



**Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας**  
**Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών**  
*Πολυτεχνική Σχολή*

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

**ΤΙΤΛΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ:**

«Μελέτη σκοπιμότητας θερμικά αυτόνομης συνδυασμένης διεργασίας, πυρόλυσης, αεριοποίησης και κυψέλης καυσίμου για την αποδοτική μετατροπή ελαιοπυρήνα προς παραγωγή βιο-ελαίου και ηλεκτρικής ενέργειας»

**ΚΑΛΕΝΤΗΡΙΑΔΟΥ ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ, ΑΕΜ:2055**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΜΑΡΝΕΛΛΟΣ**

**ΚΟΖΑΝΗ**

**ΙΟΥΛΙΟΣ 2024**



**Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας**  
**Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών**  
*Πολυτεχνική Σχολή*

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

**ΤΙΤΛΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ:**

«Μελέτη σκοπιμότητας θερμικά αυτόνομης συνδυασμένης διεργασίας, πυρόλυσης, αεριοποίησης και κυψέλης καυσίμου για την αποδοτική μετατροπή ελαιοπυρήνα προς παραγωγή βιο-ελαίου και ηλεκτρικής ενέργειας»

**ΚΑΛΕΝΤΗΡΙΑΔΟΥ ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ, ΑΕΜ:2055**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΜΑΡΝΕΛΛΟΣ**

**ΚΟΖΑΝΗ**

**ΙΟΥΛΙΟΣ 2024**

## Περίληψη

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει και αναλύει την προσομοίωση και την τεχνοοικονομική μελέτη ενός προτεινόμενου υβριδικού συστήματος σε κλίμακα MW που επιτρέπει την παραγωγή διαφορετικών εμπορεύσιμων προϊόντων (δηλαδή ηλεκτρική ενέργεια και βιο-έλαιο) από τη θερμοχημική εκμετάλλευση της υπολειμματικής βιομάζας του ελαιοπυρήνα (olive kernel, OK). Από την άποψη αυτή, πραγματοποιήθηκαν λεπτομερείς υπολογισμοί για τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας, και διεξήχθη προσομοίωση διεργασιών με τη χρήση του λογισμικού ASPEN Plus και οικονομική ανάλυση με συμπληρωματικά σενάρια ευαισθησίας, που ως στόχο έχουν τη μοντελοποίηση και αξιολόγηση της σκοπιμότητας μιας ολοκληρωμένης διαδικασίας για τη συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και αργού βιο-πετρελαίου, μέσω επακόλουθων σταδίων πυρόλυσης βιομάζας, αεριοποίησης βιο-εξανθρακώματος, και κυψέλης καυσίμου στερεών οξειδίων SOFC που τροφοδοτείται με αέριο σύνθεσης, και ατμοστροβίλου. Συγκεκριμένα, αποδείχθηκε ότι η παροχή 20 tn/ημέρα ακατέργαστου ελαιοπυρήνα (OK), είχε ως αποτέλεσμα καθαρή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας 1685 kW<sub>el</sub> καθώς και παραγωγή 3.4 tn/ημέρα βιο-ελαίου, χωρίς την ανάγκη εξωτερικής θέρμανσης. Εξίσου σημαντικό, αποτελεί το γεγονός ότι η συνολική ηλεκτρική απόδοση και η συνδυασμένη απόδοση συμπαραγωγής βιοελαίου/ηλεκτρικής ενέργειας της ολοκληρωμένης διαδικασίας ήταν ίση με 46.8% και 77.0%, αντίστοιχα, μεταξύ των υψηλότερων τιμών που αναφέρθηκαν σε σχετικές εργασίες. Επιπλέον, η οικονομική ανάλυση αποκάλυψε ότι οι μονάδες καθαρισμού του αερίου σύνθεσης και της κυψέλης καυσίμου SOFC αντιπροσωπεύουν το 75% της συνολικής επένδυσης του παγίου κεφαλαίου, καθώς και το 62% του ετήσιου κόστους λειτουργίας. Ωστόσο, το αυξημένο μοναδιαίο κόστος αντισταθμίζεται σε μεγάλο βαθμό από το γεγονός ότι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αντιπροσωπεύει το ~85% των συνολικών κερδών. Επίσης, διαπιστώθηκε ότι το προτεινόμενο εγχείρημα δεν είναι κερδοφόρο λαμβάνοντας υπόψη τις τρέχουσες τιμές της αγοράς για την ηλεκτρική ενέργεια και το βιο-έλαιο. Παρόλα αυτά, η ανάλυση ευαισθησίας αποκάλυψε ότι η μείωση του κύριου κόστους εξοπλισμού κατά 70% αποτελεί προϋπόθεση για την επίτευξη της τιμής του νεκρού σημείου της ηλεκτρικής ενέργειας στις τρέχουσες αξίες της αγοράς. Επιπλέον, η κερδοφορία του εγχειρήματος μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω, αν ληφθεί υπόψη μια κρατική επιδότηση άνω του μισού της αρχικής επένδυσης καθώς και μια αύξηση της τιμής του αργού βιο-πετρελαίου στα 700 €/tn.

Λέξεις – Κλειδιά: Ελαιοπυρήνας, Πυρόλυση, Αεριοποίηση, Κυψέλη καυσίμου στερεών οξειδίων, Τεχνοοικονομική μελέτη.

## Abstract

The present work elaborates on the simulation and techno-economic analysis of a proposed MW-scale hybrid scheme that enables the production of different marketable products (i.e., electric energy and bio-oil) from the thermochemical exploitation of olive kernel residual biomass. In this regard, detailed calculations for mass and energy balances, process simulation in ASPEN Plus and economic analysis with complementary sensitivity scenarios were conducted, with the aim to model and assess the feasibility of an integrated process for electricity and crude bio-oil co-generation via subsequent stages of biomass pyrolysis, bio-char gasification, syngas-fed SOFC and steam turbine. Notably, it was demonstrated that the provision of 20 tn/day of raw olive kernel resulted in a net electricity generation of 1685 kW<sub>el</sub> as well as production of 3.4 tn/day of bio-oil, without the need for external heating. Equally importantly, the overall electric efficiency and the combined bio-oil/power co-generation efficiency of the integrated process were equal to 46.8% and 77.0%, respectively, being amongst the highest values reported in relevant works. Moreover, economic analysis revealed that syngas clean-up and SOFC units account for 75% of the total fixed capital investment as well as for 62% of the annual operation costs. Nonetheless, increased unit cost is largely counterbalanced by the fact that electricity generation accounts for ~85% of total profits. Also, it was found that the proposed venture is not profitable considering current market values for electricity and bio-oil. However, sensitivity analysis revealed that a main equipment cost reduction of 70% is a prerequisite for the break-even electricity price to attain the current market values. Moreover, profitability can be marginally improved further by accounting for a state subsidization of more than half of the initial investment and by the increase of the crude bio-oil price at 700 €/tn.

Keywords: Olive kernel (OK), Pyrolysis, Gasification, Solid Oxide Fuel Cell (SOFC), Techno-economic assessment.

## Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο διάστημα μεταξύ Μαΐου 2022 και Ιουλίου 2024 στα πλαίσια των προπτυχιακών σπουδών μου στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας.

Ως ελάχιστη μνεία οφείλω να ευχαριστήσω θερμά όλους όσους συνέβαλαν στην εκπόνησή της και ιδιαίτερα, τον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Γεώργιο Μαρνέλλο, ο οποίος μου προσέφερε την ευκαιρία να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα και να εμπλουτίσω τις γνώσεις μου σε αυτό το αντικείμενο μελέτης. Η πολύτιμη υποστήριξή του, οι παραγωγικές υποδείξεις του καθώς και το πολύ καλό κλίμα συνεργασίας που διαμόρφωσε, συνέβαλαν τα μέγιστα για την κατάρτιση της διπλωματικής μου εργασίας. Φυσικά, δεν θα μπορούσα να παραλείψω από τις ευχαριστίες τον κ. Αθανάσιο Λαμπρόπουλο και να εκφράσω την εκτίμηση μου προς το πρόσωπο του, διότι η καθοδήγηση του σε τυχόν απορίες, η συνεχής επικοινωνία και η αμέριστη βοήθεια του συντέλεσαν τα μέγιστα στην ολοκλήρωση της.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την συνεχή συμπαράσταση και ηθική στήριξη τους, σε κάθε μου επιλογή καθ'όλη την διάρκεια των σπουδών μου, και ιδιαίτερα τον σύζυγο μου Τάσο, τη μητέρα μου Ρεβέκκα και την κόρη μου Αναστασία-Μαρία, που αποτελούσαν πηγή δύναμης και έμπνευσης για να ολοκληρώσω τη διπλωματική μου εργασία.

## Περιεχόμενα

Περίληψη.....	1
Abstract .....	2
Ευχαριστίες .....	3
Ευρετήριο Σχημάτων.....	5
Ευρετήριο Πινάκων.....	6
Κεφάλαιο 1.Εισαγωγή.....	7
1.1 Ενεργειακή μετάβαση της Ευρωπαϊκής Ένωσης και ο ρόλος της βιοενέργειας.....	7
1.2 Ο ρόλος της βιομάζας και συμβατική αξιοποίηση της βιομάζας.....	9
1.3 Ενεργειακή αξιοποίηση βιομάζας.....	11
1.3.1 Πυρόλυση βιομάζας.....	12
1.3.2 Αεριοποίηση βιομάζας.....	13
1.3.3 Κυψέλη Καυσίμου στερεών οξειδίων –Solid Oxide Fuel Cells (SOFC).....	14
1.4 Δυναμικό βιομάζας από την βιομηχανία παραγωγής ελαιολάδου στην Ελλάδα.....	15
1.5 Ανασκόπηση συνδυασμένων διεργασιών ενεργειακής αξιοποίησης βιομάζας.....	18
1.6 Σκοπός διπλωματικής εργασίας.....	21
Κεφάλαιο 2.Τεχνοοικονομική Αποτίμηση διεργασίας GASOFC με χρήση ελαιοπυρήνα.....	24
2.1 Συνοπτική περιγραφή της διαδικασίας και παραδοχές.....	24
2.2 Προσομοίωση διεργασίας – Θερμική ολοκλήρωση.....	25
2.3 Πυρόλυση Βιομάζας.....	27
2.4 Αεριοποίηση Βιο-εξανθρακώματος.....	30
2.5 Επεξεργασία και καθαρισμός παραγόμενου αερίου σε υψηλή θερμοκρασία.....	32
2.6 Κυψέλη καυσίμου στερεών οξειδίων (Solid Oxide Fuel Cell-SOFC).....	33
2.7 Μετακαυστήρας.....	35
2.8 Ατμοστρόβιλος.....	36
2.9 Ενεργειακή ανάλυση της ολοκληρωμένης διεργασίας.....	36
Κεφάλαιο 3.Οικονομική Ανάλυση.....	40
3.1 Μεθοδολογία.....	40
3.2 Κόστος Κύριου Μηχανολογικού Εξοπλισμού.....	42
3.3 Οικονομικές επιδόσεις και λειτουργικό κόστος.....	43
3.4 Ανάλυση Ευαισθησίας του Κόστους του Κύριου Μηχανολογικού Εξοπλισμού και Κίνητρα Χρηματοδότησης.....	49
Κεφάλαιο 4. Συμπεράσματα.....	55
Βιβλιογραφία.....	58

## Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1. Συνολική παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας από ΑΠΕ για το έτος 2020 και προβλέψεις για το 2050. ....	7
Σχήμα 2. Συνολική παραγωγή ενέργειας προερχόμενη από βιομάζα στην ΕΕ το 2020 .....	8
Σχήμα 3. Κατηγοριοποίηση Βιομάζας. ....	10
Σχήμα 4. Εκπομπές CO <sub>2</sub> της βιοενέργειας στην ατμόσφαιρα (αριστερά) και εκπομπές CO <sub>2</sub> της ενέργειας προερχόμενη από ορυκτά καύσιμα (δεξιά). ....	11
Σχήμα 5(a),(b). Δυναμικό γεωργικών(a) και αγροτοβιομηχανικών υπολειμμάτων(b) στην Ελλάδα. ..	16
Σχήμα 6. Χώρες με τη μεγαλύτερη παραγωγή ελαιολάδου παγκοσμίως. ....	17
Σχήμα 7. Σχηματική απεικόνιση της βιομηχανίας της παραγωγής ελαιολάδου και των υπολειμμάτων σε μια τυπική διαφασική διαδικασία εκχύλισης ελαιολάδου. ....	18
Σχήμα 8. Σχηματική απεικόνιση της προτεινόμενης ολοκληρωμένης διεργασίας πυρόλυσης του ελαιοπυρήνα, αεριοποίησης του βιο-εξανθρακώματος και παραγωγής ενέργειας σε έναν συνδυασμένο κύκλο SOFC-ατμοστροβίλου. ....	25
Σχήμα 9. Διάγραμμα ροής της ολοκληρωμένης διεργασίας ανάκτησης ενέργειας από ελαιοπυρήνα. ....	26
Σχήμα 10. Προσομοίωση της μονάδας SOFC στο ASPEN Plus. ....	35
Σχήμα 11. Διάγραμμα ροών ενέργειας της προτεινόμενης ολοκληρωμένης διεργασίας. ....	37
Σχήμα 12. Μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για τις οικονομικές αξιολογήσεις της διαδικασίας. ....	41
Σχήμα 13. Μεταβολή της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας στο νεκρό σημείο ως συνάρτηση του ποσοστού μείωσης του συνολικού κόστους του κύριου μηχανολογικού εξοπλισμού. ....	50
Σχήμα 14. Μεταβολή της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας στο νεκρό σημείο ως συνάρτηση του ποσοστού επιδότησης της συνολικής επένδυσης παγίου κεφαλαίου. ....	52
Σχήμα 15. Μεταβολή της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας στο νεκρό σημείο ως συνάρτηση της μείωσης του MEC και της χρηματοδοτικής ενίσχυσης για την σύγκλιση της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας στις τρέχουσες τάσεις της αγοράς ηλεκτρισμού. ....	53

## Ευρετήριο Πινάκων

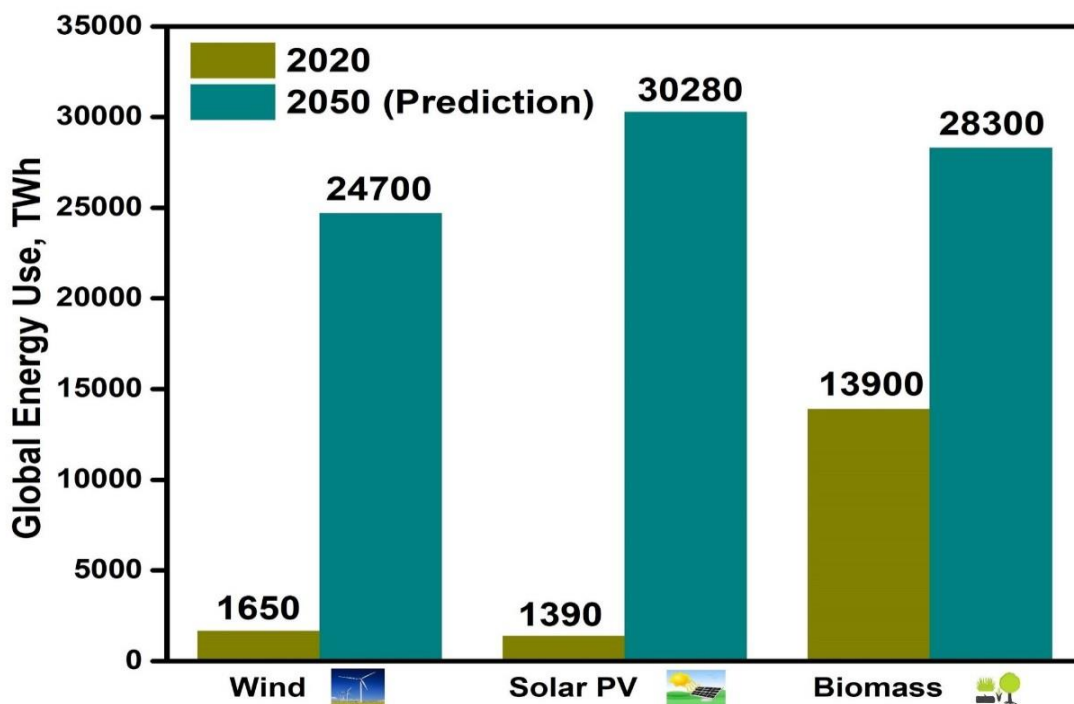
Πίνακας 1. Συστάσεις και γραμμομοριακές παροχές των κύριων ρευμάτων της ολοκληρωμένης διεργασίας σε kmol/hr. ....	27
Πίνακας 2. Σύγκριση των προϊόντων ρευμάτων και των συστάσεων τους από την αργή πυρόλυση του ελαιοπυρήνα με τη βιβλιογραφία. ....	28
Πίνακας 3. Στοιχειακή σύσταση και ενεργειακό περιεχόμενο των στερεών και υγρών προϊόντων στην διεργασία της πυρόλυσης. ....	29
Πίνακας 4. Συστάσεις και ενεργειακό περιεχόμενο αερίων ρευμάτων της ολοκληρωμένης διεργασίας. ....	32
Πίνακας 5. Σύγκριση μελετών μοντελοποίησης συζευγμένων διεργασιών αεριοποίησης βιομάζας και κυψελών καυσίμου SOFC για παραγωγή ισχύος. ....	39
Πίνακας 6. Δείκτες οικονομικής Απόδοσης.....	41
Πίνακας 7. Κόστος Κύριου εξοπλισμού (MEC) .....	43
Πίνακας 8. Λειτουργικά κόστη και έσοδα από την πώληση των προϊόντων για το βασικό σενάριο. .	45
Πίνακας 9. Συνολικές επενδύσεις παγίου κεφαλαίου και συνολικές άμεσες, έμμεσες και άλλες δαπάνες.....	46
Πίνακας 10. Ετήσιες δαπάνες παραγωγής.....	47
Πίνακας 11. Δείκτες οικονομικής απόδοσης της διεργασίας και τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας στο νεκρό σημείο για το βασικό σενάριο και για την μέγιστη τιμή βιο-ελαίου.....	49



## Κεφάλαιο 1.Εισαγωγή

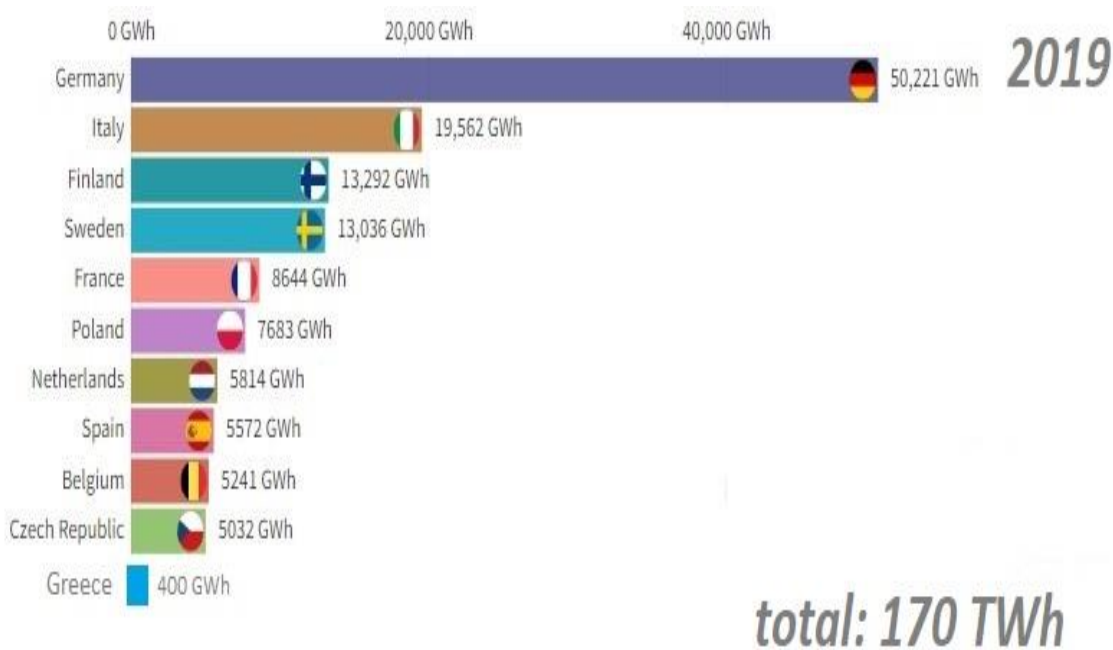
### 1.1Ενεργειακή μετάβαση της Ευρωπαϊκής Ένωσης και ο ρόλος της βιοενέργειας

Στα τέλη του 2019, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή (European Commission, EC) δρομολόγησε την στρατηγική για την πράσινη συμφωνία με στόχο να καταστήσει την Ευρώπη ουσιαστικά την πρώτη κλιματικά ουδέτερη περιοχή στον κόσμο μέχρι το 2050[1]. Για την επίτευξη αυτού του μάλλον φιλόδοξου στόχου, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή (EE) σχεδιάζει να αυξήσει το μερίδιο των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στην ολόενα και αυξανόμενη ενεργειακή κατανάλωση ενέργειας και να προωθήσει τις αρχές της κυκλικής οικονομίας σε όλους τους οικονομικούς τομείς, καθιστώντας τελικά την Ευρωπαϊκή Ένωση ανεξάρτητη από τις εισαγωγές ορυκτών καυσίμων. Στο Σχήμα 1 απεικονίζεται η συνολική παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας τριών σημαντικών πηγών ΑΠΕ, για το έτος 2020 (έτος αναφοράς) και το 2050 (πρόβλεψη). Το μερίδιο των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στον παγκόσμιο συνολικό ενεργειακό εφοδιασμό και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για το έτος αναφοράς 2020 ήταν ίσο με 12 % και 29 % αντίστοιχα. Σύμφωνα με το σενάριο των καθαρών μηδενικών εκπομπών-Net Zero Emissions (NZE), το μερίδιο των ΑΠΕ θα ανέλθει σε 66 % και 87 % για το έτος 2050. [2]. Η βιοενέργεια, το 2020, αντιπροσώπευε 13900 TWh (Σχήμα 1) στη συνολική παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας και 718 TWh στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας[2].



Σχήμα 1. Συνολική παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας από ΑΠΕ για το έτος 2020 και προβλέψεις για το 2050.

Πράγματι, η συμβολή των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση εκτιμάται ότι θα ανέλθει περίπου σε 10.280 TWh/yr μέχρι το έτος 2050, που αντιστοιχεί σε μια αξιοσημείωτη αύξηση κατά 250% σε σύγκριση με τις τιμές του 2020[2]. Συγκεκριμένα η βιοενέργεια θα αποτελεί το 1/4 της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας στην ΕΕ έως το 2050, σε σύγκριση με τη συνολική συνεισφορά το 2020 που ανερχόταν μόλις στο 1/7 [3]. Για την ακρίβεια, η συνολική παραγωγή ενέργειας προερχόμενη από βιομάζα στην ΕΕ το 2020 αντιστοιχούσε σε περίπου 170 TWh, όπως φαίνεται και από το Σχήμα 2 που παρατίθεται παρακάτω[4]. Γενικότερα, ο ρόλος της βιοενέργειας αναμένεται να είναι σημαντικά καθοριστικός στην παγκόσμια παραγωγή ενέργειας, καθώς οι προβλέψεις που καθορίζουν το σενάριο του Net Zero Energy(NZE) το 2050, αναφέρονται σε διπλάσια ή και τετραπλάσια (σε σύγκριση με τις τιμές του 2020) αύξηση της χρήσης βιοενέργειας, τόσο στον ενεργειακό εφοδιασμό όσο και στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [2].



Σχήμα 2. Συνολική παραγωγή ενέργειας προερχόμενη από βιομάζα στην ΕΕ το 2020

Όσον αφορά τις πηγές βιοενέργειας, η βιομάζα αποτελεί μια από τις τρεις βασικές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και αποτελεί βασικό παράγοντα για την επίτευξη των ευρωπαϊκών στόχων, όπου 32% της κατανάλωσης ενέργειας πρέπει να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας[2]. Η βιομάζα ακόμη, αποτελεί μια φθηνή και ευρέως διαθέσιμη ανανεώσιμη μορφή πράσινης ενέργειας, λόγω του ανθρακικά ουδέτερου κύκλου ζωής της (οι εκπομπές CO<sub>2</sub> κατά την καύση βιομάζας για παραγωγή ενέργειας είναι ίδιες με την ποσότητα CO<sub>2</sub> που απαιτείται στη διαδικασία της φωτοσύνθεσης). Ωστόσο το υψηλό κόστος συγκομιδής, συλλογής, αποθήκευσης, επεξεργασίας και μεταφοράς, περιορίζουν την

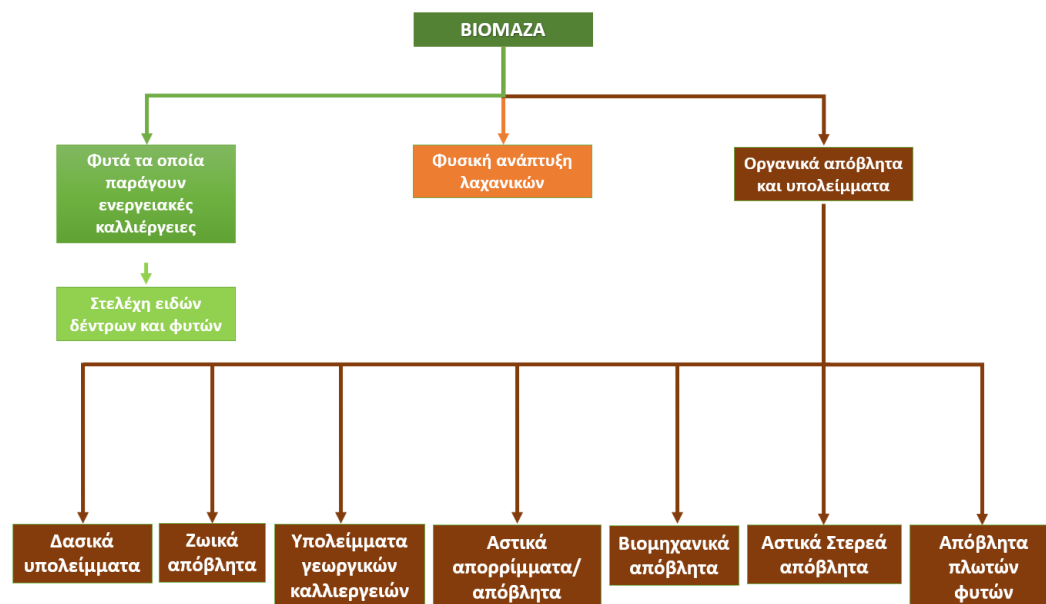
ταχεία εξάπλωση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τη βιομάζα[2].Ειδικότερα, οι γεωργικές και αγροτοβιομηχανικές δραστηριότητες παράγουν τεράστιες ποσότητες υπολειμματικής βιομάζας, που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως πρώτες ύλες ενισχύοντας τις τοπικές οικονομίες και ελαχιστοποιώντας παράλληλα τα προβλήματα διαχείρισης των αποβλήτων. Για την ακρίβεια, η συνολική εκτιμώμενη ποσότητα γεωργικών αποβλήτων, παραπροϊόντων και υποπροϊόντων στην ΕΕ ανέρχεται περίπου σε 18.4 δισεκατομμύρια τόνους [5].

## 1.2 Ο ρόλος της βιομάζας και συμβατική αξιοποίηση της βιομάζας

Προκειμένου τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης να εκπληρώσουν τις υποχρεώσεις τους και να ακολουθήσουν τους όρους και την ενεργειακή πολιτική που θεσπίστηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση σύμφωνα με τις αντίστοιχες αγορές ενέργειας και τους διαθέσιμους πόρους, δηλαδή να μειώσουν τις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα, αέριο το οποίο ευθύνεται για το φαινόμενο του θερμοκηπίου και τις επιπτώσεις του στον πλανήτη, καθίσταται αναγκαία η αξιοποίηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Είναι αξιοσημείωτο το γεγονός πως το μεγαλύτερο ποσοστό των εκπομπών του CO<sub>2</sub> προέρχεται από την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Για το σκοπό αυτό, η εκμετάλλευση της βιομάζας μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην επίτευξη των στόχων της ΕΕ όσον αφορά τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έως το 2030 και μετά[1,2,4].

