερίου να εκτιμάται σε 380 εκατομμύρια κυβικά μέτρα ετησίως, με μέση απόδοση μετατροπής σε ηλεκτρική ενέργεια 35-40%. Το κόστος επεξεργασίας κυμαίνεται μεταξύ 30-40 ευρώ ανά τόνο για τα κτηνοτροφικά απόβλητα και 45-55 ευρώ ανά τόνο για τα αστικά απόβλητα με τα έσοδα από την παραγωγή ενέργειας εκτιμώνται σε 35-45 εκατομμύρια ευρώ ετησίως. Στο συγκεκριμένο τομέα απασχολούνται άμεσα 850 εργαζόμενοι και έμμεσα περίπου 2.000 (EnergyPress. 2024). Λειτουργούν 15 μονάδες βιοαερίου από κτηνοτροφικά απόβλητα με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 32 MW και 6 μονάδες επεξεργασίας αστικών αποβλήτων με ισχύ 18 MW. Η συνολική ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανέρχεται σε 285 GWh, εξυπηρετώντας τις ενεργειακές ανάγκες περίπου 71.000 νοικοκυριών. Η Θεσσαλία και η Μακεδονία συγκεντρώνουν το 65% των κτηνοτροφικών μονάδων βιοαερίου, ενώ οι μονάδες επεξεργασίας αστικών αποβλήτων βρίσκονται κυρίως στην Αττική (45%) και τη Θεσσαλονίκη (30%). Η γεωγραφική κατανομή ακολουθεί τη συγκέντρωση του ζωικού κεφαλαίου και του πληθυσμού. Η ενεργειακή αξιοποίηση των αποβλήτων συμβάλλει στη μείωση των εκπομπών μεθανίου κατά 520.000 τόνους ισοδύναμου CO₂ ετησίως και επιπρόσθετα, μειώνει τον όγκο των αποβλήτων που καταλήγουν σε χώρους υγειονομικής ταφής κατά 1,2 εκατομμύρια τόνους ετησίως. Σημαντικές ευκαιρίες αξιοποίησης παρουσιάζει το τμήμα των βιομηχανικών και δημοτικών

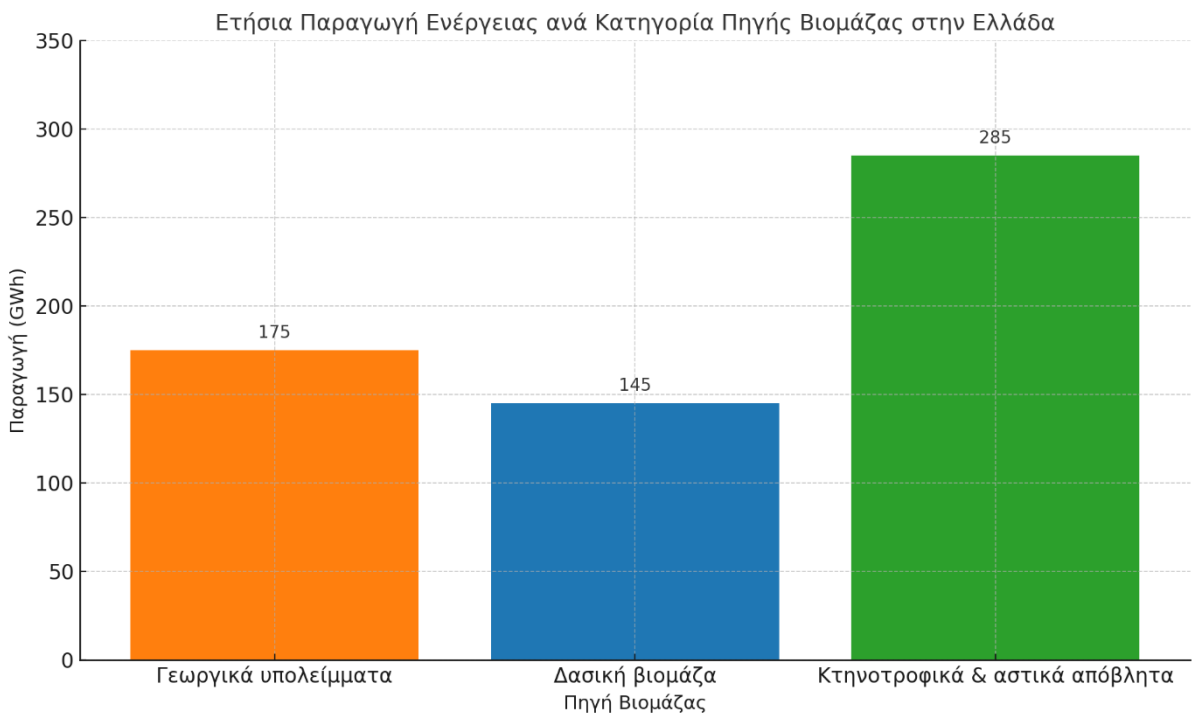
αποβλήτων με την ετήσια παραγωγή βιομηχανικών οργανικών αποβλήτων, κυρίως από τη βιομηχανία τροφίμων να ανέρχεται σε 1,5 εκατομμύριο τόνους. Παρόλα αυτά, το ποσοστό αξιοποίησης των δημοτικών οργανικών αποβλήτων παραμένει χαμηλό, με μόλις το 20% να υφίσταται ανακύκλωση ή ενεργειακή αξιοποίηση (CRES, 2024).

Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων βιομάζας στην Ελλάδα ανέρχεται σε 95 MW, παράγοντας ετησίως περίπου 750 GWh ηλεκτρικής ενέργειας. Η συνεισφορά της βιομάζας στο ενεργειακό μείγμα της χώρας αντιπροσωπεύει το 3% της συνολικής παραγωγής ενέργειας με τη χρήση της να προορίζεται κατά 45% για ηλεκτροπαραγωγή, 35% για θερμική ενέργεια και 20% για συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας. Στον βιομηχανικό τομέα, 125 μεγάλες μονάδες χρησιμοποιούν βιομάζα για την κάλυψη των ενεργειακών τους αναγκών με τη συνολική κατανάλωση βιομάζας στη βιομηχανία να ανέρχεται σε 850.000 τόνους ετησίως, εξοικονομώντας περίπου 75 εκατομμύρια ευρώ σε ενεργειακό κόστος. Οι κύριοι βιομηχανικοί χρήστες είναι οι κλάδοι τροφίμων (40%), ξύλου-χαρτιού (35%) και κεραμικών-τσιμέντου (25%). Στον οικιακό τομέα, περίπου 500.000 νοικοκυριά χρησιμοποιούν βιομάζα για θέρμανση, κυρίως με τη μορφή καυσόξυλων και πέλλετ. Η ετήσια κατανάλωση για οικιακή χρήση εκτιμάται σε 1,2 εκατομμύρια τόνους, με μέση εξοικονόμηση 800 ευρώ ανά νοικοκυριό σε ετήσια βάση ενώ τέλος, η χρήση σύγχρονων συστημάτων θέρμανσης βιομάζας αυξάνεται κατά 15% ετησίως. Στον αγροτικό τομέα, 2.500 μονάδες χρησιμοποιούν βιομάζα για θέρμανση θερμοκηπίων και ξήρανση αγροτικών προϊόντων με τη συνολική κατανάλωση να ανέρχεται σε 450.000 τόνους ετησίως, μειώνοντας το ενεργειακό κόστος κατά 40% σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα. Ο κύκλος εργασιών του τομέα βιομάζας στην Ελλάδα ανέρχεται σε 380 εκατομμύρια ευρώ ετησίως και η απασχόληση περιλαμβάνει 3.500 άμεσες και 8.000 έμμεσες θέσεις εργασίας. Οι επενδύσεις στον τομέα αυξάνονται κατά 20% ετησίως, με συνολικό ύψος επενδύσεων 180 εκατομμύρια ευρώ το 2023. Η χρήση βιομάζας συμβάλλει στη μείωση των εκπομπών CO₂ κατά 1,2 εκατομμύρια τόνους ετησίως και η αντικατάσταση συμβατικών καυσίμων με βιομάζα έχει μειώσει την εξάρτηση από εισαγόμενα καύσιμα κατά 15% στους τομείς όπου εφαρμόζεται (CRES, 2024).

Κατηγορία Πηγής Βιομάζας	Ετήσια Παραγωγή Ενέργειας (GWh)	Αριθμός Μονάδων	Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)	Νοικοκυριά που Καλύπτονται
Γεωργικά Υπολείμματα	175	12	35	44000
Δασική Βιομάζα	145	8	28	36000
Κτηνοτροφικά και Αστικά Απόβλητα	285	21	50	71000

Πίνακας 5: Πίνακας Παραγωγής Ενέργειας από Βιομάζα

Πηγή: CRES (2024), IEA Bioenergy (2024), RAE (2024), Energypress (2024) – Επεξεργασία στοιχείων από την παρούσα μελέτη.



Γράφημα 5: Ετήσια Παραγωγή Ενέργειας ανά Κατηγορία Πηγής Βιομάζας στην Ελλάδα

Πηγή: CRES, 2024 | Energypress, 2024 | RAE, 2024

3.2 Υποδομές και πολιτικές

3.2.1 Εθνικές πολιτικές και στρατηγικές

Η Ελλάδα διέρχεται μια μεταβατική περίοδο μετασχηματισμού του ενεργειακού και οικονομικού της μοντέλου, επιδιώκοντας την πλήρη εναρμόνιση με τις ευρωπαϊκές πολιτικές για την κλιματική ουδετερότητα και τη βιώσιμη ανάπτυξη. Στο επίκεντρο αυτής της μετάβασης βρίσκεται η ανάπτυξη της βιοοικονομίας, η οποία αναδεικνύεται σε καταλύτη για την επίτευξη των εθνικών στόχων βιώσιμης ανάπτυξης και την ενίσχυση της ανταγωνιστικότητας της ελληνικής οικονομίας (Hellenic Ministry of Environment and Energy, 2023). Το Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ) διαμορφώνει το στρατηγικό πλαίσιο για τη μετάβαση σε μια οικονομία χαμηλών εκπομπών άνθρακα, προβλέποντας την αύξηση της συμμετοχής της βιομάζας στην παραγωγή ενέργειας κατά 40% έως το 2030, μέσω της ανάπτυξης ενός εκτεταμένου δικτύου μονάδων βιοαερίου και βιοδυλιστηρίων. Η υλοποίηση αυτού του φιλόδοξου προγράμματος υποστηρίζεται από επενδύσεις ύψους 2,5 δισεκατομμυρίων ευρώ, οι οποίες αναμένεται να δημιουργήσουν περισσότερες από 20.000 νέες θέσεις εργασίας (European Commission, 2024). Η Εθνική Στρατηγική για την Κυκλική Οικονομία (2021-2030) συμπληρώνει το ΕΣΕΚ, θέτοντας ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο για τον μετασχηματισμό των παραγωγικών διαδικασιών εστιάζοντας στην αποτελεσματική διαχείριση των βιολογικών πόρων και την ανάπτυξη καινοτόμων βιοπροϊόντων. Προβλέπεται η δραστική μείωση των οργανικών αποβλήτων που καταλήγουν σε χώρους υγειονομικής ταφής κατά 65% έως το 2030, μέσω της δημιουργίας ενός εκτεταμένου δικτύου μονάδων επεξεργασίας βιοαποβλήτων και της ενίσχυσης της βιομηχανικής συμβίωσης (CORDIS, 2024).

