



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»

**Προσομοίωση της Κλιμάκωσης Μεγέθους της Διεργασίας και Τεχνο-οικονομική
Εκτίμηση της Αλκοολικής Ζύμωσης**

**Process Scale-up Simulation and Techno-economic Assessment of Ethanol
Fermentation**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ελένη, Α. Μπαρούτη

Επιβλέπων : Δημήτριος, Κ. Σιδηράς
Καθηγητής Πανεπιστημίου Πειραιώς

Αθήνα, Ιούλιος 2025



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ Μ/Υ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ»



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

**Προσομοίωση της Κλιμάκωσης Μεγέθους της Διεργασίας και Τεχνο-οικονομική
Εκτίμηση της Αλκοολικής Ζύμωσης**

**Process Scale-up Simulation and Techno-economic Assessment of Ethanol
Fermentation**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ελένη, Α. Μπαρούτη

Επιβλέπων : Δημήτριος, Κ.Σιδηράς
Καθηγητής Πανεπιστημίου Πειραιώς

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 3^η Ιουλίου 2025.

Δημήτριος Σιδηράς
Καθηγητής
ΠΑ.ΠΕΙ.

Δημήτριος Ασκούνης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Χριστίνα Σιοντόρου
Καθηγήτρια ΠΑ.ΠΕΙ.

Αθήνα, Ιούλιος 2025

.....
Ελένη, Α. Μπαρούτη

Κάτοχος Μεταπτυχιακού Προγράμματος “Τεχνο-οικονομικά Συστήματα” της Σχολής
Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Ελένη, Α. Μπαρούτη, 2025

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. Allrightsreserved.

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.

Περίληψη

Υπό το πρίσμα της αυξανόμενης παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης, η βιοαιθανόλη αναδεικνύεται ως μια βιώσιμη και στρατηγικά σημαντική λύση στον τομέα των μεταφορών. Η συνεχής εξάντληση των συμβατικών ενεργειακών πόρων έχουν κινήσει τις κυβερνήσεις προς την εφαρμογή συγκεκριμένου περιβαλλοντικού σχεδίου. Στο πλαίσιο αυτό, τα βιοκαύσιμα, που παράγονται από αγροτικές, δασικές και άλλες βιολογικές πρώτες ύλες αποτελούν μια πολλά υποσχόμενη κατεύθυνση για την κάλυψη των μελλοντικών ενεργειακών αναγκών. Ωστόσο, η διεύθυνσή τους στην αγορά αντιμετωπίζει σημαντικές προκλήσεις, κυρίως σε ό,τι αφορά το κόστος εγκατάστασης και παραγωγής. Στο πλαίσιο αυτό, εξετάζεται η δυνατότητα αξιοποίησης της βιοαιθανόλης με έμφαση στην παραγωγή της από κυτταρινούχες πρώτες ύλες. Η κυτταρινούχος αιθανόλη αναγνωρίζεται διεθνώς για τα σημαντικά περιβαλλοντικά και ενεργειακά της οφέλη. Παρ' όλα αυτά, η οικονομική βιωσιμότητα της διαδικασίας παραμένει ζητούμενο, καθώς εξαρτάται από την πρόοδο τεχνολογικών καινοτομιών, όπως η ανάπτυξη αποδοτικών και χαμηλού κόστους ενζύμων, η εξασφάλιση κατάλληλων και φθηνών πρώτων υλών, καθώς και η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού των διεργασιών. Η εφαρμογή τέτοιων τεχνολογιών σε βιομηχανική κλίμακα στην Ελλάδα αποτελεί πρόκληση, αλλά και σημαντική ευκαιρία για την ενίσχυση της ενεργειακής αυτάρκειας της χώρας. Στην εργασία παρουσιάζονται θεμελιώδεις έννοιες που σχετίζονται με τις ΑΠΕ, την ταξινόμηση της βιομάζας και τις γενιές των βιοκαυσίμων.

Για τη συγκριτική αξιολόγηση των διαθέσιμων επιλογών, εφαρμόζεται πολυκριτηριακή ανάλυση (MCDA), η οποία αναπτύσσεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο, εξετάζονται τρία διαφορετικά σενάρια παραγωγής βιοαιθανόλης από κυτταρινούχες πρώτες ύλες με σκοπό εύρεσης της κατάλληλης τεχνολογίας παραγωγής. Στο δεύτερο, εξετάζεται η κατάλληλη περιοχή της Ελλάδας για την δυνητική δημιουργία εγκατάστασης μεγάλης κλίμακας παραγωγής κυτταρινούχας βιοαιθανόλης. Η αξιολόγηση βασίζεται σε οικονομικούς δείκτες, καθώς και περιβαλλοντικές και τεχνολογικές μεταβλητές.

Λέξεις κλειδιά

Ελληνική Αγορά Βιοκαυσίμων, Βιοαιθανόλη, Κυτταρίνη, Πολυκριτηριακή ανάλυση, Βιοκαύσιμα Δεύτερης Γενιάς, TOPSIS

Abstract

In light of the increasing global energy demand, bioethanol emerges as a sustainable and strategically important solution in the transportation sector. The continuous depletion of conventional energy resources has prompted governments to implement specific environmental plans. Within this context, biofuels produced from agricultural, forestry, and other biological raw materials represent a promising direction for meeting future energy needs. However, their market penetration faces significant challenges, primarily regarding installation and production costs. In this regard, the potential utilization of bioethanol is examined, with an emphasis on its production from cellulosic feedstocks. Cellulosic ethanol is internationally recognized for its significant environmental and energy benefits. Nevertheless, the economic viability of the process remains an open question, as it depends on the advancement of technological innovations, such as the development of efficient and low-cost enzymes, the availability of suitable and inexpensive raw materials, as well as the optimization of process design. The application of such technologies on an industrial scale in Greece poses a challenge, but also a significant opportunity to enhance the country's energy self-sufficiency.

This study presents fundamental concepts related to renewable energy sources, the classification of biomass, and the generations of biofuels. For the comparative evaluation of available options, a multi-criteria decision analysis (MCDA) is applied, which is developed in two stages. In the first stage, three different scenarios for producing bioethanol from cellulosic feedstocks are examined to identify the most suitable production technology. In the second stage, the appropriate region of Greece for the potential establishment of a large-scale cellulosic bioethanol production facility is assessed. The evaluation is based on economic indicators, as well as environmental and technological variables.

Key words

Greek Biofuel Market, Bioethanol, Cellulose, Multi-Criteria Analysis, Second-Generation Biofuels, TOPSIS

Ευχαριστίες

Οφείλω θερμές ευχαριστίες στον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Δημήτρη Σιδηρά για την πολύτιμη καθοδήγησή του, το επιστημονικό του έργο, καθώς και την εισαγωγή μου στο γνωστικό πεδίο της βελτιστοποίησης βιομηχανικών διεργασιών μέσω του μαθήματος του στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα Τεχνο-οικονομικά συστήματα. Επίσης, ευχαριστώ θερμά τους φίλους και την οικογένειά μου για την αμέριστη υποστήριξη και ενθάρρυνσή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου, Νικολέτα και Αντώνη για την ιδιαίτερη συμβολή της μέσω των ερευνητικών τους γνώσεων αλλά και την αλόγιστη ενθάρρυνση της.

Ελπίζω ότι η παρούσα τεχνοοικονομική ανάλυση θα αποτελέσει χρήσιμο υπόβαθρο για μελλοντικές έρευνες γύρω από τη βιώσιμη παραγωγή βιοκαυσίμων στην Ελλάδα.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	5
Λέξεις κλειδιά.....	5
Abstract	6
Key words.....	6
Ευχαριστίες.....	7
Περιεχόμενα	8
Περιεχόμενα Εικόνων	9
Περιεχόμενα Πινάκων	9
Πίνακας Συντομογραφιών	10
Πρόλογος.....	12
1. Εισαγωγή.....	12
2. Θεωρητικό υπόβαθρο	13
2.1. Πηγές ενέργειας.....	13
2.2. Κατανάλωση ενέργειας	15
2.3. Βιοκαύσιμα.....	17
2.3.1. Βιομάζα	17
2.3.2. Ιστορική αναδρομή βιοκαυσίμων.....	18
2.3.3. Γενιές Βιοκαυσίμων	19
3. Νομοθετικό πλαίσιο βιοαιθανόλης – Ε.Ε.....	23
4.Βιοαιθανόλη κυτταρινούχας βιομάζας.....	27
4.1.Βιοαιθανολή	27
4.2.Κυτταρινούχα βιομάζα	29
4.4. Κυτταρινούχες πηγές στην Ελλάδα.....	35
5. Διαδικασία παραγωγής.....	37
5.1. Ανάλυση διαδικασίας παραγωγής, θεωρητικό υπόβαθρο	37
5.1.1. Βιοχημική διαδικασία παραγωγής.....	38
5.1.2. Θερμοχημική διαδικασία παραγωγής.....	50
5.2. Μελέτη περιπτώσεων	52
5.2.1. Μονάδα Crescentino – PROESA, Italy.....	53
5.2.2. Μονάδα Westbury – Enerkem, Καναδάς	55
5.2.3. Iogen Corporation &Costa Pinto της Raizen.....	59
6.Οικονομική Ανάλυση	60
6.1. Θεωρητικό υπόβαθρο Οικονομικών δεικτών	60

6.2. Οικονομική ανάλυση σεναρίων παραγωγής	65
6.2.1. Σενάριο 1 ^ο Βιοχημική διεργασία με υδροθερμική επεξεργασία – PROESA- SSCF	65
6.2.2. Σενάριο 2 ^ο Θερμοχημική επεξεργασία και αεριοποίηση.....	69
6.2.3. Σενάριο 3 ^ο Βιοχημική μέθοδος SHF	73
7. Πολυκριτηριακή μέθοδος.....	76
7.1. Βήματα και Μαθηματικό Υπόβαθρο Μεθόδου.....	78
7.2. Εφαρμογή TOPSIS στα σενάρια παραγωγής.....	80
7.2.1. Εύρεση βέλτιστης τεχνολογίας.....	80
7.2.2. Τοποθεσίας Μονάδας Βιοαιθανόλης στην Ελλάδα.....	83
8. Συμπεράσματα και Συζήτηση.....	88
Βιβλιογραφία	89

Περιεχόμενα Εικόνων

ΕΙΚΟΝΑ 1. ΕΤΗΣΙΑ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΕΙΔΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ, 2016-2023[22]	15
ΕΙΚΟΝΑ 2. ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ 2022 [23].....	16
ΕΙΚΟΝΑ 3. ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΔΙΑΘΕΣΙΜΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΝΑ ΚΑΥΣΙΜΟ [25].....	17
ΕΙΚΟΝΑ 4. ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΣΥΝΘΕΣΗ ΤΟΥ ΚΥΤΤΑΡΙΚΟΥ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ [64]	29
ΕΙΚΟΝΑ 5 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΕΤΗΣΙΑΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ, ΣΕ ΤΟΝΟΥΣ, ΑΝΑ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ. [65].....	35
ΕΙΚΟΝΑ 6. ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΞΥΛΩΔΗ ΒΙΟΜΑΖΑ ΑΝΑ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑ [65]	36
ΕΙΚΟΝΑ 7. ΔΙΑΔΡΟΜΕΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ	38
ΕΙΚΟΝΑ 8. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΗΣ ΒΙΟΧΗΜΙΚΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ	38
ΕΙΚΟΝΑ 9. ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΒΙΟΑΙΘΑΝΟΛΗΣ ΑΠΟ ΠΡΟΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΑ ΥΛΙΚΑ [84] ...	50
ΕΙΚΟΝΑ 10. ΣΤΑΔΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ WESTBURY [98]	56
ΕΙΚΟΝΑ 11. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΙΟGEN CORPORATION	60

Περιεχόμενα Πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 1. ΤΥΠΙΚΕΣ ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ ΚΥΤΤΑΡΙΝΟΥΧΑΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ [63]	32
ΠΙΝΑΚΑΣ 2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΒΙΟΛΟΓΙΚΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ [81].....	48

Πίνακας Συντομογραφιών

Συντομογραφία	Ονομασία (στα Αγγλικά)	Μετάφραση / Περιγραφή
NPV	Net Present Value	Καθαρή Παρούσα Αξία
IRR	Internal Rate of Return	Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης
CAPEX	Capital Expenditures	Κεφαλαιουχικές Δαπάνες
OPEX	Operating Expenditures	Λειτουργικές Δαπάνες
GWP	Global Warming Potential	Δυναμικό Υπερθέρμανσης Πλανήτη
AP	Acidification Potential	Δυναμικό Οξίνισης
TOPSIS	Technique for Order Preference by Similarity...	Πολυκριτηριακή Μέθοδος Αξιολόγησης
SSF	Simultaneous Saccharification and Fermentation	Συγχρονισμένη Σακχαροποίηση & Ζύμωση
SHF	Separate Hydrolysis and Fermentation	Ξεχωριστή Υδρόλυση και Ζύμωση
SSCF	Simultaneous Saccharification and Co-Fermentation	Συγχρονισμένη Σακχαροποίηση και Συζύμωση
CBP	Consolidated Bioprocessing	Ολοκληρωμένη Βιοεπεξεργασία
CRISPR/Cas9	Gene editing technology	Γονιδιακή τεχνολογία επεξεργασίας DNA
IEA	International Energy Agency	Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας
ΑΠΕ	—	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
NREL	National Renewable Energy Laboratory	Εθνικό Εργαστήριο Ανανεώσιμων Πηγών (ΗΠΑ)

kg	Κιλά
Lt	Λίτρα
kt	Κιλοτόνοι
tn	Τόνοι
Mj	Megajoule

Pj	Πενταπλάσιο GJ
MWe	Megawatt ηλεκτρικής ισχύος
°C	Βαθμοί Κελσίου
ph	Οξύτητα
FPU/g	Μονάδες ενζυμικής δραστηριότητας
PSI	Πίεση
Bar	Μπάρα πίεση

C₂H₅OH	Αιθανόλη
CO₂	Διοξείδιο του Άνθρακα
SO₂	Διοξείδιο του Θείου
CH₄	Μεθάνιο
NaOH	Υδροξείδιο του Νατρίου
NH₃	Αμμωνία
H₂SO₄ / H₂CO₃	Θεικό / Ανθρακικό Οξύ
Ca(OH)₂	Υδροξείδιο του Ασβεστίου
HCl	Υδροχλωρικό Οξύ
CaCl₂	Χλωριούχο Ασβέστιο
H₂S	Υδρόθειο
ZnO	Οξείδιο του Ψευδαργύρου
CH₃OH	Μεθανόλη
DME	Διμεθυλαιθέρας
CH₃COOH	Οξικό Οξύ
HMF	5-υδροξυμεθυλοφουρφουράλη
S / N / Cl	Θείο / Άζωτο / Χλώριο
Ca-Fe	Σύμπλοκα Ασβεστίου-Σιδήρου
Cu/ZnO	Καταλύτης Μεθανόλης (Cu + Οξείδιο Ψευδαργύρου)
Cu/ZnO/Al₂O₃	Καταλύτης για DME ή CH ₃ COOH

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο του Διεπιστημονικού Μεταπτυχιακού Προγράμματος «Τεχνοοικονομικά Συστήματα» του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και του Πανεπιστημίου Πειραιώς. Αντικείμενό της αποτελεί η διερεύνηση της αιθανόλης ως βιοκαυσίμου, με έμφαση α) στις δυνατότητες παραγωγής της από κυτταρινούχες πρώτες ύλες και β) στις προοπτικές ένταξής της στην Ελληνική ενεργειακή αγορά.

Οι ΑΠΕ έχουν αναδειχθεί σε κεντρικό πυλώνα της παγκόσμιας οικονομίας. Υπό το πρίσμα των έντονων κλιματικών και περιβαλλοντικών προκλήσεων, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θέσει ως στόχο μέχρι το 2030 το 32 % της τελικής κατανάλωσης ενέργειας να προέρχεται από ΑΠΕ (Οδηγία RED II). Παράλληλα, το γεωπολιτικό τοπίο και η αστάθεια των ενεργειακών τιμών εντείνουν την ανάγκη διαφοροποίησης του ενεργειακού μίγματος. Η βιοαιθανόλη δύναται να αποτελέσει σημαντική εναλλακτική λύση έναντι της καύσης βενζίνης στο τομέα των μεταφορών, συνεισφέροντας αφενός στον περιορισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, αφετέρου στη μείωση της εξάρτησης από συμβατικά καύσιμα. Ωστόσο, η οικονομική της βιωσιμότητα εξακολουθεί να εξαρτάται από κρίσιμους τεχνολογικούς και αγοραστικούς παράγοντες.

Στο πλαίσιο αυτό, η εργασία εφαρμόζει πολυκριτηριακή ανάλυση διαφορετικών σεναρίων παραγωγής, λαμβάνοντας υπόψη τεχνικά, οικονομικά και περιβαλλοντικά κριτήρια, προκειμένου να αναδείξει βέλτιστες πρακτικές και στρατηγικές ανάπτυξης της κυτταρινούχας βιοαιθανόλης στην Ελλάδα.

1. Εισαγωγή

Η αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού καθώς και η έντονη αστικοποίηση των τελευταίων δεκαετιών έχουν οδηγήσει σε σημαντική άνοδο της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης. Βασισόμενη στα στοιχεία του Οργανισμού Ηνωμένων Εθνών το 2022, το 55 % του πληθυσμού ζει πλέον σε αστικά κέντρα και εκτιμάται ότι θα αγγίξει το 68 % έως το 2050 [1]. Ως επακόλουθο, η κάλυψη των αστικών αναγκών απαιτεί όλο ένα και περισσότερους

πόρους ενέργειας που εξακολουθούν να καλύπτονται κυρίως από τα ορυκτά καύσιμα [2]. Από την άλλη πλευρά, ταυτόχρονα με την αύξηση της ζήτησης, αναδύονται οξύτατα περιβαλλοντικά ζητήματα τα οποία χρήζουν άμεσων ενεργειών για ερευνά και ανάπτυξη της τεχνολογίας των ΑΠΕ. Τα βιοκαύσιμα αναδεικνύονται ως μία πολλά υποσχόμενη λύση για την κάλυψη των μελλοντικών ενεργειακών αναγκών [3].

Η αναζήτηση βιώσιμων λύσεων, οι οποίες θα μειώσουν την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα και θα συμβάλουν στη διαμόρφωση ενός αποδοτικού ενεργειακού μοντέλου, αποτελεί το σημείο εκκίνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ειδικότερα, εξετάζεται η δυνατότητα αξιοποίησης της βιοαιθανόλης ως εναλλακτική πηγή καυσίμου στον τομέα των μεταφορών, με έμφαση στην παραγωγή της από κυτταρινούχες πρώτες ύλες. Παράλληλα, διερευνώνται οι προοπτικές ανάπτυξης βιομηχανικών μονάδων μεγάλης κλίμακας για την παραγωγή βιοαιθανόλης στην Ελλάδα.

Η εργασία παρουσιάζει έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον, καθώς οι προκλήσεις για την αποτελεσματική αξιοποίηση της βιομάζας είναι οικονομικά σημαντικές, γεγονός που μπορεί να μεταβληθεί μόνο με την συνεχή έρευνα και εύρεση τεχνολογικών καινοτομιών [5].

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάδειξη ενός τεχνοοικονομικά βιώσιμου μοντέλου παραγωγής βιοαιθανόλης από κυτταρινούχες πρώτες ύλες, με δυνατότητα εφαρμογής στην Ελληνική αγορά ενέργειας.

2. Θεωρητικό υπόβαθρο

2.1. Πηγές ενέργειας

Οι πηγές ενέργειας είναι τα μέσα από τα οποία αντλούμε την απαιτούμενη ενέργεια για τις ανάγκες του ανθρώπου και της κοινωνίας. Ανάλογα με τον ρυθμό αναπλήρωσής τους, τη διαθεσιμότητα και τις περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις, διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες: ΑΠΕ και μη ΑΠΕ[6].

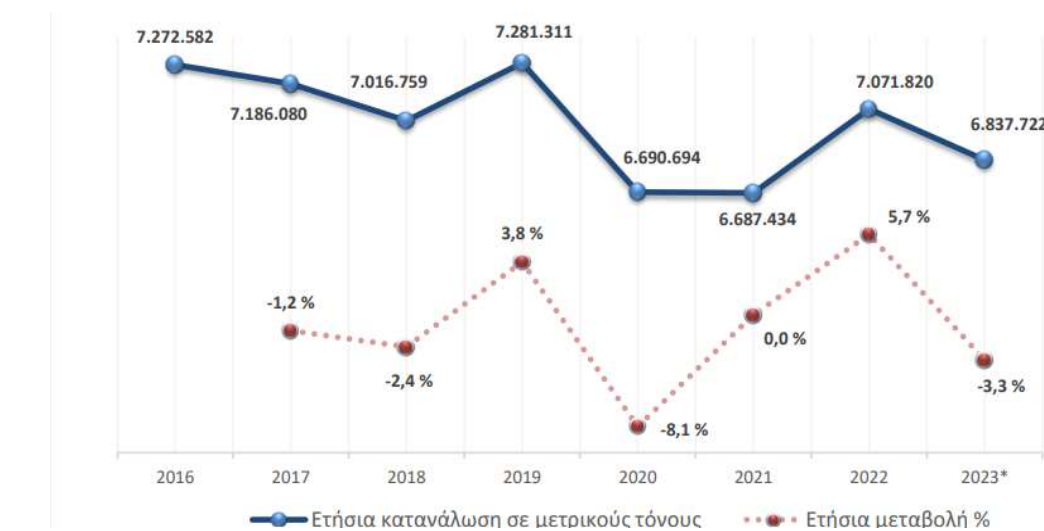
Οι ΑΠΕ περιλαμβάνουν μορφές της που απορρέουν από φυσικές διεργασίες με συνεχή ή περιοδική ανανέωση, όπως η ηλιακή ακτινοβολία, η αιολική ενέργεια, η υδροηλεκτρική, η γεωθερμική, κυματική και η ενέργεια της βιομάζας [7][8]. Η αξιοποίησή τους χαρακτηρίζεται από σχεδόν μηδενικές εκπομπές ρύπων, χαμηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα και θεωρητικά ανεξάντλητο δυναμικό στο πλαίσιο της ανθρώπινης δραστηριότητας [8]. Αντιθέτως, οι συμβατικές -μη ΑΠΕ όπως το πετρέλαιο, ο λιγνίτης, ο άνθρακας και το φυσικό αέριο, προέρχονται από γεωλογικούς σχηματισμούς που σχηματίστηκαν σε βάθος εκατομμυρίων χρόνων και δεν μπορούν να ανανεωθούν σε ρυθμούς που να ανταποκρίνονται στη ζήτηση. Η καύση τους συνοδεύεται από υψηλές εκπομπές CO₂ και άλλων ρύπων, επιβαρύνοντας κατά κόρων το περιβάλλον [9].

Βιομάζα είναι 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, όπως ορίζει η Οδηγία 2001/77/EK [10]. Περιλαμβάνει φυσικά υπολείμματα, όπως ξύλα, κλαδιά, άχυρα, πριονίδια, ελαιοπυρήνες και κουκούτσια, καθώς και ζωικά κατάλοιπα, όπως κοπριά ή αλιεύματα που δεν χρησιμοποιούνται. Επί πρόσθετα, οι ενεργειακές καλλιέργειες (φυτά δηλαδή που καλλιεργούνται αποκλειστικά για παραγωγή ενέργειας), τα απόβλητα από βιομηχανίες τροφίμων και γεωργίας, καθώς και το οργανικό τμήμα των αστικών απορριμμάτων [11][12][13].

Οι κυβερνήσεις των μεγαλύτερων οικονομιών του κόσμου επενδύουν συστηματικά στην έρευνα και ανάπτυξη των πράσινων τεχνολογιών, διοχετεύοντας ετησίως δεκάδες δισεκατομμύρια δολάρια ή ευρώ. Συμφωνά με το υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ, με τον νόμο Inflation Reduction Act του 2022 (IRA) ενισχύεται η μετάβαση σε πράσινη ενέργεια μέσω ισχυρών φορολογικών και χρηματοπιστωτικών κινήτρων [14]. Στην Ε.Ε., το ερευνητικό πρόγραμμα Horizon Europe (2021–2027), με συνολικό προϋπολογισμό 95,5 δισ. ευρώ, αφιερώνει τουλάχιστον το 35 % του συνόλου ,δηλαδή περίπου €33 δισ. , σε δράσεις που σχετίζονται με την κλιματική αλλαγή και την καθαρή ενέργεια [15].

Η Κίνα με την σειρά της αποτελεί έναν από τους μεγαλύτερους επενδυτές σε καθαρές τεχνολογίες με τις δημόσιες δαπάνες της χώρας για R&D σε καθαρές ενεργειακές τεχνολογίες να αγγίζουν τα \$8,4 δισ. για το έτος 2020 [16]. Η Ιαπωνία, τέλος, έχει θεσπίσει το «Πράσινο Ταμείο Καινοτομίας» (Green Innovation Fund) συνολικού ύψους επένδυσης 2 τρισεκατομμυρίων γιεν (περίπου \$16 δισ.), με δεκαετή ορίζοντα (2021–2030). Το ταμείο αυτό χρηματοδοτεί έργα έρευνας, πιλοτικές εγκαταστάσεις και εμπορική ανάπτυξη καινοτόμων τεχνολογιών, όπως το υδρογόνο, τα υπεράκτια αιολικά πάρκα, η πράσινη αμμωνία και άλλες προηγμένες μορφές ενέργειας [17][18][19].

Αντίστοιχα, οι μη ΑΠΕ προέρχονται από φυσικούς πόρους που δεν ανανεώνονται με ρυθμό αντίστοιχο της κατανάλωσής τους. Οι κύριες κατηγορίες περιλαμβάνουν τον άνθρακα, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο [9][20][21].

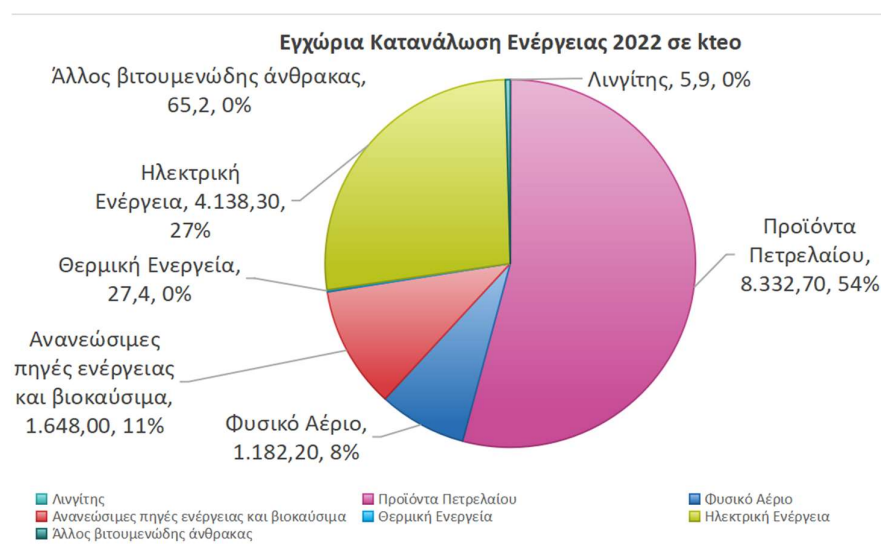


Εικόνα 1. Ετήσια κατανάλωση πετρελαιοειδών στην Ελλάδα, 2016-2023[22]

Όπως φαίνεται και στην παραπάνω διαγραμματική απεικόνιση της ΕΛΣΤΑΤ, το έτος 2023 σημειώθηκε μείωση της συνολικής κατανάλωσης πετρελαιοειδών κατά 3,3% στην χώρα μας, σε σύγκριση με το προηγούμενο έτος. Η κατανάλωση υποχώρησε από 7.071.820 τόνους το 2022 σε 6.837.722 τόνους το 2023 [22]. Πιθανότατα η μείωση αποτελεί απόρροια της αύξησης των τιμών στα προϊόντα πετρελαίου.

2.2. Κατανάλωση ενέργειας

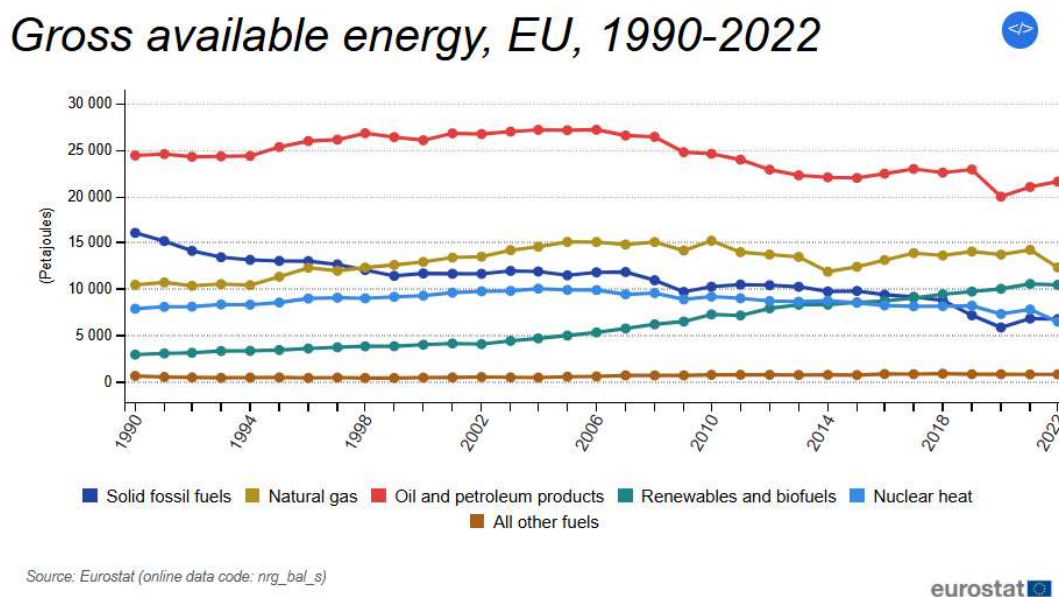
Σύμφωνα με τα ετήσια ενεργειακά στοιχεία του Υπουργείου περιβάλλοντος και ανάπτυξης παρακάτω παρουσιάζεται η κατανομή της ενεργειακής κατανάλωσης στην Ελλάδα για το έτος 2022 [23]. Η κυρίαρχη πηγή ενέργειας στη χώρα μας εξακολουθούν να είναι τα παράγωγα πετρελαίου, τα οποία καλύπτουν το 54% της συνολικής κατανάλωσης. Ακολουθεί η ηλεκτρική ενέργεια με ποσοστό 21%, ενώ οι ΑΠΕ ,όπως αναλύονται και διάγραμμα της Εικόνας 2, αντιπροσωπεύουν το 11% της συνολικής κατανάλωσης. Αναλυτικότερα, διαπιστώνεται ότι μόλις το 5% των ΑΠΕ προέρχεται από βιοκαύσιμα με την κατανάλωση βιοκαυσίμων το 2022 να έχει ανέλθει σε 5.759 χιλιάδες βαρέλια ημερησίως, σημειώνοντας μείωση σε σχέση με το 2021 [23] [24].



Εικόνα 2. Κατανάλωση ενέργειας 2022 [23]

Ως λογική συνέχεια, και στην Ε.Ε. η αγορά ενέργειας κυριαρχείται από το πετρέλαιο όπου παρά και την συνεχιζόμενη καθοδική πορεία εξακολουθεί να αποτελεί την κυριότερη ενεργειακή πηγή για την ευρωπαϊκή οικονομία. Η ακαθάριστη διαθέσιμη ενέργεια παρουσίασε μείωση της τάξης του 4,5% σε σύγκριση με το 2021. ενώ το φυσικό αέριο διατηρεί τη δεύτερη θέση [25]. Στο παρακάτω διάγραμμα της Εικόνας 3 παρουσιάζεται η εξέλιξη της ακαθάριστης διαθέσιμης ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση κατά κατηγορία καυσίμου για την περίοδο 1990–2022 (σε Petajoules). Παρατηρείται διαχρονική μείωση στη χρήση στερεών ορυκτών καυσίμων και πετρελαϊκών προϊόντων, με ταυτόχρονη αύξηση της συμμετοχής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και των βιοκαυσίμων. Η μείωση της

ενεργειακής διαθεσιμότητας από το 2021 στο 2022 απεικονίζεται στο παρακάτω διάγραμμα της Eurostat [25].



Εικόνα 3. Συνολικά διαθέσιμη ενέργεια ανά καύσιμο [25]

2.3. Βιοκαύσιμα

2.3.1. Βιομάζα

Η Ευρωπαϊκή Οδηγία 2009/29/EK ορίζει την βιομάζα ως «το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα προϊόντων, αποβλήτων και καταλοίπων βιολογικής προέλευσης από τη γεωργία (συμπεριλαμβανομένων των φυτικών και των ζωικών ουσιών), τη δασοκομία και τους συναφείς κλάδους, συμπεριλαμβανομένης της αλιείας και της υδατοκαλλιέργειας, καθώς και το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα των βιομηχανικών αποβλήτων και των οικιακών απορριμμάτων» [26].

Χαρακτηριστικά παράδειγμα είναι το ξύλο (ξύλα για καύση, υπολείμματα ξύλου, απόβλητα ξύλου, κλαδιά δέντρων, κορμούς, πέλλετς ξύλου κ.λπ.), το οποίο αποτελεί την πιο σημαντική πηγή ενέργειας βιομάζας. Άλλα παραδείγματα βιομάζας είναι το γρασίδι, το μπαμπού, το καλαμπόκι, το ζαχαροκάλαμο, τα απόβλητα ζώων, η ιλύς λυμάτων και τα φύκια[27][28]. Η χρήση της ως καύσιμο θεωρείται ουδέτερη από πλευράς άνθρακα, καθώς ο άνθρακας απορρίφθηκε από την ατμόσφαιρα κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής της βιομάζας (κατά την ανάπτυξή της) [29].

Τα βιοκαύσιμα, σε αντίθεση με τα συμβατικά καύσιμα πετρελαϊκής προέλευσης, χαρακτηρίζονται από υψηλή περιεκτικότητα σε οξυγόνο, γεγονός που επηρεάζει τη χημική τους συμπεριφορά και καύση. Ενώ το πετρέλαιο στερείται σχεδόν πλήρως οξυγόνου, τα βιοκαύσιμα μπορεί να περιέχουν οξυγόνο σε σημαντικά ποσοστά, φτάνοντας ακόμη και το 45%[4][5][30].

2.3.2. Ιστορική αναδρομή βιοκαυσίμων

Η χρήση της βιομάζας για την παραγωγή ενέργειας αποτελεί την αρχαιότερη μορφή ενεργειακής αξιοποίησης στην ανθρώπινη ιστορία. Ήδη από το 1826, ο Αμερικανός εφευρέτης Samuel Morey κατασκεύασε έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης που λειτουργούσε με αιθανόλη και τερεβινθίνη για την πρόωση πλωτών μέσων. Το 1860, ο Γερμανός μηχανικός Nicolaus August Otto ανέπτυξε επίσης έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης που μπορούσε να λειτουργεί με μείγμα αιθανόλης. Ο Henry Ford σχεδίασε το θρυλικό Model T (1908), με πρόβλεψη να λειτουργεί είτε με βενζίνη είτε με αιθανόλη, ενώ ο Rudolf Diesel ανέπτυξε τον ομώνυμο κινητήρα, ο οποίος στην αρχική του εκδοχή λειτουργούσε με φυτικό έλαιο (π.χ. από φυσικέλαιο), αποδεικνύοντας την τεχνική σκοπιμότητα των βιοκαυσίμων [31]. Κατά τη διάρκεια του 20ού αιώνα, ωστόσο, τα ορυκτά καύσιμα κυριάρχησαν στην παγκόσμια ενεργειακή αγορά με τα προϊόντα πετρελαίου. Παγκόσμιες κρίσεις, όπως η πετρελαϊκή κρίση της δεκαετίας του 1970 και η συνακόλουθη αύξηση της τιμής του πετρελαίου, επανέφεραν στο προσκήνιο την ανάγκη για ενεργειακή αυτάρκεια, με τις κυβερνήσεις να δίνουν έμφαση στην έρευνα για εναλλακτικές πηγές ενέργειας, μεταξύ αυτών και τα βιοκαύσιμα. Ωστόσο, η περιβαλλοντική διάσταση δεν αποτελούσε τότε βασική προτεραιότητα. Στη δεκαετία του 1980, ζητήματα όπως οι εκπομπές CO₂ και το φαινόμενο του θερμοκηπίου άρχισαν να γίνονται αντικείμενο παγκόσμιου προβληματισμού. Η συνειδητοποίηση ότι η καύση ορυκτών καυσίμων έχει σοβαρές επιπτώσεις στο κλίμα ενισχύθηκε με την υπογραφή της συμφωνίας του Κιότο το 1997 και τη διεθνή αναγνώριση του ζητήματος της κλιματικής αλλαγής μέσα από τις Παγκόσμιες Συνδιασκέψεις για το Κλίμα, θέτοντας έτσι τις βάσεις για μια πιο βιώσιμη ενεργειακή μετάβαση [31].