Αρχικά, ο όρος βιομάζα περιγράφει κάθε υλικό οργανικής προέλευσης. Ως εκ τούτου, η βιομάζα περιλαμβάνει τους φυτικούς και ζωικούς οργανισμούς, τα αντίστοιχα απόβλητα ή υπολείμματα τους και με την ευρύτερη έννοια όλα τα προϊόντα μετατροπής τους όπως χαρτί ή κυτταρίνη, οργανικά υπολείμματα από τη βιομηχανία τροφίμων και τα νοικοκυριά, το εμπόριο και τη βιομηχανία. Η οδηγία 2009/28/ΕΚ παρείχε έναν νέο ορισμό (με νόμο) για τη λέξη «βιομάζα» που μπορεί να οριστεί ως «το βιο-αποδομήσιμο κλάσμα προϊόντων, αποβλήτων και υπολειμμάτων βιολογικής προέλευσης από τη γεωργία (συμπεριλαμβανομένων φυτικών και ζωικών ουσιών), της δασοκομίας και των συναφών βιομηχανιών, συμπεριλαμβανομένων της αλιείας και της υδατοκαλλιέργειας, καθώς και των βιομηχανικών και αστικών αποβλήτων». Συγκεκριμένα, η βιομάζα και τα απόβλητα ορίζονται διαφορετικά από χώρα σε χώρα. Σε ορισμένες χώρες, ο όρος βιομάζα χρησιμοποιείται για οποιαδήποτε οργανική ύλη φυτικής προέλευσης διαθέσιμη σε ανανεώσιμη βάση (ενεργειακές καλλιέργειες και δέντρα, γεωργικά τρόφιμα και καλλιέργειες ζωοτροφών, απόβλητα και υπολείμματα γεωργικών καλλιεργειών, απόβλητα και υπολείμματα ξύλου, υδρόβια φυτά, ζωικά απόβλητα, αστικά απόβλητα και άλλα απόβλητα. Σε άλλες χώρες, ο όρος βιομάζα ορίζεται πιο αυστηρά και θεωρεί ότι η βιομάζα σημαίνει μόνο τα παραπροϊόντα και υπολείμματα που προέρχονται από γεωργικές και δασικές πηγές και χρησιμοποιεί μια ξεχωριστή κατηγορία, για τα απόβλητα καύσιμα, τα απόβλητα των ανθρώπων, αστικών και βιομηχανικών διεργασιών. Συνοπτικά, η βιομάζα αποτελεί μια οργανική ύλη που έχει στους χημικούς δεσμούς της αποθηκευμένα ποσοστά ηλιακής ενέργειας που συλλέγονται κατά τη διάρκεια της ζωής τους, μέσω της διεργασίας της

φωτοσύνθεσης. Όταν διασπώνται οι δεσμοί μεταξύ των μορίων της βιομάζας απελευθερώνεται ενέργεια, η οποία συλλέγεται και αξιοποιείται με την κατάλληλη μέθοδο[24].



**Σχήμα 3. Κατηγοριοποίηση Βιομάζας.**

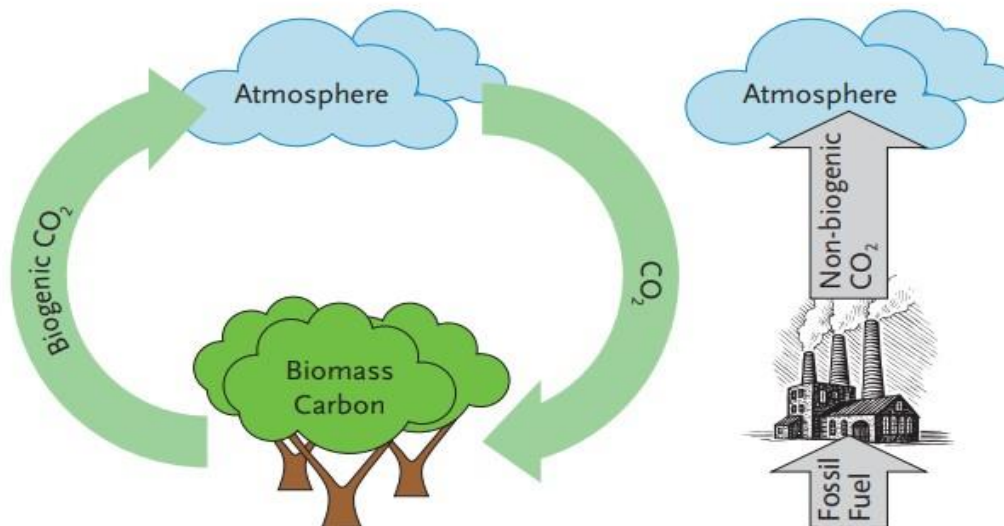
Στο Σχήμα 3 απεικονίζεται η ταξινόμηση της βιομάζας σε τρεις βασικές κατηγορίες με κριτήριο την προέλευση της. Στην πρώτη κατηγορία συναντώνται οι ανθρωπογενείς καλλιέργειες όπως και όλα τα προϊόντα παραγωγής, τα οποία μετά τον κύκλο ζωής τους συλλέγονται και καταλήγουν σε περαιτέρω επεξεργασία. Έπειτα στην δεύτερη κατηγορία παρουσιάζονται τα προϊόντα που αναπτύσσονται φυσικά χωρίς την παρέμβαση του ανθρώπου. Τέλος, στην τρίτη και τελευταία κατηγορία τοποθετούνται τα ανθρωπογενή οργανικά απόβλητα και υπολείμματα, τα οποία απαιτούν επιπρόσθετη επεξεργασία, προκειμένου να αποτελέσουν πρώτη ύλη κατάλληλη να καταλήξει σε μηχανικές διεργασίες αξιοποίησης βιομάζας.

Τέλος, σε χημικό επίπεδο η βιομάζα αποτελείται από τρία βασικά τμήματα, τα οποία είναι τα εξής:

1. Αρχικά το πρώτο αποτελεί το οργανικό, το οποίο αποτελείται από C, O<sub>2</sub> και H<sub>2</sub> και αποκαλείται συνήθως το ξηρό τμήμα της βιομάζας (το οποίο μετά την αντίδραση δεν εμφανίζει καθόλου τέφρα).
2. Το δεύτερο τμήμα αποτελείται από το ανόργανο μέρος και για την ακρίβεια από οξείδια μετάλλων, τα οποία είναι υπεύθυνα για τη δημιουργία τέφρας μετά την αντίδραση.
3. Και τέλος, αποτελείται από ένα ποσοστό υγρασίας.

Ο πιο διαδεδομένος και βασικός τρόπος αξιοποίησης της βιομάζας είναι αυτός της διεργασίας της καύσης. Με τη μέθοδο αυτή, συλλέγεται η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στους δεσμούς της. Αξίζει σε αυτό το σημείο, να αναφερθεί πως η καύση της βιομάζας συμβάλλει στην μείωση του διοξειδίου του άνθρακα. Για την ακρίβεια το ποσοστό του CO<sub>2</sub> που δημιουργείται από την καύση της είναι ελάχιστο σε σχέση με το ποσοστό που δεσμεύει το φυτό σε όλο τον κύκλο ζωής του.

Τα τελευταία χρόνια, η χρήση και αξιοποίηση της βιομάζας εδραιώνεται ολοένα και περισσότερο. Το χαμηλό κόστος καλλιέργειας σε σχέση με το χαμηλό ποσοστό ενέργειας που απαιτείται για την συλλογή της αποτελούν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις υπόλοιπες πηγές ανανεώσιμης ενέργειας. Τέλος, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4 δεν μπορεί να παραλειφθεί το γεγονός ότι στην διαδικασία παραγωγής βιομάζας εκπέμπονται μηδαμινοί ρύποι, σε αντίθεση με τις υψηλές εκπομπές ρύπων και CO<sub>2</sub> που ελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα από τα ορυκτά καύσιμα[2].



Σχήμα 4. Εκπομπές CO<sub>2</sub> της βιοενέργειας στην ατμόσφαιρα (αριστερά) και εκπομπές CO<sub>2</sub> της ενέργειας προερχόμενη από ορυκτά καύσιμα (δεξιά).

### 1.3 Ενεργειακή αξιοποίηση βιομάζας

Όσον αφορά την εκμετάλλευση της βιομάζας για παραγωγή ενέργειας, σχεδόν το 40% του συνολικού δυναμικού βιοενέργειας περιορίζεται στην παραδοσιακή χρήση της βιομάζας στη θέρμανση και το μαγείρεμα [2]. Για την ακρίβεια, 1.5 δισεκατομμύριο άνθρωποι παγκοσμίως εξακολουθούν να μην έχουν πρόσβαση σε ηλεκτρισμό και εξακολουθούν να βασίζονται στην παραδοσιακή χρήση βιοενέργειας για την κάλυψη των καθημερινών τους αναγκών [2]. Επιπλέον, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με βάση τη βιομάζα επιτυγχάνεται κυρίως σε

συμβατικούς θερμοηλεκτρικούς σταθμούς [11], οι οποίοι επιτυγχάνουν χαμηλές ηλεκτρικές αποδόσεις [12-16]. Πράγματι, η καύση βιομάζας σε κινητήρες Stirling, οργανικούς κύκλους Rankine ή ατμοστρόβιλους για παραγωγή ενέργειας, οι οποίοι διέπονται από τους θερμοδυναμικούς περιορισμούς του κύκλου Carnot, έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με χαμηλές αποδόσεις, οι οποίες κυμαίνονται από 10 έως 30% [17-19]. Ωστόσο, προκειμένου να υπάρξει πλήρης αξιοποίηση της βιομάζας υπάρχουν διαθέσιμες σήμερα πολλές θερμοχημικές (π.χ. πυρόλυση και αεριοποίηση) και βιοχημικές (π.χ. ζύμωση και αναερόβια/αερόβια χώνευση) διεργασίες για την αποτελεσματική μετατροπή της βιομάζας σε αέρια, υγρά και στερεά βιοκαύσιμα. Αυτά τα προϊόντα μπορούν με τη σειρά τους, ως ενεργειακοί φορείς να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια, θερμότητα, καύσιμα ή/και χημικά προϊόντα σε καθιερωμένες και ευρέως εφαρμόσιμες βιομηχανικές τεχνολογίες [20,21].

Ανεξάρτητα με τη διεργασία στην οποία υπόκεινται η βιομάζα, το ποσοστό της παραγόμενης ενέργειας παραμένει σταθερό και ισούται με τη θερμική αξία της βιομάζας. Είναι αξιοσημείωτο να αναφερθεί, πως ανάλογα με τη διαδικασία που αξιοποιείται η βιομάζα το προϊόν που παράγεται έχει διαφορετικές λειτουργίες και χρήσεις. Για την ακρίβεια, μέσω της άμεσης καύσης ο θερμός αέρας που παράγεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας για θερμότητα, είτε να χρησιμοποιηθεί για την τροφοδοσία ενός ατμοστρόβιλου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ακόμη, μέσω της αεριοποίησης παράγεται ένα αέριο το οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί σε καυστήρες αέριων ως καύσιμο καθώς και σε μηχανές εσωτερικής καύσης (MEK).[20,21]

Το σενάριο NZE της ΕΕ προβλέπει ότι η παραδοσιακή χρήση βιοενέργειας θα καταργηθεί σταδιακά μέχρι το 2030. Στο πλαίσιο αυτής της πρόβλεψης, οι σύγχρονες μορφές βιοενέργειας (βιο-αέριο, αέριο σύνθεσης, βιο-καύσιμα) θα αντιπροσωπεύουν τον πυλώνα της βιώσιμης ανάπτυξης, εμφανίζοντας μια αξιοσημείωτη αύξηση, από 8610 TWh το 2020 σε 21000 TWh το 2050 [1,2]. Στο συγκεκριμένο πλαίσιο, η ορθολογική αξιοποίηση της βιομάζας για παραγωγή ενέργειας, αποτελεί μία υποσχόμενη οδό προς ένα βιώσιμο και ανθρακικά ουδέτερο ενεργειακό μέλλον. Η ενέργεια προερχόμενη από βιομάζα μπορεί να αξιοποιηθεί σε διάφορες θερμοχημικές (αεριοποίηση, πυρόλυση, άμεση καύση) και βιοχημικές (ζύμωση, αναερόβια χώνευση) διεργασίες [19,20].

### 1.3.1 Πυρόλυση βιομάζας

Η πυρόλυση αποτελεί μια ενδόθερμη θερμοχημική διεργασία η οποία λαμβάνει χώρα σε χαμηλές, ενδιάμεσες ή υψηλές θερμοκρασίες (με εύρος που κυμαίνεται από 300 - 800 °C) απουσία οξυγόνου, μετατρέποντας τη στερεή βιομάζα σε υγρά (βιο-έλαιο) και αέρια βιοκαύσιμα (αέριο σύνθεσης-syngas), καθώς και σε στερεό εξανθράκωμα (βιο-εξανθράκωμα). Οι επιμέρους αποδόσεις κάθε φάσης ποικίλλουν ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας, όπως η θερμοκρασία, ο ρυθμός θέρμανσης, ο χρόνος παραμονής και η χρήση ενός καταλύτη [13,20]. Ειδικότερα, τα προϊόντα που προέρχονται από την πυρόλυση της βιομάζας

αποτελούνται από ένα στερεό ανθρακούχο υπόλειμμα (βιο-εξανθράκωμα), ένα υγρό προϊόν που αποτελείται από πολύπλοκες οργανικές ενώσεις, οι οποίες συνήθως αναφέρονται ως έλαιο πυρόλυσης ή βιο-έλαιο, και από μη συμπυκνώσιμα αέρια (δηλ. CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> και ελαφρούς υδρογονάνθρακες). Το νερό και η τέφρα είναι άλλα υποπροϊόντα που παράγονται κατά τη θερμική αποσύνθεση της βιομάζας [21-24]. Σύμφωνα με τη International Biochar Initiative (IBI), το βιο-εξανθράκωμα χαρακτηρίζεται από υψηλό ποσοστό στοιχειακού άνθρακα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ενεργειακές, γεωργικές και περιβαλλοντικές εφαρμογές. Για παράδειγμα, το βιο-εξανθράκωμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας ως καύσιμο για τη συμπαραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ισχύος (Combined Heat and Power Generation-CHP) μέσω ολοκληρωμένων κύκλων καύσης και αεριοποίησης και η απόδοσή του μεγιστοποιείται σε χαμηλές θερμοκρασίες πυρόλυσης και υψηλούς χρόνους παραμονής [22]. Επιπλέον, λόγω της πορώδους δομής του, το βιο-εξανθράκωμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό με ευεργετικές επιδράσεις στην απόδοση των θρεπτικών ουσιών του εδάφους, την επιφάνεια και την κατακράτηση νερού. Το βιο-έλαιο που παράγεται από την διαδικασία της πυρόλυσης, είναι ένα σύνθετο χημικό μείγμα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε ως καύσιμο είτε ως πρώτη ύλη για την εξαγωγή χημικών ουσιών υψηλής προστιθέμενης αξίας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη βιομηχανία τροφίμων, φαρμακευτικών ή και καλλυντικών [23,24] και η παραγωγή του ευνοείται σε ενδιάμεσες θερμοκρασίες πυρόλυσης και γρήγορους χρόνους παραμονής.

Η θερμοκρασία και ο ρυθμός θέρμανσης είναι οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την κατανομή των προϊόντων πυρόλυσης [25]. Σε γενικές γραμμές, με βάση τη θερμοκρασία και το ρυθμό θέρμανσης, υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τύποι πυρόλυσης. Οι χαμηλές θερμοκρασίες και οι χαμηλοί ρυθμοί θέρμανσης (αργή πυρόλυση) ευνοούν την παραγωγή εξανθρακώματος [25]. Η γρήγορη πυρόλυση σε υψηλές θερμοκρασίες, υψηλούς ρυθμούς θέρμανσης και με μεγάλους χρόνους παραμονής ευνοεί την παραγωγή αερίων, ενώ η γρήγορη πυρόλυση σε περίπου 500 °C (ενδιάμεσες θερμοκρασίες) και με σύντομους χρόνους παραμονής οδηγεί στη μεγιστοποίηση της απόδοσης προς βιο-έλαιο(60 - 80 %) [24]. Η ενδιάμεση ή συμβατική πυρόλυση που διεξάγεται σε μέσες θερμοκρασίες και μέσους χρόνους παραμονής οδηγεί σε ισοκατανεμημένη απόδοση σε αέρια, υγρά και στερεά προϊόντα [26].

### 1.3.2 Αεριοποίηση βιομάζας

Η αεριοποίηση αποτελεί μία άλλη θερμοχημική μέθοδο για τη μετατροπή της βιομάζας σε αέριο σύνθεσης(syngas), το οποίο είναι πλούσιο σε H<sub>2</sub>. Οι διεργασίες ενδόθερμης αεριοποίησης λαμβάνουν χώρα συνήθως σε υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις 1-10 bar, μέσω της χρήσης ενός οξειδωτικού μέσου (αέρας/οξυγόνο, ατμός, CO<sub>2</sub> ή οποιοδήποτε μείγμα αυτών) για τη μετατροπή της στερεής πρώτης ύλης σε αέρια προϊόντα. Ανάλογα, με το μέσο αεριοποίησης που χρησιμοποιείται, δίνεται η δυνατότητα να ρυθμιστεί η σύσταση των τελικών προϊόντων. Το παραγόμενο αέριο σύνθεσης, το οποίο είναι ένα μείγμα που περιέχει κυρίως H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> και μικρότερες ποσότητες CH<sub>4</sub> και ελαφρών υδρογονανθράκων (όπως αιθένιο C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> και αιθάνιο C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), υποβάλλεται σε διάφορα στάδια καθαρισμού είτε σε χαμηλή

είτε σε υψηλή θερμοκρασία [25,26] (π.χ. για απομάκρυνση των SOx και NOx) και μπορεί στη συνέχεια να αξιοποιηθεί ως καύσιμο σε μονάδες συνδυασμένης παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρικής ισχύος (Combined Heat and Power-CHP), σε κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFCs) ή ως πρώτη ύλη για την παραγωγή καυσίμων και χημικών προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας [27-29]. Παρόλο, που η αεριοποίηση βιομάζας παρέχει υψηλές αποδόσεις αερίου σύνθεσης και υδρογόνου με πολύ χαμηλές εκπομπές [30-32], καταναλώνει σημαντικές ποσότητες θερμότητας λόγω των υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας και των μονάδων διαχωρισμού αέρα [19].

### 1.3.3 Κυψέλη Καυσίμου στερεών οξειδίων –Solid Oxide Fuel Cells (SOFC)

Οι κυψέλες καυσίμου (fuel cells) είναι διατάξεις που μετατρέπουν την χημική ενέργεια του υδρογόνου (ή κάποιου άλλου καυσίμου) απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα, μέσω ηλεκτροχημικών αντιδράσεων. Το υδρογόνο ως καύσιμο μπορεί να τροφοδοτείται στην κυψέλη καυσίμου, ως πρόσμιξη με άλλα αέρια (όπως CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO), είτε υπό τη μορφή υδρογονανθράκων (όπως φυσικό αέριο, CH<sub>4</sub>), είτε σε μορφή υγρών υδρογονανθράκων (όπως μεθανόλη CH<sub>3</sub>OH). Ακόμη, δεδομένου ότι ο ατμοσφαιρικός αέρας περιέχει αρκετό οξυγόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις κυψέλες καυσίμου. Τέλος, τα προϊόντα που παράγονται στην κυψέλη καυσίμου είναι νερό και αρκετή ποσότητα θερμότητας. Η κυψέλη καυσίμου αποτελείται από έναν ηλεκτρολύτη, ένα θετικό και ένα αρνητικό ηλεκτρόδιο (τα οποία δεν υποβάλλονται σε αλλαγές ως προς την χημική τους σύσταση) και παράγει συνεχή ηλεκτρική τάση μέσω των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων. Η αρχή λειτουργίας της μοιάζει με αυτή ενός ηλεκτροχημικού συσσωρευτή, με τη διαφορά ότι απαιτεί συνεχή τροφοδοσία καυσίμου και οξυγόνου[43,45].

Οι κυψέλες καυσίμου είναι μια πολλά υποσχόμενη ενεργειακή τεχνολογία με πληθώρα πιθανών εφαρμογών, λόγω των εξαιρετικών ιδιοτήτων που παρουσιάζουν σε σύγκριση με τις υπάρχουσες συμβατικές τεχνολογίες μετατροπής ενέργειας. Ακόμη, παρουσιάζουν υψηλότερο θερμοδυναμικό βαθμό απόδοσης σε σχέση με τις θερμικές μηχανές, όπως οι μηχανές εσωτερικής καύσης, οι ατμοστρόβιλοι και οι αεριοστρόβιλοι και εμφανίζουν αρκετά πλεονεκτήματα έναντι των θερμικών μηχανών[42,45,46].

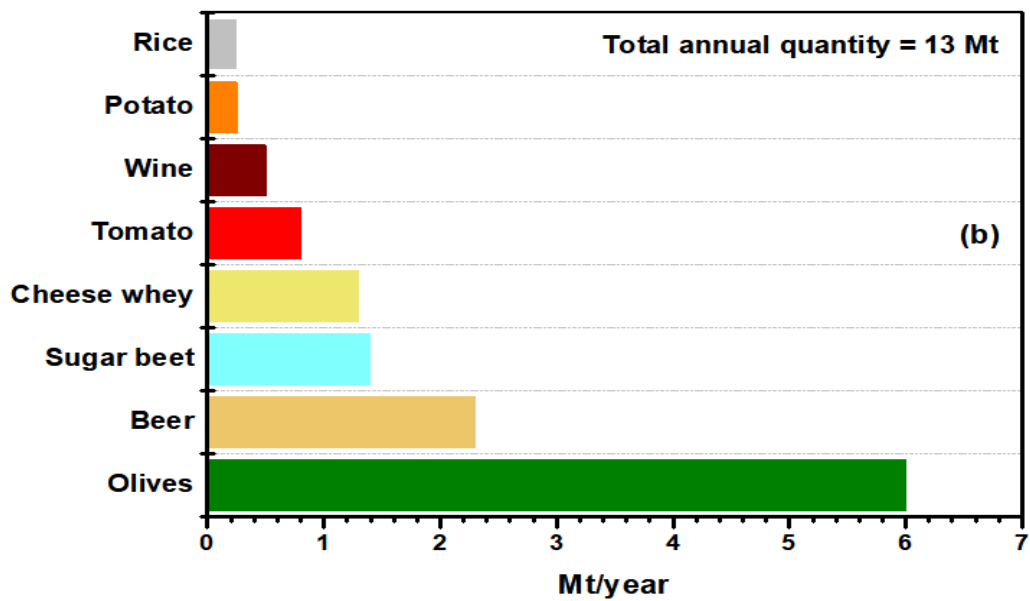
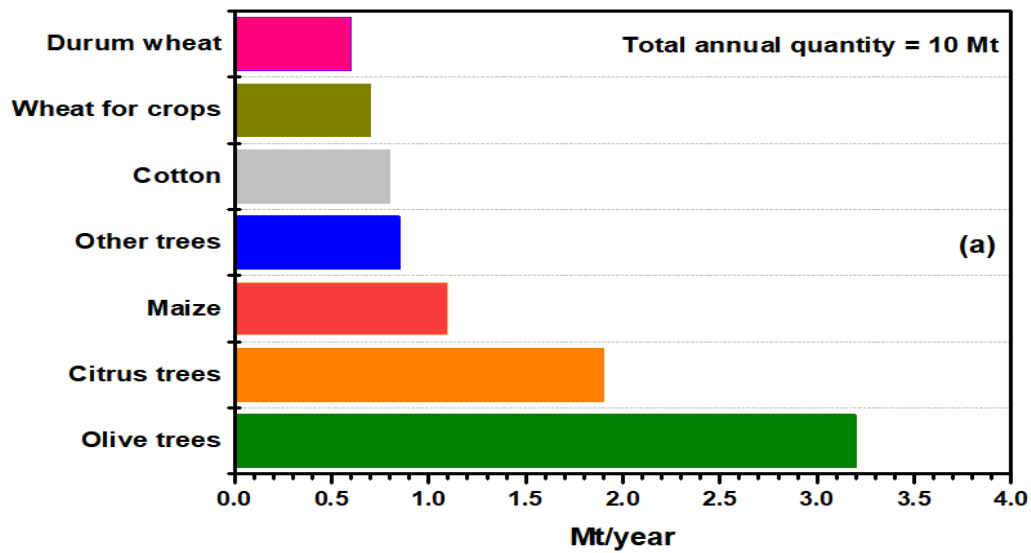
Οι κυψέλες καυσίμου χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με τον τύπο του ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιούν. Υπάρχουν διάφοροι τύποι κυψελών καυσίμου, όπως: μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων, φωσφορικού οξέος, αλκαλικές, τήγματος ανθρακικών αλάτων και στερεών οξειδίων. Οι συστοιχίες κυψελών καυσίμου, ανάλογα με τον τύπο και το μέγεθός τους, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για οικιακή ή βιομηχανική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στις βιομηχανικές τους εφαρμογές, πέραν της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, γίνεται εκμετάλλευση και της παραγόμενης θερμότητας για τη θέρμανση χώρων ή τη θέρμανση υλικών σε μια βιομηχανική διεργασία.[43,44] Στις κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC), χρησιμοποιείται ως ηλεκτρολύτης ένα σκληρό, μη πορώδες στερεό οξείδιο. Αυτές οι κυψέλες, λαμβάνουν χώρα σε υψηλές θερμοκρασίες(800-1000°C), στις οποίες έχουμε αγωγή



ιόντων οξυγόνου. Οι υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας θέτουν αυστηρές απαιτήσεις ανθεκτικότητας στα υλικά, αλλά ταυτόχρονα καταργούν την ανάγκη για καταλύτη από πολύτιμα μέταλλα, μειώνοντας έτσι το κόστος. Ακόμη, εμφανίζουν τη μεγαλύτερη ανθεκτικότητα στις προσμίξεις θείου (S), με αποτέλεσμα να μπορούν να ανεχθούν πολύ μεγαλύτερες ποσότητες θείου από ότι οι άλλοι τύποι κυψελών καυσίμου, καθώς επίσης δεν επηρεάζονται εύκολα από το μονοξείδιο του άνθρακα (CO). Οι ιδιότητες αυτές επιτρέπουν στις κυψέλες καυσίμου SOFC να χρησιμοποιούν φυσικό αέριο, βιοαέριο και άλλους υδρογονάνθρακες. Τέλος, το πιο σημαντικό πλεονέκτημα που εμφανίζουν, έναντι άλλων κυψελών καυσίμου είναι η υψηλή απόδοση. Για την ακρίβεια, η συνολική απόδοση χρήσης του καυσίμου κυμαίνεται περίπου στο 60%, ενώ σε εφαρμογές που συλλέγουν και αξιοποιούν την εκλυόμενη θερμότητα του συστήματος, η συνολική απόδοση μπορεί να ανέλθει ακόμη και σε 85%. Έτσι, οι διατάξεις κυψελών καυσίμου, συνιστανται για την παραγωγή ισχύος σε σταθερές εφαρμογές [40,42,46].

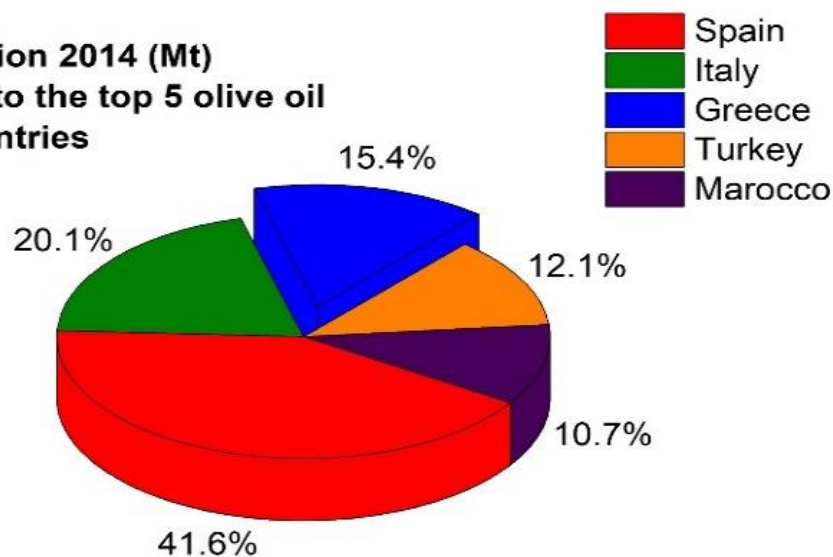
#### **1.4 Δυναμικό βιομάζας από την βιομηχανία παραγωγής ελαιολάδου στην Ελλάδα**

Στην Ελλάδα, η μέση ετήσια ποσότητα ζωικών αποβλήτων, ανέρχεται σε 26 Mt/έτος, ενώ η μέση ετήσια ποσότητα γεωργικών και αγροτοβιομηχανικών υπολειμμάτων είναι, 10 και 13 Mt/έτος (Σχήμα 5a.b), αντίστοιχα [6,7]. Η εκτιμώμενη ενέργεια από τα ανωτέρω υπολείμματα ισούται με 77 TWh [7]. Στο παρόν πλαίσιο, ιδιαίτερα ελπιδοφόρα είναι η χρήση υπολειμμάτων από τη βιομηχανία ελαιολάδου ως πηγή βιομάζας για την παραγωγή ενέργειας. Πράγματι, η καλλιέργεια ελαιόδεντρων για την παραγωγή ελαιολάδου είναι μια παραδοσιακή γεωργική δραστηριότητα στην περιοχή της Μεσογείου εδώ και χιλιάδες χρόνια. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6, χρησιμοποιώντας δεδομένα που λαμβάνονται από τον Διεθνή Οργανισμό Ελαιολάδου [8], η Ισπανία, η Ιταλία, η Ελλάδα η Τουρκία και το Μαρόκο αντιπροσωπεύουν τις χώρες με την μεγαλύτερη παραγωγή ελαιολάδου παγκοσμίως. Επίσης, η Ελληνική βιομηχανία ελαιολάδου είναι η τρίτη μεγαλύτερη παγκοσμίως, με ετήσια παραγωγή περίπου 300 ktn/έτος [7,9,10]. Ειδικότερα, τα υπολείμματα της βιομηχανίας ελαιολάδου αντιπροσωπεύουν σχεδόν το 40% του εκμεταλλεύσιμου δυναμικού των γεωργικών (κλάδεμα και φύλλα ελιάς) και αγροτοβιομηχανικών (πυρήνας ελιάς, φλούδες, κουκούτσια, πυρηνέλαιο) υπολειμμάτων στην Ελλάδα [7,9]. Σε όλη την αλυσίδα εφοδιασμού της βιομηχανίας ελαιολάδου, παράγεται ένα ευρύ φάσμα υποπροϊόντων (π.χ. πυρήνες ελιάς, πυρηνέλαιο, κλαδέματα), τα οποία αντιμετωπίζονται κυρίως ως απόβλητα, μολονότι υπάρχει η δυνατότητα για αξιοποίησή τους προς παραγωγή βιοενέργειας.



