



**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

*Ανάλυση Κύκλου Ζωής Θερμικών  
Σταθμών Συμπαραγωγής Μεγάλης  
Κλίμακας με Βιομάζα ως Καύσιμο*

**Της Μεταπτυχιακής Φοιτήτριας**

Δέσποινας Μαγκίρη - Σκουλούδη

**Επιβλέπων**

Σωτήριος Καρέλλας, Αναπλ. Καθηγητής, Σχολή  
Μηχανολόγων Μηχανικών



.....  
Διπλωματούχος Χημικός Μηχανικός Πανεπιστημίου Πατρών  
©2018 – All rights reserved

Copyright © 2018 –All rights reserved , Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

*Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.*



*Στη μνήμη του Χρίστου Γ. Γεωργαντέλου*



## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αναπλ. Καθ. κ. Σωτήριο Καρέλλα και τον υποψήφιο διδάκτορα Δημήτριο Γκριμέκη για την ευκαιρία που μου προσέφεραν να συνεργαστώ μαζί τους στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας, και φυσικά την οικογένεια και τους φίλους μου για την αδιάκοπη στήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Ιδιαίτερα ευχαριστώ τον Θεοδωρή Μήτσικα για την πολύτιμη βοήθειά του στην εκμάθηση του  $\LaTeX$ .

Ειδική μνεία πρέπει να δοθεί στους: Eric Johnson (Atlantic Consulting, Zürich, Switzerland), Arthur Braunschweig (Dr. oec. HSG, E2 Management Consulting AG, Zürich, Switzerland), Jannick Schmidt (2.-0 LCA Consultants, Aalborg, Denmark), Blane Grann (Business Strategy Innovation Center of Excellence, Vancouver, Canada), Nigel Howard (Clarity Environment, Sydney, Australia), Patrik Henriksson (Stockholm Resilience Centre/WorldFish, Sweden) για την επιστημονική καθοδήγησή τους κατά την εκπόνηση της μελέτης.





<b>ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:</b>	<b>«Ανάλυση Κύκλου Ζωής Θερμικών Σταθμών Συμπαραγωγής Μεγάλης Κλίμακας με Βιομάζα ως Καύσιμο»</b>
<b>ΦΟΙΤΗΤΗΣ:</b>	<b>Δέσποινα Μαγκίρη - Σκουλούδη</b>
<b>ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:</b>	<b>Σωτήριος Καρέλλας, Αναπλ. Καθηγητής, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών</b>
<b>ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ ΕΤΟΣ:</b>	<b>2017-18</b>

## Σύνοψη

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε με τη μεθοδολογία της ανάλυσης κύκλου ζωής (Life cycle analysis, LCA) ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος της συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας σε θερμικό σταθμό συμπαραγωγής υψηλής απόδοσης επόμενης γενιάς με χρήση βιομάζας ως καύσιμο. Η μελέτη κύκλου ζωής εκπονήθηκε στο λογισμικό Sima Pro v.8.5 και η κατάστρωση καταλόγων απογραφής στηρίχθηκε κυρίως στη βάση δεδομένων ecoinvent 3.4, ενώ η ανάλυση επιπτώσεων πραγματοποιήθηκε ακολουθώντας τη μέθοδο ReCiPe 2016. Ως λειτουργική μονάδα επιλέχθηκε το 1 MJ παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Οι κύριες κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων που μελετήθηκαν είναι η επίδραση στην ανθρώπινη υγεία, στην ποιότητα των οικοσυστημάτων, στους διαθέσιμους πόρους και στην κλιματική αλλαγή, με κύριες παραμέτρους τις εξής: κατανάλωση μη ανανεώσιμων πόρων (fossil resource scarcity), δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη (global warming potential), εξάντληση ορυκτών πόρων (mineral resource scarcity), χρήση γης (land use), εξάντληση νερού (water consumption), οξίνιση χερσαίων οικοσυστημάτων (terrestrial acidification) και δημιουργία σωματιδίων (particulate matter formation).

Εξετάστηκαν σενάρια καύσης διαφορετικών ειδών βιομάζας, που είτε η άμεση διαθεσιμότητα είτε το χαμηλό κόστος προμήθειάς τους δικαιολογεί την επιλογή τους ως καύσιμο για Ευρωπαϊκές μονάδες. Θα αναλυθεί η καύση των επιλεγμένων καυσίμων σε λέβητα τεχνολογίας κονιοποιημένου καυσίμου (pulverized fuel boiler, PF). Επίσης εξετάστηκαν διαφορετικές μηχανικές και φυσικοχημικές μέθοδοι προκατεργασίας του καυσίμου (πελλετοποίηση, κονιορτοποίηση, υδροθερμική ανθρακοποίηση, φρύξη, έκρηξη ατμού), ως προς την αποτελεσματικότητά τους στη μείωση των εκπομπών και του ανθρακικού αποτυπώματος της μονάδας συμπαραγωγής.

Δόθηκε προσοχή στο υδατικό αποτύπωμα του κάθε σεναρίου, αλλά και στη διαχείριση της τέφρας και την ανάλυση των προβλημάτων που σχετίζονται με τη διαχείρισή της (σενάρια τέλους κύκλου ζωής). Στο τέλος πραγματοποιήθηκε σύγκριση με τις σημερινές λιγνιτικές μονάδες, ώστε να τεκμηριωθεί το περιβαλλοντικό πλεονέκτημα της μετάβασης προς την καύση βιομάζας σε μεσαία έως μεγάλη κλίμακα.

**Λέξεις Κλειδιά:** Βιομάζα, Συμπαραγωγή, Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Ανθρακικό Αποτύπωμα, Ανάλυση Κύκλου Ζωής



## Περίληψη

Από τα μέσα του εικοστού αιώνα και ύστερα παρατηρείται παγκοσμίως μία αυξητική τάση στην κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος, ενώ η παγκόσμια πρωτογενής κατανάλωση ενέργειας αναμένεται να αυξηθεί κατά 20 έως 60% μεταξύ του 2010 και του 2040, ένας ουσιαστικά βραδύτερος ρυθμός ανάπτυξης από αυτόν του διαστήματος από το 1950 έως το 1980 (171 τοις εκατό), αλλά και του αντίστοιχου από το 1980 στο 2010 (79%), σύμφωνα με μελέτη των R. G. Newell et al. (2016). Η τάση αυτή οφείλεται τόσο στην αύξηση του πληθυσμού, όσο και στην εντεινόμενη βιομηχανοποίηση. Όσο όμως αυξάνεται η ηλεκτροπαραγωγή για να καλυφθούν οι νέες ανάγκες, αυξάνονται και οι ρύποι που σχετίζονται με αυτήν (κυρίως CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> κλπ.), καθώς τα καύσιμα που αξιοποιούνται στον τομέα είναι κατά κύριο λόγο ορυκτά και μη ανανεώσιμα. Σύμφωνα με στοιχεία του 2000 οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής ευθύνονται για το 50% των εκπομπών CO<sub>2</sub> στην Ελλάδα.

Παρόμοια είναι η εικόνα και στον υπόλοιπο δυτικό κόσμο. Σύμφωνα με την πρόσφατη αναθεώρηση της Οδηγίας 2009/28/EK (Renewable Energy Directive, RED), ο τομέας της ηλεκτροπαραγωγής ευθύνεται για το 28,5% των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου εντός της ΕΕ με στοιχεία του έτους 2015, ενώ ο τομέας της θέρμανσης και ψύξης αντιπροσωπεύει το 50% της καταναλισκόμενης ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ), με το 75% των καυσίμων που καταναλώνονται για θέρμανση και ψύξη να είναι μη ανανεώσιμα. Οι τεχνολογίες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας δρουν υποβοηθητικά, μειώνοντας την κατανάλωση καυσίμου και κατά συνέπεια και τις εκπομπές ρύπων, μην αρκώντας όμως ώστε να επιτευχθεί η συμμόρφωση με τα σύγχρονα αυστηρά όρια της περιβαλλοντικής νομοθεσίας. Αυτός είναι ένας κύριος λόγος για τον οποίον εξετάζεται η αξιοποίηση της βιομάζας ως καυσίμου.

Η βιομάζα προσφέρεται σαν βιώσιμη εναλλακτική για τη μείωση της ρύπανσης που οφείλεται στην παραγωγή ενέργειας, καθώς αποτελεί μία από τις κύρια χρησιμοποιούμενες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας της εποχής μας. Παράλληλα η βιομάζα αξιοποιείται ως καύσιμο για παραγωγή ενέργειας από τον άνθρωπο από τα προϊστορικά χρόνια, κυρίως για θέρμανση και φωτισμό. Έως σήμερα δεν έχει επιτευχθεί η ευρεία καθιέρωση της καύσης στερεής βιομάζας σε σταθμούς συμπαραγωγής μεσαίας έως μεγάλης κλίμακας, λόγω σημαντικών προβλημάτων που προκύπτουν σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, με κυριότερα: τη διαθεσιμότητα επαρκούς ποσότητας βιομάζας, λόγω του υψηλού κόστους μεταφοράς και του δυσμενούς περιβαλλοντικού αντικτύπου των εφοδιαστικών αλυσίδων, τις διακυμάνσεις στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του καυσίμου ακριβώς λόγω των μεταβλητών χαρακτηριστικών της βιομάζας (χαμηλή θερμογόνος ικανότητα, προσμίξεις) που συνεπάγεται την ανάγκη για (συχνά δαπανηρή) προεπεξεργασία, ώστε να αποφευχθούν οι ενίοτε εντονότερες επικαθίσεις, ρύποι και προβλήματα διάβρωσης από το λιγνίτη, αλλά και τη διαχείριση των μεγάλων ποσοτήτων τέφρας που προκύπτουν από την καύση βιομάζας. Ωστόσο το κύριο πλεονέκτημα που προσφέρουν οι διατάξεις μεγάλης κλίμακας είναι οι μεγαλύτεροι βαθμοί απόδοσης που επιτυγχάνονται, αλλά και η μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα των αντιρρυπαντικών συστημάτων μεγάλης κλίμακας.

Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος μονάδων συμπαραγωγής μεγάλης κλίμακας και τεχνολογίας αιχμής υπερκρίσιμου κύκλου ατμού, που χρησιμοποιούν στερεά βιομάζα ως καύσιμο, είτε ανεπεξέργαστη ή προκατεργασμένη, με τοποθεσία ανέγερσης την κεντρική Ευρώπη (περιοχή του Αμβούργου, Γερμανία), ενώ στα πλαίσια ανάλυσης ευαισθησίας αξιολογήθηκαν ως προς τον περιβαλλοντικό τους αντίκτυπο και εναλλακτικά σενάρια αλυσίδων ανεφοδιασμού για ορισμένα καύσιμα.

Η μελέτη κύκλου ζωής εκπονήθηκε στο λογισμικό Sima Pro v.8.5 και η κατάσταση καταλόγων απογραφής στηρίχθηκε κυρίως στη βάση δεδομένων ecoinvent 3.4, ενώ η ανάλυση επιπτώσεων πραγματοποιήθηκε ακολουθώντας τη μέθοδο ReCiPe 2016. Ως λειτουργική μονάδα επιλέχθηκε το 1 MJ παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας και το 1 MJ παραγόμενης θερμότητας αντίστοιχα. Οι κύριες κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων που μελετήθηκαν είναι η επίδραση στην ανθρώπινη υγεία, στην ποιότητα των οικοσυστημάτων, στους διαθέσιμους πόρους και στην κλιματική αλλαγή, με κύριες παραμέτρους τις εξής: κατανάλωση μη ανανεώσιμων πόρων (fossil resource scarcity), δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη (global warming potential), εξάντληση ορυκτών πόρων (mineral resource scarcity), χρήση γης (land use), εξάντληση νερού (water consumption), οξίνιση χερσαίων οικοσυστημάτων (terrestrial acidification) και δημιουργία σωματιδίων (particulate matter formation).



**POST-GRADUATE THESIS:** « Life Cycle Assessment of Large Scale Biomass Fuelled CHP Plants»

**STUDENT:** Despina Magiri - Skouloudi

**SUPERVISOR:** Assoc. Prof. Sotirios Karellas, School of Mechanical Engineering

**ACADEMIC YEAR:** 2017-18

## **Abstract**

In the present postgraduate thesis, life cycle analysis (LCA) was applied to assess the environmental impact of electricity and heat cogeneration considering a high-efficiency next generation combined heat and power plant using biomass as a fuel. The study was conducted in Sima Pro v.8.5 software and life cycle inventory population was based on the ecoinvent 3.4 database, while the impact assessment was carried out using the ReCiPe 2016 method. The selected functional unit was 1 MJ of generated electricity. The main environmental impact categories investigated are the impact on human health, ecosystem quality, available resources and climate change, with key parameters: fossil resource scarcity, global warming potential, mineral resource scarcity, land use, water consumption, acidification of terrestrial ecosystems and particulate matter formation.

Different types of combustion of different types of biomass, which either exist in abundance or their low cost of supply justify their choice as a fuel for European units. Combustion of the selected fuels was analyzed in a pulverized fuel (PF) boiler. Numerous mechanical and physicochemical pre-treatment methods (pelletization, pulverization, hydrothermal carbonization, torrefaction, steam explosion) were evaluated in terms of efficiency in reducing the emissions and carbon footprint of the cogeneration unit.

Attention was drawn to each scenario's water consumption and the solution of the problems associated with ash management (end-of-life scenarios). Finally, a comparison was made with existing lignite plants in order to document the environmental advantage of the transition medium to large scale biomass burning.

**Keywords:** Biomass, bioenergy, cogeneration, renewable energy sources, carbon footprint, life cycle analysis



## Summary

Since the mid-twentieth century, an increasing trend has been observed worldwide in the consumption of electricity. Global primary energy consumption is projected to grow by 20 to 60 percent between 2010 and 2040, a substantially slower percentage growth rate than 1950 to 1980 (171 percent) or 1980 to 2010 (79 percent), according to a study by R. G. Newell et al. (2016). This trend is due to population growth, as well as the increasing industrialization. However, as electricity generation increases to meet current needs, the emission of pollutants associated with it (mainly CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> etc.) also increases, given that the fuels used are for the most part fossil and non sustainable. According to 2000 official figures, power plants account for 50% of CO emissions in Greece.

The image in the rest of the western world is similar. According to the recent revision of the Renewable Energy Directive (RED), the electricity production sector is responsible for 28.5% of total EU greenhouse gas emissions (2015 data), while heating and cooling represents 50% of the energy consumed in the European Union (EU), with 75% of the fuel consumed for heating and cooling being non-renewable. Cogeneration technologies are beneficial in reducing fuel consumption and hence the resulting emissions, but not to such a degree as to ensure compliance with the current strict limits of environmental legislation. This is the main reason why the use of biomass as a fuel is being considered.

Biomass is a sustainable alternative to reducing energy-related pollution as it is one of the most commonly utilized renewable energy sources of our time. At the same time, biomass has been used by humans as a fuel for energy production from prehistoric times, mainly for heating and lighting. Until now, wide deployment of solid biomass combustion has not been achieved in medium to large scale thermal plants due to significant problems arising in large-scale applications, mainly due to the lack of sufficient biomass stocks, as well as due to the high cost of transport and the adverse environmental impact of biomass supply chains, the fluctuations in the fuel quality characteristics precisely because of the variable features of biomass (low calorific value, impurities) which entails the need of (often costly) pretreatment processes, in order to avoid the sometimes larger than lignite plants' deposits, pollutants and erosion problems, but also the management of large quantities of ash resulting from biomass combustion. However, the main advantage of large-scale units is the higher performance levels achieved, and also the higher efficiency of large-scale anti-pollution systems.

This study investigated the environmental impacts of large scale, supercritical steam cycle technology cogeneration plants utilizing solid biomass as a fuel, either raw or pretreated, located in central Europe (Hamburg region, Germany), while in the context of sensitivity analysis, alternative supply chain scenarios of specific fuels were assessed regarding their environmental impact.

The study was conducted in Sima Pro v.8.5 software and life cycle inventory population was based on the ecoinvent 3.4 database, while the impact assessment was carried out using the ReCiPe 2016 method. The selected functional unit was 1 MJ of generated electricity. The main environmental impact categories investigated are the impact on human health, ecosystem quality, available resources and climate change, with key parameters: fossil resource scarcity, global warming potential, mineral resource scarcity, land use, water consumption, acidification of terrestrial ecosystems and particulate matter formation.