Μακροπρόθεσμα μέχρι το 2050, προβλέπεται ότι τα βιοκαύσιμα θα μπορούσαν να καλύψουν έως και το 27% της παγκόσμιας ζήτησης καυσίμων μεταφορών, συμβάλλοντας

σημαντικά στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και μειώνοντας την εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα κατά 10–30% [2].

2.3.3. Γενιές Βιοκαυσίμων

Τα βιοκαύσιμα ταξινομούνται σε τέσσερις γενιές, με βάση την προέλευση της βιομάζας από την οποία παράγονται και την τεχνολογία μετατροπής που χρησιμοποιείται. Κάθε επόμενη γενιά στοχεύει στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, καλύπτοντας τις ανάγκες της παγκόσμιας ζήτησης ενέργειας με βιωσιμότερο τρόπο [11].

Τα βιοκαύσιμα πρώτης γενιάς προέρχονται από βρώσιμες πρώτες ύλες φυτικής προέλευσης, όπως αμυλούχα και σακχαρούχα φυτά. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται πρώτες ύλες όπως πατάτα, κριθάρι, καλαμπόκι, σιτάρι, ζαχαρότευτλα και ζαχαροκάλαμο. Μέσω μικροβιακής ζύμωσης ή άλλων φυσικοχημικών διεργασιών, από τις πρώτες ύλες αυτές παράγονται κυρίως βιοαιθανόλη, βιοντίζελ και βιοαέριο. Παρά το γεγονός ότι αρχικά προτάθηκαν ως περιβαλλοντικά βιώσιμη εναλλακτική λόγω της ουδέτερης εκπομπής CO₂ κατά την καύση, γρήγορα τέθηκαν ζητήματα σχετικά με την καθαρή ενεργειακή απόδοση αυτών των καυσίμων [13]. Οι επιφυλάξεις σχετίζονται κυρίως με την ενέργεια που απαιτείται κατά τη συγκομιδή των πρώτων υλών και την παραγωγική διαδικασία, καθώς και με το κόστος ευκαιρίας των βρώσιμων υλών δηλαδή, τη χρήση τροφίμων όπως το καλαμπόκι για παραγωγή καυσίμου, αντί για διατροφή. Ανησυχίες έχουν επίσης εκφραστεί σχετικά με τη χρήση γεωργικών εκτάσεων, τη διατήρηση της βιοποικιλότητας και τη γενικότερη επίδραση στο ενεργειακό ισοζύγιο. Ωστόσο, οι τεχνολογικές εξελίξεις των τελευταίων ετών έχουν οδηγήσει σε σημαντικές βελτιώσεις: απαιτούνται λιγότεροι φυσικοί πόροι, όπως νερό και λιπάσματα, και η ενεργειακή απόδοση της παραγωγικής διαδικασίας έχει βελτιωθεί. Η αγορά των βιοκαυσίμων πρώτης γενιάς αποτιμήθηκε στα 151,3 δισεκατομμύρια δολάρια το 2023, και προβλέπεται ετήσιος ρυθμός αύξησης 7,1% έως το 2032 [33]. Παρόλα αυτά, το πρόβλημα του ανταγωνισμού μεταξύ τροφίμων και καυσίμων παραμένει έντονο.

Στην προσπάθεια αντιμετώπισης των περιορισμών που σχετίζονται με τα βιοκαύσιμα πρώτης γενιάς, με το μεγαλύτερο πρόβλημα να είναι αυτό του ανταγωνισμού μεταξύ τροφίμων και καυσίμων, αναπτύχθηκαν τα βιοκαύσιμα δεύτερης γενιάς [11]. Η βασική τους διαφοροποίηση έγκειται στη χρήση μη βρώσιμων πρώτων υλών, καθώς αξιοποιούν

λιγνοκυτταρινούχα βιομάζα και οργανικά υπολείμματα [36]. Οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται προέρχονται από γεωργικά απόβλητα, όπως καλαμιά από καλαμπόκι, άχυρο από σιτάρι και υπολείμματα ζαχαροκάλαμου, καθώς και δασικά παραπροϊόντα όπως πριονίδι, φλοιός και ροκανίδια που προκύπτουν από την υλοτομία [35]. Επιπλέον, αξιοποιούνται βιομηχανικά και αστικά οργανικά απόβλητα, όπως χρησιμοποιημένα μαγειρικά έλαια, ζωικά λίπη, πίτουρο σιταριού και οργανικά οικιακά απορρίμματα. Σημαντικό ρόλο κατέχουν και οι ενεργειακές καλλιέργειες μη εδώδινων φυτικών ειδών, όπως ο μίσχανθος (*Miscanthus*), το switchgrass, το reed canary grass, καθώς και ξυλώδη είδη όπως η λεύκα, η ιτιά και ο ευκάλυπτος [28].

Όπως επισημαίνουν οι Cantrell (2008) και Sklar (2008) [37][38], «η πρώτη ύλη για τη δεύτερη γενιά μπορεί να είναι παραπροϊόν, συν-προϊόν ή ακόμη και απόβλητο», γεγονός που καθιστά τα βιοκαύσιμα αυτής της κατηγορίας ιδιαίτερα ευέλικτα ως προς την προμήθεια πρώτης ύλης. Επιπλέον, σύμφωνα με τους Granda (2007) και Hill (2007) [39][40], η δυνατότητα αξιοποίησης κυτταρινούχου και ετερογενούς βιομάζας υποδηλώνει χαμηλότερο συνολικό κόστος παραγωγής και σαφώς βελτιωμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα σε σύγκριση με τα καύσιμα πρώτης γενιάς.

Η προσπάθεια επίλυσης των περιορισμών που συνδέονται με τα βιοκαύσιμα πρώτης και δεύτερης γενιάς ιδίως όσον αφορά τη χρήση καλλιεργήσιμης γης και την ανταγωνιστικότητα με την παραγωγή τροφίμων οδήγησε στην ανάπτυξη των βιοκαυσίμων τρίτης και τέταρτης γενιάς, τα οποία βρίσκονται ακόμη σε πειραματικό και ερευνητικό στάδιο [35].

Τα βιοκαύσιμα τρίτης γενιάς βασίζονται κυρίως στη βιομάζα μικροφυκών, τα οποία διακρίνονται για την υψηλή περιεκτικότητά τους σε λιπίδια, οξυγόνο και υδρογόνο, καθώς και για το χαμηλό κόστος καλλιέργειας. Τα μικροφύκη είναι μονοκύτταροι φωτοσυνθετικοί μικροοργανισμοί που μπορούν να αναπτυχθούν σε γλυκά ή θαλάσσια ύδατα, ακόμη και σε λύματα, χωρίς να απαιτούν καλλιεργήσιμη γη. Διαθέτουν ταχύ ρυθμό ανάπτυξης, δύο έως τέσσερις φορές μεγαλύτερο από τα χερσαία φυτά, και υψηλή παραγωγή λιπιδίων ανά μονάδα βιομάζας. Υπάρχουν τρεις τύποι μικροφυκών, τα αυτότροφα (που καταναλώνουν ανόργανο άνθρακα), τα ετερότροφα (που καταναλώνουν οργανικό άνθρακα) και τα μεικτά ή μιξότροφα μικροφύκη (που καταναλώνουν τόσο ανόργανο όσο και οργανικό άνθρακα)[41].

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των μικροφυκών είναι η ικανότητά τους να παράγουν υδρογόνο μέσω οξυγονικής φωτοσύνθεσης, καθώς και η ικανότητά τους να δεσμεύουν CO₂ από την ατμόσφαιρα. Για κάθε κιλό παραγόμενης βιομάζας, τα μικροφύκη απορροφούν περίπου 1,8 κιλά CO₂, συμβάλλοντας σημαντικά στη μείωση των εκπομπών του θερμοκηπίου. Από την άλλη πλευρά, τα μακροφύκη, όπως το kelp, είναι πολυκύτταροι θαλάσσιοι οργανισμοί με χαμηλότερη περιεκτικότητα σε έλαια και, κατά συνέπεια, μικρότερη αποδοτικότητα ως πρώτη ύλη για παραγωγή βιοκαυσίμων. Η μέθοδος καλλιέργειας σε ανοιχτές δεξαμενές (open pond systems) προσφέρει ένα σχετικά χαμηλό κόστος σε μεγάλες κλίμακες, ωστόσο υπάρχουν ανησυχίες για την υγεία και το περιβάλλον, ιδίως στην περίπτωση καλλιέργειας γενετικά τροποποιημένων φυκών [41]. Οι ανησυχίες αυτές, σε συνδυασμό με τα αυστηρά ρυθμιστικά πλαίσια, αποτελούν βασικό εμπόδιο για την εμπορική αξιοποίηση των βιοκαυσίμων τρίτης γενιάς.

Η ανάπτυξη των βιοκαυσίμων τέταρτης γενιάς βασίζεται στη γενετική τροποποίηση μικροφυκών και στην εφαρμογή μεταβολικής μηχανικής με στόχο τη βελτιστοποίηση της αποδοτικότητας παραγωγής καυσίμου. Οι τεχνολογικές παρεμβάσεις επικεντρώνονται στη βελτίωση της φωτοσυνθετικής ικανότητας, στην αύξηση της παραγωγής υδρογόνου και στην αξιοποίηση πολλαπλών τύπων σακχάρων, μέσω της τροποποίησης των μεταβολικών οδών[32]. Πρωτοποριακές έρευνες έχουν επιβεβαιώσει ότι τροποποιημένα κυανοβακτήρια μπορούν, σε πιλοτικό επίπεδο, να παράγουν αιθανόλη, βουτανόλη και ισοβουτανόλη [34].

Παρότι τα βιοκαύσιμα τρίτης και τέταρτης γενιάς παρουσιάζουν σημαντικές προοπτικές, η μαζική εφαρμογή τους προϋποθέτει την επίλυση τεχνικών, περιβαλλοντικών και ηθικών ζητημάτων. Το κόστος παραγωγής παραμένει υψηλό και μη βιώσιμο σε βιομηχανική κλίμακα. Παράλληλα, προκύπτουν ανησυχίες σχετικά με τη βιοασφάλεια και την επίδραση στην υγεία των οικοσυστημάτων και του ανθρώπου [32][34][41]. Για τη διασφάλιση της ασφάλειας αυτών των τεχνολογιών απαιτείται η δημιουργία ενός σαφούς, αυστηρού και αποτελεσματικού ρυθμιστικού και νομοθετικού πλαισίου [42].

Τα βιοκαύσιμα διακρίνονται σε τέσσερις βασικές κατηγορίες: βιοντίζελ, βιοαιθανόλη, βιοαέριο και συμπιεσμένα στερεά βιοκαύσιμα(όπως τα pellets και οι μπρικέτες).

1. Βιοντίζελ

Το βιοντίζελ αποτελεί ένα από τα πιο διαδεδομένα καύσιμα που χρησιμοποιούνται σε κινητήρες τύπου diesel. Παράγεται κυρίως από πρώτης γενιάς βιομάζα όπως φυτικά και ζωικά λίπη μέσω της διεργασίας της μετεστεροποίησης, ωστόσο τα τελευταία χρόνια υπάρχει σημαντική πρόοδος στην παραγωγή του από χρησιμοποιημένα μαγειρικά έλαια και άλλα λιπαρά απόβλητα, περιορίζοντας έτσι τον περιβαλλοντικό του αποτύπωμα [31]. Σύμφωνα με δεδομένα του IEA, η παγκόσμια παραγωγή βιοντίζελ το 2022 έφτασε τους 50 δισεκατομμύρια λίτρων και αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά μέσα στις επόμενες δεκαετίες [43].

2. Βιοαιθανόλη

Η βιοαιθανόλη είναι ένα υγρό καύσιμο που δύναται να υποκαταστήσει τη βενζίνη και παράγεται μέσω αλκοολικής ζύμωσης σακχάρων ή μέσω υδρόλυσης κυτταρινούχων και λιγνοκυτταρινούχων πηγών και η μαζική παραγωγή της ξεκίνησε στα τέλη του 20ού αιώνα. Η βιοαιθανόλη διαθέτει υψηλό αριθμό οκτανίων που συμβάλλει στη βελτίωση της καύσης και της απόδοσης του κινητήρα, και τη δυνατότητα ενσωμάτωσής της στα υπάρχοντα δίκτυα διανομής καυσίμων μέσω μιγμάτων όπως E5 ή E10 (5% ή 10% αιθανόλη αντίστοιχα) [11]. Οι κύριοι παραγωγοί της παγκοσμίως είναι οι Ηνωμένες Πολιτείες και η Βραζιλία, χρησιμοποιώντας κυρίως καλαμπόκι και ζαχαροκάλαμο ως πρώτες ύλες πρώτης γενιάς [13][43].

3. Βιοαέριο

Το βιοαέριο αποτελείται κυρίως από μεθάνιο και CO₂, ενώ περιλαμβάνει και μικρές ποσότητες άλλων αερίων όπως υδρόθειο, αμμωνία, και υδρατμούς [11]. Παράγεται μέσω της αναερόβιας χώνευσης οργανικής ύλης, δηλαδή με την αποικοδόμηση βιολογικών υλικών από μικροοργανισμούς σε συνθήκες απουσίας οξυγόνου. Το βιοαέριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο για την παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, με κατάλληλη επεξεργασία, μπορεί να μετατραπεί σε βιομεθάνιο, το οποίο είναι κατάλληλο για χρήση ως καύσιμο οχημάτων ή για έγχυση στο δίκτυο φυσικού αερίου [43].

4. Pellets και μπρικέτες

Τα pellets και οι μπρικέτες είναι συμπιεσμένα στερεά βιοκαύσιμα που προέρχονται κυρίως από ξηρό πριονίδι και υπολείμματα ξυλείας. Τα καύσιμα αυτά έχουν ομοιογενή ροή,

απαιτούν λιγότερο χώρο αποθήκευσης και είναι ιδιαίτερα κατάλληλα για οικιακή ή αστική θέρμανση [44].

3. Νομοθετικό πλαίσιο βιοαιθανόλης – Ε.Ε.

Η ανάγκη για μετάβαση σε καθαρότερες μορφές ενέργειας οδήγησε τη διεθνή κοινότητα στη σταδιακή θέσπιση νομοθετικών πλαισίων. Στον τομέα των μεταφορών, το μεγαλύτερο ενδιαφέρον εστιάστηκε στα βιοκαύσιμα, λόγω του σημαντικού τους ρόλου στη μείωση των εκπομπών ρύπων και της δυνατότητας υποκατάστασης των ορυκτών καυσίμων. Η παρούσα ενότητα εξετάζει το νομικό πλαίσιο που διέπει τα βιοκαύσιμα στην Ελλάδα, με ιδιαίτερη έμφαση στη βιοαιθανόλη, μέσω μιας χρονολογικής επισκόπησης διεθνών, ευρωπαϊκών και εθνικών νομοθετικών εξελίξεων.

Το πρώτο σημαντικό διεθνές περιβαλλοντικό πλαίσιο που αναγνώρισε τον ρόλο των βιοκαυσίμων στο πλαίσιο της κλιματικής πολιτικής ήταν το Πρωτόκολλο του Κιότο, το οποίο υιοθετήθηκε στις 11 Δεκεμβρίου 1997 και τέθηκε σε ισχύ στις 16 Φεβρουαρίου 2005. Η συμφωνία αυτή αποτέλεσε σημείο καμπής για τη διεθνή δράση κατά της κλιματικής αλλαγής, καθώς καθιέρωσε νομικά δεσμευτικούς στόχους για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τις ανεπτυγμένες χώρες, σύμφωνα με την αρχή της «κοινής αλλά διαφοροποιημένης ευθύνης» [45].

Όπως αναφέρεται στο Παράρτημα Β του Πρωτοκόλλου, η Ελλάδα, ως κράτος μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης, δεσμεύτηκε να συμβάλει στον ποσοτικό στόχο μείωσης εκπομπών κατά 8% σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990, στο πλαίσιο της πρώτης περιόδου δέσμευσης (2008–2012). Στη συνέχεια, με την Τροποποίηση της Ντόχα που υιοθετήθηκε το 2012, εισήχθη δεύτερη περίοδος δέσμευσης (2013–2020), με στόχο τουλάχιστον 18% μείωση εκπομπών για τα συμμετέχοντα κράτη. Η τροποποίηση τέθηκε σε ισχύ το 2020, αφού συγκεντρώθηκαν οι απαραίτητες επικυρώσεις από τις χώρες μέλη [46].

Το Πρωτόκολλο προέβλεπε επίσης, τη χρήση ευέλικτων μηχανισμών για την επίτευξη των στόχων, όπως ο Μηχανισμός Καθαρής Ανάπτυξης και η Κοινή Εφαρμογή, οι οποίοι

επέτρεψαν στα κράτη να συμμορφώνονται με τις δεσμεύσεις τους μέσω επενδύσεων σε έργα χαμηλών εκπομπών σε τρίτες χώρες, ενισχύοντας ταυτόχρονα τη μεταφορά τεχνολογίας και την αποδοτικότητα. Επιπλέον, το Ταμείο Προσαρμογής δημιουργήθηκε για να στηρίζει τις πιο ευάλωτες χώρες.

Το Πρωτόκολλο αυτό και οι μετέπειτα τροποποιήσεις του έθεσαν τα θεμέλια για την παγκόσμια περιβαλλοντική διακυβέρνηση και άνοιξαν τον δρόμο για μεταγενέστερες συμφωνίες, όπως η Συμφωνία των Παρισίων του 2015, η οποία αντικατέστησε σταδιακά το Κιότο ως το κύριο εργαλείο διεθνούς συνεργασίας για το κλίμα [47].

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, η Οδηγία 2003/30/EK, η οποία εκδόθηκε στις 8 Μαΐου 2003, αποτέλεσε την πρώτη επίσημη νομική βάση ως συνέχεια των δεσμεύσεων του Κιότο για την ΕΕ. Η Οδηγία είχε ως βασικούς στόχους την ενίσχυση της ενεργειακής ασφάλειας, τη μείωση των εκπομπών του CO₂, τη διαφοροποίηση των ενεργειακών πηγών και την ενίσχυση της αγροτικής ανάπτυξης μέσω της αξιοποίησης γεωργικών προϊόντων [48].

Η Οδηγία 2009/28/EK – RED I υιοθετήθηκε στις 23 Απριλίου 2009 και αποτέλεσε σημαντική πρόοδο στη νομοθεσία της ΕΕ για τις ΑΠΕ. Για τις μεταφορές, καθόρισε υποχρεωτικό στόχο 10% για τη χρήση ενέργειας από ΑΠΕ, συμπεριλαμβανομένων των βιοκαυσίμων. Κεντρικό στοιχείο της Οδηγίας ήταν η θέσπιση κριτηρίων βιωσιμότητας για τα βιοκαύσιμα και τα βιορευστά, ώστε να διασφαλίζεται ότι μειώνουν ουσιαστικά τις εκπομπές αερίων, δεν προκαλούν καταστροφή δασών, υγροτόπων ή περιοχών υψηλής βιοποικιλότητας και τέλος ότι παράγονται με σεβασμό στα ανθρώπινα δικαιώματα και στα δικαιώματα χρήσης γης [49]. Η RED I απαίτησε από τα κράτη μέλη να καταρτίσουν Εθνικά Σχέδια Δράσης (NREAPs) και να υποβάλλουν εκθέσεις προόδου ανά διετία. Η Ελλάδα ενσωμάτωσε την Οδηγία με τον Νόμο 4062/2012, καθορίζοντας μηχανισμούς ανάμειξης και συστήματα παρακολούθησης των βιοκαυσίμων [50].

Η Οδηγία 2015/1513/ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, γνωστή και ως «Οδηγία ILUC» [51], τροποποιεί τις Οδηγίες 98/70/EK και 2009/28/EK με στόχο την αντιμετώπιση των έμμεσων αλλαγών χρήσης γης (ILUC) που σχετίζονται με την παραγωγή βιοκαυσίμων. Η Οδηγία εκδόθηκε στις 5 Οκτωβρίου 2015 και τα κράτη μέλη όφειλαν να

την ενσωματώσουν στο εθνικό τους δίκαιο έως τις 10 Σεπτεμβρίου 2017. Τα κυριότερα σημεία της είναι ότι καθορίζει ανώτατο όριο 7% για τη συμβολή των βιοκαυσίμων από καλλιέργειες τροφίμων και ζωοτροφών στον στόχο του 10% για τις ΑΠΕ στις μεταφορές έως το 2020. Επιπλέον, θεσπίζεται αυστηρότερη περιβαλλοντική απαίτηση για τα νέα εργοστάσια παραγωγής βιοκαυσίμων. Συγκεκριμένα, μονάδες που ξεκινούν τη λειτουργία τους μετά τις 5 Οκτωβρίου 2015 πρέπει να επιτυγχάνουν τουλάχιστον 60 % μείωση των καθαρών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, σε σύγκριση με τα συμβατικά ορυκτά καύσιμα, προκειμένου να θεωρούνται επιλέξιμες για ένταξη στους στόχους και τα σχήματα ενίσχυσης. Το όριο αυτό διασφαλίζει την περιβαλλοντική αποδοτικότητα των νέων τεχνολογιών και εναρμονίζεται με τη στρατηγική της Ε.Ε. για κλιματική ουδετερότητα.

Η RED II αύξησε τον συνολικό στόχο της ΕΕ για τις ΑΠΕ στο 32% έως το 2030 και τον στόχο για τις μεταφορές στο 14%. Παράλληλα, εισήγαγε αυστηρότερα και πιο λεπτομερή κριτήρια βιωσιμότητας, ενίσχυσε την έμφαση στα προηγμένα βιοκαύσιμα (που παράγονται από απόβλητα και μη εδώδιμες πρώτες ύλες), και περιόρισε τη συμβολή των συμβατικών βιοκαυσίμων από καλλιέργειες τροφίμων. Η Οδηγία απαιτούσε από τα κράτη μέλη να θεσπίσουν ελάχιστα ποσοστά προηγμένων βιοκαυσίμων και να υιοθετήσουν μέτρα ενίσχυσης της καινοτομίας στον τομέα αυτόν. Η ενσωμάτωσή της αποτέλεσε προαπαιτούμενο για την επίτευξη των στόχων της Συμφωνίας των Παρισίων [52][47].

Η RED III επικαιροποιεί την προηγούμενη Οδηγία, αυξάνοντας τον στόχο για τις ΑΠΕ στο 42,5% με ενδεικτικό στόχο 45% έως το 2030. Θέτει αυστηρότερα ελάχιστα επίπεδα για την κατανάλωση προηγμένων βιοκαυσίμων, ενώ υποχρεώνει τα κράτη μέλη να εφαρμόσουν συγκεκριμένα μέτρα ενίσχυσης της παραγωγής και χρήσης τους, κυρίως στις οδικές και θαλάσσιες μεταφορές. Επίσης, δίνει έμφαση στη διαλειτουργικότητα των συστημάτων παρακολούθησης και πιστοποίησης βιωσιμότητας, ενισχύοντας τη διαφάνεια και την αξιοπιστία των αλυσίδων εφοδιασμού βιοκαυσίμων στην ΕΕ [53].

Η Οδηγία (ΕΕ) 2023/2413 επικεντρώνεται στην απλοποίηση και επιτάχυνση των διαδικασιών αδειοδότησης για έργα, στην ενίσχυση της ενσωμάτωσης των ανανεώσιμων στις βιομηχανίες και τις μεταφορές, καθώς και στην προώθηση «έξυπνων» υποδομών επαναφόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Παράλληλα, ενισχύει τη διαφάνεια ενημέρωσης των καταναλωτών σχετικά με την ενεργειακή απόδοση και το μερίδιο ανανεώσιμης ενέργειας σε

δίκτυα τηλεθέρμανσης και τηλεψύξης [54]. Με την Οδηγία καταργούνται τα Παραρτήματα IV και V της προηγούμενης νομοθεσίας, ενδεχομένως στο πλαίσιο απλοποίησης ή ενοποίησης διατάξεων, και ενσωματώνονται τεχνικές προδιαγραφές που βασίζονται στο πρότυπο ENISO 4259-1:2017/A1:2021 και ENISO 4259-2:2017/A1:2019, τα οποία καθορίζουν μεθοδολογίες για την ερμηνεία των εργαστηριακών μετρήσεων και των ορίων ακρίβειας σε προϊόντα πετρελαίου. Συγκεκριμένα, αυτά τα πρότυπα ορίζουν πώς να αξιολογείται η αβεβαιότητα και η επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων δοκιμών, ώστε να υπάρχει συνέπεια και αξιοπιστία στις μετρήσεις καυσίμων και σχετικών παραμέτρων ποιότητας.

Ελληνικό Νομικό Πλαίσιο για τα Βιοκαύσιμα

Η προώθηση των βιοκαυσίμων στην Ελλάδα θεμελιώνεται σε ένα σύνολο νομοθετικών πράξεων που ενσωματώνουν τις ευρωπαϊκές οδηγίες και διαμορφώνουν το θεσμικό πλαίσιο για την εγχώρια εφαρμογή των πολιτικών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στον τομέα των μεταφορών.

Νόμος 3423/2005

Αποτελεί την πρώτη οργανωμένη προσπάθεια ενσωμάτωσης της ευρωπαϊκής Οδηγίας 2003/30/EK στο ελληνικό δίκαιο. Ο νόμος αυτός καθιερώνει το Εθνικό Πρόγραμμα Κατανομής Βιοκαυσίμων, το οποίο επιδιώκει την ελεγχόμενη εισαγωγή και διάθεση βιοκαυσίμων στην αγορά με στόχο την υποκατάσταση των συμβατικών καυσίμων [55].

Νόμος 4062/2012

Με τον νόμο αυτό ενσωματώνεται στο εσωτερικό δίκαιο η Οδηγία 2009/28/EK (RED I). Καθορίζονται οι υποχρεώσεις των κρατών-μελών και των παρόχων καυσίμων ως προς τη βιωσιμότητα και την αναγκαστική ανάμιξη των βιοκαυσίμων με συμβατικά καύσιμα. Ορίζει ελάχιστα ποσοστά κατανάλωσης και κριτήρια βιωσιμότητας [56].

Νόμος 4414/2016

Εισάγει νέο σύστημα στήριξης για τις ΑΠΕ, μεταβαίνοντας από τις εγγυημένες τιμές (feed-in tariffs) σε ένα μοντέλο βασισμένο σε μηχανισμούς αγοράς. Αν και δεν επικεντρώνεται

αποκλειστικά στα βιοκαύσιμα, εισάγει έμμεσα κίνητρα για την ενίσχυση της διείσδυσης των βιοκαυσίμων στην αγορά ενέργειας [57].

Παρά την ύπαρξη ενός σαφούς νομοθετικού πλαισίου, η εφαρμογή των σχετικών Οδηγιών στην Ελλάδα αντιμετώπισε σημαντικά εμπόδια, κυρίως θεσμικά και γραφειοκρατικά. Η έλλειψη εθνικής στρατηγικής για την ανάπτυξη προηγμένων βιοκαυσίμων, σε συνδυασμό με τον περιορισμένο αριθμό επενδύσεων στον τομέα, περιορίζουν τη δυνατότητα επίτευξης των στόχων της Οδηγίας RED III.

Από το 2019, η Ελλάδα έχει υποχρέωση να προσθέτει βιοαιθανόλη στη βενζίνη σε ποσοστό τουλάχιστον 1%, ποσοστό το οποίο αυξήθηκε σε 3,3% το 2020. Η αύξηση αυτή επηρέασε το κόστος της βενζίνης, καθώς η μη έγκαιρη συμμόρφωση με τις ευρωπαϊκές Οδηγίες οδήγησε σε προσαρμογές στην αγορά και επιβάρυνση του τελικού καταναλωτή [58].

Η ανάγκη για ισχυρότερη δράση καθίσταται ακόμη πιο επιτακτική μετά την 6η Έκθεση Αξιολόγησης της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC), η οποία κατέδειξε ότι ο στόχος της συγκράτησης της ανόδου της θερμοκρασίας στους 1,5°C μπορεί να επιτευχθεί μόνο αν υπάρξουν άμεσες, βαθιές και διαρκείς μειώσεις των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου εντός της τρέχουσας δεκαετίας [59]. Τέλος, αξίζει να επισημανθεί ότι η Συμφωνία των Παρισίων του 2015 επιβεβαιώνει αυτόν τον στόχο και απαιτεί την πλήρη κινητοποίηση των κρατών-μελών, τόσο μέσω εθνικών σχεδίων δράσης όσο και μέσω της ενίσχυσης βιώσιμων λύσεων όπως τα βιοκαύσιμα [47].

4.Βιοαιθανόλη κυτταρινούχας βιομάζας

Η παρούσα ενότητα επικεντρώνεται στις φυσικοχημικές ιδιότητες της αιθανόλης, στις πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή της και στα τεχνολογικά στάδια της διαδικασίας. Η εργασία επικεντρώνεται στη χρήση κυτταρινούχας βιομάζας, η οποία αποτελεί τη βάση για την ανάπτυξη αποδοτικών και καινοτόμων διεργασιών παραγωγής βιοκαυσίμων δεύτερης γενιάς, με σημαντικό δυναμικό στην απανθρακοποίηση του τομέα των μεταφορών και στη μετάβαση προς μία κυκλική, πράσινη οικονομία.

4.1.Βιοαιθανολή

Η αιθανόλη (αιθυλική αλκοόλη, C_2H_5OH) είναι μία πτητική οργανική ένωση με σημείο τήξης $-114,1^{\circ}C$, σημείο βρασμού $78,32^{\circ}C$ και πυκνότητα 789 g/l στους $20^{\circ}C$. Είναι διαλυτή στο νερό και χρησιμοποιείται ευρέως τόσο ως διαλύτης όσο και ως καύσιμο. Η λιγνοκυτταρίνη αποτελεί ένα σύνθετο δομικό συστατικό που βρίσκεται στα κυτταρικά τοιχώματα ξυλωδών και μη ξυλωδών φυτών. Είναι ένα από τα πλέον άφθονα οργανικά υλικά στη φύση και αποτελείται κυρίως από τους πολυσακχαρίτες κυτταρίνη (35–50%) και ημικυτταρίνη (20–35%), καθώς και από τον αρωματικό πολυμερή λιγνίνη (10–25%), με τα ποσοστά να διαφοροποιούνται ανάλογα με το είδος και την προέλευση της βιομάζας. Οι βασικές πηγές κυτταρίνης περιλαμβάνουν φυτικά υλικά, με ενδεικτικά ποσοστά κυτταρίνης στη βιβλιογραφία να καταγράφονται ως εξής: αγρωστώδη φυτά (33–38%), ξύλα (44–48%), ίνες φυτών όπως το λινάρι και το ράμνι (70–85%) και ίνες βαμβακιού, όπου το ποσοστό κυτταρίνης υπερβαίνει το 90%. Η κυτταρίνη είναι ένας γραμμικός πολυσακχαρίτης που αποτελείται από μονάδες γλυκόζης συνδεδεμένες με β -1,4-γλυκοσιδικούς δεσμούς. Αντιθέτως, η ημικυτταρίνη είναι ένας διακλαδισμένος, άμορφος ετεροπολυσακχαρίτης που περιέχει διάφορα μονοσακχαρίδια, όπως D-γλυκόζη, D-μανόζη, D-ξυλόζη, D-γαλακτόζη, L-ραμνόζη και L-αραβινόζη, καθώς και ουρονικά οξέα και ακετυλομάδες. Οι ακριβείς αναλογίες των σακχάρων διαφέρουν ανάλογα με το είδος του φυτού ή ακόμη και τον τύπο του φυτικού ιστού [60].

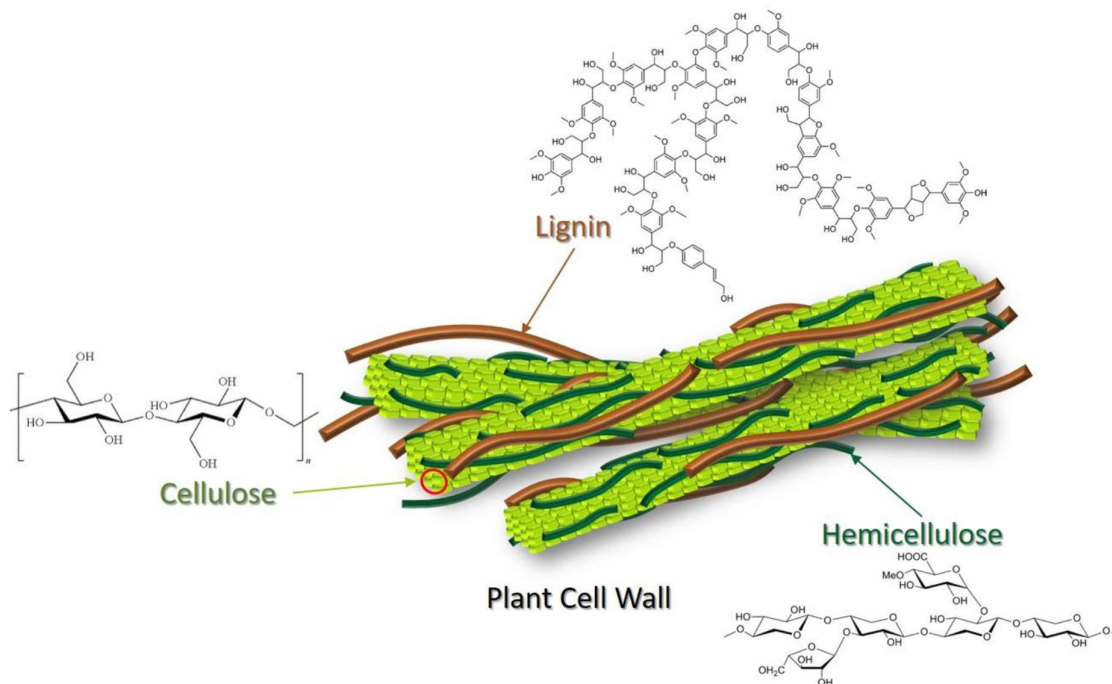
Η λιγνίνη είναι ένα πολύπλοκο, μη γραμμικό φαινολικό μακρομόριο που προκύπτει από τον πολυμερισμό και τη διασταύρωση (μέσω δεσμών C–C και C–O–C) τριών βασικών φαινυλοπροπανοειδών αλκοολών: της παρακουμαρυλικής, της κονιφερυλικής και της σιναιτυλικής. Αποτελεί ένα υδρόφοβο, αρωματικό πολυμερές που δρα ως συγκολλητική ουσία μεταξύ των ινών της κυτταρίνης, προσδίδοντας μηχανική αντοχή και προστασία από μικροβιακή προσβολή. Η αναλογία των δομικών αυτών μονάδων της λιγνίνης ποικίλλει επίσης ανάλογα με το είδος του φυτού και τη θέση της στον ιστό. Οι αλυσίδες της κυτταρίνης οργανώνονται σε μικροϊνες, οι οποίες σταθεροποιούνται μέσω δεσμών υδρογόνου. Αυτές οι μικροϊνες συνδέονται με ημικυτταρίνες και άμορφους πολυσακχαρίτες όπως η πηκτίνη, σχηματίζοντας δεμάτια υψηλής δομικής συνοχής [60].

Η υψηλή κρυσταλλικότητα των περιοχών αυτών καθιστά την κυτταρίνη λιγότερο προσβάσιμη σε ένζυμα και δυσχεραίνει τόσο τη βιοδιάσπαση όσο και τη διαλυτότητα στο νερό. Οι άμορφες περιοχές της κυτταρίνης, με χαμηλότερο βαθμό οργάνωσης, είναι περισσότερο ευάλωτες σε ενζυμική υδρόλυση. Η φυσική κυτταρίνη είναι αδιάλυτη στο νερό, λόγω του υψηλού μοριακού της βάρους και της πυκνής, κρυσταλλικής της δομής. Η

υψηλή πολυμεριστική τάξη σχετίζεται με αυξημένη ανθεκτικότητα, ενώ η χαμηλή διευκολύνει την ενζυματική αποδόμηση. Η απομόνωση και χημική τροποποίηση της κυτταρίνης αποτελούν βασικά στάδια στη βιομηχανική της αξιοποίηση [61][62][63].