Σχήμα 5(a),(b). Δυναμικό γεωργικών(a) και αγροτοβιομηχανικών υπολειμμάτων(b) στην Ελλάδα.

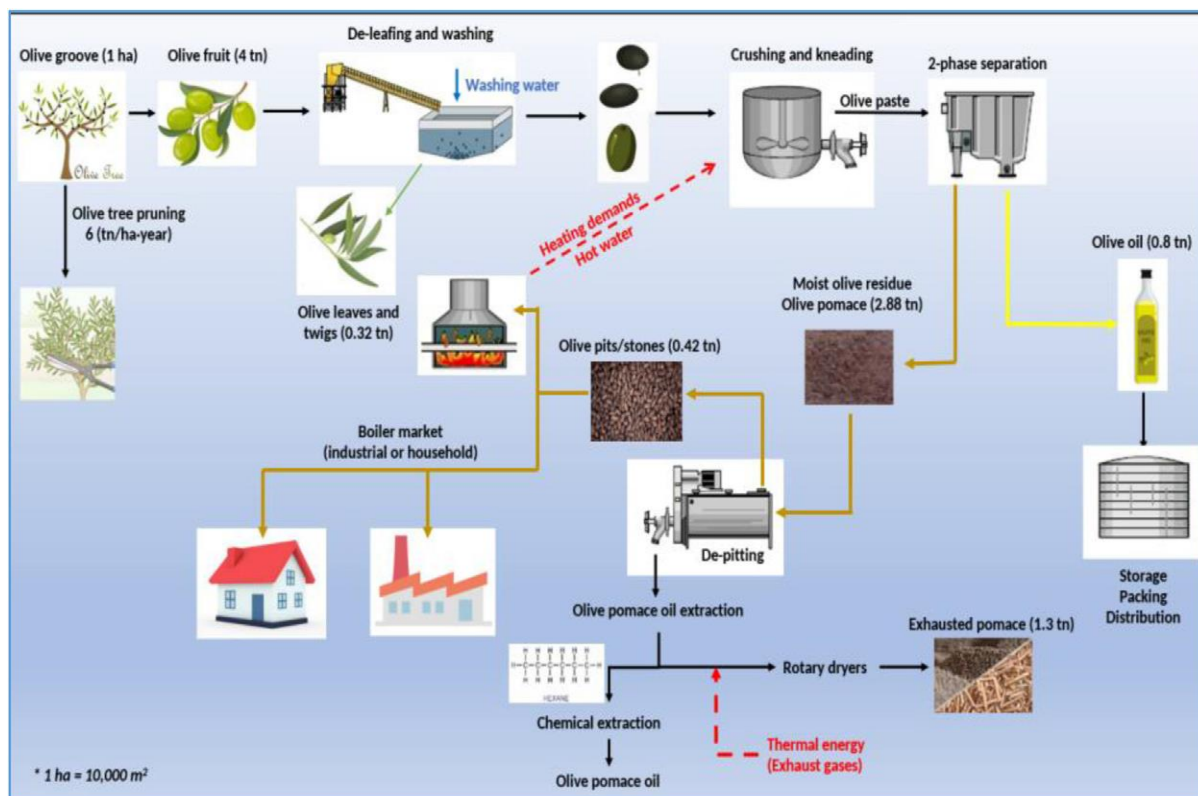
**Olives production 2014 (Mt)  
corresponding to the top 5 olive oil  
producing countries**



*Σχήμα 6. Χώρες με τη μεγαλύτερη παραγωγή ελαιολάδου παγκοσμίως.*

Η διαχείριση αυτών των υπολειμμάτων, μπορεί να αποφέρει οικονομικά καθώς και περιβαλλοντικά οφέλη. Τα στερεά υπολείμματα που προέρχονται από τη βιομηχανία ελαιολάδου αποτελούν υποσχόμενους πόρους βιομάζας, με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα παραπάνω μπορούν να γίνουν καλύτερα κατανοητά εξετάζοντας την τυπική διαδικασία εκχύλισης ελαιολάδου και τις αντίστοιχες μαζικές παροχές, όπως απεικονίζονται παρακάτω στο Σχήμα 7. Όπως φαίνεται ένας τόνος ελαιοκάρπου παράγει μόνο 200 κιλά παρθένου ελαιολάδου. Η υπόλοιπη ποσότητα (δηλαδή 800 κιλά) αντιστοιχεί στα υποπροϊόντα της διαφασικής διαδικασίας εκχύλισης ελαιολάδου: 100 κιλά ελαιοπυρήνα και 700 κιλά πάστα ελιάς. Τα υποπροϊόντα από τις δραστηριότητες κλαδέματος αντιπροσωπεύουν μια επιπρόσθετη και άφθονη πηγή υπολειμμάτων που αντιστοιχεί σε ετήσια δυναμικότητα περίπου 6 tn/ha (1 εκτάριο αντιστοιχεί σε 10 στρέμματα),



Σχήμα 7. Σχηματική απεικόνιση της βιομηχανίας της παραγωγής ελαιολάδου και των υπολειμμάτων σε μια τυπική διφασική διαδικασία εκχύλισης ελαιολάδου.

Έτσι, έπειτα από την αξιοποίηση του αρχικού προϊόντος της ελιάς, προς παραγωγή ελαιολάδου η υπολειμματική ποσότητα ελαιοπυρήνα που υπάρχει στην Ελλάδα είναι αρκετά μεγάλη. Ο ελαιοπυρήνας δεδομένου του χαμηλού κόστους και της αφθονίας στην οποία βρίσκεται, αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη μορφή βιομάζας. Η καύση του ελαιοπυρήνα είναι διαδεδομένη και εύχρηστη σε συμβατικούς καυστήρες με σκοπό την παραγωγή θερμότητας, σε αντίθεση με την ενεργειακή του μετατροπή μέσω αεριοποίησης ή πυρόλυσης, η οποία δεν έχει αποτελέσει το επίκεντρο αρκετών ερευνών. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω η εργασία αυτή επικεντρώθηκε στην συνδυασμένη διεργασία πυρόλυσης, αεριοποίησης και κυψέλης καυσίμου στερεών οξειδίων για την αποδοτική μετατροπή του ελαιοπυρήνα προς παραγωγή βιο-ελαίου και ηλεκτρικής ενέργειας.

## 1.5 Ανασκόπηση συνδυασμένων διεργασιών ενεργειακής αξιοποίησης βιομάζας

Υπάρχουν πολυάριθμες μελέτες σχετικά με τις τεχνικές και οικονομικές παραμέτρους της πυρόλυσης και της αεριοποίησης διαφόρων καυσίμων βιομάζας [27,29,33,34]. Επιπλέον,

κάποιοι ερευνητές μελέτησαν συνδυασμένους κύκλους πυρόλυσης και ολοκληρωμένους κύκλους αεριοποίησης για την παραγωγή αερίου σύνθεσης και βιο-ελαίου [11,19,35]. Για παράδειγμα, η Karittha Im-orb και οι συνεργάτες της [19] διερεύνησαν την παραγωγή αερίου σύνθεσης και βιο-ελαίου από τη συνδυασμένη διεργασία αεριοποίησης και πυρόλυσης χρησιμοποιώντας ως πρώτη ύλη βιομάζας άχυρο ρυζιού. Έτσι, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι, σε σύγκριση με τη συμβατική αεριοποίηση, ο ολοκληρωμένος κύκλος πυρόλυσης και αεριοποίησης βιομάζας προσφέρει υψηλότερη ενεργειακή απόδοση και βιο-έλαιο ως πρόσθετο προϊόν. Είναι ενδιαφέρον ότι η εμπορική εφαρμογή ολοκληρωμένων κύκλων συνδυασμένης πυρόλυσης και αεριοποίησης απαιτεί πρόσθετες μονάδες (π.χ. μηχανές εσωτερικής καύσης, κυψέλες καυσίμου, πετρελαιοκινητήρες) με επιπλέον κόστος, για την περαιτέρω αξιοποίηση των απαερίων της ανόδου της κυψέλης καυσίμου προς την συνδυασμένη παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ισχύος (Combined Heat and Power Generation-CHP).

Σε συνέχεια των παραπάνω, υπάρχουν πολυάριθμες βιβλιογραφικές μελέτες που εξετάζουν τις τεχνικές και οικονομικές πτυχές της πυρόλυσης και των διεργασιών αεριοποίησης για μια μεγάλη ποικιλία τύπων βιομάζας [29-33]. Ωστόσο, μόνο λίγες μελέτες αναφέρονται σε ολοκληρωμένα συστήματα πυρόλυσης-αεριοποίησης βιομάζας που παράγουν ταυτόχρονα αέριο σύνθεσης και βιο-έλαιο [13,20,34]. Επιπλέον, αρκετές μελέτες επικεντρώθηκαν στη σύγκριση διαφορετικών συνδυασμών για συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας [35-39], αποκαλύπτοντας ότι τα συστήματα που ενσωματώνουν μονάδες αεριοποίησης και θερμικών μηχανών χαρακτηρίζονται από ηλεκτρική απόδοση της τάξης του 18-33% και θα μπορούσαν να είναι οικονομικά βιώσιμα για εμπορικές εφαρμογές, με την προϋπόθεση ότι η πρώτη ύλη θα είναι βιομάζα χαμηλού κόστους και θα υπάρχει ένα καλός σχεδιασμός και μία ομαλή λειτουργία της εφοδιαστικής αλυσίδας της βιομάζας [35,38]. Συνοπτικά, η συνδυασμένη διεργασία αεριοποίησης με κινητήρα εσωτερικής καύσης (Internal Combustion Engine-ICE) ή αεριοστρόβιλος/κινητήρες Diesel για τη συνδυασμένη παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος και θερμότητας (CHP), μπορεί να αποτελέσει μία οικονομικά βιώσιμη προσέγγιση για την αξιοποίηση βιομάζας σε μικρής έως και μεσαίας κλίμακας (<3 MW) συστήματα που βασίζονται στην αεριοποίηση. Ωστόσο, η χαμηλή ηλεκτρική απόδοση (συνήθως μικρότερη από 35%) πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπόψη ως πιθανό εμπόδιο για εφαρμογής τους σε εμπορική κλίμακα.

Όσον αφορά τη βελτίωση της ηλεκτρικής απόδοσης, η τεχνολογία κυψελών καυσίμου μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντί των τυπικών θερμικών μηχανών. Οι κυψέλες καυσίμου μετατρέπουν άμεσα τη χημική ενέργεια των καυσίμων σε ηλεκτρική ενέργεια, παρακάμπτοντας ουσιαστικά τους θερμοδυναμικούς περιορισμούς των συμβατικών κύκλων Carnot [40-42]. Συγκεκριμένα, οι κυψέλες καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFCs) και οι κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFCs) που χρησιμοποιούν ως ηλεκτρολύτη αγωγό ιόντων οξυγόνου αποτελούν τις πλέον συνήθεις τεχνολογίες κυψελών καυσίμου στις μέρες μας, και λειτουργούν σε χαμηλές και υψηλές θερμοκρασίες, αντίστοιχα [43-45]. Λόγω των υψηλότερων θερμοκρασιών λειτουργίας τους, οι κυψέλες καυσίμου SOFC παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα που σχετίζονται με υψηλότερη ηλεκτρική καθώς και συνολική απόδοση, ευελιξία στην επιλογή καυσίμου, χαμηλότερες απαιτήσεις καθαρισμού καυσίμου,

λιγότερη πολυπλοκότητα συστήματος και αποφυγή δαπανηρών μετάλλων, όπως είναι για παράδειγμα η πλατίνα που χρησιμοποιείται ως ηλεκτρόδιο στις PEMFC [43,45]. Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα των SOFCs είναι το γεγονός ότι προσφέρουν τη δυνατότητα να συνδυαστούν με ενδόθερμες διεργασίες (όπως, η αεριοποίηση βιομάζας), λόγω της εξώθερμης φύσης τους και της λειτουργίας τους σε υψηλές θερμοκρασίες [42]. Με αυτόν τον τρόπο, το πλούσιο σε  $H_2$  μίγμα αερίου σύνθεσης που παράγεται στην έξοδο ενός αεριοποιητή (δηλαδή μετά την απομάκρυνση της τέφρας, των πισσών και άλλων ακαθαρσιών) μπορεί να τροφοδοτηθεί απευθείας στον θάλαμο ανόδου μίας SOFC και να παράγει ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα μέσω της ηλεκτρο-οξειδωσης των καυσίμων χημικών ειδών, όπως το  $H_2$  το CO και το  $CH_4$  [40,46,47].

Όπως προαναφέρθηκε, η αεριοποίηση είναι μια αποτελεσματική διεργασία για την παραγωγή αερίου σύνθεσης (υδρογόνου και μονοξειδίου του άνθρακα) από στερεά καύσιμα, το οποίο αποτελεί ένα κατάλληλο μίγμα καυσίμου για τροφοδοσία σε κυψέλες καυσίμου υψηλών θερμοκρασιών, όπως οι SOFCs [41]. Έτσι, ο συνδυασμός της αεριοποίησης βιομάζας με κυψέλες καυσίμου υψηλών θερμοκρασιών αναμένεται να αποτελέσει ένα αποδοτικό σύστημα προς την συμπαραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος (CHP) [20]. Στο συγκεκριμένο πλαίσιο, οι Gadsbøll et al. [48] διερεύνησαν τη λειτουργία ενός συνδυασμένου αεριοποιητή Viking δύο σταδίων και μίας κυψέλης καυσίμου SOFC για πιθανή εμπορική εφαρμογή έως  $10 MW_{el}$ . Τα πειραματικά αποτελέσματα μιας μονάδας SOFC  $0.8 kW_{el}$  έδειξαν ότι η συνολική ηλεκτρική απόδοση του συστήματος ήταν περίπου 40%, λαμβάνοντας υπόψη την ηλεκτρική απόδοση και τον συντελεστή χρήσης καυσίμου του SOFC ίσα με 46% και 0.90, αντίστοιχα. Σε μια άλλη μελέτη [49], συγκρίθηκαν τέσσερα διαφορετικά σενάρια ενός συνδυασμένου διπλού ρευστοαιωρούμενου αεριοποιητή με υδρατμούς ως μέσο αεριοποίησης και μίας συστοιχίας SOFC κυλινδρικής γεωμετρίας, με τροφοδοσία βιομάζας  $330 kW_{th}$ . Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι για μια μονάδα SOFC  $120 kW_{el}$ , η θερμική σύζευξη μεταξύ αεριοποιητή και κυψέλης καυσίμου είναι η πιο αποτελεσματική μέθοδος που προσφέρει ηλεκτρική και συνολική απόδοση ίση με 27 και 84%, αντίστοιχα. Στην πραγματικότητα, η αποτελεσματικότητα των συστημάτων αεριοποίησης-SOFC μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω μέσω της εκμετάλλευσης της απορριπτόμενης θερμότητας και των άκαυστων απαερίων που εξέρχονται από την άνοδο της κυψέλης καυσίμου (off-gases) [44]. Ως εκ τούτου, η χρήση της χημικής ενέργειας και της θερμότητας από τα απαέρια της ανόδου της SOFC, μπορούν να ενισχύσουν περαιτέρω τη συνολική απόδοση του συστήματος. Από την άποψη αυτή, η C. Bang-Møller et al. [45] μοντελοποίησαν τρία συστήματα για τη συμπαραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος,  $140-250 kW_{el}$  και  $150-240 kW_{th}$ , αντίστοιχα, για σκοπούς τηλεθέρμανσης με βάση την αεριοποίηση βιομάζας με τροφοδοσία  $150 kg/h$ . Η προτεινόμενη διαμόρφωση μικρό-αεριοστρόβιλου (Micro Gas Turbine-MGT) οδήγησε σε ηλεκτρική απόδοση έως περίπου 26%, σημαντικά χαμηλότερη σε σύγκριση με το σύστημα αεριοποιητή-SOFC (36.5%). Παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον το γεγονός ότι συνδυάζοντας τις δύο διεργασίες, η ηλεκτρική απόδοση αυξήθηκε έως και 50% λόγω της αποτελεσματικής χρήσης του μη-αξιοποιήσιμου καυσίμου από την SOFC στον MGT. Με παρόμοιο τρόπο, ένα νέο σύστημα συνολικής παραγωγής ισχύος  $1.44 MW$  ( $1.08 MW_{el}$  και  $0.36 MW_{th}$ ) από βιομάζα ( $500 kg/h$ ) προτάθηκε σε μία άλλη συναφή εργασία, που αποτελούνταν από έναν αεριοποιητή, μία μονάδα SOFC, μία μηχανή Diesel και ένα σύστημα ανάκτησης της απορριπτόμενης

θερμότητας για συμπαραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας και επέτυχε ηλεκτρική και ολική απόδοση 54 και 68%, αντίστοιχα [21]. Επιπλέον, προτάθηκε ένα σύστημα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή συνθετικού φυσικού αερίου από ροκανίδια ξύλου [51] τροφοδοτώντας βιομάζα ίση με  $100 \text{ MW}_{\text{th}}$ . Η ηλεκτρική απόδοση της μονάδας υπολογίστηκε ίση με 46%, ενώ ακόμη πιο σημαντικό αποτελεί το γεγονός ότι η συνολική απόδοση (συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής θερμότητας) έφτασε σε πολύ υψηλά επίπεδα (90%). Από οικονομικής άποψης, το κόστος επένδυσης ήταν υψηλό λόγω του μεγάλου κόστους της SOFC και του αεριοποιητή. Η οικονομική ανάλυση της προτεινόμενης διεργασίας αποκάλυψε επίσης ότι η πώληση της παραγόμενης θερμότητας είναι ζωτικής σημασίας για την οικονομική βιωσιμότητα του εγχειρήματος. Η υψηλότερη καθαρή παρούσα αξία παρατηρήθηκε όταν η προτεινόμενη μονάδα παρήγαγε ταυτόχρονα ηλεκτρική ενέργεια και συνθετικό φυσικό αέριο.

## 1.6 Σκοπός διπλωματικής εργασίας

Όπως προαναφέρθηκε, η βιομηχανία ελαιολάδου αποτελεί τον κυρίαρχο πυλώνα των αγροτοβιομηχανικών υπολειμμάτων στην Ελλάδα, καθιστώντας έτσι τα υπολείμματα ελιάς σημαντική πηγή βιομάζας για την παραγωγή ενέργειας και καυσίμων μέσω ολοκληρωμένων και συνδυασμένων κύκλων αεριοποίησης. Υπάρχουν λίγες μελέτες σχετικά με την τεχνοοικονομική αξιολόγηση των υπολειμμάτων της βιομηχανίας ελαιολάδου (πάστα ελιάς, ελαιοπυρήνας) για εκμετάλλευση προς συμπαραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος και παραγωγή καυσίμων [35,47-58]. Για παράδειγμα, η Aguado et al. [52] προσομοίωσε μία συνδυασμένη διεργασία αξιοποίησης 300 tn/ημέρα ελαιοπυρήνα προς παραγωγή  $275 \text{ kW}_{\text{el}}$  και  $470 \text{ kW}_{\text{th}}$  μέσω ενός συνδυασμένου κύκλου αεριοποίησης-αεροστροβίλου προς συμπαραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας. Η ηλεκτρική ( $\eta_{\text{el}}$ ) και θερμική απόδοση ( $\eta_{\text{th}}$ ) του σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ήταν ίση με 18.8 και 32.3 %, αντίστοιχα. Με την υπόθεση πως ο σταθμός λειτουργεί 15 έτη, τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν πως η Καθαρή Παρούσα Αξία ήταν 500,000 € με τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας 0.10 €/kWh και η περίοδος αποπληρωμής ήταν 6-9 χρόνια. Ομοίως, η Dogru et al. [56] παρουσίασαν τα αποτελέσματα της εκμετάλλευσης 500 kg/hr πάστα ελιάς σε αεριοποιητή σταθερής κλίνης (Autothermal Fixed Bed-AFB) σε συνδυασμό με στρόβιλο Rankine (Organic Rankine Cycle Turbine – ORC). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας θα μπορούσε να παράγει καθαρή ηλεκτρική και θερμική ισχύ έως  $221 \text{ kW}_{\text{el}}$  και  $1356 \text{ kW}_{\text{th}}$ , αντίστοιχα, με ηλεκτρική και θερμική απόδοση ίση με 15 και 85%, αντίστοιχα. Προσπαθώντας να εξετάσει μια πιο νέα προσέγγιση, οι Fryda et al. [49] προσομοίωσαν την διεργασία αεριοποίησης 200 kg/hr βιομάζας από πυρήνα ελιάς σε τρεις διαφορετικούς ολοκληρωμένους κύκλους, συμπεριλαμβανομένου ενός αεριοποιητή, μιας κυψέλης καυσίμου στερεών οξειδίων ή/και ενός μικρο-αεροστροβίλου (Micro Gas Turbine-MGT), καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι το σύστημα αεριοποιητή υπό πίεση/SOFC/μικρο-αεροστροβίλου ήταν εκείνο με την υψηλότερη ηλεκτρική απόδοση ( $\eta_{\text{el}} = 40 \%$ ) παράγοντας  $350 \text{ kW}_{\text{el}}$ . Ωστόσο, από οικονομικής άποψης, ένα τέτοιο σύστημα πιθανότατα δεν θα ήταν εφικτό χωρίς αξιοσημείωτα έσοδα από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας λόγω του υψηλού

κόστους πάγιας επένδυσης της SOFC και του αεριοποιητή. Συμπερασματικά, σχεδόν όλες οι επικαιροποιημένες τεχνοοικονομικές μελέτες που αναφέρονται στην ενεργειακή αξιοποίηση των υπολειμμάτων ελιάς περιορίζονται σε ολοκληρωμένους κύκλους αεριοποίησης/στροβίλων χαμηλής απόδοσης που στοχεύουν σε συμπαραγωγή ηλεκτρικής ισχύος και θερμότητας (CHP).

Ενώ οι προαναφερθείσες μελέτες εξέτασαν αρκετούς τύπους βιομάζας, μπορούν να βρεθούν πολλά παραδείγματα μελετών στη βιβλιογραφία που επικεντρώνονται συγκεκριμένα στην εκμετάλλευση των υπολειμμάτων της βιομηχανίας ελαιολάδου (δηλαδή πυρηνέλαιου, πυρήνα και φλοιού ελιάς) για παραγωγή ενέργειας ή παραγωγή καυσίμου [52-58] μέσω πυρόλυσης [59-61] ή και αεριοποίησης [53,55,58,62,63]. Ειδικότερα και από όσο είναι γνωστό και από την βιβλιογραφία, η εκμετάλλευση υπολειμμάτων με βάση την ελιά σε συνδυασμένες διεργασίες πυρόλυσης/αεριοποίησης συμπληρώνεται σχεδόν πάντα και με μια διαδικασία για την χρήση του αερίου σύνθεσης, όπως για παράδειγμα για συμπαραγωγή σε θερμικούς κινητήρες και στροβίλους [52,53,55,58,64], ενώ μόνο ένα από αυτά εξετάζει την προσθήκη ενός συστήματος SOFC [60]. Επιπλέον, υπάρχει ένα κενό στη βιβλιογραφία σχετικά με την ενσωμάτωση της πυρόλυσης βιομάζας με την αεριοποίηση του βιο-εξανθρακώματος και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από SOFC που τροφοδοτείται με αέριο σύνθεσης, ανεξάρτητα από τον τύπο της βιομάζας [13,20].

Με βάση τα παραπάνω, στη παρούσα εργασία προτείνεται και αναλύεται τεχνικοοικονομικά μία ολοκληρωμένη διεργασία αξιοποίησης των υπολειμμάτων από τη βιομηχανία παραγωγής ελαιολάδου, και συγκεκριμένα του ελαιοπυρήνα. Πράγματι, βρέθηκε ότι η προτεινόμενη διεργασία για την συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και βιο-ελαίου που συνδυάζει διαδοχικά την πυρόλυση του ελαιοπυρήνα, την αεριοποίηση του παραγόμενου βιο-εξανθρακώματος, μία κυψέλη καυσίμου τύπου SOFC για συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας και ένα κύκλο Rankine για την περαιτέρω παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα απαέρια της SOFC, προσφέρει δυναμικά υψηλή ηλεκτρική απόδοση, παρά το γεγονός ότι ένα μέρος της τροφοδοσίας της βιομάζας χρησιμοποιείται για την παραγωγή βιο-ελαίου, ενώ υπάρχουν πολλές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν σχετικά με τη συνολική θερμική ολοκλήρωση, τη συνολική μετατροπή της βιομάζας και τη μεγιστοποίηση της απόδοσης συμπαραγωγής. Αυτές οι προκλήσεις αντιμετωπίστηκαν μέσω μιας θεωρητικής μεθοδολογίας που περιλαμβάνει τη λεπτομερή ανάλυση και προσομοίωση των ισοζυγίων μάζας και ενέργειας για κάθε υπομονάδα του προτεινόμενου συστήματος με τη χρήση του λογισμικού ASPEN Plus, συγκεκριμένα των εξής υπο-συστημάτων: i) αργή πυρόλυση πρωτογενούς βιομάζας, ii) αεριοποίηση βιο-εξανθρακώματος προς αέριο σύνθεσης, iii) λειτουργία SOFC για συμπαραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας, iv) χρήση μετακαυστήρα για παραγωγή θερμότητας υψηλής ποιότητας και v) έναν αμμοστρόβιλο για συμπληρωματική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της εκμετάλλευσης των υψηλής ποιότητας εσωτερικών ρευμάτων θερμότητας. Στη συνέχεια, η λεπτομερής τεχνική ανάλυση της προτεινόμενης διεργασίας συμπληρώθηκε με μία ενδελεχή αξιολόγηση της οικονομικής σκοπιμότητας μέσω της εξέτασης πιθανών ρεαλιστικών σεναρίων που μπορούν να υλοποιηθούν στο άμεσο μέλλον. Συνολικά, αυτή η μελέτη μπορεί να χρησιμεύσει ως σημείο αναφοράς για τη θερμοδυναμική βελτιστοποίηση, την οικονομική αξιολόγηση και την



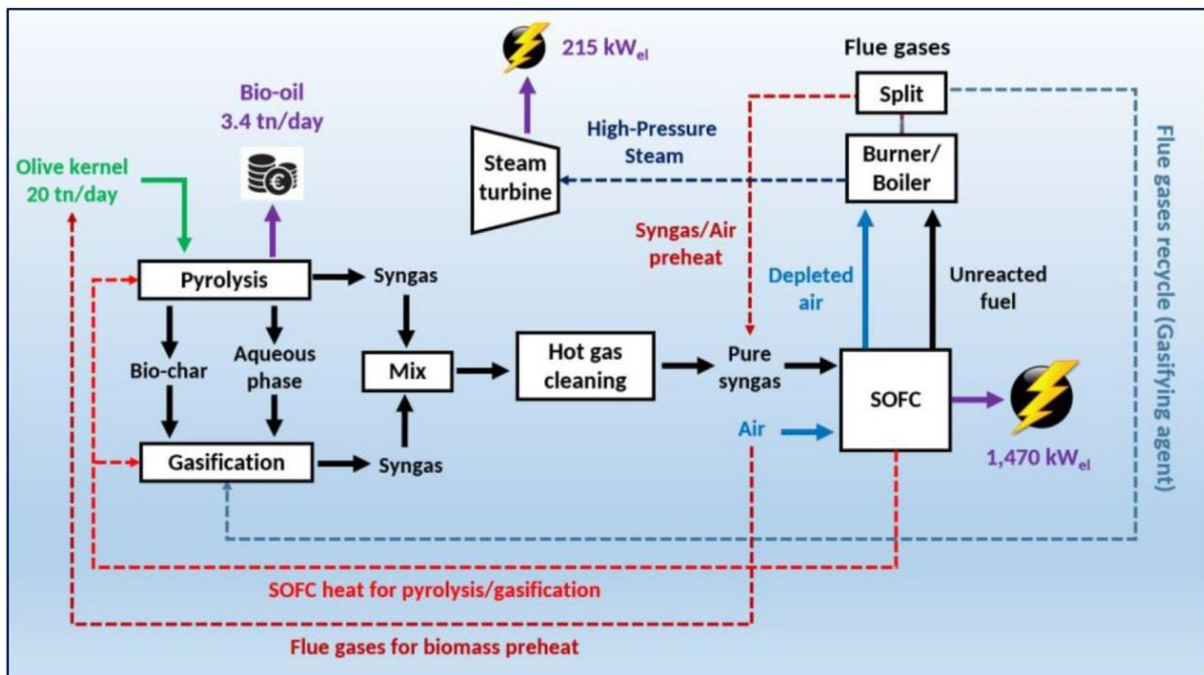
πρακτική λειτουργία μελλοντικών αποκεντρωμένων υβριδικών συστημάτων παραγωγής ενέργειας μικρής κλίμακας με βάση τη βιομάζα.