<b>Κατάλογος σχημάτων</b>	<b>xiii</b>
<b>Κατάλογος πινάκων</b>	<b>xv</b>
<b>Συντομογραφίες και Σύμβολα</b>	<b>xvii</b>
<b>1 Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
1.1 Εξεταζόμενα είδη βιομάζας - Δυναμικό παραγωγής στην Ευρωπαϊκή Ένωση . . . . .	3
1.1.1 Πελλέτες και τσιπς ξύλου . . . . .	5
1.1.2 Φλοιός ξύλου . . . . .	6
1.1.3 Περίβλημα καρπών ελαιοφοίνικα (empty fruit bunches, EFB) . . . . .	7
1.2 Βιομάζα και παραγωγή ενέργειας: νομικό πλαίσιο . . . . .	7
<b>2 Βιβλιογραφική αναδρομή: Χρήση Βιομάζας στη (Συμ)παραγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας</b>	<b>11</b>
2.1 Σύντομη περιγραφή υφιστάμενης κατάστασης . . . . .	12
2.1.1 Συμπαραγωγή και τηλεθέρμανση με καύση ξύλου . . . . .	13
2.1.2 Συμπαραγωγή και τηλεθέρμανση με καύση αχύρου σιτηρών . . . . .	13
2.2 Ανάλυση Κύκλου Ζωής στον τομέα της παραγωγής ενέργειας από βιομάζα . . . . .	14
2.3 Εφοδιαστικές αλυσίδες βιομάζας . . . . .	17
2.4 Εξεταζόμενες τεχνολογίες προκατεργασίας . . . . .	17
2.4.1 Πελλετοποίηση . . . . .	18
2.4.2 Υδροθερμική ανθρακοποίηση (hydrothermal carbonization, HTC) . . . . .	18
2.4.3 Φρύξη (torrefaction) . . . . .	19
2.4.4 Έκρηξη ατμού (steam explosion) . . . . .	20
2.5 Τεχνολογίες Καύσης . . . . .	20
2.5.1 Καύση κονιοποιημένου καυσίμου (pulverized fuel combustion): . . . . .	22
2.5.2 Καύση ρευστοποιημένης κλίνης (fluidized bed combustion): . . . . .	22
2.5.3 Όρια και εξοικονόμηση εκπομπών . . . . .	23
2.6 Ιδιότητες και αξιοποίηση της τέφρας . . . . .	23
2.6.1 Αξιοποίηση της τέφρας . . . . .	24
<b>3 Μεθοδολογία: Ανάλυση Κύκλου Ζωής (AKZ, LCA)</b>	<b>27</b>
3.1 Γενικά περί της ακολουθούμενης μεθόδου . . . . .	27
3.2 Τεκμηρίωση ακολουθούμενης μεθοδολογίας . . . . .	29

3.3	Ορισμοί: στόχος και εύρος μελέτης . . . . .	29
3.4	Κατάλογος απογραφής κύκλου ζωής, Life Cycle Inventory, LCI . . . . .	30
3.5	Ανάλυση περιβαλλοντικού αντικτύπου . . . . .	30
<b>4</b>	<b>Περιγραφή Διαδικασίας Προσομοίωσης και Μοντέλα</b>	<b>33</b>
4.1	Γενική περιγραφή των διαδικασιών προσομοίωσης . . . . .	33
4.2	Εξεταζόμενα σενάρια και μοντελοποίηση . . . . .	34
4.2.1	Γενικές παραδοχές . . . . .	34
4.2.2	Σενάριο 1α: Ακατέργαστες πελλέτες ξύλου . . . . .	36
4.2.3	Σενάριο 1β: Φρυγμένες πελλέτες ξύλου . . . . .	37
4.2.4	Σενάριο 2α: Ακατέργαστες πελλέτες περιβλήματος καρπών ελαιοφώινικα . . . . .	37
4.2.5	Σενάριο 2β: Υδροθερμικώς κατεργασμένες πελλέτες περιβλήματος καρπών ελαιοφώινικα . . . . .	38
4.2.6	Σενάριο 3α: Ακατέργαστες πελλέτες φλοιού ξύλου . . . . .	39
4.2.7	Σενάριο 3β: Πελλέτες φλοιού ξύλου κατεργασμένες με έκρηξη ατμού . . . . .	40
<b>5</b>	<b>Παράθεση Αποτελεσμάτων</b>	<b>41</b>
<b>6</b>	<b>Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία</b>	<b>55</b>
6.1	Συμπεράσματα . . . . .	55
6.2	Μελλοντική εργασία . . . . .	55
	<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>57</b>
<b>7</b>	<b>Παράρτημα: Λοιποί Υπολογισμοί</b>	<b>67</b>

1.1	Η σταδιακή απόσυρση λιγνιτικών μονάδων σε Ευρωπαϊκές χώρες από το 2015 (Bloomberg)	2
1.2	Το διαθέσιμο δυναμικό βιομάζας στην ΕΕ27 ανά πηγή προέλευσης για το διάστημα 2010-2050 υπό διαφορετικά σενάρια (Matthews, 2015)	4
1.3	Η παγκόσμια παραγωγή πελλετών ξύλου (σε χιλιάδες τόνους) μετά το 2000 (Junginger, 2014)	6
2.1	Η ηλεκτροπαραγωγή στην ΕΕ το 2017 - η συνεισφορά των ΑΠΕ (Agora Energiewende and Sandbag, 2018)	13
2.2	Εφαρμοζόμενες τεχνολογίες συμπαραγωγής με βιομάζα στην Ευρώπη (Jungmeier, G. et al, 2004)	21
2.3	Τυπική διάταξη ηλεκτροπαραγωγής από καύση βιομάζας (Sertvert, 2011)	22
2.4	Τα όρια εκπομπών για μεγάλου μεγέθους μονάδες βιομάζας σύμφωνα με το BAT Reference Document for Large Combustion Plants, Ευρωπαϊκή Επιτροπή 2016	23
3.1	Τα τέσσερα στάδια μίας μελέτης ΑΚΖ σύμφωνα με τα πρότυπα ISO 14040:2006 και ISO 14044:2006	28
4.1	Όρια του υπό μελέτη συστήματος	34
4.2	Μηχανισμοί παραγωγής NO <sub>x</sub> από καύση βιομάζας (Korpejan, Van Loo, 2012)	35
5.1	Σενάριο 1α: συγκριτικά αποτελέσματα	49
5.2	Σενάριο 1β: συγκριτικά αποτελέσματα	50
5.3	Σενάριο 2α: συγκριτικά αποτελέσματα	51
5.4	Σενάριο 2β: συγκριτικά αποτελέσματα	52
5.5	Σενάριο 3α: συγκριτικά αποτελέσματα	53
5.6	Σενάριο 3β: συγκριτικά αποτελέσματα	54
7.1	Σενάριο 1α, παροχή ηλεκτρισμού από το δίκτυο, +30% μεταφορά - συγκριτικά αποτελέσματα	78
7.2	Σενάριο 1α, παροχή ηλεκτρισμού από το δίκτυο, -30% μεταφορά - συγκριτικά αποτελέσματα	79
7.3	Σενάριο 1α, παροχή ηλεκτρισμού από το δίκτυο - συγκριτικά αποτελέσματα	80
7.4	Σενάριο 1β, παροχή ηλεκτρισμού από το δίκτυο - συγκριτικά αποτελέσματα	81

7.5	Σενάριο 3α, παροχή ηλεκτρισμού από το δίκτυο και χωρίς τρένο - συγκριτικά αποτελέσματα . . . . .	82
7.6	Σενάριο 3α, παροχή ηλεκτρισμού από το δίκτυο - συγκριτικά αποτελέσματα . . . .	83
7.7	Σενάριο 3α, χωρίς μεταφορά με τρένο - συγκριτικά αποτελέσματα . . . . .	84
7.8	Σενάριο 3β, παροχή ηλεκτρισμού από το δίκτυο - συγκριτικά αποτελέσματα . . . . .	85

3.1	Υπολογισμός εκπομπών καυσίμου σύμφωνα με την RED	29
3.2	Δυναμικά θέρμανσης του πλανήτη αερίων θερμοκηπίου σύμφωνα με τη μέθοδο ReCiPe 2016	31
4.1	Υπόδειγμα των τροποποιήσεων στο σετ δεδομένων της ecoinvent ώστε να αναπαριστάται η καύση βιομάζας	36
4.2	Κατάστρωση σετ δεδομένων για τη μοντελοποίηση της φρύξης ξύλου χρησιμοποιώντας διεργασίες της ecoinvent	38
4.3	Κατάστρωση σετ δεδομένων για τη μοντελοποίηση της υδροθερμικής ανθρακοποίησης EFB χρησιμοποιώντας διεργασίες της ecoinvent	39
4.4	Κατάστρωση σετ δεδομένων για τη μοντελοποίηση της έκρηξης ατμού φλοιού ξύλου χρησιμοποιώντας διεργασίες της ecoinvent	40
5.1	Σενάριο 1α - αποτελέσματα	43
5.2	Σενάριο 1β - αποτελέσματα	44
5.3	Σενάριο 2α - αποτελέσματα	45
5.4	Σενάριο 2β - αποτελέσματα	46
5.5	Σενάριο 3α - αποτελέσματα	47
5.6	Σενάριο 3β - αποτελέσματα	48
7.1	Σενάριο 1α, +30% μεταφορά με πλοίο - αποτελέσματα	68
7.2	Σενάριο 1α, -30% μεταφορά με πλοίο - αποτελέσματα	69
7.3	Σενάριο 1α, παροχή ηλεκτρισμού από το δίκτυο - αποτελέσματα	70
7.4	Σενάριο 1β, παροχή ηλεκτρισμού από το δίκτυο - αποτελέσματα	71
7.5	Σενάριο 2α, -30% μεταφορά πλοίου - αποτελέσματα	72
7.6	Σενάριο 2α, +30% μεταφορά πλοίου - αποτελέσματα	73
7.7	Σενάριο 2α, παροχή ηλεκτρισμού από το δίκτυο - αποτελέσματα	74
7.8	Σενάριο 3α, παροχή ηλεκτρισμού από το δίκτυο - αποτελέσματα	75
7.9	Σενάριο 3α, μεταφορά χωρίς τρένο - αποτελέσματα	76
7.10	Σενάριο 3β, παροχή ηλεκτρισμού από το δίκτυο - αποτελέσματα	77



## ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ ΚΑΙ ΣΥΜΒΟΛΑ

*ΣΗΘ, CHP* Συμπαράγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας, Cogeneration of Heat and Power

*AKZ, LCA* Ανάλυση Κύκλου Ζωής, Life Cycle Assessment

*EFB* Empty fruit bunches

*FFB* Fresh fruit bunches

*GHG* Greenhouse Gas

*GWP* Global warming potential

*HGI* Hardgrove Grindability Index

*HTC* Hydrothermal carbonization

*IPCC* Intergovernmental Panel on Climate Change

*LHV* Lower Heating Value, Κατώτερη Θερμογόνος Ικανότητα

*RED* Renewable Energy Directive

*SE* Steam explosion

*WBA* World Bioenergy Association





Η ολοένα και αυξανόμενη ρύπανση του περιβάλλοντος κατά το δεύτερο μισό του εικοστού αιώνα είχε ως αποτέλεσμα την κινητοποίηση των τεχνολογικά ανεπτυγμένων κρατών με σκοπό τον περιορισμό της. Για την επίτευξη ενός τέτοιου σκοπού υπογράφηκε το 1997 η συνθήκη του Κιότο, η οποία προέβλεπε μείωση των εκπομπών των πέντε κύριων αερίων του θερμοκηπίου της τάξεως του 5% μέσα στα επόμενα χρόνια, σε σύγκριση πάντα με τις εκπομπές των αερίων από το 1990 έως το 2000. Πλέον στα πλαίσια της αναθεωρημένης Οδηγία RED παρέχεται μεγαλύτερη ευελιξία στα Κράτη Μέλη της ΕΕ, όσον αφορά τις επιλογές υλοποίησης, τη στοχοθέτηση στις μεταφορές και τα κριτήρια βιωσιμότητας σε σχέση με την Οδηγία 2009/28/ΕΚ, εισάγοντας παράλληλα το δεσμευτικό στόχο [1] για μείωση κατά 40% των εκπεμπόμενων ρύπων σε σύγκριση με τη δεκαετία του 1990-2000, ενώ ο αντίστοιχος δεσμευτικός στόχος στην Οδηγία 2009/28/ΕΚ αναφερόταν σε μείωση εκπομπών ρύπων της τάξης του 30% έως το 2020 στο πλαίσιο παγκόσμιας συμφωνίας, ενώ ειδικά για την Ελλάδα ο εθνικός στόχος διαμορφώθηκε ως 20% μείωση εκπομπών μονομερώς [2].

Ένας δεύτερος δεσμευτικός στόχος της αναθεωρημένης Οδηγίας είναι η αύξηση του ποσοστού των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ευρωπαϊκό ενεργειακό μίγμα τουλάχιστον στο 27% της συνολικής παραγωγής ενέργειας έως το 2030 [1]. Η στοχοθεσία της περιβαλλοντικής νομοθεσίας των χωρών που υπέγραψαν τη συνθήκη του Παρισιού (2015) γίνεται με γνώμονα τον περιορισμό της υπερθέρμανσης του πλανήτη σε επίπεδο κάτω των 2 °C [3]. Συγκεκριμένα, στα πλαίσια της αναθεωρημένης νομοθεσίας της ΕΕ [1] ο στόχος εξοικονόμησης εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου για εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, θέρμανσης και ψύξης με θερμική ισχύ καυσίμου τουλάχιστον 20 MW είναι τουλάχιστον 70% για τα βιοκαύσιμα και βιορευστά που παράγονται σε εγκαταστάσεις που αρχίζουν να λειτουργούν μετά την 1η Ιανουαρίου 2021, 80% για παραγωγή θέρμανσης και ψύξης από στερεά καύσιμα βιομάζας που χρησιμοποιούνται σε εγκαταστάσεις που αρχίζουν να λειτουργούν μετά την 1η Ιανουαρίου 2021 και 85% για εγκαταστάσεις συμπαραγωγής ή τριπαραγωγής στερεής βιομάζας που αρχίζουν να λειτουργούν μετά την 1η Ιανουαρίου 2026 σε σύγκριση με το μέσο όρο εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου για τα ορυκτά καύσιμα της ΕΕ (183 g CO<sub>2</sub>-eq/MJ<sub>el</sub> για τον ηλεκτρισμό και 80 CO<sub>2</sub>-eq/MJ<sub>th</sub> για τη θερμότητα), με ετήσιο στόχο αύξησης 1,3% στο μερίδιο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για θέρμανση και ψύξη για όλη την πενταετία. Κρίνεται λοιπόν αναγκαία για την επίτευξη τόσο των εθνικών, όσο και των ευρωπαϊκών στόχων, η αξιοποίηση εναλλακτικών - ήπιων μορφών ενέργειας, η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, καθώς και η τεχνολογική ανάπτυξή τους.

Η παλαιότητα αρκετών μεγάλων ατμοηλεκτρικών μονάδων, αλλά και άλλοι παράγοντες, με πρώτο και κύριο τους ολοένα και αυστηρότερους περιβαλλοντικούς και νομοθετικούς περιορισμούς (π.χ. carbon tax, συστήματα εμπορίας εκπομπών), καθιστούν τις παλαιότερες μονάδες εξαιρετικά

κοστοβόρες, με αποτέλεσμα τη σταδιακή απόσυρση λιγνιτικών μονάδων σε πολλές χώρες (βλ. Σχ. 1.1). Μία αξιόλογη προσπάθεια για να αντιμετωπισθεί έστω μερικώς το πρόβλημα έγινε τις τελευταίες δεκαετίες με τη συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας, όπου στην ίδια εγκατάσταση παράγεται ταυτόχρονα ηλεκτρική ενέργεια και χρήσιμη θερμότητα (και ορισμένες φορές και ψύξη) από το ίδιο καύσιμο, ώστε να επιτυγχάνεται πρωτογενής εξοικονόμηση καυσίμου, άρα και εκπομπών ρύπων. Με αυτόν τον τρόπο η προκύπτουσα μείωση εκπομπών δεν επαρκεί ώστε να ικανοποιούνται οι θεσπισμένοι αυστηροί στόχοι για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής, και βεβαίως δεν επιλύεται το πρόβλημα της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα. Για τους λόγους αυτούς, μεταξύ άλλων, προωθείται η αξιοποίηση της βιομάζας στη συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας. Το κόστος μιας μονάδας συμπαραγωγής είναι μεν μεγαλύτερο από αυτό μίας συμβατικής μονάδας ηλεκτροπαραγωγής, αλλά αυτό εξισορροπείται από τα προαναφερθέντα σημαντικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η τεχνολογία.



**Σχήμα 1.1:** Η σταδιακή απόσυρση λιγνιτικών μονάδων σε Ευρωπαϊκές χώρες από το 2015 (Bloomberg)

Μία εναλλακτική στην ολική απόσυρση των ρυπογόνων μονάδων με ευρεία εφαρμογή στο δυτικό κόσμο είναι το λεγόμενο *powering*, η μετασκευή δηλαδή ενός ατμοηλεκτρικού σταθμού ώστε να καίει διαφορετικό καύσιμο, είτε εξ' ολοκλήρου είτε σε ποσοστό μαζί με το λιγνίτη (σύγκαυση, *co-firing*). Με τον τρόπο αυτό παρατείνεται (με κάποιο κόστος) η διάρκεια ζωής της μονάδας, αυξάνεται ο βαθμός απόδοσής της και αποκτάται η δυνατότητα καύσης φθινοτέρου και αειφόρου καυσίμου, όπως η βιομάζα. Η άμεση καύση βιομάζας προτιμάται λόγω του αξιώματός της ανθρακικής ουδετερότητάς της, αλλά και λόγω της αφθονίας και του χαμηλού κόστους της ως πρώτης ύλης. Σημειώνεται εδώ ότι στην Ευρωπαϊκή Ένωση η πρωτογενής ζήτηση ενέργειας εκτιμάται περί τα 1,8 δισεκατομμύρια toe για το έτος 2020, και σύμφωνα με προβλέψεις της Ευρωπαϊκής Επιτροπής η βιομάζα θα καλύπτει το 13% αυτής ή 236 εκατομμύρια toe, σε σύγκριση με τα 69 εκατομμύρια toe που παρείχε το 2003 [4].

Φυσικά η μετάβαση από την καύση λιγνίτη στην καύση βιομάζας δεν είναι εύκολη. Η βιομάζα, ακριβώς λόγω των μεταβλητών χαρακτηριστικών της, εμφανίζει διακυμάνσεις στα ποιοτικά χαρακτηριστικά της και δημιουργεί εντονότερες επικαθίσεις, ρύπους, τέφρα και προβλήματα διάβρωσης από το λιγνίτη λόγω των προσμίξεών της, καθιστώντας τα συστατικά πέρα από C, H, και O ανεπιθύμητα. Επίσης αρκετά είδη βιομάζας εμφανίζουν εποχικότητα, δημιουργώντας μεγάλες ανάγκες για αποθήκευση όλο το έτος. Ο βαθμός απόδοσης της μονάδας εμφανίζει κι αυτός διακύμανση και συχνά μειώνεται λόγω της μεγάλης περιεκτικότητας των καυσίμων στερεής βιομάζας σε υγρασία. Ωστόσο οι υφιστάμενες τεχνολογίες επιτρέπουν άμεση καύση βιομάζας με περιεκτικότητα σε υγρα-

σία έως 60% [5].

Στην παρούσα εργασία θα διερευνηθεί ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος των μονάδων συμπαραγωγής μεγάλης κλίμακας και υπερκρίσιμης τεχνολογίας αιχμής, που χρησιμοποιούν στερεά βιομάζα ως καύσιμο, ενώ στα πλαίσια ανάλυσης ευαισθησίας θα αξιολογηθούν ως προς τον περιβαλλοντικό τους αντίκτυπο και εναλλακτικά σενάρια αλυσίδας ανεφοδιασμού για ορισμένα καύσιμα.