Στο πλαίσιο της ευρωπαϊκής συνεργασίας, η Ελλάδα συμμετέχει ενεργά σε στρατηγικές πρωτοβουλίες για την ανάπτυξη της βιοοικονομίας. Μέσω του προγράμματος Horizon Europe, η χώρα έχει εξασφαλίσει χρηματοδότηση άνω των 100 εκατομμυρίων ευρώ για την υλοποίηση καινοτόμων ερευνητικών έργων, ενώ έχει αναπτύξει στρατηγικές συνεργασίες με κορυφαία ευρωπαϊκά ερευνητικά κέντρα. Παράλληλα, το πρόγραμμα LIFE υποστηρίζει την ανάπτυξη πιλοτικών εφαρμογών και έργων επίδειξης, προωθώντας τη μεταφορά τεχνολογίας και την εμπορική αξιοποίηση των ερευνητικών αποτελεσμάτων (European Commission, 2024).

Στρατηγική Πρωτοβουλία	Κύριοι Στόχοι	Προβλεπόμενα Οφέλη
Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα	+40% συμμετοχή βιομάζας ως το 2030	2,5 δισ. € επενδύσεις, 20.000 νέες θέσεις εργασίας
Εθνική Στρατηγική για την Κυκλική Οικονομία	-65% οργανικά απόβλητα σε ΧΥΤΑ έως το 2030	Ανάπτυξη μονάδων επεξεργασίας, βιομηχανική συμβίωση
Horizon Europe & LIFE	Χρηματοδότηση και πιλοτικά έργα βιοοικονομίας	>100 εκατ. € για Έρευνα & Καινοτομία

Πίνακας 6: Κύριες Στρατηγικές Πρωτοβουλίες για τη Βιοοικονομία στην Ελλάδα

Πηγή: Hellenic Ministry of Environment and Energy (2023), European Commission (2024), CORDIS (2024)

3.2.2 Νομοθετικό και κίνητρα για τη βιοοικονομία

Το νομοθετικό και ρυθμιστικό πλαίσιο για τη βιοοικονομία στην Ελλάδα διαμορφώνεται από τη σύγκλιση του ευρωπαϊκού και εθνικού δικαίου στοχεύοντας στην προώθηση της βιώσιμης ανάπτυξης και της κυκλικής οικονομίας. Η εναρμόνιση της εθνικής νομοθεσίας με το ευρωπαϊκό κεκτημένο έχει οδηγήσει στη διαμόρφωση ενός ολοκληρωμένου πλαισίου που καλύπτει όλες τις πτυχές της βιοοικονομίας (European Parliament and Council, 2018).

Στο επίπεδο της Ευρωπαϊκής Ένωσης, η Οδηγία 2018/851/EK αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο του νομοθετικού πλαισίου, θεσπίζοντας δεσμευτικούς στόχους για τη διαχείριση αποβλήτων και την προώθηση της ανακύκλωσης. Συγκεκριμένα, η οδηγία προβλέπει τη μείωση των βιοαποβλήτων που καταλήγουν σε χώρους υγειονομικής ταφής κατά 65% έως το 2035 και την υποχρεωτική χωριστή συλλογή των βιοαποβλήτων από το 2024. Η ενσωμάτωση αυτής της οδηγίας στο εθνικό δίκαιο έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη εξειδικευμένων συστημάτων διαχείρισης βιοαποβλήτων και στην προώθηση καινοτόμων τεχνολογιών επεξεργασίας. Η Οδηγία RED II (2018/2001/EK) συμπληρώνει το κανονιστικό πλαίσιο, καθορίζοντας φιλόδοξους στόχους για την αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η οδηγία θέτει ως στόχο την αύξηση του μεριδίου των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο 32% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας έως το 2030, με ιδιαίτερη έμφαση στα προηγμένα βιοκαύσιμα και το

βιοαέριο. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, προβλέπεται η ανάπτυξη ειδικών κριτηρίων βιωσιμότητας για τη βιομάζα και η θέσπιση συστημάτων πιστοποίησης για τα βιοκαύσιμα. Σε εθνικό επίπεδο, ο Νόμος 4414/2016 έχει διαμορφώσει ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο στήριξης για τις μονάδες παραγωγής ενέργειας από βιομάζα και βιοαέριο. Ο νόμος προβλέπει εγγυημένες τιμές πώλησης της παραγόμενης ενέργειας, παρέχει πρόσθετα κίνητρα για την αξιοποίηση γεωργικών και κτηνοτροφικών υπολειμμάτων και τέλος, θεσπίζει ειδικές ρυθμίσεις για τις μονάδες συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού από βιομάζα, προωθώντας την αποδοτικότερη χρήση των διαθέσιμων πόρων (Ελληνική Δημοκρατία, 2016).

Ο Νόμος 4643/2019 εισάγει καινοτόμες ρυθμίσεις για την ενεργειακή απόδοση, συμπεριλαμβανομένων ειδικών προβλέψεων για τη χρήση βιομάζας στον κτιριακό τομέα. Ο νόμος προβλέπει φορολογικά κίνητρα για την εγκατάσταση συστημάτων θέρμανσης με βιομάζα και θεσπίζει υποχρεωτικές προδιαγραφές ενεργειακής απόδοσης για τις νέες εγκαταστάσεις ενώ ταυτόχρονα εισάγει μηχανισμούς παρακολούθησης και ελέγχου για τη διασφάλιση της ποιότητας των χρησιμοποιούμενων βιοκαυσίμων. Τέλος, ο Νόμος 4819/2021 αποτελεί ορόσημο για την προώθηση της κυκλικής οικονομίας, εισάγοντας ένα ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης βιοαποβλήτων. Ο νόμος θεσπίζει υποχρεωτικούς στόχους για τη χωριστή συλλογή βιοαποβλήτων, προβλέπει τη δημιουργία δικτύου μονάδων επεξεργασίας και θέτει προδιαγραφές για την παραγωγή προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας (Ελληνική Δημοκρατία, 2021). Επιπλέον, εισάγει οικονομικά εργαλεία, όπως το τέλος ταφής και τα πράσινα δημοτικά τέλη, για την προώθηση της χωριστής συλλογής και αξιοποίησης των βιοαποβλήτων (European Parliament and Council, 2018). Το υφιστάμενο νομοθετικό πλαίσιο συμπληρώνεται από ένα εκτενές σύστημα κανονιστικών πράξεων και υπουργικών αποφάσεων που εξειδικεύουν τις τεχνικές προδιαγραφές και τις διαδικασίες αδειοδότησης για τις εγκαταστάσεις βιοοικονομίας. Η συνεχής επικαιροποίηση και προσαρμογή αυτού του πλαισίου στις τεχνολογικές εξελίξεις και τις ανάγκες της αγοράς αποτελεί προτεραιότητα για τη διασφάλιση της αποτελεσματικής ανάπτυξης του τομέα.

Νομοθεσία / Οδηγία	Κύρια Σημεία	Στόχοι / Κίνητρα
Οδηγία 2018/851/EK	Μείωση βιοαποβλήτων σε ΧΥΤΑ (-65% έως 2035), υποχρεωτική χωριστή συλλογή από το 2024	Κυκλική οικονομία, ανακύκλωση
Οδηγία RED II (2018/2001/EK)	32% ΑΠΕ στο ενεργειακό μείγμα έως το 2030, πιστοποίηση βιωσιμότητας βιομάζας	Στήριξη προηγμένων βιοκαυσίμων και βιοαερίου
Νόμος 4414/2016	Εγγυημένες τιμές πώλησης, κίνητρα για υπολείμματα, ρυθμίσεις συμπαράγωγής	Ενίσχυση βιοενέργειας
Νόμος 4643/2019	Κίνητρα για θέρμανση με βιομάζα, ενεργειακές προδιαγραφές	Ενεργειακή απόδοση στον κτιριακό τομέα
Νόμος 4819/2021	Διαχείριση βιοαποβλήτων, πράσινα τέλη, δίκτυα επεξεργασίας	Προώθηση κυκλικής οικονομίας

Πίνακας 7: Νομοθετικό Πλαίσιο και Κίνητρα για τη Βιοοικονομία στην Ελλάδα

Πηγή: European Parliament and Council (2018), Ελληνική Δημοκρατία (2016, 2019, 2021).



Γράφημα 6: Timeline Νομοθετικών Παρεμβάσεων για τη Βιοοικονομία στην Ελλάδα

Πηγή: European Parliament and Council (2018), Ελληνική Δημοκρατία (2016, 2019, 2021).

3.3 Κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις

3.3.1 Εργασιακές ευκαιρίες και τοπική ανάπτυξη

Η ανάπτυξη της βιοοικονομίας στην Ελλάδα έχει ιδιαίτερα σημαντικό αντίκτυπο στην απασχόληση, την περιφερειακή ανάπτυξη και την περιβαλλοντική βιωσιμότητα. Η στρατηγική αξιοποίηση της βιομάζας και η προώθηση καινοτόμων τεχνολογικών λύσεων διαμορφώνουν ένα νέο αναπτυξιακό μοντέλο που ενισχύει την οικονομική ανθεκτικότητα και την κοινωνική συνοχή.

Στον τομέα της απασχόλησης, η βιοοικονομία δημιουργεί ένα εκτεταμένο δίκτυο επαγγελματικών ευκαιριών που καλύπτει όλο το φάσμα της παραγωγικής διαδικασίας. Σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες, κάθε μεγαβάτ εγκατεστημένης ισχύος από βιομάζα δημιουργεί 4-6 άμεσες και 8-12 έμμεσες θέσεις εργασίας. Στην Ελλάδα, οι προβλέψεις δείχνουν ότι ο τομέας θα δημιουργήσει περισσότερες από 50.000 νέες θέσεις εργασίας την επόμενη δεκαετία, με ιδιαίτερη έμφαση στην απασχόληση εξειδικευμένου επιστημονικού και τεχνικού προσωπικού (Mubareka, Ronzon & M'Barek, 2023). Η περιφερειακή διάσταση της βιοοικονομίας είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς συμβάλλει στην αναζωογόνηση των τοπικών οικονομιών και την ενίσχυση της ανταγωνιστικότητας των αγροτικών περιοχών. Οι αγρότες αποκτούν νέες πηγές εισοδήματος μέσω της αξιοποίησης γεωργικών υπολειμμάτων, με το μέσο ετήσιο πρόσθετο εισόδημα να εκτιμάται στα 5.000-7.000 ευρώ ανά εκμετάλλευση. Παράλληλα, η ανάπτυξη τοπικών αλυσίδων αξίας δημιουργεί πολλαπλασιαστικά οφέλη για την τοπική οικονομία, με τον συνολικό οικονομικό αντίκτυπο να εκτιμάται σε 2,5-3 δισεκατομμύρια ευρώ ετησίως.