## Κεφάλαιο 2. Τεχνοοικονομική Αποτίμηση διεργασίας GASOFC με χρήση ελαιοπυρήνα

### 2.1 Συνοπτική περιγραφή της διαδικασίας και παραδοχές

Η γενική προτεινόμενη ιδέα της ολοκληρωμένης διεργασίας απεικονίζεται παρακάτω στο Σχήμα 8. Συνοπτικά, ως πρώτη ύλη βιομάζας χρησιμοποιήθηκε ελαιοπυρήνας (olivekernel, OK), ο οποίος αρχικά ξηραίνεται με θερμότητα που παράγεται εντός της ολοκληρωμένης διεργασίας, και στη συνέχεια η θερμαινόμενη βιομάζα τροφοδοτείται στον αντιδραστήρα αργής πυρόλυσης όπου μετατρέπεται σε βιο-έλαιο, σε μία υδατική υγρή φάση, σε αέριο σύνθεσης και σε βιο-εξανθράκωμα. Τα ρεύματα εξόδου της πυρόλυσης υποβάλλονται σε περαιτέρω επεξεργασία ως εξής: το βιοέλαιο αποτελεί προϊόν της διεργασίας, το βιο-εξανθράκωμα μαζί με την υδατική φάση τροφοδοτούνται στον αεριοποιητή, ενώ τα αέρια προϊόντα της πυρόλυσης αναμιγνύονται με το αέριο ρεύμα εξόδου του αεριοποιητή. Στη συνέχεια, η έξοδος του αεριοποιητή (αέριο σύνθεσης) υποβάλλεται σε καθαρισμό και τροφοδοτείται ως καύσιμο σε μια διάταξη κυψέλης καυσίμου στερεών οξειδίων SOFC. Ο απεμπλουτισμένος αέρας από την κάθοδο της SOFC και το καύσιμο που δεν αντέδρασε από την άνοδο της SOFC οδηγούνται σε έναν μετακαυστήρα/λέβητα, όπου παράγεται ατμός για τους επακόλουθους στροβίλους. Τα καυσαέρια του μετακαυστήρα στη συνέχεια διαχωρίζονται, εν μέρει οδηγούνται ως μέσο αεριοποίησης προς τον αεριοποιητή και το υπόλοιπο ρεύμα χρησιμοποιείται ως θερμότητα υψηλής ποιότητας για την προθέρμανση της ξηρής βιομάζας καθώς και των ρευμάτων εισόδου στην άνοδο και στην κάθοδο της SOFC. Συνολικά, στη ολοκληρωμένη αυτόθερμη διεργασία τροφοδοτούνται 20 tn/ημέρα ακατέργαστης βιομάζας(ελαιοπυρήνας, OK) και παράγονται 1685 kW<sub>el</sub> ηλεκτρικής ενέργειας και 3.4 tn/ημέρα βιο-ελαίου. Περισσότερες λεπτομέρειες για τις επιμέρους μονάδες αναλύονται στη συνέχεια.

Η ολοκληρωμένη διεργασία προσομοιώθηκε με τη χρήση του λογισμικού ASPEN Plus σε λειτουργία σταθερής κατάστασης υποθέτοντας αμελητέες θερμικές απώλειες και ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας και σύστασης των ρευμάτων, όπως συνήθως ακολουθείτε σε αρκετές σχετικές εργασίες [55,60,65-67]. Οι θερμοφυσικές ιδιότητες όλων των συστατικών προέκυψαν χρησιμοποιώντας την εξίσωση Peng-Robinson με την τροποποίηση Boston Mathias (PR-BM). Επίσης, όλοι οι υπολογισμοί που δεν πραγματοποιήθηκαν μέσω του λογισμικού, επιβεβαιώθηκαν ξεχωριστά στο λογισμικό ASPEN Plus με σφάλματα μικρότερα από 0.1%.

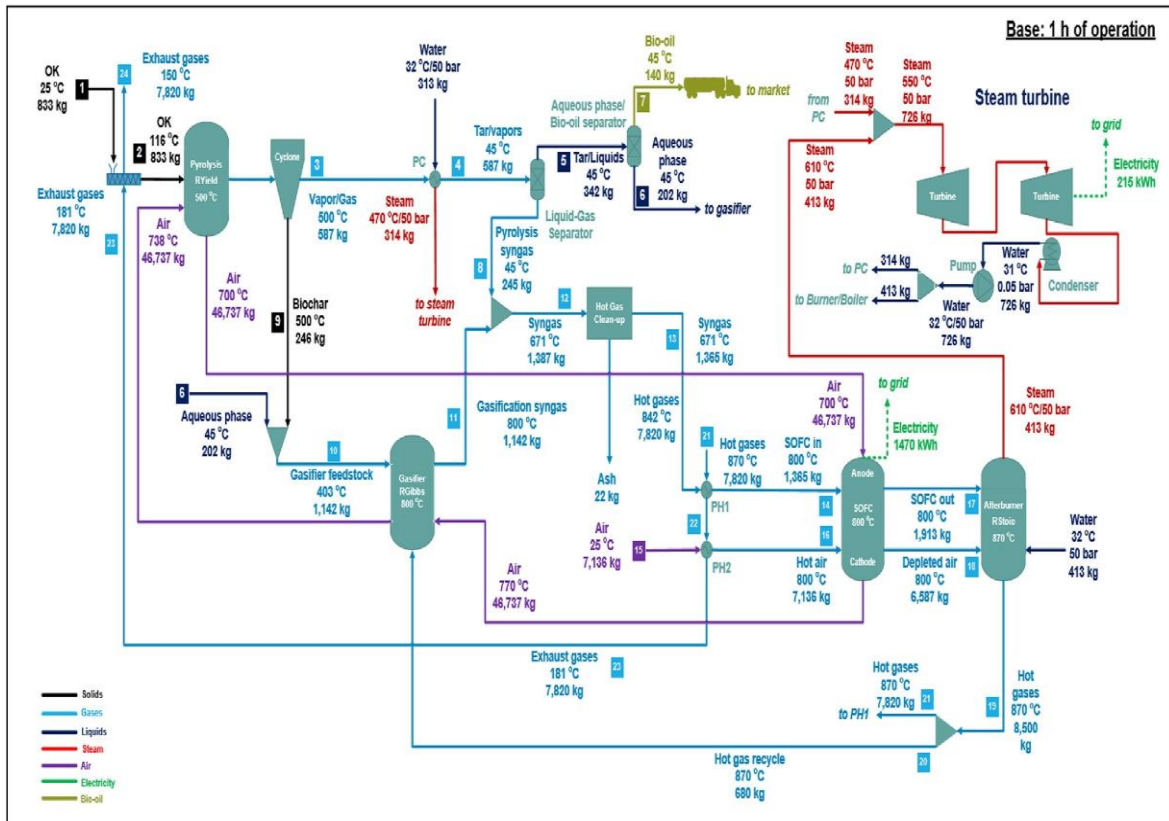


Σχήμα 8. Σχηματική απεικόνιση της προτεινόμενης ολοκληρωμένης διεργασίας πυρόλυσης του ελαιοπυρήνα, αεριοποίησης του βιο-εξανθρακώματος και παραγωγής ενέργειας σε έναν συνδυασμένο κύκλο SOFC-ατμοστρόβιλου.

## 2.2 Προσομοίωση διεργασίας – Θερμική ολοκλήρωση

Συνολικά, το λεπτομερές διάγραμμα ροής της ολοκληρωμένης διαδικασίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 9 και οι γραμμομοριακές ροές των ρευμάτων δίνονται αναλυτικά στον Πίνακα 1. Σύμφωνα με το γενικό διάγραμμα της διεργασίας, που εξηγήθηκε παραπάνω, σε αυτή την ενότητα πραγματοποιείται μια σύντομη παρουσίαση των πιο σημαντικών υπολογισμών. Συγκεκριμένα, η διεργασία λειτουργεί σε ατμοσφαιρική πίεση και περιλαμβάνει αρχικά την αργή πυρόλυση του ακατέργαστου ελαιοπυρήνα στους 500 °C (Ρεύμα 1) μετά από ένα στάδιο ξήρανσης του, στους ~116 °C. Στην συνέχεια, το στερεό προϊόν της πυρόλυσης (Ρεύμα 9) μαζί με την υδατική φάση της πυρόλυσης, η οποία προέκυψε από τον διαχωρισμό των υγρών του βιο-ελαίου (Ρεύμα 6), τροφοδοτούνται στον αεριοποιητή. Η έξοδος της μονάδας αεριοποίησης αναμιγνύεται με τα αέρια από την πυρόλυση του ελαιοπυρήνα και το προκύπτον αέριο μίγμα (Ρεύμα 12) αφού θερμανθεί στους 671 °C επεξεργάζεται σε ένα σύστημα καθαρισμού υψηλής θερμοκρασίας προτού οδηγηθεί στην άνοδο της SOFC. Τόσο ο αεριοποιητής, όσο και η διάταξη της SOFC λειτουργούν στους 800 °C. Τα αέρια εξόδου από την άνοδο και την κάθοδο της κυψέλης SOFC (Ρεύμα 17 και 18, αντίστοιχα) τροφοδοτούνται σε έναν μετακαυστήρα/λέβητα, του οποίου η θερμοκρασία ρυθμίζεται περίπου στους 870 °C για την παραγωγή υπέρθερμου ατμού που αποστέλλεται σε έναν ατμοστρόβιλο. Επίσης, ένα κλάσμα των καυσαερίων του μετακαυστήρα (9%) ανακυκλώνεται στον αεριοποιητή ως μέσο

αεριοποίησης (Ρεύμα 20), ενώ το υπόλοιπο χρησιμοποιείται για να θερμάνει την ακατέργαστη βιομάζα καθώς και τις παροχές του αερίου σύνθεσης και του αέρα στην άνοδο και στην κάθοδο της SOFC. Συνολικά, η διαδικασία παράγει ηλεκτρική ενέργεια από την διάταξη SOFC και από τον ατμοστρόβιλο, καθώς και βιο-έλαιο από το διαχωρισμό των υγρών προϊόντων της πυρόλυσης (Ρεύμα 7). Η περιγραφή της μεθοδολογίας και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των διαφορετικών υπομονάδων παρουσιάζονται αναλυτικότερα στις επόμενες ενότητες.



Σχήμα 9. Διάγραμμα ροής της ολοκληρωμένης διεργασίας ανάκτησης ενέργειας από ελαιοπυρήνα.

(1,2) OK, (3,4) Ατμοί/αέριο, (5) Πίσσες-βιοέλαιο, (6) Υδατική φάση, (7) Βιο-έλαιο, (8) Αέριο προϊόν πυρόλυσης, (9) Βιο-εξανθράκωμα, (10) Τροφοδοσία αεριοποιητή, (11) Αέριο σύνθεσης αεριοποίησης, (12,13,14) Συνολικό αέριο σύνθεσης, (15,16) Αέρας καθόδου SOFC, (17) Έξοδος ανόδου SOFC, (18) Απεμπλουτισμένος αέρας στην έξοδο της καθόδου της SOFC, (19) Καυσαέρια μετακαυστήρα, (20) Μέσο αεριοποίησης, (21-24) Ρεύματα εξόδου διεργασίας.

Πίνακας 1. Συστάσεις και γραμμομοριακές παροχές των κύριων ρευμάτων της ολοκληρωμένης διεργασίας σε kmol/hr.

Ρεύματα Διεργασίας	C <sub>c</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	Συνολικά
(1-2) OK <sup>a</sup>	32.08	9.66	22.46	-	-	-	-	3.65	0.19	68.05
(3-4) Ατμοί/Αέρια	7.55	3.23	14.99	3.94	0.92	0.20	2.50	6.54	0.12	40.00
(5) Πίτσες <sup>b</sup>	7.55	3.23	13.16	-	-	-	-	6.54	0.12	30.61
(6) Υδατική Φάση <sup>b</sup>	0.76	2.44	6.58	-	-	-	-	5.61	0.02	15.41
(7) Βιο-έλαιο <sup>b</sup>	6.80	0.79	6.58	-	-	-	-	0.93	0.10	15.20
(8) Αέριο προϊόν πυρόλυσης	-	-	1.83	3.94	0.92	0.20	2.50	0.00	-	9.39
(9) Βιοεξανθράκωμα <sup>a</sup>	16.76	0.51	2.17	-	-	-	-	-	0.07	19.51
(10) Τροφοδοσία Αεριοποιητή	17.52	2.95	8.75	-	-	-	-	5.61	0.09	34.93
(11) Αέριο Σύνθεσης Αεριοποίησης	-	-	14.57	17.97	0.10	-	1.65	1.22	17.52	53.04
(12-14) Συνολικό Αέριο Σύνθεσης	-	-	16.40	21.91	1.01	0.20	4.15	1.22	17.52	62.43
(15-16) Αέρας καθόδου	-	51.94	-	-	-	-	-	-	195.39	247.33
(17) Εξοδος Ανόδου SOFC	-	-	3.33	5.43	0.20	0.04	21.77	16.35	17.52	64.65
(18) Απεμπλουτισμένος Αέρας	-	34.80	-	-	-	-	-	-	195.39	230.19
(19) Καυσαέρια Μετακαυστήρα	-	30.08	-	-	-	-	27.48	20.22	212.91	290.71
(20) Μέσο Αεριοποίησης	-	2.48	-	-	-	-	2.20	1.62	17.33	23.63
(21-24) Ρεύματα Εξόδου Διεργασίας	-	27.68	-	-	-	-	25.28	18.61	195.88	267.45

<sup>a</sup> Στερεά Ρεύματα.  
<sup>b</sup> Υγρά Ρεύματα.  
<sup>c</sup> Τα στερεά και τα υγρά ρεύματα αναφέρονται σε στοιχειακές συστάσεις C, O και H. Τα δύο τελευταία εκφράζονται ως μοριακά O<sub>2</sub> και H<sub>2</sub>

## 2.3 Πυρόλυση Βιομάζας

Η ακατέργαστη υγρή βιομάζα (ελαιοπυρήνας, OK) τροφοδοτείται σε ατμοσφαιρικές συνθήκες με μαζική παροχή 20 tn/ημέρα, έπειτα ξηραίνεται και προθερμαίνεται στους 116 °C, πριν την εισαγωγή της στον αντιδραστήρα πυρόλυσης. Γενικά, η πυρόλυση κατηγοριοποιείται ως αργή ή γρήγορη πυρόλυση, ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας στις οποίες λαμβάνει χώρα. Σε αυτή τη μελέτη, επιλέχθηκε η αργή πυρόλυση, καθώς αυτός ο τύπος πυρόλυσης συνήθως οδηγεί σε αυξημένη παραγωγή εξανθρακώματος και μειωμένη περιεκτικότητα σε πίσσες [68]. Η θερμοκρασία αργής πυρόλυσης ορίστηκε σε μια τυπική τιμή 500 °C, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [69-74] καθώς και λόγω του γεγονότος ότι είχαν πραγματοποιηθεί πειραματικές μετρήσεις σε αυτή τη θερμοκρασία [75]. Το παραγόμενο στερεό βιο-εξανθράκωμα μαζί με την τέφρα διαχωρίζονται και το στερεό βιο-εξανθράκωμα τροφοδοτείται απευθείας στον αεριοποιητή. Το μίγμα των μη συμπυκνώσιμων αερίων που παράγεται από την πυρόλυση θεωρήθηκε ότι αποτελείται από H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> και C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>. Επίσης, οι ατμοί των παραγόμενων πηκτών διαχωρίζονται με συμπύκνωση στους 45 °C,

παρέχοντας με τη σειρά τους επαρκή θερμότητα για την παραγωγή υπέρθερμου ατμού που χρησιμοποιείται στην συνέχεια σε έναν ατμοστρόβιλο. Οι δύο διαχωρισμένες φάσεις των συνολικών υγρών στη συνέχεια διαχωρίζονται σε ακατέργαστο βιο-έλαιο και στην υδατική φάση [76,77]. Η υδατική φάση μπορεί να περιγραφεί ως ένα μίγμα νερού και διαλυτών οργανικών ενώσεων, το οποίο τροφοδοτείται στον αεριοποιητή ως μέσο αεριοποίησης, ενώ το ακατέργαστο βιο-έλαιο θεωρείται ένα εμπορικό προϊόν που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο με χαμηλή περιεκτικότητα σε οξυγόνο. Θα πρέπει να αναφερθεί εδώ, ότι η υδρογονοκατεργασία ή άλλες μέθοδοι για την αναβάθμιση του βιο-ελαίου δεν ελήφθησαν υπόψη στην παρούσα εργασία.

Για την επίλυση των ισοζυγίων μάζας της διεργασίας αργής πυρόλυσης του ΟΚ στους 500 °C, χρησιμοποιήθηκαν οι στοιχειακές συστάσεις του ακατέργαστου ΟΚ και του παραγόμενου βιο-εξανθρακώματος, καθώς και οι αποδόσεις σε στερεά, υγρά και αέρια προϊόντα που υπολογίστηκαν διεξοδικά σε αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο [75]. Συνεπώς, λαμβάνοντας υπόψη τις στοιχειακές συστάσεις καθώς και τις αποδόσεις, υποτέθηκε μία τυπική σύσταση του παραγόμενου αερίου ρεύματος της πυρόλυσης (Πίνακας 2), σε συμφωνία με τις σχετικές επιστημονικές εργασίες για διεργασίες αργής πυρόλυσης [69,70,72,73]. Επιπλέον, η σύσταση των συνολικών υγρών προήλθε από τα αντίστοιχα στοιχειακά ισοζύγια μάζας (Πίνακας 3). Τέλος, οι στοιχειακές συστάσεις της υδατικής και της ακατέργαστης φάσης του βιο-ελαίου υπολογίστηκαν υποθέτοντας ότι:

α) Ένα κλάσμα των υγρών (συμπεριλαμβανομένου και ενός μικρού ποσοστού από το νερό) 40 wt.% καταλήγει στην οργανική φάση (βιο-έλαιο) και το υπόλοιπο αποτελεί την υδατική φάση.

β) Με βάση τα στοιχειακά ισοζύγια, το 90% του C, το 50% του H και το 25% του O καταλήγουν στο βιο-έλαιο με βάση την ξηρή και ελεύθερη τέφρα βιομάζας (dry and ash free, d.a.f), ενώ η περιεκτικότητα σε νερό στο ακατέργαστο βιο-έλαιο θεωρήθηκε ότι είναι ίση με 12% κατά βάρος. Το υπόλοιπο μέρος καταλήγει στο d.a.f οργανικό περιεχόμενο της υδατικής φάσης (το μισό από το οποίο υποτίθεται ότι είναι νερό), σε συμφωνία με τις σχετικές εργασίες [69-74].

Πίνακας 2. Σύγκριση των προϊόντων ρευμάτων και των συστάσεων τους από την αργή πυρόλυση του ελαιοπυρήνα με τη βιβλιογραφία.

Κατανομή προϊόντων (wt.% του συνολικού ΟΚ)		Σύσταση αέριων προϊόντων (wt. %)		
Στερεά (βιο-εξανθράκωμα)	29.55		Παρούσα Εργασία	Βιβλιογραφία[69,72,73]
Υγρά	41.05	CO	45.0	(33.6-57.6)
Αέρια	29.40	CO <sub>2</sub>	45.0	(34.3-58.1)
		CH <sub>4</sub>	6.0	(4.8-9.0)
		H <sub>2</sub>	1.5	(0.4-1.8)
		C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	2.5	(3.3)
		HHV (MJ/l)	13.17	
		LHV (MJ/l)	12.27	
Στοιχειακή σύσταση (wt%, επί ξηρού)				

	OK	Βιο-εξανθράκωμα	Υγρά			
			Συνολικά Υγρά	Υδατική Φάση	Οργανική Φάση-Βιοέλαιο Παρούσα Μελέτη Βιβλιογραφία[69-72]	
C	50.20	81.75	40.46	8.97	66.32	(66.37-68.79)
H	5.90	1.78	11.84	13.13	10.78	(7.82-10.62)
O	40.28	6.58	46.16	77.29	20.60	(17.66-24.32)
N	0.70	0.80	1.52	0.61	2.27	
S	0.02	0.05	0.01	0.00	0.02	
Ανόργανα	2.90	9.04	0.00	0.00	0.00	
H <sub>2</sub> O ( wt.%)	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	
HHV (MJ/kg)	7.90		34.46	50.00	12.00	
LHV (MJ/kg)	16.85	27.53	14.74	4.02	30.23	
	15.47	27.15	12.21	1.37	27.87	

Όσον αφορά την προσομοίωση της διεργασίας πυρόλυσης στο Aspen Plus, αυτή πραγματοποιήθηκε από δύο διαδοχικούς αντιδραστήρες RYield. Ο πρώτος χρησιμοποιήθηκε για την διάσπαση του OK σε C, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> και S σύμφωνα με τη στοιχειακή ανάλυση και ο δεύτερος για την προσομοίωση του σχηματισμού των αερίων προϊόντων [78-82]. Το βιο-εξανθράκωμα καθώς και η ξηρή φάση των συνολικών υγρών στην έξοδο του αντιδραστήρα RYield εκφράστηκαν επίσης ως C, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> και S. Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκαν τρεις διατάξεις διαχωρισμού (Sep blocks) για την προσομοίωση: i) του κυκλώνα στην έξοδο του αντιδραστήρα πυρόλυσης όπου συλλέγεται το βιο-εξανθράκωμα, ii) τον διαχωρισμό του βιο-ελαίου και των αερίων/υγρών και iii) τον φυσικό διαχωρισμό των δύο διαχωρισμένων φάσεων του βιο-ελαίου, δηλ. της υδατικής φάσης και του ακατέργαστου βιο-ελαίου [23,83]. Τόσο το βιο-εξανθράκωμα όσο και η υδατική φάση από το διαχωρισμό του βιο-ελαίου τροφοδοτούνται στον αεριοποιητή ως στερεό καύσιμο και μέρος του μέσου αεριοποίησης, αντίστοιχα, ενώ το ακατέργαστο βιο-έλαιο αποθηκεύεται χωρίς περαιτέρω επεξεργασία ως τελικό προϊόν.

Πίνακας 3. Στοιχειακή σύσταση και ενεργειακό περιεχόμενο των στερεών και υγρών προϊόντων στην διεργασία της πυρόλυσης.						
		OK	Βιο-εξανθράκωμα	Υδατική Φάση	Τροφοδοσία Αεριοποίησης	Βιο-έλαιο
Συστάσεις (wt.% d.a.f.)	C	51.70	89.88	8.97	64.72	66.32
	H	6.08	1.94	13.13	5.43	10.78
	O	41.48	7.23	77.29	29.02	20.6
	N	0.72	0.88	0.61	0.79	2.27

	S	0.02	0.05	0.00	0.04	0.02
Συνολικά (d.a.f.)	wt.%	89.43	90.96	50.00	72.50	88.00
H <sub>2</sub> O		7.90	-	50.00	22.54	12.00
Ανόργανα		2.67	9.04	-	4.96	-
HHV <sub>d.a.f.</sub>	MJ/kg	18.84	32.03	8.04	21.22	34.35
LHV <sub>d.a.f.</sub>		17.74	31.93	7.72	21.02	34.03
HHV <sub>total</sub>		16.85	29.14	4.02	16.93	30.23
LHV <sub>total</sub>		15.57	28.78	1.57	15.63	28.05

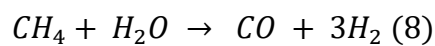
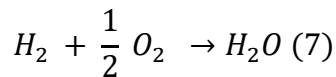
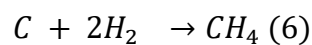
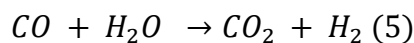
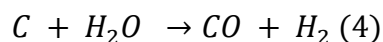
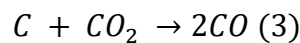
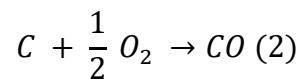
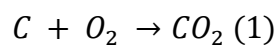
Γενικά, οι θερμικές απαιτήσεις πυρόλυσης της βιομάζας μπορεί να ποικίλλουν σημαντικά ανάλογα με διάφορες παραμέτρους της διεργασίας όπως η σύσταση, η υγρασία και το ενεργειακό περιεχόμενο της βιομάζας, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και η διαμόρφωση του αντιδραστήρα, ο ρυθμός θέρμανσης και η κατανομή της θερμοκρασίας στην διάταξη πυρόλυσης, οι μέγιστες θερμοκρασίες κ.α. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί αυτό, πραγματοποιήθηκε ένας λεπτομερής υπολογισμός των συνολικών απαιτήσεων θερμότητας λαμβάνοντας υπόψη την ενθαλπία της αντίδρασης πυρόλυσης στους 25 °C, τη λανθάνουσα θερμότητα της εξάτμισης του νερού στα προϊόντα πυρόλυσης, τη λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης των υγρών κλασμάτων της πυρόλυσης και την αισθητή θερμότητα των στερεών, υγρών και αέριων προϊόντων στους 500 °C, που είναι η θερμοκρασία εξόδου της πυρόλυσης (Ρεύματα 3 και 9 στο Σχήμα 9). Συνολικά, αυτή η προσέγγιση οδήγησε στην εκτίμηση των απαιτήσεων θερμότητας της διεργασίας πυρόλυσης στα 627 kW ή 2,71 MJ/kg βιομάζας στην είσοδο του αντιδραστήρα πυρόλυσης (Ρεύμα 1), που αντιστοιχεί περίπου στο 16% της ανώτερης θερμογόνου δύναμης (High Heating Value, HHV) του ΟΚ. Αυτή η τιμή βρίσκεται σε συμφωνία με το εύρος 7-15% που αναφέρεται στην βιβλιογραφία [84]. Επίσης, μέσω της ίδιας μεθοδολογίας, θα μπορούσε να εκτιμηθεί η ωφέλιμη θερμότητα που θα μπορούσε να ανακτηθεί από την ψύξη των προϊόντων της πυρόλυσης. Πράγματι, αυτή η θερμότητα αναφέρεται στην ενέργεια που απελευθερώνεται από τη συμπύκνωση αερίων/ατμών στους 45 °C και υπολογίστηκε ότι είναι ~287 kW. Έτσι, η καθαρή θερμότητα της διεργασίας πυρόλυσης υπολογίστηκε σε ~340 kW.

## 2.4 Αεριοποίηση Βιο-εξανθρακώματος

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τόσο το βιο-εξανθράκωμα που προέρχεται από τη διεργασία της αργής πυρόλυσης, όσο και η υδατική φάση των υγρών της πυρόλυσης εισήχθησαν στον αεριοποιητή, μαζί με μέρος των ανακυκλωμένων καυσαερίων από τον μετακαυστήρα (βλ. Πίνακα 4). Συγκεκριμένα, η στερεά πρώτη ύλη είναι ένα υλικό πλούσιο σε άνθρακα (64.7 wt% d.a.f.) με υψηλή υγρασία (22.5 wt%) και ειδικό ενεργειακό περιεχόμενο σχεδόν ίσο με αυτό του αρχικού ΟΚ, ενώ τα καυσαέρια αποτελούνται από O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> και H<sub>2</sub>O, αραιωμένα σε



N<sub>2</sub> (Πίνακας 4). Στην ουσία, εξαιρουμένου του αζώτου, οι υπόλοιπες ενώσεις στα καυσαέρια του μετακαυστήρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως οξειδωτικά μέσα για την αεριοποίηση του στερεού βιο-εξανθρακώματος. Όσον αφορά την προσομοίωση της διαδικασίας αεριοποίησης, αυτή πραγματοποιήθηκε μέσω της μεθόδου ελαχιστοποίησης της ελεύθερης ενέργειας Gibbs σε ένα αντιδραστήρα RGibbs, που υπολόγισε τη θερμοδυναμική ισορροπία του δικτύου των χημικών αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα στον αεριοποιητή (Αντιδράσεις 1-8). Η θερμοκρασία αντίδρασης ορίστηκε στους 800 °C, η οποία αποτελεί μια συμβατική θερμοκρασία αεριοποίησης, ειδικά για συστήματα που θα διασυνδεθούν θερμικά με SOFCs [21,42,85,86]. Επίσης, έγινε η παραδοχή για αμελητέα παραγωγή πησών, όπως και σε σχετικές μελέτες της βιβλιογραφίας [20,66]. Επίσης, η πλήρης μετατροπή του άνθρακα διασφαλίστηκε με τη βελτιστοποίηση του λόγου ανακυκλοφορίας των καυσαερίων του μετακαυστήρα (περίπου 9%) όπως αναφέρεται αλλού [20,66]. Όσον αφορά το ενεργειακό ισοζύγιο, διαπιστώθηκε ότι η συνολική διεργασία αεριοποίησης είναι ενδόθερμη με καθαρή απαίτηση θερμότητας ~654 kW, τιμή που αντιστοιχεί σε περίπου 27% της HHV της ακατέργαστης βιομάζας. Όπως αποδείχθηκε και στην περίπτωση της πυρόλυσης, η διεργασία της αεριοποίησης μπορεί να καλυφθεί πλήρως θερμικά από εσωτερικά θερμαινόμενα ρεύματα της ολοκληρωμένης διεργασίας, αφού τα 184 kW<sub>th</sub> μπορούν να προέλθουν από την αισθητή θερμότητα του μέσου αεριοποίησης και τα υπόλοιπα 470 kW<sub>th</sub> μπορούν να παρασχεθούν από την SOFC.



Το παραγόμενο αέριο μίγμα από τον αεριοποιητή (1398.3 Nm<sup>3</sup>/hr), που αποτελείται κυρίως από N<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O και μικρότερες ποσότητες CH<sub>4</sub> και CO<sub>2</sub>, αναμιγνύεται στη συνέχεια με τα αέρια προϊόντα της πυρόλυσης, τα οποία επηρεάζουν ελαφρά την αρχική του σύσταση (δηλ. αύξηση της περιεκτικότητας σε υδρογονάνθρακες). Ωστόσο, μετά την ανάμειξη, επιτυγχάνεται μια αύξηση στην ενεργειακή πυκνότητα του συνολικού αερίου σύνθεσης που

τροφοδοτείται στην κυψέλη καυσίμου στερεών οξειδίων SOFC περίπου 10% σε σύγκριση με το προερχόμενο από την αεριοποίηση αέριο σύνθεσης (Πίνακας 4).