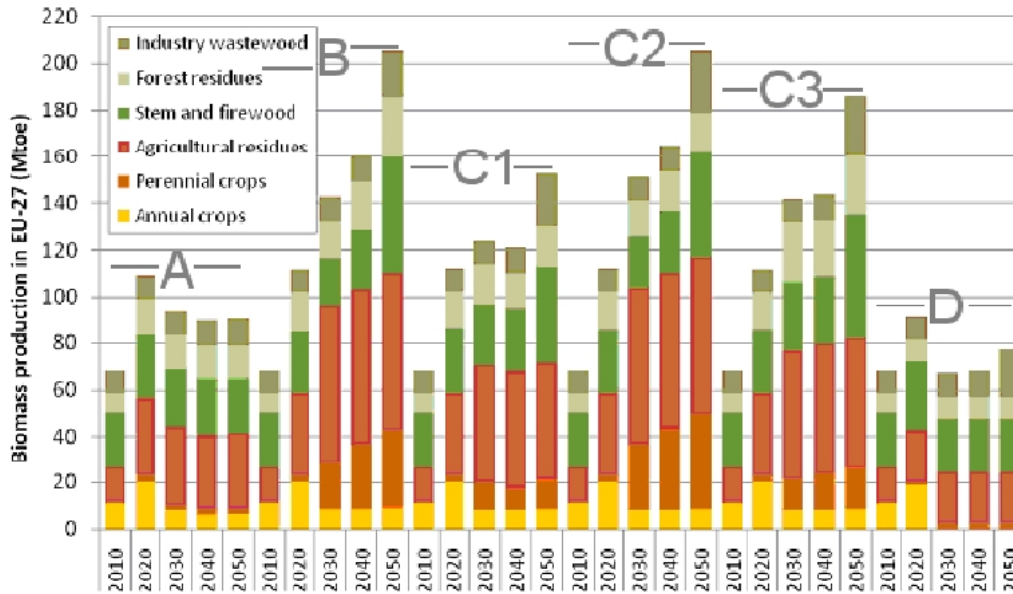
## 1.1 Εξεταζόμενα είδη βιομάζας - Δυναμικό παραγωγής στην Ευρωπαϊκή Ένωση

Σύμφωνα με την RED (Renewable Energy Directive, Οδηγία 2009/28/EK) [2], ορίζεται ως βιομάζα (biomass) το βιοαποδομήσιμο κλάσμα των προϊόντων, αποβλήτων ή καταλοίπων βιολογικής προέλευσης, από τον αγροτικό τομέα (γεωργία και κτηνοτροφία), τη δασοκομία και σχετικές δραστηριότητες, όπως η ιχθυοκαλλιέργεια, συμπεριλαμβανομένου του βιοαποδομήσιμου κλάσματος των βιομηχανικών και αστικών αποβλήτων. Η βιομάζα αποτελεί μία δεσμευμένη και αποθηκευμένη μορφή της ηλιακής ενέργειας και είναι αποτέλεσμα της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας των φυτικών οργανισμών. Η βιομάζα παρουσιάζει ενδιαφέρον ως καύσιμο για την παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας, κυρίως λόγω της αφθονίας της σε όλες τις περιοχές του πλανήτη, αλλά και λόγω της θερμογόνου ικανότητάς της. Τα κύρια δομικά συστατικά που απαρτίζουν τη βιομάζα είναι η κυτταρίνη, η λιγνίνη και οι ημικυτταρίνες.

Το δυναμικό παραγωγής βιομάζας μπορεί να αναλυθεί στις εξής κατηγορίες[6]:

- Θεωρητικό δυναμικό βιομάζας, που αποτελεί τη μέγιστη ποσότητα βιομάζας που μια περιοχή μπορεί να παράξει.
- Διαθέσιμο δυναμικό βιομάζας, που αποτελεί τη μέγιστη ποσότητα που μπορεί να παραχθεί σε μια περιοχή σε θεωρητικό επίπεδο, λαμβάνοντας υπόψη τη μορφολογία του εδάφους και άλλους περιορισμούς.
- Τεχνικά εκμεταλλεύσιμο δυναμικό βιομάζας, που αφορά το ποσοστό της βιομάζας που μπορεί να αξιοποιηθεί με τα διαθέσιμα τεχνικά μέσα.
- Οικονομικά εκμεταλλεύσιμο δυναμικό βιομάζας, που αποτελεί το ποσοστό του τεχνικά εκμεταλλεύσιμου δυναμικού βιομάζας του οποίου η αξιοποίηση συμφέρει οικονομικά.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση διαθέτει ένα αρκετά μεγάλο, και εν πολλοίς αναξιοποίητο [7], δυναμικό παραγωγής βιομάζας προς ενεργειακή αξιοποίηση. Το εκτιμώμενο ετήσιο δυναμικό παραγωγής με ορίζοντα το 2030, σύμφωνα με την αναφορά της IPCC [8], ανέρχεται σε 12 έως 74 EJ/έτος στην περίπτωση των υπολειμμάτων δασοκομίας, από 15 έως 70 EJ/έτος για τα γεωργικά υπολείμματα και περί τα 13 EJ/έτος από λοιπά απόβλητα. Τα συγκεκριμένα είδη βιομάζας είναι διαθέσιμα σε μεγάλο βαθμό νωρίτερα από το 2030, αλλά η διαθέσιμη ποσότητα παρουσιάζει μια αβεβαιότητα. Η αβεβαιότητα αυτή πηγάζει από πιθανή εντατικοποίηση ανταγωνιστικών χρήσεων (π.χ. η κατασκευή μοριοσανίδων από κατάλοιπα δασοκομίας και η χρήση αγροτικών υπολειμμάτων ως σανό ή λίπασμα) και από διαφορετικές πολιτικές όσον αφορά τα κριτήρια βιωσιμότητας που εφαρμόζονται στη δασοκομία και την εντατική καλλιέργεια. Στο Σχ. 1.2 φαίνεται η εκτίμηση του διαθέσιμου δυναμικού στερεής βιομάζας στην ΕΕ27 με βάση διαφορετικά σενάρια για το διάστημα 2010-2050 [9].



**Σχήμα 1.2:** Το διαθέσιμο δυναμικό βιομάζας στην ΕΕ27 ανά πηγή προέλευσης για το διάστημα 2010-2050 υπό διαφορετικά σενάρια (Matthews, 2015)

Οποιοδήποτε είδος βιομάζας, προκειμένου να διερευνηθεί η αξιοποίησή του ως στερεό καύσιμο, ελέγχεται κατά βάση ως προς τις εξής ιδιότητες [10]:

- ποσοστό υγρασίας,
- θερμογόνος ικανότητα,
- περιεκτικότητα σε σταθεροποιημένο άνθρακα και πτητικές ουσίες,
- περιεκτικότητα σε τέφρα/υπολείμματα,
- περιεκτικότητα σε αλκαλικά μέταλλα

Επιπροσθέτως, για να αποφέρει εύλογο οικονομικό όφελος η ενεργειακή αξιοποίηση ενός είδους βιομάζας, χρειάζεται αυτό να υπάρχει άμεσα διαθέσιμο σε μεγάλες ποσότητες στην περιοχή πέριξ της μονάδας, αλλά και να μπορεί εύκολα να αποθηκευτεί και να μεταφερθεί στη μονάδα αξιοποίησης, χωρίς ιδιαίτερες τεχνικές δυσκολίες στη διαχείρισή του. Ένα από τα τεχνικά κριτήρια για την καύση ενός στερεού βιοκαυσίμου σε μονάδα συμπαραγωγής είναι και η αλεσιμότητα, δηλαδή η σχετική ευκολία κονιοροποίησής του. Ο δείκτης αλεσιμότητας (Hardgrove Grindability Index, HGI) χρησιμοποιείται συνήθως για να περιγράψει τη συμπεριφορά των στερεών καυσίμων κατά την άλεση, ωστόσο στην περίπτωση των καυσίμων βιομάζας, όπως και του άνθρακα υψηλής υγρασίας, ο συγκεκριμένος δείκτης δεν θεωρείται αξιόπιστος [11].

Το συνολικό δυναμικό μείωσης εκπομπών άνθρακα μέσω της παραγωγής ενέργειας από βιομάζα, σύμφωνα πάλι με την αναφορά της IPCC [8], ανέρχεται σε 1.220 Mt CO<sub>2</sub> eq με έτος αναφοράς το 2030, και μάλιστα με ένα σημαντικό ποσοστό αυτού να επιτυγχάνεται με κόστος χαμηλότερο των 19,5 USD<sub>2005</sub>/t CO<sub>2</sub> eq. Στην περίπτωση της παραγωγής ενέργειας από αγροτικής προέλευσης βιομάζα, η μείωση εκπομπών εκτιμάται από 70 έως 1.260 Mt CO<sub>2</sub> eq/yr με κόστος έως 19,5 USD<sub>2005</sub>/t CO<sub>2</sub> eq, και από 560 έως 2.320 Mt CO<sub>2</sub> eq/yr με κόστος έως 48,5 USD<sub>2005</sub>/t CO<sub>2</sub> eq. Η μείωση εκπομπών άνθρακα μέσω της παραγωγής ενέργειας από δασικής προέλευσης βιομάζα εκτιμάται ότι θα ανέλθει στα 400 Mt CO<sub>2</sub> eq/yr έως το 2030.

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής θα εξεταστούν ως προς το δυναμικό μείωσης εκπομπών άνθρακα ορισμένα μόνο είδη, τα οποία επιλέχθηκαν με ορισμένα επιπλέον κριτήρια: είτε λόγω της άμεσης διαθεσιμότητάς τους στον ευρωπαϊκό χώρο, είτε λόγω του χαμηλού κόστους προμήθειάς τους. Τα εξεταζόμενα είδη είναι τα εξής: πελλέτες ξύλου, φλοιός ερυθρελάτης (spruce), άχυρο σιταριού, μίσχανθος και περίβλημα καρπών ελαιοφοίνικα. Ως προς το δυναμικό παραγωγής τους στην ΕΕ, στις αναφερόμενες εκτιμήσεις υφίσταται μερική αβεβαιότητα λόγω διακύμανσης, τόσο μεταξύ των ετών, όσο και εντός του έτους (για είδη με περισσότερες από μία περιόδους συγκομιδής ετησίως).

### 1.1.1 Πελλέτες και τσιπς ξύλου

Η συνολική δασική έκταση της ΕΕ28 το 2015 ανήλθε σε 161 Mha, που καλύπτει το 38% της γης. Από αυτή την περιοχή, 134 Mha (84%) θεωρούνται ως διαθέσιμα δάση για την προμήθεια ξυλείας [12]. Η ξυλεία αυτή αξιοποιείται κυρίως για την παραλαβή της πριστής ξυλείας, ενώ τα υπολείμματα (ροκανίδια, τσιπς ξύλου, φλοιός) συνήθως καίγονται επιτόπου για παραγωγή ηλεκτρισμού ή θερμότητας. Τα τελευταία χρόνια, με την άνοδο της τιμής των πελλετών ξύλου, τα υπολείμματα της κατεργασίας ξυλείας πλέον μετατρέπονται σε πελλέτες και μεταπωλούνται ως καύσιμο, προσφέροντας μία νέα πηγή εσόδων στη βιομηχανία ξυλείας. Η ξυλεία αποτελεί περί το 80% της χρησιμοποιούμενης βιομάζας στην παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας. Τα ευρωπαϊκά δάση προσφέρονται για εντατικοποίηση της αξιοποίησής τους για παραγωγή ενέργειας: μόνο το 60-70% της ετήσιας αύξησης της δασικής βιομάζας συλλέγεται στην ΕΕ <sup>1</sup>.

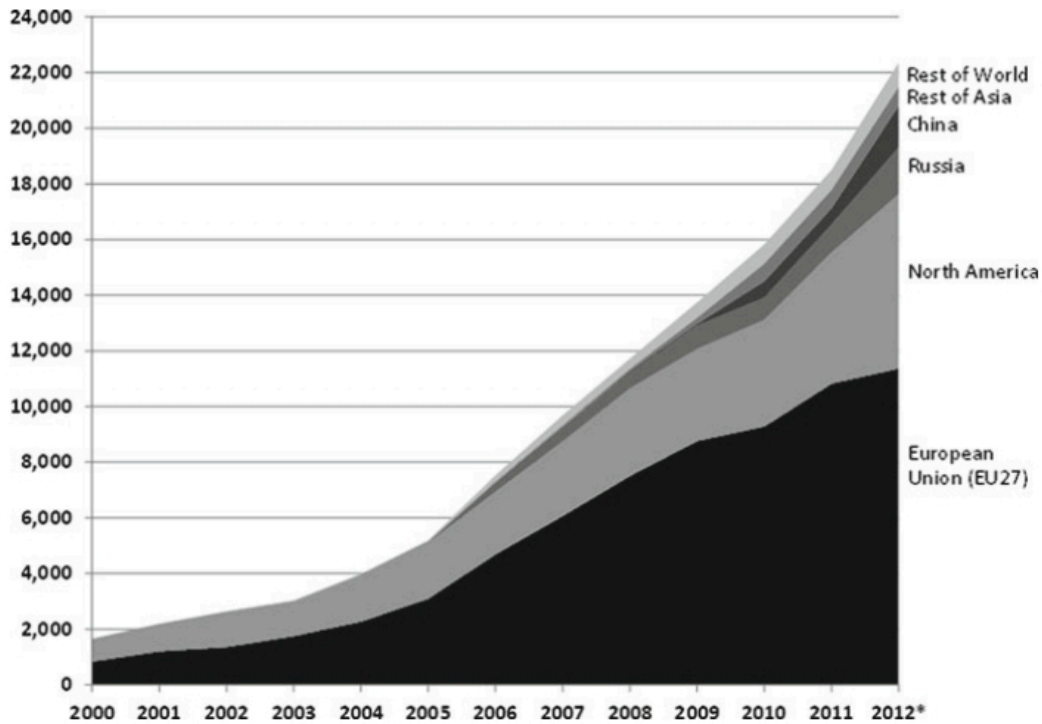
Ανάλογα με τη σύστασή τους, οι πελλέτες ξύλου πιστοποιούνται με διαφορετικά πρότυπα ποιότητας. Στην Ευρώπη, αλλά και σε άλλες χώρες λόγω της κυριαρχίας της ΕΕ στο διεθνές εμπόριο πελλετών, καθιερώθηκε το 2012 το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 14961-2, για τη δημιουργία του οποίου πρωτοστάτησαν η Γερμανία, η Σουηδία και η Αυστρία. Παράλληλα με αυτό αναπτύχθηκε το 2015 το διεθνές πρότυπο ISO 17225-2, το οποίο θέτει διαφορετικά κριτήρια ποιότητας για τις πελλέτες που προορίζονται για οικιακή και εμπορική χρήση, και διαφορετικά για τις πελλέτες που προορίζονται για χρήση στη βιομηχανία, με τις αντίστοιχες ποιοτικές κατηγορίες να ορίζονται ως A1, A2 και B για τις πελλέτες μη βιομηχανικών χρήσεων και I1, I2 και I3 για τις πελλέτες βιομηχανικής χρήσης [14]. Οι πελλέτες μη ξυλώδους προέλευσης δεν κατηγοριοποιούνται με τα υφιστάμενα πρότυπα ποιότητας, οπότε για τη διεύρυνση της αγοράς με προσθήκη των πελλετών μη ξυλώδους βιομάζας είναι απαραίτητη η αναθεώρηση των σημερινών προτύπων.

Παράγοντας 13,5 εκατομμύρια τόνους (στοιχεία 2014), η ΕΕ27 είναι επί του παρόντος ο μεγαλύτερος παραγωγός πελλετών ξύλου στον κόσμο, παρέχοντας περί το 50% της παγκόσμιας παραγωγής. Παγκοσμίως η παραγωγή πελλετών ξύλου έχει πλέον ξεπεράσει τα 26 εκατομμύρια τόνους (στοιχεία 2015). Η παραγωγή στην ΕΕ εμφανίζει ξεκάθαρη αυξητική τάση στην πάροδο των ετών (βλ. Σχ. 1.3), με αύξηση της τάξης του 35% το διάστημα από το 2010 ως το 2014 και 11% από το 2013 μέχρι το 2014 [15].

Οι πελλέτες ξύλου θεωρούνται η πιο γρήγορα αναπτυσσόμενη αγορά ξυλώδους βιομάζας στην Ευρώπη των 27. Την τελευταία δεκαετία οι κύριοι προμηθευτές πελλετών ξύλου εκτός της Ευρώπης των 27 είναι ο Καναδάς, οι ΗΠΑ και η Ρωσία. Στο εγγύς μέλλον οι κύριοι εξαγωγείς προς την ΕΕ προβλέπεται να είναι ο Καναδάς, οι ΗΠΑ και η Βραζιλία. Οι παραγωγοί που αναμένεται να αυξήσουν περισσότερο την παραγωγή τους στο εγγύς μέλλον είναι οι ΗΠΑ και η Βραζιλία [16].

---

<sup>1</sup>Για την Ελλάδα το δυναμικό αυτό είναι ως επί το πλείστον αναξιοποίητο, καθώς με στοιχεία του WWF Ελλάς “σήμερα διαχειριζόμαστε περίπου το 35% των δασών μας, ενώ για το υπόλοιπο 65% δεν εφαρμόζεται καμία συστηματική παραγωγική ή άλλου είδους διαχείριση. Μάλιστα, σε κάποιες οικολογικά σημαντικές περιοχές, η μείωση της υλοτομίας είναι τόσο ραγδαία που έχει αρνητική επίδραση στη διατήρηση της βιοποικιλότητας” [13]



**Σχήμα 1.3:** Η παγκόσμια παραγωγή πελλετών ξύλου (σε χιλιάδες τόνους) μετά το 2000 (Junginger, 2014)

Στην ΕΕ σήμερα, περίπου το 42% της δασικής συγκομιδής αξιοποιείται τελικά για παραγωγή ενέργειας, συνεπεξεργαζόμενο μαζί με σημαντικό ποσοστό από κατάλοιπα κατεργασίας τεχνικής ξυλείας. Σημαντικά δυναμικά επέκτασης εντοπίζονται σε μικρότερες ιδιωτικές δασικές εκμεταλλεύσεις και σχετίζονται με υπολείμματα δασών και συμπληρωματικές κοπές, όπως πρώτες αραιώσεις. Σαφώς θα ήταν μη βιώσιμη οικονομικά η ενεργειακή αξιοποίηση ξυλείας που δύναται να αξιοποιηθεί στην παραγωγή προϊόντων μεγαλύτερης αξίας. Οι πρόσφατες προβλέψεις για το 2030 ποσοτικοποιούν το βιώσιμο δυναμικό ανάπτυξης της ξυλείας για παραγωγή ενέργειας από τα δάση της ΕΕ, που ανέρχεται στα 675 εκατομμύρια κυβικά μέτρα (146 εκατομμύρια toe) ετησίως, με την προϋπόθεση ότι θα εφαρμοστούν πολιτικές ενθάρρυνσης της διακίνησης των προϊόντων ξύλου [4].