Τα κύρια εμπόδια στην αποτελεσματική βιομετατροπή της κυτταρίνης περιλαμβάνουν τη συνένωσή της με λιγνίνη και ημικυτταρίνη, τον υψηλό βαθμό κρυσταλλικότητας, τον μεγάλο βαθμό πολυμερισμού, καθώς και τη μικρή προσβάσιμη επιφάνεια. Κατά την προεπεξεργασία παραμένουν υπολείμματα λιγνίνης που δεσμεύουν τα ένζυμα, μειώνοντας σημαντικά την αποδοτικότητα της υδρόλυσης [63].

Οι περισσότερες φυσικές πηγές κυτταρίνης παρουσιάζουν υψηλό βαθμό λιγνινοποίησης, γεγονός που τις καθιστά ακατάλληλες για άμεση βιομετατροπή [60]. Για τον λόγο αυτό, απαιτείται προηγουμένως κατάλληλη, τεχνικά αποτελεσματική και οικονομικά βιώσιμη προεπεξεργασία, η οποία στοχεύει στην απομάκρυνση ή τροποποίηση της λιγνίνης και στη διευκόλυνση της ενζυματικής δράσης κατά την υδρόλυση [62][63].



Εικόνα 4. Δομή και σύνθεση του κυτταρικού τοιχώματος [64]

4.2.Κυτταρινούχα βιομάζα

Η κατηγοριοποίηση των πηγών κυτταρίνης βασίζεται κυρίως στην προέλευσή τους και στην περιεκτικότητά τους σε κυτταρίνη, ημικυτταρίνη και λιγνίνη. Οι τρεις κύριες κατηγορίες είναι: γεωργικά υπολείμματα, δασικά υπολείμματα και ενεργειακές καλλιέργειες. Κάθε κατηγορία παρουσιάζει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά όσον αφορά τη διαθεσιμότητα, την οικονομικότητα συλλογής και μεταφοράς, τη χημική σύσταση, καθώς και τις δυνατότητες βιομετατροπής [63]. Τα γεωργικά υπολείμματα, όπως τα στελέχη και τα φύλλα καλαμποκιού, το άχυρο σιταριού, το άχυρο ρυζιού και τα υπολείμματα βαμβακιού, είναι υποπροϊόντα των αγροτικών δραστηριοτήτων και συχνά μένουν αχρησιμοποίητα ή σε διαφορετική περίπτωση απορρίπτονται ή καίγονται, συμβάλλοντας σε εκπομπές αερίων θερμοκηπίου. Οι πρώτες ύλες αυτής της κατηγορίας είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρουσες, καθώς αφενός είναι φθηνές και διαθέσιμες σε μεγάλες ποσότητες, αφετέρου περιέχουν υψηλά ποσοστά κυτταρίνης (30–40%) και ημικυτταρίνης (20–30%), ενώ το ποσοστό λιγνίνης παραμένει σχετικά χαμηλό, γεγονός που ευνοεί την υδρόλυση και ζύμωση [60]. Επιπλέον, παρουσιάζουν γεωγραφική διασπορά και εποχιακή διαθεσιμότητα, γεγονός που απαιτεί τη δημιουργία συστημάτων συλλογής και αποθήκευσης. Για παράδειγμα, στην Ελλάδα, μεγάλες ποσότητες αχύρου και κορμών βαμβακιού παράγονται κυρίως στη Θεσσαλία και την Κεντρική Μακεδονία. Παρότι παραμένουν σε μεγάλο βαθμό αναξιοποίητες, αποτελούν μια δυνητικά σημαντική πηγή πρώτης ύλης για την ανάπτυξη τοπικών μονάδων παραγωγής βιοκαυσίμων [65].

Τα δασικά υπολείμματα περιλαμβάνουν κλαδιά, φλοιούς, πριονίδια και άλλα υποπροϊόντα της υλοτομίας και της ξυλοβιομηχανίας. Χαρακτηρίζονται από υψηλή περιεκτικότητα σε κυτταρίνη (40–50%), αλλά συνοδεύονται και από υψηλό ποσοστό λιγνίνης (25–35%), γεγονός που καθιστά τη βιομετατροπή τους περισσότερο απαιτητική. Τα δασικά υπολείμματα διαθέτουν πλεονεκτήματα σε περιοχές με έντονη δασική δραστηριότητα και οργανωμένη βιομηχανία ξύλου [60].

Οι ενεργειακές καλλιέργειες των φυτών γλυκός σόργος, ο μίσχανθος (*Miscanthus giganteus*), τα καλάμια, τα είδη ιτιάς και switchgrass, έχουν σχεδιαστεί ειδικά για της αξιοποίηση τους για παραγωγή ενέργειας. Αυτά τα φυτά χαρακτηρίζονται από γρήγορη ανάπτυξη, υψηλή απόδοση σε ξηρή μάζα και σημαντική περιεκτικότητα σε κυτταρίνη. Για το *Miscanthus*, για παράδειγμα, η παραγωγή σε βιομάζα μπορεί να φτάσει τους 2 τόνους

ανά στρέμμα. Η καλλιέργεια αυτών των φυτών απαιτεί γεωργικές εισροές, αλλά προσφέρει τη δυνατότητα σταθερής και προβλέψιμης παραγωγής χωρίς να επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της αγοράς τροφίμων. Επιπλέον, μπορούν να καλλιεργηθούν σε υποβαθμισμένες ή περιθωριακές εκτάσεις, συμβάλλοντας στην αναβάθμιση της γεωργικής παραγωγικότητας και τη δημιουργία απασχόλησης σε αγροτικές περιοχές. Μερικά σημαντικά έργα που έχουν πραγματοποιηθεί στην χώρα μας για την υποστήριξη ενεργειακών καλλιεργειών είναι της LIGNOFOS – Αειφορική παραγωγή βιοκαυσίμων και βιοχημικών προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας από λιγνοκυταρινούχο βιομάζα (φαλαρίδα) (2011-2013), OPTIMA- Βελτιστοποίηση της παραγωγής βιομάζας από πολυετή αγροστώδη (καλάμι, μίσχανθος, switchgrass κι άλλα ενδημικά πολυετή φυτά) στη Μεσόγειο (2011-2015), καθώς και το EUROBIOREF - Ευρωπαϊκό, πολυεπίπεδο, ολοκληρωμένο σχέδιο βιοδιυλστηρίου για αειφόρα επεξεργασία βιομάζας (πολυετή και ελαιούχα φυτά) 2010-2014 [66].

Εκτός των παραδοσιακών πηγών, ενδιαφέρον παρουσιάζουν και τα οργανικά απόβλητα της αστικής και βιομηχανικής δραστηριότητας, όπως τα χαρτιά, τα υπολείμματα της βιομηχανίας τροφίμων και τα ιζήματα βιολογικών καθαρισμών πλούσια σε φυτικές ίνες. Παρότι η αξιοποίησή τους αντιμετωπίζει ζητήματα σταθερότητας, μόλυνσεων και ανομοιογένειας, αποτελούν αντικείμενο εντατικής έρευνας [67].

Βιομάζα	Κυτταρίνη (%)	Ημικυτταρίνες (%)	Λιγνίνη (%)
Λευκό βαμβάκι	94–96	1–2	<1
Καφέ βαμβάκι	85–88	2–3	5–7
Λινάρι	85–88	5–6	3–5
Μαλακό ξύλο (κωνοφόρα)	46–48	20–23	27–28
Σκληρό ξύλο	44–46	25–27	22–25
Υπόλειμμα ζαχαροκάλαμου (Bagasse)	37–39	23–25	19–21
Στελέχη αραβόσιτου	35–37	24–26	18–20
Καλαμποκόφυλλα (cobs)	34–36	36–38	9–11
Καλαμποκόξυλο (stover)	35–37	28–30	18–20
Άχυρο σίτου	34–36	28–30	15–17

Άχυρο ρυζιού	34–36	25–27	7–9
Switchgrass (ποώδες χόρτο)	36–38	26–28	17–19

Πίνακας 1. Τυπικές συνθέσεις κυτταρινούχας βιομάζας [63]

Λευκό και Καφέ Βαμβάκι

Το βαμβάκι, είτε σε λευκή είτε σε καφέ μορφή, αποτελεί μία από τις πιο αγνές φυσικές πηγές κυτταρίνης που απαντώνται στη φύση. Οι ίνες του, αποτελούμενες σχεδόν αποκλειστικά από κυτταρίνη (σε ποσοστά που υπερβαίνουν το 90%), προσφέρουν εξαιρετική καθαρότητα, με μηδαμινή παρουσία λιγνίνης ή ημικυτταρίνης. Η καθαρότητα αυτή καθιστά το βαμβάκι ιδανικό για επεξεργασία χωρίς την ανάγκη έντονης προεπεξεργασίας. Ωστόσο, η ευρεία χρήση του στη βιομηχανία κλωστοϋφαντουργίας περιορίζει σημαντικά τη διαθεσιμότητά του ως ενεργειακή πρώτη ύλη, ενώ το κόστος του παραμένει υψηλότερο σε σύγκριση με άλλες γεωργικές υπολειμματικές πηγές [61].

Λινάρι

Το λινάρι, φυτό παραδοσιακά συνδεδεμένο με την παραγωγή λινών υφασμάτων, προσφέρει μια ενδιαφέρουσα πηγή ινωδών συστατικών με υψηλή περιεκτικότητα σε κυτταρίνη, που κυμαίνεται γύρω στο 85–88%. Οι ίνες του λιναριού είναι επιμήκεις και ομοιογενείς, ιδιότητα που διευκολύνει και τις μηχανικές διεργασίες κοπής και πολτοποίησης. Η χρήση του ως ενεργειακή καλλιέργεια παραμένει περιορισμένη, αλλά η αυξανόμενη τάση για εκμετάλλευση εναλλακτικών φυτικών υπολειμμάτων καθιστά το λινάρι ελκυστικό για το μέλλον [68][65].

Μαλακό Ξύλο (Κωνοφόρα)

Τα κωνοφόρα δέντρα, όπως το πεύκο και το έλατο, αντιπροσωπεύουν τις κύριες πηγές μαλακού ξύλου. Η κυτταρίνη που περιέχουν φτάνει περίπου το 46–48% της ξηρής μάζας, ενώ η λιγνίνη καταλαμβάνει επίσης μεγάλο ποσοστό, φτάνοντας το 27–28%. Το υψηλό αυτό ποσοστό λιγνίνης, μαζί με τη δομική της πολυπλοκότητα, καθιστούν τα μαλακά ξύλα δύσκολα επεξεργάσιμα για βιοαιθανόλη χωρίς ισχυρές χημικές ή θερμικές προεπεξεργασίες. Παρόλα αυτά, η άφθονη παρουσία των μαλακών ξύλων σε δασικές περιοχές, καθώς και τα υπολείμματα υλοτομίας και βιομηχανικής επεξεργασίας τους, τα καθιστούν αξιόλογη εναλλακτική για την παραγωγή βιοκαυσίμων [65].

Σκληρό Ξύλο

Τα σκληρά ξύλα, όπως η δρυς και η οξιά, παρουσιάζουν ελαφρώς υψηλότερη περιεκτικότητα σε κυτταρίνη συγκριτικά με τα μαλακά ξύλα, φτάνοντας περίπου το 45%, ενώ η λιγνίνη κυμαίνεται γύρω στο 22–25%. Η επεξεργασία τους απαιτεί εξίσου απαιτητικές μεθόδους προεπεξεργασίας, αλλά η πιο συμπαγής και ομοιόμορφη δομή των κυτταρινικών τους ινών καθιστά τη μετατροπή τους πιο σταθερή και προβλέψιμη. Επιπλέον, τα σκληρά ξύλα προκύπτουν συχνά ως παραπροϊόντα από τη βιομηχανία επίπλων ή πατωμάτων, παρέχοντας έτσι ένα δευτερογενές ρεύμα πρώτης ύλης που μπορεί να αξιοποιηθεί ενεργειακά [65].

Bagasse (Υπόλειμμα Ζαχαροκάλαμου)

Το bagasse, που αποτελεί το ινώδες υπόλειμμα από την έκθλιψη του ζαχαροκάλαμου, συνιστά μία από τις πιο ευρέως διαθέσιμες λιγνοκυτταρινούχες πρώτες ύλες στον τροπικό και υποτροπικό κόσμο. Η περιεκτικότητά του σε κυτταρίνη και ημικυτταρίνη είναι σημαντική (περίπου 40% και 30% αντίστοιχα), ενώ η λιγνίνη παραμένει σε ανεκτά επίπεδα. Δεδομένου ότι προέρχεται από ήδη υφιστάμενη βιομηχανική καλλιέργεια, το bagasse δεν απαιτεί επιπλέον καλλιεργητικό χώρο ή εισροές. Η δομή του είναι ευνοϊκή για τη διεργασία ενζυμικής υδρόλυσης, καθιστώντας το ιδιαίτερα ελκυστικό για μονάδες παραγωγής βιοαιθανόλης που γειτνιάζουν με εργοστάσια ζάχαρης [65][70].

Στελέχη Αραβόσιτου

Τα στελέχη του αραβόσιτου, που παραμένουν στο χωράφι μετά τη συγκομιδή του καρπού, αποτελούν έναν από τους πιο άφθονους τύπους γεωργικών υπολειμμάτων παγκοσμίως. Χημικά, περιέχουν περίπου 35–37% κυτταρίνη, 24–26% ημικυτταρίνη και 18–20% λιγνίνη, καθιστώντας τα μια ισορροπημένη, αλλά τεχνικά απαιτητική, πρώτη ύλη για βιομετατροπή. Το κύριο πλεονέκτημα των στελεχών είναι η μεγάλη γεωγραφική διαθεσιμότητα, ειδικά σε αγροτικές περιοχές με εκτεταμένη καλλιέργεια αραβόσιτου. Παρά την ανάγκη για συλλογή και μεταφορά, θεωρούνται σημαντικός πόρος για αποκεντρωμένα συστήματα παραγωγής βιοαιθανόλης. Η ποικιλία της φυσικής τους σύστασης απαιτεί καλά σχεδιασμένες προεπεξεργασίες για να εξασφαλιστεί η βέλτιστη απόδοση [60][65][70].

Καλαμποκόφυλλα

Τα καλαμποκόφυλλα που προέρχονται από τον άξονα του καλαμποκιού στον οποίο αναπτύσσονται οι σπόροι, αποτελούν ένα πιο συμπαγές και ινώδες υλικό σε σχέση με τα υπόλοιπα μέρη του φυτού. Είναι ιδιαίτερα πλούσια σε ημικυτταρίνη, με ποσοστά που αγγίζουν το 34–36%, ενώ η κυτταρίνη κυμαίνεται στο 36-38% και η λιγνίνη περίπου στο 09-11%. Αυτή η σύνθεση καθιστά τα καλαμποκόφυλλα εξαιρετικά κατάλληλα για παραγωγή όχι μόνο βιοαιθανόλης, αλλά και άλλων προϊόντων ζύμωσης όπως ξυλόζη. Η δομή τους επιτρέπει υψηλή επιφανειακή επαφή με ένζυμα, γεγονός που ευνοεί την υδρόλυση και βελτιώνει τη συνολική ενεργειακή απόδοση [60][61][65].

Καλαμποκόζυλο

Ο όρος "stover" αναφέρεται γενικά σε όλα τα φυτικά υπολείμματα του καλαμποκιού εκτός των καρπών, συμπεριλαμβανομένων των στελεχών, των φύλλων και των κοτσανιών. Το stover παρουσιάζει το πλεονέκτημα της συλλογής μεγάλης ποσότητας από κάθε αγροτεμάχιο, γεγονός που μπορεί να μειώσει το κόστος εφοδιαστικής αλυσίδας. Εντούτοις, η μεταβλητότητα της υγρασίας και της σύστασής του καθιστούν απαραίτητη την εφαρμογή ελέγχου ποιότητας πριν από την ενσωμάτωσή του σε βιομηχανικές διεργασίες [61][65].

Άχυρο Σίτου

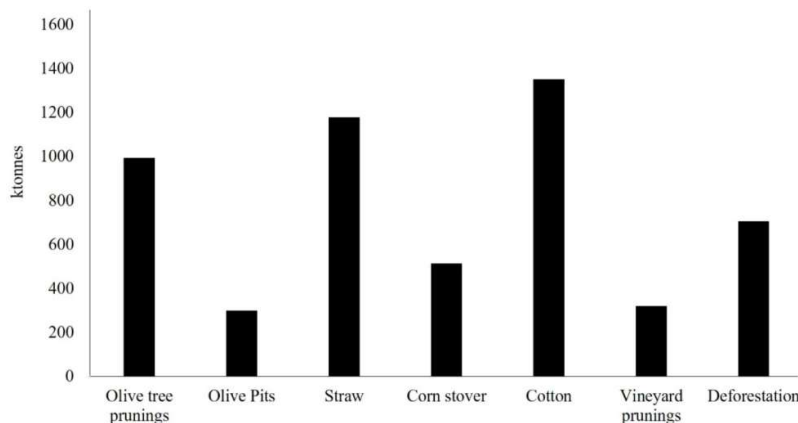
Το άχυρο σίτου είναι ένα υποπροϊόν της καλλιέργειας σιταριού, το οποίο παράγεται σε μεγάλες ποσότητες σε γεωργικές περιοχές. Αποτελείται κυρίως από ινώδη κύτταρα με περιεκτικότητα σε κυτταρίνη περίπου 34–36%, ημικυτταρίνη 28–30% και λιγνίνη 15–17%. Η αφθονία και το χαμηλό κόστος του άχυρου σίτου το καθιστούν μία από τις πιο μελετημένες πρώτες ύλες για παραγωγή βιοαιθανόλης. Επιπλέον, η δομή του είναι κατάλληλη για θερμοχημεία και βιολογική επεξεργασία, ενώ η χρήση του δεν έρχεται σε αντίθεση με την τροφική αλυσίδα. Σε πειραματικές και πιλοτικές μονάδες, το άχυρο σίτου έχει αποδώσει ικανοποιητικές ποσότητες σακχάρων και αιθανόλης μετά από αλκαλική προεπεξεργασία [65][69][70].

Άχυρο Ρυζιού

Το άχυρο ρυζιού είναι μία από τις λιγότερο αξιοποιημένες, αλλά δυνητικά εξαιρετικά παραγωγικές πρώτες ύλες βιοαιθανόλης. Περιέχει κυτταρίνη σε ποσοστά 34–36%, παρόμοια με εκείνα του σιταριού, και παρόμοια επίπεδα ημικυτταρίνης και λιγνίνης [61][65][68][70].

Switchgrass

Το switchgrass είναι μια πολυετής ενεργειακή καλλιέργεια που έχει προσελκύσει σημαντικό επιστημονικό ενδιαφέρον λόγω της αντοχής του σε φτωχά εδάφη, της ελάχιστης ανάγκης για φυτοφάρμακα και της υψηλής απόδοσης βιομάζας. Η χημική του σύσταση χαρακτηρίζεται από περιεκτικότητα σε κυτταρίνη γύρω στο 35%, ημικυτταρίνη 26–28% και λιγνίνη περίπου 18%. Το switchgrass προσφέρει ένα σταθερό και ελεγχόμενο ρεύμα πρώτης ύλης, ιδιαίτερα κατάλληλο για μεγάλες μονάδες παραγωγής, καθώς και για συστήματα αγροτοβιομηχανικής συνέργειας. Επιπλέον, οι τεχνικές καλλιέργειας και συγκομιδής του είναι συμβατές με τον υπάρχοντα αγροτικό εξοπλισμό, γεγονός που μειώνει τις επενδυτικές απαιτήσεις για τους παραγωγούς [65][70].



Εικόνα 5 Κατανομή της ετήσιας παραγωγής βιομάζας, σε τόνους, ανά κατηγορία γεωργικών αποβλήτων στην Ελλάδα. [65]

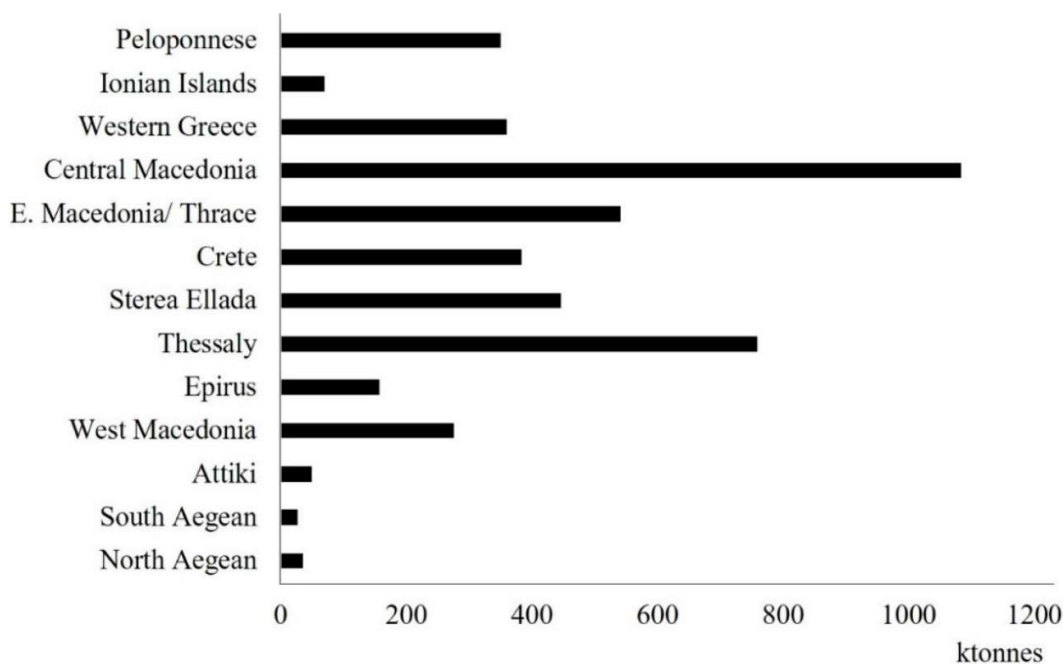
4.4. Κυτταρινούχες πηγές στην Ελλάδα

Μεγάλες ποσότητες βιομάζας συγκεντρώνονται σε περιοχές με έντονη γεωργία και δάση. Σύμφωνα με μελέτες, η Κρήτη παράγει περίπου 1,96 εκατ. τόνους αγροτικών υπολειμμάτων ετησίως, και η Θεσσαλία περίπου 1,76 εκατ. τόνους. Σημαντικά δασικά αποθέματα έχουν καταγραφεί σε Περιφέρειες όπως η Κεντρική Μακεδονία (περίπου 1,08 εκατ. τόνους ξυλώδη βιομάζα/έτος) και η Θεσσαλία (0,76 εκατ. τόνοι), ενώ αξιοσημείωτα αποθέματα δασικής βιομάζας εμφανίζονται επίσης στην Κρήτη και στην Πελοπόννησο [65].

Επίσης, υπολείμματα από καλλιέργειες εντοπίζονται σε πεδινές γεωργικές ζώνες, ενώ οι δασικές πηγές στους ορεινούς όγκους. Σε γενικές γραμμές, η βιομάζα «διασκορπίζεται» σε

όλη τη χώρα, καθιστώντας περίπλοκη τη συγκέντρωσή της για βιοενέργεια. Σε ό,τι αφορά τις ενεργειακές καλλιέργειες, οι εκτάσεις στην Ελλάδα είναι επί του παρόντος περιορισμένες και κυρίως πιλοτικού χαρακτήρα. Έχουν πραγματοποιηθεί δοκιμαστικές φυτεύσεις ενεργειακού *Miscanthus* και γλυκού σόργου σε ορισμένες αγροτικές εκτάσεις στο πλαίσιο ευρωπαϊκών έργων, ωστόσο η εμπορική εφαρμογή τους παραμένει ανεκμετάλλευτη [65][66].

Σε βιομηχανική κλίμακα, αν και δεν καλύπτεται ο τομέας των μεταφορών, υπάρχουν εταιρείες προϊόντων ξύλου αξιοποιούν υπολείμματα ξυλείας. Η ALFA WOOD GROUP λειτουργεί στο Νευροκόπι Δράμας και είναι βιομηχανική μονάδα όπου παράγονται pellet ξύλου και βιομηχανικό πέλλετ από αγροτικά υπολείμματα (π.χ. φλοιούς ελιάς, σπόρους βαμβακιού) [71]. Η ίδια εγκατάσταση παράγει επίσης ηλεκτρική ενέργεια (2 MW) με κάψιμο βιομάζας. Παράλληλα, έχουν σχεδιαστεί νέες μικρές μονάδες αεριοποίησης. Για παράδειγμα, η Ελληνική εταιρεία Agrigas Energy προωθεί μονάδα αεριοποίησης βιομάζας στη Λάρισα (0,5 MWe) που θα χρησιμοποιεί συμπιεσμένα υπολείμματα αραβόσιτου, βαμβακιού και άχυρου ως πρώτη ύλη [72]. Η λειτουργία τέτοιων μονάδων αναμένεται να αυξήσει σημαντικά τη ζήτηση εγχώριας λιγνοκυτταρινικής βιομάζας [65].



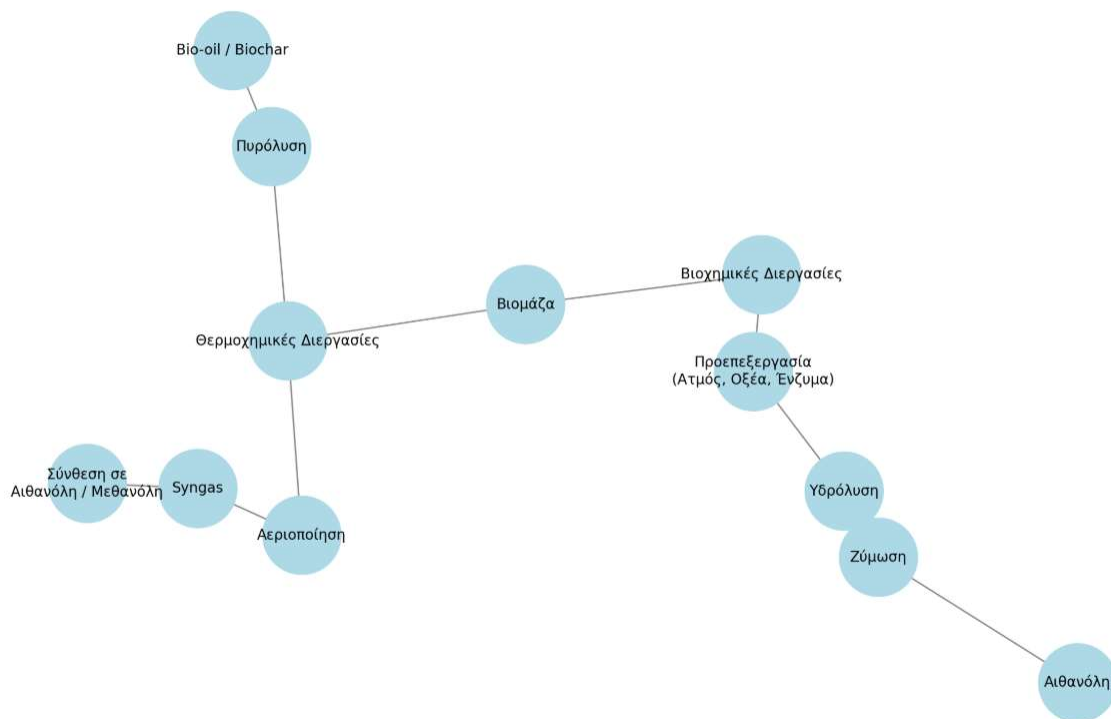
Εικόνα 6. Συνολική ξυλώδη βιομάζα ανά περιφέρεια [65]

Η Κεντρική Μακεδονία καταγράφει τη μεγαλύτερη ετήσια παραγωγή, με 1.083.272 τόνους, ακολουθούμενη από τη Θεσσαλία με 759.654 τόνους και την Ανατολική Μακεδονία και Θράκη με 54.792 τόνους. Όσον αφορά τη βιομάζα που προέρχεται αποκλειστικά από δενδρώδεις καλλιέργειες και δασικές εκτάσεις, η Κεντρική Μακεδονία παραμένει στην πρώτη θέση με 463.849 τόνους, ενώ σημαντικές ποσότητες καταγράφονται επίσης στην Κρήτη (234.741 τόνοι) και στην Πελοπόννησο (219.595 τόνοι).

5. Διαδικασία παραγωγής

5.1. Ανάλυση διαδικασίας παραγωγής, θεωρητικό υπόβαθρο

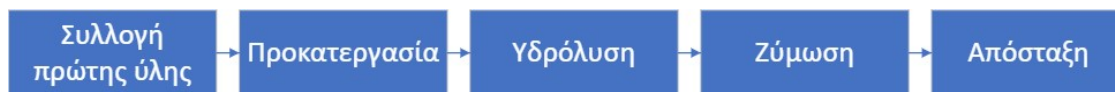
Η αξιοποίηση της λιγνοκυτταρινούχας βιομάζας για την παραγωγή βιοκαυσίμων και χημικών προϊόντων βασίζεται σε δύο κύριες τεχνολογικές προσεγγίσεις: τη βιοχημική και τη θερμοχημική μετατροπή. Οι δύο αυτές κατηγορίες διαφοροποιούνται τόσο ως προς τους μηχανισμούς δράσης όσο και ως προς τις απαιτήσεις σε εξοπλισμό, ενέργεια και πρώτη ύλη. Οι βιοχημικές διεργασίες στηρίζονται σε ήπιες συνθήκες θερμοκρασίας και pH, αξιοποιώντας ένζυμα και μικροοργανισμούς για τη διάσπαση των πολυσακχαριτών σε ζυμώσιμα σάκχαρα και, στη συνέχεια, για τη μετατροπή τους σε προϊόντα όπως η αιθανόλη [69]. Αντίθετα, οι θερμοχημικές διεργασίες επιτυγχάνουν την αποδόμηση της οργανικής ύλης μέσω εφαρμογής υψηλών θερμοκρασιών και, σε ορισμένες περιπτώσεις, χημικών παραγόντων, οδηγώντας σε προϊόντα όπως συνθετικά αέρια ή υγρά καύσιμα. Η επιλογή μεταξύ των δύο διαδρομών εξαρτάται από τη φύση της πρώτης ύλης, το επιθυμητό τελικό προϊόν και τα οικονομοτεχνικά χαρακτηριστικά της διεργασίας [70].



Εικόνα 7. Διαδρομές μετατροπής βιομάζας

5.1.1. Βιοχημική διαδικασία παραγωγής

Στον παρόν κεφάλαιο αναλύονται τα στάδια παραγωγής όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 8. Διάγραμμα ροής παραγωγικής βιοχημικής διεργασίας

Αρχικά, η αποδοτική μετατροπή της λιγνοκυτταρινούχου βιομάζας σε βιοαιθανόλη απαιτεί την προηγούμενη αποδόμηση της σύνθετης και ανθεκτικής κυτταρικής δομής της. Το σύνθετο πολυμερικό πλέγμα που αποτελείται από την κυτταρίνη, την ημικυτταρίνη και την λιγνίνη καθιστά δύσκολη την υδρόλυση των πολυσακχαριτών. Για τον λόγο αυτό, κρίσιμη προϋπόθεση για την αποδοτική ενζυμική υδρόλυση και τη ζύμωση των υδατανθράκων είναι η εφαρμογή κατάλληλων μεθόδων προκατεργασίας.

Μέθοδοι προεπεξεργασίας

Η **μηχανική προεπεξεργασία** στοχεύει στη μείωση του μεγέθους των σωματιδίων και την αύξηση της ειδικής επιφάνειας του υλικού, διευκολύνοντας έτσι την επακόλουθη χημική ή ενζυμική δράση. Περιλαμβάνει τεχνικές όπως η άλεση, η σύνθλιψη και η εξώθηση, οι οποίες μπορούν να εφαρμοστούν αυτόνομα ή συμπληρωματικά με άλλες μεθόδους. Αν και δεν οδηγεί από μόνη της σε σημαντική αποδόμηση της λιγνίνης, μειώνει τον κρυσταλλικό βαθμό της κυτταρίνης και ενισχύει τη διείσδυση των αντιδραστηρίων. Ωστόσο, έχει υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις και το κόστος της εξαρτάται από την αρχική μορφή και υγρασία της βιομάζας [73][74].

Βασικές μέθοδοι μηχανικής προεπεξεργασίας: Θρυμματισμός και άλεση της βιομάζας (chipping, grinding, milling), συχνά με χρήση θρυμματιστών, σφυρόμυλων ή σφαιρόμυλων. Εναλλακτικά χρησιμοποιούνται και πιεστικοί εξωθητήρες (extrusion) που συνδυάζουν μηχανική πίεση και θερμότητα [73].

Η **χημική προεπεξεργασία** περιλαμβάνει τη χρήση οξέων, βάσεων, οξειδωτικών παραγόντων ή ιοντικών υγρών για τη διασπαστική αποδιοργάνωση των δεσμών μεταξύ κυτταρίνης, ημικυτταρίνης και λιγνίνης. Η αραιή όξινη υδρόλυση, συνήθως με H_2SO_4 σε συγκεντρώσεις $<4\%$, εφαρμόζεται σε θερμοκρασίες $120-200^\circ C$ για σύντομο χρονικό διάστημα, αποδομώντας την ημικυτταρίνη και καθιστώντας την κυτταρίνη πιο προσβάσιμη. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή συχνά συνοδεύεται από τη δημιουργία ανασταλτικών παραπροϊόντων, όπως φουρφουράλη, που επηρεάζουν αρνητικά την επακόλουθη, ζύμωση. Αντίστοιχα η αλκαλική απολιγνίνωση, με τη χρήση βάσεων όπως $NaOH$, $Ca(OH)_2$ ή αμμωνίας, απομακρύνει αποτελεσματικά τη λιγνίνη και εν μέρει την ημικυτταρίνη, οδηγώντας σε σημαντική αύξηση της αποδοτικότητας της ενζυμικής υδρόλυσης. Τα αλκάλια προκαλούν διόγκωση των ινών, μείωση της κρυσταλλικότητας και αύξηση της πορώδους δομής. Παρά τα πλεονεκτήματα αυτά, η ανάγκη για ανάκτηση των χημικών αντιδραστηρίων και η παραγωγή μεγάλου όγκου αποβλήτων αποτελούν περιορισμούς της μεθόδου [69][75].

Βασικές μέθοδοι χημικής προεπεξεργασίας: Όξινη υδρόλυση με αραιά ανόργανα οξέα (dilute acid pretreatment) ή συμπυκνωμένα οξέα, αλκαλική επεξεργασία με βάσεις (alkaline pretreatment, συνήθως $NaOH$ ή NH_3), οργανοσολβική κατεργασία με οργανικούς διαλύτες (organosolv), οξείδωση (υγρή οξείδωση με οξυγόνο ή υπεροξείδιο) και νεότερες μέθοδοι με ιοντικά υγρά (ionic liquids) ή βαθύ ευτηκτικό διαλύτη (deep eutectic solvent) [73].

Η **φυσικοχημική προεπεξεργασία** συνδυάζει θερμική και χημική δράση, με κύριες μεθόδους την έκρηξη ατμού (steam explosion), τη θερμοχημική υδρόλυση και τη μέθοδο AFEX (Ammonia Fiber Explosion). Η έκρηξη ατμού, κατά την οποία η βιομάζα υπόκειται σε κορεσμένο ατμό υπό πίεση και έπειτα αποσυμπιέζεται απότομα, διασπά τη λιγνοκυτταρινούχο μήτρα και αυξάνει την προσβασιμότητα της κυτταρίνης. Η προσθήκη όξινων καταλυτών (όπως H_2SO_4 ή H_2CO_3) μπορεί να ενισχύσει τη διάσπαση της ημικυτταρίνης, αλλά ενδέχεται να αυξήσει τα ανασταλτικά παραπροϊόντα [73][75].