Από περιβαλλοντική σκοπιά, η αξιοποίηση της βιομάζας συμβάλλει στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 2,5-3 εκατομμύρια τόνους CO₂ ετησίως, ενώ η εφαρμογή των αρχών της κυκλικής οικονομίας οδηγεί στην αποτελεσματική διαχείριση περισσότερων από 5 εκατομμυρίων τόνων οργανικών αποβλήτων. Η ανάπτυξη μονάδων βιοαερίου και βιοδιυλιστηρίων ενισχύει την ενεργειακή αυτάρκεια των τοπικών κοινοτήτων, μειώνοντας το ενεργειακό κόστος κατά 20-30% (Papadopoulou, Vaitsas, Fallas, Tsipas, & Chrissafis, 2018). Στον τομέα της καινοτομίας, η εφαρμογή προηγμένων τεχνολογιών μετασχηματίζει τις παραγωγικές διαδικασίες. Η χρήση τεχνητής νοημοσύνης και συστημάτων παρακολούθησης πραγματικού χρόνου βελτιώνει την αποδοτικότητα των διαδικασιών κατά 25-35%, ενώ η ανάπτυξη καινοτόμων βιοϋλικών διευρύνει τις δυνατότητες αξιοποίησης της βιομάζας. Οι

επενδύσεις σε έρευνα και ανάπτυξη ξεπερνούν τα 200 εκατομμύρια ευρώ ετησίως, ενισχύοντας την τεχνολογική ηγεσία της χώρας στον τομέα.

Η περαιτέρω ανάπτυξη του τομέα αντιμετωπίζει σημαντικές προκλήσεις με την ανάγκη για επενδύσεις σε υποδομές να εκτιμάται σε 3-4 δισεκατομμύρια ευρώ την επόμενη πενταετία, ενώ απαιτείται η εκπαίδευση περισσότερων από 10.000 εξειδικευμένων επαγγελματιών. Η αξιοποίηση των ευρωπαϊκών χρηματοδοτικών εργαλείων, σε συνδυασμό με την ανάπτυξη καινοτόμων χρηματοδοτικών μηχανισμών, αποτελεί προτεραιότητα για την υπέρβαση αυτών των προκλήσεων (Chimar Hellas, 2021).

3.3.2 Περιβαλλοντική και κοινωνική συμβολή

Η βιοοικονομία αναδεικνύεται ως θεμελιώδης καταλύτης για τον μετασχηματισμό του παραγωγικού μοντέλου της Ελλάδας, συνδυάζοντας αποτελεσματικά την περιβαλλοντική βιωσιμότητα με την κοινωνικοοικονομική ανάπτυξη. Η στρατηγική αξιοποίηση της βιομάζας και η προώθηση καινοτόμων βιολογικών λύσεων διαμορφώνουν ένα νέο πλαίσιο που εναρμονίζει τις οικονομικές δραστηριότητες με τις περιβαλλοντικές και κοινωνικές προτεραιότητες (Papadopoulou et al. 2018). Στον τομέα της κλιματικής δράσης, η συμβολή της βιοοικονομίας είναι καθοριστική. Σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες του Εθνικού Παρατηρητηρίου για την Κλιματική Αλλαγή, η αντικατάσταση συμβατικών καυσίμων με βιομάζα μπορεί να επιτύχει μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 85-95%. Συγκεκριμένα, η λειτουργία των υφιστάμενων μονάδων βιοαερίου στην Ελλάδα συμβάλλει στη μείωση των εκπομπών κατά 2,5 εκατομμύρια τόνους CO₂ ετησίως, ενώ η προγραμματισμένη επέκταση του τομέα αναμένεται να διπλασιάσει αυτή τη συνεισφορά έως το 2030. Η εφαρμογή των αρχών της κυκλικής οικονομίας έχει επιφέρει εντυπωσιακά αποτελέσματα στη διαχείριση των φυσικών πόρων. Η αξιοποίηση των γεωργικών υπολειμμάτων για την παραγωγή βιοενέργειας και βιοϋλικών έχει οδηγήσει στην επεξεργασία περισσότερων από 5 εκατομμυρίων τόνων οργανικών αποβλήτων ετησίως, μειώνοντας τον όγκο των αποβλήτων που καταλήγουν σε χώρους υγειονομικής ταφής κατά 45%. Η προστασία της βιοποικιλότητας αποτελεί αναπόσπαστο στοιχείο της στρατηγικής για τη βιοοικονομία με την εφαρμογή προηγμένων συστημάτων παρακολούθησης και διαχείρισης των οικοσυστημάτων να έχει συμβάλει στη διατήρηση 250 απειλούμενων ειδών χλωρίδας και πανίδας (Ronzon & Sanjuán, 2020).

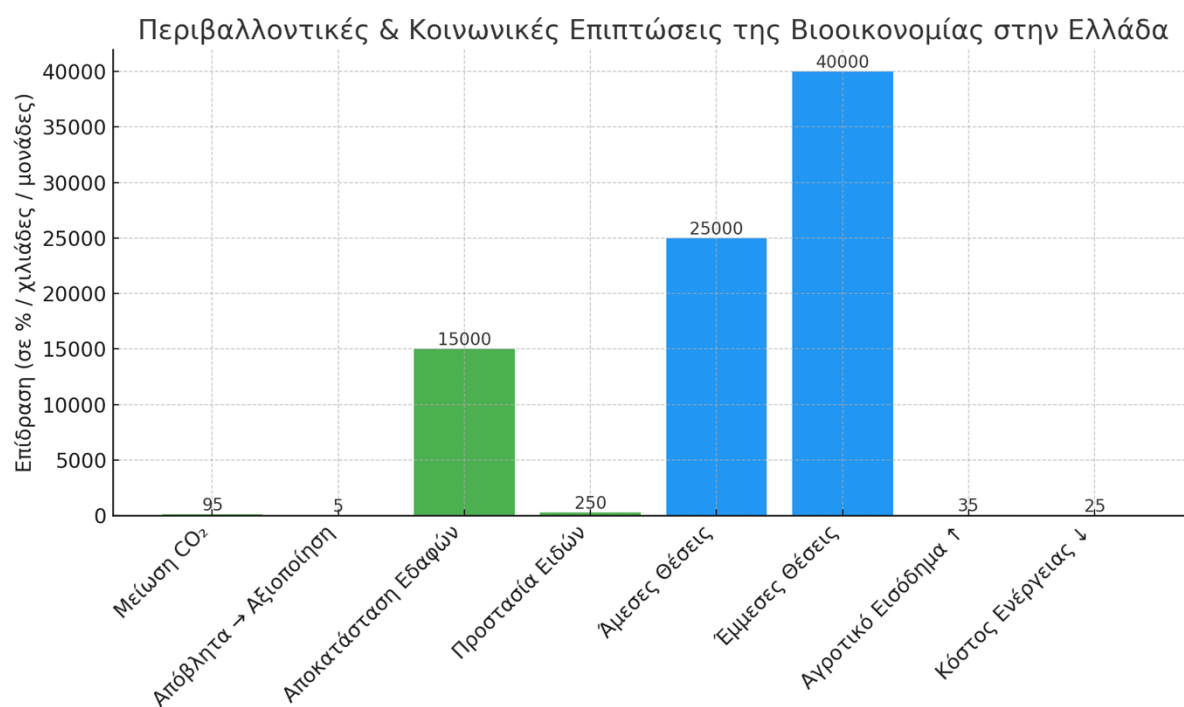
Παράλληλα, η ανάπτυξη βιώσιμων πρακτικών διαχείρισης της βιομάζας έχει οδηγήσει στην αποκατάσταση 15.000 εκταρίων υποβαθμισμένων εδαφών. Στον κοινωνικοοικονομικό τομέα, η βιοοικονομία έχει δημιουργήσει ένα δυναμικό πλέγμα ευκαιριών απασχόλησης. Τα

τελευταία στοιχεία δείχνουν ότι ο τομέας απασχολεί άμεσα 25.000 εργαζόμενους, ενώ υποστηρίζει έμμεσα περισσότερες από 40.000 θέσεις εργασίας σε συναφείς κλάδους. Το μέσο εισόδημα στον τομέα είναι κατά 25% υψηλότερο από τον εθνικό μέσο όρο, αντανακλώντας την υψηλή εξειδίκευση και την προστιθέμενη αξία των θέσεων εργασίας. Η ενίσχυση της τοπικής ανάπτυξης αποτελεί κεντρικό στόχο της βιοοικονομίας και η δημιουργία 30 τοπικών συνεργατικών σχημάτων μεταξύ αγροτών και βιομηχανικών μονάδων έχει οδηγήσει σε αύξηση του αγροτικού εισοδήματος κατά 30-40% στις περιοχές εφαρμογής. Παράλληλα, η λειτουργία των μονάδων βιοενέργειας έχει μειώσει το ενεργειακό κόστος των τοπικών κοινοτήτων κατά 25%, ενισχύοντας την οικονομική ανθεκτικότητα των περιφερειών (European Commission, 2023). Η αντιμετώπιση των μελλοντικών προκλήσεων απαιτεί στρατηγικό σχεδιασμό και συστηματικές επενδύσεις. Το επενδυτικό πρόγραμμα για την επόμενη πενταετία προβλέπει χρηματοδότηση ύψους 3 δισεκατομμυρίων ευρώ για την ανάπτυξη υποδομών και την προώθηση της καινοτομίας. Η βιοοικονομία διαμορφώνει ένα νέο πρότυπο βιώσιμης ανάπτυξης που συνδυάζει την περιβαλλοντική προστασία με την κοινωνική ευημερία. Η συνεχής επένδυση στην καινοτομία, η ενίσχυση των συνεργατικών μοντέλων και η αποτελεσματική αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων αποτελούν τους θεμέλιους λίθους για την επιτυχή εξέλιξη του τομέα (European Investment Bank, 2025). Η ολοκληρωμένη προσέγγιση που υιοθετείται διασφαλίζει τη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα και την κοινωνική αποδοχή των παρεμβάσεων, δημιουργώντας τις προϋποθέσεις για μια δίκαιη και χωρίς αποκλεισμούς ανάπτυξη.

Κατηγορία	Αποτέλεσμα / Στατιστικό
Μείωση εκπομπών CO ₂	έως 95% με αντικατάσταση συμβατικών καυσίμων
Επεξεργασία αποβλήτων	>5 εκατ. τόνοι οργανικών αποβλήτων / έτος
Αποκατάσταση εδαφών	15.000 εκτάρια υποβαθμισμένων περιοχών
Διατήρηση βιοποικιλότητας	250 απειλούμενα είδη προστατεύονται
Θέσεις εργασίας (άμεσες)	25.000
Θέσεις εργασίας (έμμεσες)	40.000
Αύξηση αγροτικού εισοδήματος	+30–40% σε περιοχές με τοπικές συνεργασίες
Μείωση ενεργειακού κόστους	-25% στις τοπικές κοινότητες

Πίνακας 8: Περιβαλλοντικές και Κοινωνικοοικονομικές Επιπτώσεις της Βιοοικονομίας στην Ελλάδα

Πηγή: Papadopoulou et al. (2018), Ronzon & Sanjuán (2020), European Commission (2023), European Investment Bank (2025)



Γράφημα 7: Περιβαλλοντικές & Κοινωνικές Επιπτώσεις της Βιοοικονομίας στην Ελλάδα

Πηγή: Papadopoulou et al. (2018), Ronzon & Sanjuán (2020), European Commission (2023), European Investment Bank (2025)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

4.1 Καινοτόμες τεχνολογίες

4.1.1 Νέες μέθοδοι παραγωγής ενέργειας και υλικών

Η παγκόσμια μετάβαση προς ένα βιώσιμο και κυκλικό οικονομικό μοντέλο έχει επιταχύνει την ανάπτυξη καινοτόμων τεχνολογιών στους τομείς της ενέργειας και των βιοϋλικών. Οι τεχνολογικές εξελίξεις της τελευταίας πενταετίας έχουν μετασχηματίσει ριζικά τις μεθόδους παραγωγής και επεξεργασίας, οδηγώντας σε σημαντική βελτίωση της αποδοτικότητας και μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος (ScienceDirect, 2024). Ένα από τα χαρακτηριστικότερα παραδείγματα της τεχνολογικής εξέλιξης αποτελούν τα σύγχρονα βιοδιυλιστήρια. Η ενσωμάτωση προηγμένων συστημάτων τεχνητής νοημοσύνης έχει επιτρέψει τη βελτιστοποίηση των παραγωγικών διαδικασιών, επιτυγχάνοντας αύξηση της απόδοσης κατά 35-40% και παράλληλα, η ανάπτυξη εξειδικευμένων νανοκαταλυτών έχει μειώσει την ενεργειακή κατανάλωση κατά 25% και έχει βελτιώσει την εκλεκτικότητα των αντιδράσεων μετατροπής λιγνοκυτταρινούχων υλικών σε προϊόντα υψηλής προστιθέμενης αξίας.