### 1.1.2 Φλοιός ξύλου

Η ΕΕ27 μέσω της κατεργασίας τεχνικής ξυλείας, αλλά και της βιομηχανίας πολτού και χάρτου παράγει περί τα 25-30 εκατομμύρια νωπούς τόνους ανάμεικτου φλοιού σκληρής και μαλακής ξυλείας [17]. Ο φλοιός αντιστοιχεί περίπου στο 10-22% του όγκου ενός δέντρου, ποσοστό που κυμαίνεται ανάλογα με το είδος, αλλά και την ηλικία του δέντρου[18]. Εάν εφαρμοστεί η οδηγία 2009/28/ΕΚ, ως παραπροϊόν της επεξεργασίας ξύλου, ο φλοιός δεν επιβαρύνεται με τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου των εργασιών δασικής διαχείρισης ή άλλων εργασιών μέχρι το σημείο της συλλογής της βιομάζας [2]. Ελλείψει άλλων επιλογών, ο φλοιός παραδοσιακά καίγεται επιτόπου στους λέβητες των εγκαταστάσεων για παραγωγή χρήσιμης θερμότητας, ατμού ή ζεστού νερού χρήσης. Για το φλοιό κωνοφόρων, και συγκεκριμένα της ερυθρελάτης (*Picea abies*), ένα από τα πιο διαδεδομένα είδη δέντρων στην Ευρώπη, η παραγωγή εκτιμάται στα 10 εκατομμύρια ξηρών τόνων πανευρωπαϊκά, με τη Φινλανδία να παράγει 1 εκατομμύριο τόνους (στοιχεία 2015) [19].

### 1.1.3 Περιβλήμα καρπών ελαιοφοίνικα (empty fruit bunches, EFB)

Το περιβλήμα των καρπών ελαιοφοίνικα, που απορρίπτεται μετά την αφαίρεση των καρπών, είναι μια αρκετά νέα προσθήκη στις κατηγορίες βιομάζας που παρουσιάζουν δυναμικό αξιοποίησης ως πρώτη ύλη για την παραγωγή ενέργειας. Η βιομηχανία φοινικελαίου σε Μαλαισία, Ινδονησία και Ταϊλάνδη παράγει περίπου 50 εκατομμύρια τόνους EFB ετησίως, με έντονη ωστόσο διακύμανση μεταξύ των εποχών [20]. Συγκεκριμένα παράγονται περίπου 1.125 kg EFB/kg CPO (ακατέργαστου φοινικελαίου) [21]. Τα περιβλήματα καρπών του ελαιοφοίνικα είναι κι αυτά παραπροϊόν της επεξεργασίας τροφίμων, και ως εκ τούτου έχουν κι αυτά τη δυνατότητα να θεωρηθούν ως πρώτες ύλες μηδενικού περιβαλλοντικού αποτυπώματος κατά την καλλιέργειά τους σύμφωνα με την ευρωπαϊκή νομοθεσία. Το μεγαλύτερο πρόβλημα στη διαχείριση των EFB είναι η υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία, καθώς και σε ανόργανα συστατικά (τέφρα).

## 1.2 Βιομάζα και παραγωγή ενέργειας: νομικό πλαίσιο

Στον ευρωπαϊκό χώρο το κύριο νομικό πλαίσιο αναφοράς που ορίζει τα κριτήρια αιεφορίας για τα βιοκαύσιμα και τη βιοενέργεια είναι η Οδηγία 2009/28/EK (RED, Renewable Energy Directive). Η ΕΕ έθεσε τρεις στόχους που πρέπει να υλοποιηθούν μέχρι το 2020: 20% μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου, 20% μερίδιο της τελικά καταναλισκόμενης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές (20%) και 20% βελτιώσεις της ενεργειακής απόδοσης. Σύμφωνα με την αναθεωρημένη Οδηγία RED, το ποσοστό καταναλισκόμενης ενέργειας από ΑΠΕ αυξάνεται στο 27% έως το 2030 [1], καθώς επίσης προστίθεται ως ελάχιστο όριο το 10% της καταναλισκόμενης ενέργειας στις μεταφορές στο εσωτερικό κάθε κράτους μέλους. Όλα τα κράτη μέλη της ΕΕ είναι υποχρεωμένα να υιοθετήσουν τις διατάξεις της αναθεωρημένης RED και να τις ενσωματώσουν στην εθνική νομοθεσία έως τις 30 Ιουνίου 2021. Η RED θέτει σαφείς προδιαγραφές ως προς τις ελάχιστες απαιτήσεις αιεφορίας για τα βιοκαύσιμα (στις μεταφορές) και τα βιορευστά (για παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας), καθώς και τα κριτήρια για την πιστοποίησή τους, ώστε να δικαιούνται κρατική επιχορήγηση ή να προσμετρώνται στην επίτευξη των δεσμευτικών εθνικών στόχων για την ανανεώσιμη ενέργεια [2].

Τα κριτήρια αιεφορίας είναι:

- Μείωση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (GHG) τουλάχιστον κατά 35% σε σύγκριση με τα ορυκτά καύσιμα (αυξήθηκε ήδη στο 50% για το έτος 2017 και αυξάνεται περαιτέρω στο 60% για νέες μονάδες από την αρχή του έτους 2018 και στο 70% για την παραγωγή βιοκαυσίμων και βιορευστών από μονάδες που τίθενται σε λειτουργία από την αρχή του 2021), ενώ για την ηλεκτροπαραγωγή και την παραγωγή χρήσιμης θερμότητας και ψύξης από βιομάζα η μείωση θα ανέρχεται τουλάχιστον στο 80 % όσον αφορά σε μονάδες που τίθενται σε λειτουργία μετά την 1/1/2021 και στο 85% για μονάδες που τίθενται σε λειτουργία μετά την 1/1/2026 [1].
- Η πρώτη ύλη δεν προέρχεται από γη σημαντικής βιοποικιλότητας, όπως πρωτογενή δάση (primary forests), προστατευόμενες φυσικές περιοχές (π.χ. Natura 2000), λειμώνες υψηλής βιοποικιλότητας (εκτός εάν αποδεικνύεται ότι η απομάκρυνση βιομάζας είναι τμήμα ενός σχεδίου διαχείρισης συμβατού με, ή προαπαιτούμενο για τη διατήρηση της υψηλής βιοποικιλότητας),
- Η πρώτη ύλη δεν προέρχεται από εκχερσωμένη γη με υψηλό απόθεμα άνθρακα (συνεχώς δασωμένες περιοχές, υδροβιότοποι ή τυρφώνες),
- Οι πρώτες ύλες που προέρχονται από την ευρωπαϊκή γεωργία οφείλουν να παράγονται σύμφωνα με τις “ορθές γεωργικές πρακτικές”, όπως αυτές περιγράφονται στην Κοινή Αγροτική Πολιτική (ΚΑΠ, CAP).

Η συμμόρφωση ως προς τις συγκεκριμένες προδιαγραφές αειφορίας θα ελέγχεται από τα κράτη μέλη ή μέσω εθελοντικών σχεδίων δράσης εγκεκριμένων από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή (European Commission, EC). Τα κράτη μέλη υποχρεούνται επίσης σε λεπτομερή αναφορά προς την EC σε διετή βάση σχετικά με τον αντίκτυπο των βιοκαυσίμων και βιορευστών στους τομείς της βιοποικιλότητας, των αποθεμάτων νερού, της ποιότητας νερού και εδάφους, της μείωσης εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (GHG) και σε μεταβολές σε τιμές αγαθών και χρήσεις γης που σχετίζονται με την παραγωγή βιομάζας. Η Οδηγία RED αυτή καθεαυτή δεν περιλαμβάνει σαφή ορισμό των κριτηρίων και διατάξεων που σχετίζονται με όρους όπως τα πρωτογενή δάση και οι λειμώνες υψηλής βιοποικιλότητας, οπότε και κρίνεται απαραίτητη η διερεύνηση και ο καθορισμός τους στα πλαίσια διαδικασίας επιτροπολογίας σε πανευρωπαϊκό επίπεδο.

Στην αρχική μορφή της Οδηγίας RED τα κριτήρια αειφορίας δεν εφαρμόζονταν στην περίπτωση χρήσης στερεής και αέριας βιομάζας για παραγωγή ηλεκτρισμού ή θερμότητας, ωστόσο οι πρώτες ύλες για την παραγωγή στερεών και αέριων ενεργειακών μεταφορέων (η λεγόμενη λιγνοκυτταρινούχος βιομάζα) αναμένονταν να αξιοποιούνται και για την παραγωγή “βιοκαυσίμων δεύτερης γενιάς”, και άρα να συμμορφώνονται με τις απαιτήσεις που έχουν τεθεί σχετικά με τα βιοκαύσιμα και τα βιορευστά [22]. Στην αναθεωρημένη Οδηγία RED II, που θα τεθεί σε ισχύ από τις αρχές του 2021, υπάρχει διεύρυνση της μεθοδολογίας επιμερισμού των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, ώστε να συμπεριλαμβάνει και τη χρησιμοποίηση βιοκαυσίμων υπό μορφή στερεής και αέριας βιομάζας.

Σύμφωνα με πρόσφατα τεχνικά και επιστημονικά ευρήματα, η μεθοδολογία απογραφής των αερίων θερμοκηπίου (GHG) θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τον μετασχηματισμό των στερεών και αερίων καυσίμων βιομάζας στην τελικά εκμεταλλεύσιμη ενέργεια, προκειμένου να είναι συνεπής με τον υπολογισμό της ανανεώσιμης ενέργειας για τους σκοπούς της καταμέτρησης προς τον επιδιωκόμενο στόχο της ΕΕ. Ο επιμερισμός των εκπομπών σε συμπαραγόμενα προϊόντα, διακρίνοντάς τα από τα κατάλοιπα και τα απόβλητα, πρέπει επίσης να εξετάζεται σε περιπτώσεις μονάδων συμπαραγωγής ή πολυπαραγωγής ηλεκτρισμού, θερμότητας και ψύξης. Για να εξασφαλιστεί η συνοχή και η συγκρισιμότητα των μειώσεων αερίων ρύπων από καύσιμα βιομάζας για τη θέρμανση, την ψύξη και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στα διάφορα κράτη μέλη, κρίνεται σκόπιμο να εφαρμοστεί σύγκριση με τις εκπομπές των ορυκτών καυσίμων βάσει των μέσων εκπομπών της ΕΕ στους τομείς της θέρμανσης και της ηλεκτρικής ενέργειας.

Εάν αποφιλωθεί για την καλλιέργεια πρώτης ύλης γη με υψηλό απόθεμα άνθρακα στο έδαφος ή τη βλάστησή της, ένα ποσοστό του αποθηκευμένου άνθρακα θα καταλήξει στην ατμόσφαιρα, σχηματίζοντας διοξείδιο του άνθρακα. Το προκύπτον πλεόνασμα εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου μπορεί να αντισταθμίσει τις θετικές επιπτώσεις των βιορευστών, βιοκαυσίμων ή καυσίμων βιομάζας, και σε ορισμένες περιπτώσεις να έχει το αντίθετο αποτέλεσμα. Επομένως, ο πλήρης ανθρακικός αντίκτυπος μιας τέτοιου είδους μετατροπής πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τον υπολογισμό της εξοικονόμησης εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου συγκεκριμένου βιοκαυσίμου, βιορευστού ή καυσίμου βιομάζας. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίζεται ότι ο υπολογισμός της εξοικονόμησης εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου συμπεριλαμβάνει το σύνολο των επιπτώσεων σε εκπομπές άνθρακα από τη χρήση βιορευστών, βιοκαυσίμων ή καυσίμων βιομάζας [1].

Συμπεραίνεται, λοιπόν, ότι, αν και η βιομάζα θεωρείται ανανεώσιμο καύσιμο εν γένει, όταν λαμβάνεται υπόψη ολόκληρη η εφοδιαστική αλυσίδα στην ανάλυση του κύκλου ζωής μιας μονάδας βιομάζας, η μείωση εκπομπών άνθρακα ενδέχεται να μην είναι εντός των θεσμοθετημένων ορίων ώστε να θεωρηθεί το συνολικό σύστημα περιβαλλοντικά βιώσιμο. Παραδείγματος χάρη, στη μελέτη των Järpinen και Korpinen σχετικά με την παραγωγή ενέργειας από ξυλώδη βιομάζα στη Φινλανδία ακολουθείται η μεθοδολογία υπολογισμού που προτείνεται από την RED II και δε συμπεριλαμβάνει εκπομπές ρύπων λόγω αλλαγών χρήσης γης και λόγω αποθήκευσης. Βρέθηκε κατόπιν ότι εάν συμπεριληφθούν στους υπολογισμούς εξ ολοκλήρου οι εκπομπές ρύπων από αποθήκευση του καυσίμου για έξι μήνες, κανένα από τα εξεταζόμενα σενάρια παραγωγής βιοενέργειας δεν επιτυγχάνει



την απαιτούμενη τουλάχιστον κατά 60% μείωση ρύπων [23].



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ: ΧΡΗΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΣΤΗ (ΣΥΜ)ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Η βιομάζα χρησιμοποιείται από τον άνθρωπο ως πηγή ενέργειας, κυρίως θερμότητας, ήδη από τα προϊστορικά χρόνια. Ακόμα και στις μέρες μας, στις αναπτυσσόμενες χώρες πάνω από το 1/3 των ενεργειακών αναγκών καλύπτεται από βιομάζα. Σχεδόν 3 δις άνθρωποι ουσιαστικά εξαρτώνται από τη βιομάζα για την κάλυψη των αναγκών τους σε θέρμανση, φωτισμό και μαγείρεμα [24].

Η καύση βιομάζας επανέρχεται στο προσκήνιο τις τελευταίες δεκαετίες και στις ανεπτυγμένες χώρες, λόγω των περιβαλλοντικών πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει, και κυρίως λόγω της κατά σύμβαση ανθρακικής της ουδετερότητας. Θεωρείται δηλαδή ότι η βιομάζα δεν συνεισφέρει στην αύξηση της συγκέντρωσης CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα επειδή, ενώ κατά την καύση της παράγεται CO<sub>2</sub>, κατά την ανάπτυξή της μέσω της φωτοσύνθεσης επαναδεσμεύονται σημαντικές ποσότητες CO<sub>2</sub> στους ιστούς της. Το αξίωμα της ανθρακικής ουδετερότητας έχει πολλαπλές προεκτάσεις και έχει εξελιχθεί σε πεδίο έντονης αντιπαράθεσης μεταξύ των ερευνητών ([25, 26, 27]), ωστόσο συνεχίζει να αποτελεί τη βάση του υπολογισμού του ανθρακικού αποτυπώματος των βιοκαυσίμων και καυσίμων βιομάζας οποιασδήποτε μορφής.

Ορισμένα ακόμη πλεονεκτήματα από την καύση βιομάζας είναι:

- Η αποφυγή της επιβάρυνσης της ατμόσφαιρας με διοξείδιο του θείου (SO<sub>2</sub>) που παράγεται κατά την καύση ορυκτών καυσίμων και συντελεί στο φαινόμενο της “όξινης βροχής” - η περιεκτικότητα των περισσότερων ειδών βιομάζας σε θείο είναι σχεδόν αμελητέα σε σύγκριση με αυτή του λιγνίτη.
- Η βιομάζα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο σε μονάδες βάσης, παράγοντας ενέργεια ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες, σε αντίθεση με την ηλιακή, αιολική και υδροδυναμική ενέργεια.
- Η διάδοση των μονάδων ενεργειακής αξιοποίησης βιομάζας δημιουργεί μία νέα αγορά και αρκετές νέες θέσεις εργασίας στον κατασκευαστικό και αγροτικό τομέα, αλλά και στον τομέα των υπηρεσιών. Αυτές οι νέες θέσεις εργασίας είναι σε θέση να ενισχύσουν την περιφερειακή ανάπτυξη της Ευρωπαϊκής Ένωσης.
- Η μείωση της ενεργειακής εξάρτησης των χωρών της Ευρωπαϊκής Ένωσης, που είναι αποτέλεσμα της εισαγωγής καυσίμων από τρίτες χώρες, με αξιοποίηση του εντόπιου δυναμικού και με αντίστοιχη εξοικονόμηση συναλλάγματος.
- Τα τελευταία χρόνια έχει διαπιστωθεί ότι μεγάλες εκτάσεις εύφορης γης σε χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης τίθενται εκτός παραγωγικής δραστηριότητας. Η χρήση και επομένως η

ζήτηση βιομάζας για παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας μπορεί με τις ενεργειακές καλλιέργειες να δώσει νέα δυναμική σε αυτές τις αναξιοποίητες εκτάσεις.

## 2.1 Σύντομη περιγραφή υφιστάμενης κατάστασης

Η βιομάζα έχει τη δυνατότητα να συμβάλλει στην υποκατάσταση των ορυκτών καυσίμων στον τομέα των μεταφορών και της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω της ικανότητας παραγωγής βιοκαυσίμων, όπως βιοντίζελ, μεθανόλη και υδρογόνο μέσω τη διαδικασία σύνθεσης Fisher-Tropsch. Παρά τους εγγενείς περιορισμούς στη χρήση της, όπως η χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα, η ινώδης δομή (που συνεπάγεται δυσκολία στο χειρισμό), η συχνά υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία και πτητικές οργανικές ενώσεις [5] και η υγροσκοπική της φύση [28], η χρήση βιομάζας εξαπλώνεται με ταχείς ρυθμούς στην παγκόσμια παραγωγή ενέργειας.