Βασικές μέθοδοι φυσικοχημικής προεπεξεργασίας: Έκρηξη ατμού (Steam Explosion), υδροθερμική επεξεργασία με νερό υπό πίεση ή αυτοϋδρόλυση (Liquid Hot Water), έκρηξη με υγρή αμμωνία (Ammonia Fiber Explosion – AFEX), έκρηξη με CO_2 , Wet Air Oxidation. Επιπρόσθετα, ως φυσικοχημικές τεχνικές θεωρούνται η χρήση μικροκυμάτων ή υπερήχων για την παροχή ενέργειας στη βιομάζα – συνήθως σε συνδυασμό με κάποιον καταλύτη ή διαλύτη [73].

Η **βιολογική προεπεξεργασία** βασίζεται στη χρήση μικροοργανισμών, κυρίως μυκήτων όπως είδη *Phanerochaete*, *Trametes* και *Ceriporiopsis*, για την εκλεκτική αποικοδόμηση της λιγνίνης. Οι λιγνολυτικοί μύκητες εκκρίνουν ένζυμα όπως λιγνινοπεροξειδάσες και λακκάσες, τα οποία δρουν ήπια, χωρίς παραγωγή τοξικών ενώσεων. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η περιβαλλοντική της συμβατότητα και η χαμηλή ενεργειακή απαίτηση. Ωστόσο παρουσιάζει σημαντικούς περιορισμούς: η ταχύτητα της διεργασίας είναι χαμηλή (διάρκεια εβδομάδων), απαιτούνται ακριβείς συνθήκες καλλιέργειας, ενώ η αποτελεσματικότητα εξαρτάται από το είδος της βιομάζας και του μικροοργανισμού. Παρά τους περιορισμούς, η βιολογική προεπεξεργασία θεωρείται πολλά υποσχόμενη για τη μελλοντική ανάπτυξη «πράσινων» τεχνολογιών μετατροπής βιομάζας [75][74].

Βασικές μέθοδοι βιολογικής προεπεξεργασίας: βακτηριακή ή μυκητιακή αποδόμηση της βιομάζας από μικροοργανισμούς (π.χ. μύκητες λευκής σήψης – white-rotfungi), ενζυμική προεπεξεργασία με μεμονωμένα ένζυμα (π.χ. λιγνιολυτικά ένζυμα όπως λακκάσες), ή συνδυασμοί μικροβιακών κοινοπραξιών [73].

Η επιλογή ή ο συνδυασμός των παραπάνω μεθόδων αποσκοπεί στη μέγιστη ελευθέρωση των δομικών πολυσακχαριτών της βιομάζας και στη βελτιστοποίηση της πρόσβασης των ενζύμων που χρησιμοποιούνται στο επόμενο κρίσιμο στάδιο: την ενζυμική υδρόλυση και τη ζύμωση, όπου οι απλοί υδατάνθρακες μετατρέπονται σε βιοαιθανόλη με τη βοήθεια καταλυτών ή μικροοργανισμών.

Το στάδιο της υδρόλυσης αποτελεί κρίσιμο βήμα στην παραγωγή βιοαιθανόλης από λιγνοκυτταρινούχα υλικά, καθώς επιτρέπει τη μετατροπή των πολυμερών σακχάρων, όπως η κυτταρίνη και η ημικυτταρίνη, σε ζυμώσιμα μονομερή σάκχαρα, κυρίως γλυκόζη. Οι πολυσακχαρίτες δεν μπορούν να αξιοποιηθούν άμεσα από τους μικροοργανισμούς κατά τη ζύμωση, γεγονός που καθιστά απαραίτητο τον αρχικό καταλυόμενο διαχωρισμό τους μέσω υδρόλυσης [73][74]. Η διαδικασία αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με χρήση ενζύμων (ενζυμική υδρόλυση), είτε με χρήση ισχυρών οξέων (όξινη υδρόλυση), ανάλογα με τη φύση της πρώτης ύλης και τις οικονομικές ή τεχνικές απαιτήσεις της διεργασίας. Η επιλογή του κατάλληλου τύπου υδρόλυσης επηρεάζει καθοριστικά την απόδοση της διαδικασίας σε μονοσακχαρίτες, και κατ' επέκταση την απόδοση σε βιοαιθανόλη στο επόμενο στάδιο της ζύμωσης.

Μέθοδοι Υδρόλυσης

Η **ενζυμική υδρόλυση** αποτελεί μια από τις πλέον διαδεδομένες μεθόδους για την παραγωγή γλυκόζης από κυτταρίνη, η οποία μπορεί στη συνέχεια να υποστεί ζύμωση προς βιοαιθανόλη. Στη διεργασία αυτή, χρησιμοποιούνται εξειδικευμένα ένζυμα, τα οποία δρουν συνερίστηκα για τη διάσπαση της κυτταρίνης σε μονοσακχαρίτες. Συγκεκριμένα, οι ενδογλυκανάσες διασπούν τυχαία τους γλυκοσιδικούς δεσμούς στο εσωτερικό της αλυσίδας, οι εξογλυκανάσες ή κυτταροβιοϋδρολάσες αποδεσμεύουν μονομερή ή διμερή (κελλοβιόζη) από τα άκρα, και οι β-γλυκοσιδάσες υδρολυσούν την κελλοβιόζη σε γλυκόζη. Η διεργασία πραγματοποιείται υπό σχετικά ήπιες συνθήκες θερμοκρασίας (συνήθως 40–50 °C) και ουδέτερο ή ελαφρώς όξινο pH, αποφεύγοντας ακραίες συνθήκες που θα κατέστρεφαν τα σάκχαρα [70]. Τα παραπάνω προσδίδουν πλεονεκτήματα, όπως υψηλή εκλεκτικότητα προς γλυκόζη και ελαχιστοποίηση ανεπιθύμητων υποπροϊόντων, καθώς και χαμηλότερο ενεργειακό αποτύπωμα και περιβαλλοντική επιβάρυνση. Παρ' όλα αυτά, η ανάγκη για προκατεργασία της βιομάζας και το υψηλό κόστος των ενζύμων παραμένουν βασικά εμπόδια για την ευρεία βιομηχανική εφαρμογή [73].

Στην **όξινη υδρόλυση** χρησιμοποιούνται ισχυρά ανόργανα οξέα, συνήθως H_2SO_4 ή HCl , για την κατάτμηση των πολυσακχαριτών. Η κυτταρίνη και η ημικυτταρίνη του προτετεγμένου υλικού αντιδρούν με το οξύ, με αποτέλεσμα το σπάσιμο των γλυκοζιτικών δεσμών και τον

σχηματισμό διαλυτών σακχάρων. Η διαδικασία μπορεί να διεξαχθεί είτε με αραιό οξύ σε υψηλή θερμοκρασία (π.χ. dilute acid hydrolysis, σε θερμοκρασίες $>150\text{ }^{\circ}\text{C}$ και 0,5–1,5% w/w H_2SO_4) είτε με συμπυκνωμένο οξύ σε χαμηλότερη θερμοκρασία (π.χ. 70% H_2SO_4 σε θερμοκρασία περιβάλλοντος) ανάλογα με την τεχνική. Και στις δύο περιπτώσεις, οι συνθήκες είναι διαβρωτικές για τον εξοπλισμό (απαιτούνται αντιδραστήρες από ειδικά κράματα ή με επένδυση), ενώ η άμεση παραγωγή γλυκόζης μπορεί να είναι υψηλή αλλά συχνά συνοδεύεται από ανεπιθύμητες παράπλευρες αντιδράσεις. Για παράδειγμα, τα απελευθερωμένα σάκχαρα (ιδίως οι πεντόζες από την ημικυτταρίνη) μπορεί να αφυδατωθούν παρουσία ισχυρού οξέος και υψηλής θερμοκρασίας, σχηματίζοντας τοξικά υποπροϊόντα όπως φουρφουράλη και HMF, τα οποία αναστέλλουν τους μικροοργανισμούς ζύμωσης [76].

Επιπρόσθετες τεχνικές προκλήσεις της όξινης μεθόδου είναι η εξουδετέρωση του καταλύτη μετά την υδρόλυση και η διαχείριση των υποπροϊόντων. Μετά την υδρόλυση, το όξινο διάλυμα πρέπει να εξουδετερωθεί (π.χ. με προσθήκη βάσης όπως $\text{Ca}(\text{OH})_2$), παράγοντας μεγάλες ποσότητες αλάτων (π.χ. γύψος στην περίπτωση H_2SO_4) που πρέπει να απομακρυνθούν [77]. Επίσης, συχνά απαιτείται πλύση του στερεού υπολείμματος πριν τη ζύμωση ώστε να απομακρυνθούν τα ανασταλτικά υποπροϊόντα και τυχόν υπολειμματικά οξέα. Όλα αυτά προσθέτουν κόστος και πολυπλοκότητα στη διεργασία. Αν και η όξινη υδρόλυση μπορεί να πετύχει σχετικά γρήγορους χρόνους αντίδρασης και δεν απαιτεί ακριβούς βιοκαταλύτες, εντούτοις υστερεί σε οικονομία κλίμακας και περιβαλλοντική συμβατότητα σε σχέση με την ενζυμική μέθοδο. Στην πράξη, λόγω των ζητημάτων διάβρωσης, διαχείρισης χημικών και αναστολής της ζύμωσης, η χρήση ισχυρών οξέων για υδρόλυση περιορίζεται κυρίως σε εργαστηριακή ή πιλοτική κλίμακα, όπου μπορεί κανείς να επιλέξει την απόδοση εις βάρος του κόστους/πολυπλοκότητας για σκοπούς έρευνας και επίδειξης [70][77][76].

Πρόσφατες μελέτες έχουν στραφεί σε εναλλακτικές μεθόδους υδρόλυσης με τη χρήση στερεών καταλυτών, στοχεύοντας σε πιο βιώσιμες και περιβαλλοντικά αποδοτικότερες διαδικασίες παραγωγής σακχάρων και εν τέλει βιοαιθανόλης. Καταλύτες όπως οι σουλφονιωμένοι ενεργοί άνθρακες, οι ρητίνες και τα οξειδία μετάλλων μπορούν να μετατρέψουν την κυτταρίνη σε γλυκόζη με ικανοποιητική απόδοση. Η γλυκόζη αυτή μπορεί έπειτα να υποστεί ζύμωση από κατάλληλους μικροοργανισμούς για την παραγωγή

αιθανόλης δεύτερης γενιάς [78]. Η προσέγγιση αυτή, παρότι βρίσκεται ακόμη υπό βελτιστοποίηση, επιτρέπει τη μείωση των προβλημάτων που σχετίζονται με τη χρήση διαβρωτικών υγρών καταλυτών και προσφέρει δυνατότητα ανακύκλωσης του καταλύτη, μειώνοντας το κόστος σε βάθος χρόνου.

Στο επόμενο στάδιο πραγματοποιείται η *αλκοολική ζύμωση*. Η πιο διαδεδομένη αλληλουχία των διαδικασιών είναι η ξεχωριστή υδρόλυση και ζύμωση (**SHF, Separate Hydrolysis and Fermentation**) αρχικά η βιομάζα υφίσταται προκατεργασία (π.χ. ατμοθραύση, οξύ) για απομάκρυνση του λιγνίνης, και στη συνέχεια γίνεται ενζυμική υδρόλυση κυτταρίνης/ημικυτταρίνης σε έναν βιοαντιδραστήρα. Το διάλυμα των παραγόμενων μονοσακχαριτών μεταφέρεται μετά σε ξεχωριστό βιοαντιδραστήρα όπου μικροοργανισμοί (π.χ. ζύμες ή βακτήρια) ζυμώνουν τα σάκχαρα σε αιθανόλη. Το πλεονέκτημα του SHF είναι ότι κάθε στάδιο λειτουργεί σε βέλτιστα για αυτό θρεπτικά ή ενζυμικά επίπεδα θερμοκρασίας και pH (50°C για τις κυτταρινάσες και 30°C για τη ζύμωση), γεγονός που μεγιστοποιεί την αποδοτικότητα ενζυμικής υδρόλυσης και ζύμωσης αντίστοιχα [69]. Ωστόσο, μειονέκτημα του SHF είναι η αναστολή της υδρόλυσης από τη συσσώρευση γλυκόζης και ξυλόζης, που οδηγεί σε μείωση του ρυθμού υδρόλυσης. Επιπλέον, η ξεχωριστή διαχείριση των σακχάρων πεντόζης (π.χ. ξυλόζη) συχνά απαιτεί διπλό σταθμό ζύμωσης ή έξτρα στελέχη μικροοργανισμών για τα πεντοζικά σάκχαρα, αυξάνοντας έτσι τον εξοπλιστικό και λειτουργικό κόστος της διεργασίας [69][73][74].

Ως εναλλακτική προσέγγιση εφαρμόζεται η ταυτόχρονη σακχαροποίηση και ζύμωση (**SSF, Simultaneous Saccharification and Fermentation**), όπου η ενζυμική υδρόλυση του κυτταρίνης και η ζύμωση των σακχάρων γίνονται ταυτόχρονα στον ίδιο αντιδραστήρα. Η ιδέα της SSF ανέκυψε ήδη τη δεκαετία του 1970, όταν παρατηρήθηκε ότι η άμεση μετατροπή των ελευθερωμένων σακχάρων σε αιθανόλη μείωνε το φαινόμενο αναστολής των ενζύμων υδρόλυσης [69]. Έτσι, η SSF τυπικά οδηγεί σε μεγαλύτερες συνολικές αποδόσεις αιθανόλης συγκριτικά με το SHF, επειδή αφαιρείται άμεσα η γλυκόζη και η κελοβιόζη από τη ζύμωση, ελευθερώνοντας τη δράση των κυτταρινάσων. Επιπλέον, η συγχώνευση των δύο σταδίων μειώνει τον απαιτούμενο όγκο αντιδραστήρων και γενικά το επενδυτικό κόστος (υπολογίζεται μείωση κεφαλαίου άνω του 20%). Άλλο πλεονέκτημα της SSF είναι η δυνατότητα μερικής συγκατανάλωσης πεντοζών (όταν αυτές παραμένουν στη στερεή φάση μετά την προκατεργασία) και η ταυτόχρονη αποτοξίνωση του υγρού από ενδιάμεσα τοξικά προϊόντα επεξεργασίας [5]. Ωστόσο, οι βέλτιστες συνθήκες για

κυτταρινάσες (pH4–5, θερμοκρασία 40–50°C) και για τους μικροοργανισμούς ζύμωσης (pH5–6, θερμοκρασία 30°C) διαφέρουν σημαντικά, με αποτέλεσμα η SSF να απαιτεί συμβιβαστικές συνθήκες ή ειδικά ενζυματικά μίγματα [69][79]. Σημειώνεται ότι οι τελευταίες έρευνες επικεντρώνονται στη χρήση θερμοανθεκτικών ή γενετικά τροποποιημένων ζυμών και βακτηρίων που μπορούν να λειτουργούν ικανοποιητικά σε υψηλότερες θερμοκρασίες ή να ζυμώνουν παράλληλα πεντόζες και εξόζες. Με τον τρόπο αυτό επιχειρείται να ξεπεραστεί το σχήμα SSF, ώστε να ενσωματωθεί και η πεντόζη χωρίς πρόσθετο κόστος εξοπλισμού.

Περαιτέρω επέκταση της μεθόδου SSF αποτελεί η ταυτόχρονη σακχαροποίηση και συνεζύμωση (**SSCF, Simultaneous Saccharification and Co-Fermentation**), όπου στο ίδιο στάδιο επιχειρείται να συνυπάρχουν και οι ζύμωση των πεντοζών της ημικυτταρίνης και των εξοζών της κυτταρίνης. Αυτό γίνεται είτε με την ταυτόχρονη χρήση μικτών στελεχών μικροοργανισμών (π.χ. ζύμες που ζυμώνουν εξίσου γλυκόζη και ξυλόζη), είτε με γενετικά τροποποιημένους οργανισμούς *S. cerevisiae* που έχουν ενσωματωμένες διαδρομές μεταβολισμού ξυλόζης. Το βασικό πλεονέκτημα του SSCF είναι η μεγαλύτερη αποδοτικότητα ζύμωσης (χρησιμοποιείται μεγαλύτερο ποσοστό των σακχάρων της βιομάζας), γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε υψηλότερες συνολικές αποδόσεις αιθανόλης [80]. Επιπλέον, διατηρείται η μείωση του χρόνου αντίδρασης σε σχέση με το SHF, επειδή υδρόλυση και ζύμωση συμβαίνουν ταυτόχρονα. Ωστόσο, σημαντικό μειονέκτημα είναι η ανάγκη εξειδικευμένων μικροοργανισμών που να ζυμώνουν αποτελεσματικά και πεντόζες και εξόζες. Στις συμβατικές ζύμες *S. cerevisiae*, για παράδειγμα, η παρουσία υψηλών συγκεντρώσεων γλυκόζης μπορεί να καταστέλλει την ταυτόχρονη ζύμωση της ξυλόζης (καταβολική καταστολή) [80]. Έτσι, πολλές μελέτες χρησιμοποιούν μεταλλακτά στελέχη που εκφράζουν ένζυμα ξυλόζης ή και μικτές καλλιέργειες ζυμών και βακτηρίων για να αποφύγουν το πρόβλημα αυτό. Παράλληλα, όπως και στην SSF, τα διαφορετικά βέλτιστα πεδία λειτουργίας ενζύμων και ζυμών απαιτούν συμβιβασμούς ή λύσεις, π.χ. διαδοχική τροφοδοσία βιομάζας (fed-batch SSCF) για σταθερότερη τροφοδοσία σακχάρων. Συνολικά, οι ερευνητικές προσπάθειες των τελευταίων ετών επιδιώκουν τη βελτιστοποίηση των μικροοργανισμών και των ενζύμων (π.χ. με γενετική μηχανική ή CRISPR/Cas9) ώστε οι διεργασίες SSF/SSCF να προσεγγίζουν τις αποδόσεις των αμυλούχων πρώτων υλών[68].

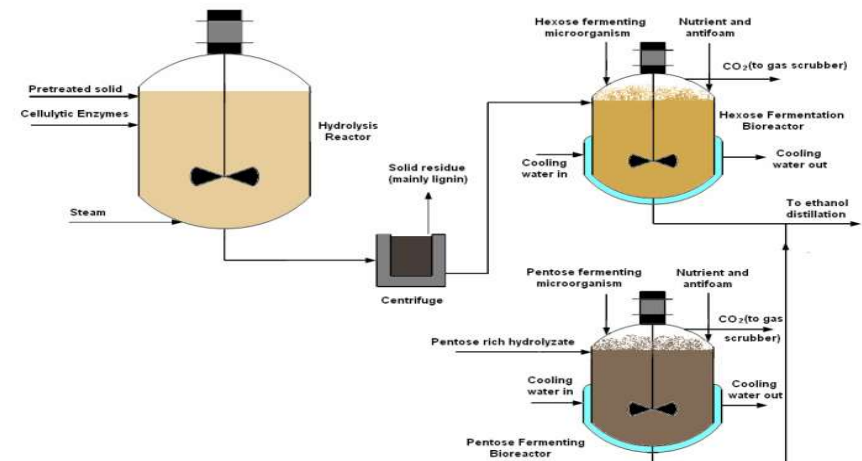
Τέλος, η τεχνική της ενοποιημένης βιοδιεργασίας (**CBP, Consolidated Bioprocessing** ή «**ολοκληρωμένη βιοεπεξεργασία**») υπολογίζεται ως το «ιερό δισκοπότηρο» για την παραγωγή κυτταρινούχου αιθανόλης. Στην CBP ένα μόνο μικροβιακό σύστημα – συνήθως ένας μικροοργανισμός ή πληθυσμός – παράγει τα απαραίτητα υδρολυτικά ένζυμα *in situ* και ταυτόχρονα ζυμώνει τα ελευθερωμένα σάκχαρα σε αιθανόλη. Με αυτόν τον τρόπο καταργείται η ανάγκη προσθήκης εξωγενών ενζύμων, μειώνοντας δραστικά το κόστος παραγωγής [68]. Στην πράξη η CBP αντιμετωπίζει μεγάλες τεχνικές προκλήσεις: κανένας γνωστός οργανισμός δεν συνδυάζει από μόνος του υψηλή υδρολυτική ικανότητα και αποδοτική ζύμωση. Γι' αυτό, έντονες έρευνες επικεντρώνονται στην γενετική μηχανική: π.χ. έχουν χρησιμοποιηθεί εργαλεία CRISPR/Cas9 για την ένταξη πολλαπλών γονιδίων κυτταρινάσης-ημικυτταρινάσης σε στελέχη *S. cerevisiae*, ώστε να πετύχουν παραγωγή ενζύμων και συνεχή μετατροπή βιομάζας σε αιθανόλη. Πρόσφατα στελέχη που έφτασαν να εκφράσουν συνολική δραστηριότητα 95 FPU/g ξηρή ουσία επέτρεψαν την άμεση μετατροπή καθαρής κυτταρίνης σε αιθανόλη, επιτυγχάνοντας προϊόντικότητα 4.5 g/Lt/h [68]. Παρόλα αυτά, τα αποτελέσματα παραμένουν πολύ χαμηλότερα από τα βιομηχανικά πρότυπα: οι επιτευγόμενες συγκεντρώσεις αιθανόλης και οι ρυθμοί παραγωγής είναι ακόμη σε εργαστηριακά επίπεδα και μη εφικτοί εμπορικά. Αντιθέτως, π.χ. βακτηριακές συνεζυμώσεις προσφέρουν υψηλή υδρόλυση αλλά φτωχή αιθανόλη, ενώ τα περισσότερα επιτυχημένα στελέχη ζύμης CBP δίνουν πολύ χαμηλές αποδόσεις. Συνεπώς η CBP ακόμη δεν έχει φτάσει στην κλίμακα της βιομηχανίας, αν και παραμένει στόχος εξελίξεων μέσω συνθετικής βιολογίας, μοριακής βελτίωσης και τεχνολογιών μετάλλαξης (CRISPR) προκειμένου να ενισχυθεί η ενζυμική παραγωγή και η αντοχή των μικροοργανισμών.

Οικονομική σύγκριση μεθόδων

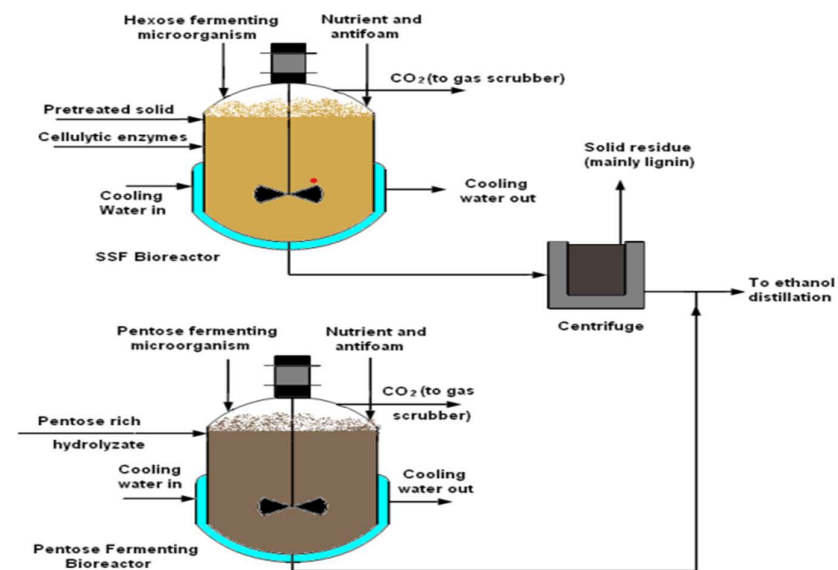
Από οικονομική σκοπιά, οι μελέτες συγκλίνουν στο ότι η SSF προσφέρει ανταγωνιστικό πλεονέκτημα έναντι της SHF, κυρίως λόγω της απλούστερης αρχιτεκτονικής διεργασίας και της μειωμένης ενεργειακής απαίτησης. Ενδεικτικά, το κόστος παραγωγής αιθανόλης εκτιμάται στα \$0,57/Lt για την SSF έναντι \$0,63/Lt για SHF [5]. Η μέθοδος SSCF παρουσιάζει ακόμη καλύτερες προοπτικές, ιδίως όταν χρησιμοποιούνται μεταλλαγμένες ζύμες για ζύμωση πεντοζών, ενώ έχει αναφερθεί μείωση κόστους ενζύμων έως και 40% [80]. Η πιο ριζικά οικονομική λύση προτείνεται από τη μέθοδο CBP, η οποία σε ορισμένα σενάρια υπολογίζεται ότι μπορεί να μειώσει το συνολικό κόστος παραγωγής αιθανόλης έως

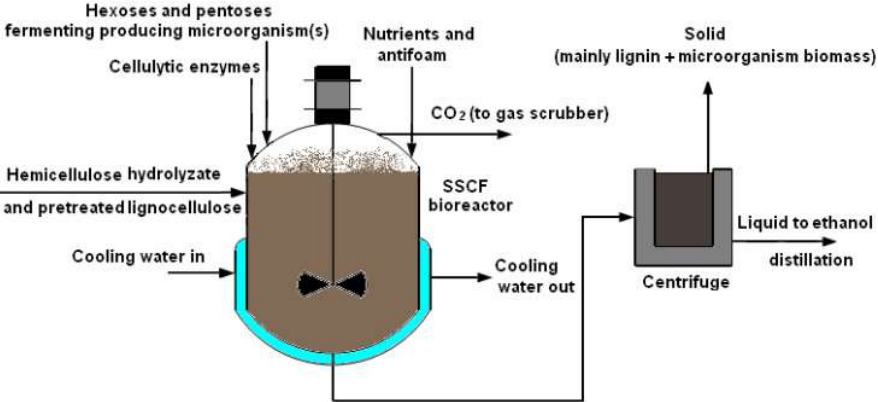
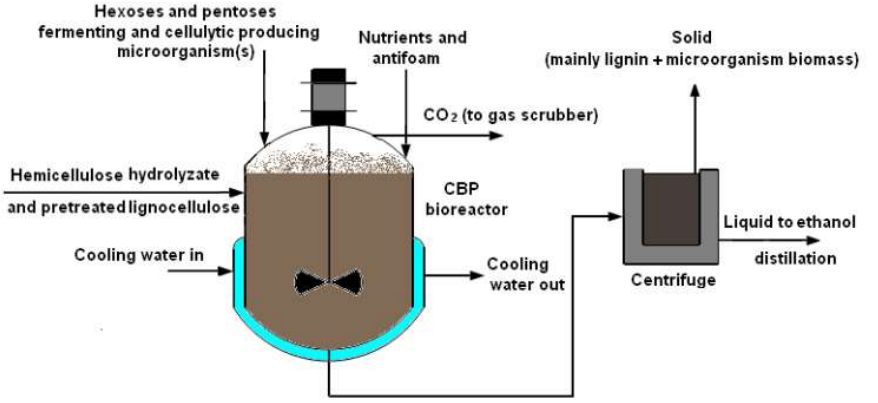
και 25–30%, λόγω της εξάλειψης των σταδίων προ-παραγωγής ενζύμων και χρήσης λιγότερου εξοπλισμού [68]. Ωστόσο, η τεχνική ανωριμότητα των στελεχών CBP και η ανάγκη για σταθερότητα στη μετατροπή παραμένουν βασικά εμπόδια για πλήρη εμπορική εφαρμογή. Συνολικά, η επιλογή της κατάλληλης διεργασίας εξαρτάται από την τεχνολογική ωριμότητα, τη διαθεσιμότητα ενζύμων και μικροοργανισμών, αλλά και από τα τοπικά οικονομικά και ενεργειακά δεδομένα.

Μέθοδος	Περιγραφή	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
SHF Ξεχωριστή Υδρόλυση και Ζύμωση	Η υδρόλυση και η ζύμωση γίνονται σε διαδοχικά στάδια, κάτω από διαφορετικές συνθήκες.	Κάθε στάδιο γίνεται σε βέλτιστες συνθήκες θερμοκρασίας και pH.	Μεγαλύτερη διάρκεια, τελικό κόστος αυξημένο, πιθανή αναστολή ενζύμων από προϊόντα.



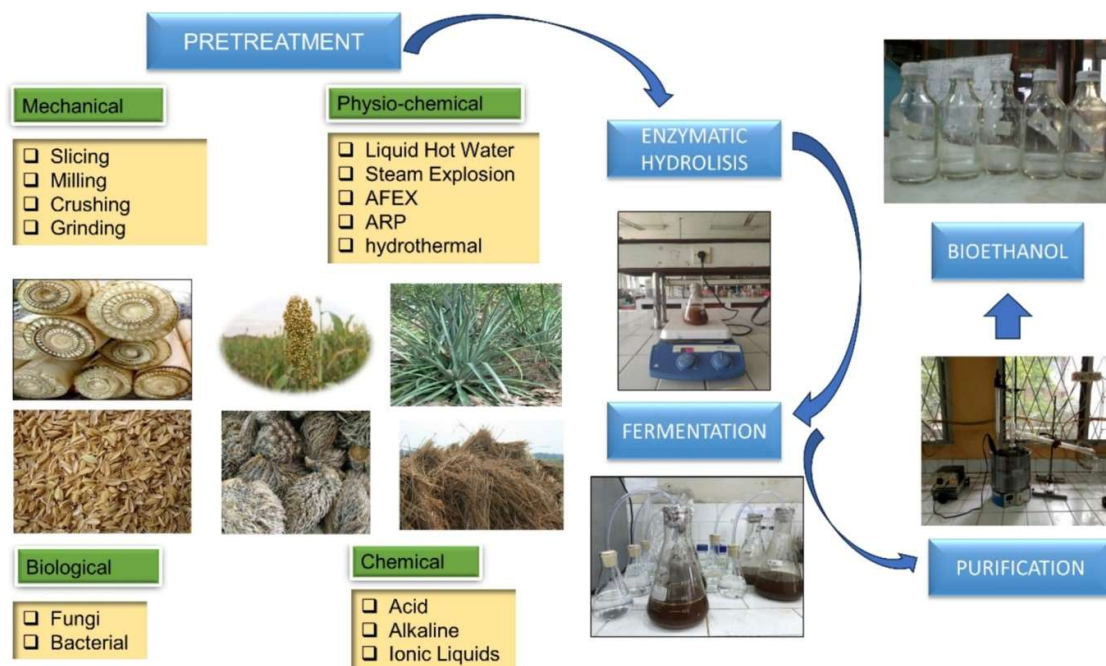
SSF Συγχρόνως Σακχαροποίηση και Ζύμωση	Υδρόλυση και ζύμωση γίνονται ταυτόχρονα στον ίδιο αντιδραστήρα.	Μείωση χρόνου και κόστους, περιορισμός αναστολής ενζύμων από τα σάκχαρα.	Δύσκολη εύρεση κοινών συνθηκών για ένζυμα και μικροοργανισμούς.
---	---	--	---



SSCF Συγχρόνως Σακχαροποίηση & Συνεξύμωση	Ταυτόχρονη διάσπαση κυτταρίνης και ημικυτταρίνης και συνδυασμένη ζύμωση των C6 και C5 σακχάρων.	Αξιοποίηση περισσότερων σακχάρων, αύξηση συνολικής απόδοσης αιθανόλης.	Απαιτεί γενετικά τροποποιημένους μικροοργανισμούς, πιο σύνθετος έλεγχος διεργασίας.	
CBP Ολοκληρωμένη Βιοεπεξεργασία	Όλα τα στάδια (ένζυμα, υδρόλυση, ζύμωση) γίνονται από έναν μικροοργανισμό ή μικτή καλλιέργεια.	Μείωση κόστους κεφαλαίου και λειτουργίας, απλοποίηση διεργασίας.	Σε ερευνητικό στάδιο, απαιτείται σύνθετη γενετική μηχανική.	

Κατά το στάδιο της απόσταξης, στη βιομηχανική παραγωγή κυτταρινούχας αιθανόλης εφαρμόζεται κυρίως συνεχής αποστακτική διύλιση σε διαδοχικές στήλες. Αρχικά η μάζα ζύμωσης (5–10% αιθανόλη) εισέρχεται σε στήλη “beer” (stripping column), όπου το αέριο απόσταγμα περιέχει 35% αιθανόλη (κατά βάρος). Το απόσταγμα αυτό οδηγείται σε δεύτερη στήλη “rectifier” που παράγει διωλισμένη αιθανόλη περίπου 92–95% καθαρότητας. Το μείγμα 95% αιθανόλης – 5% νερού είναι αζεοτροπικό και δεν διαχωρίζεται με απλή απόσταξη [82]. Παραδοσιακά αυτό ξεπερνιόταν με αζεοτροπική απόσταξη προσθέτοντας οργανικούς διαλύτες (π.χ. βενζόλιο ή κυκλοεξάνιο), αλλά σήμερα σπάνια χρησιμοποιούνται λόγω ασφάλειας. Εναλλακτικά έχει προταθεί εξαγωγή με άλατα (π.χ. CaCl_2) ή οργανικά εκλεκτικά διαλύτες, ενώ η καθαρή αφυδάτωση γίνεται πλέον σχεδόν αποκλειστικά με μηχανισμό μοριακών κοσκίων [80][82]. Συγκεκριμένα, σεκύκλωμα μοριακής έλξης (adsorption), ο υπέρθερμος ατμός αιθανόλης από το επάνω μέρος της διορθωτικής στήλης διέρχεται από κλίνες κοσκίων τύπου 3A, όπου το νερό προσροφάται επιλεκτικά και το προϊόν αποστάζει ως >99% καθαρή αιθανόλη [82].

Το στάδιο της αποστάξεως είναι ιδιαίτερα ενεργοβόρο. Συμβατικές διατάξεις δύο στύλων (beer + rectifier) απαιτούν μεγάλους ρυθμούς ατμοπαραγωγής, και παραδοσιακά αποδίδουν συνολική θερμική κατανάλωση περίπου 9–10 MJ ανά λίτρο παραγόμενης αιθανόλης [82]. Για παράδειγμα, σε μελέτη Hussain & Pfromm (2013) το βασικό σενάριο με απλή απόσταξη και μοριακό αφυγραντήρα κατανάλωνε 9.2 MJ/Lt (σε ισοδύναμα φυσικού αερίου), ενώ διάταξη διπλού αποτελέσματος με αλάτων έπεσε στα 8.1 MJ/Lt και με άμεση επανασυμπύεση ατμών ακόμη στα 7.1 MJ/Lt [83]. Οι βελτιώσεις αυτές επιτυγχάνονται με διαδοχική χρήση πολλαπλών εξατμιστών (double/triple effect) και με ενσωμάτωση ανακυκλούμενης θερμότητας. Σε έναν σχεδιασμό του NREL η θερμότητα από τη συμπύκνωση του αναβραστή της στήλης διόρθωσης τροφοδοτεί τριπλό εξατμιστικό κύκλωμα για συμπύκνωση υγρών υπολειμμάτων. Παράλληλα, τα στερεά υπολείμματα (εγκλωβισμένη κυτταρίνη/λιγνίνη) καίγονται σε λεβητοστάσιο για συμπαραγωγή ατμού και ηλεκτρισμού. Στην ίδια μελέτη αναφέρεται ότι το πλεόνασμα ατμού συχνά μετατρέπεται σε ρεύμα για την αυτοκατανάλωση ή πώληση στο δίκτυο [82]. Συμπερασματικά, το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας κατανέμεται στις μονάδες απόσταξης και εξατμισμού, και πρακτικές όπως η κατάλληλη ενορχήστρωση των στηλών με ανακυκλωτήρες ατμού, η χρήση στήλης διπλού αποτελέσματος για το beer και η αξιοποίηση των ατμογενών λαϊπών επιτρέπουν σημαντική μείωση της συνολικής δαπάνης ενέργειας



Εικόνα 9. Σχηματικό διάγραμμα παραγωγής βιοαιθανόλης από προεπεξεργασμένα υλικά [84]

5.1.2. Θερμοχημική διαδικασία παραγωγής

Η κυτταρινούχα βιομάζα μπορεί να μετατραπεί σε αιθανόλη μέσω μιας ακολουθίας θερμοχημικών σταδίων. Σ' αυτή τη διαδρομή, αρχικά η βιομάζα υποβάλλεται σε πυρόλυση ή/και σε αεριοποίηση, παράγοντας συνθετικό αέριο (syngas) – μείγμα κυρίως CO και H₂ – μαζί με επικαθίμενα σωματίδια, πίσσες και CO₂. Το παραγόμενο syngas καθαρίζεται (αφαίρεση σκόνης, πίσσας, ενώσεων S/N/Cl) και στη συνέχεια μετατρέπεται σε αιθανόλη είτε με βακτηριακή ζύμωση είτε με καταλυτική αναγωγή. Στη βιβλιογραφία σημειώνεται ότι απευθείας σύνθεση αιθανόλης από βιομάζα μέσω syngas είναι ελκυστική αλλά απαιτητική διεργασία. Οι τεχνολογικές επιλογές σε κάθε στάδιο (αντιδραστήρες, θερμοκρασίες, αναλογίες αερίων) καθορίζουν τις αποδόσεις και την οικονομική βιωσιμότητα της συνολικής διαδικασίας [84].