**Πίνακας 4. Συστάσεις και ενεργειακό περιεχόμενο αερίων ρευμάτων της ολοκληρωμένης διεργασίας.**

	Παραγόμενο Άεριο Πυρόλυσης	Παραγόμενο Αέριο Αεριοποίησης	Συνολικό Αέριο Σύνθεσης	Έξοδος Ανόδου SOFC	Αέρας	Απεμπλο υτισμένο ς Αέρας	Μέσο Αεριοποίησης
Ρυθμός Ροής (Nm <sup>3</sup> /h)	210.2	1188.1	1398.3	1448.3	5540.4	5156.3	529.2
Σύνθεση (v/v %)							
H <sub>2</sub>	19.45	27.48	26.27	5.16	-	-	-
CO	41.92	33.88	35.09	8.39	-	-	-
CO <sub>2</sub>	26.68	3.11	6.66	33.67	-	-	9.45
CH <sub>4</sub>	9.76	0.18	1.62	0.31	-	-	-
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	2.17	-	0.33	0.06	-	-	-
H <sub>2</sub> O	-	2.30	1.96	25.29	-	-	6.96
O <sub>2</sub>	-	-	-	-	21.00	15.00	10.35
N <sub>2</sub>	-	33.03	28.07	27.10	79.00	85.00	73.24
HHV (MJ/Nm <sup>3</sup> )	13.17	7.86	8.66	1.75	-	-	-
LHV (MJ/Nm <sup>3</sup> )	12.27	7.31	8.06	1.65	-	-	-

## 2.5 Επεξεργασία και καθαρισμός παραγόμενου αερίου σε υψηλή θερμοκρασία

Μετά την ανάμιξη των παραγόμενων αερίων μιγμάτων από την πυρόλυση και την αεριοποίηση, το συνολικό ρεύμα αερίου σύνθεσης πρέπει να επεξεργαστεί και να καθαριστεί κατάλληλα πριν από την εισαγωγή του ως καύσιμο στην διάταξη SOFC, κυρίως λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς του σε θειούχες ενώσεις. Πράγματι, αναφορικά με το στοιχειακό ισοζύγιο του ατομικού S στη διεργασία, περίπου το 1/5 του θείου που υπάρχει στον τροφοδοτούμενο ΟΚ υποτίθεται ότι καταλήγει στο βιο-έλαιο [87], ενώ το υπόλοιπο παραμένει στα παραγόμενα αέρια μίγματα από τις διεργασίες της πυρόλυσης και της αεριοποίησης και υπόκειται σε επεξεργασία και καθαρισμό. Από αυτή την άποψη, η περιεκτικότητα σε θείο στο βιο-έλαιο υπολογίζεται ότι είναι περίπου 214 ppm, πολύ πάνω από το όριο των 10 ppm για τα εμπορικά βιο-καύσιμα [88], γεγονός που καθιστά απαραίτητη την απομάκρυνση του θείου στο βιο-έλαιο, μέσω παραδείγματος χάρη της υδρογόνωσης του, προτού χρησιμοποιηθεί ως βιο-καύσιμο σε κάποια εφαρμογή. Ωστόσο, αυτό δεν ελήφθη υπόψη στην παρούσα εργασία και το παραγόμενο βιο-έλαιο θεωρείται προϊόν χωρίς περαιτέρω επεξεργασία. Επίσης, υποθέτοντας την πλήρη μετατροπή των ενώσεων που περιέχουν S σε H<sub>2</sub>S στον αεριοποιητή, η υπολειπόμενη συγκέντρωση H<sub>2</sub>S στο μίγμα των παραγόμενων αερίων είναι περίπου 60 ppm. Συνεπώς, λαμβάνοντας υπόψη ότι οι διατάξεις

SOFC επιτρέπουν μέγιστη περιεκτικότητα σε  $H_2S$  μικρότερη από 1 ppm [89], ένα σύστημα καθαρισμού αερίου θα εξακολουθεί να απαιτείται ακόμη και στην περίπτωση χρήσης προηγουμένων υλικών ( π.χ. οξικό ασβέστιο) που επιτρέπουν τη μέγιστη δέσμευση θείου στην κλίνη εντός του αεριοποιητή [90].

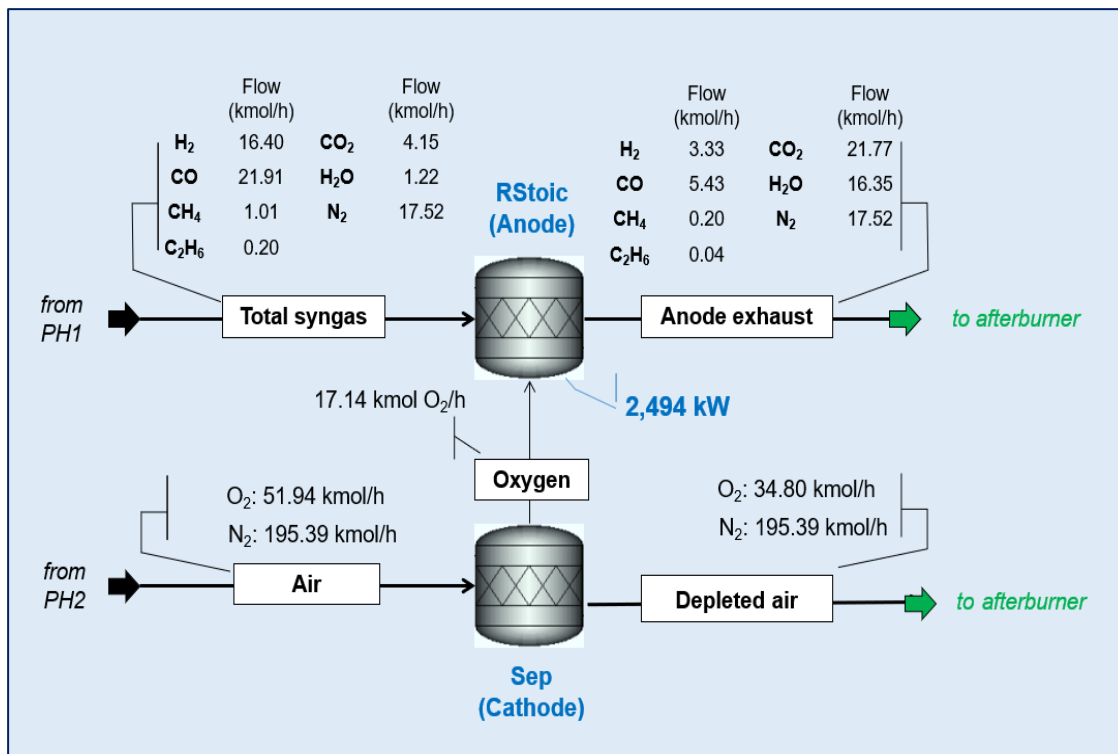
Γενικά, οι μέθοδοι καθαρισμού αερίων μιγμάτων κατηγοριοποιούνται σε διεργασίες υψηλών και χαμηλών θερμοκρασιών. Ωστόσο, για την πρώτη περίπτωση έχει αναφερθεί ότι μεγιστοποιείται η συνολική απόδοση της διεργασίας ελαχιστοποιώντας τις απώλειες εξέργειας από τους επόμενους κύκλους ψύξης/θέρμανσης [91]. Επομένως, και εφόσον το παραγόμενο αέριο μίγμα βρίσκεται ήδη σε αρκετά υψηλή θερμοκρασία (671 °C), επιλέχθηκε σε αυτή τη φάση ένα σύστημα θερμού καθαρισμού του αερίου σύνθεσης. Παρόλο που αυτή η διεργασία δεν προσομοιώθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, η συνολική μονάδα επεξεργασίας και καθαρισμού του αερίου μίγματος θεωρήθηκε ότι περιλαμβάνει έναν φυγοκεντρικό κυκλώνα συνδυασμένο με κεραμικά φίλτρα για την απομάκρυνση της τέφρας και των ατμών αλκαλίων [92], μία κλίνη προσρόφησης βασισμένη σε  $CeO_2$  για την απομάκρυνση των θειούχων ενώσεων [90] και μία κλίνη από δολομίτη ή ασβεστόλιθο για τα ίχνη των πισσών και άλλες ακαθαρσίες [46]. Όσον αφορά τα προσροφητικά υλικά και τα κεραμικά φίλτρα, εφαρμόστηκε μια απλοποιημένη προσέγγιση: α) το συνολικό θείο (στοιχειακό ή με τη μορφή ενώσεων όπως το  $H_2S$ ) υπολογίστηκε από το ισοζύγιο μάζας, β) η απόδοση του προσροφητικού υλικού θεωρήθηκε ίση με 15 g ακαθαρσιών/100 g προσροφητικού υλικού [89,91], γ) τα προσροφητικά υλικά αποτελούνται από ένα μείγμα  $CaCO_3$ ,  $MgO$  και  $CeO_2$  και δ) θεωρήθηκε ένας μέσος ημερήσιος ρυθμός αναπλήρωσης του προσροφητικού υλικού ίσος με 10%. Σύμφωνα με αυτές τις παραδοχές, απαιτείται συνολική ποσότητα προσροφητικού υλικού ίση με 12 tn/έτος. Σε κάθε περίπτωση, η εκτίμηση του κόστους της διεργασίας επεξεργασίας και καθαρισμού του αερίου σύνθεσης λήφθηκε υπόψη στις οικονομικές εκτιμήσεις της διαδικασίας.

## 2.6 Κυψέλη καυσίμου στερεών οξειδίων (Solid Oxide Fuel Cell-SOFC)

Σύμφωνα με τη σχετική βιβλιογραφία [48,49], η διάταξη κυψέλης καυσίμου στερεών οξειδίων μοντελοποιήθηκε σε περιβάλλον ASPEN Plus με τη χρήση ενός στοιχειομετρικού αντιδραστήρα RStoic για την άνοδο της SOFC (προσομοίωση των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων) και μίας μονάδας Sep για τον διαχωρισμό του οξυγόνου για την κάθοδο (προσομοίωση της κατανάλωσης οξυγόνου στην κάθοδο της SOFC) (Σχήμα 10). Πιο συγκεκριμένα, το συνολικό ρεύμα του αερίου σύνθεσης που παράγεται από την διεργασία, εισέρχεται στην άνοδο μαζί με το ρεύμα καθαρού οξυγόνου το οποίο διαχωρίζεται ηλεκτροχημικά στην κάθοδο, ενώ ο αέρας εισέρχεται στην κάθοδο, παράγοντας τα καυσαέρια στην έξοδο της ανόδου της SOFC και το ρεύμα απεμπλουτισμένου αέρα στην έξοδο της καθόδου της κυψέλης καυσίμου [93]. Θεωρήθηκε ισοθερμοκρασιακή λειτουργία τόσο στον θάλαμο της ανόδου όσο και στον θάλαμο της καθόδου με θερμοκρασία ίση με 800 °C.

Αναλυτικότερα, ο συντελεστής χρήσης των καυσίμων χημικών ειδών στο αέριο μίγμα τροφοδοσίας της SOFC (δηλαδή των  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$  και  $C_2H_6$ ) λαμβάνεται τυπικά ίσος με 80% [51]. Επίσης, θεωρήθηκε ότι το ρεύμα απεμπλουτισμένου αέρα στην έξοδο της καθόδου περιέχει 15 v/v%  $O_2$ , ενώ το  $N_2$  που περιέχεται στην τροφοδοσία αέρα θεωρήθηκε αδρανές [86,94,95]. Από αυτή την άποψη, η γραμμομοριακή ροή του οξυγόνου που μεταφέρεται ηλεκτροχημικά προς την πλευρά της ανόδου της κυψέλης καυσίμου ρυθμίζεται αναλόγως στο λογισμικό Aspen Plus. Οι αντίστοιχες γραμμομοριακές ροές της διάταξης SOFC απεικονίζονται στο Σχήμα 10. Αναφορικά με τα ισοζύγια ενέργειας στην άνοδο, λαμβάνοντας υπόψη την έκταση των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων στους 800 °C, η συνολική παραγόμενη ισχύς (θερμική και ηλεκτρική) της SOFC υπολογίστηκε περίπου ίση με 2494 kW, όπου περίπου 1024 kW<sub>th</sub> αντιστοιχούν στην παραγόμενη θερμότητα και 1470 kW<sub>el</sub> στην παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ. Αυτή η σχεδιαστική προσέγγιση χρησιμοποιήθηκε για τη βελτιστοποίηση του δυναμικού λειτουργίας της SOFC έτσι ώστε να μπορεί να συνδυαστεί θερμικά με τις ενδόθερμες διεργασίες της πυρόλυσης και της αεριοποίησης. Έχοντας αυτό κατά νου, η ηλεκτρική απόδοση της SOFC υπολογίζεται τελικά ότι είναι περίπου 55,4% (δηλαδή, παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ίση με το 55,4% της ενθαλπίας των αντιδράσεων ηλεκτρο-οξειδωσης που λαμβάνουν χώρα στην άνοδο, θεωρώντας συντελεστή χρήσης καυσίμου ίσο με 80%), που είναι μια μάλλον τυπική τιμή για τις διατάξεις SOFC [51]. Ως εκ τούτου, μπορεί να υποστηριχθεί ότι η διάταξη κυψελών καυσίμου στερεών οξειδίων που έχει σχεδιαστεί κατά αυτόν τον τρόπο επιτρέπει την παροχή του συνόλου της υψηλής ποιότητας θερμότητας που απαιτείται για τις ενδόθερμες διεργασίες της πυρόλυσης βιομάζας και της αεριοποίησης του βιο-εξανθρακώματος.

Σε κάθε περίπτωση, πρέπει να σημειωθεί ότι για μία πιο λεπτομερή προσέγγιση της προσομοίωσης της διάταξης κυψέλης καυσίμου θα απαιτούνταν η εκτίμηση του δυναμικού λειτουργικού της κυψέλης καυσίμου, καθώς και ο υπολογισμός των υπερτάσεων για δεδομένη πυκνότητα ρεύματος και συνολική επιφάνεια ηλεκτροδίων. Ωστόσο, αυτή η ανάλυση δεν συμπεριλήφθηκε στην εργασία καθώς αναμένεται να είχε μικρό αντίκτυπο στο ενεργειακό ισοζύγιο της SOFC και της συνολικής διεργασίας.



Σχήμα 10. Προσομοίωση της μονάδας SOFC στο ASPEN Plus.

## 2.7 Μετακαυστήρας

Μετά την SOFC που λειτουργεί στους 800 °C, τα ρεύματα εξόδου της ανόδου και της καθόδου (καυσαέρια ανόδου και απεμπλουτισμένος αέρας) τροφοδοτούνται σε ένα μετακαυστήρα. Ο μετακαυστήρας μοντελοποιήθηκε ως ένας στοιχειομετρικός αντιδραστήρας, RStoic, που λειτουργεί ισοθερμοκρασιακά στους 870 °C και λαμβάνει υπόψη την πλήρη μετατροπή των καύσιμων ειδών που εξέρχονται από την άνοδο της κυψέλης καυσίμου μέσω της καύσης τους με O<sub>2</sub> που περιέχεται στο ρεύμα του απεμπλουτισμένου αέρα. Στη συνέχεια, τα θερμά καυσαέρια από τον μετακαυστήρα διαχωρίζονται σε ένα ρεύμα που ανακυκλώνεται στον αεριοποιητή ως μέσο αεριοποίησης (περίπου 9%), ενώ το υπόλοιπο χρησιμοποιείται εσωτερικά ως ένα ρεύμα υψηλής ποιότητας θερμότητας για την προθέρμανση του αερίου σύνθεσης που οδηγείται στην άνοδο της κυψέλης καυσίμου και του αέρα που τροφοδοτείται στην κάθοδο της SOFC. Επίσης, ο μετακαυστήρας θεωρήθηκε ότι λειτουργεί ως λέβητας και προκειμένου να διατηρηθεί η ισοθερμοκρασιακή λειτουργία του στους 870 °C, υπολογίστηκε ότι πρέπει να απομακρύνονται συνεχώς περίπου 472 kW θερμότητα, παράγοντας υπέρθερμο ατμό υψηλής ποιότητας.

## 2.8 Ατμοστρόβιλος

Τα παραγόμενα ρεύματα υπέρθερμου ατμού από τον μετακαυστήρα (413 kg/h στους 610 °C και 50 bar) και από το σύστημα ψύξης της πυρόλυσης (314 kg/h στους 470°C και 50 bar) αναμιγνύονται και οδηγούνται σε ένα ατμοστρόβιλο για παραγωγή επιπλέον ηλεκτρικής ισχύος (727 kg/h υπέρθερμου ατμού στους 550 °C και 50 bar). Ο ατμοστρόβιλος θεωρήθηκε ότι λειτουργεί ισεντροπικά μεταξύ 50 και 0.05 bar με απόδοση 85% [96]. Μετά την έξοδο του στροβίλου, το συμπυκνωμένο νερό συμπιέστηκε εκ νέου στα 50 bar και διαχωρίστηκε/ανακυκλώθηκε στον μετακαυστήρα και στο σύστημα ψύξης της πυρόλυσης. Η καθαρή παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς του ατμοστροβίλου υπολογίστηκε ίση με 215 kW<sub>el</sub>.

## 2.9 Ενεργειακή ανάλυση της ολοκληρωμένης διεργασίας

Προκειμένου να κατανοηθούν πληρέστερα οι σχετικές ενεργειακές ροές της προτεινόμενης ολοκληρωμένης διεργασίας, στο Σχήμα 11 απεικονίζεται το συνολικό διάγραμμα των ενεργειακών ροών. Όπως φαίνεται, τα ενεργειακά περιεχόμενα του παραγόμενου αερίου και του βιο-εξανθρακώματος από την διεργασία αργής πυρόλυσης ήταν ίσα με 769 kW<sub>HHV</sub> και 1993 kW<sub>HHV</sub>, που αντιστοιχούν σε περίπου 20% και 51% της ανώτερης θερμογόνου δύναμης του πρωτογενούς ΟΚ, αντίστοιχα. Όσον αφορά τα υγρά, το ενεργειακό περιεχόμενο της υδατικής φάσης υπολογίστηκε σε 226 kW<sub>HHV</sub>, που αντιστοιχεί σε περίπου 6% του HHV του πρωτογενούς ελαιοπυρήνα. Για το βιο-έλαιο, λαμβάνοντας υπόψη τη μάζα του και το ενεργειακό του περιεχόμενο, τα οποία είναι ίσα με 139.9 kg/h και 30.2 MJ<sub>HHV</sub>/kg, αντίστοιχα, η ισχύς του υπολογίστηκε περίπου ίση με 1175 kW (30% της HHV του πρωτογενούς ελαιοπυρήνα), ένα αποτέλεσμα που βρίσκεται σε συμφωνία με σχετικές εργασίες [69-72].



Επιπλέον, περίπου το 16.8% της μάζας του πρωτογενούς ΟΚ (που αντιστοιχεί σε 1090 kW<sub>LHV</sub> ή 30.2% της κατώτερης θερμογόνου δύναμης του πρωτογενούς ΟΚ και 1175 kW<sub>HHV</sub> ή 30,1% της ανώτερης θερμογόνου δύναμης του ΟΚ) μετατράπηκε σε βιο-έλαιο. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η εναπομένουσα βιομάζα χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενέργειας, η ηλεκτρική απόδοση ως προς LHV (Εξ. (11)) και HHV (Εξ. (12)) της ολοκληρωμένης διεργασίας ( $n_{el}$ ) είναι ίση με:

$$n_{el/LHV} = \frac{P_{el}}{LHV_{OK} - LHV_{bio-oil}} = 46,8\% \quad (11)$$

$$n_{el/HHV} = \frac{P_{el}}{HHV_{OK} - HHV_{bio-oil}} = 43,2\% \quad (12)$$

Επιπρόσθετα, η απόδοση του συστήματος του ατμοστρόβιλου υπολογίζεται από την Εξ. (13):

$$n_{el/ST} = \frac{P_{el} + P_{bio-oil_{LHV}}}{Q_{burner} + Q_{PC}} = 28.3\% \quad (13)$$

Λαμβάνοντας υπόψη το θερμικό περιεχόμενο του παραγόμενου βιο-ελαίου, οι αντίστοιχες αποδόσεις ηλεκτρικής ισχύος και συμπαραγωγής βιο-ελαίου ( $n_{comb}$ ) ως προς την LHV (Εξ. (14)) και την HHV (Εξ. (15)) της εισερχόμενης βιομάζας ήταν ίσες με:

$$n_{comb/LHV} = \frac{P_{el} + P_{bio-oil_{LHV}}}{LHV_{OK}} = 77.0\% \quad (14)$$

$$n_{comb/HHV} = \frac{P_{el} + P_{bio-oil_{LHV}}}{HHV_{OK}} \quad (15)$$

Επίσης, θα πρέπει να τονιστεί σε αυτό το σημείο ότι η προτεινόμενη διεργασία δεν έχει σχεδιαστεί ως μια αποκλειστική και οικονομικά αποδοτική διεργασία παραγωγής ενέργειας, καθώς i) μέρος του ενεργειακού περιεχομένου του ακατέργαστου ελαιοπυρήνα μετατρέπεται προς βιο-έλαιο μέσω της πυρόλυσης αντί να μετατραπεί πλήρως σε ηλεκτρική ενέργεια και ii) η χρήση της κυψέλης καυσίμου με τροφοδοσία αερίου σύνθεσης συνεπάγεται αναπόφευκτα τη χρήση δαπανηρών μονάδων καθαρισμού του αερίου σύνθεσης. Άρα, μια άμεση ποσοτική σύγκριση με συμβατικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής που χρησιμοποιούν μόνο οικονομικά αποδοτικούς θερμικούς κινητήρες δεν έχει νόημα σε αυτή την περίπτωση.



Υπό το πρίσμα των παραπάνω, τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας επεξηγούνται καλύτερα αν γίνει μια σύγκριση με αρκετές μελέτες που εξετάζουν την ενσωμάτωση μιας κυψέλης καυσίμου SOFC σε διεργασίες αεριοποίησης βιομάζας, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5. Πράγματι, η ηλεκτρική απόδοση που υπολογίστηκε στην παρούσα εργασία είναι συγκρίσιμη ή ακόμη και υψηλότερη σε σύγκριση με πολλές σχετικές εργασίες, λαμβάνοντας μάλιστα υπόψη το γεγονός ότι ένα σημαντικό μέρος της πρωτογενούς βιομάζας (16.8% ανά μάζα ή περίπου 30% του ενεργειακού της περιεχομένου) οδηγείτε για παραγωγή βιο-ελαίου και επομένως δεν χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, η ανακυκλοφορία της θερμότητας καθώς και του ατμού που παράγεται από τις εξώθερμες (SOFC και μετακαυστήρας) στις ενδόθερμες διεργασίες (πυρόλυση και αεριοποίηση) συμβάλει σημαντικά στη μεγιστοποίηση της απόδοσης. Αυτό οφείλεται σε δύο βασικούς λόγους: i) οι αντιδράσεις αεριοποίησης και αναμόρφωσης αυξάνουν την περιεκτικότητα σε υδρογόνο και μονοξείδιο του άνθρακα και κατά συνέπεια το ενεργειακό περιεχόμενο της παροχής αερίου καυσίμου στη διάταξη SOFC και ii) η ανακυκλοφορία της θερμότητας καλύπτει τις θερμικές απαιτήσεις αυτών των ενδόθερμων αντιδράσεων. Ως αποτέλεσμα, η συνολική διεργασία καθίσταται πρακτικά αυτόθερμη, γεγονός που αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα λαμβάνοντας υπόψη την εγγενή πολυπλοκότητά της. Επίσης, η υψηλή θερμαντική αξία του τροφοδοτούμενου αερίου καυσίμου στην άνοδο της SOFC (3363 kW, βλ. Σχήμα 8) αντιστοιχεί στο 86.2% του HHV της αρχικά τροφοδοτούμενης βιομάζας (3900 kW), αν και ένα μεγάλο ποσοστό του πρωτογενούς ελαιοπυρήνα (περίπου 30%) οδηγείτε προς παραγωγή βιο-πετρελαίου.

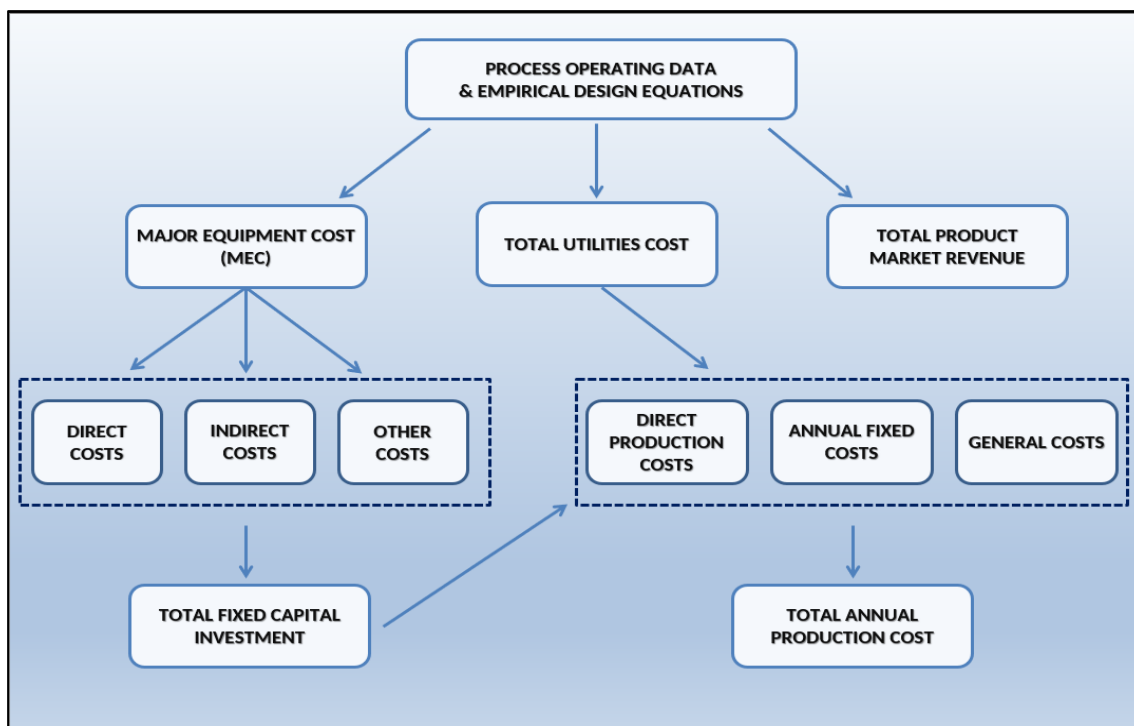
Πίνακας 5. Σύγκριση μελετών μοντελοποίησης συζευγμένων διεργασιών αεριοποίησης βιομάζας και κυψελών καυσίμου SOFC για παραγωγή ισχύος.

Σύστημα	Κλίμακα ( $MW_{el}$ )	$\eta_{el}$ (%)	Βιβλιογραφία
SOFC	1.70-2.10	38-41	[97]
SOFC – Μηχανή Stirling	0.12	42.4	[97]
SOFC – Ατμοστρόβιλος	7.10-7.3	49-51	[98]
SOFC – Αεριοστρόβιλος (SGE)	46.0	46	[51]
SOFC – MGT	0.25	50	[51]
SOFC – MGT	0.26	35	[99]
SOFC – MGT	0.17-0.35	40.6	[60]
SOFC – ICE	1.08	54	[21]
SOFC – Ατμοστρόβιλος	7.60	56	[96]
SOFC – Αεριοστρόβιλος (SGE)	10.0	54	[100]
Παρούσα Μελέτη	1.68	46.8	-

## Κεφάλαιο 3.Οικονομική Ανάλυση

### 3.1 Μεθοδολογία

Όσον αφορά την οικονομική ανάλυση του ολοκληρωμένου συστήματος, η χρησιμοποιούμενη μεθοδολογία περιλαμβάνει μια σειρά βημάτων όπως φαίνεται στο Σχήμα 12. Αρχικά, τα δεδομένα της προσομοίωσης της διεργασίας χρησιμοποιήθηκαν για τη διαστασιολόγηση των διαφόρων συστημάτων της διεργασίας και στη συνέχεια, υπολογίστηκε το κύριο κόστος εξοπλισμού για όλα τα εμπλεκόμενα υποσυστήματα (δηλαδή, αυτά που περιλαμβάνονται στο Σχήμα 9). Η εκτίμηση του κόστους του κύριου μηχανολογικού εξοπλισμού (MEC-Major Equipment Cost) είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό της Συνολικής Επένδυσης Πάγιου Κεφαλαίου, η οποία περιλαμβάνει το άμεσο, το έμμεσο και λοιπό κόστος κεφαλαίου. Παράλληλα, υπολογίστηκαν δύο συνολικές ετήσιες κατηγορίες κόστους: i) τα λειτουργικά έξοδα, τα οποία υπολογίζονται σε ετήσια βάση και περιλαμβάνουν εκτιμήσεις και υποθέσεις που σχετίζονται με το κόστος προμήθειας του ελαιοπυρήνα, τις ανάγκες ψύξης και τα προσροφητικά υλικά για την επεξεργασία του αερίου σύνθεσης πριν τροφοδοτηθεί στην κυψέλη καυσίμου και ii) την τιμή πώλησης των προϊόντων της ολοκληρωμένης διεργασίας, που περιλαμβάνει τα συνολικά έσοδα από τις πωλήσεις της ηλεκτρικής ενέργειας και του βιοελαίου. Τελικά, για την εκτίμηση του Συνολικού Ετήσιου Κόστους Παραγωγής χρησιμοποιείται το σύνολο των λειτουργικών εξόδων και της συνολικής επένδυσης παγίου κεφαλαίου.