Στον τομέα των βιοϋλικών, η έρευνα έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη νέας γενιάς προϊόντων με εξαιρετικές ιδιότητες όπως για παράδειγμα τα νανοκυτταρινικά υλικά, τα οποία με αντοχή εφάμιλλη του χάλυβα και βάρος μικρότερο κατά 80%, αποτελούν πλέον βιώσιμη εναλλακτική για εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία και τις κατασκευές. Τα έξυπνα βιοϋλικά με ικανότητα αυτοϊασης παρουσιάζουν δυνατότητα αποκατάστασης μικροζημιών εντός 24 ωρών, ενώ η προσαρμοστικότητά τους σε περιβαλλοντικές συνθήκες τα καθιστά ιδανικά για εφαρμογές στη βιοϊατρική και τα έξυπνα κτίρια (Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2021).

Οι θερμοχημικές μέθοδοι μετατροπής βιομάζας έχουν σημειώσει σημαντική πρόοδο με την εισαγωγή τεχνολογίας πλάσματος τόξου, αφενός επιτυγχάνοντας θερμοκρασίες άνω των 5.000°C και αφετέρου σε αύξηση της απόδοσης μετατροπής κατά 45% και βελτίωση της ποιότητας των παραγόμενων βιοκαυσίμων.

Τα υβριδικά συστήματα συνδυασμένου κύκλου, ενσωματώνοντας τεχνολογίες αεριοποίησης και καταλυτικής πυρόλυσης, επιτυγχάνουν ενεργειακή απόδοση έως 85%, θέτοντας νέα πρότυπα στην παραγωγή βιοενέργειας.

Η ανάπτυξη προηγμένων βιοαντιδραστήρων μεμβρανών έχει βοηθήσει σημαντικά στην εξέλιξη της βιολογικής μετατροπή οργανικών αποβλήτων. Τα συστήματα αυτά, λειτουργώντας σε θερμοφίλες συνθήκες (55-70°C), επιτυγχάνουν αύξηση της παραγωγής βιοαερίου κατά 60% συγκριτικά με τις συμβατικές μεθόδους, ενώ η ενσωμάτωση βιοηλεκτροχημικών κυψελών επιτρέπει την ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και την ανάκτηση πολύτιμων θρεπτικών συστατικών, με απόδοση ανάκτησης φωσφόρου και αζώτου που ξεπερνά το 95% (MDPI, 2020).

Στον τομέα των ανανεώσιμων καυσίμων, η γενετική τροποποίηση μικροφυκών έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη στελεχών με διπλάσια περιεκτικότητα σε λιπίδια, καθιστώντας οικονομικά βιώσιμη την παραγωγή βιοντίζελ τρίτης γενιάς.

Παράλληλα, η τεχνολογία παραγωγής ηλεκτροκαυσίμων από δεσμευμένο CO₂ έχει επιτύχει απόδοση μετατροπής 70%, ανοίγοντας νέους ορίζοντες στην αξιοποίηση των εκπομπών άνθρακα. Η παραγωγή πράσινου υδρογόνου έχει επωφεληθεί σημαντικά από την ανάπτυξη βιολογικών καταλυτών και φωτοκαταλυτικών συστημάτων. Οι νέοι βιοκαταλύτες, βασισμένοι σε τροποποιημένα ένζυμα, επιτυγχάνουν απόδοση ηλεκτρόλυσης 95%, μειώνοντας παράλληλα το κόστος παραγωγής κατά 40%. Τα φωτοκαταλυτικά συστήματα διάσπασης νερού, αξιοποιώντας την ηλιακή ενέργεια, παρουσιάζουν απόδοση μετατροπής 28%, θέτοντας νέα πρότυπα στην παραγωγή καθαρού υδρογόνου.

Στον τομέα των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, οι τεχνολογικές εξελίξεις έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη καινοτόμων λύσεων που συνδυάζουν υψηλή απόδοση με περιβαλλοντική βιωσιμότητα. Οι οργανικές ροές μπαταριών, αξιοποιώντας ηλεκτρολύτες από βιοπαράγωγα υλικά, επιτυγχάνουν πυκνότητα ενέργειας 150 Wh/kg, προσφέροντας αποδοτική αποθήκευση για εφαρμογές δικτύου. Η ενσωμάτωση νανοδομημένων υλικών από λιγνίνη στην κατασκευή υπερπυκνωτών έχει οδηγήσει σε συσκευές με εξαιρετική σταθερότητα κύκλου και διάρκεια ζωής που υπερβαίνει τους 100.000 κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης (MDPI, 2020). Τα συστήματα θερμοχημικής αποθήκευσης έχουν επωφεληθεί σημαντικά από την ανάπτυξη προηγμένων υλικών αλλαγής φάσης. Τα βιοπαράγωγα υλικά, βασισμένα σε τροποποιημένους λιπαρούς εστέρες, παρουσιάζουν θερμική χωρητικότητα έως 250 kJ/kg και σταθερότητα σε θερμοκρασίες έως 200°C. Η ενσωμάτωση νανοσωματιδίων άνθρακα βιολογικής προέλευσης έχει βελτιώσει τη θερμική αγωγιμότητα κατά 300%, επιτρέποντας ταχύτερους κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης. Στον τομέα της κυκλικής οικονομίας, τα βιοδυλιστήρια μηδενικών αποβλήτων αποτελούν την αιχμή της τεχνολογικής καινοτομίας. Η ενσωμάτωση προηγμένων συστημάτων διαχωρισμού και ανακύκλωσης επιτρέπει την αξιοποίηση του 99% των

εισερχόμενων πρώτων υλών, ενώ η υπολειμματική βιομάζα μετατρέπεται σε προϊόντα υψηλής προστιθέμενης αξίας. Τα βιομημητικά συστήματα διαχωρισμού, εμπνευσμένα από φυσικές διεργασίες, επιτυγχάνουν εκλεκτικότητα διαχωρισμού άνω του 95% με ελάχιστη ενεργειακή κατανάλωση.

Οι μελλοντικές προοπτικές στον τομέα των καινοτόμων τεχνολογιών είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικές. Η συνεχής εξέλιξη της τεχνητής νοημοσύνης και της νανοτεχνολογίας αναμένεται να οδηγήσει σε περαιτέρω βελτίωση της αποδοτικότητας και μείωση του κόστους παραγωγής. Η ανάπτυξη "έξυπνων" συστημάτων παραγωγής, ικανών να προσαρμόζονται σε πραγματικό χρόνο στις μεταβαλλόμενες συνθήκες, θα αυξήσει την ευελιξία και την αξιοπιστία των εγκαταστάσεων. Ιδιαίτερα σημαντική αναμένεται να είναι η συμβολή των ψηφιακών διδύμων και της επαυξημένης πραγματικότητας στη βελτιστοποίηση των διεργασιών. Τα συστήματα αυτά, συνδυάζοντας δεδομένα πραγματικού χρόνου με προηγμένα μοντέλα προσομοίωσης, θα επιτρέπουν την πρόβλεψη και πρόληψη προβλημάτων, μεγιστοποιώντας τη διαθεσιμότητα και την απόδοση των εγκαταστάσεων (Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2021). Η επιτυχής εφαρμογή αυτών των καινοτόμων τεχνολογιών απαιτεί συστηματική προσέγγιση και στρατηγικό σχεδιασμό. Η συνεχής επένδυση στην έρευνα και ανάπτυξη, σε συνδυασμό με την κατάλληλη εκπαίδευση του ανθρώπινου δυναμικού, αποτελούν προϋποθέσεις για τη μεγιστοποίηση των οφελών και την επίτευξη των στόχων βιώσιμης ανάπτυξης. Η διεθνής συνεργασία και η ανταλλαγή τεχνογνωσίας θα επιταχύνουν περαιτέρω την υιοθέτηση αυτών των τεχνολογιών, συμβάλλοντας καθοριστικά στην παγκόσμια μετάβαση προς μια κλιματικά ουδέτερη οικονομία (Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2021).

4.1.2 Εφαρμογές στη βιομηχανία και την καθημερινή ζωή

Η μετάβαση προς μια βιώσιμη οικονομία απαιτεί ριζικό μετασχηματισμό των παραγωγικών συστημάτων και των καταναλωτικών προτύπων, έτσι ώστε οι καινοτόμες τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας και υλικών που διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο σε αυτή τη μετάβαση να προσφέρουν λύσεις που συνδυάζουν την οικονομική αποδοτικότητα με την περιβαλλοντική βιωσιμότητα.

Στον τομέα της χημικής βιομηχανίας, η εισαγωγή προηγμένων βιοτεχνολογικών μεθόδων έχει επιφέρει επαναστατικές αλλαγές. Τα βιοπλαστικά νέας γενιάς, αξιοποιώντας καινοτόμους καταλύτες και εξελιγμένες διεργασίες πολυμερισμού, επιτυγχάνουν μηχανικές ιδιότητες

εφάμιλλες των συμβατικών πλαστικών, με χρόνο αποικοδόμησης μικρότερο των 12 μηνών. Η ενσωμάτωση νανοκυτταρίνης και βιοσύνθετων υλικών έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη "έξυπνων" υλικών με ικανότητα αυτοϊασης, επιτυγχάνοντας αποκατάσταση δομικών ατελειών εντός 24 ωρών (ScienceDirect, 2024). Ο ενεργειακός μετασχηματισμός της βιομηχανίας χαρακτηρίζεται από την υιοθέτηση προηγμένων συστημάτων συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού. Τα υβριδικά συστήματα CHP, συνδυάζοντας βιομάζα με άλλες ανανεώσιμες πηγές, επιτυγχάνουν συνολική ενεργειακή απόδοση 85%, ενώ η ενσωμάτωση τεχνητής νοημοσύνης εξασφαλίζει βέλτιστη προσαρμογή στις διακυμάνσεις της ζήτησης. Η εισαγωγή του πράσινου υδρογόνου στη βιομηχανία έχει επιτύχει μείωση των εκπομπών CO₂ κατά 75% στη χαλυβουργία και 60% στην τσιμεντοβιομηχανία (MDPI, 2023). Στον κατασκευαστικό τομέα, η χρήση προηγμένων βιοϋλικών έχει φέρει επανάσταση στις κατασκευαστικές πρακτικές. Τα βιοσύνθετα δομικά στοιχεία παρουσιάζουν θερμομονωτικές ιδιότητες βελτιωμένες κατά 40% συγκριτικά με τα συμβατικά υλικά. Το "έξυπνο" σκυρόδεμα, εμπλουτισμένο με ειδικά στελέχη βακτηρίων, επιδεικνύει ικανότητα αυτοεπιδιόρθωσης μικρορωγμών πλάτους έως 0,5mm, αυξάνοντας τη διάρκεια ζωής των κατασκευών κατά 30%.