Η πυρόλυση διεξάγεται με απουσία οξυγόνου σε θερμοκρασίες περίπου 300–700 °C. Η βιομάζα διασπάται θερμικά σε στερεά (κάρβουνο), υγρά (πυρόλυτα/βιολάδι, πίσσες) και αέρια προϊόντα (CO, H₂, CH₄ κ.ά.). Η αεριοποίηση συνδυάζει μερική καύση ή οξείδωση με ατμό ή αέρα, οδηγώντας σε καύσιμα αέρια. Βασικές αντιδράσεις στην αεριοποίηση είναι:

- $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$
- $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$
- $C + CO_2 \rightarrow 2CO$

Αντίστοιχα, σε γενική μορφή, η βιομάζα οξειδώνεται με O_2 /ατμό παράγοντας CO , H_2 , CO_2 , H_2O και CH_4 . Η τελική σύσταση του syngas εξαρτάται από παράγοντες όπως η θερμοκρασία αεριοποίησης (συνήθως $800\text{--}1000\text{ }^\circ\text{C}$), ο τύπος αντιδραστήρα (π.χ. ρευστοποιημένης κλίνης, στρωτού κρεβατιού, ενσφηνωμένης ροής) και οι αναλογίες των παρεχόμενων αερίων (π.χ. λόγος υδρατμών/βιομάζας ή ισοδύναμο αναλογίας O_2) [78].

Το syngas που παράγεται αποτελείται κυρίως από H_2 και CO , μαζί με CO_2 , CH_4 , N_2 και ίχνη πίσσας ή άλλων υδρογονανθράκων. Η σχέση H_2/CO είναι κρίσιμη: υψηλότερος λόγος συχνά επιτυγχάνεται με χρήση ατμού (steam gasification) ενώ η χρήση αέρα δίνει χαμηλότερη περιεκτικότητα H_2 . Πειραματικά, αυξημένος λόγος υδρατμού προς βιομάζα αυξάνει τα ποσοστά H_2 και CO_2 στο αέριο ενώ μειώνει CO και CH_4 . Ο ακριβής σχεδιασμός του αντιδραστήρα (π.χ. καταλυτική αεριοποίηση με ειδικούς φορείς οξυγόνου) μπορεί να βελτιώσει το H_2 περιεχόμενο, όπως δείχνει η χρήση $Ca\text{--}Fe$ οξειδίων σε αεριοποίηση κινέζικης ρυζόφλουδας [85][78].

Το παραγόμενο syngas περιέχει ρύπους (αιωρούμενα στερεά, πίσσα, ενώσεις θείου/αζώτου, μέταλλα κ.ά.) που πρέπει να αφαιρεθούν πριν τη μετατροπή σε αιθανόλη. Γενικά απαιτείται πολυβάθμια επεξεργασία:

- ο Αρχικός καθαρισμός με κυκλώνες και φίλτρα για απομάκρυνση μεγάλων σωματιδίων και τέφρας. Οι λεπτοί υδρογονάνθρακες-πίσσες διασπώνται με θερμική επεξεργασία ή καταλύτες [86].
- ο Υγρή έκπλυση (scrubbing) του αερίου με νερό ή διαλύτες για απομάκρυνση πίσσας, HCl , NH_3 , H_2S κ.ά. (π.χ. ξέπλυμα με μεθανόλη σε διαδικασία Rectisol) [78][86].
- ο Προσροφητές και καταλυτικοί ρυθμιστές ενεργός άνθρακας ή ZnO δεσμεύουν μέταλλα και ενώσεις θείου, ενώ καταλυτικοί στρωτήρες (π.χ. $CoMo$ -based) προσφέρουν αποθειωποίηση. Εναλλάξιμα συστήματα MDEA ή amine scrubbing σε υψηλή πίεση αφαιρούν CO_2/H_2S σε $>90\%$ [78][87][88].

Ο καθαρισμός του syngas είναι κρίσιμος, η παρουσία πίσσας και ακαθαρσιών σε μη καθαρισμένο syngas καταστέλλει εντελώς την ανάπτυξη μικροοργανισμών, ενώ μετά από επεξεργασία το βακτηριακό στέλεχος (*Clostridium* sp.) αναπτύχθηκε έως και 500 φορές μεγαλύτερο και παρήγαγε αιθανόλη [78]. Ως εκ τούτου, η διατήρηση syngas «σχεδόν καθαρού» κρίνεται απαραίτητη για αποτελεσματική μετατροπή του.

Με την καταλυτική μέθοδο, το καθαρό syngas υφίσταται αναγωγή πάνω σε ειδικούς καταλύτες υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης. Συνηθισμένες διεργασίες περιλαμβάνουν

πολυβηματική μετατροπή: π.χ. αρχικά υδρογόνωση $\text{CO} \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}$ με Cu/ZnO , στη συνέχεια σε DME ή CH_3COOH μέσω όξινων ζεολίθων, και τελικά υδρογόνωση σε αιθανόλη [78]. Πρόσφατα συστήματα τριπλών καταλυτών σε ενιαίο αντιδραστήρα πέτυχαν εκλεκτικότητα έως 90% για μετατροπή syngas σε αιθανόλη [89]. Ωστόσο, οι καταλυτικές διεργασίες απαιτούν υψηλές θερμοκρασίες (350–600 °C) και πιέσεις και ακριβούς μεταλλικούς, οδηγώντας σε μεγάλα ενεργειακά και επενδυτικά κόστη. Για παράδειγμα, σε πειραματικές συνθήκες 350 °C/30 bar η επιλογικότητα σε αιθανόλη ήταν πολύ περιορισμένη (<10% μετατροπή) ακόμη και με Rh-καταλύτη. Στο NREL μοντέλο αεριοποίησης, το καθαρό syngas μετατρέπεται με καταλύτη μολυβδαινίου σε μίγμα αλκοολών (κυρίως αιθανόλη και προπανόλη) [89].

Με τη **μικροβιακή ζύμωση syngas**, εκμεταλλευόμαστε ακτινόβια βακτήρια (acetogens) που χρησιμοποιούν το CO/H_2 ως πηγή C και ηλεκτρονίων μέσω της διαδρομής Wood–Ljungdahl [82]. Κύριοι εκπρόσωποι είναι οι *Clostridium ljungdahlii*, *C. carboxidivorans*, *C. autoethanogenum* κ.ά., οι οποίοι σε ευνοϊκές συνθήκες (ανάερα, 30–37 °C, pH 6) παράγουν αλκοολα (αιθανόλη, βουτανόλη) και οξέα (οξικό κ.ά.). Π.χ. η *C. ljungdahlii* μπορεί να δώσει σημαντική ποσότητα αιθανόλης, ενώ άλλες (όπως *C. carboxidivorans*) παράγουν κυρίως οξικό, μερικώς αναγωγόμενο στη συνέχεια σε αιθανόλη [82]] [91]. Οι αντιδράσεις αυτές λαμβάνουν χώρα σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες και πίεση, μειώνοντας το ενεργειακό κόστος σε σχέση με τα καταλύτες. Παρά ταύτα, η μικροβιακή ζύμωση έχει προκλήσεις: ο ρυθμός αντίδρασης περιορίζεται από τη μαζική μεταφορά αερίων (ειδικά του CO που είναι τοξικό σε υψηλές συγκεντρώσεις) και απαιτεί πολύ καθαρό syngas για να αποφευχθούν τοξίνες. Επίσης, η σύνθεση συχνά παράγει μίγμα προϊόντων (αιθανόλη και οξικό άλας) αναλόγως συνθηκών (π.χ. υψηλότερο H_2/CO τείνει να δίνει περισσότερο αιθανόλη), γεγονός που κάνει αναγκαία συμπληρωματική ανάκτηση/διαχωρισμό προϊόντων [91].

5.2. Μελέτη περιπτώσεων

5.2.1. Μονάδα Crescentino – PROESA, Italy

Η μονάδα Crescentino λειτουργεί σήμερα υπό τη διαχείριση της Versalis (θυγατρική της ENI) και εφαρμόζει την τεχνολογία PROESA. Η τεχνολογία περιλαμβάνει προεπεξεργασία λιγνοκυτταρινούχας βιομάζας με υδροθερμική μέθοδο (smart cooking), ενζυμική υδρόλυση και ζύμωση για παραγωγή αιθανόλης, διαχωρισμό της λιγνίνης για χρήση σε λέβητα, καθώς και αναερόβια χώνευση των ιλύων [92].

Η μέθοδος PROESA είναι μια προηγμένη δεύτερης γενιάς τεχνολογία βιομηχανικής παραγωγής αιθανόλης από λιγνοκυτταρινούχες πρώτες ύλες, όπως γεωργικά υπολείμματα και ενεργειακές καλλιέργειες. Αναπτύχθηκε από την ιταλική εταιρεία Biochemtex (Όμιλος Mossi & Ghisolfi) και τη θυγατρική της Beta Renewables, σε συνεργασία με τη δανέζικη Novozymes για την ενζυμική τεχνολογία. Η έρευνα ξεκίνησε το 2005 και οδήγησε στην πιλοτική μονάδα Rivalta (1 tn/ημέρα) το 2009, βάσει της οποίας σχεδιάστηκε η πρώτη εμπορική μονάδα στην Crescentino της Ιταλίας, που λειτούργησε το 2013. Η μονάδα Crescentino θεωρείται η πρώτη παγκοσμίως ημι-εμπορικής κλίμακας για κυτταρινική αιθανόλη, με δυναμικότητα περίπου 25.000 τόνων αιθανόλης τον χρόνο, χρησιμοποιώντας ως υλικό τροφοδοσίας άχυρο σιτηρών, ρυζιού και το ενεργειακό χόρτο Reed (Arundo donax). Η τεχνολογία PROESA έχει ήδη αποδειχθεί σε βιομηχανική κλίμακα και αδειοδοτείται διεθνώς – εκτός από τη Crescentino, έχει εφαρμοστεί σε εργοστάσιο στη Βραζιλία και προγραμματίζεται σε άλλη μονάδα στη Σλοβακία.[92]

Τα κύρια τεχνικά στάδια της τεχνολογίας Proesa είναι τα παρακάτω όπως παρουσιάζονται από αρχεία της Chemtex Group Global Engineering and Project Solutions [93]:

Προεπεξεργασία βιομάζας (υδροθερμική/steam-explosion): Η λιγνοκυτταρινούχα βιομάζα υποβάλλεται σε θερμομηχανική κατεργασία με κορεσμένο ατμό υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας, χωρίς την προσθήκη χημικών καταλυτών. Σε αυτή τη φάση, επιτυγχάνεται η αποδόμηση της δομής της βιομάζας και ο διαχωρισμός των πολυμερών υδατανθράκων (κυτταρίνη, ημικυτταρίνη) από τη λιγνίνη. Τυπικές συνθήκες μιας τέτοιας υδροθερμικής έκρηξης ατμού είναι θερμοκρασίες τάξης 180–210 °C υπό πίεση (20 bar) για λίγα λεπτά, ακολουθούμενες από απότομη εκτόνωση που διασπά περαιτέρω τη δομή. Η PROESA αξιοποιεί τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου (π.χ. απουσία οξέων/αλκαλίων και

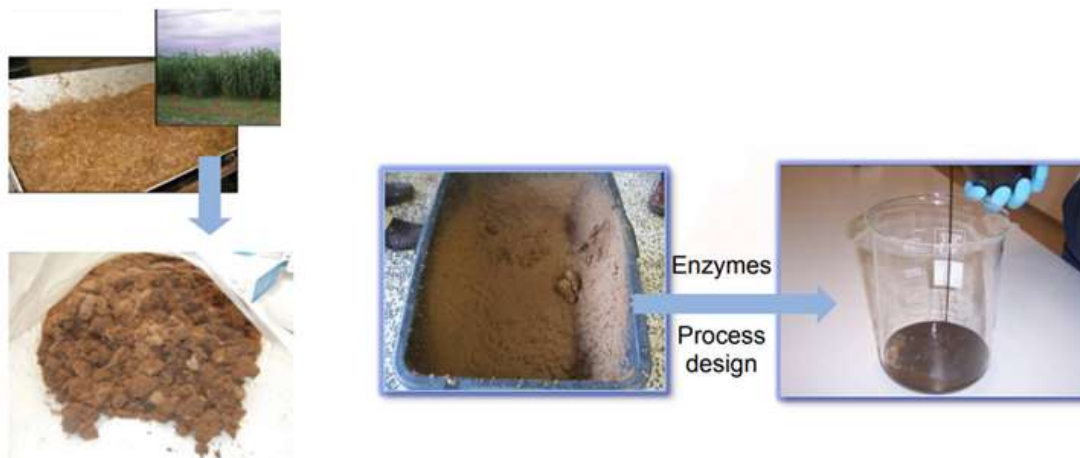
αποδοτική απομάκρυνση της ημικυτταρίνης) ενώ ταυτόχρονα μειώνει τον σχηματισμό αναστολέων που θα επηρέαζαν τα επόμενα στάδια. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό είναι ότι δεν απαιτείται έντονη άλεση του υλικού (μόνο αρχικός τεμαχισμός), γεγονός που απλοποιεί τον εξοπλισμό προεπεξεργασίας. Η προεπεξεργασμένη βιομάζα εξέρχεται ως ένας υγρός πολτός (πολτώδες υλικό) με υψηλή περιεκτικότητα σε στερεά (τυπικά 20% κ.β.) και με πολύ αυξημένη προσβασιμότητα της κυτταρίνης για τα ένζυμα [92][93].

Ενζυμική υδρόλυση (ρευστοποίηση): Ο πολτός της προεπεξεργασμένης βιομάζας υποβάλλεται σε ενζυμική υδρόλυση με εξειδικευμένα κυτταρινολυτικά ένζυμα (παρέχονται από στρατηγικό συνεργάτη όπως η Novozymes) για να διασπαστούν οι πολυσακχαρίτες σε ζυμώσιμα σάκχαρα (μονοσακχαρίτες C5 και C6). Στην PROESA έχει δοθεί έμφαση στη μείωση του ιξώδους του μίγματος μέσω μιας αρχικής ταχείας ρευστοποίησης, η μερική υδρόλυση στην αρχή καθιστά το μίγμα πιο ρευστό και επιτρέπει την εύκολη και συνεχή ροή του προς τους βιοαντιδραστήρες ζύμωσης. Η μοναδική σχεδίαση της διεργασίας και του εξοπλισμού επιτρέπει υδρόλυση σε πολύ υψηλά φορτία στερεών (ξηρά ουσία) με χαμηλό ενεργειακό κόστος ανάδευσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα υψηλές συγκεντρώσεις παραγόμενων σακχάρων και, εντέλει, υψηλή περιεκτικότητα αιθανόλης στο ζυθό μετά τη ζύμωση (αυξάνοντας την αποδοτικότητα της ανάκτησης). Επιπλέον, η αποδοτική προεπεξεργασία μειώνει την απαιτούμενη δόση ενζύμων, συμβάλλοντας σε χαμηλότερο λειτουργικό κόστος [92][93].

Ζύμωση: Τα παραγόμενα ζυμώσιμα σάκχαρα μετατρέπονται σε αιθανόλη μέσω ζύμωσης από επιλεγμένο μικροοργανισμό (συνήθως γενετικά τροποποιημένη μαγιά). Στην τεχνολογία PROESA χρησιμοποιείται ειδικός ζυμομύκτης συμβατός με το ανάμεικτο υπόστρωμα C5/C6, δηλαδή μπορεί να συνζυμώσει τους πεντοζικούς (C5, από την ημικυτταρίνη) και εξοζικούς (C6, από την κυτταρίνη) μονοσακχαρίτες σε ένα στάδιο (SSCF). Η διαδικασία αυτή μεγιστοποιεί την απόδοση μετατροπής όλης της βιομάζας σε αιθανόλη και επιτρέπει υψηλότερες τελικές συγκεντρώσεις αιθανόλης. Η ζύμωση συνήθως πραγματοποιείται σε μεγάλους αναδευόμενους βιοαντιδραστήρες σε θερμοκρασία 30–35 °C. Ο χρησιμοποιούμενος ζυμομύκτης έχει αναπτυχθεί ώστε να αντέχει σε αναστολές που παράγονται φυσικά κατά την προεπεξεργασία, όπως χαμηλές συγκεντρώσεις οξικού οξέος από την αποικοδόμηση της ημικυτταρίνης. Πριν την είσοδο στη φάση ανάκτησης, το

μείγμα μπορεί να υποστεί διαχωρισμό στερεών-υγρών ώστε η στερεή λιγνίνη να απομακρυνθεί από τον ζυθό [92][93].

Ανάκτηση και καθαρισμός αιθανόλης: Η αιθανόλη που παράγεται διαχωρίζεται από το ζυμωμένο μείγμα μέσω απόσταξης και στη συνέχεια αφυδατώνεται (ξηράνση) σε βαθμό καυσίμου με χρήση μοριακών κοσκίνων, ώστε να παραχθεί άνυδρη αιθανόλη υψηλής καθαρότητας. Το υπολειμματικό υγρό (αφυδατωμένη λεπτή υγρή φάση, γνωστή ως stillage) αναμειγνύεται με τα στερεά υπολείμματα. Το κύριο στερεό παραπροϊόν είναι η λιγνίνη, η οποία διαχωρίζεται μετά τη ζύμωση/απόσταξη (ως υγρή πάστα) και αξιοποιείται ενεργειακά. Συγκεκριμένα, η λιγνίνη ξηραίνεται και καίγεται σε λέβητα παραγωγής ατμού και ηλεκτρικής ενέργειας, καθιστώντας το εργοστάσιο ενεργειακά αυτόνομο και με περίσσεια πράσινης ενέργειας προς πώληση στο δίκτυο. Χάρη σε αυτή την ολοκληρωμένη αξιοποίηση, η διαδικασία δεν παράγει υγρά απόβλητα – εφαρμόζεται πλήρης ανακύκλωση νερού και τυχόν οργανικά υπολείμματα υφίστανται αναερόβια χώνευση για παραγωγή βιοαερίου [93].



Εικόνα10. Σταδία παραγωγής[93]

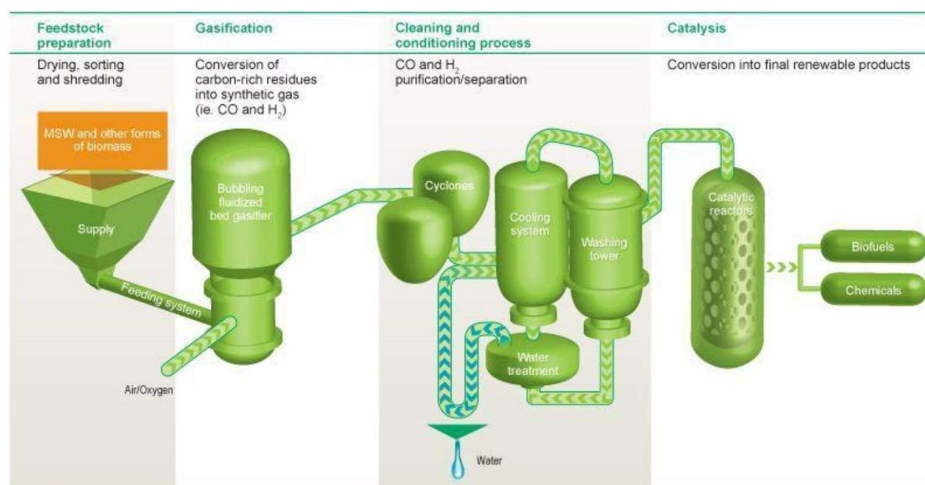
5.2.2. Μονάδα Westbury – Enerkem, Καναδάς

Η Enerkem είναι μια καινοτόμος Καναδική εταιρεία καθαρής τεχνολογίας που εξειδικεύεται στην παραγωγή προηγμένων βιοκαυσίμων και ανανεώσιμων χημικών από μη

ανακυκλώσιμα απορρίμματα [94]. Ιδρύθηκε με όραμα τη μετατροπή απορριμμάτων σε χρήσιμα προϊόντα μέσω καινοτόμων θερμοχημικών διεργασιών, συμβάλλοντας έτσι στη βιώσιμη διαχείριση πόρων και τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου [99].

Μία από τις πιο σημαντικές μονάδες της είναι η πιλοτική/δειγματική εγκατάσταση στο Westbury του Κεμπέκ, η οποία τέθηκε σε λειτουργία σταδιακά από το 2009. Εκεί εφαρμόζεται η ιδιόκτητη τεχνολογία της Enerkem για την αεριοποίηση βιομάζας και αποβλήτων, με σκοπό την παραγωγή μεθανόλης και στη συνέχεια κυτταρινούχας αιθανόλης μέσω καταλυτικών διεργασιών [95]. Η μονάδα Westbury παίζει καθοριστικό ρόλο στην εμπορική επικύρωση της τεχνολογίας της εταιρείας, λειτουργώντας με σύγχρονα αυτοματοποιημένα συστήματα ελέγχου (DCS/SCADA) [94].

Παρακάτω ακολουθεί το διάγραμμα ροής της μονάδας Westbury με τα κύρια στάδια της διεργασίας όπως την προετοιμασία ξυλώδους τροφοδοσίας, αεριοποίηση, καθαρισμός συνθετικού αερίου, καταλυτική σύνθεση σε μεθανόλη και τελική μετατροπή σε αιθανόλη [99]. Η μονάδα είναι πιλοτικής κλίμακας (το πρώτο στάδιο αεριοποίησης λειτουργεί από το 2009, παραγωγή μεθανόλης το 2010 και αιθανόλης το 2012) και σχεδιάστηκε για την πιστοποίηση του κύριου διεργασιακού σχήματος πριν τη μαζική παραγωγή. Τροφοδοτείται από ξύλινα υπολείμματα δασικών εργασιών ως κύρια πρώτη ύλη, συνολικής ισχύος περίπου 48 tn/ημέρα, παράγοντας περίπου 4.000 τόνους αιθανόλης ανά έτος [94].



Εικόνα 10. Στάδια παραγωγής μονάδας Westbury [98]

Διαδικασία παραγωγής

Προετοιμασία τροφοδοσίας: Τα δασικά υπολείμματα εισέρχονται σε σταθμό διαλογής για απομάκρυνση ανακυκλώσιμων και ανόργανων, ακολουθεί τεμαχισμός (κόψιμο σε μικρά κομμάτια) και ξήρανση για μείωση υγρασίας. Το έτοιμο υλικό τροφοδοτείται συνεχώς στο

σύστημα αεριοποίησης [99][96].

Αεριοποίηση (gasification): Σε ελεγχόμενες συνθήκες, η ξηρή βιομάζα τροφοδοτεί έναν ρευστοποιημένο κρεβάτι (bubbling fluidized bed) αεριοποιητή. Εκεί αντιδρά με περιορισμένο οξυγόνο και ατμό σε υψηλές θερμοκρασίες (περίπου 700–900 °C) και πίεση σχεδόν ατμοσφαιρική (16 psi). Η διεργασία αυτή διασπά τους λιγνινοκυτταρινούς δεσμούς, παράγοντας σύνθετο αέριο (syngas) πλούσιο σε CO και H₂. Στόχος είναι η μετατροπή 90–92% του ανθρακούχου υλικού σε syngas, ενώ το υπόλοιπο (8%) παραμένει ως στερεός ενεργειακός κατακρημνισμένος υδαράνθρακας (char) [99].

Καθαρισμός και επεξεργασία σύνθετου αερίου: Το παραγόμενο syngas εξέρχεται από τον αεριοποιητή μαζί με διάφορα στέρεα και πτητικά σωματίδια. Μέσω σειράς εξοπλισμού (κυκλώνων κατακρήμνισης, εναλλακτών θερμότητας, πλυντηρίων με νερό/διαλύματα κ.λπ.) αφαιρούνται οι ξένες προσμίξεις (πίσσα, ταρ, θειούχες ενώσεις, αλκυλίδια κ.ά.). Κατά τη φάση αυτή επιτυγχάνεται παραλλαγή και ρύθμιση της σύστασης του syngas (αναλογία H₂:CO), ενώ ένα μέρος του CO₂ μπορεί να κατακρατηθεί εάν απαιτείται. Ο καθαρισμένος βιοσύνθετος ατμός οδηγείται στη συνέχεια για συμπίεση και μετασχηματισμό [99][96][94].

Καταλυτική σύνθεση σε μεθανόλη: Το καθαρό syngas συμπιέζεται αρχικά σε 250 psi για αφαίρεση CO₂ και στη συνέχεια σε 1.000 psi πριν εισέλθει σε καταλυτικό αντιδραστήρα. Παρουσία τυπικών εμπορικών καταλυτών χαλκού (Cu/ZnO/Al₂O₃), το σύνολο των συστατικών H₂, CO και CO₂ αντιδρά προς παραγωγή ακατέργαστης υγρής μεθανόλης. Η αντίδραση αυτή είναι εξωθερμική η παραγόμενη θερμότητα απομακρύνεται σε ψυκτικό κύκλωμα, ενώ η πρώτη μεθανόλη συλλέγεται για περαιτέρω επεξεργασία. Η ακατέργαστη μεθανόλη υφίσταται ενδιάμεσα καθαρισμό (π.χ. διήθηση, απομάκρυνση νερού) ώστε να καλύπτει προδιαγραφές εμπορικής καθαρότητας (συμμόρφωση με IMPCA spec) [99].

Καταλυτική μετατροπή μεθανόλης σε αιθανόλη: Η μεθανόλη υποβάλλεται σε δεύτερο καταλυτικό σκαλοπάτι μετατροπής. Σύμφωνα με την πατενταρισμένη τεχνολογία της Enerkem, η μεθανόλη και ένα μέρος μονοξειδίου του άνθρακα αντιδρούν πάνω σε εξειδικευμένο καταλύτη για να δώσουν κυρίως μεθυλο-οξικό μεθανόλη (methyl acetate) και ενίοτε οξικό οξύ. Στη συνέχεια, οι εστέρες (όπως το methyl acetate) υδρογονώνονται σε χαμηλές θερμοκρασίες παρουσία καταλυτών (συνήθως ευγενή μέταλλα) και μετατρέπονται

σε αιθανόλη. Η διαδικασία αυτή είναι ουσιαστικά «διπλού σταδίου» (καρβοξυλίωση + υδρογόνωση εστέρα) για τη σύνθεση αιθανόλης από μεθανόλη [99].

Διαχωρισμός προϊόντων και απόσταξη: Το τελικό μίγμα υγρών περιέχει αιθανόλη, υπολείμματα μεθανόλης και ίχνη ακεταλών. Αυτά απομονώνονται μέσω κλασματικής απόσταξης/εκλεκτικής απομάκρυνσης. Η καθαρή αιθανόλη βιοκαυσίμου συλλέγεται, ενώ τυχόν παραπανίσια μεθανόλη ανακυκλώνεται ή αποθηκεύεται. Κατά την απόσταξη αξιοποιείται η υψηλή πτητικότητα αιθανόλης (βρασμό 78°C) για απομάκρυνση νερού και άλλων ένυδρων ενώσεων [99].

Ενεργειακή αξιοποίηση παραπροϊόντων: Ο άνθρακας (char) που προκύπτει σε ποσοστό 8% του εισερχόμενου C, καθώς και βαριά υπολείμματα (πίσσες, αιθάνια) καίγονται εν μέρει στο εσωτερικό της μονάδας, παρέχοντας θερμότητα/ατμό για τη λειτουργία του αεριοποιητή και των αναγεννητών. Επίσης, το πλυντήριο νερού επαναχρησιμοποιεί μέρος του συμπυκνωμένου νερού των αερίων, ενώ οργανικές ουσίες μπορούν να οδηγούνται σε βιολογικό ή σε διάσπαση (DAF) για επεξεργασία υγρών αποβλήτων. Έτσι εκμεταλλεύονται τα παράγωγα (char, αιθάλη, πίσσες) ώστε να βελτιωθεί η ενεργειακή αυτάρκεια της μονάδας. Σύμφωνα με αναλύσεις, τα παραπροϊόντα περιλαμβάνουν επίσης βενζόλιο, τολουόλιο, ξυλένια (BTEx) κ.ά., τα οποία ελέγχονται πριν απαχθούν στο περιβάλλον.

Η διαδικασία της Enkern στη μονάδα Westbury έχει ωριμάσει σε επίπεδο βιομηχανικής επίδειξης (TRL 8–9). Όπως αναφέρεται, η κατασκευή της μονάδας υποστηρίχτηκε από πρόγραμμα ανάπτυξης και έχει δοκιμαστεί πάνω από μια δεκαετία σε πιλοτική κλίμακα (Sherbrooke) και επίδειξη (Westbury). Η λειτουργία της είναι πλήρως αυτοματοποιημένη με σύγχρονα συστήματα ελέγχου διαδικασιών (DCS/SCADA), επιτρέποντας σταθερή και αδιάλειπτη παραγωγή αιθανόλης. Σκοπός της πιλοτικής μονάδας Westbury είναι η επικύρωση του τεχνολογικού σχεδιασμού πριν την πλήρη κλίμακα (όπως στον σχεδιαζόμενο εμπορικό σταθμό στο Edmonton) [94]. Το γεγονός ότι η παραγωγή αιθανόλης στο Westbury αποτελεί «σημαντικό ορόσημο» για την Enkern υπογραμμίζει την ωριμότητα της τεχνολογίας (έχει ήδη πιστοποιηθεί σε εμπορικούς ρυθμούς παραγωγής μεθανόλης, ενώ η μετατροπή σε αιθανόλη βελτιστοποιείται στο Westbury) [94][99].

Όπως αναφέρεται, η κατασκευή της μονάδας υποστηρίχτηκε από πρόγραμμα ανάπτυξης και έχει δοκιμαστεί πάνω από μια δεκαετία σε πιλοτική κλίμακα (Sherbrooke) και επίδειξη (Westbury) [99][96]. Η λειτουργία της είναι πλήρως αυτοματοποιημένη με σύγχρονα συστήματα ελέγχου διαδικασιών (DCS/SCADA), επιτρέποντας σταθερή και αδιάλειπτη παραγωγή αιθανόλης. Σκοπός της πιλοτικής μονάδας Westbury είναι η επικύρωση του τεχνολογικού σχεδιασμού πριν την πλήρη κλίμακα (όπως στον σχεδιαζόμενο εμπορικό σταθμό στο Edmonton) [99]. Το γεγονός ότι η παραγωγή αιθανόλης στο Westbury αποτελεί «σημαντικό ορόσημο» για την Enekcem υπογραμμίζει την ωριμότητα της τεχνολογίας (έχει ήδη πιστοποιηθεί σε εμπορικούς ρυθμούς παραγωγής μεθανόλης, ενώ η μετατροπή σε αιθανόλη βελτιστοποιείται στο Westbury).

5.2.3. Iogen Corporation & Costa Pinto της Raizen

Η Iogen Corporation είναι πρωτοπόρος στην κυτταρινική αιθανόλη με τεχνολογία ενζυματικής υδρόλυσης SHF. Η τεχνολογία της έχει δοκιμαστεί σε πιλοτική μονάδα στο Οτάβα του Καναδά, και κλιμακώθηκε εμπορικά στο εργοστάσιο Costa Pinto της Raizen, με κόστος \$105 εκατ. και παραγωγή 40 εκατ. Lt/έτος [100][103]. Η παραγωγή αιθανόλης από κυτταρινούχα βιομάζα στην τεχνολογία SHF της Iogen περιλαμβάνει τα εξής βασικά στάδια [104]:

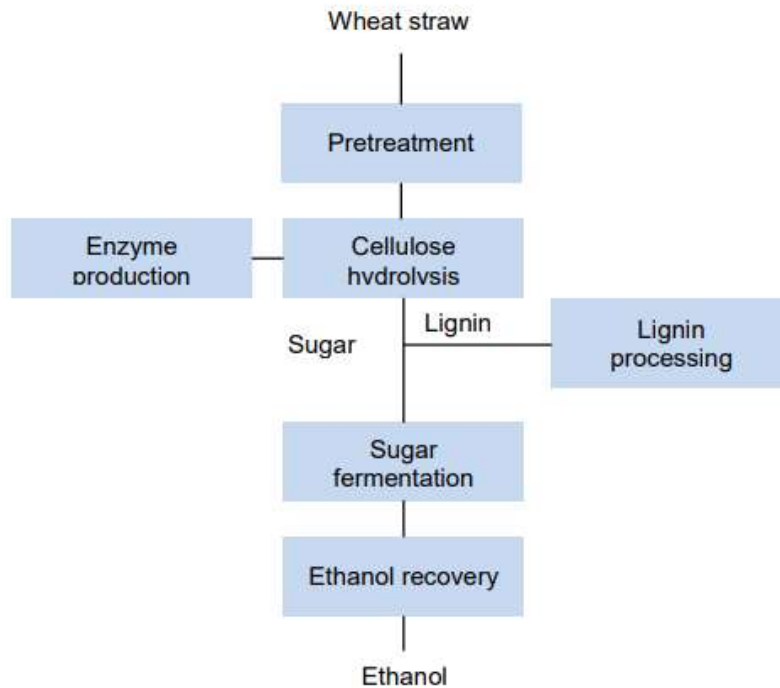
Τροφοδοσία: Χρησιμοποιούνται κυρίως αγροτικά υπολείμματα πλούσια σε κυτταρίνη/ημικυτταρίνη (άχυρα σιταριού, βρώμης, βαμβακιού, φύλλα ζαχαροκάλαμου κ.λπ.).

Προκατεργασία: Τα στελέχη υφίστανται τροποποιημένη εξάτμιση με ατμό (steam explosion) υπό όξινες συνθήκες, με στόχο τη διάσπαση της λιγνίνης και την αυξημένη προσβασιμότητα των πολυσακχαριτών.

Ενζυματική Υδρόλυση: Τα ένζυμα (κυτταρινάσες/ημικυτταρινάσες που παράγει η ίδια η Iogen) υδρολύουν τους πολυσακχαρίτες σε σάκχαρα (γλυκόζη, ξυλόζη). Η Iogen εφαρμόζει πολύ-σταδιακή υδρόλυση με στόχο υψηλή απόδοση.

Ζύμωση: Ακολουθεί ξεχωριστή ζύμωση (SHF): ειδικά μικρόβια (μεταλλαγμένα ζύμες ή *Zymomonas* μετατρέπουν τα εξόζα (C6) και πεντόζα (C5) σάκχαρα σε αιθανόλη. Το εργοστάσιο ελέγχει τις συνθήκες pH και αφαίρεση τοξικών ενώσεων (π.χ. οξικό οξύ) για βέλτιστη ζύμωση [101].

Απόσταξη: Το «μπιρέ» αιθανόλης που προκύπτει αποσταζόμενου βιολογικά διυλίζεται και αφυδατώνεται με συμβατικές διαδικασίες απόσταξης για παραγωγή αιθανόλης καυσίμου υψηλής καθαρότητας.



Εικόνα 11. Διάγραμμα ροής παραγωγής Iogen Corporation

6.Οικονομική Ανάλυση

6.1. Θεωρητικό υπόβαθρο Οικονομικών δεικτών

Στο παρόν κεφάλαιο ορίζονται οι οικονομικές έννοιες που θα χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση της επένδυσης παράγωγης μεγάλης κλίμακας βιοαιθανόλης.

Καθαρή παρούσα αξία – ΚΠΑ

Η Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV) είναι η διαφορά ανάμεσα στην παρούσα αξία των μελλοντικών ταμειακών ροών και το αρχικό κόστος της επένδυσης. Ο τύπος της ΚΠΑ είναι:

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{R_t}{(1+i)^t} - C_0$$

R_t = καθαρή ταμειακή ροή το έτος t

i = προεξοφλητικό επιτόκιο

C_0 = αρχική επένδυση

n = διάρκεια ζωής επένδυσης

$KPA > 0$, το έργο είναι οικονομικά βιώσιμο

$KPA < 0$, η επένδυση δεν μπορεί καλύψει το κόστος

$KPA = 0$, επιλέγεται μόνο ένα δεν υπάρχουν καλύτερες εναλλακτικές.