Σχήμα 12. Μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για τις οικονομικές αξιολογήσεις της διαδικασίας.

Η ωφέλιμη διάρκεια ζωής του έργου θεωρήθηκε ίση με 20 χρόνια ( $N=20$ ) με τους συντελεστές απόσβεσης ( $d$ ) και ανάκτησης κεφαλαίου ( $e$ ) να λαμβάνονται ίσοι με  $d=e=6\%$ . Επίσης θεωρήθηκε συνολικός φόρος εισοδήματος ίσος με  $24\%$  επί των καθαρών κερδών με βάση τους Ελληνικούς συντελεστές φορολογίας επιχειρήσεων του 2021-22. Λαμβάνοντας υπόψη τον καινοτόμο χαρακτήρα της ιδέας, ο παράγοντας κινδύνου του έργου ορίστηκε στο  $8\%$ . Συλλογικά, οι δείκτες οικονομικής απόδοσης που υποτίθεται ότι θα αξιολογήσουν την οικονομική βιωσιμότητα της προτεινόμενης ολοκληρωμένης διεργασίας παρατίθενται στον Πίνακα 6.

Πίνακας 6. Δείκτες οικονομικής Απόδοσης	
Περιγραφή Οικονομικών Δείκτων	Τιμή Αξία
Συντελεστής λειτουργίας εγκατάστασης (% των ετών)	90
Ωφέλιμη ζωή εγκατάστασης, $N$ (έτη)	20
Συντελεστής φόρου εισοδήματος, $t$ (% του καθαρού κέρδους)	24
Παράγοντας κινδύνου (%)	8
Απόσβεση (%)	6
Ετήσιο επιτόκιο (%)	6

### 3.2 Κόστος Κύριου Μηχανολογικού Εξοπλισμού

Η εκτίμηση του κόστους του κύριου μηχανολογικού εξοπλισμού (MEC) πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας κοινές εμπειρικές εξισώσεις που λαμβάνουν υπόψη τις βασικές σχεδιαστικές παραμέτρους και είναι ευρέως διαθέσιμες στη βιβλιογραφία [101]. Επιπλέον, για την κοστολόγηση των τμημάτων του εξοπλισμού που βασίζονται σε καθιερωμένες τεχνολογίες, όπως ο ατμοστρόβιλος, οι αντλίες, οι μονάδες αποθήκευσης, κ.α. λήφθηκαν υπόψη τιμές της αγοράς, με στόχο μία ρεαλιστική εκτίμηση της πάγιας επένδυσης. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν οι δείκτες Marshall και Swift και η άμεση σύγκριση με τη βιβλιογραφία [102-105], προκειμένου να ληφθούν υπόψη οι διακυμάνσεις στον πληθωρισμό του νομισματικού κόστους και του κόστους εργασίας.

Ο Πίνακας 7 παρουσιάζει το κόστος των κύριων τμημάτων του μηχανολογικού εξοπλισμού (MEC) της ολοκληρωμένης διεργασίας. Για την κυψέλη καυσίμου λήφθηκε υπόψη ένα ειδικό κόστος της SOFC που ανέρχεται σε 2000 €/kW [106,107], το συνολικό κόστος της οποίας αντιστοιχεί περίπου στο ήμισυ του MEC. Το γεγονός αυτό, έχει αναφερθεί επανειλημμένα σε άλλες σχετικές μελέτες. Συγκεκριμένα, με βάση το ίδιο ειδικό κόστος της SOFC των 2000 €/kW, οι Gadsbøll et al. [48] ανέφεραν ότι το κόστος της SOFC αποτελούσε τον βασικό περιορισμό για την εμπορευματοποίηση των ολοκληρωμένων λύσεων αεριοποίησης βιομάζας και SOFC που προτάθηκαν. Επίσης, οι Fryda et al. [60] σχολίασαν ότι ένα σύστημα αεριοποίησης SOFC-MGT πιθανότατα δεν θα ήταν οικονομικά εφικτό λόγω του υψηλού κόστους του συστήματος SOFC και παρά την αυξημένη απόδοση του συνδυασμένου συστήματος. Εκτός από τη μονάδα SOFC, το σύστημα καθαρισμού του αερίου καυσίμου έχει επίσης αναφερθεί ότι αντιστοιχεί σε μεγάλο μέρος του MEC (περίπου 20-30%), λόγω του γεγονότος ότι οι κυψέλες καυσίμου SOFC απαιτούν την τροφοδοσία εξαιρετικά καθαρών καυσίμων, σε αντίθεση με την περίπτωση των στρόβιλων ή των κινητήρων εσωτερικής καύσης [89,108]. Στην παρούσα εργασία, λαμβάνοντας υπόψη ότι το ειδικό κόστος της μονάδας καθαρισμού αερίου ανέρχεται σε 1000 €/kW<sub>SOFC</sub> [40,89,108-110], το σύστημα καθαρισμού βρέθηκε να αντιστοιχεί στο 1/4 του συνολικού MEC, που είναι το δεύτερο πιο σημαντικό στοιχείο κόστους της εξεταζόμενης διεργασίας μετά τη μονάδα SOFC. Με άλλα λόγια, οι μονάδες καθαρισμού του αερίου καυσίμου και η SOFC αντιπροσωπεύουν τα τρία τέταρτα του συνολικού κόστους MEC, ενώ το υπόλοιπο κόστος κατανέμεται πιο ομοιόμορφα.

Πίνακας 7. Κόστος Κύριου εξοπλισμού (MEC)		
Κύριος Μηχανολογικός Εξοπλισμός	€	%
Αντιδραστήρας πυρόλυσης (συμπεριλαμβανομένου κυκλώνα, ιμάντα μεταφοράς και άλλων βοηθητικών εξαρτημάτων)	321,698	5.4
Εναλλάκτες θερμότητας	355,125	6.0
Διαχωριστές/Δοχεία/Δεξαμενές Αποθήκευσης	233,924	4.0
Αεριοποιητής (συμπεριλαμβανομένου του κυκλώνα των βοηθητικών εξαρτημάτων)	132,174	2.2
Κυψέλη Καυσίμου SOFC	2,940,000	49.8
Μετακαυστήρας	167,193	2.8
Ατμοστρόβιλοι	285,425	4.8
Μονάδα καθαρισμού και επεξεργασίας του αερίου Καυσίμου	1,470,000	24.9
<b>Συνολικό κόστος εξοπλισμού(MEC)</b>	<b>5,905,539</b>	<b>100.0</b>

### 3.3 Οικονομικές επιδόσεις και λειτουργικό κόστος

Τα βοηθητικά υποσυστήματα και οι παροχές για το ολοκληρωμένο σύστημα αναφέρονται στα αναλώσιμα του συστήματος καθαρισμού του αερίου καυσίμου (κεραμικά φίλτρα, προσροφητές κ.λπ.), στο κόστος προμήθειας της βιομάζας και στις ανάγκες ψύξης του αέρα της διεργασίας. Όσον αφορά τη μονάδα καθαρισμού του αερίου σύνθεσης, υπολογίστηκε ένα κόστος προσροφητή 14 €/kg και ένα πρόσθετο λειτουργικό κόστος των κεραμικών φίλτρων (συνολικό κόστος καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της επένδυσης) που ανέρχεται στις 250.000 €. Ακόμη, όσον αφορά το κόστος της πρώτης ύλης του ελαιοπυρήνα, γενικά το κόστος των υπολειμμάτων με βάση την ελιά μπορεί να ποικίλλει ευρέως μεταξύ 10 και 150 €/tn, ανάλογα με παραμέτρους όπως η υγρασία και η περιεκτικότητα σε τέφρα, σύμφωνα με το μέσο εύρος κόστους άλλων τυπικών λιγνοκυτταρινούχων υπολειμμάτων βιομάζας [35,111]. Ωστόσο, σε αυτήν την εργασία επιλέχθηκε ένα σχετικά χαμηλό εύρος τιμών πρώτης ύλης 10-60 €/tn, καθώς υποτίθεται ότι ο απαιτούμενος ελαιοπυρήνας για την συνδυασμένη διεργασία είναι τοπικά διαθέσιμος και είναι δυνατό να προμηθευτεί σε μεγάλες ποσότητες, όπως συμβαίνει για αρκετές μονάδες μικρής έως μεσαίας κλίμακας που επωφελούνται από την απουσία

προβλημάτων στην εφοδιαστική αλυσίδα της βιομάζας, μειώνοντας έτσι σημαντικά την τιμή αγοράς της πρώτης ύλης βιομάζας [34,59].

Ωστόσο, μετά την οικονομική ανάλυση, διαπιστώθηκε ότι η επίδραση της τιμής της πρώτης ύλης βιομάζας ήταν αμελητέα στη συνολική οικονομική αποτίμηση της διεργασίας. Επομένως λήφθηκε μια τυπική τιμή για την πρωτογενή βιομάζα ίση με 40 €/tn για το βασικό σενάριο.

Από την άλλη πλευρά, οι πωλήσεις των προϊόντων της διεργασίας αναφέρονται στα εξής: α) στην καθαρή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, που παράγεται από κοινού από τους ατμοστρόβιλους (~215 kW<sub>el</sub>) και τη μονάδα SOFC (~1470 kW<sub>el</sub>) έχοντας καλύψει τις εσωτερικές ανάγκες της διεργασίας για την αντλία/συμπιεστή και β) την παραγωγή βιο-ελαίου (υψηλής ποιότητας εμπορεύσιμο καύσιμο με χαμηλή περιεκτικότητα σε οξυγόνο). Η τιμή πώλησης του βιο-ελαίου δεν ακολουθεί τα κανονικά πρότυπα τιμολόγησης προϊόντων της αγοράς καυσίμων (π.χ. βενζίνη, φυσικό αέριο) και εξαρτάται από την παραγωγική ικανότητα, τη ζήτηση της αγοράς και τη γεωγραφική περιοχή παραγωγής. Με βάσει τα παραπάνω, έχει αναφερθεί στη βιβλιογραφία ένα εύρος τιμών για το βιο-έλαιο μεταξύ 400 και 700 €/tn [112], ενώ στο βασικό σενάριο χρησιμοποιήθηκε μια συντηρητική τιμή 400 €/tn. Επίσης, για το βασικό σενάριο, η τιμή ηλεκτρικής ενέργειας ορίστηκε στα 0.175 €/kWh, σύμφωνα με το ελληνικό νομικό πλαίσιο για τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από βιομάζα και τη δυναμικότητα της μονάδας (Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής, νόμος 3851/ 2010 «Επιτάχυνση των εξελίξεων στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας για τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής»).

Στη συνέχεια, στον Πίνακα 8 παρουσιάζονται αναλυτικά τα ετήσια λειτουργικά έσοδα και έξοδα για το βασικό σενάριο για το έτος 2022. Φαίνεται ότι το συνολικό κόστος των βοηθητικών παροχών ανέρχεται σε περίπου 1.02 M€/έτος, ενώ τα συνολικά έσοδα είναι σχεδόν τρεις φορές υψηλότερα (2.75 M€/έτος). Συγκεκριμένα, σχεδόν το 85% αυτών των εσόδων αποδίδεται στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, καταδεικνύοντας τον ευεργετικό αντίκτυπο της χρήσης μιας μονάδας SOFC για τη χρήση αερίου σύνθεσης στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία αντισταθμίζει σε μεγάλο βαθμό το αυξημένο κόστος εγκατάστασης τόσο για τον καθαρισμό του αερίου καυσίμου όσο και για τη διάταξη SOFC, όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

Πίνακας 8. Λειτουργικά κόστη και έσοδα από την πώληση των προϊόντων για το βασικό σενάριο.	
Λειτουργικά Έξοδα	€/year
Ελαιοπυρήνας (40 €/tn)	262,695
Απαιτήσεις Ψύξης	1656
Προσροφητικά Υλικά/Κεραμικά Φίλτρα (για την απομάκρυνση του θείου, της τέφρας, των πτητικών και των αιωρούμενων σωματιδίων)	755,903
<b>Συνολικό Ετήσιο Κόστος</b>	<b>1,020,254</b>
Πώληση Προϊόντων	
Ηλεκτρική Ενέργεια (0.175 €/kWh)	2,322,516
Βιο-έλαιο (400 €/tn)	432,043
<b>Συνολικά Ετήσια Έσοδα από την πώληση προϊόντων</b>	<b>2,754,559</b>

Το άμεσο, έμμεσο και λοιπό επενδυτικό κόστος υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας συντελεστές από τη βιβλιογραφία [35,102,103,105,107] ως ποσοστό του MEC, όπως φαίνεται παρακάτω στον Πίνακα 9. Η επένδυση παγίου κεφαλαίου (Fixed Capital Investment- $I_F$ ) προέρχεται από τις άμεσες, έμμεσες και λοιπές δαπάνες, ενώ το κεφάλαιο κίνησης (Working Capital- $I_W$ ) υπολογίζεται ως 15% του  $I_F$ . Ομοίως, ο Πίνακας 10 ταξινομεί και παρουσιάζει το συνολικό ετήσιο κόστος παραγωγής (Total Annual Production Costs-TPC) που σχετίζεται με τις δαπάνες παραγωγής (δηλαδή το κόστος λειτουργίας). Το TPC υπολογίστηκε από το κόστος άμεσης παραγωγής (Direct Production Cost-DPC), το ετήσιο πάγιο (Annual Fixed Cost-AFC) και το γενικό κόστος (General Cost-GC) και ανέρχεται σε περίπου 8.3 Μ€, υπερδιπλάσιο των ετήσιων εσόδων για το βασικό σενάριο (βλ. Πίνακα 8). Πρέπει να σημειωθεί ότι το ετήσιο κόστος παραγωγής που σχετίζεται άμεσα με την επένδυση παγίου κεφαλαίου ( $I_F$ , Πίνακας 9), δηλαδή, συντήρηση (A4), προμήθειες (A5), γενικά έξοδα (A7), ετήσια πάγια έξοδα (B), μάρκετινγκ (C2) και επιτόκια (C3), αντιστοιχούν σε 6.87 Μ€ ή 83% του TPC. Έτσι, η υψηλή επένδυση παγίου κεφαλαίου της επιχείρησης, κυρίως λόγω του υψηλού κόστους της τεχνολογίας της κυψέλης καυσίμου SOFC και δευτερευόντως του καθαρισμού του αερίου καυσίμου, έχει ως αποτέλεσμα ένα αυξημένο ετήσιο κόστος παραγωγής.

Με βάση τη συνολική επένδυση παγίου κεφαλαίου του Πίνακα 9 και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που είναι περίπου  $\sim 1685.85 \text{ kW}_{el}$ , το μοναδιαίο κόστος της μονάδας ανά kW παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας υπολογίστηκε σε  $\sim 20.000 \text{ €/kW}_{el}$ , το οποίο βρίσκεται σε συμφωνία με το αναφερόμενο κόστος αντίστοιχης συνδυασμένης μονάδας αεριοποίησης βιομάζας/SOFC,  $> 8000 \text{ €}_{2013}/\text{kW}_{el}$  και  $> 15000 \text{ €/kW}_{el}$  [104,105]. Θα πρέπει να τονιστεί, ωστόσο, ότι αυτές οι μελέτες δεν εξέτασαν λεπτομερώς τα στάδια καθαρισμού του αερίου σύνθεσης και δεν περιέλαβαν μια διαδικασία πυρόλυσης για την παραγωγή βιο-ελαίου.

Πίνακας 9. Συνολικές επενδύσεις παγίου κεφαλαίου και συνολικές άμεσες, έμμεσες και άλλες δαπάνες.		
<b>Άμεσα Κόστη</b>		<b>€</b>
Κύριο Κόστος Εξοπλισμού (MEC)	<a href="#">Πίνακας 7</a>	5,905,539
Κόστος Εγκατάστασης	47% MEC	2,775,604
Ρυθμίσεις και Όργανα	36% MEC	2,125,994
Σωληνώσεις	68% MEC	4,015,767
Μονώσεις	8% MEC	472,443
Ηλεκτρολογικός Εξοπλισμός	11% MEC	649,609
Κατασκευή Κτιρίου και υπηρεσίες	18% MEC	1,062,997
Βελτιώσεις Οικοπέδου	10% MEC	590,554
Εγκαταστάσεις Υπηρεσιών	70% MEC	4,133,878
Οικόπεδο	6% MEC	354,332
<b>Συνολικό πάγιο Άμεσο Κόστος (DC)</b>		<b>22,086,717</b>
<b>Έμμεσα Κόστη</b>		
Κόστος Σχεδιασμού και επίβλεψης	33% MEC	1,948,828
Δαπάνες Κατασκευής	41% MEC	2,421,271
<b>Συνολικό Πάγιο Έμμεσο Κόστος (IC)</b>		<b>4,370,099</b>
<b>Λοιπά Κόστη</b>		
Νομικές Δαπάνες	4% MEC	236,222
Εργολαβίες	22% MEC	1,299,219
Απρόβλεπτα Κόστη	44% MEC	2,598,437
<b>Συνολικά Λοιπά Κόστη (OC)</b>		<b>4,133,878</b>
<b>Συνολικά Κόστη</b>		
<b>Σταθερό Πάγιο Κόστος (I<sub>F</sub>)</b>	DC + IC + OC	<b>30,590,694</b>
<b>Κεφάλαιο Κίνησης (I<sub>W</sub>)</b>	15% I <sub>F</sub>	<b>4,588,604</b>
<b>Συνολική Πάγια Επένδυση (I=I<sub>F</sub>+I<sub>W</sub>)</b>		<b>35,179,298</b>



Πίνακας 10. Ετήσιες δαπάνες παραγωγής.		
<b>A. Κόστος Άμεσης Παραγωγής(DPC)</b>		€/year
A1. Πρώτες ύλες και βοηθητικές παροχές	Πίνακας8	1,020,254
A2. Εργατικά	15 άτομα	270,000
A3. Επίβλεψη	15% A2	40,500
A4. Συντήρηση	5% I <sub>F</sub>	1,529,535
A5. Προμήθειες λειτουργίας	15% A4	229,430
A6. Λειτουργία εργαστηρίου	10% A2	27,000
A7.Γενικά έξοδα	1% (A1 - A6)	31,167
<b>Συνολικό άμεσο κόστος παραγωγής (DPC)</b>		3,147,886
<b>B. Ετήσια πάγια κόστη (APC)</b>		
B1. Συνολικοί Φόροι	1% I <sub>F</sub>	305,907
B2. Ασφάλιστρα	1% I <sub>F</sub>	305,907
B3. Απόσβεση	10% I <sub>F</sub>	3,059,069
B4. Απρόβλεπτα κόστη	60% (A2 + A3 + A4)	1,104,021
<b>Συνολικό ετήσιο πάγιο κόστος (AFC)</b>		4,774,904
<b>C. Γενικά κόστη</b>		
C1. Διοίκηση	20% A2	54,000
C2. Μάρκετινγκ	2% (A1 - A6)	62,334
C3. Επιτόκια	8% (B3)	244,726
<b>Συνολικό γενικό κόστος (TGC)</b>		361,060
<b>Συνολικό ετήσιο κόστος παραγωγής (TPC) = DPC + AFC + GC</b>		8,283,850

Προκειμένου να εκτιμηθεί η κερδοφορία του προτεινόμενου εγχειρήματος, οι δείκτες του μικτού (R) και του καθαρού (P) κέρδους, καθώς και τα κριτήρια οικονομικής σκοπιμότητας της απόδοσης επένδυσης (ROI) και της καθαρής παρούσας αξίας (NPV) του εγχειρήματος, θα πρέπει να καθοριστούν και να αξιολογηθούν κατάλληλα. Έτσι, το μικτό κέρδος (R) ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ των εσόδων από τις πωλήσεις (S) και των ετήσιων λειτουργικών εξόδων της ολοκληρωμένης διεργασίας (δηλαδή του TPC), εξαιρουμένου του φόρου εισοδήματος (Εξ. (16)):

$$R = S - \text{TPC} \quad (16)$$

όπου το S εκφράζεται σε €/έτος και αναφέρεται στα συνολικά ετήσια έσοδα των προϊόντων (Πίνακας 8), και το TPC (€/έτος) είναι το συνολικό ετήσιο κόστος παραγωγής (υπολογισμένο στον Πίνακα 10). Το καθαρό κέρδος (P) με τη σειρά του είναι η διαφορά μεταξύ του μικτού κέρδους (R), του φόρου εισοδήματος ( $t = 24\%$ ) και του αποσβέσιμου κεφαλαίου επένδυσης (Εξ. (17)):

$$P = R \cdot (1 - t) \quad (17)$$

Η απόδοση επένδυσης (ROI) ορίζεται ως ο λόγος του Καθαρού Κέρδους επί της συνολικής επένδυσης παγίου κεφαλαίου και εκφράζεται σε ετήσια ποσοστιαία βάση. Το ROI υπολογίζεται μετά την αφαίρεση του φόρου εισοδήματος από το ακαθάριστο ή προ φόρων

εισόδημα για ένα συγκεκριμένο έτος ή ως μέσος όρος κατά τη διάρκεια ζωής του έργου (Εξ. (18)):

$$ROI = \frac{P}{(I_F + I_W)} \quad (18)$$

Τέλος, η Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV) είναι η διαφορά μεταξύ της παρούσας αξίας των ταμειακών εισροών (το καθαρό κέρδος) και της παρούσας αξίας των ταμειακών εκροών (Εξ. (19)):

$$NPV = \sum_{i=1}^N \frac{P}{(1+h)^i} - I \quad (19)$$

όπου  $i$  δηλώνει την εξέλιξη των ετών,  $h$  το προεξοφλητικό επιτόκιο (ίσο με 6% όπως φαίνεται στον Πίνακα 7) και  $I$  είναι η επένδυση παγίου κεφαλαίου (Πίνακας 9). Μια θετική καθαρή παρούσα αξία υποδηλώνει ότι το εισόδημα που δημιουργείται από την προτεινόμενη επένδυση υπερβαίνει το αναμενόμενο κόστος. Αυτοί οι δείκτες και τα κριτήρια παρέχουν μια επισκόπηση και μια ένδειξη της οικονομικής απόδοσης της επένδυσης και θα εξεταστούν στις επόμενες ενότητες.

Επίσης, ο Πίνακας 11 παρουσιάζει τους προαναφερθέντες δείκτες και τα κριτήρια σκοπιμότητας για το βασικό σενάριο καθώς και για τις τιμές νεκρού σημείου της ηλεκτρικής ενέργειας για τη βασική περίπτωση και για τη μέγιστη τιμή βιο-ελαίου. Το βασικό σενάριο για τις τρέχουσες τιμές βιο-ελαίου και ηλεκτρικής ενέργειας (Πίνακας 8) είναι απολύτως μη βιώσιμο, οδηγώντας σε πολύ αρνητικά ετήσια κέρδη και σε αρνητική απόδοση της επένδυσης και στην καθαρή παρούσα αξία. Η τιμή ηλεκτρικής ενέργειας για το νεκρό σημείο, δηλαδή στην περίπτωση που η  $NPV = 0$  καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της επένδυσης υπολογίστηκε σε 0.915 €/kWh, η οποία είναι σημαντικά υψηλότερη από την ήδη επιδοτούμενη τιμή ηλεκτρικής ενέργειας από βιομάζα που ανέρχεται σε 0.175 €/kWh και των τρεχουσών τιμών ηλεκτρικής ενέργειας για το 2022 (0.20-0.30 €/kWh, Κατάσταση Ελληνικής Αγοράς, 2022) [113]. Το νεκρό σημείο για την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας πέφτει στα 0.890 €/kWh για τη μέγιστη τιμή βιοελαίου των 700 €/tn, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [80,112,114]. Τα νεκρά σημεία του Πίνακα 11 που παρατίθεται παρακάτω αναφέρονται στην πλήρη απόσβεση των συνολικών επενδύσεων παγίου κεφαλαίου και του ετήσιου κόστους παραγωγής κατά τη διάρκεια της 20ετούς διάρκειας ζωής της μονάδας για την ολοκληρωμένη διεργασία, που αντιστοιχούν σε καθαρά κέρδη υπολογιζόμενα σε 3.1 Μ€/έτος, οδηγώντας τελικά σε τιμή απόδοσης επένδυσης,  $ROI = 8.7\%$ .

Πίνακας 11. Δείκτες οικονομικής απόδοσης της διεργασίας και τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας στο νεκρό σημείο για το βασικό σενάριο και για την μέγιστη τιμή βιο-ελαίου.			
Κόστος	Βασικό Σενάριο	Νεκρό Σημείο (Ηλεκτρική Ενέργεια)	Νεκρό Σημείο (Ηλεκτρική Ενέργεια+Βιο-έλαιο)
Ηλεκτρική Ενέργεια(€/kWh)	0.175	0.915	0.890
Βιο-έλαιο(€/tn)	400.0	400.0	700.0
R (Μ€/ανά έτος)	-5.58	4.03	4.03
P (Μ€/ανά έτος)	-3.24	3.07	3.07
ROI(%)	-12.05	8.72	8.72
NPV(Μ€)	-83.81	0.00	0.00

### 3.4 Ανάλυση Ευαισθησίας του Κόστους του Κύριου Μηχανολογικού Εξοπλισμού και Κίνητρα Χρηματοδότησης

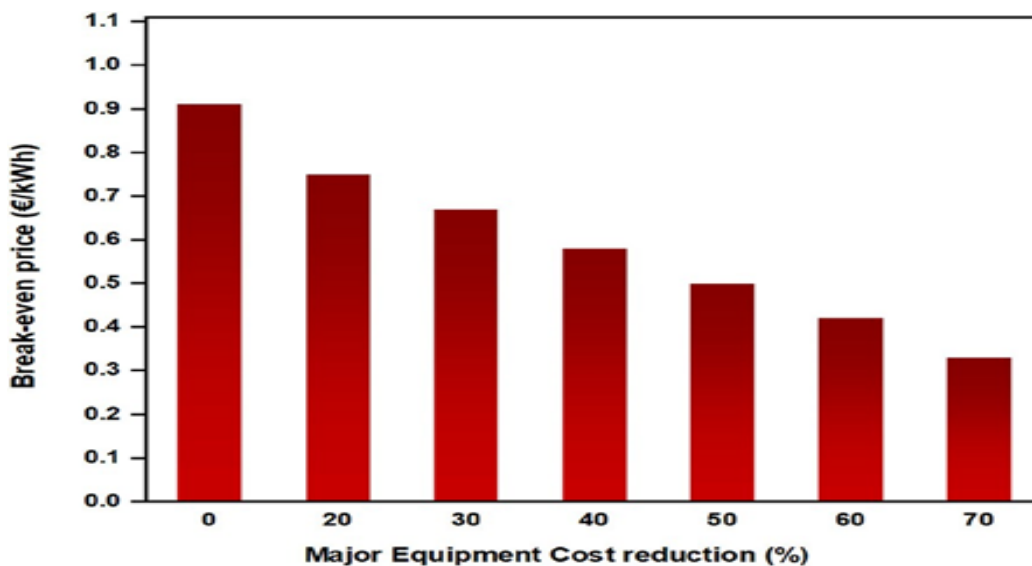
Η παραπάνω οικονομική ανάλυση αποκάλυψε ότι η εξεταζόμενη επένδυση δεν είναι οικονομικά εφικτή εφόσον ληφθούν υπόψη: το τρέχον κόστος της τεχνολογίας, τα λειτουργικά έξοδα και οι τιμές πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας και του βιο-ελαίου (βασικό σενάριο του Πίνακα 11). Στη συνέχεια και προκειμένου να αξιολογηθούν οι συνθήκες υπό τις οποίες η ολοκληρωμένη μονάδα θα μπορούσε να είναι οικονομικά βιώσιμη, έχει διαμορφωθεί ένα σύνολο σεναρίων και λήφθηκαν υπόψη και οι αντίστοιχες τιμές του νεκρού σημείου της ηλεκτρικής ενέργειας (δηλαδή για NPV= 0 έως το τέλος της 20ετούς διάρκειας ζωής).

Σύμφωνα με τον Πίνακα 10 και όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το ετήσιο κόστος παραγωγής που σχετίζεται άμεσα με τις επενδύσεις παγίου κεφαλαίου αντιστοιχεί στο 83% του TPC, ενώ οι πρώτες ύλες και οι βοηθητικές παροχές (Πίνακας 8 και A1 στον Πίνακα 10) σε μόλις 12.3 %, καθιστώντας λιγότερο σημαντική την ανάλυση ευαισθησίας της οικονομικής απόδοσης με βάση το κόστος της βιομάζας και τα αναλώσιμα που απαιτούνται για τον καθαρισμό του αερίου καυσίμου. Έτσι, εξετάστηκαν οι ακόλουθες δυνητικά ρεαλιστικές επιλογές, οι οποίες συνάδουν με τη συνεχιζόμενη πρόοδο των Ευρωπαϊκών και Εθνικών Σχεδίων για το Κλίμα και την Ενέργεια [1] και είναι οι εξής:

1. Μείωση του κόστους εξοπλισμού της διάταξης SOFC και του συστήματος καθαρισμού του αερίου καυσίμου καθώς και άλλων τεχνολογικών δαπανών, που θα μείωνε έτσι μετέπειτα το MEC και κατά συνέπεια τη συνολική επένδυση παγίου κεφαλαίου. Ειδικότερα για τις διατάξεις SOFC υφίστανται προβλέψεις δραματικής μείωσης του κόστους τους, όταν επιτευχθούν οικονομίες κλίμακας.