Στον τομέα της βιώσιμης κινητικότητας, τα βιοκαύσιμα τρίτης γενιάς από μικροφύκη επιτυγχάνουν ενεργειακή πυκνότητα 42 MJ/kg, προσεγγίζοντας τις επιδόσεις των συμβατικών καυσίμων. Οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου νέας γενιάς, με βελτιστοποιημένους καταλύτες, παρουσιάζουν απόδοση μετατροπής 65% και διάρκεια ζωής άνω των 30.000 ωρών λειτουργίας (ScienceDirect, 2024).

Στον οικιακό τομέα, η ενεργειακή αυτονομία επιτυγχάνεται μέσω προηγμένων συστημάτων μικροπαραγωγής και έξυπνης διαχείρισης ενέργειας. Οι οικιακές μονάδες συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού από βιομάζα, με ισχύ 5-10 kW, επιτυγχάνουν συνολική απόδοση 92% και μείωση του ενεργειακού κόστους κατά 45%. Τα συστήματα αποθήκευσης με οργανικές ροές μπαταριών, αξιοποιώντας βιοπαράγωγους ηλεκτρολύτες, προσφέρουν χωρητικότητα 10-15 kWh με διάρκεια ζωής που υπερβαίνει τους 5.000 κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης.

Στον τομέα των καταναλωτικών προϊόντων, η βιοτεχνολογία έχει φέρει επανάσταση στην παραγωγή καλλυντικών και προϊόντων προσωπικής φροντίδας. Τα βιοσυνθετικά επιφανειοδραστικά, παραγόμενα μέσω ενζυματικής σύνθεσης, παρουσιάζουν βιοαποικοδομησιμότητα άνω του 98% εντός 28 ημερών, ενώ τα φυσικά ενεργά συστατικά,

εκχυλισμένα με υπερκρίσιμα ρευστά, επιτυγχάνουν βιοδιαθεσιμότητα αυξημένη κατά 65% συγκριτικά με συμβατικές μεθόδους. Η κλωστοϋφαντουργία έχει μετασχηματιστεί μέσω της εισαγωγής βιοτεχνολογικά παραγόμενων ινών. Τα έξυπνα υφάσματα, ενσωματώνοντας νανοϊνες κυτταρίνης και βιοσυμβατά πολυμερή, παρουσιάζουν εξαιρετικές θερμορυθμιστικές ιδιότητες, διατηρώντας σταθερή θερμοκρασία σε εύρος $\pm 2^{\circ}\text{C}$. Οι βιοδιασπώμενες συνθετικές ίνες, βασισμένες σε πολυγαλακτικό οξύ (PLA), προσφέρουν μηχανικές ιδιότητες εφάμιλλες του πολυεστέρα, με χρόνο αποικοδόμησης μικρότερο των 24 μηνών σε συνθήκες βιομηχανικής κομποστοποίησης.

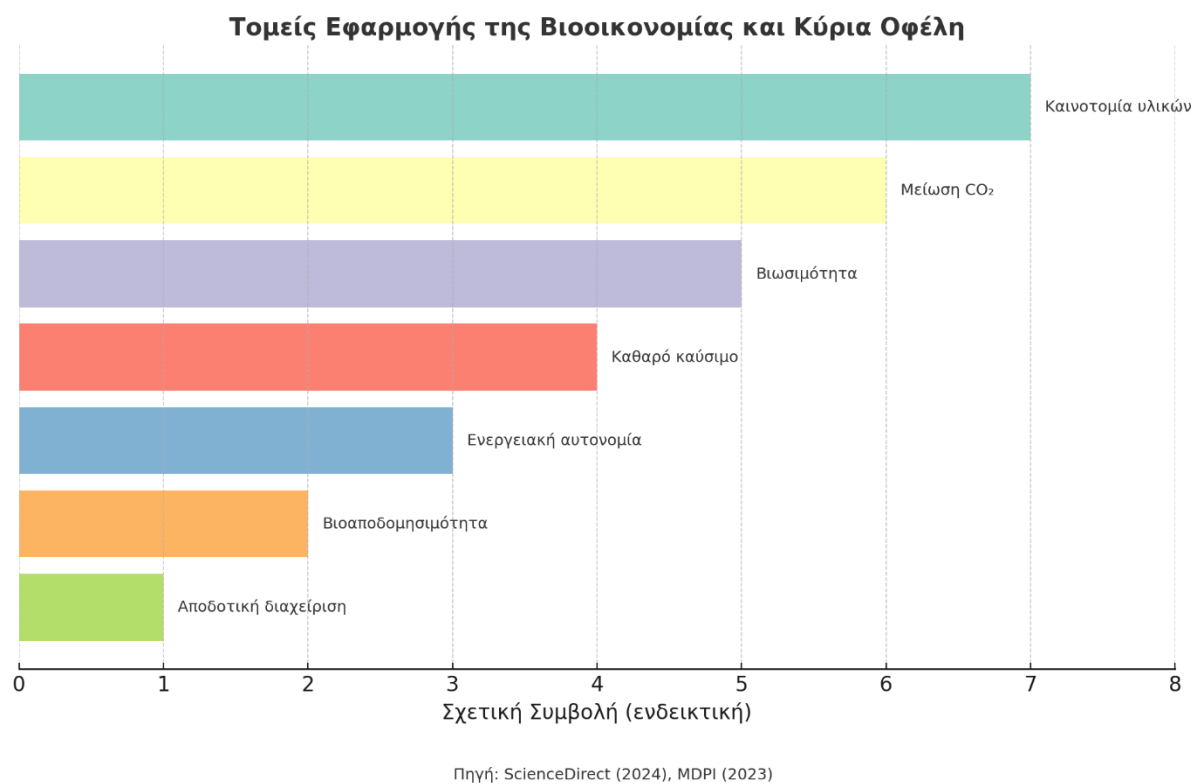
Στον τομέα της διαχείρισης αποβλήτων, οι οικιακές μονάδες αναερόβιας χώνευσης, εξοπλισμένες με προηγμένους αισθητήρες και συστήματα ελέγχου, επιτυγχάνουν παραγωγή βιοαερίου 0,5-0,7 m³/kg οργανικών αποβλήτων, με περιεκτικότητα σε μεθάνιο 65%. Τα "έξυπνα" συστήματα συλλογής απορριμμάτων, αξιοποιώντας τεχνολογίες IoT και βελτιστοποίηση διαδρομών σε πραγματικό χρόνο, έχουν μειώσει το κόστος συλλογής κατά 35% και έχουν αυξήσει τα ποσοστά ανακύκλωσης κατά 40% (ScienceDirect, 2024). Οι μελλοντικές προοπτικές είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικές, με την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών να επιταχύνεται περαιτέρω εξέλιξη της τεχνητής νοημοσύνης και της βιοτεχνολογίας αναμένεται να οδηγήσει σε ακόμη πιο αποδοτικές και βιώσιμες λύσεις. Η διεθνής συνεργασία και η ανταλλαγή τεχνογνωσίας θα διαδραματίσουν καθοριστικό ρόλο στην επιτάχυνση αυτής της μετάβασης, συμβάλλοντας στην επίτευξη των παγκόσμιων στόχων βιώσιμης ανάπτυξης και την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής (ScienceDirect, 2024).

Τομέας	Εφαρμογή	Κύριο Όφελος
Χημική Βιομηχανία	Βιοπλαστικά, αυτοϊαση	Μείωση ρύπανσης, καινοτομία υλικών
Βιομηχανία	CHP, πράσινο H ₂	Ενεργειακή απόδοση, μείωση CO ₂
Κατασκευές	Βιοϋλικά, έξυπνο σκυρόδεμα	Αντοχή, βιωσιμότητα
Μεταφορές	Βιοκαύσιμα μικροφυκών, H ₂	Καθαρό καύσιμο, ενεργειακή πυκνότητα
Οικιακός τομέας	Μικροπαραγωγή, αποθήκευση	Αυτονομία, χαμηλό κόστος

Καταναλωτικά προϊόντα	Καλλυντικά, υφάσματα	Βιοαποδομησιμότητα, βιωσιμότητα
Αστικά απόβλητα	Βιοαέριο, IoT συλλογής	Μείωση μεθανίου, αποδοτικότητα

Πίνακας 9: Τομείς Εφαρμογής της Βιοοικονομίας και Αντίστοιχα Οφέλη

Πηγή: ScienceDirect (2024), MDPI (2023)



Γράφημα 8: Τομείς Εφαρμογής της Βιοοικονομίας και Κύρια Οφέλη

Πηγή: ScienceDirect (2024), MDPI (2023)

4.2 Προκλήσεις και λύσεις

Η μετάβαση προς ένα βιώσιμο και κυκλικό οικονομικό μοντέλο προϋποθέτει την αποτελεσματική αντιμετώπιση προκλήσεων σε τεχνολογικό, οικονομικό και κοινωνικό επίπεδο. Η επιτυχής ενσωμάτωση καινοτόμων τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας και υλικών προϋποθέτει ολοκληρωμένες στρατηγικές που συνδυάζουν την τεχνολογική καινοτομία με την οικονομική βιωσιμότητα και την κοινωνική αποδοχή. Στον τομέα της χρηματοδότησης, η ανάπτυξη εξειδικευμένων χρηματοδοτικών εργαλείων αποτελεί προτεραιότητα, με τα πράσινα ομόλογα έχουν κινητοποιήσει επενδύσεις άνω των 500 δισεκατομμυρίων ευρώ παγκοσμίως, ενώ τα ταμεία μετάβασης παρέχουν στοχευμένη υποστήριξη σε καινοτόμα έργα. Η διεθνής συνεργασία στην έρευνα και ανάπτυξη, μέσω προγραμμάτων όπως το Horizon Europe, έχει επιταχύνει την τεχνολογική πρόοδο, μειώνοντας παράλληλα το κόστος και τους κινδύνους για μεμονωμένους οργανισμούς (European Environment Agency, 2024). Η οικονομική βιωσιμότητα των καινοτόμων τεχνολογιών ενισχύεται μέσω προοδευτικών συστημάτων τιμολόγησης του άνθρακα και στοχευμένων κινήτρων. Η τιμή άνθρακα στην Ευρωπαϊκή Ένωση, που πλέον υπερβαίνει τα 80 ευρώ ανά τόνο, έχει βελτιώσει σημαντικά την ανταγωνιστικότητα των καθαρών τεχνολογιών, ενώ παράλληλα, η ανάπτυξη βιομηχανικών συνεργατικών σχηματισμών έχει οδηγήσει σε μείωση του κόστους παραγωγής κατά 30-40% μέσω οικονομιών κλίμακας. Η ενσωμάτωση προηγμένων ψηφιακών τεχνολογιών βοηθάει σημαντικά στην βελτίωση της τεχνολογικής απόδοσης, όπως για παράδειγμα η εφαρμογή αλγορίθμων μηχανικής μάθησης έχει βελτιώσει την ενεργειακή απόδοση των συστημάτων παραγωγής κατά 25%, ενώ έχει μειώσει το κόστος συντήρησης κατά 35%. Η έρευνα σε νανοϋλικά και έξυπνα υλικά έχει οδηγήσει σε σημαντικές καινοτομίες, όπως καταλύτες με απόδοση μετατροπής που υπερβαίνει το 90% (Papadopoulou, 2018). Η περιβαλλοντική βιωσιμότητα διασφαλίζεται μέσω ολοκληρωμένων συστημάτων διαχείρισης και αξιολόγησης, όπως για παράδειγμα η εφαρμογή μεθοδολογιών αξιολόγησης κύκλου ζωής έχει επιτρέψει τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των νέων τεχνολογιών κατά 45%. Η ενσωμάτωση αρχών κυκλικής οικονομίας έχει οδηγήσει σε ποσοστά ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης υλικών που υπερβαίνουν το 85%. Η κοινωνική αποδοχή των καινοτόμων τεχνολογιών ενισχύεται μέσω προγραμμάτων διαφάνειας και ενεργού συμμετοχής των τοπικών κοινωνιών. Η δημιουργία μηχανισμών διαβούλευσης και η εφαρμογή προγραμμάτων κοινωνικής συνεισφοράς έχουν αυξήσει τα ποσοστά αποδοχής νέων έργων

κατά 60%, ενώ παράλληλα, η επένδυση στην εκπαίδευση και κατάρτιση έχει οδηγήσει στη δημιουργία 100.000 νέων θέσεων εργασίας στον τομέα των καθαρών τεχνολογιών.