Η μέθοδος της Καθαρής Παρούσας Αξίας (ΚΠΑ) προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα για την αξιολόγηση επενδύσεων, καθώς επιτρέπει τον ακριβή υπολογισμό της αποδοτικότητας ενός έργου μέσω της προεξόφλησης των ταμειακών ροών με το μέσο σταθμικό κόστος κεφαλαίου, που αντικατοπτρίζει το πραγματικό κόστος χρηματοδότησης. Επιπλέον, μπορεί να ληφθεί υπόψη ο επιχειρηματικός κίνδυνος μέσω της εφαρμογής ενός συντελεστή ασφαλείας στις χρηματοροές, ενισχύοντας έτσι τη ρεαλιστικότητα των προβλέψεων. Ένα ακόμη πλεονέκτημα είναι ότι το τελικό αποτέλεσμα εκφράζεται σε απόλυτες χρηματικές μονάδες, διευκολύνοντας τους επενδυτές στη λήψη αποφάσεων. Ωστόσο, ένα βασικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δυσκολεύει τη σύγκριση επενδυτικών επιλογών όταν αυτές απαιτούν σημαντικά διαφορετικά κεφάλαια εκκίνησης, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένα συμπεράσματα αν δεν αξιολογηθούν και άλλοι δείκτες παράλληλα.

Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης

Ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης (IRR) μιας επένδυσης είναι το επιτόκιο i που μηδενίζει την καθαρή παρούσα αξία (ΚΠΑ) των μελλοντικών ταμειακών ροών.

$$\sum_{t=1}^n \frac{R_t}{(1 + IRR)^t} - C_0 = 0$$

R_t : οι καθαρές ταμειακές εισροές στο έτος t

C_0 : το αρχικό κόστος επένδυσης

n : η διάρκεια ζωής του έργου

$IRR >$ προεξοφλητικό επιτόκιο η επένδυση είναι συμφέρουσα

$IRR <$ προεξοφλητικό επιτόκιο, η επένδυση δεν είναι συμφέρουσα

$IRR =$ προεξοφλητικό επιτόκιο, θεωρείται οριακή περίπτωση

Με τον IRR μπορεί εύκολα να συγκριθεί ο εσωτερικός δείκτης απόδοσης με το κόστος κεφαλαίου, διευκολύνοντας την απόφαση αποδοχής ή απόρριψης του έργου. Επίσης, Δίνει ένα ποσοστιαίο αποτέλεσμα που μπορεί να συγκριθεί εύκολα με άλλους οικονομικούς δείκτες όπως τα επιτόκια αποταμίευσης ή τα επιτόκια δανεισμού.

Μεικτός Δείκτης Αποδοτικότητας (PI)

Ο Μεικτός Δείκτης Αποδοτικότητας (Profitability Index, PI) είναι ένας δείκτης που βοηθά στην αξιολόγηση της οικονομικής αποδοτικότητας μιας επένδυσης. Ορίζεται ως ο λόγος της παρούσας αξίας των μελλοντικών ταμειακών ροών προς το αρχικό κόστος επένδυσης ($PI = PV$ των ταμειακών ροών / Κόστος επένδυσης).

Όταν ο $PI > 1$, η επένδυση είναι αποδοτική, καθώς η παρούσα αξία των εσόδων υπερβαίνει το κόστος. Αντίθετα, $PI < 1$ σημαίνει πως η επένδυση δεν αποδίδει, και όταν $PI = 1$, η επένδυση είναι ουδέτερη, καθώς τα έσοδα ακυρώνουν ακριβώς τα έξοδα – σε αυτήν την περίπτωση, η απόφαση εξαρτάται από άλλους παράγοντες.

Ο PI είναι εξαιρετικά χρήσιμος όταν υπάρχουν περιορισμοί κεφαλαίου, καθώς επιτρέπει τη συσχέτιση αποδοτικότητας με το ύψος του κεφαλαίου που δεσμεύεται, επιτρέποντας συγκρίσεις μεταξύ έργων διαφορετικών μεγεθών. Επιπλέον, επειδή περιλαμβάνει την διαχρονική αξία του χρήματος, προσφέρει πιο ρεαλιστική εκτίμηση συγκριτικά με μεθόδους που το αγνοούν.

$$PI = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{R_t}{(1+i)^t}}{C_0}$$

R_t : καθαρή ταμειακή ροή στο έτος t

i : προεξοφλητικό επιτόκιο

n : διάρκεια ζωής της επένδυσης

C_0 : αρχικό κόστος επένδυσης (συνήθως αρνητική ταμειακή ροή στο έτος 0)

Παρ' όλα αυτά, ο δείκτης έχει και περιορισμούς:

- Δεν αντικατοπτρίζει την απόλυτη χρηματική απόδοση (σε €), γι' αυτό επενδύσεις με υψηλό PI αλλά μικρό μέγεθος μπορεί να εμφανίζονται πιο ελκυστικές από ό,τι πραγματικά είναι.
- Επίσης, όταν συγκρίνονται έργα διαφορετικής κλίμακας, μπορεί να παραπλανηθεί κανείς, καθώς ένας μικρός project με πολύ ψηλό PI όχι απαραίτητα αποφέρει μεγαλύτερο καθαρό όφελος από ένα μεγαλύτερο με λίγο μικρότερο PI.

Ο PI αποτελεί ένα σημαντικό συμπληρωματικό δείκτη στην αξιολόγηση επενδύσεων, ειδικά όταν πρόκειται για επιλογή μεταξύ πολλών έργων με περιορισμένο κεφάλαιο. Ωστόσο, για ολοκληρωμένη ανάλυση, συνιστάται να χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με την Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV) και άλλους δείκτες, όπως η IRR, ώστε να διασφαλίζεται πλήρης εικόνα κόστους και απόδοσης.

Περίοδος Επανάκτησης Κεφαλαίου (Payback Period - PBP)

Η περίοδος επανάκτησης κεφαλαίου μετρά τον χρόνο που απαιτείται ώστε τα συσσωρευμένα καθαρά έσοδα (ταμειακές ροές) μιας επένδυσης να επαναφέρουν το αρχικά επενδεδυμένο κεφάλαιο. Ο τύπος για την περίοδο επανάκτησης, όταν οι ετήσιες καθαρές ταμειακές ροές είναι σταθερές, είναι:

$$PBP = \frac{C_0}{R}$$

C₀: το αρχικό κόστος της επένδυσης

R: η ετήσια καθαρή ταμειακή ροή (αν είναι σταθερή)

Όσο μικρότερη η περίοδος επανάκτησης, τόσο πιο γρήγορα επιστρέφεται το κεφάλαιο στον επενδυτή και τόσο πιο ελκυστική θεωρείται η επένδυση. Επίσης, η μέθοδος δεν λαμβάνει υπόψη τη διαχρονική αξία του χρήματος (εκτός αν χρησιμοποιηθεί η «προεξοφλημένη» περίοδος επανάκτησης), ούτε τα κέρδη που προκύπτουν μετά την περίοδο αποπληρωμής.

Ορισμός CAPEX

Οι κεφαλαιουχικές δαπάνες (CAPEX) αναφέρονται στις δαπάνες που απαιτούνται για την απόκτηση, αναβάθμιση ή κατασκευή πάγιων περιουσιακών στοιχείων που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για μεγάλο χρονικό διάστημα. Στις επενδύσεις αυτές περιλαμβάνονται η αγορά εξοπλισμού, η ανέγερση εγκαταστάσεων, η προμήθεια τεχνολογίας και υποδομών, καθώς και άλλες μεγάλες αρχικές επενδύσεις απαραίτητες για την έναρξη ή επέκταση της παραγωγικής διαδικασίας. Ουσιαστικά, το CAPEX αποτελεί το αρχικό επενδυτικό κόστος που απαιτείται για να καταστεί δυνατή η λειτουργία της επένδυσης.

Ορισμός OPEX

Οι λειτουργικές δαπάνες (OPEX) είναι οι συνεχείς, επαναλαμβανόμενες δαπάνες που απαιτούνται για τη λειτουργία και συντήρηση μιας επιχειρηματικής μονάδας. Σε αυτές περιλαμβάνονται τα κόστη ενέργειας, πρώτων υλών, μισθών, συντήρησης, ασφάλισης, φόρων και λοιπών καθημερινών εξόδων. Σε αντίθεση με το CAPEX, που αφορά μακροχρόνιες επενδύσεις, το OPEX σχετίζεται με τη συνεχιζόμενη καθημερινή λειτουργία της επένδυσης.

6.2. Οικονομική ανάλυση σεναρίων παραγωγής

Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι η συγκριτική τεχνο-οικονομική αξιολόγηση τριών εναλλακτικών σεναρίων επένδυσης για παραγωγή κυτταρινικής βιοαιθανόλης δεύτερης γενιάς εστιάζοντας στην σύγκριση σεναρίων με διαφορετική τεχνολογία. Συγκεκριμένα εξετάζονται τα ακόλουθα τρία σενάρια:

1^ο Σενάριο: Μονάδα παραγωγής αιθανόλης 2ης γενιάς με χρήση γεωργικών υπολειμμάτων με βιοχημική υδρόλυση και ζύμωση – Μέθοδος Proesa –SSCF

2^ο Σενάριο: Μονάδα παραγωγής αιθανόλης μέσω αεριοποίησης δασικών καταλοίπων - Enerkem Technology

3^ο Σενάριο: Παραγωγή κυτταρινικής αιθανόλης με βιοχημική μέθοδο- SHF

6.2.1. Σενάριο 1^ο Βιοχημική διεργασία με υδροθερμική επεξεργασία – PROESA- SSCF

Για την ανάλυση του σεναρίου θα βασιστούμε στα οικονομικά στοιχεία της μονάδας Crescentino στην Ιταλία και της τεχνολογίας PROESA, η οποία αναλύθηκε στο κεφάλαιο 5.2.1.

Επενδυτικό κόστος CAPEX:

Το έργο παραγωγής προηγμένης (2G) βιοαιθανόλης με τεχνολογία PROESA χαρακτηρίζεται από υψηλό αρχικό επενδυτικό κόστος. Το πρώτο εμπορικό εργοστάσιο στο Crescentino η οποία ιδρύθηκε το 2013 απαίτησε κεφαλαιουχική επένδυση περίπου €150 εκατομμυρίων για δυναμικότητα παραγωγής 40.000 τόνων βιοαιθανόλης ετησίως [92][104]. Αυτή η κλίμακα κατέστησε το Crescentino την πρώτη μονάδα βιοαιθανόλης 2G σε εμπορικό επίπεδο παγκοσμίως, αλλά όπως είναι σύνηθες στις κυτταρινούχες βιοδιυλιστήρες, η επένδυση ήταν μεγάλης κλίμακας και υψηλού ρίσκου. Μετά την αρχική υλοποίηση απαιτήθηκαν περαιτέρω επενδύσεις για βελτιστοποίηση και επανεκκίνηση της μονάδας υπό τη Versalis. Συγκεκριμένα, η Versalis απέκτησε το εργοστάσιο το 2018 και δαπάνησε επιπλέον €15 εκατομμύρια για εκσυγχρονισμό και αναβάθμιση, ώστε η παραγωγή να καταστεί εκ νέου λειτουργική το 2020 [105]. Οι πρόσθετες αυτές κεφαλαιουχικές δαπάνες χρηματοδότησαν βελτιώσεις όπως η αναβάθμιση του

λεβητοστασίου βιομάζας, του συστήματος υδάτινης ανακύκλωσης/βιοαερίου και η ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών ενζυματικής παραγωγής. Είναι αξιοσημείωτο ότι το κόστος επένδυσης για μια μονάδα 2G βιοαιθανόλης εξαρτάται από διάφορους παράγοντες (χωρητικότητα, τοποθεσία, είδος πρώτης ύλης, απαιτούμενες υποδομές υποστήριξης κλπ). Για παράδειγμα, μεγαλύτερες μονάδες μπορούν θεωρητικά να επωφεληθούν από οικονομίες κλίμακας, όμως εξακολουθούν να απαιτούν πολύ μεγάλο απόλυτο κεφάλαιο. Τα δεδομένα δείχνουν ότι ανά τόνο ετήσιας ικανότητας παραγωγής, το επενδυτικό κόστος παραμένει υψηλό (της τάξης των χιλιάδων ευρώ ανά τόνο/έτος δυναμικότητας). Στην περίπτωση του Crescentino, το κόστος ανά ετήσιο τόνο παραγωγής ήταν €3.750 [92], ενώ αντίστοιχα μία νεότερη μονάδα 65.000 tn/έτος (π.χ. στη Βραζιλία) ανερχόταν σε επένδυση \$190 εκατ. μόνο για το κύριο εργοστάσιο (χωρίς τις μονάδες ενέργειας). Συνεπώς, επιβεβαιώνεται ότι οι προηγμένες βιοδιωλιστήρες απαιτούν μεγάλη αρχική επένδυση, με την επιτυχία τους να εξαρτάται από σταθερές πολιτικές στήριξης και ικανές χρηματοδοτήσεις λόγω του μακροπρόθεσμου ορίζοντα απόσβεσης [94].

Λειτουργικό κόστος OPEX:

Η λειτουργία μιας μονάδας PROESA 2G αιθανόλης συνοδεύεται από σημαντικές δαπάνες, με κυριότερες συνιστώσες την προμήθεια/διαχείριση βιομάζας και τα ένζυμα για την υδρόλυση. Παρακάτω παρουσιάζονται οι βασικές κατηγορίες του OPEX και οι σχετικές παράμετροι.

Στο Crescentino, για παραγωγή 40 kt/έτος αιθανόλης απαιτούνται περίπου 200.000 τόνοι ξηρής βιομάζας ετησίως από την τοπική αγροτική ζώνη. Αντίστοιχα, η αναλογία μετατροπής βιομάζας-προϊόντος κυμαίνεται γύρω στις 5–6 τόνους ξηρής βιομάζας ανά 1 τόνο βιοαιθανόλης (ανάλογα με τη σύσταση και απόδοση της εκάστοτε πρώτης ύλης). Το κόστος κυμαίνεται από €58,5 έως €73,5 ανά τόνο ξηρής βιομάζας (παραδοτέα στο εργοστάσιο), συμπεριλαμβανομένων μεταφορικών & logistics[107].

Κατά τα πρώτα έτη λειτουργίας, το κόστος των ενζύμων ήταν σημαντικός παράγοντας – ωστόσο η εξέλιξη της βιοτεχνολογίας μείωσε δραστικά το κόστος τους. Ήδη από το 2012, η Novozymes ανακοίνωσε ότι η βελτιστοποίηση των ενζύμων (Cellic CTec2 + HTec2) έριξε το κόστος χρήσης έως \$0,50 ανά γαλόνι αιθανόλης (περίπου €0,11 ανά λίτρο). Μετά την εξαγορά του Crescentino, η Versalis επέλεξε να εσωτερικεύσει την παραγωγή ενζύμων και

απέκτησε πλήρως την τεχνογνωσία, τις πατέντες και τα μικροβιακά στελέχη ενζύμων από την Novozymes ώσπου εγκατέστησε μονάδα παραγωγής ενζύμων επί τόπου στο εργοστάσιο μειώνοντας βιώσιμα το κόστος παραγωγής.

Υπάρχει ενσωματωμένος ατμοηλεκτρικός σταθμός 13 MW [108], που καίει τη λιγνίνη και παράγει ατμό και ρεύμα για το εργοστάσιο. Αυτό καθιστά τη μονάδα ενεργειακά αυτόνομη, ενώ τυχόν περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας διοχετεύεται στο δίκτυο, αποφέροντας πρόσθετο έσοδο μέσω του μηχανισμού “πράσινων πιστοποιητικών” στην Ιταλία. Έτσι, τα κόστη καυσίμων και ηλεκτρισμού μηδενίζονται ή και μετατρέπονται σε καθαρά έσοδα. Επίσης, το εργοστάσιο διαθέτει πλήρες σύστημα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων με αναερόβια χώνευση (παραγωγή βιοαερίου) και 100% ανακύκλωση νερού, πράγμα που μειώνει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα αλλά και τις δαπάνες υδάτινων πόρων. Συνολικά, οι δαπάνες utilities (νερού, ατμού, ρεύματος) είναι ιδιαίτερα χαμηλές σε σύγκριση με ένα συμβατικό χημικό εργοστάσιο αντίστοιχου μεγέθους, χάρη στην έξυπνη ολοκλήρωση του κύκλου ενέργειας και υλών στο biorefinery.

Στην μονάδα αυτή την στιγμή απασχολούνται 130 άτομα και υπάρχουν ακόμα και 200 έμμεσες θέσεις σε υποστηρικτικές υπηρεσίες και την εφοδιαστική αλυσίδα [108]. Το εργατικό κόστος αποτελεί ένα όχι ευκαταφρόνητο μέρος του OPEX, ειδικά στην Ευρώπη όπου το εργατικό είναι ακριβότερο απ’ ό,τι σε χώρες όπως η Βραζιλία. Ωστόσο, λόγω της αυτοματοποιημένης συνεχούς λειτουργίας (24/7) και του μεγάλου μεγέθους, το προσωπικό δεν κλιμακώνεται γραμμικά με την παραγωγική δυναμικότητα – π.χ. μια μεγαλύτερη μονάδα 2G δεν θα απαιτήσει πολλαπλάσιους εργαζόμενους. Στα λοιπά λειτουργικά έξοδα συμπεριλαμβάνονται τα κόστη συντήρησης (το χειρισμό λειαντικών υλικών όπως η βιομάζα προκαλεί φθορές σε εξοπλισμό, π.χ. κοχλίες, μύλους, αντιδραστήρες, άρα απαιτούνται ανταλλακτικά και τακτική συντήρηση), αναλώσιμα χημικά (μικρές ποσότητες θρεπτικών υλικών για ζύμες, καθαριστικά CIP, ένζυμα στην περίπτωση που συμπληρώνονται αγοραστά κ.ά.) και τα γενικά έξοδα διοίκησης.

Όπως έχει δημοσιευθεί από την εταιρία με τα οικονομικά δεδομένα του 2012, το μεταβλητό κόστος παραγωγής ενός λίτρου βιοαιθανόλης ήταν μικρότερο από 1,50 \$/γαλόνι, δηλαδή περίπου 0,40 \$/λίτρο [109].

Υπολογισμός οικονομικών δεικτών:

Καθαρή Παρούσα Αξία

Λαμβάνοντας υπόψη ως μέγιστη ετήσια παραγωγή 25 εκατομμυρίων λίτρων προηγμένης βιοαιθανόλης, εξετάζεται η οικονομική βιωσιμότητα υπό τις τρέχουσες τιμές αγοράς. Με τιμή πώλησης €0,60/Lt και λειτουργικό κόστος €0,40/Lt, τα ετήσια έσοδα ανέρχονται σε €15 εκατομμύρια, ενώ τα λειτουργικά έξοδα φθάνουν τα €10 εκατομμύρια, οδηγώντας σε μικτό λειτουργικό κέρδος της τάξης των €5 εκατομμυρίων ετησίως. Υπό την παραδοχή επενδυτικού κόστους (CAPEX) ύψους €150 εκατομμυρίων και προεξοφλητικού επιτοκίου 8%, η ΚΠΑ για ορίζοντα 20 ετών υπολογίζεται αρνητική (€100.9 εκατομμύρια), καταδεικνύοντας ότι το έργο δεν επιτυγχάνει αποπληρωμή του αρχικού κεφαλαίου υπό αυτές τις συνθήκες. Η απόκλιση αυτή υποδηλώνει ότι, χωρίς πρόσθετη πολιτική ή εμπορική ενίσχυση (όπως υψηλότερη τιμή προϊόντος, φορολογικά κίνητρα, έσοδα από πράσινα πιστοποιητικά ή carbon credits), το έργο παρουσιάζει περιορισμένη ελκυστικότητα.

$$\text{ΚΠΑ} = \sum_{t=1}^{n=20} \left(\frac{5.000.000}{(1+0,08)^t} \right) - 150.000.000 = -100.909.263\text{€}$$

Εσωτερικός Βαθμός απόδοσης

Υποθέτοντας αρχικό επενδυτικό κόστος (CAPEX) ύψους €150 εκατομμυρίων και σταθερές καθαρές ετήσιες ταμειακές ροές ύψους €5 εκατομμυρίων για διάστημα 20 ετών, ο IRR προκύπτει αρνητικός, ίσος με -3,59%. Αυτό σημαίνει ότι, με τις παρούσες οικονομικές παραμέτρους (τιμή πώλησης €0,60/Lt και OPEX €0,40/Lt). Απαιτείται είτε αύξηση των καθαρών ροών, μέσω καλύτερης τιμής προϊόντος ή χαμηλότερου κόστους λειτουργίας, είτε ενίσχυση με επιδοτήσεις ή άλλες πολιτικές στήριξης.

$$0 = -150.000.000 + \sum_{t=1}^{n=20} \frac{5.000.000}{(1+r)^t}$$

$$\text{IRR} \approx -3,59$$

Μεικτός Δείκτης Αποδοτικότητας

Για την περίπτωση της μονάδας παραγωγής προηγμένης βιοαιθανόλης με τεχνολογία PROESA υπολογίζεται η παρούσα αξία των ροών 49.090.737€, άρα:

$$PI = \frac{\text{σημερινή αξία ροών}}{\text{Αρχική επένδυση}} = \frac{49.090.737}{150.000.000} = 0,33\text{€}$$

Η τιμή αυτή υποδηλώνει ότι για κάθε €1 επενδυμένου κεφαλαίου, επιστρέφονται μόλις €0,33 σε παρούσα αξία. Επομένως, το έργο θεωρείται οικονομικά μη ελκυστικό, αφού ισχύει ότι για $PI < 1$ απορρίπτεται η αίτηση.

Περίοδος Απόσβεσης & Επανάκτησης Κεφαλαίου (Payback Period)

Στο σενάριο της μονάδας παραγωγής προηγμένης βιοαιθανόλης, με αρχικό επενδυτικό κόστος €150 εκατομμύρια και σταθερές ετήσιες καθαρές ροές €5 εκατομμύρια, η περίοδος απόσβεσης προκύπτει ότι το έργο θα χρειαστεί 30 χρόνια για να αποπληρώσει πλήρως την αρχική του επένδυση, χωρίς να συνυπολογίζονται επιτόκια ή προεξοφλήσεις (απλή λογιστική μέθοδος). Εφόσον ο επενδυτικός ορίζοντας που εξετάζεται είναι 20 έτη, η επένδυση δεν αποσβένεται εντός του κύκλου ζωής της.

$$\frac{150.000.000}{5.000.000} = PBP = 30 \text{ έτη}$$

Συνοπτικά για το σενάριο 1:

Σύμβολο	Περιγραφή	Τιμές
Co	Αρχικό κόστος επένδυσης	€150.000.000
Rt	Ετήσια καθαρή ταμειακή ροή	€5.000.000
r	Προεξοφλητικό επιτόκιο	0,08
n	Ορίζοντας αξιολόγησης επένδυσης	20 έτη
ΚΠΑ	Καθαρή Παρούσα Αξία	-€100.909.263
IRR	Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης	-3,59%
PI	Δείκτης Αποδοτικότητας	0,33
PBP	Περίοδος Απόσβεσης	30 έτη

6.2.2. Σενάριο 2° Θερμοχημική επεξεργασία και αεριοποίηση

Το 2ο σενάριο αναλύεται με βάση την τεχνολογία και τα λειτουργικά δεδομένα της канаδικής εταιρείας Enerkem, και ειδικότερα της πιλοτικής μονάδας επίδειξης που λειτουργεί στο Westbury, Κεμπέκ.

Επενδυτικό Κόστος (CAPEX):

Σύμφωνα με την SEC Form F-1 της Enerkem, το συνολικό κεφαλαιουχικό κόστος για τη μονάδα Westbury προέρχεται κυρίως από τις αγορές εξοπλισμού στις αρχικές φάσεις κατασκευής. Συγκεκριμένα, το 2008 πραγματοποιήθηκαν αγορές εξοπλισμού \$9,6 εκατ. και το 2009 επιπλέον αγορές \$6,9 εκατ. για τον ίδιο σκοπό. Συνολικά, οι επενδύσεις σε εξοπλισμό για τη μονάδα Westbury το 2008–2009 ανήλθαν σε περίπου \$16,5 εκατ.. (Σημειώνεται ότι επιπλέον κεφάλαια συγκεντρώθηκαν με δάνειο \$1,0 εκατ. από την Multi-Mécanique du Bâtiment για τη χρηματοδότηση κατασκευής και εξοπλισμού Westbury. Το συνολικό κεφαλαιουχικό κόστος (CAPEX) για τη μονάδα Westbury της Enerkem ανήλθε σε περίπου €11,9 εκατ., σύμφωνα με τα επίσημα οικονομικά στοιχεία της εταιρείας έως το 2011 [97].

Λειτουργικό Κόστος (OPEX):

Κατά την ανάλυση του λειτουργικού κόστους της μονάδας Westbury, η κατανομή των εξόδων αποτυπώνει ξεκάθαρα ότι οι κύριες επιβαρύνσεις σχετίζονται με την ενέργεια, τα λειτουργικά φορτία και το ανθρώπινο δυναμικό. Η μονάδα λειτουργεί καθημερινά με σταθερή παροχή πρώτης ύλης (48 τόνοι/ημέρα) και απαιτεί συνεχή παροχή θερμότητας και ατμού, γεγονός που επιβαρύνει το ενεργειακό κόστος σε σταθερή βάση [110]. Σημαντικό μέρος της ενέργειας καταναλώνεται για την παραγωγή και διατήρηση θερμοκρασιών στη μονάδα αεριοποίησης, την ξήρανση των πρώτων υλών και τις απαιτήσεις συμπίεσης στις φάσεις σύνθεσης. Αυτές οι ανάγκες καλύπτονται είτε από εσωτερικά παραγόμενη θερμότητα καύση παραπροϊόντων όπως το char, είτε από εξωτερική παροχή ηλεκτρικής ενέργειας και καυσίμων, με αποτέλεσμα το ενεργειακό σκέλος να αποτελεί ένα από τα πιο σταθερά και βαριά στοιχεία του ετήσιου OPEX.

Πέρα από την ενέργεια, καθοριστικό ρόλο παίζει το κόστος εργασίας. Αν και η μονάδα είναι πλήρως αυτοματοποιημένη μέσω συστημάτων SCADA/DCS, απαιτείται παρουσία εξειδικευμένου προσωπικού για τη λειτουργία, τη συντήρηση και την εποπτεία των διεργασιών. Το κόστος ανθρώπινου δυναμικού καλύπτει τεχνικό προσωπικό βάρδιας, χημικούς μηχανικούς, προσωπικό συντήρησης και διοικητική υποστήριξη, με τις σχετικές

δαπάνες να είναι αυξημένες λόγω της ειδικής τεχνογνωσίας που απαιτείται. Επιπλέον, υπάρχει σταθερό κόστος από προμήθειες χημικών και καταλυτών που χρησιμοποιούνται περιοδικά, καθώς και έξοδα συντήρησης του εξοπλισμού, τα οποία αθροιστικά αυξάνουν τις λειτουργικές δαπάνες. Συνολικά, το λειτουργικό κόστος της μονάδας, όπως καταγράφεται και στην οικονομική αναφορά του SEC για το 2011, αγγίζει τα €2,11 εκατ. ετησίως, εκ των οποίων τα €1,8 εκατ. αφορούν καθαρά έξοδα λειτουργίας (χωρίς αποσβέσεις) [97]. Αυτό το ποσό αντικατοπτρίζει μια σταθερή κατανομή μεταξύ ενεργειακού κόστους, κόστους εργασίας και λειτουργικής υποστήριξης (αναλώσιμα, συντήρηση, τεχνικές υπηρεσίες), με το ενεργειακό σκέλος να είναι διαχρονικά το πλέον κρίσιμο σε μονάδες αυτού του τύπου.

Ανάλυση οικονομικών δεικτών

ΚΠΑ

Η αξιολόγηση της οικονομικής βιωσιμότητας του Σεναρίου 2 βασίζεται στη μέγιστη δυναμικότητα της πιλοτικής μονάδας Westbury της Enerkem, η οποία ανέρχεται σε 5 εκατομμύρια λίτρα προηγμένης βιοαιθανόλης ετησίως. Με τιμή πώλησης €0,60/Lt και συνολικό λειτουργικό κόστος €1,8 εκατομμύρια ετησίως, τα ετήσια έσοδα φθάνουν τα €3 εκατομμύρια, ενώ οι καθαρές ταμειακές ροές ανέρχονται σε €1,2 εκατομμύρια ετησίως. Υπό την παραδοχή επενδυτικού κόστους (CAPEX) ύψους €11,9 εκατομμυρίων και προεξοφλητικού επιτοκίου 8%, η ΚΠΑ για ορίζοντα 20 ετών υπολογίζεται αρνητική, στα – €453.430. Το αποτέλεσμα αυτό καταδεικνύει ότι υπό τις παρούσες οικονομικές παραμέτρους, η επένδυση δεν αποπληρώνει πλήρως το αρχικό κεφάλαιο, χωρίς πρόσθετα έσοδα ή πολιτική ενίσχυση. Ωστόσο, η μικρή απόκλιση από το σημείο εξισορρόπησης δείχνει ότι με στοχευόμενες παρεμβάσεις σε λειτουργικό κόστος ή μέσω μηχανισμών στήριξης (π.χ. carbon credits), η επένδυση μπορεί να καταστεί βιώσιμη.

$$ΚΠΑ = \sum_{t=1}^{n=20} \left(\frac{1.200.000}{(1+0,08)^t} \right) - 11.900.000 = -€453.430$$

Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης

Λαμβάνοντας υπόψη το αρχικό επενδυτικό κόστος ύψους €11,9 εκατομμυρίων και σταθερές καθαρές ταμειακές ροές €1,2 εκατομμυρίων για διάστημα 20 ετών, ο IRR προκύπτει οριακά χαμηλότερος του προεξοφλητικού επιτοκίου, ίσος με 7,66%. Η τιμή αυτή

υποδηλώνει ότι το έργο δεν είναι αποδεκτό υπό τις παρούσες οικονομικές παραμέτρους, αφού για $IRR < r$ η καθαρή παρούσα αξία είναι αρνητική. Ωστόσο, η μικρή διαφορά δείχνει ότι με βελτιώσεις στην αποδοτικότητα, το κόστος λειτουργίας ή την εμπορική τιμή, ο IRR δύναται να υπερβεί το όριο αποδοχής.

$$0 = -11.900.000 + \sum_{t=1}^{n=20} \frac{1.200.000}{(1+r)^t}$$

$IRR \approx 7,66\%$

Μεικτός Δείκτης Αποδοτικότητας

Για τη συγκεκριμένη μονάδα θερμοχημικής μετατροπής, η παρούσα αξία των ταμειακών ροών υπολογίζεται στις €11.446.570. Ως εκ τούτου, ο Δείκτης Αποδοτικότητας υπολογίζεται σε 0,96. Η τιμή αυτή δηλώνει ότι για κάθε €1 επενδυόμενου κεφαλαίου επιστρέφονται €0,96 σε παρούσα αξία, τιμή μικρότερη της μονάδας, η οποία δεν ικανοποιεί το επενδυτικό κριτήριο $PI \geq 1$. Επομένως, το έργο απορρίπτεται οριακά από πλευράς αποδοτικότητας, με την ένδειξη ότι η επίτευξη θετικού PI είναι εφικτή με μικρές βελτιστοποιήσεις.

$$PI = \frac{\text{σημερινή αξία ροών}}{\text{αρχική επένδυση}} = \frac{11.446.570}{11.900.000} = 0,96\text{€}$$

Περίοδος Απόσβεσης & Επανάκτησης Κεφαλαίου (Payback Period)

Στο συγκεκριμένο σενάριο, το αρχικό επενδυτικό κόστος των €11,9 εκατομμυρίων συγκρίνεται με σταθερές ετήσιες καθαρές ταμειακές ροές ύψους €1,2 εκατομμυρίων. Κατά συνέπεια, η περίοδος απόσβεσης, χωρίς προεξόφληση, ανέρχεται σε περίπου 9,9 έτη. Το χρονικό αυτό διάστημα βρίσκεται εντός του εξεταζόμενου επενδυτικού ορίζοντα των 20 ετών, γεγονός που καθιστά το έργο δυνητικά αποδεκτό με βάση την απλή λογιστική μέθοδο. Παρ' όλα αυτά, όταν ληφθεί υπόψη η προεξόφληση των ταμειακών ροών, η επένδυση παρουσιάζει καθυστέρηση στην πλήρη ανάκτηση κεφαλαίου, στοιχείο που περιορίζει την οικονομική της ελκυστικότητα χωρίς πρόσθετη ενίσχυση.

$$\frac{11.900.000}{1.200.000} = PBP = 9,9 \text{ \textit{\textepsilon}\textit{t}\textit{h}}$$

Συνοπτικά για το Σενάριο 2:

Σύμβολο	Περιγραφή	Τιμές
C ₀	Αρχικό κόστος επένδυσης	€11.900.000
R _t	Ετήσια καθαρή ταμειακή ροή	€1.200.000
R	Προεξοφλητικό επιτόκιο	0,08
n	Ορίζοντας αξιολόγησης επένδυσης	20 \textit{\textepsilon}\textit{t}\textit{h}
ΚΠΑ	Καθαρή Παρούσα Αξία	-€453.430
IRR	Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης	7,66%
PI	Δείκτης Αποδοτικότητας	0,96
PBP	Περίοδος Απόσβεσης	9,9 \textit{\textepsilon}\textit{t}\textit{h}

6.2.3. Σενάριο 3^ο Βιοχημική μέθοδος SHF

Ανάλυση Κεφαλαιουχικού Κόστους (CAPEX)

Η τεχνολογία παραγωγής κυτταρινικής αιθανόλης με διαχωρισμένη υδρόλυση και ζύμωση SHF, όπως αναπτύχθηκε από την Iogen Corporation, απαιτεί σημαντικές υποδομές και εξειδικευμένο εξοπλισμό, γεγονός που καθιστά το αρχικό κόστος επένδυσης (CAPEX) ιδιαίτερα υψηλό. Σύμφωνα με δημόσια διαθέσιμα στοιχεία της εταιρείας, η πιλοτική μονάδα στο Οτάβα και η μετέπειτα εμπορική εφαρμογή της τεχνολογίας σε συνεργασία με τη Raízen (Βραζιλία) υποδεικνύουν ένα κόστος κατασκευής της τάξεως των 105 εκατομμυρίων δολαρίων ΗΠΑ για ετήσια παραγωγή 40 εκατομμυρίων λίτρων αιθανόλης. Με βάση αυτά τα δεδομένα, το συνολικό CAPEX εκτιμάται στα 150 εκατομμύρια ευρώ για μια αντίστοιχη μονάδα [111]. Η τεχνολογία SHF παρουσιάζει αυξημένες απαιτήσεις σε εξοπλισμό λόγω του διαχωρισμού της ενζυματικής υδρόλυσης από τη ζύμωση, γεγονός που αυξάνει το κόστος κατασκευής σε σύγκριση με την τεχνολογία SSF κατά περίπου 15%[112].

Λειτουργικό κόστος (OPEX)

Η μονάδα Costa Pinto της Raízen διαθέτει ημερήσια δυναμικότητα επεξεργασίας περίπου 24.000 τόνων ζαχαροκάλαμου, με ετήσια παραγωγή που υπερβαίνει τα 82 εκατομμύρια λίτρα βιοαιθανόλης, εκ των οποίων 40 εκατομμύρια λίτρα αφορούν κυτταρινική αιθανόλη δεύτερης γενιάς. Το βασικό παράγοντα δαπάνης στην τεχνολογία ξεχωριστής υδρόλυσης και ζύμωσης (SHF). Το κόστος αυτό εκτιμάται μεταξύ 0,08–0,12 ευρώ ανά λίτρο παραγόμενης αιθανόλης. Επιπλέον, τα κόστη ενέργειας, μεταφοράς και χειρισμού της λιγνοκυτταρινούχας βιομάζας, καθώς και η συντήρηση του εξοπλισμού, διαμορφώνονται συνολικά σε 0,28–0,32 ευρώ ανά λίτρο προϊόντος. Σύμφωνα με εκτιμήσεις της ίδιας της Raízen, το συνολικό λειτουργικό κόστος παραγωγής κυτταρινικής αιθανόλης ανέρχεται σε περίπου 400–450 R\$/m³, που αντιστοιχεί σε 75–85 ευρώ ανά κυβικό μέτρο (ή 0,075–0,085 €/λίτρο). Με βάση τις τιμές αυτές και εάν η μονάδα λειτουργεί στη μέγιστη δυναμικότητά της (82 εκατομμύρια λίτρα ετησίως), το συνολικό ετήσιο OPEX εκτιμάται στα €7 εκατ., επιβεβαιώνοντας τη βιωσιμότητα της διαδικασίας υπό ενοϊκές βιομηχανικές συνθήκες [112].