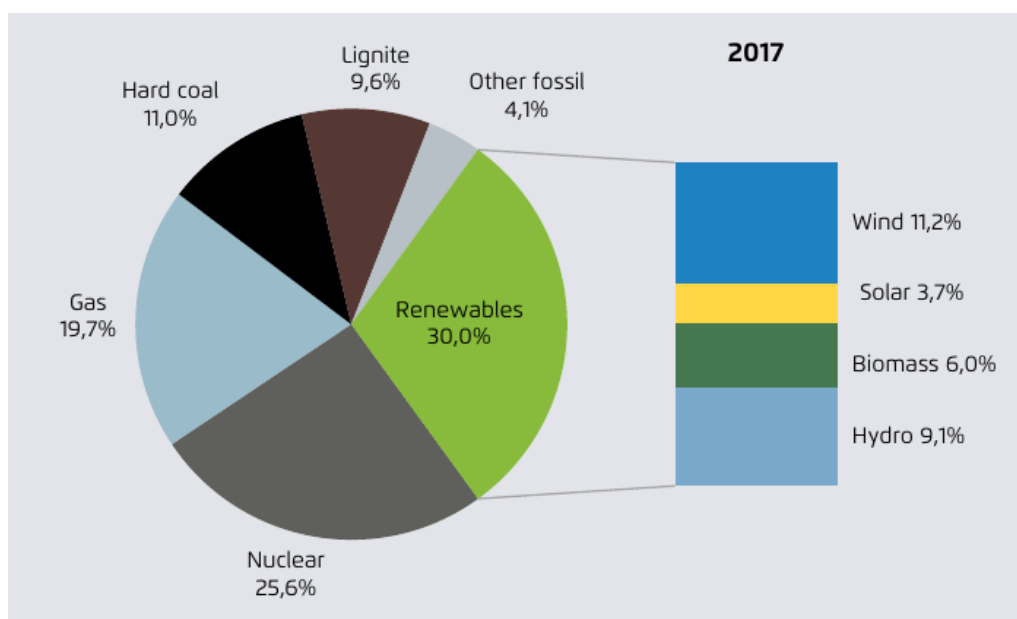
Η καύση βιομάζας είναι πλέον μία ώριμη τεχνολογία που εφαρμόζεται σε πολυάριθμες εν ενεργεία μονάδες παγκοσμίως, με περιορισμένη ακόμα ενεργειακή αποδοτικότητα και υψηλά λειτουργικά και επενδυτικά κόστη, παράγοντες που οδηγούν σε χαμηλή κερδοφορία. Το κύριο πλεονέκτημα, ωστόσο, της συγκεκριμένης τεχνολογίας είναι η προσαρμοστικότητά της σε διαφορετικά είδη καυσίμων (αγροτικά, αστικά και βιομηχανικά υπολείμματα, ενεργειακές καλλιέργειες), σε μονάδες των οποίων η δυναμικότητα τυπικά κυμαίνεται μεταξύ 2-50 MW<sub>el</sub> [29]. Με βάση τη δυναμικότητα, τα συστήματα καύσης βιομάζας κατηγοριοποιούνται γενικά σε συστήματα μικρής κλίμακας (<200 KW<sub>th</sub>), μεσαίας κλίμακας (200 KW<sub>th</sub> - 20 MW<sub>th</sub>), μεγάλης κλίμακας (> 20 MW<sub>th</sub>) και σε συστήματα σύγκαισης με άνθρακα σε συμβατικούς θερμικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής (μερικοί μπορούν να φθάσουν εκατοντάδες MW<sub>th</sub> ή ακόμη και 1000 MW<sub>th</sub>) [30].

Η απόδοση των θερμικών σταθμών καύσης βιομάζας τυπικά κυμαίνεται μεταξύ 20%-40%. Μεγαλύτερες αποδόσεις επιτυγχάνονται είτε σε μεγαλύτερες μονάδες (πάνω από 100 MW<sub>el</sub>) ή με τη σύγκαιση βιομάζας σε ανθρακικούς θερμικούς σταθμούς. Η σύγκαιση βιομάζας σε ανθρακικούς θερμικούς σταθμούς προσέλκυσε αρκετό ενδιαφέρον ακριβώς επειδή εκμεταλλεύεται τους υψηλούς βαθμούς απόδοσης αυτών των μονάδων [31]. Οι μεγαλύτερες μονάδες αμιγούς καύσης βιομάζας σαφώς επωφελούνται από τους μεγαλύτερους ηλεκτρικούς βαθμούς απόδοσης που επιτυγχάνουν (τυπικά από 22-23% κατ' ελάχιστον), αλλά παράλληλα αντιμετωπίζουν πολύ μεγαλύτερες προκλήσεις στον ανεφοδιασμό τους με καύσιμη ύλη, καθώς η βιομάζα ως πρώτη ύλη συχνά εμφανίζει υψηλά μεταφορικά κόστη, ελλείψεις και εποχικότητα, με αποτέλεσμα η βιομάζα ως καύσιμο να προτιμάται σε μονάδες μικρού έως μεσαίου μεγέθους, και σε αναλογίες έως 20% ως προς το βάρος του συνολικού καυσίμου [32].

Η ηλεκτροπαραγωγή, ωστόσο, συμφέρει περισσότερο σε μονάδες μεγάλης κλίμακας λόγω των υψηλότερων βαθμών απόδοσης που αυτές επιτυγχάνουν [33], αλλά και λόγω της μεγαλύτερης αποτελεσματικότητας των αντιρρυπαντικών συστημάτων που αυτές διαθέτουν. Γενικά ο συνδυασμός υψηλών αποδόσεων με χαμηλές εκπομπές ρύπων είναι αρκετά πιο δύσκολος στην περίπτωση της βιομάζας απ' ό, τι στα ορυκτά καύσιμα [34]. Το κόστος είναι ο κύριος περιοριστικός παράγοντας στην εγκατάσταση αντιρρυπαντικών συστημάτων, και ως εκ τούτου οι μεγάλες μονάδες προσφέρουν μεγαλύτερη ευελιξία στην εγκατάσταση δαπανηρών διατάξεων, καθώς εκμεταλλεύονται τις οικονομίες κλίμακας. Ένας τρόπος αντιμετώπισης των προβλημάτων με την καύση βιομάζας είναι η συμπύκνωση του καυσίμου με διάφορες κατεργασίες, συνήθως με πελλετοποίηση [30]. Μία πρόσφατα αναπτυχθείσα εναλλακτική για την επίλυση αυτού του προβλήματος είναι ο συνδυασμός μονάδας συμπαραγωγής βιομάζας με εγκατάσταση συμπυκνωμένης ηλιακής ενέργειας [35].

Σύμφωνα με στοιχεία του World Bioenergy Association (WBA), η χρήση βιοενέργειας ως τελική κατανάλωση ενέργειας αυξήθηκε κατά 1,23 EJ - μία καθαρή αύξηση κατά 0,05% σε σύγκριση με το 2015. Το ποσοστό βιοενέργειας επί της τελικής παγκόσμιας κατανάλωσης διαμορφώθηκε στο 13,9%. Η βιοενέργεια είναι η τρίτη σε παραγόμενη ισχύ ανανεώσιμη πηγή ηλεκτρικής ενέργειας, και η πρώτη στους τομείς της άμεσης θέρμανσης, της παραγόμενης θερμότητας και των μεταφο-

ρών. Πιο αναλυτικά το 2013 παράχθηκαν 0,9 EJ παραγόμενης θερμότητας παγκοσμίως. Το 77% της παραγωγής πραγματοποιήθηκε στην Ευρώπη. Η Σουηδία είναι η μεγαλύτερη παραγωγός χώρα παραγόμενης θερμότητας από βιομάζα [36], ενώ η Γερμανία είναι η μεγαλύτερη παραγωγός ηλεκτρισμού από βιομάζα. Το έτος 2017, η συνολική καθαρή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση ανήλθε στις 3.244 TWh, το 30% της οποίας προήλθε από ΑΠΕ, εκ του οποίου το 6% παράχθηκε από μονάδες βιομάζας (βλέπε εικ. 2.1). Οι συνολικές εκπομπές CO<sub>2</sub> του τομέα ηλεκτροπαραγωγής για το 2017 ανήλθαν στα 1019 εκατομμύρια τόνους [37]. Τέλος, εκ των 8.1 εκατομμυρίων θέσεων εργασίας που δημιουργήθηκαν στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας παγκοσμίως, τα 3,7 εκατομμύρια δημιουργήθηκαν στον τομέα της βιοενέργειας [36].



**Σχήμα 2.1:** Η ηλεκτροπαραγωγή στην ΕΕ το 2017 - η συνεισφορά των ΑΠΕ (Agora Energiewende and Sandbag, 2018)

### 2.1.1 Συμπαράγωγή και τηλεθέρμανση με καύση ξύλου

Το ξύλο είναι ίσως η πρώτη πηγή βιομάζας που αξιοποιήθηκε για την παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού σε βιομηχανικές μονάδες, και ακόμη και σήμερα τα κατάλοιπα της επεξεργασίας του καίγονται για το σκοπό αυτό (π.χ. σε βιομηχανίες πολτού και χάρτου, ξυλουργεία). Σε ολόκληρη τη Σκανδιναβία, αλλά και στον Καναδά χρησιμοποιούνται ευρέως εδώ και δεκαετίες τοις και πελλέτες ξύλου σε μονάδες τηλεθέρμανσης, αεριοποίησης και συμπαράγωγής, μάλιστα έχει εκτιμηθεί ότι η τηλεθέρμανση με βιομάζα είναι πιο φτηνή από την τηλεθέρμανση με φυσικό αέριο [38].

Σε μεγάλης κλίμακας θερμικούς σταθμούς, λόγω μεγάλων απαιτήσεων σε καύσιμο προτιμάται η καύση (ή σύγκausη) επεξεργασμένου καυσίμου, συνήθως με τη μέθοδο της φρύξης, καθώς αυτή είναι η μόνη κατεργασία που βρίσκεται σε τροχιά εισαγωγής στο διεθνές εμπόριο στερεών βιοκαυσίμων [39, 40].

### 2.1.2 Συμπαράγωγή και τηλεθέρμανση με καύση αχύρου σιτηρών

Ενώ το ξύλο χρησιμοποιείται εξίσου σε μικρές-οικιακές και μεγάλες μονάδες, η ποώδης βιομάζα αξιοποιείται αποκλειστικά σε μεγάλου μεγέθους μονάδες, αφού μόνο σε αυτές υπάρχει αποτελεσματικό σύστημα καθαρισμού καυσαερίων για τη μείωση των τοξικών ρύπων, όπως βαρέα μέταλλα και ενώσεις χλωρίου [5].

Στη Δανία βρίσκονται σε λειτουργία μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας με άχυρο σιτηρών ως καύσιμο από το 1996. Τα κόστη λειτουργίας και συντήρησης των μονάδων συμπαραγωγής με καύση άχυρου είναι υψηλά. Το άχυρο εμφανίζει μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε άζωτο, θείο, κάλιο και χλώριο από το ξύλο, εκπέμποντας μεγαλύτερες ποσότητες NO<sub>x</sub>, στάχτης και σωματιδίων, αλλά και επιταχύνοντας τους μηχανισμούς διάβρωσης και επικάλυψης σκωρίας. Για το λόγο αυτό οι μονάδες ΣΗΘ με καύση άχυρων κατασκευάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι σχετικά εύκολη η αντικατάσταση των διαβρωμένων σωλήνων στην έξοδο του λέβητα. Η αντικατάσταση αυτή είναι κοστοβόρα και απαιτεί να μείνει η μονάδα κλειστή κατά τη διάρκειά της. Οι εξελίξεις, ωστόσο, στους τομείς της τεχνολογίας των υλικών και του σχεδιασμού του λέβητα προσδίδουν μεγαλύτερη αντοχή στη διάβρωση, μεγαλύτερες θερμοκρασίες και πιέσεις και σαφώς μεγαλύτερο συντελεστή απόδοσης [41].

## 2.2 Ανάλυση Κύκλου Ζωής στον τομέα της παραγωγής ενέργειας από βιομάζα

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (AKZ, LCA) θεωρείται ως η πλέον κατάλληλη μέθοδος για την αξιολόγηση της απόδοσης των βιοκαυσίμων σε σχέση με τα ορυκτά, σύμφωνα με την ευρωπαϊκή νομοθεσία [1]. Το ισοζύγιο εκπομπών αερίων θερμοκηπίου των συστημάτων βιοενέργειας διαφέρει ανάλογα με τον τύπο της πρώτης ύλης, τις μεταβολές του αποθέματος άνθρακα λόγω αλλαγής της χρήσης γης, της μεταφοράς, της επεξεργασίας των πρώτων υλών και των τεχνολογιών μετατροπής για την παραγωγή θερμότητας ή ηλεκτρικής ενέργειας. Έως τώρα δεν έχει αναπτυχθεί ενιαία, διεθνώς αποδεκτή ακολουθούμενη μεθοδολογία AKZ για την αξιολόγηση των συστημάτων βιοενέργειας. Η διεύρυνση της κλασικής μεθοδολογίας σύμφωνα με την ευρωπαϊκή νομοθεσία [1], ώστε να συμπεριλαμβάνεται στην AKZ και το στάδιο της ενεργειακής μετατροπής των βιοκαυσίμων για την παραλαβή του τελικού προϊόντος (ηλεκτρισμός, θερμότητα ή ψύξη) θεωρείται από την ερευνητική κοινότητα ως μια κίνηση προς τη σωστή κατεύθυνση [42].

Η μεθοδολογία της AKZ έχει αξιοποιηθεί σε πολλές μελέτες για την ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων κατά την αξιοποίηση βιομάζας στην παραγωγή ενέργειας. Ενδεικτικά η μελέτη των Wahlund et al., με χώρα αναφοράς τη Σουηδία, υποστηρίζει ότι η πελλετοποίηση της ξυλώδους βιομάζας προς καύση έχει μικρότερο κόστος και αποφέρει αρκετά μεγαλύτερη μείωση εκπομπών CO<sub>2</sub> απ' ό,τι η αξιοποίησή της προς βιοκαύσιμα [43]. Αρκετές μελέτες, βεβαίως, δίνουν περισσότερη έμφαση [44] ή περιορίζονται αποκλειστικά στην αξιοποίηση βιομάζας για σύγκausη σε λιγνιτικές μονάδες αντί της διερεύνησης της αποκλειστικής καύσης βιομάζας [45].

Πρόσφατες μελέτες υποδεικνύουν ότι η ΕΕ των 27 μπορεί να επιτύχει με αυτάρκεια τους στόχους μείωσης εκπομπών που έχουν τεθεί, βασιζόμενη στο δυναμικό βιομάζας που διαθέτει, ωστόσο θα χρειαστεί να αξιοποιηθούν σε ανάλογο βαθμό όλα τα ευρισκόμενα σε αφθονία είδη, με προτεραιότητα στα γεωργικά υπολείμματα, αντί της αξιοποίησης έως σημείου εξάντλησης ενός συγκεκριμένου είδους, που μακροχρόνια θα επιφέρει το αντίθετο αποτέλεσμα [46]. Ένα ακόμα σημαντικό ζήτημα αειφορίας της παραγωγής ενέργειας από βιομάζα είναι η αποδοτική ανακύκλωση των θρεπτικών συστατικών που βρίσκονται στην τέφρα και η δέσμευση των ανθεκτικών οργανικών ενώσεων, παραγόντων οξίνισης και βαρέων μετάλλων που εκπέμπονται κατά την καύση [47].

Η εφαρμογή της AKZ στον τομέα της βιοενέργειας εμφανίζει έντονη διαφοροποίηση, όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, τόσο ως προς τις ακολουθούμενες μεθόδους, όσο και στον ορισμό των εργαλείων ανάλυσης, όπως η λειτουργική μονάδα και τα όρια του υπό μελέτη συστήματος. Η διαφοροποίηση αυτή οδηγεί σε δυσκολία, έως και αδυναμία σύγκρισης των αποτελεσμάτων των αναλύσεων, τα οποία εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από όλους τους προαναφερθέντες παράγοντες.

Από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση προέκυψαν τα εξής ευρήματα: αρχικά, ως προς την ακολουθούμενη μέθοδο ανάλυσης, οι περισσότερες μελέτες αξιοποίησαν την ανάλυση χαρακτηρισμού

(attributional modelling) [48, 49], ενώ ορισμένες ακολούθησαν την ανάλυση συνεπειών (consequential modelling) [50, 51]. Τα όρια του συστήματος διαφέρουν ανάλογα με την ακολουθούμενη μέθοδο ανάλυσης, το είδος της χρησιμοποιούμενης βιομάζας και την κατεργασία που ακολουθείται. Αρκετές μελέτες δε συμπεριλαμβάνουν τη διεργασία ανάπτυξης ή καλλιέργειας της βιομάζας εντός των ορίων του συστήματος, όταν πρόκειται για αξιοποίηση υπολειμματικής βιομάζας, ακολουθώντας την ανάλυση της αναθεωρημένης RED περί πλήρους επιμερισμού του περιβαλλοντικού αποτυπώματος στο κύριο προϊόν και μηδενικής επιβάρυνσης των υπολειμμάτων [48].