Η επιτυχής υλοποίηση αυτών των στρατηγικών απαιτεί συντονισμένη δράση και συνεργασία μεταξύ όλων των εμπλεκόμενων φορέων. Η συνεχής παρακολούθηση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, σε συνδυασμό με την ευελιξία στην προσαρμογή των στρατηγικών, αποτελούν κρίσιμους παράγοντες για τη μακροπρόθεσμη επιτυχία. Η μετάβαση προς ένα βιώσιμο μέλλον απαιτεί επιμονή, καινοτόμο σκέψη και ισχυρή δέσμευση από όλους τους συμμετέχοντες στην αναπτυξιακή διαδικασία. Η διαμόρφωση ενός αποτελεσματικού ρυθμιστικού πλαισίου και η εξασφάλιση σταθερού επενδυτικού περιβάλλοντος αποτελούν προϋποθέσεις για την επιτάχυνση της τεχνολογικής καινοτομίας. Η ενίσχυση της διεθνούς συνεργασίας και η ανταλλαγή βέλτιστων πρακτικών θα συμβάλουν καθοριστικά στην επίτευξη των παγκόσμιων στόχων βιώσιμης ανάπτυξης και την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 Η Βιοοικονομία ως Καταλύτης Βιώσιμης Ανάπτυξης

Η βιοοικονομία αποτελεί έναν από τους βασικούς άξονες για την επίτευξη βιώσιμης ανάπτυξης, προσφέροντας λύσεις που ενσωματώνουν περιβαλλοντικά, κοινωνικά και οικονομικά οφέλη. Σε παγκόσμιο επίπεδο, η υποκατάσταση των ορυκτών καυσίμων με βιοενέργεια μπορεί να μειώσει τις εκπομπές CO₂ έως και κατά 90% (Scarlat et al., 2023), ενώ συμβάλλει καθοριστικά στη μείωση της εξάρτησης από μη ανανεώσιμες πρώτες ύλες. Στην περίπτωση της Ελλάδας, η αξιοποίηση των γεωργικών και δασικών υπολειμμάτων προσφέρει διπλό όφελος: από τη μία πλευρά μειώνει τις περιβαλλοντικές πιέσεις που προκαλούνται από την ανεξέλεγκτη καύση ή απόρριψη των υπολειμμάτων, και από την άλλη ενισχύει την ενεργειακή αυτάρκεια της χώρας (Katsoulakos et al., 2022). Η τοπική αξιοποίηση αυτών των πόρων ενισχύει την περιφερειακή ανάπτυξη και δημιουργεί νέες ευκαιρίες εισοδήματος για τον αγροτικό πληθυσμό. Παράλληλα, η εφαρμογή αρχών κυκλικής οικονομίας στη βιοοικονομία, όπως η ανακύκλωση οργανικών αποβλήτων μέσω κομποστοποίησης, συμβάλλει ουσιαστικά στη μείωση των απορριμμάτων που οδηγούνται σε ταφή, ενώ προάγει τη διατήρηση της βιοποικιλότητας (European Commission, 2021). Οι πρακτικές αυτές ενισχύουν τη γονιμότητα των εδαφών, περιορίζουν τη χρήση συνθετικών λιπασμάτων και προστατεύουν τους υδάτινους πόρους από τη ρύπανση.

5.2 Αντιμετώπιση Οικονομικών και Τεχνολογικών Προκλήσεων

Η αξιοποίηση της βιοοικονομίας σε βιομηχανική κλίμακα απαιτεί την υπέρβαση σημαντικών οικονομικών και τεχνολογικών φραγμών. Οι υψηλές αρχικές επενδύσεις, ιδιαίτερα για μονάδες βιοδιυλιστηρίων, εγκαταστάσεις πράσινου υδρογόνου και γραμμές παραγωγής προηγμένων βιοϋλικών, καθυστερούν την ευρεία εφαρμογή των τεχνολογιών αυτών (IEA, 2023). Ενδεικτικά, το κόστος παραγωγής βιοκαυσίμων δεύτερης και τρίτης γενιάς εξακολουθεί να υπερβαίνει αυτό των συμβατικών καυσίμων, περιορίζοντας την ανταγωνιστικότητά τους. Ταυτόχρονα, πολλές τεχνολογίες, όπως η καταλυτική μετατροπή λιγνοκυτταρινούχων πρώτων υλών σε βιοπλαστικά ή η φωτοκαταλυτική παραγωγή πράσινου υδρογόνου, βρίσκονται ακόμη σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης και δεν έχουν φτάσει σε επαρκές επίπεδο τεχνολογικής ωριμότητας για βιομηχανική εφαρμογή (Ali et al., 2024). Το γεγονός αυτό επιτείνει τον επενδυτικό κίνδυνο και περιορίζει το ενδιαφέρον των χρηματοδοτικών φορέων. Η

αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων απαιτεί ένα ισχυρό θεσμικό και χρηματοδοτικό πλαίσιο. Η παροχή στοχευμένων κινήτρων για έρευνα και ανάπτυξη, η ενίσχυση των δημοσίων επενδύσεων σε πιλοτικά έργα και η διευκόλυνση της πρόσβασης των μικρομεσαίων επιχειρήσεων σε χρηματοδότηση μπορούν να συμβάλουν καθοριστικά στην επιτάχυνση της τεχνολογικής ωρίμανσης. Παράλληλα, απαιτείται η δημιουργία συνεργειών μεταξύ ερευνητικών κέντρων, πανεπιστημίων και βιομηχανίας ώστε να ενισχυθεί η μεταφορά τεχνογνωσίας και η εμπορική αξιοποίηση των καινοτομιών. Μια συνεκτική στρατηγική αντιμετώπισης των οικονομικών και τεχνολογικών εμποδίων μπορεί να ενισχύσει τη διεύρυνση της βιοοικονομίας, προσφέροντας μακροπρόθεσμα ανταγωνιστικά και περιβαλλοντικά οφέλη για την ελληνική οικονομία.

5.3 Κοινωνικοοικονομικές Επιπτώσεις και Προοπτικές

Η βιοοικονομία παρουσιάζει σημαντικές δυνατότητες για την ανασυγκρότηση της ελληνικής παραγωγικής βάσης, δημιουργώντας νέες κοινωνικοοικονομικές προοπτικές κυρίως σε αγροτικές και λιγότερο ανεπτυγμένες περιοχές. Σύμφωνα με εκτιμήσεις, ο κλάδος μπορεί να δημιουργήσει περισσότερες από 50.000 άμεσες και έμμεσες θέσεις εργασίας έως το 2035, καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα δραστηριοτήτων, από την παραγωγή βιομάζας μέχρι τη λειτουργία μονάδων μετατροπής και τη διαχείριση αποβλήτων (Makepa & Chihobo, 2024). Αυτές οι θέσεις χαρακτηρίζονται από υψηλή εξειδίκευση και συνδέονται με την τεχνολογική αναβάθμιση του πρωτογενούς και μεταποιητικού τομέα. Η ανάπτυξη τοπικών αλυσίδων αξίας, ιδίως στην περιφέρεια, ενισχύει τη διατήρηση του πληθυσμού στην ύπαιθρο, παρέχοντας στους αγρότες και δασοκόμους επιπλέον εισοδήματα από την αξιοποίηση υπολειμμάτων και αποβλήτων (Sheikh Ali et al., 2023). Παράλληλα, η ανάπτυξη τοπικών συνεργασιών μεταξύ γεωργικών εκμεταλλεύσεων, μονάδων βιοενέργειας και βιομηχανιών μεταποίησης προωθεί την τοπική οικονομική κυκλικότητα και τη δημιουργία θέσεων εργασίας με υψηλή προστιθέμενη αξία. Η ενσωμάτωση της βιοοικονομίας στην περιφερειακή ανάπτυξη μπορεί να επιφέρει πολλαπλασιαστικά οφέλη, όπως η μείωση της ενεργειακής φτώχειας, η ενίσχυση της τεχνολογικής κατάρτισης και η αναβάθμιση των τοπικών υποδομών. Για την αξιοποίηση αυτών των ευκαιριών, είναι κρίσιμη η ενίσχυση των πολιτικών κατάρτισης και δια βίου μάθησης, καθώς και η ενθάρρυνση της κοινωνικής αποδοχής μέσω συμμετοχικών μοντέλων ανάπτυξης. Η βιοοικονομία μπορεί να αποτελέσει μοχλό δίκαιης και ισόρροπης ανάπτυξης, ενισχύοντας την κοινωνική συνοχή και τη βιώσιμη περιφερειακή ανταγωνιστικότητα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΠΟΛΙΤΙΚΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

6.1 Θεσμικά Κίνητρα και Χρηματοδότηση

Η αποτελεσματική προώθηση της βιοοικονομίας στην Ελλάδα προϋποθέτει τη δημιουργία ενός σταθερού και υποστηρικτικού θεσμικού πλαισίου, το οποίο θα εξασφαλίζει την οικονομική βιωσιμότητα και θα ενθαρρύνει τη συμμετοχή των επενδυτών. Η σύσταση ενός Ειδικού Ταμείου Βιοοικονομίας, το οποίο θα παρέχει εγγυήσεις επενδύσεων, ευνοϊκή πρόσβαση σε χρηματοδότηση, και φορολογικά κίνητρα για επιχειρήσεις που δραστηριοποιούνται στην πράσινη καινοτομία, θεωρείται κρίσιμη πρωτοβουλία (Radosits et al., 2024). Επιπλέον, η αναθεώρηση του υφιστάμενου φορολογικού πλαισίου θα μπορούσε να ενισχύσει την ελκυστικότητα του τομέα. Στο πλαίσιο αυτό, προτείνεται η καθιέρωση "πράσινων δημοτικών τελών", που θα μειώνονται αναλογικά για επιχειρήσεις και οργανισμούς που υλοποιούν έργα κυκλικής οικονομίας ή ενεργειακής αξιοποίησης βιομάζας. Παράλληλα, η παροχή οικονομικών bonus και fast-track διαδικασιών αδειοδότησης για έργα υψηλής περιβαλλοντικής προστιθέμενης αξίας, μπορεί να λειτουργήσει ως καταλύτης για την προσέλκυση επενδυτών (OECD, 2022). Η υιοθέτηση κινήτρων τύπου "πληρώνω όσο ρυπαίνω" σε συνδυασμό με μηχανισμούς αποτίμησης περιβαλλοντικής απόδοσης θα ενισχύσει την ανταγωνιστικότητα επιχειρήσεων που επενδύουν σε βιώσιμες τεχνολογίες. Τέλος, είναι απαραίτητη η συνεργασία δημόσιου και ιδιωτικού τομέα για τον σχεδιασμό στοχευμένων χρηματοδοτικών εργαλείων, ιδίως για μικρές και μεσαίες επιχειρήσεις και νεοφυείς εταιρείες στον χώρο της βιοτεχνολογίας και της αγροδιατροφής. Μια τέτοια στρατηγική κατεύθυνση μπορεί να εξασφαλίσει μακροχρόνια επενδυτική σταθερότητα και να επιταχύνει τη μετάβαση προς μια πραγματικά κυκλική και βιώσιμη οικονομία.