Αξίζει να σημειωθεί ότι η τεχνολογία SHF, αν και ώριμη και αποδοτική, συνοδεύεται από αυξημένο λειτουργικό κόστος σε σύγκριση με άλλες μεθόδους, όπως η ταυτόχρονη σακχαροποίηση και ζύμωση (SSF), κυρίως λόγω της υψηλής κατανάλωσης ενζύμων και της μεγαλύτερης τεχνικής πολυπλοκότητας της διαδικασίας.

Ανάλυση Οικονομικών Δεικτών

ΚΠΑ

Η οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης στη μονάδα Costa Pinto βασίζεται στη μέγιστη δυναμικότητα των 82 εκατομμυρίων λίτρων βιοαιθανόλης ετησίως. Υπό την παραδοχή τιμής πώλησης €0,60/λίτρο, τα ετήσια έσοδα ανέρχονται σε €49,2 εκατομμύρια, ενώ το ετήσιο λειτουργικό κόστος (OPEX) εκτιμάται σε €7 εκατομμύρια. Οι καθαρές ταμειακές ροές επομένως διαμορφώνονται σε €42,2 εκατομμύρια ετησίως. Με αρχικό επενδυτικό κόστος (CAPEX) €150 εκατομμύρια και προεξοφλητικό επιτόκιο 8%, η Καθαρή Παρούσα Αξία (ΚΠΑ) για επενδυτικό ορίζοντα 20 ετών υπολογίζεται ως:

$$\text{ΚΠΑ} = \sum_{t=1}^{n=20} \left(\frac{42.200.000}{(1+0,08)^t} \right) - 150.000.000 = +264.381.820$$

Το αποτέλεσμα αυτό δείχνει ότι η επένδυση είναι ιδιαίτερα ελκυστική, καθώς η ΚΠΑ είναι σημαντικά θετική, και το αρχικό κεφάλαιο όχι μόνο αποπληρώνεται, αλλά προσφέρει υψηλή καθαρή αξία σε παρούσες τιμές.

Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (IRR)

Με αρχική επένδυση €150 εκατομμυρίων και σταθερές ετήσιες καθαρές ταμειακές ροές €42,2 εκατομμυρίων για 20 χρόνια, ο Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (IRR) υπολογίζεται ως εξής:

$$0 = -150.000.000 + \sum_{t=1}^{n=20} \frac{42.200.000}{(1+r)^t}$$

$$IRR \approx 25,6\%$$

Η τιμή αυτή υπερβαίνει κατά πολύ το προεξοφλητικό επιτόκιο (8%), επιβεβαιώνοντας την υψηλή επενδυτική απόδοση και τη βιωσιμότητα του έργου χωρίς ανάγκη επιδοτήσεων.

Δείκτης Αποδοτικότητας (PI)

Η παρούσα αξία των μελλοντικών καθαρών ροών (PV) υπολογίζεται περίπου σε:

$$PV \approx €341.457.000$$

Ο Δείκτης Αποδοτικότητας (PI) προκύπτει ως:

$$PI = \frac{\text{σημερινή αξία ροών}}{\text{αρχική επένδυση}} = \frac{341.457.000}{150.000.000} = 2,28€$$

Η τιμή αυτή δείχνει ότι για κάθε €1 επενδύόμενο, επιστρέφονται €2,28, γεγονός που κατατάσσει την επένδυση στις ιδιαίτερα αποδοτικές.

Περίοδος Απόσβεσης (Payback Period – PBP)

Με καθαρές ταμειακές ροές €42,2 εκατομμυρίων και επένδυση €150 εκατ., η λογιστική περίοδος απόσβεσης (χωρίς προεξόφληση) είναι:

$$\frac{150.000.000}{42.200.000} = PBP = 3,6 \text{ έτη}$$

Η πραγματική απόσβεση με προεξόφληση λαμβάνει χώρα λίγο μετά τον 4ο χρόνο, διατηρώντας την επένδυση εντός αποδεκτού χρονικού ορίζοντα απόσβεσης για ενεργειακά έργα μεγάλης κλίμακας.

Συνοπτικά για τη μονάδα Costa Pinto:

Σύμβολο	Περιγραφή	Τιμές
C_0	Αρχικό κόστος επένδυσης	€150.000.000
R_t	Ετήσια καθαρή ταμειακή ροή	€42.200.000
R	Προεξοφλητικό επιτόκιο	0,08
N	Ορίζοντας αξιολόγησης επένδυσης	20 έτη
ΚΠΑ	Καθαρή Παρούσα Αξία	+€191.457.000
IRR	Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης	25,6%
PI	Δείκτης Αποδοτικότητας	2,28
PBP	Περίοδος Απόσβεσης	3,6 έτη

7. Πολυκριτηριακή μέθοδος

Στις σύγχρονες διαδικασίες λήψης αποφάσεων, οι μέθοδοι πολυκριτηριακής ανάλυσης (MCDA) χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση και ιεράρχηση εναλλακτικών λύσεων με αντικρουόμενα κριτήρια. Η MCDA λαμβάνει υπόψη τόσο ποσοτικές όσο και ποιοτικές παραμέτρους.

Κατά την επίλυση προβλημάτων μέσω πολυκριτηριακών μεθόδων, εντοπίζονται ορισμένα κοινά δομικά στοιχεία που διέπουν τις περισσότερες προσεγγίσεις. Πρώτα απ' όλα, η διαδικασία περιστρέφεται γύρω από ένα πεπερασμένο σύνολο εναλλακτικών επιλογών, οι οποίες αποτελούν τα υποψήφια σενάρια ή λύσεις προς αξιολόγηση από τον λήπτη της απόφασης. Κάθε εναλλακτική συνδέεται με ένα σύνολο κριτηρίων ή ιδιοτήτων, τα οποία περιγράφουν τις επιμέρους διαστάσεις αξιολόγησής της. Τα κριτήρια αυτά μπορούν να αφορούν ποσοτικά ή ποιοτικά χαρακτηριστικά, και συχνά ορίζονται με βάση διαφορετικούς στόχους ή προτεραιότητες.

Η αλληλοσυγκρουόμενη φύση των κριτηρίων είναι συχνή σε πολυκριτηριακά προβλήματα. Για παράδειγμα, η επιδίωξη της μέγιστης απόδοσης μπορεί να αντιτίθεται στον περιορισμό του κόστους. Η αντιπαράθεση μεταξύ στόχων, όπως κόστους – ποιότητας ή αποτελεσματικότητας – χρόνου, επιβάλλει την ανάγκη για σύνθετες σταθμίσεις. Ένα επιπρόσθετο ζήτημα έγκειται στις ετερογενείς μονάδες μέτρησης που χαρακτηρίζουν τα κριτήρια. Για παράδειγμα, σε μια επένδυση ενεργειακής τεχνολογίας, μπορεί να αξιολογούνται κριτήρια με οικονομικές μονάδες (€, \$), τεχνικές παραμέτρους (kWh, CO₂ eq) ή κοινωνικούς δείκτες (επίπεδο αποδοχής). Για τον λόγο αυτό, η κανονικοποίηση των δεδομένων καθίσταται απαραίτητη ώστε να καταστεί δυνατή η σύγκρισή τους. Αναγκαία είναι επίσης η εκχώρηση βαρών σπουδαιότητας στα επιμέρους κριτήρια, τα οποία αντανakλούν τον βαθμό επιρροής κάθε παραμέτρου στη συνολική απόφαση. Τα βάρη αυτά καθορίζονται είτε μέσω εμπειρικής κρίσης είτε με ποσοτικές μεθόδους, και συνήθως υφίστανται κανονικοποίηση, ώστε να διατηρείται η συγκρισιμότητα των κριτηρίων.

Η συνολική εικόνα της απόφασης μπορεί να εικονιστεί σε μορφή πίνακα απόφασης (decision matrix), στον οποίο οι γραμμές αντιστοιχούν στις εναλλακτικές λύσεις και οι στήλες στα κριτήρια αξιολόγησης. Κάθε στοιχείο του πίνακα αποτυπώνει την απόδοση μιας εναλλακτικής σε σχέση με ένα συγκεκριμένο κριτήριο. Ο συνδυασμός του πίνακα με τα αντίστοιχα βάρη επιτρέπει τη σύνθεση των πληροφοριών και την τελική ιεράρχηση των επιλογών [114].

Μέθοδος TOPSIS

Η μέθοδος TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) προτάθηκε από τους Hwang και Yoon το 1981 και αποτελεί μία από τις πλέον γνωστές και ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους πολυκριτηριακής ανάλυσης. Η βασική φιλοσοφία της TOPSIS βασίζεται στην ιδέα ότι η καλύτερη εναλλακτική λύση είναι εκείνη που βρίσκεται πλησιέστερα στην ιδανική λύση και ταυτόχρονα πιο απομακρυσμένη από την αρνητικά ιδανική. Με άλλα λόγια, η ιδανική λύση αντιστοιχεί στις καλύτερες επιδόσεις για κάθε κριτήριο, ενώ η αρνητική ιδανική λύση συγκεντρώνει τις χειρότερες.

Η μέθοδος προϋποθέτει ότι όλες οι εναλλακτικές έχουν αξιολογηθεί ποσοτικά ως προς τα επιλεγμένα κριτήρια και τα δεδομένα έχουν κανονικοποιηθεί. Ακολουθείται μια σειρά υπολογιστικών βημάτων: πρώτα κανονικοποιείται ο πίνακας αποφάσεων ώστε οι τιμές των κριτηρίων να καταστούν συγκρίσιμες. Έπειτα, εφαρμόζονται τα βάρη σπουδαιότητας σε

κάθε κριτήριο, και καθορίζονται τα διανύσματα της ιδανικής και της αντι-ιδανικής λύσης. Για κάθε εναλλακτική, υπολογίζεται η ευκλείδεια απόστασή της από τις δύο αυτές λύσεις και προσδιορίζεται ο σχετικός δείκτης εγγύτητας προς την ιδανική λύση. Η μέθοδος αυτή πλεονεκτεί ως προς την απλότητα της εφαρμογής και την καλή ερμηνευσιμότητα των αποτελεσμάτων, ενώ είναι κατάλληλη και για μεγάλο αριθμό εναλλακτικών. Επιπλέον, προσφέρει έναν σταθμισμένο μηχανισμό αντιστάθμισης μεταξύ των κριτηρίων, χωρίς να απαιτεί ακραίες υποθέσεις. Ωστόσο, ενδέχεται να παρουσιάζει προβλήματα όταν υπάρχουν ασυμμετρίες στα δεδομένα ή όταν τα κριτήρια είναι μη ποσοτικά. Για το λόγο αυτό, συχνά συνδυάζεται με μεθόδους fuzzy logic σε περιβάλλοντα υψηλής αβεβαιότητας. Χρησιμοποιείται ευρέως σε τομείς όπως η βιομηχανική διοίκηση, η ενεργειακή ανάλυση, ο σχεδιασμός έργων, η περιβαλλοντική πολιτική και η στρατηγική επιλογή επενδύσεων [113].

7.1. Βήματα και Μαθηματικό Υπόβαθρο Μεθόδου

Βήμα 1^ο Κατασκευή Πίνακα Απόφασης

Κατασκευάζεται ο πίνακας απόφασης A όπου:

x_{ij} είναι η τιμή της εναλλακτικής A_i ως προς το κριτήριο C_j

$i=1,2,\dots,m$ ο αριθμός εναλλακτικών

$j=1,2,\dots,n$ ο αριθμός κριτηρίων

$$A = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{1n} \\ x_{m1} & x_{mn} \end{bmatrix}$$

Βήμα 2^ο Κανονικοποίηση πίνακα

Ο πίνακας R κανονικοποιείται ώστε οι τιμές να γίνουν συγκρίσιμες, με χρήση του τύπου, όπου το r_{ij} αναπαριστά την κανονικοποιημένη επίδοση της εναλλακτικής A_i έναντι του κριτηρίου C_j .

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}$$

$i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$

Βήμα 3^ο Υπολογισμός Σταθμισμένου Πίνακα

Ο σταθμισμένος κανονικοποιημένος πίνακας $P=[P_{ij}]$ προκύπτει πολλαπλασιάζοντας τις κανονικοποιημένες τιμές με τα αντίστοιχα βάρη w_j . Το διάνυσμα βαρών $W=[w_1, w_2, \dots, w_n]$ αποτελείται από τα επιμέρους βάρη w_j για κάθε κριτήριο C_j που ικανοποιούν τον περιορισμό της:

$$\sum_{j=1}^{j=n} w_j = 1$$

Η σταθμισμένη κανονικοποιημένη αξία p_{ij} μπορεί έτσι να υπολογισθεί:

$$p_{ij} = w_j \times r_{ij}$$

Βήμα 4^ο Προσδιορισμός Ιδεατών Λύσεων

Ορίζονται δύο διανύσματα, όπου το J αναπαριστά κριτήρια θετικής επίδρασης (οφέλους) και το J' κριτήρια αρνητικής επίδρασης (κόστους).

- Θετική Ιδεατή Λύση (P^+):
- Αρνητική Ιδεατή Λύση (P^-):

$$P^+ = (p_1^+, p_2^+, \dots, p_n^+)$$

$$P^- = (p_1^-, p_2^-, \dots, p_n^-)$$

$$p_i^+ = \{(\max p_{ij}, j \in J) \text{ or } (\min p_{ij}, j \in J')\}$$

$$p_i^- = \{(\min p_{ij}, j \in J) \text{ or } (\max p_{ij}, j \in J')\}$$

Βήμα 5^ο Υπολογισμός Αποστάσεων από τις Ιδεατές Λύσεις

Για κάθε εναλλακτική A_i , υπολογίζονται οι ευκλείδειες αποστάσεις από τις ιδεατές λύσεις:

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (p_{ij} - p_j^+)^2}$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (p_{ij} - p_j^-)^2}$$

Βήμα 6^ο Υπολογισμός Σχετικής Εγγύτητας στην Ιδεατή Λύση

Η σχετική εγγύτητα κάθε εναλλακτικής στην ιδεατή λύση υπολογίζεται ως:

$$D_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-}$$

Όσο μεγαλύτερο είναι το D_i τόσο πιο κατάλληλη θεωρείται η εναλλακτική.

Βήμα 7^ο Κατάταξη Εναλλακτικών

Οι εναλλακτικές κατατάσσονται κατά φθίνουσα σειρά με βάση τη σχετική εγγύτητα, η εναλλακτική με τη μεγαλύτερη τιμή είναι η προτιμότερη.

7.2. Εφαρμογή TOPSIS στα σενάρια παραγωγής

7.2.1. Εύρεση βέλτιστης τεχνολογίας

Στο παρόν υποκεφάλαιο επιχειρείται η σύγκριση και αξιολόγηση τριών διαφορετικών τεχνολογιών για την παραγωγή αιθανόλης δεύτερης γενιάς, με στόχο τον προσδιορισμό της βέλτιστης εναλλακτικής λύσης με βάση οικονομικά και περιβαλλοντικά κριτήρια. Η ανάλυση πραγματοποιείται με τη χρήση της πολυκριτηριακής μεθόδου **TOPSIS**, η οποία επιτρέπει την κατάταξη των εναλλακτικών επιλογών σύμφωνα με την εγγύτητά τους στην ιδεατή λύση. Τα σενάρια που εξετάζονται:

Σενάριο 1 – Τεχνολογία Proesa – SSCF

Παραγωγή κυτταρινικής αιθανόλης μέσω βιοχημικής υδρόλυσης και ταυτόχρονης ζύμωσης - SSCF γεωργικών υπολειμμάτων.

Σενάριο 2 – Τεχνολογία Enerkem

Παραγωγή αιθανόλης μέσω θερμοχημικής μετατροπής (αεριοποίηση) δασικών καταλοίπων σε συνθετικό αέριο (syngas), από το οποίο παράγονται μεθανόλη και αιθανόλη.

Σενάριο 3 – Τεχνολογία SHF

Παραγωγή κυτταρινικής αιθανόλης με ξεχωριστή ενζυματική υδρόλυση και ζύμωση - SHF, σε διαφορετικούς αντιδραστήρες.

Για την αξιολόγηση των τεχνολογιών Proesa SSCF, Enerkem και SHF, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα τόσο από τεχνοοικονομικές αναλύσεις όσο και από μελέτες κύκλου ζωής. Η NPV προέρχεται από πρόσφατα επικαιροποιημένα οικονομικά στοιχεία των σεναρίων. Το δυναμικό Θερμοκηπίου (GWP) εκτιμήθηκε βάσει μελετών όπως αυτή των Roy & Dutta (2013) [115], που αναλύουν τις καθαρές εκπομπές CO₂ από τεχνολογίες κυτταρινικής αιθανόλης, και συγκεκριμένα για την Enerkem από τον δηλωμένο δείκτη Carbon Intensity (CI = -55 g CO₂/MJ), ο οποίος μεταφράζεται σε περίπου -10,45 g CO₂/L αιθανόλης. Για την όξινη βροχή (AP) δεν υπάρχουν επίσημα δημοσιευμένα στοιχεία από τις ίδιες τις εταιρείες, συνεπώς οι τιμές υπολογίζονται με βάση τυπικούς παράγοντες εκπομπών (emission factors) που χρησιμοποιούνται σε μοντέλα LCA (EMEP/EEA, IPCC).

Η βαθμονόμηση και στάθμιση των κριτηρίων βασίστηκε στη σχετική σημασία κάθε παράγοντα για την τεχνικοοικονομική βιωσιμότητα μιας μονάδας παραγωγής αιθανόλης. Το NPV απέκτησε το υψηλότερο βάρος 0.50, καθώς αποτελεί τον βασικό οικονομικό δείκτη και καθοριστικό παράγοντα για την αποδοτικότητα της επένδυσης. Τα περιβαλλοντικά κριτήρια GWP και AP έλαβαν βάρος 0.167 το καθένα, αντιστακώνοντας τη σημασία της περιβαλλοντικής επίδοσης σε τεχνολογίες ανανεώσιμης ενέργειας, παρόλο που δεν σχετίζονται άμεσα με την κερδοφορία. Τέλος, η ενεργειακή κατανάλωση βαθμολογήθηκε με βάρος 0.166, υποδεικνύοντας τη σημασία της ενεργειακής αποδοτικότητας και της ορθολογικής χρήσης πόρων στο συνολικό περιβαλλοντικό και οικονομικό αποτύπωμα της τεχνολογίας.

Πίνακα Απόφασης

Σενάριο	NPV (όφελος) (€)	GWP (g CO ₂ /Lt)	AP (g SO ₂ /Lt)	Ενέργεια (MJ/Lt)
---------	---------------------	--------------------------------	----------------------------	---------------------

1. Proesa-SSCF	-100.909.263	240 (εκτίμηση)	3.85 [116]	11.7 [115]
2. Enerkem αεριοποίησης	-453.430	22 [117]	1.59 (εκτίμηση)	15.0 [116]
3. SHF	191.457.000	610 [116]	2.50 [116]	10.0 [115]

Το NPV είναι κριτήριο οφέλους, ενώ τα GWP, AP και Ενέργεια είναι κριτήρια κόστους.

Κανονικοποιημένος πίνακας με την μέθοδο Min-Max :

Σενάριο	NPV	GWP	AP	Ενέργεια
Proesa-SSCF	0.000	0.629	0.000	0.660
Enerkem	0.344	1.000	1.000	0.000
SHF	1.000	0.000	0.597	1.000

Σταθμισμένος Πίνακας Αποφάσεων

Η τελική στάθμιση διαμορφώνεται ως εξής:

Κριτήριο	Τύπος	Βάρος
NPV	Οφέλους	0.50
GWP	Κόστους	0.167
AP	Κόστους	0.167
Ενέργεια	Κόστους	0.166

Ο σταθμισμένος πίνακας :

Σενάριο	NPV	GWP	AP	Ενέργεια
Proesa SSCF	0.000	0.105	0.000	0.110
Enerkem	0.172	0.167	0.167	0.000
SHF	0.500	0.000	0.100	0.166

Οι Ευκλείδειες αποστάσεις κάθε εναλλακτικής από τις ιδεατές λύσεις υπολογίστηκαν ως εξής:

Σενάριο	Απόσταση από P ⁺ (d ⁺)	Απόσταση από P ⁻ (d ⁻)	C ⁺
SHF	0.1801	0.5362	0.749
Enerkem	0.3676	0.2922	0.443
Proesa	0.5338	0.1518	0.221

Στη συγκεκριμένη ανάλυση, η θετική ιδεατή λύση (P^+) αντιπροσωπεύει τον θεωρητικά άριστο συνδυασμό επιδόσεων: τη μέγιστη οικονομική απόδοση (NPV) και τις ελάχιστες τιμές στα περιβαλλοντικά και ενεργειακά κριτήρια (GWP, AP, κατανάλωση ενέργειας). Αντιθέτως, η αρνητική ιδεατή λύση (P^-) ενσωματώνει τις χειρότερες δυνατές τιμές σε κάθε κριτήριο. Η τεχνολογία SHF κατέγραψε τη μικρότερη απόσταση από την P^+ (0.1801) και τη μεγαλύτερη εγγύτητα στην ιδεατή λύση ($C^+ = 0.749$), γεγονός που υποδηλώνει ότι αποτελεί την πλέον ισορροπημένη εναλλακτική. Η υψηλή της NPV σε συνδυασμό με ικανοποιητικές περιβαλλοντικές επιδόσεις την καθιστούν την πλησιέστερη στο βέλτιστο σενάριο. Αντίθετα, η Proesa, παρά την καλή της επίδοση στα περιβαλλοντικά κριτήρια, έχει μηδενική σταθμισμένη NPV και τη μεγαλύτερη απόσταση από την ιδεατή λύση (0.5338), κατατάσσοντάς την στην τελευταία θέση ($C^+ = 0.221$). Η Enerkem, με σχετικά χαμηλό GWP και AP αλλά αρνητική NPV, καταλαμβάνει τη μεσαία θέση στην κατάταξη. Συνεπώς, η απόσταση από την ιδεατή λύση αποτυπώνει με ακρίβεια τον τρόπο που οι τεχνολογίες συμβιβάζουν οικονομικά και περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά.

7.2.2. Τοποθεσίας Μονάδας Βιοαιθανόλης στην Ελλάδα

Το επόμενο στάδιο, δεδομένης της βέλτιστης τεχνολογίας, επικεντρώνεται στην αξιολόγηση τριών γεωγραφικών σεναρίων για την εγκατάσταση μονάδας παραγωγής βιοαιθανόλης στην Ελλάδα, με βάση διαφορετικά είδη διαθέσιμης πρώτης ύλης και τις γεωγραφικές, περιβαλλοντικές και ενεργειακές συνθήκες της κάθε περιοχής.

1. **Θεσσαλία (γεωργικά υπολείμματα):** Η Θεσσαλία αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους γεωργικούς κάμπους της Ελλάδας, με εκτεταμένες καλλιέργειες δημητριακών και άλλων σιτηρών. Το τεχνικά διαθέσιμο δυναμικό γεωργικών υπολειμμάτων (όπως άχυρο σιταριού και καλαμποκιού) είναι εξαιρετικά υψηλό, φτάνοντας έως και 4,9 εκατομμύρια τόνους ξηρής ουσίας πανελλαδικά [65], με σημαντικό ποσοστό αυτού να συγκεντρώνεται στην περιοχή. Η αξιοποίηση αυτών των υπολειμμάτων μειώνει την ανεξέλεγκτη καύση στα χωράφια, αποφέρει πρόσθετο εισόδημα στους παραγωγούς και προσφέρει συνεχή τροφοδοσία με

λιγνοκυτταρινούχα υλικά υψηλής απόδοσης. Η συλλογή θεωρείται σχετικά εύκολη λόγω της πεδινότητας και της συγκεντρωτικής φύσης των καλλιεργειών.

2. **Ήπειρος (δασικά υπολείμματα):** Η Ήπειρος διαθέτει πλούσια δασική κάλυψη και σημαντικό ανεκμετάλλευτο δυναμικό ξυλώδους βιομάζας, κυρίως από υπολείμματα υλοτομιών, αραιώσεις και μικρής διαμέτρου ξυλεία. Το τεχνικά διαθέσιμο δασικό δυναμικό υπολογίζεται σε περίπου 410.000 τόνους ξερής βιομάζας ετησίως, αντιστοιχώντας σε ενεργειακό περιεχόμενο 7,7 PJ [118]. Παρά τα πλεονεκτήματα αυτά, η συλλογή είναι πιο απαιτητική λόγω της μορφολογίας του εδάφους (ορεινή περιοχή), της κατακερματισμένης ιδιοκτησίας και της χαμηλής προσβασιμότητας. Επιπλέον, η τεχνολογία αεριοποίησης που απαιτείται είναι πιο σύνθετη και κοστοβόρα σε σχέση με τη βιοχημική ζύμωση.
3. **Δυτική Μακεδονία (ενεργειακές καλλιέργειες):** Η Δυτική Μακεδονία, λόγω της απολιγνιτοποίησης, διαθέτει σημαντικές εκτάσεις που θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν για ενεργειακές καλλιέργειες όπως ο μίσχανθος, το switchgrass και η αγριαγκινάρα. Οι φυτείες αυτές παρέχουν σταθερή και προβλέψιμη τροφοδοσία βιομάζας, με αποδόσεις που κυμαίνονται από 10 έως 15 τόνους ανά εκτάριο [65]. Η περιοχή διαθέτει βασικές υποδομές, καθώς και εμπειρία από την ενεργειακή παραγωγή. Ωστόσο, η καλλιεργήσιμη βιομάζα ενέχει κόστος παραγωγής, το οποίο την καθιστά πιο δαπανηρή σε σχέση με τα υπολείμματα.

Αιτιολόγηση Κριτηρίων και Πηγών Δεδομένων:

Διαθέσιμη Βιομάζα (Κt/ έτος): Οι ποσότητες βιομάζας βασίζονται σε τεχνικά διαθέσιμα εθνικά και περιφερειακά στοιχεία. Για τη Θεσσαλία χρησιμοποιείται εκτίμηση 2 εκατ. τόνων, ως αναλογικό ποσοστό από τα συνολικά 4,9 εκατ. τόνοι γεωργικών υπολειμμάτων στην Ελλάδα [65], λόγω της συγκέντρωσης εντατικής γεωργίας στον θεσσαλικό κάμπο. Η Ήπειρος εμφανίζει χαμηλότερο δυναμικό, περί τους 410 χιλ. τόνους [118] από δασικά υπολείμματα, σύμφωνα με εκτιμήσεις ξερής βιομάζας με αειφορική συγκομιδή. Η Δυτική Μακεδονία αξιολογείται στα 1 εκατ. τόνους, στηριζόμενη στην πιθανή ανάπτυξη ενεργειακών καλλιεργειών (π.χ. μίσχανθος), σε διαθέσιμες εκτάσεις μετά την απολιγνιτοποίηση.

Ενεργειακό Δυναμικό (TWh / έτος): Υπολογίστηκε με βάση τη μέση θερμογόνο δύναμη της ξερής βιομάζας (περίπου 18–20 MJ/kg). Για παράδειγμα, οι 2 εκατ. τόνοι της

Θεσσαλίας αποδίδουν 36 PJ ή 10 TWh, από τα οποία λαμβάνεται υπόψη ένα μέρος (5.6 TWh) λόγω απωλειών, ανταγωνιστικών χρήσεων και τεχνικών περιορισμών. Αντίστοιχα ποσοστά χρησιμοποιήθηκαν για τις άλλες περιοχές.

Δυσκολία Συλλογής (κλίμακα 1–10): Προκύπτει από τη μορφολογία του εδάφους, το ιδιοκτησιακό καθεστώς και τη γεωγραφική κατανομή της βιομάζας. Η Ήπειρος, με ορεινά, αραιοκατοικημένα και δυσπρόσιτα εδάφη, βαθμολογείται με 8. Η Δυτική Μακεδονία με 4, λόγω πιο οργανωμένων εκτάσεων. Η Θεσσαλία, λόγω πεδινότητας και συγκέντρωσης παραγωγής, κατατάσσεται με δείκτη 3.

Υφιστάμενες Υποδομές (κλίμακα 1–10): Η αξιολόγηση βασίζεται στην ενεργειακή εμπειρία, την ύπαρξη βιομηχανικών περιοχών, προσβασιμότητα (οδικό/ σιδηροδρομικό δίκτυο) και υφιστάμενη τεχνογνωσία. Η Θεσσαλία διαθέτει ισχυρό αγροβιομηχανικό υπόβαθρο και μακρά παράδοση στην εντατική γεωργία και αγροτική μεταποίηση. Επιπλέον, η βιβλιογραφία τεκμηριώνει την πίεση της περιοχής για εγκατάσταση ΑΠΕ, γεγονός που αναδεικνύει την ενεργειακή της δυναμική. Η προσβασιμότητα είναι επίσης υψηλή, λόγω της Εθνικής Οδού και του σιδηροδρομικού δικτύου, ενισχύοντας τη λειτουργικότητα της εφοδιαστικής αλυσίδας [119].

Η Δυτική Μακεδονία είναι ιστορικά συνδεδεμένη με τον ενεργειακό τομέα μέσω της λιγνιτικής δραστηριότητας και της παρουσίας της ΔΕΗ. Η ύπαρξη υποδομών ηλεκτροπαραγωγής και έμπειρου εργατικού δυναμικού [120]. Το δίκτυο μεταφορών, αν και βελτιωμένο (Εγνατία Οδός), δεν καλύπτει πλήρως τις ανάγκες για εναλλακτική βιομηχανική δραστηριότητα.

Η Ήπειρος εμφανίζει πιο περιορισμένες βιομηχανικές εγκαταστάσεις και μεταφορικές συνδέσεις. Η απουσία σιδηροδρομικού δικτύου και η μορφολογία του εδάφους καθιστούν δυσχερή την πρόσβαση. Η παραγωγική βάση παραμένει κυρίως κτηνοτροφική, με λίγες ενεργειακές ή μεταποιητικές μονάδες. Η βιομηχανική υποδομή είναι ασθενής, και οι υφιστάμενες δυνατότητες βασίζονται κυρίως σε μικρής κλίμακας υδροηλεκτρικά έργα και τοπική γεωργία.

Επομένως η βαθμολόγηση γίνεται ως εξής: Η Θεσσαλία (8) διαθέτει ισχυρό αγροβιομηχανικό υπόβαθρο. Η Δυτική Μακεδονία (7) έχει εμπειρία από τις λιγνιτικές

υποδομές. Η Ήπειρος (4) διαθέτει πιο περιορισμένες βιομηχανικές εγκαταστάσεις και δύσκολη πρόσβαση.

Πίνακας Αποφάσεων

	Τοποθεσία	Βιομάζα (Κt/έτος)	Ενεργειακό Δυν. (TWh/έτος)	Δυσκ. Συλλογής (1–10, κόστος)	Υφιστάμενες Υποδομ. (1–10, όφελος)
1	Θεσσαλία	2 000	5.6	3	8
2	Ήπειρος	410	2.1	8	4
3	Δ. Μακεδονία	1 000	3.0	4	7

Κανονικοποιημένος πίνακας:

Περιοχή	Βιομάζα	Εν. Δυναμικό	Δυσκ. Συλλογής	Υποδομές
Θεσσαλία	0.857	0.814	0.316	0.700
Ήπειρος	0.176	0.305	0.842	0.350
Δ. Μακεδονία	0.428	0.436	0.421	0.613

Τα κριτήρια αξιολογούνται ως εξής:

$$\text{Βιομάζα} = 0.30$$

$$\text{Ενεργειακό Δυναμικό} = 0.30$$

$$\text{Δυσκολία Συλλογής} = 0.20$$

$$\text{Υποδομές} = 0.20$$

Σταθμισμένος Πίνακας Αποφάσεων

Περιοχή	Βιομάζα	Εν. Δυναμικό	Δυσκ. Συλλογής	Υποδομές
Θεσσαλία	0.257	0.244	0.063	0.140
Ήπειρος	0.053	0.092	0.168	0.070

Δ. Μακεδονία	0.128	0.131	0.084	0.123
--------------	-------	-------	-------	-------

Οι Ευκλείδειες αποστάσεις κάθε εναλλακτικής από τις ιδεατές λύσεις υπολογίστηκαν ως εξής:

Περιοχή	Απόσταση από P^+ (d^+)	Απόσταση από P^- (d^-)
Θεσσαλία	0.000	0.261
Ήπειρος	0.357	0.000
Δ. Μακεδονία	0.155	0.194

Η σχετική εγγύτητα στην ιδεατή λύση (C^+):

Περιοχή	C_i
Θεσσαλία	1.000
Δ. Μακεδονία	0.556
Ήπειρος	0.000

Με βάση τις τιμές της σχετικής εγγύτητας, προκύπτει η ακόλουθη κατάταξη:

1. Θεσσαλία ($C1 = 1.000$)
2. Δυτική Μακεδονία ($C2 = 0.556$)
3. Ήπειρος ($C3 = 0.000$)

Η Θεσσαλία είναι η βέλτιστη τοποθεσία για εγκατάσταση μονάδας παραγωγής βιοαιθανόλης, λόγω υψηλού διαθέσιμου δυναμικού, επαρκούς ενεργειακού περιεχομένου και καλών υποδομών, σε συνδυασμό με τη μικρή δυσκολία συλλογής. Η Δυτική Μακεδονία αποτελεί τη δεύτερη επιλογή, με πλεονεκτήματα στις υποδομές και επαρκή δυναμικότητα. Η Ήπειρος, παρά την ύπαρξη δασικής βιομάζας, μειονεκτεί λόγω αυξημένης δυσκολίας συλλογής και χαμηλότερης διαθεσιμότητας.

Η ανάλυση τεχνολογικής και χωρικής καταλληλότητας ανέδειξε τη συνδυασμένη υπεροχή της τεχνολογίας SHF και της περιοχής της Θεσσαλίας ως την πλέον αποδοτική επιλογή για

την εγκατάσταση μονάδας παραγωγής βιοαιθανόλης. Η τεχνολογία SHF ξεχώρισε μέσω της μεθόδου TOPSIS, παρουσιάζοντας υψηλή καθαρή παρούσα αξία (NPV) και ικανοποιητικές επιδόσεις στα περιβαλλοντικά και ενεργειακά κριτήρια. Παρότι το GWP της είναι αυξημένο, η συνολική της ισορροπία είναι ευνοϊκή, επιβεβαιώνοντας ευρήματα της βιβλιογραφίας σύμφωνα με τα οποία η SHF, λόγω διαχωρισμένης διαχείρισης σταδίων και τεχνικής ευελιξίας, προσφέρει υψηλές αποδόσεις υπό κατάλληλες συνθήκες (Roy & Dutta, 2013). Από πλευράς χωρομέτρησης, η Θεσσαλία αποτελεί την ιδανική τοποθεσία, συνδυάζοντας υψηλή διαθεσιμότητα γεωργικής βιομάζας, ευνοϊκό ενεργειακό περιεχόμενο, ανεπτυγμένες μεταφορικές υποδομές και μικρή δυσκολία συλλογής πρώτης ύλης. Η Δυτική Μακεδονία, με ικανοποιητική δυναμικότητα και υποδομές, κατατάσσεται δεύτερη, ενώ η Ήπειρος, παρά την ύπαρξη δασικής βιομάζας, εμφανίζει σαφείς περιορισμούς. Συνολικά, η τεχνολογία SHF σε συνδυασμό με τη γεωγραφική επιλογή της Θεσσαλίας συγκροτούν μια τεκμηριωμένα βιώσιμη πρόταση για την ανάπτυξη της παραγωγής βιοαιθανόλης στην Ελλάδα, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τα τεχνοοικονομικά όσο και τα γεωγραφικά δεδομένα.

8. Συμπεράσματα και Συζήτηση

Εν κατακλείδι, στη εργασία έγινε μια αναλυτική επισκόπηση του θεωρητικού μέρους το οποίο μελετά την διαθέσιμη βιομάζα στον Ελλαδικό χώρο. Η συγκέντρωση των πληροφοριών μας δίνει το έναυσμα για περαιτέρω έρευνα στις περιοχές της Θεσσαλίας, της Θράκης, της Μακεδονίας αλλά και της Κρήτης, πόλεις που σημειώνουν την μεγαλύτερη διαθέσιμη εκτιμώμενη ποσότητα. Παράλληλα, αναλύονται οι τρόποι παραγωγής και του κόστους τεχνολογίας τους. Η κοστολογικά αποδοτικότερη τεχνολογία (2G) μέχρι στιγμής είναι η SHF, λόγω ωριμότητας. Όμως, οι καινοτόμες εξελιγμένες τεχνολογίες αναμένεται να είναι αποδεκτότερες σε παράγωγή μεγάλης κλίμακας.