Ορισμένες μελέτες ακολουθούν διαφορετική προσέγγιση, συμπεριλαμβάνοντας την ανάπτυξη / καλλιέργεια της βιομάζας εντός των ορίων συστήματος και αποδίδοντας στο υπολειμματικό προϊόν ένα ποσοστό του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της όλης διεργασίας. Τα καύσιμα βιομάζας που προκύπτουν από ενεργειακές καλλιέργειες δε μπορούν να θεωρηθούν ως υπολείμματα, και έτσι επιβαρύνονται με αυτούσιο το ποσοστό των ρύπων που προκύπτουν από την ανάπτυξη / καλλιέργειά τους [44]. Το ποσοστό αυτό προκύπτει σε αρκετές περιπτώσεις από οικονομικό επιμερισμό του φορτίου [52, 53, 54], ενώ σε άλλες μελέτες ακολουθείται ο ενεργειακός [55], ο εξεργειακός [56] ή και ο μαζικός επιμερισμός [57]. Πιο συγκεκριμένα, ο μαζικός επιμερισμός είναι πιο συνηθισμένος σε μελέτες κύκλου ζωής γεωργικών προϊόντων [58]. Άλλες μελέτες αποφεύγουν τον επιμερισμό εφαρμόζοντας τη μέθοδο της επέκτασης του συστήματος (system expansion) [50]. Σε όσες μελέτες περιλαμβάνουν το στάδιο ανάπτυξης της βιομάζας, αυτό είναι κατά κανόνα και το πιο επιβαρυντικό, καθώς ευθύνεται για το μεγαλύτερο ποσοστό των παραγόμενων εκπομπών ρύπων, ωστόσο συνήθως το εκτιμώμενο ανθρακικό αποτύπωμα είναι πολύ μικρότερο από το αντίστοιχο της παραγωγής ενέργειας με χρήση ορυκτών καυσίμων [59].

Η RED, αλλά και τα πρότυπα ISO συνιστούν αποφυγή του επιμερισμού, ενώ στις περιπτώσεις που αυτός κρίνεται αναγκαίος προτείνουν τη χρήση επιμερισμού βασισμένου σε φυσική συσχέτιση, συνήθως του ενεργειακού [2]. Στην περίπτωση της υπολειμματικής βιομάζας, ωστόσο, συχνά προτιμάται ο οικονομικός επιμερισμός [53], καθώς καταλήγει σε πιο άμεσα ερμηνεύσιμα συμπεράσματα για τους ενδιαφερόμενους, παρόλο που αρκετοί ερευνητές απορρίπτουν τη συγκεκριμένη μέθοδο λόγω της αστάθειας στις τιμές τους στη διεθνή αγορά, που οδηγεί σε μεγάλο ποσοστό αβεβαιότητας ως προς τα τελικά αποτελέσματα [60]. Σε πρόσφατη μελέτη εφαρμόστηκε ο ενεργειακός, ο οικονομικός και ο εξεργειακός επιμερισμός στην ανάλυση κύκλου ζωής παραγωγής θερμότητας από βιομηχανική μονάδα συμπαραγωγής [61], καταλήγοντας ότι ο ενεργειακός επιμερισμός καταλογίζει περισσότερους ρύπους στην παραγόμενη θερμότητα από τις υπόλοιπες μεθόδους, ο οικονομικός επιμερισμός είναι σχετικά ουδέτερος όσον αφορά το περιβαλλοντικό κομμάτι, ενώ ο εξεργειακός επιμερισμός είναι ο πιο δίκαιος περιβαλλοντικά, ωστόσο ορισμένες φορές καταλήγει σε λανθασμένα συμπεράσματα όσον αφορά στον επιμερισμό του κόστους καυσίμου της μονάδας.

Η μελέτη των Luo, van der Voet και Huppes [62] εφήρμοσε τρία διαφορετικά σενάρια επιμερισμού στην περίπτωση της παραγωγής βιοαιθανόλης από ταγή καλαμποκιού, λαμβάνοντας διαφορετικό ποσοστό μείωσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων όταν εφαρμόζεται μαζικός και ενεργειακός επιμερισμός, ενώ στην περίπτωση του οικονομικού επιμερισμού (με τιμές αναφοράς τις τότε επικρατούσες στην αγορά) παρατηρήθηκε αύξηση του δυναμικού θέρμανσης του πλανήτη. Αυτή η αύξηση οφείλεται στην αύξηση του ποσοστού επιμερισμού των εκπομπών CO<sub>2</sub> για την ταγή, και αναιρείται στην περίπτωση απαλοιφής των εκπομπών βιογενούς CO<sub>2</sub>.

Κατά την ανάλυση κύκλου ζωής σε μονάδες συμπαραγωγής ή τηλεθέρμανσης με βιομάζα, η χρησιμοποιούμενη λειτουργική μονάδα<sup>2</sup> είναι συχνά η παραγόμενη θερμότητα (ως το κύριο προϊόν, δεδομένου ότι η πλειονότητα των υφιστάμενων μονάδων είναι μικρού έως μεσαίου μεγέθους), εκφρασμένη σε MJ ([50, 63]). Στην περίπτωση αυτή η συμπαραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (εάν αυτή υπάρχει) αντιμετωπίζεται ως αποφευχθέν προϊόν (βλ. λήμμα), αφού η ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρισμού μειώνει ή και εκμηδενίζει τη ζήτηση από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

Αρκετές μελέτες χρησιμοποιούν την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια ως λειτουργική μονάδα,

---

<sup>2</sup>Η ορολογία που χρησιμοποιείται στην ανάλυση κύκλου ζωής εξηγείται στο αντίστοιχο κεφάλαιο

εκφρασμένη σε kWh<sub>el</sub> ([64, 65, 44]), ή σε MJ ή TJ<sub>el</sub> ([49, 66, 52]), ανάλυση κατά την οποία συνηθίζεται η αντιμετώπιση της (συμ)παραγόμενης αξιοποιήσιμης θερμότητας ως αποφευχθέν προϊόν, ενώ ορισμένες μελέτες ακολουθούν τη μέθοδο ενεργειακού επιμερισμού του φορτίου των ρύπων, και ως εκ τούτου λαμβάνουν τη μονάδα καθαρής παραγόμενης ενέργειας (σε MJ) ως λειτουργική μονάδα, ανεξαρτήτως μορφής, αποφεύγοντας τη διάκριση μεταξύ παραγόμενου ηλεκτρισμού και θερμότητας ([67, 68]).

Μελέτες που στοχεύουν στη σύγκριση διαφορετικών εφοδιαστικών αλυσίδων καυσίμου για παραγωγή βιοενέργειας, ορίζουν ως λειτουργική μονάδα το 1 MJ πελλετών καυσίμου, ώστε να διευκολύνεται η σύγκριση των διάφορων σεναρίων [69, 70]. Στη μελέτη των Wang και Winans [71], όπου ερευνήθηκε ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος της καύσης βιομάζας σε μονάδα αεριοποίησης συνδυασμένου κύκλου και αξιοποίησης της προκύπτουσας τέφρας στην παραγωγή τσιμέντου, ως λειτουργική μονάδα επιλέχθηκαν τα 1000 kg τελικού προϊόντος (τσιμέντου). Παράλληλα η εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων πραγματοποιήθηκε σε επίπεδο μέσου σημείου (midpoint) αξιοποιώντας τη μέθοδο CML 2001, ενώ η ανάλυση αβεβαιότητας πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο Monte Carlo θεωρώντας κανονική κατανομή για όλες τις παραμέτρους.

Όσον αφορά την προέλευση των δεδομένων που χρησιμοποιούνται για τη συμπλήρωση του καταλόγου απογραφής στις μελέτες AKZ στον κλάδο της βιοενέργειας, αυτά είναι συνήθως εμπειρικά ή ημιεμπειρικά (από πειραματικά δεδομένα, προσομοιώσεις και ισοζύγια μάζας και ενέργειας) όσον αφορά τις κύριες διεργασίες του υπό μελέτη συστήματος. Για τις παρασκηνακές, τις ανάντη και κατάντη διεργασίες, για τις οποίες η εύρεση πλήρους καταλόγου δεδομένων κύκλου ζωής είναι αρκετά επίπονη, προτιμάται η άντλησή τους από βιβλιογραφικές πηγές και βάσεις δεδομένων. Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη βάση είναι η Ελβετική ecoinvent [50], ακολουθούμενη από τη Γερμανική Gemis [53] και την επίσης Γερμανική GaBi [72], ενώ στις Ηνωμένες Πολιτείες και στον Καναδά χρησιμοποιείται και η βάση δεδομένων US-EI [73].

Για τη διευκόλυνση του ερευνητή έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια πολυάριθμα πακέτα λογισμικού, από εταιρίες ή ερευνητικά κέντρα, εξειδικευμένα στη μοντελοποίηση διεργασιών για την εκπόνηση μελέτης AKZ, συνήθως με πρόσβαση σε μία ή περισσότερες βάσεις δεδομένων. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το πακέτο λογισμικού SimaPro v8.5, το οποίο είναι και το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο στις μέρες μας [74, 50], συνδυασμένο με τη βάση δεδομένων ecoinvent. Για την εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων αξιοποιήθηκε η μέθοδος ReCiPe 2016, καθώς είναι η πιο πλήρης και πρόσφατα αναθεωρημένη μέθοδος [74, 75] που υπάρχει ενσωματωμένη στις βιβλιοθήκες του λογισμικού SimaPro. Άλλες μέθοδοι εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων που χρησιμοποιούνται στον τομέα της βιοενέργειας είναι οι: Eco-Indicator 99, IMPACT 2002+ [74], CML 2001 [71, 45]. Άλλα πακέτα λογισμικού που χρησιμοποιούνται στον τομέα της βιοενέργειας είναι τα Umberto LCA+ [76] και CMLCA [45].

Κατά την ανάλυση κύκλου ζωής προκύπτουν ορισμένα σημεία ενδιαφέροντος (hot spots), όπου συγκεντρώνονται οι δυσμενέστερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, και συνήθως σε αυτά εντοπίζεται και το μεγαλύτερο δυναμικό βελτίωσης. Τα κύρια σημεία ενδιαφέροντος που εντοπίστηκαν κατά τις μελέτες ανάλυσης κύκλου ζωής ήταν οι εργασίες δασικής και αγροτικής διαχείρισης, καθώς και συλλογής και μεταφοράς της ακατέργαστης βιομάζας ([63]), αλλά και η μεταφορά προς την εγκατάσταση καύσης και η αποθήκευση των καυσίμων μέχρι την τελική καύση [77].

Το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ (DOE) έχει εκπονήσει ορισμένες μελέτες Ανάλυσης Κύκλου Ζωής σχετικά με τη βιοενέργεια. Μία εξ αυτών αναφέρει ότι οι εκπομπές GHG ανά παραγόμενη ηλεκτρική κιλοβατώρα είναι σημαντικά αυξημένες στην περίπτωση μονάδων βασισμένων σε ορυκτά καύσιμα, ακόμα και όταν αυτές χρησιμοποιούν τεχνολογίες δέσμευσης CO<sub>2</sub>, σε σύγκριση με μονάδες ηλεκτροπαραγωγής που χρησιμοποιούν 100% βιομάζα και χωρίς δέσμευση CO<sub>2</sub>. Αρκετές μελέτες AKZ στο χώρο της βιοενέργειας προωθούν τη σύγκαυση με άνθρακα. Η τεχνολογία για τη σύγκαυση είναι διαθέσιμη σε εμπορική κλίμακα και χρησιμοποιείται ευρέως. Μία μελέτη AKZ του DOE εκτιμά ότι μία μονάδα σύγκαυσης, με ποσοστά βιομάζας 15% και 5% αντίστοιχα και



εγκατεστημένη ισχύ 350 και 354 MW αντίστοιχα, συγκρινόμενη με ένα συμβατικό σταθμό χωρίς σύγκαιση, εμφάνισε μείωση εκπομπών GHG κατά 18% και 5% αντίστοιχα [25]. Κατά τη σύγκαιση σε υφιστάμενες ανθρακικές μονάδες, ωστόσο, εμφανίστηκαν μια σειρά από προβλήματα, με τα κυριότερα να εντοπίζονται στα συστήματα τροφοδοσίας, στο θερμοκρασιακό προφίλ του κλιβάνου, στην αύξηση ορισμένων οργανικών ρυπαντών (παρόλο που άλλες κατηγορίες ρύπων εμφανίζουν σημαντική μείωση), καθώς και στην κοινωνική αποδοχή της μεθόδου.

Η μεθοδολογία της AKZ συμπληρώνεται με την Ανάλυση Κόστους Κύκλου Ζωής (AKKZ, LCCA, Life Cycle Cost Analysis), που είναι μια οικονομική αποτίμηση του αντικτύπου μίας δραστηριότητας. Στο χώρο της βιοενέργειας υπάρχουν αρκετές μελέτες που συμπεριλαμβάνουν AKKZ, όπως αυτή των Zeymer και Meisel, όπου ο αντίκτυπος μονάδων παραγωγής θερμότητας από βιομάζα αποτιμάται οικονομικά με χρήση του κόστους απομείωσης εκπομπών (GHG mitigation cost) [78].

## 2.3 Εφοδιαστικές αλυσίδες βιομάζας

Οι εφοδιαστικές αλυσίδες καυσίμων στερεάς βιομάζας προς καύση σε σταθμούς παραγωγής ενέργειας μεγάλης κλίμακας είναι αρκετά περίπλοκες. Στην πράξη είναι συχνό φαινόμενο η αυτανάφλεξη του ανεπεξέργαστου καυσίμου κατά την αποθήκευση, αλλά και η αλλοίωση της ποιότητας του λόγω αποσύνθεσης, απορρόφησης υγρασίας ή προσβολής από μικροοργανισμούς [30].

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας εξετάζονται τρεις διαφορετικές εφοδιαστικές αλυσίδες βιομάζας, μία για τα ξυλώδη, μία για ποώδη και άχυρα δημητριακών και μία για τα λοιπά αγροτικά υπολείμματα. Η μεταφορά καυσίμων στερεάς βιομάζας σε μικρές αποστάσεις συνήθως γίνεται με φορτηγά. Άλλοι τρόποι είναι η χρήση τρένου, ποτάμιων και θαλάσσιων μεταφορών. Στην υπό μελέτη περίπτωση, ωστόσο, λόγω του συχνού ανεφοδιασμού και των μεγάλων ποσοτήτων που απαιτούνται για την τροφοδότηση μεγάλων εγκαταστάσεων, η σειρά προτίμησης διαμορφώνεται σύμφωνα με οικονομικά και περιβαλλοντικά κριτήρια ως εξής: πλοίο > τραίνο > φορτηγό.

Όσον αφορά τη μεταφορά με τρένο, οι δυνατότητες μείωσης των εκπομπών της αλυσίδας εφοδιασμού εξαρτώνται από την τοπική διαθεσιμότητα βιομάζας και την ανάπτυξη του τοπικού οδικού δικτύου γύρω από τις μονάδες. Σε γενικές γραμμές, όσο δυσμενέστερες είναι αυτές οι συνθήκες στη γύρω περιοχή των μονάδων, τόσο περισσότερο μπορούν να συνεισφέρουν οι μεταφορές με τρένο στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Καθώς η ζήτηση πρώτης ύλης αυξάνεται και οι αποστάσεις γίνονται μεγαλύτερες, η εξοικονόμηση εκπομπών από τη μεταφορά με τρένο αναμένεται να αυξηθεί ακόμη περισσότερο [77].

## 2.4 Εξεταζόμενες τεχνολογίες προκατεργασίας

Οι μέθοδοι προκατεργασίας της βιομάζας που προορίζεται για χρήση στην παραγωγή ενέργειας είναι είτε μηχανικές, είτε βιολογικές, είτε θερμοχημικές. Με τις θερμοχημικές μεθόδους παράγονται είτε απευθείας ηλεκτρική και θερμική ενέργεια (καύση), ή βιοκαύσιμα (πυρόλυση, αεριοποίηση, φρύξη κλπ.), τα οποία μπορούν στη συνέχεια να αξιοποιηθούν για παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας. Η εφαρμογή τέτοιων μεθόδων είναι δυνατόν να γίνει και στα πλαίσια συστημάτων συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας. Σε γενικές γραμμές, οι τεχνολογίες θερμικής επεξεργασίας παρουσιάζουν αξιολογικά πλεονεκτήματα ως μέρος μίας ολοκληρωμένης και προηγμένης προσέγγισης στη διαχείριση στερεών αποβλήτων. Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε μία μηχανική (πελλετοποίηση) και τρεις θερμοχημικές μεθόδους (υδροθερμική ανθρακοποίηση, φρύξη και έκρηξη ατμού).

### 2.4.1 Πελλετοποίηση

Η πελλετοποίηση είναι μία από τις ευρύτερα καθιερωμένες μεθόδους προκατεργασίας στερεών καυσίμων, καθώς επιτυγχάνει μεγάλη ενεργειακή συμπύκνωση με μικρή απώλεια μάζας, προσφέροντας αξιόλογη εξοικονόμηση στο μεταφορικό κόστος, αλλά και στο κόστος αποθήκευσης. Οι πελλέτες είναι μικρά κυλινδρικά κομμάτια συμπιεσμένης βιομάζας με τυπικές διαμέτρους 6 – 10 mm και μήκους έως 40 mm. Η χύδην πυκνότητά τους κυμαίνεται στο εύρος 600 – 700 kg/m<sup>3</sup>, περίπου 4 φορές μεγαλύτερη από αυτή της δεματοποιημένης βιομάζας, και η κατανομή μεγέθους σωματιδίων βιομάζας στη μάζα τους είναι ομογενής [30]. Η μεταφορά του ανεπεξέργαστου καυσίμου σε κοντινές αποστάσεις πραγματοποιείται κατά κανόνα με φορτηγά, θέτοντας έτσι ως ανώτατο όριο οικονομικής βιωσιμότητας για τα τσιπς ξύλου την απόσταση των 50 χλμ. όσον αφορά τη νωπή βιομάζα. Για τις πελλέτες ξύλου το ανώτατο αυτό όριο συνήθως διαμορφώνεται στα 200 χλμ. [14], και με την απαραίτητη αποθήκευση αντιπροσωπεύουν έως και το 50% του συνολικού κόστους ηλεκτροπαραγωγής [8].

Η διεργασία της πελλετοποίησης αποτελείται από τα στάδια της ξήρανσης, της άλεσης, της ομογενοποίησης με ατμό, της πελλετοποίησης και της ψύξης [30]. Η πρέσα πελλετοποίησης αποτελείται από μία μήτρα από σκληρό χάλυβα σε σχήμα τυμπάνου με διάτρητη περιφέρεια με μια πυκνή σειρά οπών διαμέτρου 0,3-1,3 cm. Η μήτρα περιστρέφεται έναντι ενός εσωτερικού κυλίνδρου πίεσης, αναγκάζοντας την κίνηση της βιομάζας προς τις οπές σε πίεση 10.000 psi καθώς οι πελλέτες εξωθούνται μέσω των οπών της μήτρας σε συγκεκριμένο μήκος (τυπικά λιγότερο από 3 cm). Υπάρχουν τρεις τύποι πελλετοποιητών: (α) τύπος δαχτυλιδιού - κοπτικού καλουπιού, (β) τύπος δίσκου - κοπτικού καλουπιού και (γ) τύπος λαβίδας [32].