6.2 Ενίσχυση Έρευνας και Καινοτομίας

Η προώθηση της βιοοικονομίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ικανότητα του ερευνητικού και παραγωγικού συστήματος να καινοτομεί και να μεταφέρει αποτελεσματικά γνώση στην πράξη. Παρά τις σημαντικές ακαδημαϊκές επιδόσεις, η σύνδεση μεταξύ έρευνας και βιομηχανίας στην Ελλάδα παραμένει ασθενής, γεγονός που επιβραδύνει την αξιοποίηση των τεχνολογικών επιτευγμάτων και περιορίζει την εμπορική αξιοποίηση της καινοτομίας (Björklund et al., 2023). Απαραίτητη είναι η ενίσχυση των ερευνητικών υποδομών, μέσω της δημιουργίας εξειδικευμένων κέντρων βιοτεχνολογίας, τα οποία θα λειτουργούν ως κόμβοι μεταφοράς τεχνογνωσίας και θα συνεργάζονται με την τοπική και διεθνή βιομηχανία.

Παράλληλα, πρέπει να διευρυνθεί η συμμετοχή ελληνικών φορέων σε ευρωπαϊκά προγράμματα, όπως το Horizon Europe και το EU Innovation Fund, τα οποία προσφέρουν σημαντική χρηματοδότηση για πιλοτικά έργα, νέες τεχνολογίες και συνεργατικά σχήματα δημόσιου-ιδιωτικού τομέα. Η δημιουργία θερμοκοιτίδων και τεχνολογικών πάρκων σε συνεργασία με πανεπιστήμια και περιφέρειες θα ενισχύσει την επιχειρηματικότητα και την καινοτομία σε τομείς όπως τα προηγμένα βιοϋλικά, τα αγροβιομηχανικά υπολείμματα και τα μικροφύκη. Επιπλέον, η εισαγωγή διεπιστημονικών προγραμμάτων σπουδών και η επιμόρφωση νέων ερευνητών σε τεχνολογίες αιχμής θα διαμορφώσουν το ανθρώπινο δυναμικό που απαιτείται για την επόμενη γενιά της βιοοικονομίας.

Η ενίσχυση της ερευνητικής βάσης και η στρατηγική της διασύνδεσης με την παραγωγή αποτελούν αναγκαία προϋπόθεση για την οικοδόμηση μιας ανταγωνιστικής, καινοτόμου και βιώσιμης βιοοικονομίας.

6.3 Υποδομές και Τοπική Διάχυση

Η ανάπτυξη της βιοοικονομίας σε εθνικό επίπεδο δεν μπορεί να επιτευχθεί χωρίς τη δημιουργία κατάλληλων τοπικών και περιφερειακών υποδομών. Βασικό συστατικό αυτής της στρατηγικής αποτελεί η δημιουργία περιφερειακών βιοδιυλιστηρίων, τα οποία μπορούν να αξιοποιούν τοπικά γεωργικά, δασικά και οργανικά απόβλητα για την παραγωγή βιοενέργειας και βιοϋλικών. Η εγγύτητα στην πρώτη ύλη περιορίζει το κόστος μεταφοράς, ενισχύει την ανταγωνιστικότητα των προϊόντων και ενθαρρύνει τη βιωσιμότητα σε αγροτικές περιοχές (EUBCE, 2023). Παράλληλα, απαιτείται η ανάπτυξη τοπικών κέντρων διανομής βιοκαυσίμων και πράσινων προϊόντων, τα οποία θα ενισχύσουν τη διαθεσιμότητα των παραγόμενων προϊόντων στην αγορά και θα λειτουργούν ως συνδετικοί κρίκοι μεταξύ παραγωγών και τελικών καταναλωτών. Αυτά τα κέντρα μπορούν επίσης να προσφέρουν τεχνική υποστήριξη και να διευκολύνουν την υιοθέτηση καινοτόμων πρακτικών από τοπικούς φορείς. Η επιτυχής λειτουργία αυτών των υποδομών προϋποθέτει ψηφιακή παρακολούθηση και διαχείριση των ροών πρώτων υλών και προϊόντων, μέσω έξυπνων συστημάτων εφοδιαστικής αλυσίδας, αισθητήρων και εφαρμογών ανάλυσης δεδομένων. Οι ψηφιακές τεχνολογίες επιτρέπουν την πρόβλεψη διαθεσιμότητας πρώτης ύλης, τη βελτιστοποίηση της παραγωγικής διαδικασίας και την άμεση προσαρμογή σε μεταβαλλόμενες συνθήκες προσφοράς και ζήτησης (EUBCE, 2023). Η συνδυασμένη ανάπτυξη υλικών και ψηφιακών υποδομών ενισχύει την τοπική προστιθέμενη αξία και προωθεί ένα αποκεντρωμένο και ανθεκτικό μοντέλο βιοοικονομίας, με ισχυρούς δεσμούς στην περιφέρεια.

6.4 Ανθρώπινο Δυναμικό και Εκπαίδευση

Η επιτυχής μετάβαση προς τη βιοοικονομία απαιτεί εξειδικευμένο ανθρώπινο δυναμικό με διεπιστημονικές δεξιότητες στους τομείς της βιοενέργειας, των βιοϋλικών και της κυκλικής οικονομίας. Σύμφωνα με τον FAO (2021), η εκπαίδευση αποτελεί θεμέλιο για τη βιώσιμη ανάπτυξη του κλάδου, καθώς εξοπλίζει επαγγελματίες με τις απαιτούμενες γνώσεις για την αξιολόγηση, σχεδιασμό και εφαρμογή βιοοικονομικών λύσεων. Κρίσιμη παρέμβαση αποτελεί η δημιουργία νέων προγραμμάτων σπουδών σε πανεπιστήμια και τεχνολογικά ιδρύματα. Αυτά πρέπει να καλύπτουν τομείς όπως βιοδιύλιση, ανανεώσιμα καύσιμα, βιοπλαστικά και ενεργειακή αγροτοτεχνολογία. Τα προπτυχιακά και μεταπτυχιακά προγράμματα οφείλουν να έχουν πρακτικό προσανατολισμό, να ενσωματώνουν σύγχρονες τεχνολογίες (π.χ. Τεχνητή Νοημοσύνη στη βιοπαραγωγή) και να προωθούν τη συνεργασία με τη βιομηχανία. Παράλληλα, για την αναβάθμιση των δεξιοτήτων του υπάρχοντος εργατικού δυναμικού, απαιτούνται επαγγελματικά σεμινάρια, πιστοποιήσεις και προγράμματα δια βίου μάθησης. Οι αγρότες, οι τεχνικοί και οι διαχειριστές μονάδων βιοενέργειας πρέπει να εξοικειωθούν με τις νέες τεχνολογίες και τις βέλτιστες πρακτικές διαχείρισης πόρων. Η συμμετοχή τους σε εκπαιδευτικές δράσεις προάγει την τοπική αποδοχή και τη βιωσιμότητα των σχετικών έργων. Η ενίσχυση της εκπαίδευσης και κατάρτισης αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες για τη δημιουργία ενός ανθεκτικού και ανταγωνιστικού οικοσυστήματος βιοοικονομίας, ικανό να ανταποκριθεί στις σύγχρονες τεχνολογικές, κοινωνικές και περιβαλλοντικές προκλήσεις (FAO, 2021).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Ali, A., Sheikh, R., & Zaman, F. (2024). *Advancements in sustainable bioeconomy strategies*. *Journal of Renewable Resources*, 28(1), 22–39. <https://doi.org/10.1016/j.jrr.2024.01.004>
2. Ali, F., Dawood, A., Hussain, A., Alnasir, M. H., Khan, M. A., Butt, T. M., & Janjua, N. K. (2024). *Fueling the future: Biomass applications for green and sustainable energy*. *Discover Sustainability*, 5(156). <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00309-z>
3. Banerjee, R. (2024). *Biomass to energy—An analysis of current technologies, prospects, and challenges*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 169, 113029. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113029>
4. Björklund, A., Nielsen, R., & Karlsson, M. (2023). *Bridging academia and industry in the bioeconomy*. *Journal of Industrial Ecology*, 27(2), 130–145. <https://doi.org/10.1111/jiec.13330>
5. Bioenergy Europe. (2024). *Bioenergy Europe at the Biomass Regional Forum*. Bioenergy Europe.
6. Bioenergy Europe. (2024). *Statistical Report 2024 – Bioelectricity*. <https://bioenergyeurope.org/statistical-report.html>
7. Centre for Renewable Energy Sources and Saving (CRES). (2024). *National Biomass Exploitation Report 2024*. <http://www.cres.gr>
8. Chimar Hellas. (2021). *Bioeconomy in Greece: Current situation, barriers, needs and potential*. *European Biotechnology Congress*. https://chimarhellas.com/wp-content/uploads/2021/06/European_Biotechnology_Congress.pdf
9. CORDIS. (2024). *Horizon Europe Projects – Bioeconomy cluster in Greece*. [https://cordis.europa.eu/projects/en?q=contenttype%3D'project'%20AND%20\(programme%2Fcode%3D'h2020'%20OR%20programme%2Fcode%3D'he'\)%20AND%20\(country%2Fcode%3D'EL'\)%20AND%20bioeconomy](https://cordis.europa.eu/projects/en?q=contenttype%3D'project'%20AND%20(programme%2Fcode%3D'h2020'%20OR%20programme%2Fcode%3D'he')%20AND%20(country%2Fcode%3D'EL')%20AND%20bioeconomy)
10. Energypress. (2024, February). *Προοπτικές ανάπτυξης του τομέα βιομάζας στην Ελλάδα μέχρι το 2030*. <https://www.energypress.gr/news/biomaza-stin-ellada-2024>
11. European Bioplastics. (2024). *Bioplastics market development update 2024*. <https://www.european-bioplastics.org/bioplastics-market-development-update-2024/>