Οι παραπάνω πληροφορίες οργανώθηκαν στο σύνολο τους μέσω τριών cases τα οποία αποτελούν αντιπροσωπευτικό παράδειγμά για την ανάλυση σε πραγματικά δεδομένα των τεχνολογιών SSCF, Αεριοποίησης και SHF. Με αυτό τον τρόπο είχα την ευκαιρία να μελετήσω τεχνο-οικονομικές αξιολογήσεις και δημοσιεύσεις των εταιριών οι οποίες αφορούν τα πραγματικά δεδομένα για την τεχνολογία τους και το κοστολογικό αντίκτυπο της. Με μεγάλο ενδιαφέρον χρησιμοποιώντας τα άνω δεδομένα πραγματοποιήθηκε οικονομική ανάλυση 3 σεναρίων στην οποία εξετάζονται τα μεγέθη capex, opex, ΚΠΑ, IRR,PI και PBP. Η SHF είχε μεγάλο ανταγωνιστικό προβάδισμα καθώς ήταν η μόνη

εταιρία η οποία είχε θετική ΚΠΑ. Οι εταιρίες που αναλύθηκαν με τις τεχνολογίες SSCF, και Αεριοποίησης μπορούν να θεωρηθούν βιώσιμες μόνο με την χρήση επιπρόσθετων χρηματοδοτήσεων. Στο επόμενο κεφάλαιο, πραγματοποιήθηκε πολυκριτηριακή ανάλυση σε δύο φάσεις, αρχικά για την εύρεση της κατάλληλης τεχνολογίας αξιολογώντας την ΚΠΑ του 6^{ου} κεφαλαίου και περιβαλλοντικά κριτήρια από την βιβλιογραφία. Σε δεύτερη φάση πραγματοποιήθηκε πολυκριτηριακή για την εύρεση της κατάλληλης περιοχής στην Ελλάδα για εγκαταστάτη μεγάλης κλίμακας κυτταρινούχας αιθανόλης.

Τα αποτελέσματα ανέδειξαν τη μέθοδο SHF (Separate Hydrolysis and Fermentation) ως την πλέον κατάλληλη για τη βιομηχανική παραγωγή αιθανόλης από κυτταρινούχες πρώτες ύλες, λόγω της υψηλής ενεργειακής απόδοσης και της δυνατότητας ελέγχου των επιμέρους σταδίων της διεργασίας. Παράλληλα, η γεωγραφική περιοχή της Θεσσαλίας προέκυψε ως η πλέον συμφέρουσα τοποθεσία εγκατάστασης, χάρη στη διαθεσιμότητα πρώτης ύλης, την υφιστάμενη αγροτική υποδομή και τη δυνατότητα σύνδεσης με το δίκτυο διανομής ενέργειας.

Για τη μελλοντική έρευνα προτείνονται τρεις βασικές κατευθύνσεις. Πρώτον, η αναλυτική μελέτη του κόστους μεταφοράς και συλλογής πρώτης ύλης σε σχέση με διαφορετικές αγροτικές περιοχές. Δεύτερον, η ανάπτυξη υβριδικών μοντέλων παραγωγής, όπου η βιοαιθανόλη συνδυάζεται με άλλες μορφές βιοενέργειας (όπως βιοαέριο ή βιοπλάστικά), αξιοποιώντας πλήρως το οργανικό φορτίο της βιομάζας. Τρίτον, η αξιολόγηση της δυναμικής χρήσης παραπροϊόντων της διαδικασίας (όπως λιγνίνη ή υπολείμματα ενζυμικής υδρόλυσης) για παραγωγή θερμικής ενέργειας ή άλλες εμπορικές εφαρμογές.

Η εργασία αυτή φιλοδοξεί να αποτελέσει αφετηρία περαιτέρω διερεύνησης και εφαρμογής σε ένα πεδίο με υψηλό τεχνολογικό, περιβαλλοντικό και αναπτυξιακό ενδιαφέρον, συμβάλλοντας ουσιαστικά στη διαμόρφωση ενός βιώσιμου και αυτάρκους ενεργειακού μέλλοντος.

Βιβλιογραφία

1. United Nations Department of Economic and Social Affairs. Global Population and Development Policies [Internet]. 2023 [cited 2025 Jun 26]. Available from: <https://www.un.org/development/desa/en/news/population/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html>

2. International Energy Agency. World Energy Outlook 2023 [Internet]. IEA; 2023 [cited 2025 Jun 26]. Available from: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
3. Balat M, Balat H. Recent trends in global production and utilization of bio-ethanol fuel. *Applied Energy*. 2009;86(11):2273–2282. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.03.015>
4. Lynd LR, Cushman JH, Nichols RJ, Wyman CE. Fuel ethanol from cellulosic biomass. *Science*. 1991 Mar 15;251(4999):1318–23. doi: <https://doi.org/10.1126/science.251.4999.1318>
5. Piccolo C, Bezzo F. A techno-economic comparison between two technologies for bioethanol production from lignocellulose. *Biomass and Bioenergy*. 2009;33(3):478–491. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.08.008>
6. Middlebury College. What is the difference between renewable and non-renewable energy? [Internet]. Middlebury; 2025 [cited 2025 Jun 26]. Available from: <https://online.middlebury.edu/resources/article/renewable-vs-non-renewable-energy/>
7. European Commission. Renewable Energy Directive – targets and rules. Brussels: European Commission; 2023 [cited 2025 Jun 27]. Available from: https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules_en
8. International Energy Agency (IEA). Renewables 2023: Analysis and Forecasts to 2028. IEA; 2023 [cited 2025 Jun 27]. Available from: <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>
9. Searchinger TD, Heimlich R, Houghton RA, Dong F, Elobeid A, Fabiosa J, et al. Use of U.S. croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change. *Science*. 2008 Feb 29;319(5867):1238–1240. doi: 10.1126/science.1151861
10. European Parliament and Council. Directive 2001/77/EC of 27 September 2001 on the promotion of electricity produced from renewable energy sources in the internal electricity market [Internet]. Official Journal of the European Communities. 2001 Oct 27;L283:33–40 [cited 2025 Jun 27]. Available from: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32001L0077>

11. Mat Aron NS, Khoo KS, Chew KW, Show PL, Chen WH, Nguyen THP. Sustainability of the four generations of biofuels – a review. *Int J Energy Res.* 2020;44(12):9266–82. doi:10.1002/er.5557
12. Dias MOS, Cunha MP, Jesus CDF, Rocha GJM, Pradella JGC, Rossell CEV, Maciel Filho R, Bonomi A. Second generation ethanol in Brazil: can it compete with electricity production? *Bioresour Technology* 2011 Jul;102(19):8964–8971. doi:10.1016/j.biortech.2011.06.098
13. Rulli MC, Bellomi D, Cazzoli A, De Carolis G, D’Odorico P. The water-land-food nexus of first-generation biofuels. *Sci Rep.* 2016;6:22521. doi: 10.1038/srep22521
14. DOE Loan Programs Office. Inflation Reduction Act of 2022 [Internet]. U.S. Department of Energy; [cited 2025 Jun 27]. Available from: energy.gov/lpo/inflation-reduction-act-2022
15. Ορίζοντας Ευρώπη: το πλαίσιο έρευνας & καινοτομίας 2021–2027 [Διαδίκτυο]. 2025 [Πρόσβαση 2025 Jun 27]. Διαθέσιμο: <https://horizoneurope.gr/>
16. International Energy Agency. Tracking Clean Energy Innovation: Focus on China [Internet]. IEA; 2021 [cited 2025 Jun 27]. Available from: <https://www.iea.org/reports/tracking-clean-energy-innovation-focus-on-china>
17. Ministry of Economy, Trade and Industry; New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO). Outline of Green Innovation Fund. METI; 2023 Mar [cited 2025 Jun 27]. Available from: https://www.meti.go.jp/english/policy/energy_environment/global_warming/gifund/index.html
18. International Energy Agency. Green Innovation Fund – Policies. IEA; last updated 25 Apr 2025 [cited 2025 Jun 27]. Available from: <https://www.iea.org/policies/13128-green-innovation-fund>
19. Global Compliance News. Japan: JPY 2 trillion (around USD 16 B) Green Innovation Fund under the Green Development Strategy for carbon neutrality in Japan by 2050. 2022 Apr 28 [cited 2025 Jun 27]. Available from: <https://www.globalcompliancenews.com/2022/04/28/japan-jpy-2-trillion-around-usd-16-billion-green-innovation-fund-under-the-green-development-strategy-for-carbon-neutrality-in-japan-by-2050>
20. GlobeNewswire. Raízen Has Lowest Price as Cellulosic Ethanol Hinges on Feedstock Cost. *Ethanol Producer Magazine* [Internet]. 2016 [cited 2025 Jun 27].

- Available from: <https://www.globenewswire.com/news-release/2016/02/24/920865/0/en/Raizen-Has-Lowest-Price-as-Cellulosic-Ethanol-Hinges-on-Feedstock-Cost.html>
21. Seabra JEA, Macedo IC, Chum HL, Faroni CE, Sarto CA. Life cycle assessment of Brazilian sugarcane products: GHG emissions and energy use. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. 2011;5(5):519–532. doi:10.1002/bbb.289
 22. Ελληνική Στατιστική Αρχή (ΕΛ.ΣΤΑΤ.). Κατανάλωση πετρελαιοειδών, 2023 [Διαδίκτυο]. Πειραιάς: ΕΛΣΤΑΤ.; 2025 Jan 29 [πρόσβαση 27 Ιουνίου 2025]. Διαθέσιμο: <https://www.statistics.gr/documents/20181/f0c530e7-7f5e-b57d-06f3-4071584b4f39>
 23. Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. Στατιστικά στοιχεία – Ενέργεια [Διαδίκτυο]. [Πρόσβαση 27 Ιουνίου 2025]. Διαθέσιμο: <https://ypen.gov.gr/energeia/statistika-stoicheia/>
 24. TheGlobalEconomy.com. Greece: Oil production [Internet]. [cited 2025 Jun 27]. Available from: https://www.theglobaleconomy.com/Greece/oil_production/
 25. Eurostat. Energy statistics - an overview [Internet]. European Commission; 2025 [cited 27 June 2025]. Available from: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_statistics_-_an_overview
 26. European Parliament and Council. Directive 2009/28/EC 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources. 2009 Jun 5;L140:16–62. [cited 2025 Jun 29]. Available from: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0028>
 27. Ho DP, Ngo HH, Guo W. A mini review on renewable sources for biofuel. *Bioresour Technol*. 2014;169:742–9. doi:10.1016/j.biortech.2014.07.022
 28. Paschalidou K, Tsatiris M. SWOT Analysis of Perennial vs Annual Energy Crops: A Case Study in Greece. In: Paschalidou AK, Tsatiris M, editors. *New Approaches in Engineering Research*. Vol. 3. BPI; 2021. doi:10.9734/bpi/naer/v3/2479F
 29. Brack D. Woody biomass for power and heat: Impacts on the global climate. Chatham House – The Royal Institute of International Affairs; 2017 [cited 2025 Jun 28]. Available from: <https://www.chathamhouse.org/2017/02/woody-biomass-power-and-heat/1-biomass-carbon-neutral>
 30. BioBoost Project. Biomass based energy intermediates boosting biofuel production – Feedstock costs (Deliverable D1.1) [Internet]. 2013 [cited 27 June 2025]. Available

from: https://www.bioboost.eu/uploads/files/bioboost_dl.1-syncom_feedstock_cost-vers_1.0-final.pdf

31. Balasubramanian N, Steward KF. Biodiesel: History of Plant Based Oil Usage and Modern Innovations. *Substantia*. 2019 Nov 22 [cited 2025 Jun 27];3(2 Suppl 1):57–71. doi: 10.13128/Substantia-281
32. Abdullah B, Syed Muhammad FA, Shokravi Z, Ismail S, Kassim KA, Nik Mahmood A, Aziz MMA. Fourth generation biofuel: a review on risks and mitigation strategies. *Renew Sustain Energy Rev*. 2019 Feb;107:37–50. doi:10.1016/j.rser.2019.02.018
33. Mandaokar A, Bio Power Market Research Report Information By Technology (Direct Combustion, Cofiring & Gasification, Anaerobic Digestion, Pyrolysis, and Landfill Gas), By End-User (Residential, Commercial, and Industrial), By Region - Global Forecast to 2030 [Internet]. 2023 [cited 2025 Jun 27]. Available from: <https://www.marketresearchfuture.com/reports/first-generation-biofuel-market-1512>
34. Cavelius P, Engelhart-Straub S, Mehler N, Lercher J, Awad D, Brück T. The potential of biofuels from first to fourth generation. *PLoS Biol*. 2023 Mar 30;21(3):e3002063. doi: 10.1371/journal.pbio.3002063
35. Havlík P, Schneider UA, Schmid E, Böttcher H, Fritz S, Skalský R, et al. Global land-use implications of first and second generation biofuel targets. *Energy Policy*. 2011 Oct;39(10):5690–5702. doi:10.1016/j.enpol.2010.03.030
36. Wiloso EI, Heijungs R, de Snoo GR. LCA of second generation bioethanol: a review and some issues to be resolved for good LCA practice. *Renew Sustain Energy Rev*. 2012 Jul;16(7):5295–5308. doi:10.1016/j.rser.2012.04.035
37. Cantrell KB, Ducey T, Ro KS, Hunt PG. Livestock waste-to-bioenergy generation opportunities. *Bioresour Technol*. 2008;99(17):7941–7953. doi:10.1016/j.biortech.2008.02.061
38. Sklar T. Ethanol from wood waste – an opportunity for refiners. *Oil Gas J*. 2008;106(21):54–59. [cited 2025 Jun 29]. Available from: <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=20405780>
39. Granda CB, Zhu L, Holtzaple MT. Sustainable liquid biofuels and their environmental impact. doi: 10.1002/ep.10209

40. Hill J. Environmental costs and benefits of transportation biofuel production from food- and lignocellulose-based energy crops: A review. *Agron Sustain Dev.* 2007;27(1):1–12. doi: 10.1051/agro:2007006
41. Mutanda T, Ramesh D, Karthikeyan S, Kumari S, Anandraj A, Bux F. Bioprospecting for hyper-lipid producing microalgal strains for sustainable biofuel production. *Bioresour Technol.* 2011;102(1):57–70. doi:10.1016/j.biortech.2010.06.077
42. Saini JK, Saini R, Tewari L. Lignocellulosic agriculture wastes as biomass feedstocks for second-generation bioethanol production: concepts and recent developments. *3 Biotech.* 2015;5(4):337–353. doi: 10.1007/s13205-014-0246-5
43. International Energy Agency (IEA). *Biofuels 2023: Analysis and forecast to 2028.* IEA Publications. 2023 [cited 2025 Jun 27]. Available from: <https://www.iea.org/reports/renewables-2023/transport-biofuels>
44. Dinesha P, Kumar S, Rosen MA. Biomass Briquettes as an Alternative Fuel: A Comprehensive Review. *Energy Technology.* 2019 May 10;7(5):1–8. doi:10.1002/ente.201801011.
45. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change.* 1998 [cited 2025 Jun 27]. Available from: https://unfccc.int/kyoto_protocol
46. United Nations. *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change, Annex B.* United Nations Treaty Series. 1998;2303:162. Available from: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>
47. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). *Paris Agreement.* UNFCCC Publications. 2015 [cited 2025 Jun 27]. Available from: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>
48. European Parliament and Council. *Directive 2003/30/EC on the promotion of the use of biofuels or other renewable fuels for transport* [Internet]. Official Journal of the European Union. 2003 May 8 [cited 2025 Jun 27];L 123/42. Available from: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32003L0030>
49. European Parliament and Council. *Directive 2009/28/EC on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC* [Internet]. Official Journal of the European

- Union. 2009 Apr 23 [cited 2025 Jun 27];L 140/16. Available from: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32009L0028>
50. Ελληνική Δημοκρατία. Νόμος 4062/2012 – Πλαίσιο για την ενσωμάτωση της Οδηγίας 2009/28/EK σχετικά με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας [Διαδίκτυο]. Εφημερίδα της Κυβερνήσεως. ΦΕΚ Α' 70/30.03.2012 [Πρόσβαση 2025 Jun 27]. Διαθέσιμο: <https://www.et.gr>
51. European Parliament and Council. Directive (EU) 2015/1513 amending Directive 98/70/EC relating to the quality of petrol and diesel fuels and amending Directive 2009/28/EC on the promotion of the use of energy from renewable sources [Internet]. Official Journal of the European Union. 2015 Oct 5 [cited 2025 Jun 27];L 239/1. Available from: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32015L1513>
52. European Parliament and Council. Directive (EU) 2018/2001 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast) [Internet]. Official Journal of the European Union. 2018 Dec 21 [cited 2025 Jun 27];L 328/82. Available from: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32018L2001>
53. European Parliament and Council. Directive (EU) 2023/2413 amending Directive (EU) 2018/2001 as regards the promotion of energy from renewable sources and repealing Council Directive (EU) 2015/652 [Internet]. Official Journal of the European Union. 2023 Sep 20 [cited 2025 Jun 27];L 2023/2413. Available from: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32023L2413>
54. European Parliament and Council. Directive (EU) 2023/2413 amending Directive (EU) 2018/2001 as regards the promotion of energy from renewable sources and repealing Council Directive (EU) 2015/652 [Internet]. Official Journal of the European Union. 2023 Sep 20 [cited 2025 Jun 27];L 2023/2413. Available from: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32023L2413>
55. Ελληνική Δημοκρατία. Νόμος 3423/2005 – Εισαγωγή βιοκαυσίμων και άλλων ανανεώσιμων καυσίμων στην ελληνική αγορά [Διαδίκτυο]. ΦΕΚ Α' 304/13.12.2005. [Πρόσβαση την: 27 Ιουνίου 2025]. Διαθέσιμο: <https://www.et.gr>
56. Ελληνική Δημοκρατία. Νόμος 4062/2012 – Ενσωμάτωση της Οδηγίας 2009/28/EK για την προώθηση της χρήσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές [Διαδίκτυο]. ΦΕΚ Α' 70/30.03.2012. [Πρόσβαση την: 27 Ιουνίου 2025]. Διαθέσιμο: <https://www.et.gr>

57. Ελληνική Δημοκρατία. Νόμος 4414/2016 – Νέο καθεστώς στήριξης για σταθμούς παραγωγής ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ [Διαδίκτυο]. ΦΕΚ Α' 149/09.08.2016. [Πρόσβαση την: 27 Ιουνίου 2025]. Διαθέσιμο: <https://www.et.gr>
58. Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. Κοινή Υπουργική Απόφαση 65128/2017 – Καθορισμός ελάχιστου ποσοστού ανάμιξης βιοαιθανόλης στη βενζίνη [Διαδίκτυο]. ΦΕΚ Β' 4064/2017. [Πρόσβαση την: 27 Ιουνίου 2025]. Διαθέσιμο : <https://www.et.gr>
59. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2023: Synthesis Report. Summary for Policymakers [Internet]. Geneva: IPCC; 2023 [cited 2025 Jun 27]. Available from: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf
60. Chandel AK, Garlapati VK, Singh AK, Antunes FAF, da Silva SS. The path forward for lignocellulose biorefineries: Bottlenecks, solutions, and perspectives. *Bioresour Technol Rep.* 2018;264:370–81. doi: 10.1016/j.biortech.2018.06.004
61. Lee HV, Hamid SK, Zain SK. Conversion of lignocellulosic biomass to nanocellulose: structure and chemical process. *ScientificWorldJournal.* 2014;2014:631013. doi:10.1155/2014/631013
62. McAloon A, Taylor F, Yee W, Ibsen Kand Wooley R. Determining the cost of producing ethanol from corn starch and lignocellulosic feedstocks [Internet]. NREL; 2000; NREL:TP-580-28893 [cited 2025 Jun 27]. Available from: <https://docs.nrel.gov/docs/fy01osti/28893.pdf>
63. Michael Ioelovich Plant Biomass as a Renewable Source of Biofuels and Biochemicals Lambert Academy Publishig 2013. [cited Jun 30]. Available from: https://www.researchgate.net/publication/257561875_Plant_Biomass_as_a_Renewable_Source_of_Biofuels_and_Biochemicals
64. Kumar R, Tabatabaei M, Karimi K, Sárvári Horváth I. Recent updates on lignocellulosic biomass derived ethanol – A review. *Biofuel Res J.* 3(1):347-356 doi: [10.18331/BRJ2016.3.1.4](https://doi.org/10.18331/BRJ2016.3.1.4)
65. Alatzas S, Moustakas K, Malamis D, Vakalis S. Biomass Potential from Agricultural Waste for Energetic Utilization in Greece: A Review. *Energies.* 2019;12(6):1095 doi:10.3390/en12061095

66. Χρήστου Μ. Γεωγραφική κατανομή ενεργειακών καλλιεργειών στην Ελλάδα [Διαδύκτιο]. ΚΑΠΕ· 2017 [Πρόσβαση 27 Ιουνίου 2025]. Διαθέσιμο: http://perseus.thermo.mech.ntua.gr/develop/sites/default/files/Christou_NTUA_150317.pdf
67. Gadaleta G, Todaro F, Giuliano A, De Gisi S, Notarnicola M. Co-Treatment of Food Waste and Municipal Sewage Sludge: Technical and Environmental Review of Biological and Thermal Technologies. *Clean Technologies*. 2024;6(3):852-885. doi:10.3390/cleantechnol6030044
68. Fortuin J, Hoffmeester LJ, Minnaar LS, den Haan R. Advancing cellulose utilization and engineering consolidated bioprocessing yeasts: current state and perspectives. *Appl Microbiol Biotechnol*. 2023;109(1):43–60. doi: 10.1007/s00253-025-13426-0
69. Sun Y, Cheng J. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: A review. *Bioresour Technol*. 2002 Jan;83(1):1-11. doi: [10.1016/s0960-8524\(01\)00212-7](https://doi.org/10.1016/s0960-8524(01)00212-7)
70. Humbird D, Davis R, Tao L, Kinchin C, Hsu D, Aden A, et al. Techno-Economic Analysis for Bioethanol Plant Design and Cost Estimation from Lignocellulosic Biomass. National Renewable Energy Laboratory (NREL); 2011 [cited 2025 Jun 27]. Available from: <https://www.nrel.gov/docs/fy11osti/47764.pdf>
71. ALFA WOOD GROUP. Επίσημη ιστοσελίδα. [Πρόσβαση 27 Ιουνίου 2025]. Διαθέσιμο: <https://alfawood.gr/>
72. AgrigasEnergy. Επίσημη ιστοσελίδα. [Πρόσβαση 27 Ιουνίου 2025]. Διαθέσιμο: <https://www.agrigas.gr/>
73. Γκαντέλα Χ. Προσομοίωση και βελτιστοποίηση προσροφητικών υλικών από προκατεργασμένη βιομάζα για την απομάκρυνση Cr(VI) από υδατικά διαλύματα: προσέγγιση του Severity Factor [διπλωματική εργασία]. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο· Πανεπιστήμιο Πειραιώς. [Πρόσβαση: 27 Ιουνίου 2025] Διαθέσιμο: <https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/55913/%CE%94%CE%B9%CF%80%CE%BB%CF%89%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AE%20%CE%B5%CF%81%CE%B3%CE%B1%CF%83%CE%AF%CE%B1-%CE%93%CE%BA%CE%B1%CE%BD%CF%84%CE%AD%CE%BB%CE%B1%20%CE%A7%CF%81%CF%85%CF%83%CE%BF%CF%8D%CE%BB%CE%B1.pdf>

74. Adepu Kiran Kumar, Shaishav Sharma. Recent updates on different methods of pretreatment of lignocellulosic feedstocks: a review *Bioresour. Bioprocess.* (2017) 4:7 doi: 10.1186/s40643-017-0137-9
75. Kumar D, Murthy GS. Impact of pretreatment and downstream processing technologies on economics and energy in cellulosic ethanol production. *Biotechnol Biofuels.* 2011;4:27. doi: 10.1186/1754-6834-4-27
76. Taherzadeh MJ, Karimi K. Acid based hydrolysis processes for ethanol from lignocellulosic materials: a review. *BioResources.* 2007;2(3):472–499. doi:10.15376/biores.2.4.472 499
77. P. Lenihan, A. Orozco, E. O'Neill, M.N.M. Ahmad, D.W. Rooney, G.M. Walker Dilute-acid hydrolysis of lignocellulosic biomass for ethanol production: A review. *Bioresour Technol.* 2010;156(2):395–403. doi: [10.1016/j.cej.2009.10.061](https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.10.061)
78. Gong Z, Lv X, Yang J, Luo X, Shuai L. Chemocatalytic conversion of lignocellulosic biomass to ethanol: A mini-review. *Catalysts.* 2022;12(8):922. doi:10.3390/catal12080922
79. Zuliani L, Serpico A, De Simone M, Frison N, Fusco S. Biorefinery gets hot: Thermophilic enzymes and microorganisms for second-generation bioethanol production. *Processes.* 2021;9(9):1583. doi:10.3390/pr9091583
80. González-Gloria KD, Tomás-Pejó E, Amaya-Delgado L, Rodríguez-Jasso RM, Loredó-Treviño A, Singh A, et al. Biochemical and biorefinery platform for second-generation bioethanol: fermentative strategies and microorganisms. *Fermentation.* 2024;10(7):361. doi:10.3390/fermentation10070361
81. Taherzadeh M, Karimi H. Enzymatic-based hydrolysis processes for ethanol. *BioResources.* 2007;2(4):707–738. doi:10.15376/biores.2.4.707-738
82. Humbird D, Davis R, Tao L, Kinchin C, Hsu D, Aden A, et al. Process design and economics for biochemical conversion of lignocellulosic biomass to ethanol. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory (NREL); 2011. Report No.: NREL/TP-5100-47764 [cited 2025 Jun 27]. Available from: <https://www.nrel.gov/docs/fy11osti/47764.pdf>
83. Hussain, M. A. M., & Pfromm, P. H. (2013). Reducing the Energy Demand of Cellulosic Ethanol through Salt Extractive Distillation Enabled by Electrodialysis. *Separation Science and Technology*, 48(10), 1518–1528. Received August 30, 2011;

accepted January 10, 2013; published online May 8, 2013.
doi:10.1080/01496395.2013.766211

84. Novia N, Melwita E, Jannah AM, Selpiana S, Yandriani Y, Afrah BD, et al. Current advances in bioethanol synthesis from lignocellulosic biomass: sustainable methods, technological developments, and challenges. *J Umm Al-Qura Univ Appl Sci.* 2025;3:Published 28 Jan 2025. doi: 10.1007/s43994-025-00212-x
85. Venugopal D, Thangavelu L, Natarajan A. Investigation of gasification reactions and H₂/CO ratio analysis for rice husk air gasification simulation. *Thermal Sci.* 2023;27(1B):881–890. doi:10.2298/TSCI220119087V
86. National Energy Technology Laboratory Syngas Contaminant Removal and Conditioning.: Syngas Cleanup [Internet]. [cited 2025 Jun 30]. Available from: <https://www.netl.doe.gov/research/coal/energy-systems/gasification/gasifiedia/cleanup>
87. United States Department of Energy, National Renewable Energy Laboratory. Survey and down-selection of acid gas removal systems for the thermochemical conversion of biomass to ethanol with a detailed analysis of an MDEA system. Subcontract report NREL/SR-5100-50482. Golden, CO: NREL; 2011 May. Available from: <https://www.nrel.gov/docs/fy11osti/50482.pdf>
88. Therasme O, Volk TA, Eisenbies MH, Amidon TE, Fortier M-O. Life cycle greenhouse gas emissions of ethanol produced via fermentation of sugars derived from shrub willow (*Salix* spp.) hot water extraction in the Northeast United States. *Biotechnol Biofuels.* 2021;14:52. doi:10.1186/s13068-021-01900-6
89. Jincan Kang, Shun He, Wei Zhou, Zheng Shen, Yangyang Li, Mingshu Chen, Qinghong Zhang & Ye Wang. Single pass transformation of syngas into ethanol with high selectivity by triple tandem catalysis. *Nat Commun.* 2020;11:827. doi:10.1038/s41467-020-14672-8
90. NREL. Thermochemical ethanol via indirect gasification and mixed alcohol synthesis [Internet]. Golden, CO: NREL; 2007 Aug [cited 2025 Jun 27]. Report No.: NREL/TP-510-41168. Available from: <https://www.nrel.gov/docs/fy07osti/41168.pdf>
91. Lee R Lynd, Mark S Laser, David Bransby, Bruce E Dale, Brian Davison, Richard Hamilton, Michael Himmel, Martin Keller, James D McMillan, John Sheehan &

- Charles E Wyman. How biotech can transform biofuels. Nat Biotechnol. 2008;26(2):169-172. doi:10.1038/nbt0208-169
92. Crescentino – Advanced Ethanol Biorefinery (Case Study) [Internet]. 2018 [cited 2025 Jun 27]. Available from: [3-Crescentino-AdvancedEthanolBiorefinery_IT_Final.pdf](#)
 93. Pescarolo A. PROESA Overview Tech [Internet]. IEA Bioenergy; 2015 [cited 2025 Jun 27]. Available from: [https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2015/02/IX3-Pescarolo-PROESA-Overview-Tech.pdf](#)
 94. Enkern. Solution | Our Technology [Internet]. [no date] [cited 2025 Jun 27]. Available from: [https://enkern.com/solution/technology](#)
 95. Enkern begins ethanol production from waste at its demonstration facility in Westbury, Québec [Internet]. 2016 [cited 2025 Jun 27]. Available from: [https://enkern.com](#)
 96. USDA. Enkern DOE Environmental Assessment [Internet]. [no date] [cited 2025 Jun 27]. Available from: [https://www.rd.usda.gov/sites/default/files/Enkern_DOE-EA.pdf](#)
 97. U.S. Securities and Exchange Commission. Form S-1 Enkern Inc. [Internet]. 2012 [cited 2025 Jun 27]. Available from: [https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1528521/000104746912000608/a2205299zf-1.htm](#)
 98. Figure Caption Figure 48: Enkern – flow chart.. [Internet]. [cited 2025 Jun 27]. Available from: [https://www.researchgate.net/publication/303364173_Status_of_advanced_biofuels_demonstration_facilities_in_2012/figures?lo=1](#)
 99. Bacovsky D, Ludwiczek N, Ognissanto M, Wörgetter M. Status of Advanced Biofuels Demonstration Facilities in 2012 [Internet]. IEA Bioenergy Task 39; 2013 [cited 2025 Jun 27]. Available from: [https://task39.sites.olt.ubc.ca/files/2013/12/2013_Bacovsky_Status-of-Advanced-Biofuels-Demonstration-Facilities-in-2012.pdf](#)
 100. Biofuels News. Brazilian president opens new cellulosic ethanol plant using Iogen technology [Internet]. 2014 [cited 2025 Jun 27]. Available from: [https://biofuels-news.com/news/brazilian-president-opens-new-cellulosic-ethanol-plant-using-io-gen-technology/](#)

101. Lawford HG, Rousseau JD. Cellulosic fuel ethanol: alternative fermentation process designs with wild-type and recombinant *Zymomonas mobilis*. Appl Biochem Biotechnol. 2003;106(1–3):457–69. doi:10.1385/abab:106:1-3:457.
102. LAWFOR AND JOYCE D. ROUSSEAU. Alternative Fermentation Process Designs with Wild-Type and Recombinant *Zymomonas mobilis* [Internet]. 2003 [cited 2025 Jun 27]. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1385/ABAB:106:1-3:457>
103. Iogen Corporation. Cellulosic ethanol scale-up [Internet]. [no date] [cited 2025 Jun 27]. Available from: https://www.iogen.ca/cellulosic_ethanol/scale-up.html
104. Iogen Corporation. Cellulosic ethanol [Internet]. Ottawa, Canada: Iogen Corporation; 2021 [cited 2025 Jun 27]. Available from: https://www.iogen.ca/cellulosic_ethanol/
105. Giovannini A. Crescentino Demo Plant: Challenges and opportunities [Internet]. BIOLYFE; 2013 [cited 2025 Jun 27]. Available from: https://www.biolyfe.eu/images/stories/downloads/Crescentino%20Demo%20Plant_13.pdf
106. Versalis. Biomass power plant restarted at Crescentino and bioethanol production onstream within the first half of the year. Eni; 2020 Feb 8 [cited 2025 Jun 27]. Available from: <https://www.eni.com/en-IT/media/press-release/2020/02/versalis-biomass-power-plant-restarted-at-crescentino-and-bioethanol-production-onstream-within-the-first-half-of-the-year.html>
107. Dutta A, Talmadge M, Hensley J, et al. Process Design and Economics for Conversion of Lignocellulosic Biomass to Ethanol [Internet]. Golden (CO): National Renewable Energy Laboratory; 2011 May [cited 2025 Jun 27]. Available from: <https://docs.nrel.gov/docs/fy11osti/51400.pdf>
108. Crescentino story - the world's first cellulosic ethanol plant is reality [Internet]. BIOLYFE; [cited 2025 Jun 27]. Available from: <https://www.biolyfe.eu/production-plant.html@lang=en.html#:~:text=impact%20in%20the%20region%2C%20employing,The%20%E2%80%9Crevolutionary%E2%80%9D>
109. Greentech Media. Denmark makes stab for biofuel greatness. Greentech Media; 2012 [cited 2025 Jun 27]. Available from:

- <https://www.greentechmedia.com/articles/read/denmark-makes-stab-for-biofuel-greatness>
110. Canadian Biomass Magazine. Enkern filling orders in Alberta. Canadian Biomass Magazine; 2012 Jun 8 [cited 2025 Jun 27]. Available from: <https://www.canadianbiomassmagazine.ca/enkern-filling-orders-in-alberta-6007>
 111. International Energy Agency – Advanced Motor Fuels. AMFI Newsletter, October 2015 [Internet]. IEA-AMF; 2015 Oct [cited 2025 Jun 27]. Available from: https://www.iea-amf.org/app/webroot/files/file/Newsletters/AMFNewsletter_3-2015.pdf
 112. Iogen Corporation. Costa Pinto Project [Internet]. Iogen Corporation; [cited 2025 Jun 27]. Available from: <https://www.ioegen.ca/raizen-project/>
 113. NikasA. Απόσταση από ιδεατό σημείο (TOPSIS). Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο; 2021. [Πρόσβαση 2025 Jun 27]. Διαθέσιμο: <https://www.epu.ntua.gr>
 114. NikasA. Εισαγωγικές έννοιες. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο; 2021. [Πρόσβαση 2025 Jun 27]. Διαθέσιμο: <https://www.epu.ntua.gr>
 115. Roy P, Dutta A. Life cycle assessment of ethanol derived from sawdust. *Bioresour Technol.* 2013 Dec;150:407–11. doi:10.1016/j.biortech.2013.08.057. PMID: 23993286
 116. Heath, G., Warner, E. & O'Donoghue, P. (2010). Harmonization of Energy Generation Life Cycle Assessments (LCA): FY2010 LCA Milestone Report. National Renewable Energy Laboratory (NREL). [cited 2025 Jun 27]. Available at: <https://www.nrel.gov/docs/gen/fy11/47492.pdf>
 117. PR Newswire (2020). Enkern's second-generation ethanol obtains the lowest carbon intensity ever from the British Columbia government. [cited 2025 Jun 27]. Available at: <https://www.prnewswire.com/news-releases/enkerns-second-generation-ethanol-obtains-the-lowest-carbon-intensity-ever-from-the-british-columbia-government-619829843.html>
 118. Δαμάτης Ν. Ανακύκλωση Σταθμών Βιομάζας [Internet]. ΕΛΕΑΒΙΟΜ - HellaBiom 2023 Jun 9 [cited 2025 Jun 27]. Available from: https://www.raaey.gr/energeia/wp-content/uploads/2023/06/007-HellaBiom_Forward-Green_2023-06-09.pdf
 119. Sargentis GF, Siamparina P, Efstratiadis A, et al. Agricultural Land or Photovoltaic Parks? The Water–Energy–Food Nexus and Land Development

Perspectives in the Thessaly Plain, Greece. *Sustainability*. 2021;13(16):8935. doi:10.3390/su13168935

120. Tranoulidis A, Sotiropoulou REP, Bithas K, Tagaris E. Decarbonization and Transition to the Post-Lignite Era: Analysis for a Sustainable Transition in the Region of Western Macedonia. *Sustainability*. 2022;14(16):10173. doi:10.3390/su141610173