## 2. Επιχορήγηση του εξεταζόμενου επιχειρηματικού εγχειρήματος.

Επομένως, όπως φαίνεται στο Σχήμα 13 που παρατίθεται παρακάτω η μείωση του MEC θα μπορούσε να έχει ουσιαστικά ευεργετική επίδραση στην τιμή ηλεκτρικής ενέργειας στο νεκρό σημείο, οδηγώντας σε μείωση από 0.91 €/kWh (βασικό σενάριο) σε 0.75 και 0.32 €/kWh (δηλ. 18% και 65% αντίστοιχα) καθώς το MEC μειώνεται κατά 20 και 70%, αντίστοιχα (λαμβάνοντας υπόψη την τιμή της πρώτης ύλης του ελαιοπυρήνα στα 40 €/tn και της αξίας πώλησης του βιοελαίου στα 400 €/tn). Όπως φαίνεται στον Πίνακα 7, δεδομένου ότι το σύστημα της κυψέλης καυσίμου SOFC και ο καθαρισμός του αερίου σύνθεσης καταλαμβάνουν το σημαντικότερο ποσοστό στο συνολικό κόστος του μηχανολογικού εξοπλισμού (MEC), η μείωση του κόστους της τεχνολογίας της κυψέλης καυσίμου SOFC και του κόστους της μονάδας καθαρισμού του αερίου καυσίμου θα έχει σημαντικό αντίκτυπο στην οικονομική βιωσιμότητα της ολοκληρωμένης διεργασίας.

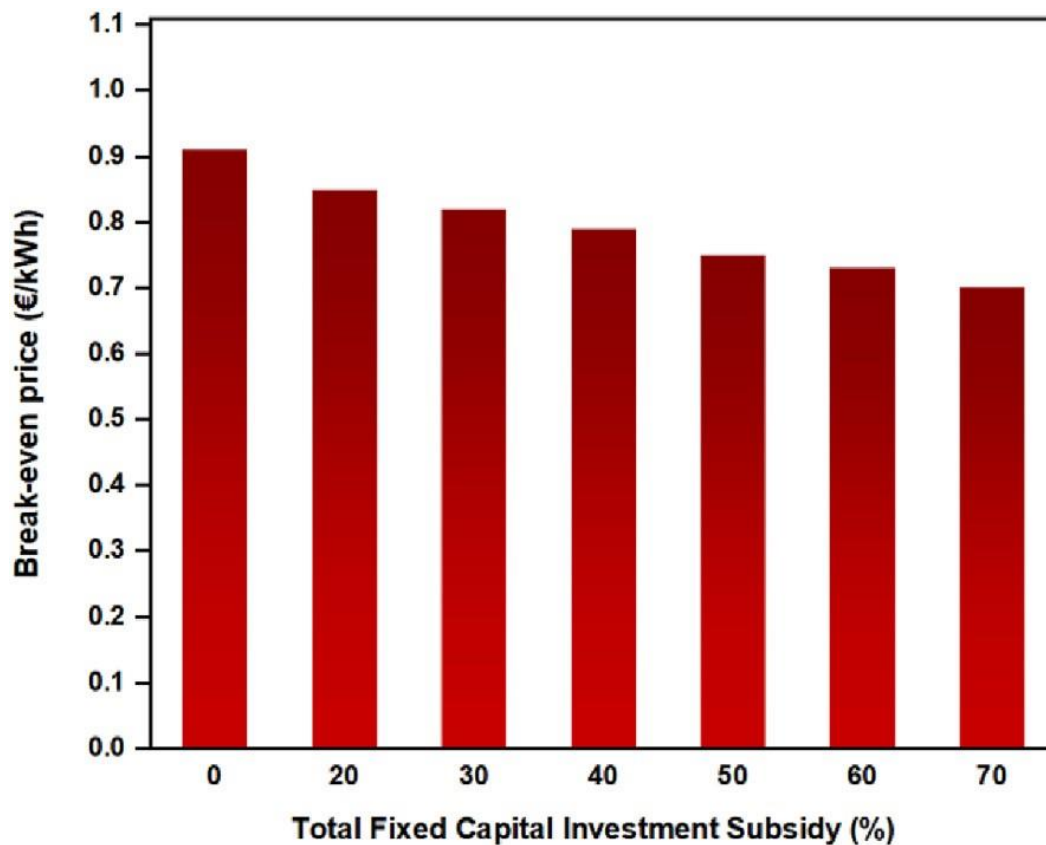


Σχήμα 13. Μεταβολή της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας στο νεκρό σημείο ως συνάρτηση του ποσοστού μείωσης του συνολικού κόστους του κύριου μηχανολογικού εξοπλισμού.

Προς αυτή την κατεύθυνση, οι Whiston et al. [115] και Singh et al. [106] εξέτασαν τις προοπτικές για ανταγωνιστικά ολοκληρωμένα συστήματα SOFC από πλευράς κόστους και ανέφεραν ότι για το έτος αναφοράς του 2020, το κόστος SOFC 250 kW θα μπορούσε να είναι της τάξης των 2200 €/2020/kW<sub>el</sub> για παραγωγική ικανότητα 210 συστημάτων ετησίως. Ωστόσο, οι μελλοντικές προβλέψεις συνεπάγονται πιθανές σημαντικές μειώσεις στο κόστος του συστήματος SOFC, σε σχέση με την αύξηση του όγκου παραγωγής προς την κατεύθυνση επίτευξης οικονομικών κλίμακας. Έτσι, ένα κόστος συστήματος SOFC 250 kW θα μπορούσε τελικά να μειωθεί στα 1750 €/kW<sub>el</sub> και 775 €/kW<sub>el</sub> σε όγκους παραγωγής 4000 και 10000 αντίστοιχων συστημάτων για τα έτη 2035 και 2050, αντίστοιχα. Σε σχέση με το υποτιθέμενο εδώ κόστος SOFC των 2000 €/kW<sub>el</sub> (Πίνακας 7), αυτές οι τιμές αντιστοιχούν σε μείωση κόστους SOFC κατά 12.5% και 61.3%, αντίστοιχα. Επιπλέον, σύμφωνα με το Strategic

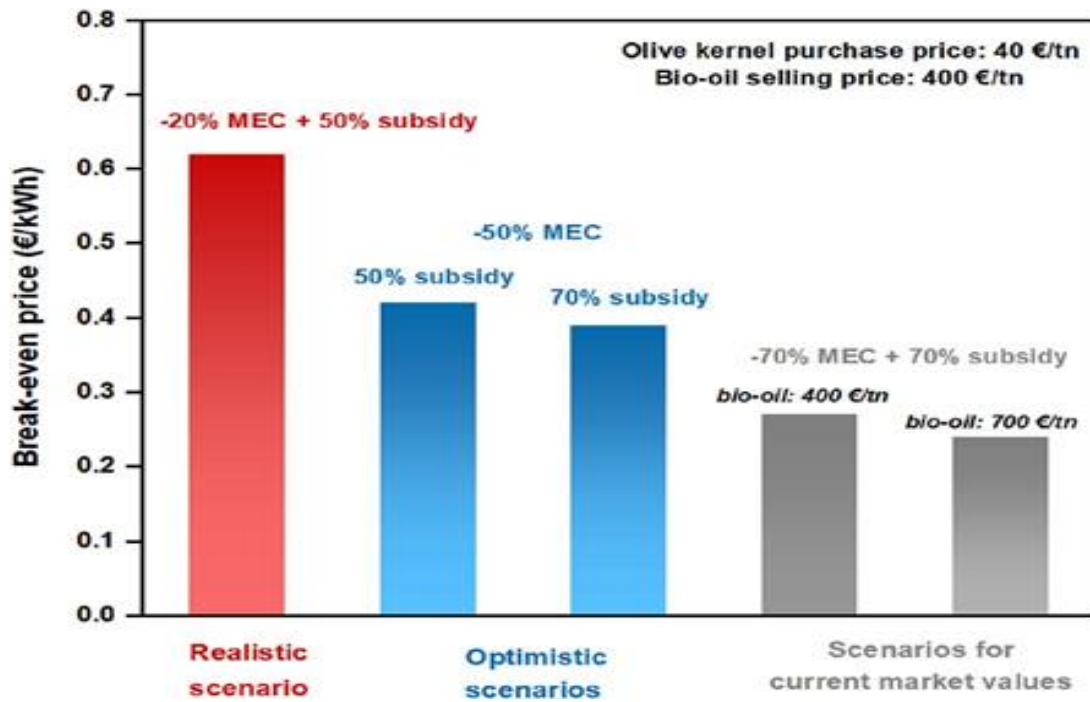
Research and Innovation Agenda of Hydrogen Europe [116], των κόστος κεφαλαίου συστημάτων SOFC τρέχουσας τεχνολογικής στάθμης (συμπεριλαμβανομένου και των βοηθητικών υποσυστημάτων) προβλέπεται να μειωθεί σημαντικά έως και 80% σε όλη την τρέχουσα δεκαετία έως και το 2030. Όσον αφορά τα συστήματα καθαρισμού αερίου καυσίμου για SOFC, λήφθηκε το συμπέρασμα ότι το κόστος κεφαλαίου για τον καθαρισμό του αερίου σύνθεσης πρέπει να μειωθεί κάτω από 200 €/kWh (δηλαδή, κατά 80%, σε σχέση με την υποτιθέμενη εδώ τιμή, για το βασικό σενάριο), προκειμένου να επιταχυνθεί η μεγάλη κλίμακας ανάπτυξη της τεχνολογίας SOFC στον ενεργειακό τομέα [108]. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, οι μειώσεις στα κόστη του συστήματος SOFC και στο σύστημα καθαρισμού του αερίου καυσίμου θεωρούνται ρεαλιστικές για το άμεσο μέλλον και θα μπορούσαν να βελτιώσουν την οικονομική αποδοτικότητα παρόμοιων ολοκληρωμένων μονάδων.

Επιπλέον, η μεγάλης κλίμακας παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από βιομάζα ως υποκατάστατο των συμβατικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα απαιτεί επί του παρόντος αποτελεσματικά προγράμματα επιδοτήσεων προκειμένου να επιτευχθεί οικονομική ανταγωνιστικότητα [115]. Σε αυτό το πλαίσιο, το Σχήμα 14 απεικονίζει την επίδραση της άμεσης επιδότησης των συνολικών επενδύσεων παγίου κεφαλαίου (Πίνακας 9) με αυξανόμενο ποσοστό 20%-70%, στην τιμή νεκρού σημείου της ηλεκτρικής ενέργειας, για βιοέλαιο στα 400 €/tn. Αυτή η επιδότηση θα μπορούσε να έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της τιμής νεκρού σημείου της ηλεκτρικής ενέργειας κατά 17% (0.760 €/kWh) για ποσοστό επιδότησης 50% (δηλαδή επιδοτώντας το 50% της συνολικής επένδυσης παγίου κεφαλαίου) και με 24% (0.700 €/kWh) για ποσοστό επιδότησης 70%. Ωστόσο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 14, η επιχορήγηση παρόμοιων επενδύσεων έχει σχετικά μικρή επίδραση στην τιμή νεκρού σημείου ηλεκτρικής ενέργειας σε σύγκριση με την επίδραση της πιθανής μείωσης του κόστους του βασικού εξοπλισμού. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι η μείωση του κόστους του εξοπλισμού οδηγεί με τη σειρά της σε μείωση σε αποσβέσεις, συντήρηση, απρόβλεπτα κόστη και άλλες ετήσιες δαπάνες παραγωγής που υπολογίζονται στον Πίνακα 10, οι οποίες επηρεάζονται άμεσα από το MEC. Έτσι, η πιθανή μείωση του κόστους του εξοπλισμού οδηγεί στη μείωση όχι μόνο της επένδυσης παγίου κεφαλαίου, αλλά κυρίως του συνολικού ετήσιου κόστους παραγωγής, ενώ η πιθανή επιδότηση μειώνει μόνο την επένδυση παγίου κεφαλαίου και μειώνει την τιμή ηλεκτρικής ενέργειας στο νεκρό σημείο, δηλαδή για NPV=0, σε πολύ μικρότερο βαθμό.



Σχήμα 14. Μεταβολή της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας στο νεκρό σημείο ως συνάρτηση του ποσοστού επιδότησης της συνολικής επένδυσης παγίου κεφαλαίου.

Όσον αφορά τη συνδυασμένη επίδραση τόσο της μείωσης του κόστους του εξοπλισμού αλλά και της επιδότησης, το Σχήμα 15 απεικονίζει την επίδραση στην τιμή νεκρού σημείου της ηλεκτρικής ενέργειας πέντε διαφορετικών σεναρίων. Στο πρώτο σενάριο δυναμικής μείωσης του κόστους εξοπλισμού, σε συνδυασμό με αρχική χρηματοδότηση 50%, η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας στο νεκρό σημείο υπολογίστηκε ότι θα μειωθεί στα 0.626 €/kWh (δηλαδή μείωση 31.5% μικρότερη σε σύγκριση με την τιμή νεκρού σημείου των 0.915 €/kWh για το βασικό σενάριο). Για περαιτέρω μείωση του κόστους του εξοπλισμού κατά 50%, τα ποσοστά επιδότησης 50% και 70% οδηγούν σε τιμές ηλεκτρικής ενέργειας στο νεκρό σημείο ίσες με 0.426 και 0.395 €/kWh (μείωση κατά 53 και 57%, αντίστοιχα), ενώ για μείωση του κόστους εξοπλισμού κατά 70% και επιδότηση 70%, η τιμή νεκρού σημείου για την ηλεκτρική ενέργεια μειώνεται κατά 70% σε 0.274 €/kWh, που είναι 57% υψηλότερη από την θεωρούμενη βασική τιμή ηλεκτρικής ενέργειας των 0.175 €/kWh. Τέλος, μια αύξηση της τιμής πώλησης του βιο-ελαίου στα 700 €/tn (σε σύγκριση με τα 400 €/tn του βασικού σεναρίου) θα μπορούσε να μειώσει περαιτέρω την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας στο νεκρό σημείο στα 0.249 €/kWh.



Σχήμα 15. Μεταβολή της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας στο νεκρό σημείο ως συνάρτηση της μείωσης του MEC και της χρηματοδοτικής ενίσχυσης για την σύγκλιση της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας στις τρέχουσες τάσεις της αγοράς ηλεκτρισμού.

Συνολικά, η προβλεπόμενη μείωση του MEC, κυρίως με τη μείωση του κόστους της μονάδας SOFC και του συστήματος καθαρισμού του αερίου σύνθεσης ώστε να καταστεί κατάλληλο για να τροφοδοτηθεί ως καύσιμο στην κυψέλη καυσίμου SOFC, σε συνδυασμό με προγράμματα επιδοτήσεων, θα μπορούσαν να μειώσουν σημαντικά την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας για NPV= 0 (δηλαδή στο νεκρό σημείο). Τα οικονομικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται συμπίπτουν σε μεγάλο βαθμό με εκείνα της βιβλιογραφίας σχετικά με την παραγωγή βιο-ηλεκτρικής ενέργειας μέσω αεριοποίησης βιομάζας και συνδυασμό με διατάξεις SOFC. Για παράδειγμα, στη μελέτη των Borello et al. [56], το σταθμισμένο κόστος ενέργειας για μια μονάδα ηλεκτροπαραγωγής με βάση τη βιομάζα (χωρίς SOFC) υπολογίστηκε σε  $>0.20 \text{ €}_{2017}/\text{kWh}$ , ενώ οι Arena et al. [39] ανέφεραν ότι η οικονομικά βιώσιμη τιμή ηλεκτρικής ενέργειας για μια μονάδα αεριοποίησης βιομάζας και ατμοστρόβιλου ήταν μεταξύ  $0.28$  και  $0.35 \text{ €}_{2010}/\text{kWh}$ . Για την καύση του ελαιοπυρήνα και την υδροθερμική εξανθράκωση του σε διάφορες συνδυασμένες διεργασίες, οι Lopez et al. [117] υπολόγισαν την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας στο νεκρό σημείο υψηλότερη από  $0.30 \text{ €}_{2021}/\text{kWh}$ . Σε μια άλλη εργασία [114] παρουσιάστηκε μια ανασκόπηση των οικονομικών μελετών ολοκληρωμένων συστημάτων που περιλάμβαναν διεργασίες πυρόλυσης και αεριοποίησης βιομάζας. Σε αυτή τη μελέτη, το κόστος της πρώτης ύλης βιομάζας ήταν της τάξης των  $15-90 \text{ €/tn}$ , ενώ οι τιμές ηλεκτρικής ενέργειας θα μπορούσαν να κυμαίνονται μεταξύ  $0.65-0.70 \text{ €/kWh}$ . Για τη συμπαραγωγή βιοελαίου και ηλεκτρικής ενέργειας με βάση την πυρόλυση βιομάζας, οι Pighinelli et al. [103] υπολόγισαν τιμή ηλεκτρικής ενέργειας στο νεκρό σημείο πάνω από  $0.40 \text{ €/kWh}$ . Από την άλλη πλευρά, για σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής που περιλαμβάνουν αεριοποίηση βιομάζας σε συνδυασμό με μονάδες

SOFC, οι Kempgowda et al. [104], εξέτασαν διάφορα σενάρια λειτουργίας και υπολόγισαν τις τιμές ηλεκτρικής ενέργειας στο νεκρό σημείο μεταξύ 0.40-0.80 €/2012/kWh, ενώ οι ίδιοι συγγραφείς [118] παρουσίασαν μια οικονομικά βιώσιμη μονάδα αεριοποίησης βιομάζας SOFC-GT για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με κόστος 0.3 €/kWh.

Τα σενάρια που εξετάστηκαν κατέδειξαν ότι η τιμή του νεκρού σημείου της ηλεκτρικής ενέργειας της εξεταζόμενης ολοκληρωμένης διεργασίας απέχει πολύ από το να είναι άμεσα ανταγωνιστική. Ωστόσο, η έννοια της συμπαραγωγής βιο-ελαίου και ηλεκτρικής ενέργειας μέσω μιας συνδυασμένης διεργασίας πυρόλυσης-αεριοποίησης-SOFC-ατμοστρόβιλου που τροφοδοτείται από υπολειμματική βιομάζα χαμηλού κόστους συνεπάγεται σημαντικά πλεονεκτήματα όσον αφορά την πορεία προς μια κυκλική και ανθρακικά ουδέτερη οικονομία. Στο πλαίσιο αυτό, η εξεταζόμενη διεργασία συνδυάζει την αξιοποίηση υπολειμματικής βιομάζας για εξαιρετικά αποδοτική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και υγρών βιοκαυσίμων. Αν και τα οικονομικά της διεργασίας επηρεάζονται σημαντικά από το υψηλό κόστος των αναδυόμενων τεχνολογιών SOFC και του καθαρισμού του αέριου σύνθεσης πριν την είσοδο του στην κυψέλη καυσίμου SOFC, ακριβώς λόγω της καινοτομίας αυτών των τεχνολογιών αναμένονται δραστικές μειώσεις κόστους στο άμεσο μέλλον.



## Κεφάλαιο 4. Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, παρουσιάστηκε μία καινοτόμος, ολοκληρωμένη και θερμικά αυτόνομη διεργασία αξιοποίησης υπολειμματικής βιομάζας, συγκεκριμένα ελαιοπυρήνα(OK), για την συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και βιο-ελαίου, η οποία προσομοιώθηκε τεχνικά και αποτιμήθηκε η οικονομική της απόδοση. Συγκεκριμένα, η ολοκληρωμένη διεργασία περιλάμβανε i) τη θερμική επεξεργασία του πρωτογενούς ελαιοπυρήνα μέσω της αργής πυρόλυσης του προς παραγωγή βιο-εξανθρακώματος, βιο-ελαίου και αερίου σύνθεσης, ii) την αεριοποίηση του εξανθρακώματος με χρήση των καυσαερίων και της υδατικής φάσης από την πυρόλυση ως μέσο αεριοποίησης προς παραγωγή αερίου σύνθεσης, iii) τον θερμό καθαρισμό/επεξεργασία των παραγόμενων αερίων μιγμάτων από την πυρόλυση και την αεριοποίηση iv) την χρήση μίας διάταξης SOFC με τροφοδοσία του συνολικού αερίου σύνθεσης προς παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος, v) έναν μετακαυστήρα για την παροχή θερμότητας στις ενδόθερες διεργασίες της ολοκληρωμένης διάταξης και vi) έναν ατμοστρόβιλο για παραγωγή επιπρόσθετης ηλεκτρικής ενέργειας. Ο σχεδιασμός της ολοκληρωμένης διεργασίας και η επίλυση των ισοζυγίων μάζας και ενέργειας πραγματοποιήθηκε με χρήση του λογισμικού Aspen Plus. Συνολικά, η διεργασία βελτιστοποιήθηκε με σκοπό την βέλτιστη θερμική ολοκλήρωση μεταξύ των διαφόρων υποσυστημάτων, έτσι ώστε να διασφαλίζεται η αυτόθερμη λειτουργία της.

Για ένα ρυθμό τροφοδοσίας πρωτογενούς βιομάζας ίσο με 20 tn/ημέρα προέκυψε παραγωγή 1685 kW ηλεκτρικής ενέργειας και 3.4 tn/ημέρα βιο-ελαίου. Συγκεκριμένα, διαπιστώθηκε ότι παρόλο που το ~ 17% της αρχικής τροφοδοσίας της βιομάζας (ή, ισοδύναμα, το ~ 30% του LHV του) χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά για την παραγωγή βιο-ελαίου, επιτεύχθηκε υψηλή συνολική ηλεκτρική απόδοση ίση με 46.8%, η οποία αποδόθηκε κυρίως στην χρήση της διάταξης SOFC, η οποία υπερτερεί σε ηλεκτρικές αποδόσεις σε σύγκριση με τις συμβατικές θερμικές μηχανές, και δευτερευόντως στην συμπληρωματική εφαρμογή ενός ατμοστρόβιλου για την αξιοποίηση των πλεοναζόντων θερμικών ρευμάτων της διεργασίας προς παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Εξίσου σημαντικό, είναι ότι λαμβάνοντας υπόψη την παραγωγή βιο-ελαίου και ηλεκτρικής ενέργειας, η συνολική απόδοση συμπαραγωγής της προτεινόμενης διεργασίας υπολογίστηκε ίση με 77.0% με βάση την ανώτερη θερμογόνο δύναμη της τροφοδοτούμενης πρωτογενούς βιομάζας. Είναι αξιοσημείωτο ότι οι τιμές απόδοσης που υπολογίστηκαν βρίσκονται στο άνω όριο σε σύγκριση με πολλές εργασίες στη βιβλιογραφία που εξετάζουν παρόμοια συστήματα θερμοχημικής αξιοποίησης της βιομάζας σε συνδυασμό με κυψέλες καυσίμου αποκλειστικά για παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος.

Όσον αφορά την οικονομική αποτίμηση της διεργασίας, διαπιστώθηκε ότι οι μονάδες καθαρισμού του αερίου σύνθεσης και της διάταξης SOFC αντιπροσωπεύουν τα τρία τέταρτα του συνολικού κόστους του μηχανολογικού εξοπλισμού (25% και 50%, αντίστοιχα). Ωστόσο, το υψηλό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας τους αντισταθμίζεται σε μεγάλο βαθμό από τη συμβολή τους στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε υψηλές αποδόσεις, καθώς τα έσοδα από την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια αντιστοιχούν περίπου στο 85% των συνολικών εσόδων. Λαμβάνοντας υπόψη την πολυπλοκότητα και καινοτομία της

προτεινόμενης διεργασίας καθώς και τις τρέχουσες τάσεις στο κόστος των τεχνολογιών και στις τιμές πώλησης των προϊόντων, διαπιστώθηκε ότι η παρούσα επένδυση απέχει πολύ από το θεωρηθεί κερδοφόρα, καθώς η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας στο νεκρό σημείο, δηλαδή για μηδενική καθαρή παρούσα αξία, υπολογίστηκε ότι ήταν πολύ υψηλή, στην περιοχή των 0.820-0.915 €/kWh, ανάλογα με την υποτιθέμενη τιμή πώλησης του βιο-ελαίου. Ωστόσο, για να εκτιμηθεί η κερδοφορία του προτεινόμενου εγχειρήματος σε ρεαλιστικά προβλεπόμενα σενάρια, ακολούθησε και ανάλυση ευαισθησίας. Ειδικότερα, τα σενάρια ευαισθησίας που αξιολογήθηκαν περιλάμβαναν: α) τη μείωση του MEC, κυρίως λόγω της προβλεπόμενης μείωσης του ειδικού κόστους των μονάδων SOFC, β) την επιδότηση της επένδυσης παγίου κεφαλαίου στο πλαίσιο της γενικότερης ενεργειακής μετάβασης προς την απεξάρτηση από τον άνθρακα και γ) την αύξηση της τιμής πώλησης του βιο-ελαίου, του οποίου η αγορά διακρίνεται από έντονες διακυμάνσεις και αβεβαιότητα. Μέσω αυτής της ανάλυσης ευαισθησίας διαπιστώθηκε ότι η προοδευτική μείωση του κόστους εξοπλισμού μειώνει αναλογικά τις επενδύσεις παγίου κεφαλαίου και το ετήσιο κόστος παραγωγής. Συγκεκριμένα, η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας στο νεκρό σημείο θα μπορούσε να μειωθεί σε 0.320 €/kWh για μείωση του κόστους εξοπλισμού κατά 70%. Επιπλέον, η συμπληρωματική συνεισφορά της επιδότησης 70% στην επένδυση παγίου κεφαλαίου οδήγησε σε ακόμη χαμηλότερη τιμή για την ηλεκτρική ενέργεια στο νεκρό σημείο, που έγινε ίση με 0.274 €/kWh. Τέλος, λαμβάνοντας επίσης υπόψη μια αυξημένη μελλοντική τιμή πώλησης του βιο-ελαίου στα 700 €/tn, η χαμηλότερη τιμή στο νεκρό σημείο για την ηλεκτρική ενέργεια υπολογίστηκε σε 0.249 €/kWh, τιμή η οποία δεν απέχει πολύ από το να είναι ανταγωνιστική στην τρέχουσα αγορά ηλεκτρικής ενέργειας.

Συμπερασματικά, από την παρούσα διπλωματική εργασία προέκυψε ότι ο συνδυασμός της διεργασίας της πυρόλυσης βιομάζας με την διεργασία της αεριοποίησης του βιο-εξανθρακώματος και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με SOFC σε κλίμακα MW, μπορεί να αποτελέσει μία επωφελή διεργασία αξιοποίησης υπολειμματικής βιομάζας για την παραγωγή πράσινης ηλεκτρικής ενέργειας και ανανεώσιμου υγρού καυσίμου. Ωστόσο, η οικονομική βιωσιμότητα του προτεινόμενου εγχειρήματος, όπως συμβαίνει για κάθε καινοτόμο διεργασία, δεν είναι δεδομένη, καθώς εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από πολλούς παράγοντες που πρέπει να βελτιστοποιηθούν ταυτόχρονα για να καταστεί το εγχείρημα κερδοφόρο. Ειδικότερα, η παγκόσμια μετάβαση σε ένα ενεργειακό μέλλον απαλλαγμένο από τον άνθρακα αναμένεται να οδηγήσει, αργά ή γρήγορα, στη σταδιακή κατάργηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με βάση τα ορυκτά καύσιμα. Παρόλο που ένα μεγάλο μέρος του μελλοντικού ενεργειακού μείγματος θα αποτελείται από μεταβλητές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (π.χ. ηλιακή και αιολική ενέργεια), η εγγενής διαλείπουσα φύση τους, τις καθιστά δύσκολες στην διαχείρισή τους, απαιτώντας έργα αποθήκευσης ενέργειας ή την εισαγωγή μία μορφής ΑΠΕ που μπορεί να διασφαλίσει σταθερή παροχή ισχύος, όπως η βιομάζα. Ως εκ τούτου, αναμένεται ότι, προκειμένου να ενισχυθεί η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με βάση τη βιομάζα, θα δοθούν οικονομικά κίνητρα, π.χ., θα παρέχονται κρατικές επιδοτήσεις ή θα αυξηθούν τα δικαιώματα άνθρακα για να καταστούν στο μέλλον αυτές οι τεχνολογίες οικονομικά ανταγωνιστικές. Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη τις εγγενώς υψηλές ηλεκτρικές αποδόσεις των μονάδων κυψελών καυσίμου SOFC, θα ήταν ρεαλιστικό να υποστηριχθεί ότι το ειδικό κόστος τους θα μειωθεί τα επόμενα χρόνια, κυρίως επωφελούμενο

από καμπύλες μάθησης και οικονομίες κλίμακας, επιτρέποντας την ευρεία εφαρμογή τους για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή/και συμπαραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος (CHP).