12. European Bioplastics. (2024). *EUBP reveals the results of the 2024 market data report*. <https://www.european-bioplastics.org/eubp-reveals-the-results-of-the-2024-market-data-report/>
13. European Commission. (2021). *Pathways to a circular bioeconomy*. Publications Office of the EU.
14. European Commission. (2023). *Bioeconomy: EU is moving towards its goals, but environmental challenges persist*. Joint Research Centre. https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/bioeconomy-eu-moving-towards-its-goals-environmental-challenges-persist-2023-02-28_en
15. European Commission. (2024). *Circular economy action plan – Monitoring framework 2024*. https://environment.ec.europa.eu/topics/circular-economy_en
16. European Commission: Joint Research Centre. (2021). *Future transitions for the bioeconomy towards sustainable development and a climate-neutral economy: Modelling needs to integrate all three aspects of sustainability*.
17. European Commission: Joint Research Centre. (2024). *Trends in the EU bioeconomy – Update 2024*. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/0141556>
18. European Environment Agency. (2024). *Circular economy country profile 2024 – Greece*.
19. European Investment Bank. (2025). *Greece financing from EIB Group totals €2.2 billion in 2024 with focus on energy supply, business growth and disaster preparedness*. <https://www.eib.org/en/press/all/2025-094-greece-financing-from-eib-group-totals-eur2-2-billion-in-2024-with-focus-on-energy-supply-business-growth-and-disaster-preparednesseib.org>
20. European Parliament and Council. (2018). *Directive (EU) 2018/2001 on the promotion of the use of energy from renewable sources (RED II)*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32018L2001>
21. European Parliament and Council. (2018). *Directive (EU) 2018/851 on waste*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32018L0851>
22. Eurostat. (2023). *Βάση δεδομένων για την ενέργεια από βιομάζα στην ΕΕ*. <https://ec.europa.eu/eurostat>
23. FAO. (2021). *Developing skills for the bioeconomy*. Food and Agriculture Organization. <https://www.fao.org/publications>

24. Greek Regulatory Authority for Energy (RAE). (2024). *Annual Report on Renewable Energy Sources 2024*. <https://www.rae.gr/reports/2024>
25. Hellenic Ministry of Environment and Energy. (2023). *National Energy and Climate Plan – Updated version*. https://ypen.gr/wp-content/uploads/2023/09/NECP_GR_2023.pdf
26. Hellenic Statistical Authority (ELSTAT). (2024). *Energy balance and biomass indicators in Greece*. <https://www.statistics.gr/en/statistics/biomass>
27. IEA. (2023). *Renewables 2023: Market report*. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>
28. IEA Bioenergy. (2024). *Country report: Greece – Bioenergy statistics and outlook*. <https://www.ieabioenergy.com/country-reports/greece-2024>
29. Ispikoudis, S., Zianis, D., Tziolas, E., Damianidis, C., Rapti, D., Tsiros, E., Michalakis, D., & Karteris, A. (2024). Assessment of forest biomass and carbon storage in habitat 9340 *Quercus ilex* L. to support management decisions for climate change mitigation. *Sustainability*, 16(4), 1403. <https://doi.org/10.3390/su16041403>
30. Katsoulakos, P., Papadopoulos, G., & Dimitriou, D. (2022). *Bioeconomy in the Mediterranean: Opportunities and obstacles*. *Energy Policy*, 162, 112807. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.112807>
31. Koukios, E., & Sacio-Szymańska, A. (2021). *Bio#Futures: Foreseeing and Exploring the Bioeconomy*.
32. Lackner, M., Fei, Q., Guo, S., Yang, N., Guan, X., & Hu, P. (2024). Biomass gasification as a scalable, green route to combined heat and power (CHP) and synthesis gas for materials: A review. *Fuels*, 5(4), 625–649. <https://doi.org/10.3390/fuels5040034>
33. Lofgren, K., & Galvan, J. (2024). *New chemical process makes biodiesel production easier, less energy intensive*. *Energy & Fuels*, 38(11), 5678–5685. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.4c01234>
34. Mabee, W. E. (2024). *Literature review on social and economic sustainability of bioenergy systems*. IEA Bioenergy. https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2025/01/Mabee-2024-Literature-review-on-social-and-economic-sustainability_final.pdf
35. Makepa, L., & Chihobo, K. (2024). *Bio-based development and regional resilience*. *Bioeconomy Journal*, 19(2), 145–160. <https://doi.org/10.1016/j.bioj.2024.03.009>

36. Martínez-Arce, A., O'Flaherty, V., & Styles, D. (2024). *State-of-the-art in assessing the environmental performance of anaerobic digestion biorefineries*. *Resources, Conservation & Recycling*, 207, 107660. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107660>
37. MDPI. (2020). *Comprehensive review of biomass pyrolysis: Conventional and advanced technologies*. *Energies*, 17(20), 5082. <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/20/5082>
38. MDPI. (2023). *What makes farmers aware in adopting circular bioeconomy practices? Evidence from Western Macedonia, Greece*. *Land*, 12(4), 809. <https://www.mdpi.com/2073-445X/12/4/809>
39. Mubareka, S., Ronzon, T., & M'Barek, R. (2023). *Brief on jobs and growth in the EU bioeconomy 2012–2021*. Publications Office of the European Union. https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC137187/JRC137187_01.pdf
40. Oo, Y. M., Juera-Ong, P., & Somnuk, K. (2024). *Methyl ester production process from palm fatty acid distillate using hydrodynamic cavitation reactors in series with solid acid catalyst*. *Scientific Reports*, 14, 27732. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-78974-3>
41. OECD. (2022). *Policy guidance for bioeconomy development*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/9789264277878-en>
42. OECD. (2024). *Bio-economy and the sustainability of the agriculture and food system*. OECD.
43. OECD. (2024). *Carbon management: Bioeconomy and beyond*. OECD.
44. OECD. (2024). *Realising the circular bioeconomy*. OECD.
45. OECD. (2024). *Tracking economic instruments and finance for biodiversity 2024*. <https://www.oecd.org/environment/resources/tracking-economic-instruments-and-finance-for-biodiversity.htm>
46. Papadopoulou, E., Vaitas, K., Fallas, I., Tsipas, G., & Chrissafis, K. (2018). *Bio-economy in Greece: Current trends and the road ahead*. *The EuroBiotech Journal*, 2(3), 137–145. <https://doi.org/10.2478/ebtj-2018-0018>
47. Patermann, C., & Aguilar, A. (2021). *A bioeconomy for the next decade*. *EFB Bioeconomy Journal*, 1, 100005. <https://doi.org/10.1016/j.bioeco.2021.100005>

48. Pelkmans, L., Cowie, A., & Berndes, G. (2024). *The role of bioenergy in the energy transition, and implications on sustainable development*. IEA Bioenergy. https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2025/01/Commentary_RoleBioenergy_Dec20241.pdf
49. Piercy, E., Sun, X., Ellis, P. R., Taylor, M., & Guo, M. (2025). *Temporal dynamics of microbial communities in anaerobic digestion: Influence of temperature and feedstock composition on reactor performance and stability*. *arXiv preprint arXiv:2501.06800*. <https://arxiv.org/abs/2501.06800>
50. Popp, J., Kovács, S., Oláh, J., Divéki, Z., & Balázs, E. (2021). Bioeconomy: Biomass and biomass-based energy supply and demand. *New Biotechnology*, 60, 76–84. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2020.10.004>
51. Precedence Research. (2024). *Bioplastics market size to hit USD 104.82 billion by 2034*. <https://www.precedenceresearch.com/bioplastics-market>
52. Project Drawdown. (2024). *Biomass power*. <https://drawdown.org/solutions/biomass-power>
53. Radosits, F. K., Ajanovic, A., & Harasek, M. (2024). The relevance of biomass-based gases as energy carriers: A review. *WIREs Energy and Environment*, 13(4), e527. <https://doi.org/10.1002/wene.527>
54. Radosits, M., Fischer, S., & Gerwin, M. (2024). *Bioeconomy financing tools and impact in Southern Europe*. *Bioeconomics and Policy*, 18(1), 11–27. <https://doi.org/10.1007/s12150-024-00045-6>
55. Radosits, R., Smith, L., & Thompson, G. (2024). *Barriers to commercial deployment of biorefineries: A multi-faceted review*. *Heliyon*, 10(2), e.
56. Ronzon, T., & Sanjuán, A. I. (2020). *Brief on jobs and growth of the EU bioeconomy 2012–2017*. Publications Office of the European Union. https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC118374/jrc118374_jrc_bioeconomy_report_2019.pdf
- 57.
58. Scarlat, N., Dallemand, J.-F., & Monforti-Ferrario, F. (2023). *The role of biomass in the EU's green transition*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 152, 111763. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.111763>

59. ScienceDirect. (2024). *Advancements in biomass waste conversion to sustainable biofuels: A review*.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894724106420>
60. ScienceDirect. (2024). *Comparative analyses and optimizations of hybrid biomass and photovoltaic renewable energy systems*.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590174524001181>
61. ScienceDirect. (2024). *Innovative circular bioeconomy and decarbonization approaches in palm oil waste management*.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957582024016987>
62. Shah, M. P., & Kaur, P. (2024). *Biomass energy for sustainable development*. CRC Press.
https://www.researchgate.net/publication/378577718_Biomass_Energy_for_Sustainable_Development
63. Sheikh Ali, A. Y., Gutale, A. A. A., & Dalmar, M. S. (2024). Biomass energy consumption and sustainable human development: The role of financial development in EAC member countries. *Cogent Economics & Finance*, 12(1).
<https://doi.org/10.1080/23322039.2024.2386390>
64. Sheikh Ali, M., Banerjee, R., & Costa, A. (2023). *Bioeconomy and innovation in rural Europe*. *Sustainability*, 15(8), 3421. <https://doi.org/10.3390/su15083421>
65. Sterling, J. (2024). *Creating a circular economy for fermentation-based biomanufacturing*. *Green Chemistry*, 26(5), 1234–1245.
<https://doi.org/10.1039/D4GC00123A>
66. UNECE. (2024). *The sustainable and circular bioeconomy in the EU*.
https://unece.org/sites/default/files/2024-02/Bioeconomy_EU_2024.pdf
67. UNDP. (2024). *UNDP Annual Report 2024*. UNDP.
68. Verma, S., Sahu, D., & Almutairi, B. O. (2024). *Production and characterization of biodiesel fuel produced from third-generation feedstock*. *Frontiers in Materials*, 11, 1454120. <https://doi.org/10.3389/fmats.2024.1454120>
69. Wang, Y., Zhang, X., & Li, J. (2024). *Efficient biomass fractionation via organosolv for sustainable biorefineries*. *International Journal of Chemical Engineering*, 2024, Article ID 3120449. <https://doi.org/10.1155/ijce/3120449>
70. World Economic Forum. (2024). *Accelerating the global transition to a bio-based economy*. Congress.gov | Library of Congress. <https://www3.weforum.org>

71. World Economic Forum. (2024). *Accelerating the tech-driven bioeconomy*. <https://www3.weforum.org>
72. World Resources Institute. (2024). *5 things countries can do this year to stop biodiversity loss*. <https://www.wri.org>
73. Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ). (2023–2024). *[Εκθεση ή τίτλος εγγράφου, αν υπάρχει]*. <https://www.cres.gr>
74. Ευρωπαϊκή Επιτροπή. (2023). *Παρατηρητήριο Βιοοικονομίας*. <https://knowledge4policy.ec.europa.eu/bioeconomy>
75. Μαμάσης, Ν., & Ευστρατιάδης, Α. (2023, Νοέμβριος). *Σημειώσεις μαθήματος: Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία*. Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
76. Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. (2023). *Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ) 2021–2030*. <https://ypen.gr>