Σε γενικές γραμμές το κόστος της πελλετοποίησης περιλαμβάνει γενικά έξοδα, όπως την κατασκευή της υποδομής και το κόστος προγραμματισμού, το κόστος αγοράς εξοπλισμού (ξηραντήρες, μύλοι άλεσης, πρέσες πελλετών), λειτουργικά κόστη (ηλεκτρισμός, θέρμανση, ψύξη), αλλά και το κόστος προμήθειας και αποθήκευσης της πρώτης ύλης και του τελικού προϊόντος. Το κόστος πελλετοποίησης εξαρτάται από το μέγεθος της μονάδας, το κόστος ηλεκτρισμού και παρεχόμενης θερμότητας, το κόστος εργασίας και τα χαρακτηριστικά των πρώτων υλών, όπως η περιεκτικότητα σε υγρασία, η πυκνότητα και η ευκολία κατεργασίας της πρώτης ύλης. Η αναλυθείσα βιβλιογραφία υποδεικνύει ότι το κόστος της πελλετοποίησης κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 25-40 €/τόνο [14].

### 2.4.2 Υδροθερμική ανθρακοποίηση (hydrothermal carbonization, HTC)

Η υδροθερμική ανθρακοποίηση (HTC) είναι μία θερμοχημική εξώθερμη διεργασία που μειώνει την περιεκτικότητα της πρώτης ύλης (βιομάζα σε οποιαδήποτε μορφή) σε οξυγόνο και υδρογόνο, κυρίως μέσω αφυδάτωσης και αποκαρβοξυλίωσης, αυξάνοντας την περιεκτικότητα της σε άνθρακα. Αυτό επιτυγχάνεται εφαρμόζοντας θερμοκρασίες 180-280 °C σε ένα μίγμα βιομάζας και νερού σε πίεση κορεσμού, ή ελαφρά υψηλότερη, υπό αδρανή ατμόσφαιρα και για χρονική διάρκεια από ένα λεπτό έως αρκετές ώρες, με τις κύριες αντιδράσεις να πραγματοποιούνται κατά τα πρώτα 20 λεπτά. Η τεχνική αυτή ανακαλύφθηκε από τον Bergius το 1913 [79] και εφαρμόζεται σε διάφορες επιστήμες, κυρίως για την προσομοίωση της φυσικής διεργασίας ανθρακοποίησης σε εργαστηριακή - βιομηχανική κλίμακα. Γύρω από αυτό πολλές φορές αναφέρεται και ως τεχνητή ανθρακοποίηση.

Κατά κανόνα όλα σχεδόν τα είδη βιομάζας μπορούν να ανθρακοποιηθούν υδροθερμικώς. Ορισμένα είδη στα οποία έχει εφαρμοστεί επιτυχώς υδροθερμική ανθρακοποίηση είναι η κυτταρίνη, η λιγνίνη [80], το ξύλο σε μορφή τσιπς, φυτικοί ιστοί και υπολείμματα όπως τα περιβλήματα καρπού ελαιοφόινικα [81], αλλά και αστικά [82] και γεωργικής και κτηνοτροφικής προέλευσης υγρά απόβλητα, όπως η κοπριά από κτηνοτροφικές μονάδες [83] και τα απόβλητα ελαιουργείου [84]. Η διεργασία της υδροθερμικής ανθρακοποίησης, αλλιώς ονομαζόμενη υγρή πυρόλυση, πλεονεκτεί σε σύγκριση με άλλες μεθόδους προεπεξεργασίας της βιομάζας ως πρώτης ύλης, όπως είναι η ξηρή πυρόλυση (dry pyrolysis) ή η φρύξη (torrefaction) ως προς το είδος της τροφοδοσίας που μπορεί

να χρησιμοποιηθεί. Η HTC διευρύνει τις πιθανές πρώτες ύλες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή άνθρακα, αφού δεν υπάρχει σημαντικός περιορισμός στο ποσοστό υγρασίας της βιομάζας, σε ένα εύρος μη παραδοσιακών ανανεώσιμων καταλοίπων που βρίσκονται σε αφθονία, όπως υπολείμματα γεωργικών διεργασιών ή αστικά λύματα.

Τα υγρά απόβλητα της διεργασίας μπορούν να επεξεργαστούν με αναερόβια χώνευση, παράγοντας μεθάνιο που καίγεται επιτόπου για μερική κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της μονάδας, με μελέτες να αναφέρουν εξοικονόμηση φυσικού αερίου σε μονάδες μεγάλης κλίμακας έως και 94% [79], ενώ το αέριο που προκύπτει κατά τη διεργασία της HTC αποτελείται από CO<sub>2</sub> σε ποσοστό μεγαλύτερο του 90% [85], και ως εκ τούτου δεν διαθέτει αξιόλογη θερμογόνο ικανότητα ώστε να βελτιώσει την ενεργειακή αυτάρκεια της μονάδας προκατεργασίας. Η προκατεργασία βιομάζας με HTC αυξάνει την ενεργειακή της πυκνότητα, ευνοεί τη μηχανική αφυδάτωση, η οποία απαιτεί λιγότερη ενεργειακή κατανάλωση σε σχέση με τη θερμική ξήρανση, και γενικά βελτιώνει ιδιότητες όπως η αλεσιμότητα για τη χρήση της βιομάζας ως καύσιμο στις ήδη υπάρχουσες μονάδες παραγωγής ενέργειας. Η ανθρακοποιημένη βιομάζα είναι βιοσταθεροποιημένη και υδρόφοβη και η θερμογόνο ικανότητά της βρίσκεται στο ίδιο εύρος με του λιγνίτη [79].

### 2.4.3 Φρύξη (torrefaction)

Φρύξη ονομάζεται η μερική πυρόλυση βιομάζας σε θερμοκρασίες στην περιοχή των 200-300 °C, σε ατμοσφαιρική πίεση και υπό αδρανή ατμόσφαιρα [28]. Η φρυγμένη βιομάζα παρουσιάζει βελτιωμένη αλεσιμότητα και μπορεί στη συνέχεια να πελλετοποιηθεί αυξάνοντας ακόμα περισσότερο την ενεργειακή της πυκνότητα, ενώ καθίσταται πλέον υδρόφοβη και έτσι διευκολύνεται η διαχείριση και η αποθήκευσή της [86]. Η φρύξη είναι η τεχνολογία που βρίσκεται πιο κοντά από όλες τις μελετούμενες κατεργασίες στην εμπορική καθιέρωση για την παραγωγή καυσίμων στερεάς βιομάζας.

Το φρυγμένο ξύλο προτιμάται για εφαρμογές καύσης κονιοποιημένου καυσίμου, λόγω της αυξημένης αλεσιμότητας που εμφανίζει. Για το λόγο αυτό αξιοποιείται επί του παρόντος πιλοτικά σε εφαρμογές σύγκαυσης σε μονάδες κονιοποιημένου άνθρακα, οδηγώντας σε μείωση εκπομπών CO<sub>2</sub> σε υπάρχουσες μονάδες, χωρίς υπέρογκες ανάγκες μετασκευής. Αυτή είναι η κύρια χρήση φρυγμένου καυσίμου στις μέρες μας, καθώς τα κύρια εμπόδια προς την εμπορική καθιέρωση είναι το επενδυτικό κόστος και η σχετικά μικρή θερμογόνο ικανότητα (σε σύγκριση με άλλες προκατεργασίες) του καυσίμου που προκύπτει [87].

Οι ενεργειακές απαιτήσεις της διεργασίας ικανοποιούνται συνήθως με καύση του αερίου που παράγεται κατά τη φρύξη (στο εξής *torgas*), και επικουρικά με καύση φυσικού αερίου ή, εάν ο λέβητας το επιτρέπει, μεικτή καύση ακατέργαστης βιομάζας μαζί με το *torgas*. Σε περίπτωση υψηλού ποσοστού υγρασίας στο παραγόμενο *torgas*, υπάρχει η πιθανότητα να μην επαρκεί το ενεργειακό περιεχόμενο του αερίου ώστε να επιτευχθεί (και να συντηρηθεί) η απαιτούμενη θερμοκρασία για την πλήρη καύση (τουλάχιστον 900 °C). Για το λόγο αυτό, το ποσοστό υγρασίας της εισερχόμενης στον αντιδραστήρα βιομάζας συνιστάται εν γένει να μην υπερβαίνει το 15% [29]. Ωστόσο, ανάλογα με το σχεδιασμό και το κόστος της πρώτης ύλης, μπορεί η επιλογή πρώτων υλών με αρκετά μεγαλύτερα ποσοστά υγρασίας να αποδειχθεί οικονομικά βιώσιμη. Ο καθαρός βαθμός απόδοσης ως προς τη μάζα του προϊόντος μιας βιομηχανικής μονάδας φρύξης κυμαίνεται στο εύρος 70-98%, εξαρτώμενος από τη χρησιμοποιούμενη τεχνολογία (αντιδραστήρας), το βαθμό θερμικής ολοκλήρωσης και το είδος της αξιοποιούμενης βιομάζας [88].

Η χύδην πυκνότητα των φρυγμένων πελλετών κυμαίνεται από 750 έως 850 kg/m<sup>3</sup>. Σε συνδυασμό με τη σχετικά υψηλή θερμογόνο ικανότητα (LHV) της φρυγμένης βιομάζας (συνήθως 19 έως 22 MJ/kg, ως έχει), η ενεργειακή πυκνότητα των φρυγμένων πελλετών κυμαίνεται στο εύρος από 15 έως 18,5 GJ/m<sup>3</sup>. Οι συμβατικές πελλέτες ξύλου εμφανίζουν χύδην πυκνότητα από 520 έως 640 kg/m<sup>3</sup> και θερμογόνο ικανότητα από 15 έως 17 MJ/kg. Συνεπώς η ενεργειακή τους πυκνότητα κυμαίνεται

από 8 έως 11 GJ/m<sup>3</sup>, και ως εκ τούτου οι φρυγμένες πελλέτες υπερτερούν ως προς την ενεργειακή πυκνότητα κατά 70-80% [89].

#### 2.4.4 Έκρηξη ατμού (steam explosion)

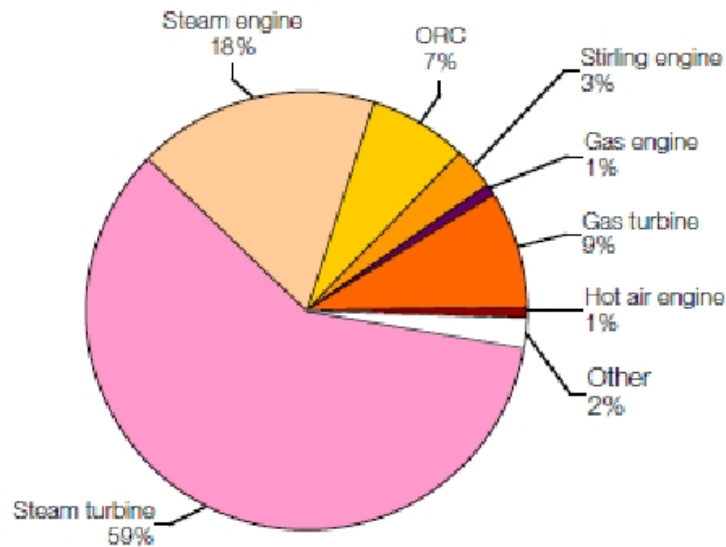
Η έκρηξη ατμού είναι μία θερμοχημική εξώθερμη κατεργασία που συνίσταται στην παραμονή σε δοχείο με θερμό υγροποιημένο ατμό υπό πίεση (συνήθως έως 3,5 MPa [90]) και σε θερμοκρασιακό εύρος από 200 έως 260 °C με χρόνο παραμονής από 1 έως 15 λεπτά, ακολουθούμενη από ταχεία αποσυμπίεση μέσω βαλβίδας εκτόνωσης. Κατά την κατεργασία αυτή παρατηρείται αύξηση του λόγου C/H του καυσίμου από 7,78% έως 8,98% [91]. Η απότομη εκτόνωση διαλύει τις δέσμες κυτταρίνης, καθιστά το υλικό εύθρυπτο και συνεισφέρει στη μείωση του μεγέθους των σωματιδίων της βιομάζας, μειώνοντας την ανάγκη για άλεση, και άρα την απαίτηση σε ιδιοκατανάλωση ηλεκτρισμού της μονάδας συμπαραγωγής [70].

Ανάλογα με το χρόνο παραμονής και τη θερμοκρασία, μπορεί να προκληθεί οτιδήποτε από μικρές ρωγμές στη δομή του ξύλου έως τη συνολική διάλυση των ινών του ξύλου. Τα κύρια πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η μη απαίτηση άλλων ουσιών πέραν του νερού, ο μειωμένος ρυθμός διάβρωσης του εξοπλισμού, αλλά και οι μειωμένες απαιτήσεις επεξεργασίας αποβλήτων λόγω του ήπιου pH της διεργασίας, αλλά και η συμβατότητα της μεθόδου με κατάντη διεργασίες βιοδιυλιστηρίου, όπως ζύμωση ή ενζυμική υδρόλυση, αλλά και ως αρχικό στάδιο της παραγωγής χαρτοπολτού, λόγω του ικανοποιητικού διαχωρισμού κυτταρίνης, λιγνίνης και ημικυτταρινών που επιτυγχάνεται [90]. Λόγω του ήπιου χαρακτήρα της, η συγκεκριμένη κατεργασία ήδη εφαρμόζεται πιλοτικά στη βιομηχανία χάρτου ως αειφόρος εναλλακτική στην περιβαλλοντικά επιβαρυντική συμβατική χημική διεργασία παραγωγής χαρτοπολτού. Λόγω του κόστους εξοπλισμού, των απαιτήσεων σε θερμότητα, αλλά και της ανάγκης επεξεργασίας του εμπλουτισμένου σε οργανικές ενώσεις συμπυκνώματος, προτιμάται η κατασκευή μονάδων έκρηξης ατμού ως μέρος ήδη υπάρχουσών μονάδων, όπως βιοδιυλιστήρια ή χαρτοβιομηχανίες. Ανάλυση ευαισθησίας έδειξε ότι το κόστος παραγωγής των κατεργασμένων με ατμό πελλετών είναι σχετικά μη ευαίσθητο στις μεταβολές κεφαλαιακού κόστους [70], καθώς ο διπλασιασμός του κόστους κεφαλαίου οδηγεί σε αύξηση του κόστους παραγωγής κατεργασμένων πελλετών μόνο κατά 7%.

## 2.5 Τεχνολογίες Καύσης

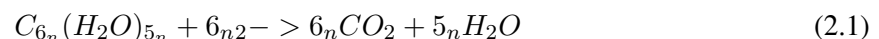
Οι κύριες υφιστάμενες τεχνολογίες για την ενεργειακή αξιοποίηση βιομάζας είναι η καύση, η αεριοποίηση και η πυρόλυση. Η άμεση καύση της βιομάζας για παραγωγή θερμότητας είναι ο παλαιότερος και απλούστερος τρόπος για την ενεργειακή αξιοποίησή της, αν και είναι επίσης και η τεχνολογία με το χαμηλότερο τυπικό βαθμό απόδοσης από τις τρεις. Η καύση είναι επί της ουσίας πλήρης οξείδωση της βιομάζας με περίσσεια αέρα για παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα και νερού. Τα καυσαέρια χρησιμοποιούνται για να μετατρέψουν νερό σε ατμό, ο οποίος οδηγείται σε ατμοστρόβιλο, συνήθως ακολουθώντας κύκλο Rankine [92].