Τέλος, βασιζόμενοι στις παραπάνω σκέψεις, μπορεί να υποτεθεί ότι στο μέλλον αρκετές μικρομεσαίες μονάδες που λειτουργούν με πρώτη ύλη τη βιομάζα, όπως αυτή που προτείνεται στην παρούσα διπλωματική εργασία, θα μπορούσαν να λειτουργούν συμβιωτικά με εταιρείες μεταποίησης γεωργικών και αγροδιατροφικών προϊόντων ή γεωργικούς συνεταιρισμούς, οι οποίοι θα μπορούν να διαθέτουν τα υπολείμματα/απορρίμματά τους στην μονάδα και να καλύπτουν πλήρως ή μερικώς τις ηλεκτρικές και θερμικές τους ανάγκες, μειώνοντας με αυτό τον τρόπο τα εμπόδια στην εφοδιαστική αλυσίδα της βιομάζας. Σε κάθε περίπτωση, το κόστος μεταφοράς είναι σημαντικό σε οποιαδήποτε διεργασία περιλαμβάνει την επεξεργασία και αξιοποίηση της βιομάζας, επομένως η διαθεσιμότητα βιομάζας σε τέτοιες περιφερειακές μονάδες μικρής κλίμακας είναι απαραίτητη προκειμένου αυτές να καταστούν οικονομικά εφικτές και περιβαλλοντικά βιώσιμες. Ωστόσο, αν και το προτεινόμενο μοντέλο είναι επί του παρόντος εφαρμόσιμο σε χώρες της περιοχής της Μεσογείου λόγω της μεγάλης αφθονίας υπολειμμάτων ελιάς, μπορεί να αναπαραχθεί για άλλες περιοχές και για διάφορες πρώτες ύλες βιομάζας επικαιροποιώντας τις παραδοχές που έγιναν για το κόστος της βιομάζας και την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας. Σε κάθε περίπτωση, παράλληλα με την αξιολόγηση της τεχνοοικονομικής τους σκοπιμότητας, η μελλοντική εφαρμογή τέτοιων διεργασιών, ιδιαίτερα σε μεγαλύτερη κλίμακα, απαιτεί λεπτομερείς μελέτες αξιολόγησης του κύκλου ζωής, προκειμένου να επιβεβαιωθεί το περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα και η συνολική βιωσιμότητά τους.

## Βιβλιογραφία

- [1] European Commission. Europe's 2030 climate and energy targets. Research & innovation actions; 2021. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/1c8ab88a-e44d-11eb-895a-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-219125747>.
- [2] IEA. Net zero by 2050: a roadmap for the global energy sector. Int. Energy Agency.; 2021. p. 224. [https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroby2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector\\_CORR.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroby2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf).
- [3] DNV. Energy transition: a frontrunner striving for energy independence. 2022.
- [4] Bioelectricity - Bioenergy Europe, (n.d.). <https://bioenergyeurope.org/article/307-bioelectricity-2.html>.
- [5] Bedoić R, Ćosić B, Duić N. Technical potential and geographic distribution of agricultural residues, co-products and by-products in the European Union. *Sci Total Environ* 2019;686:568-79. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.219>.
- [6] Aravani VP, Sun H, Yang Z, Liu G, Wang W, Anagnostopoulos G, Syriopoulos G, Charisiou ND, Goula MA, Kornaros M, Papadakis VG. Agricultural and livestock sector's residues in Greece & China: comparative qualitative and quantitative characterization for assessing their potential for biogas production. *Renew Sustain Energy Rev* 2022;154:111821. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111821>.
- [7] Alatzas S, Moustakas K, Malamis D, Vakalis S. Biomass potential from agricultural waste for energetic utilization in Greece. *Energies* 2019; 12. <https://doi.org/10.3390/en12061095>.
- [8] International olive council, <https://www.internationaloliveoil.org/>.
- [9] Vourdoubas J. Use of renewable energy sources for energy generation in rural areas in the island of Crete, Greece. *Eur J Environ Earth Sci* 2020; 1:1-7. <https://doi.org/10.24018/ejgeo.2020.1.6.88>.
- [10] Tsarouhas P, Achillas C, Aidonis D, Folinas D, Maslis V. Life Cycle Assessment of olive oil production in Greece. *J Clean Prod* 2015;93:75-83. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.01.042>.

- [11] Ruiz JA, Juárez MC, Morales MP, López-Ochoa LM, Doménech J. Biomass gasification or combustion for generating electricity in Spain: review of its current situation according to the opinion of specialists in the field. *J Renew Sustain Energy* 2013;5. <https://doi.org/10.1063/1.4792605>.
- [12] Faaij APC. Biomass combustion. *Encycl Energy* 2004:175-91. <https://doi.org/10.1016/b0-12-176480-x/00355-7>.
- [13] Brigagao GV, de Queiroz Fernandes Araújo O, de Medeiros JL, Mikulcic H, Duic N. A techno-economic analysis of thermochemical pathways for corncob-to-energy: fast pyrolysis to bio-oil, gasification to methanol and combustion to electricity. *Fuel Process Technol* 2019; 193:102-13. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.05.011>.
- [14] Parascanu MM, Kaltschmitt M, Rodl A, Soreanu G, Sánchez-Silva L. Life cycle assessment of electricity generation from combustion and gasification of biomass in Mexico. *SustainProd Consum* 2021; 27:72-85. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.10.021>.
- [15] Megwai GU. *Process simulations of small scale biomass power plant. Univ. Boras.*; 2014. p. 44.
- [16] Colpan CO, Hamdullahpur F, Dincer I, Science A. Solid oxide fuel cell and biomass gasification systems for better efficiency and environmental impact. *Energy* 2010;78:1-8
- [17] Renzi M, Brandoni C. Study and application of a regenerative Stirling cogeneration device based on biomass combustion. *Appl Therm Eng* 2014; 67:341-51. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.03.045>.
- [18] Huang Y, McIlveen-Wright DR, Rezvani S, Huang MJ, Wang YD, Roskilly AP, Hewitt NJ. Comparative techno-economic analysis of biomass fuelled combined heat and power for commercial buildings. *Appl Energy* 2013; 112:518-25. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.03.078>.
- [19] Maraver D, Sin A, Sebastián F, Royo J. Environmental assessment of CCHP (combined cooling heating and power) systems based on biomass combustion in comparison to conventional generation. *Energy* 2013;57:17-23. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.02.014>.
- [20] Im-orb K, Wiyaratn W, Arpornwichanop A. Technical and economic assessment of the pyrolysis and gasification integrated process for biomass conversion. *Energy* 2018; 153:592-603.

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.049>.

- [21] Wu Z, Zhu P, Yao J, Zhang S, Ren J, Yang F, Zhang Z. Combined biomass gasification, SOFC, IC engine, and waste heat recovery system for power and heat generation: energy, exergy, exergoeconomic, environmental (4E) evaluations. *Appl Energy* 2020;279:115794. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115794>.
- [22] Manyà JJ. Pyrolysis for bio-char purposes: a review to establish current knowledge gaps and research needs. *Environ Sci Technol* 2012;46:7939-54. <https://doi.org/10.1021/es301029g>.
- [23] Bridgwater AV. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass Bioenergy* 2012;38:68-94. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>.
- [24] Wang Y, Akbarzadeh A, Chong L, Du J, Tahir N, Awasthi MK. Catalytic pyrolysis of lignocellulosic biomass for bio-oil production: a review. *Chemosphere* 2022;297:134181. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134181>.
- [25] Marcantonio V, Bocci E, Ouweltjes JP, Del Zotto L, Monarca D. Evaluation of sorbents for high temperature removal of tars, hydrogen sulphide, hydrogen chloride and ammonia from biomass-derived syngas by using Aspen Plus. *Int J Hydrogen Energy* 2020;45:6651-62. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.142>.
- [26] Woolcock PJ, Brown RC. A review of cleaning technologies for biomass-derived syngas. *Biomass Bioenergy* 2013; 52:54e84. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.02.036>.
- [27] Porcu A, Sollai S, Marotto D, Mureddu M, Ferrara F, Pettinau A. Techno-economic analysis of a small-scale biomass-to-energy BFB gasification-based system. *Energies* 2019;12. <https://doi.org/10.3390/en12030494>.
- [28] Shahabuddin M, Bhattacharya S. Process modelling for the production of hydrogen-rich gas from gasification of coal using oxygen, CO<sub>2</sub> and steam reactants. *Int J Hydrogen Energy* 2021;46:24051-9. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.05.006>.
- [29] Sousa Cardoso J, Silva V, Eusebio D, Lima Azevedo I, Tarelho LAC. Techno-economic analysis of forest biomass blends gasification for small-scale power production facilities in the Azores. *Fuel* 2020;279:118552. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118552>.

- [30] Im-Orb K, Simasatitkul L, Arpornwichanop A. Analysis of synthesis gas production with a flexible H<sub>2</sub>/CO ratio from rice straw gasification. *Fuel* 2016;164:361-73. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.10.018>.
- [31] van Schalkwyk DL, Mandegari M, Farzad S, Gørgens JF. Techno-economic and environmental analysis of bio-oil production from forest residues via non-catalytic and catalytic pyrolysis processes. *Energy Convers Manag* 2020;213:112815. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112815>.
- [32] Tahir F, Saeed MA, Ali U. Biomass energy perspective in Pakistan based on chemical looping gasification for hydrogen production and power generation. *Int J Hydrogen Energy* 2023;48:18211-32. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.01.247>.
- [33] Marcantonio V, De Falco M, Capocelli M, Amado-Fierro A, Centeno TA, Bocci E. Modelling and assessment of a sorption enhanced gasification system coupled with hydrothermal carbonization, hot gas cleaning, and plasma to produce pure H<sub>2</sub> from biomass. *Int J Hydrogen Energy* 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.075>.
- [34] Zabaniotou A, Rovas D, Libutti A, Monteleone M. Boosting circular economy and closing the loop in agriculture: case study of a small-scale pyrolysis-bio-char based system integrated in an olive farm in symbiosis with an olive mill. *Environ. Dev.* 2015;14:22-36. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2014.12.002>.
- [35] Amirante R, Bruno S, Distaso E, La Scala M, Tamburrano P. A biomass small-scale externally fired combined cycle plant for heat and power generation in rural communities. *Renew Energy Focus* 2019;28:36-46. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2018.10.002>.
- [36] Patuzzi F, Prando D, Vakalis S, Rizzo AM, Chiaramonti D, Tirler W, Mimmo T, Gasparella A, Baratieri M. Small-scale biomass gasification CHP systems: comparative performance assessment and monitoring experiences in South Tyrol (Italy). *Energy* 2016;112:285-93. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.06.077>.
- [37] Safarian S, Saryazdi SME, Unnthorsson R, Richter C. Gasification of woody biomasses and forestry residues: simulation, performance analysis, and environmental impact. *Fermentation* 2021;7:1-14. <https://doi.org/10.3390/fermentation7020061>.
- [38] Lan W, Chen G, Zhu X, Wang X, Liu C, Xu B. Biomass gasification-gas turbine combustion for power generation system model based on ASPEN

PLUS. Sci Total Environ 2018:628-9.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.159>. 1278-1286.

- [39] Arena U, Di Gregorio F, Santonastasi M. A techno-economic comparison between two design configurations for a smallscale, biomass-to-energy gasification based system. Chem Eng J 2010;162:580-90.  
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.05.067>.
- [40] Radenahmad N, Azad AT, Saghir M, Taweekun J, Bakar MSA, Reza MS, Azad AK. A review on biomass derived syngas for SOFC based combined heat and power application. Renew Sustain Energy Rev 2020;119:109560. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109560>.
- [41] Wang F, Ouyang D, Zhou Z, Page SJ, Liu D, Zhao X. Lignocellulosic biomass as sustainable feedstock and materials for power generation and energy storage. J Energy Chem 2021;57:247-80. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2020.08.060>.
- [42] Subotić V, Baldinelli A, Barelli L, Scharler R, Pongratz G, Hochenauer C, Anca-Couce A. Applicability of the SOFC technology for coupling with biomass-gasifier systems: short- and long-term experimental study on SOFC performance and degradation behaviour. Appl Energy 2019;256.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113904>.
- [43] Tzelepis S, Kavadias KA, Marnellos GE, Xydis G. A review study on proton exchange membrane fuel cell electrochemical performance focusing on anode and cathode catalyst layer modelling at macroscopic level. Renew Sustain Energy Rev 2021;151:111543. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111543>.
- [44] Nimir W, Al-Othman A, Tawalbeh M, Al Makky A, Ali A, Karimi-Maleh H, Karimi F, Karaman C. Approaches towards the development of heteropolyacid-based high temperature membranes for PEM fuel cells. Int J Hydrogen Energy 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.11.174>.
- [45] Zouridi L, Garagounis I, Vourros A, Marnellos GE, Binas V. Advances in inkjet-printed solid oxide fuel cells. Adv Mater Technol 2022;7:1-32.  
<https://doi.org/10.1002/admt.202101491>.
- [46] Costa P, Pinto F, André RN, Marques P. Integration of



- gasification and solid oxide fuel cells (SOFCs) for combined heat and power (CHP). *Processes* 2021;9:1-26. <https://doi.org/10.3390/pr9020254>.
- [47] Yang S, Peng S, Xiao Z, Liu Z, Deng C, Du W, Xie N. Energetic and exergetic analysis of a biomass-fueled CCHP system integrated with proton exchange membrane fuel cell. *Int J Hydrogen Energy* 2023;48:13603-16. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.12.259>.
- [48] Gadsbøll RØ, Thomsen J, Bang-Møller C, Ahrenfeldt J, Henriksen UB. Solid oxide fuel cells powered by biomass gasification for high efficiency power generation. *Energy* 2017;131:198-206. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.044>.
- [49] Doherty W, Reynolds A, Kennedy D. Process simulation of biomass gasification integrated with a solid oxide fuel cell stack. *J Power Sources* 2015;277:292-303. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.11.125>.
- [50] Bang-Møller C, Rokni M. Thermodynamic performance study of biomass gasification, solid oxide fuel cell and micro gas turbine hybrid systems. *Energy Convers Manag* 2010; 51:2330-9. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.04.006>.
- [51] Sigurjonsson HÆ, Clausen LR. Solution for the future smart energy system: a polygeneration plant based on reversible solid oxide cells and biomass gasification producing either electrofuel or power. *Appl Energy* 2018;216:323-37. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.124>.
- [52] Vera D, Jurado F, De Mena B, Hernández JC. A distributed generation hybrid system for electric energy boosting fueled with olive industry wastes. *Energies* 2019;12. <https://doi.org/10.3390/en12030500>.
- [53] Aguado R, Vera D, Jurado F, Beltrán G. An integrated gasification plant for electric power generation from wet biomass: toward a sustainable production in the olive oil industry. *Biomass Convers Biorefinery* 2022. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-02231-0>.
- [54] Vera D, Jurado F, Carpio J, Kamel S. Biomass gasification coupled to an EFGT-ORC combined system to maximize the electrical energy generation: a case applied to the olive oil industry. *Energy* 2018;144:41-53. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.152>.
- [55] Elias A, Boumeddane B, Vera D, Jurado F. Gasification of olive mill solid wastes for cogeneration applications in Tizi Ouzou region: thermo-economic assessment. *Int J Sustain Energy* 2021;40:1002-26. <https://doi.org/10.1080/14786451.2021.1891069>.

- [56] Borello D, Pantaleo AM, Caucci M, De Caprariis B, De Filippis P, Shah N. Modeling and experimental study of a small scale olive pomace gasifier for cogeneration: energy and profitability analysis. *Energies* 2017;10. <https://doi.org/10.3390/en10121930>.
- [57] Kougioumtzis MA, Kanaveli IP, Karampinis E, Grammelis P, Kakaras E. Combustion of olive tree pruning pellets versus sunflower husk pellets at industrial boiler. Monitoring of emissions and combustion efficiency. *Renew Energy* 2021; 171:516-25. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.118>.
- [58] Aguado R, Vera D, López-García DA, Torreglosa JP, Jurado F. Techno-economic assessment of a gasification plant for distributed cogeneration in the agrifood sector. *Appl Sci* 2021;11:1-18. <https://doi.org/10.3390/app11020660>.
- [59] Manara P, Zabaniotou A. Indicator-based economic, environmental, and social sustainability assessment of a small scale gasification bioenergy system fuelled with food processing residues from the Mediterranean agro-industrial sector. *Sustain Energy Technol Assessments* 2014;8:159-71. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2014.08.007>.
- [60] Fryda L, Panopoulos KD, Kakaras E. Integrated CHP with autothermal biomass gasification and SOFC-MGT. *Energy Convers Manag* 2008;49:281-90. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.06.013>.
- [61] Zabaniotou A, Rovas D, Monteleone M. Management of olive grove pruning and solid waste from olive oil extraction via thermochemical processes. *Waste and Biomass Valorization* 2015;6:831-42. <https://doi.org/10.1007/s12649-015-9403-2>.
- [62] Mertzis D, Mitsakis P, Tsiakmakis S, Manara P, Zabaniotou A, Samaras Z. Performance analysis of a small-scale combined heat and power system using agricultural biomass residues: the SMART-CHP demonstration project. *Energy* 2014;64:367-74. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.11.055>.
- [63] Ozturk MU, Ayol A, Tezer O. Life cycle assessment of olive pomace gasification for an up-draft fixed bed gasifier system. *Int J Hydrogen Energy* 2023:1-9. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.01.206>.
- [64] Amirante R, Clodoveo ML, Distaso E, Ruggiero F, Tamburrano P. A tri-

- generation plant fuelled with olive tree pruning residues in Apulia: an energetic and economic analysis. *Renew Energy* 2016;89:411-21. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.11.085>.
- [65] Niu M, Huang Y, Jin B, Wang X. Simulation of syngas production from municipal solid waste gasification in a bubbling fluidized bed using aspen plus. *Ind Eng Chem Res* 2013;52:14768-75. <https://doi.org/10.1021/ie400026b>.
- [66] Pala LPR, Wang Q, Kolb G, Hessel V. Steam gasification of biomass with subsequent syngas adjustment using shift reaction for syngas production: an Aspen Plus model. *Renew Energy* 2017;101:484-92. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.08.069>.
- [67] Zhao Z, Andre Situmorang Y, An P, Yang J, Hao X, Rizkiana J, Abudula A, Guan G. A biomass-based small-scale power generation system with energy/exergy recuperation. *Energy Convers Manag* 2021;227:113623. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113623>.
- [68] Nguyen VG, Nguyen-Thi TX, Phong Nguyen PQ, Tran VD, Ağbulut Ü, Nguyen LH, Balasubramanian D, Tarelko W, Bandh SA, Khoa Pham ND. Recent advances in hydrogen production from biomass waste with a focus on pyrolysis and gasification. *Int J Hydrogen Energy* 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.049>.
- [69] Hu X, Guo H, Gholizadeh M, Sattari B, Liu Q. Pyrolysis of different wood species: impacts of C/H ratio in feedstock on distribution of pyrolysis products. *Biomass Bioenergy* 2019;120:28-39. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.10.021>.
- [70] Hani FFB, Hailat MM. Production of bio-oil from pyrolysis of olive biomass with/without catalyst. *Adv Chem Eng Sci* 2016;6:488-99. <https://doi.org/10.4236/aces.2016.64043>.
- [71] Christoforou EA, Fokaidis PA, Banks SW, Nowakowski D, Bridgwater AV, Stefanidis S, Kalogiannis KG, Iliopoulou EF, Lappas AA. Comparative study on catalytic and non-catalytic pyrolysis of olive mill solid wastes. *Waste Biomass Valorization* 2018;9:301-13. <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9809-5>.
- [72] Amini E, Safdari MS, DeYoung JT, Weise DR, Fletcher TH.

Characterization of pyrolysis products from slow pyrolysis of live and dead vegetation native to the southern United States. *Fuel* 2019;235:1475-91. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.08.112>.

- [73] Gronnow MJ, Budarin VL, Mašek O, Crombie KN, Brownsort PA, Shuttleworth PS, Hurst PR, Clark JH. Torrefaction/bio-char production by microwave and conventional slow pyrolysis - comparison of energy properties. *GCB Bioenergy* 2013;5:144-52. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12021>.
- [74] Crombie K, Mašek O. Investigating the potential for a self-sustaining slow pyrolysis system under varying operating conditions. *Bioresour Technol* 2014;162:148-56. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.03.134>.
- [75] Lampropoulos A, Kaklidis N, Athanasiou C, Montes- Morán MA, Arenillas A, Menéndez JA, Binas VD, Konsolakis M, Marnellos GE. Effect of Olive Kernel thermal treatment (torrefaction vs. slow pyrolysis) on the physicochemical characteristics and the CO<sub>2</sub> or H<sub>2</sub>O gasification performance of as-prepared bio-chars. *Int J Hydrogen Energy* 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.230>.
- [76] Kanaujia PK, Naik DV, Tripathi D, Singh R, Poddar MK, Siva Kumar Konathala LN, Sharma YK. Pyrolysis of Jatropha Curcas seed cake followed by optimization of liquid-liquid extraction procedure for the obtained bio-oil. *J Anal Appl Pyrolysis* 2016;118:202-24. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2016.02.005>.
- [77] Silva RVS, Pereira VB, Stelzer KT, Almeida TA, Romeiro GA, Azevedo DA. Comprehensive study of the liquid products from slow pyrolysis of crambe seeds: bio-oil and organic compounds of the aqueous phase. *Biomass Bioenergy* 2019;123:78-88. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.02.014>.
- [78] Parascanu MM, Puig Gamero M, Sánchez P, Soreanu G, Valverde JL, Sanchez-Silva L. Life cycle assessment of olive pomace valorisation through pyrolysis. *Renew Energy* 2018;122:589-601. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.027>.
- [79] Adeniyi AG, Ighalo JO. ASPEN plus predictive simulation of soft and hard wood pyrolysis for bio-energy recovery. *Int J Environ Waste Manag* 2020;26:234-44. <https://doi.org/10.1504/IJEW.2020.108816>.
- [80] Shahbaz M, AlNouss A, Parthasarathy P, Abdelaal AH, Mackey H,

- McKay G, Al-Ansari T. Investigation of biomass components on the slow pyrolysis products yield using Aspen Plus for techno-economic analysis. *Biomass Convers Biorefinery* 2022;12:669-81. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-01040-1>.
- [81] Faraji M, Saidi M. Hydrogen-rich syngas production via integrated configuration of pyrolysis and air gasification processes of various algal biomass: process simulation and evaluation using Aspen Plus software. *Int J Hydrogen Energy* 2021;46:18844-56. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.03.047>.
- [82] Adeniyi AG, Ighalo JO, Amosa MK. Modelling and simulation of banana (*Musa spp.*) waste pyrolysis for bio-oil production. *Biofuels* 2021;12:879-83. <https://doi.org/10.1080/17597269.2018.1554949>.
- [83] Hu X, Gholizadeh M. Progress of the applications of bio-oil. *Renew Sustain Energy Rev* 2020;134:110124. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110124>.
- [84] Bridgwater T. Review biomass for energy. *J Sci Food Agric* 2006;1755-68. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2605>.
- [85] Chambon CL, Karia T, Sandwell P, Hallett JP. Techno-economic assessment of biomass gasification-based mini-grids for productive energy applications: the case of rural India. *Renew Energy* 2020;154:432-44. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.002>.
- [86] Hosseinpour J, Chitsaz A, Liu L, Gao Y. Simulation of eco-friendly and affordable energy production via solid oxide fuel cell integrated with biomass gasification plant using various gasification agents. *Renew Energy* 2020;145:757-71. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.033>.
- [87] Auersvald M, Kejla L, Eschenbacher A, Thi HD, Van Geem KM, Šimáček P. Detailed characterization of sulfur compounds in fast pyrolysis bio-oils using GC × GC-SCD and GCeMS. *J Anal Appl Pyrolysis* 2021;159. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105288>.
- [88] Official Journal of the European Union. Directive 2003/17/EC of the European Parliament and of the council of 3 March 2003 amending

directive 98/70/EC relating to the quality of petrol and diesel fuels. 2003.

- [89] Bocci E, Di Carlo A, McPhail SJ, Gallucci K, Foscolo PU, Moneti M, Villarini M, Carlini M. Biomass to fuel cells state of the art: a review of the most innovative technology solutions. *Int J Hydrogen Energy* 2014;39:21876-95. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.09.022>.
- [90] Meng X, De Jong W, Pal R, Verkooijen AHM. In bed and downstream hot gas desulphurization during solid fuel gasification: a review. *Fuel Process Technol* 2010;91:964-81. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.02.005>.
- [91] Toonssen R, Sollai S, Aravind PV, Woudstra N, Verkooijen AHM. Alternative system designs of biomass gasification SOFC/GT hybrid systems. *Int J Hydrogen Energy* 2011;36:10414-25. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.06.069>.
- [92] Ud Din Z, Zainal ZA. The fate of SOFC anodes under biomass producer gas contaminants. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;72:1050-66. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.012>.
- [93] xu ming, Wang H, Liu M, Zhao J, Zhang Y, Li P, Shi M, Gong S, Zhang Z, Li C. Performance test on a 5kw SOFC system under high fuel utility with practical syngas feeding. 2020. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-33010/v1>.
- [94] Shayan E, Zare V, Mirzaee I. On the use of different gasification agents in a biomass fueled SOFC by integrated gasifier: a comparative exergo-economic evaluation and optimization. *Energy* 2019;171:1126-38. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.095>.
- [95] Vijay P, Hosseini S, Tadé MO. A novel concept for improved thermal management of the planar SOFC. *Chem Eng Res Des* 2013;91:560-72. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2012.09.004>.
- [96] Rokni M. Thermodynamic investigation of an integrated gasification plant with solid oxide fuel cell and steam cycles. *Green* 2012;2:71-86. <https://doi.org/10.1515/green-2011-0022>.
- [97] Rokni M. Thermodynamic and thermoeconomic analysis of a system with biomass gasification, solid oxide fuel cell (SOFC) and Stirling engine. *Energy* 2014;76:19-31. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.01.106>.

- [98] Hosseinpour J, Sadeghi M, Chitsaz A, Ranjbar F, Rosen MA. Exergy assessment and optimization of a cogeneration system based on a solid oxide fuel cell integrated with a Stirling engine. *Energy Convers Manag* 2017;143:448-58.  
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.04.021>.
- [99] Perna A, Minutillo M, Jannelli E, Cigolotti V, Nam SW, Yoon KJ. Performance assessment of a hybrid SOFC/MGT cogeneration power plant fed by syngas from a biomass down-draft gasifier. *Appl Energy* 2018;227:80-91. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.077>.
- [100] Mazzucco A, Rokni M. Thermo-economic analysis of a solid oxide fuel cell and steam injected gas turbine plant integrated with woodchips gasification. *Energy* 2014; 76:114-29.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.04.035>.
- [101] Peters MS, Peters JI. Plant design and economics for chemical engineers. *Eng Econ* 1959;5. <https://doi.org/10.1080/00137915908965075>.
- [102] Buragohain B, Mahanta P, Moholkar VS. Biomass gasification for decentralized power generation: the Indian perspective. *Renew Sustain Energy Rev* 2010;14:73-92. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.034>.
- [103] Pighinelli ALMT, Schaffer MA, Boateng AA. Utilization of eucalyptus for electricity production in Brazil via fast pyrolysis: a techno-economic analysis. *Renew Energy* 2018; 119:590-7.  
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.12.036>.
- [104] Kempegowda RS, Skreiberg O, Tran KQ. Cost modeling approach and economic analysis of biomass gasification integrated solid oxide fuel cell systems. *J Renew Sustain Energy* 2012;4. <https://doi.org/10.1063/1.4737920>.
- [105] Morandin M, Maréchal F, Giacomini S. Synthesis and thermo-economic design optimization of wood-gasifier-SOFC systems for small scale applications. *Biomass Bioenergy* 2013;49:299-314.  
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.01.003>.
- [106] Singh SP, Ohara B, Ku AY. Prospects for cost-competitive integrated gasification fuel cell systems. *Appl Energy* 2021;290:116753.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116753>.

- [107] Whiston MM, Lima Azevedo IM, Litster S, Samaras C, Whitefoot KS, Whitacre JF. Paths to market for stationary solid oxide fuel cells: expert elicitation and a cost of electricity model. *Appl Energy* 2021;304. [https://doi.org/ 10.1016/j.apenergy.2021.117641](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117641).
- [108] Nam H, Ibanez K, Konishi S. Cost analysis and energy return on investment of fuel cell and gas turbine integrated fusion-biomass hybrid system; application of a small scale conceptual fusion reactor GNOME. *Energy* 2020;203:117825. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117825>.
- [109] Jaiganesh N, Kuo PC, Champatan V, Gopi G, Kumar RA, Aravind PV. Negative emission power plants: techno-economic analysis of a biomass-based integrated gasification solid oxide fuel cell/gas turbine system for power, heat, and bio-char co-production-part 2. *Front Energy Res* 2022;10. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.826227>.
- [110] Wei C, Liu Z, Li C, Singh S, Lu H, Gong Y, Li P, Wang H, Yang X, Xu M, Mu S. Status of an MWth integrated gasification fuel cell power-generation system in China. *Int J Coal Sci Technol* 2021;8:401-11. <https://doi.org/10.1007/s40789-021-00429-1>.
- [111] González-Arias J, Baena-Moreno FM, Sánchez ME, Cara-Jiménez J. Optimizing hydrothermal carbonization of olive tree pruning: a techno-economic analysis based on experimental results. *Sci Total Environ* 2021;784:147169. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147169>.
- [112] Zaini IN, Sophonrat N, Sjöblom K, Yang W. Creating values from biomass pyrolysis in Sweden: Co-production of H<sub>2</sub>, biocarbon and bio-oil. *Processes* 2021;9:1-21. <https://doi.org/10.3390/pr9030415>.
- [113] Regulatory authority for Energy, Regulatory authority for energy, (n.d.). <https://www.rae.gr/>.
- [114] Snyder BF. Costs of biomass pyrolysis as a negative emission technology: a case study. *Int J Energy Res* 2019;43:1232-44. <https://doi.org/10.1002/er.4361>.
- [115] Smith Matthew AG, Smit Tycho. *Financial support for electricity generation and CHP from solid biomass*. 2019.
- [116] Europe H. *Strategic research and innovation agenda*. 2020.
- [117] López R, González-Arias J, Pereira FJ, Fernández C, Cara-Jiménez J. A



techno-economic study of HTC processes coupled with power facilities and oxy-combustion systems. *Energy* 2021;219. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119651>.

- [118] Kempegowda RS, Tran K. Economic analysis of combined cycle biomass gasification fuelled SOFC systems. 2011. p. 134-41.