Τα καυσαέρια, πέρα από οξείδια του άνθρακα, του αζώτου και του θείου που περιέχουν, συμπερασύρουν ιπτάμενη τέφρα, σωματίδια, άκαυστες οργανικές ενώσεις και άλλους ρύπους, και ως εκ τούτου είναι απαραίτητος ο καθαρισμός τους πριν τη διασπορά τους στην ατμόσφαιρα. Παρά τα δαπανηρά συστήματα αντιρρύπανσης που απαιτεί, η καύση, σε αντίθεση με τις άλλες δύο μεθόδους, είναι μια ώριμη και εμπορικά διαθέσιμη τεχνολογία με μικρό επενδυτικό κίνδυνο. Ανταγωνιστικά κόστη παραγωγής, ωστόσο, προκύπτουν κυρίως στην περίπτωση που αξιοποιούνται υπολειμματικά είδη βιομάζας ως καύσιμο [93]. Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται σε Ευρωπαϊκές μονάδες συμπαραγωγής με βιομάζα παρουσιάζονται στην εικόνα 2.2 [94]:

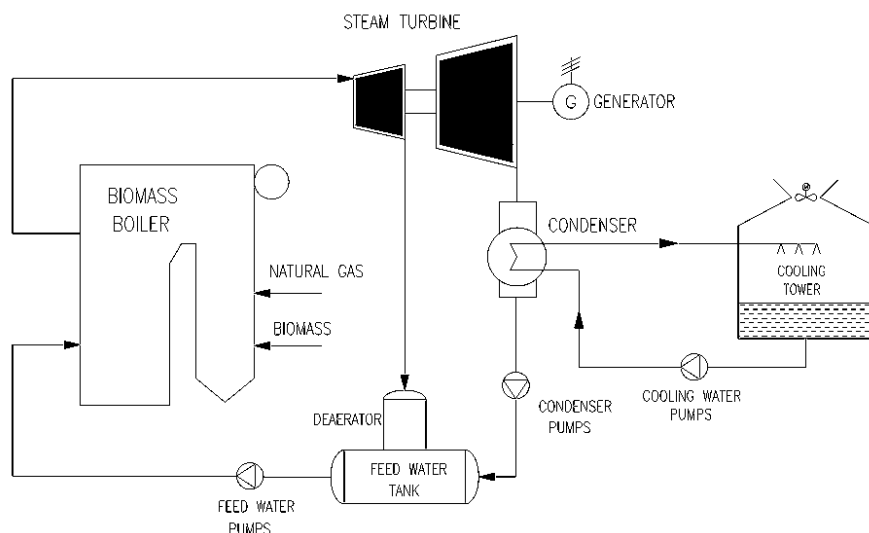


**Σχήμα 2.2:** Εφαρμοζόμενες τεχνολογίες συμπαραγωγής με βιομάζα στην Ευρώπη (Jungmeier, G. et al, 2004)

Θεωρητικά όλα τα είδη βιομάζας μπορούν να καούν, ωστόσο στην πράξη η καύση είναι δυνατή για είδη με ποσοστά υγρασίας έως 50% [31]. Για την επίτευξη καλύτερων βαθμών απόδοσης στη καύση είναι επιθυμητό η περιεκτικότητα της βιομάζας σε υγρασία να είναι όσο το δυνατόν πιο χαμηλή, συνήθως κάτω του 20%. Ανάλογα με το σχεδιασμό του χρησιμοποιούμενου λέβητα, η βιομάζα μπορεί να τροφοδοτηθεί σε αυτόν υπό μορφή πελλετών (σε λέβητες ρευστοποιημένης κλίνης), διαφορετικά απαιτείται η κονιορτοποίησή της πριν εισέλθει στο θάλαμο καύσης (σε λέβητες κονιοποιημένου καυσίμου). Η καύση βιομάζας ακολουθεί έναν πολύπλοκο μηχανισμό που συμπεριλαμβάνει μεταφορά μάζας και θερμότητας μαζί με μια σειρά χημικών αντιδράσεων, με κύρια την οξείδωση του άνθρακα σε  $CO_2$  και του υδρογόνου σε  $H_2O$ . Η τυπική χημική αντίδραση κατά τη καύση της βιομάζας είναι:



Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν διατάξεις καύσης βιομάζας κλειστού κύκλου με ατμοστρόβιλο αντίθλιψης (back-pressure turbine). Οι τεχνολογίες καύσης που χρησιμοποιούνται σε λέβητες βιομάζας είναι οι εξής: εσχάρας (στάσιμης ή κινούμενης), κονιοποιημένου καυσίμου και ρευστοποιημένης κλίνης (ανακυκλοφορίας ή αναβράζουσα). Οι λέβητες στάσιμης εσχάρας χρησιμοποιούνται μόνο σε μικρής έως μεσαίας κλίμακας εφαρμογές, καθώς σε σύγχρονες μονάδες βιομάζας μεγαλύτερης κλίμακας εμφανίζονται δυσκολίες στη μεταφορά και κατανομή του καυσίμου στην επιφάνεια της σχάρας, οπότε και δε θα μας απασχολήσουν [30]. Οι λέβητες κινούμενης εσχάρας χρησιμοποιούνται ευρέως για την καύση διαφορετικών ειδών βιομάζας, ωστόσο δεν επιτυγχάνουν αρκετά υψηλές αποδόσεις σε σύγκριση με τους λέβητες κονιοποιημένου καυσίμου και ρευστοποιημένης κλίνης. Οι τελευταίες δύο τεχνολογίες, λοιπόν, είναι αυτές που θα εξεταστούν στα πλαίσια αυτής της εργασίας. Μία τυπική διάταξη μονάδας καύσης βιομάζας φαίνεται στην εικόνα 2.3:



**Σχήμα 2.3:** Τυπική διάταξη ηλεκτροπαραγωγής από καύση βιομάζας (Sertvert, 2011)

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι οι μονάδες καύσης βιομάζας σχεδιάζονται είτε για υποκρίσιμες είτε για υπερκρίσιμες συνθήκες. Στα πλαίσια της εργασίας αυτής μελετάται η ανέγερση υπερκρίσιμων μονάδων, που λειτουργούν σε υψηλότερες θερμοκρασίες και πιέσεις και εμφανίζουν αυξημένους συντελεστές απόδοσης.

### 2.5.1 Καύση κονιοποιημένου καυσίμου (pulverized fuel combustion):

Στους λέβητες κονιοποιημένου καυσίμου το καύσιμο εισέρχεται στο θάλαμο καύσης παρασυρόμενο από ρεύμα αέρα και καίγεται υπό μορφή αιωρούμενων σωματιδίων, σε αντίθεση με τους λέβητες εσχάρας και ρευστοποιημένης κλίνης. Το μείζον πλεονέκτημά της είναι ότι επιτυγχάνει τη μεγαλύτερη απόδοση καύσης, επιτυγχάνοντας και τις υψηλότερες θερμοκρασίες καύσης, συνήθως από 1200-1300 °C. Το κύριο μειονέκτημα της τεχνολογίας αυτής είναι η πολυπλοκότητα και οι υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις του συστήματος κονιορτοποίησης. Ενδεικτικά για την κατανάλωση ενέργειας, εκτιμάται ότι για την κονιορτοποίηση σε σωματίδια μεγέθους 100 mm φρυγμένου ξύλου σε θερμοκρασία δωματίου απαιτώνται 10-20 kWe/MWth [95].

### 2.5.2 Καύση ρευστοποιημένης κλίνης (fluidized bed combustion):

Οι μονάδες καύσης ρευστοποιημένης κλίνης (fluidized bed combustion, FBC) αξιοποιούνται από το 1960 για την καύση αστικών και βιομηχανικών αποβλήτων. Περισσότερες από 300 μονάδες εμπορικού μεγέθους έχουν κατασκευαστεί παγκοσμίως έκτοτε. Λόγω υψηλού κόστους, η τεχνολογία αποκτά εμπορικό ενδιαφέρον για ονομαστική δυναμικότητα λέβητα άνω των 20MWth. Κατά την καύση σε λέβητες ρευστοποιημένης κλίνης το υλικό γόμωσης της κλίνης βρίσκεται στο κάτω μέρος του θαλάμου καύσης, που χαρακτηρίζεται από υψηλή συγκέντρωση στερεών και αποτελεί την κλίνη. Ο πρωτογενής αέρας εισέρχεται μέσω μιας κάθετης συστοιχίας φυσητήρων στο κάτω μέρος και ρευστοποιεί την κλίνη. Το υλικό γόμωσης είναι συνήθως πυριτική άμμος διαμέτρου 0.5–1 mm, ενώ η ταχύτητα ρευστοποίησης του αέρα κυμαίνεται μεταξύ 1-2 m/s (για την αναβράζουσα ρευστοποιημένη κλίνη, BFB, η ταχύτητα είναι έως και 3 φορές μεγαλύτερη [96]). Ο δευτερογενής αέρας εισέρχεται διαμέσω συστοιχιών οριζόντιων φυσητήρων (βαθμιαία προσαγωγή) σε όλο το άνω τμήμα του θαλάμου καύσης (τον ελεύθερο χώρο πάνω από την κλίνη, που αποκαλείται και “freeboard”) ώστε να περιοριστούν οι εκπομπές NO<sub>x</sub>.

Η τροφοδότηση του καυσίμου δεν γίνεται στο επάνω μέρος της κλίνης, όπως στους ανθρακικούς λέβητες BFB, αλλά στο εσωτερικό της, μέσω κεκλιμένων αγωγών από τις χοάνες καυσίμου, λόγω της αυξημένης δραστηριότητας της βιομάζας σε σύγκριση με τον άνθρακα. Το καύσιμο αποτελεί μόνο το 0.3-1% της μάζας της κλίνης [97], ενώ είναι αναγκαία η προθέρμανση της κλίνης πριν την εισαγωγή καυσίμου [30]. Η προθέρμανση γίνεται συνήθως με κατανάλωση φυσικού αερίου ή ντήζελ, έως τη θερμοκρασία των 400–500 °C, ανάλογα με το σχεδιασμό και το είδος του καυσίμου. Μετά την εισαγωγή του στερεού καυσίμου η θερμοκρασία ανεβαίνει μέχρι την τυπική θερμοκρασία λειτουργίας, συνήθως περί τους 800–900 °C [96].

### 2.5.3 Όρια και εξοικονόμηση εκπομπών

Τα θεσμοθετημένα όρια όσον αφορά τους εκπεμπόμενους ρύπους εξαρτώνται από την τεχνολογία καύσης και το είδος του καυσίμου. Για την κατασκευή νέων μονάδων τα όρια εκπομπών είναι πιο αυστηρά από αυτά των υφιστάμενων μονάδων, όπως είναι αναμενόμενο. Στην ΕΕ η περιβαλλοντική νομοθεσία καθορίζει τα όρια μέσω Ευρωπαϊκής Οδηγίας (βλ. Σχ. 2.4), τόσο σε μεγάλου όσο και σε μεσαίου μεγέθους μονάδες [98].

Δυναμικότητα (MWth)	Είδος λέβητα	mg/Nm <sup>3</sup> (@ 6% O <sub>2</sub> )							
		SO <sub>2</sub>	NOX	NH <sub>3</sub>	Dust	CO	HF	HCl	Hg
100–300	FB	<10-50	50-140	1–15	2-5	< 30–160	< 1–5	< 1–5	0.0001-0.0039
100–300	PF	2–3	120–248		3-12	12-515			

**Σχήμα 2.4:** Τα όρια εκπομπών για μεγάλου μεγέθους μονάδες βιομάζας σύμφωνα με το BAT Reference Document for Large Combustion Plants, Ευρωπαϊκή Επιτροπή 2016

Σε περίπτωση απουσίας πειραματικών μετρήσεων, ο όγκος και η σύσταση των καυσαερίων υπολογίζεται σύμφωνα με το πρότυπο EN 12952-15.

## 2.6 Ιδιότητες και αξιοποίηση της τέφρας

Η ταχεία ενσωμάτωση της καύσης βιομάζας στην παγκόσμια παραγωγή ενέργειας έφερε στο προσκήνιο το πρόβλημα των μεγάλων ποσοτήτων τέφρας που προκύπτουν από αυτήν. Σύμφωνα με στατιστικές εκτιμήσεις, η ετήσια παραγωγή τέφρας βιομάζας αγγίζει τα 476 εκατομμύρια τόνους [99]. Στην ΕΕ η παραγωγή τέφρας βιομάζας εκτιμάται περί τα 5,6 εκ. τόνους για το έτος 2005, και λαμβάνοντας υπόψη το στόχο του 20% της ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές έως το 2020, η ποσότητα αυτή θα μπορούσε να φτάσει τα 15.5 εκ. τόνους [100]. Ως εκ τούτου, κρίνεται αναγκαία μια περιβαλλοντικά και οικονομικά επωφελής μέθοδος ανακύκλωσης του συγκεκριμένου παραπροϊόντος.

Η τέφρα από τη βιομάζα περιέχει ιδιαίτερα υψηλές ποσότητες ασβεστίου, που αυξάνει την αλκαλικότητα και μπορεί να αυξήσει τη διαλυτότητα του μολύβδου, του ασβεστίου και του θειικού άλατος. Η διακύμανση στις ιδιότητες της τέφρας επηρεάζει τις επιλογές για την αξιοποίησή της. Η ποιότητα της τέφρας και η συγκέντρωση μετάλλων ποικίλλει ακόμα και στην περίπτωση τέφρας προερχόμενης από διαφορετικό τμήμα του φυτού, για παράδειγμα η συγκέντρωση μετάλλων είναι υψηλότερη στον φλοιό και τους κλάδους από ό, τι στους βλαστούς. Επιπλέον, ο τύπος του εδάφους έχει κάποια επίδραση στην ποιότητα της τέφρας. Η τέφρα από βιομάζα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αποκατάσταση περιβάλλοντος λατομείων, καθώς και να διασκορπίζεται στο δάσος προκειμένου να διατηρηθεί η ισορροπία του κύκλου θρεπτικών ουσιών.

Η τέφρα βιομάζας μπορεί επίσης να είναι κατάλληλη για χρήση ως ποζολανικό πρόσθετο στην παραγωγή τσιμεντοκονίας, μειώνοντας τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο αυτής της εξαιρετικά επιβα-

ρυντικής διεργασίας, αλλά η χρήση είναι περιορισμένη λόγω της περιεκτικότητας σε χλωρίδια και ενώσεις θείου, και επιπλέον λόγω της διακύμανσης της ποιότητας της τέφρας λόγω του γεγονότος ότι η βιομάζα είναι ένα ετερογενές καύσιμο [101]. Το πρότυπο EN 450-1 και ο οργανισμός ASTM C 618 αποκλείουν ρητά την προσθήκη ακόμα και μικρών ποσοτήτων ιπτάμενης τέφρας βιομάζας στο τοιμέντο [102], αι για το λόγο αυτό η έρευνα που διεξάγεται στον τομέα περιορίζεται κυρίως στη μελέτη ιδιοτήτων της τέφρας από σύγκausη άνθρακα και βιομάζας.

Η χημική ταξινόμηση της τέφρας περιλαμβάνει τρεις κύριες κατηγορίες:

- Τέφρες με υψηλή περιεκτικότητα σε Si, K και χαμηλή σε Ca, με χαμηλή θερμοκρασία σύντηξης (άχυρο και άλλα αγροτικά κατάλοιπα)
- Τέφρες με χαμηλή περιεκτικότητα σε Si, K και υψηλή σε Ca, με υψηλή θερμοκρασία σύντηξης (η πλειονότητα των ξυλωδών υλικών)
- Τέφρες με υψηλή περιεκτικότητα σε Ca, P, με χαμηλή θερμοκρασία σύντηξης (κοπριά, ακατέργαστα αστικά λύματα, περιττώματα πουλερικών, ζωικά κατάλοιπα)

Όσον αφορά την ιπτάμενη τέφρα, βρέθηκε πειραματικά ότι για τιμές pH κάτω από 7,5, η απελευθέρωση βαρέων μετάλλων ιδιαίτερα βλαβερών για το περιβάλλον υπερβαίνει τα όρια για διάθεση της τέφρας σε χώρους υγειονομικής ταφής μη επικίνδυνων αποβλήτων [102]. Η ιπτάμενη τέφρα από την καύση άχυρων δε χρησιμοποιείται απευθείας ως εδαφοβελτιωτικό λόγω της ακόμα υψηλότερης περιεκτικότητας σε βαρέα μέταλλα. Για το λόγο αυτό συνήθως απορρίπτεται σε χώρους υγειονομικής ταφής. Ωστόσο ορισμένες μελέτες κατέδειξαν ότι μέταλλα όπως το κάδμιο μπορούν να απομακρυνθούν από την τέφρα σε μεγάλο ποσοστό [41]. Μερικά σημεία ενδιαφέροντος όσον αφορά τη διάθεση τέφρας στο περιβάλλον είναι τα εξής:

- Η νομοθεσία της ΕΕ για τη διαχείριση αποβλήτων για την προστασία του ανθρώπου και του περιβάλλοντος, με άξονες την πρόληψη, την επαναχρησιμοποίηση, την ανακύκλωση και την ανάκτηση, αποτρέπει την απλή διάθεση όπως γινόταν στο παρελθόν
- Η αποφυγή της απόθεσης τέφρας από την καύση άνθρακα είναι μία πρακτική που βρίσκει ευρεία αποδοχή στα περισσότερα κράτη μέλη της ΕΕ. Για το 2008 μόνο το 7 % των υπολειμμάτων αποτέθηκε σε χωματερή εντός της ΕΕ των 15.
- Στην περίπτωση της τέφρας από καύση βιομάζας, η αξιοποίηση δεν έχει ακόμα καθιερωθεί. Το μεγαλύτερο ποσοστό εξακολουθεί να διατίθεται σε χωματερές.

Λόγω της τοξικότητας συστατικών της τέφρας βιομάζας, όπως ενώσεις αζώτου, θείου, βαρέα μέταλλα και τοξικές οργανικές ενώσεις (ΡΑΗ, διοξίνες, βενζοφουράνια) ο περιορισμός της διαρροής αυτών των ουσιών στο περιβάλλον είναι απαραίτητος για την αειφορία των κοινωνιών που υιοθετούν την καύση βιομάζας μεγάλης κλίμακας. Ωστόσο η τέφρα βιομάζας περιέχει και απαραίτητα θρεπτικά συστατικά, τα οποία οφείλουν να ανακυκλωθούν πίσω στις περιοχές καλλιέργειας του καυσίμου για να διατηρηθεί η απόδοση των καλλιεργειών. Η ικανοποίηση και των δύο αυτών συνθηκών απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή [47]. Η επεξεργασία της τέφρας πυθμένα πριν το στάδιο της αξιοποίησης περιλαμβάνει συνήθως τα εξής στάδια: κοσκίνισμα (κατανάλωση ενέργειας: 40 MJ/τόνο [103]), μαγνητικός και βαρυτικός διαχωρισμός (eddy separators), απόπλυση με ή χωρίς προσθήκη οξέος (για τη λεπτόκοκκη τέφρα), άλεση (προαιρετικά για την αδρόκοκκη τέφρα). [104]

### 2.6.1 Αξιοποίηση της τέφρας

Σύμφωνα με τη νομοθεσία της ΕΕ για τη διαχείριση αποβλήτων [105], η τέφρα βιομάζας πρέπει να επαναχρησιμοποιείται ή να ανακυκλώνεται, και σε καμία περίπτωση να μην αποτίθεται σε χωματερή. Αυτό ισχύει και για τέφρες που περιέχουν υπολείμματα από πρόσθετα κατά το στάδιο της



καύσης ή της αντιρρύπανσης, ενώ οι τέφρες με περιεκτικότητα σε άκαυστα άνω του 30w% κατά βάρος πρέπει να επαναχρησιμοποιούνται ως καύσιμο. Κατόπιν τουλάχιστον ο φώσφορος πρέπει να ανακτηθεί, διαφορετικά η τέφρα με υψηλή περιεκτικότητα σε φώσφορο μπορεί να εφαρμοστεί ως λίπασμα, εφόσον πληροί τις προδιαγραφές και εφόσον ο φώσφορος είναι σε βιοαπορροφήσιμη μορφή. Διαφορετικά η τέφρα προστίθεται σε προϊόντα όπου απαιτείται η προσθήκη αυτού του είδους τέφρας, όπως η πορσελάνη. Επιτρέπεται επίσης η ανάμιξη διαφορετικών ειδών τέφρας από την ίδια μοναδα, όπως η τέφρα πυθμένα και η ιπτάμενη [104]. Ενδιαφέρον παρουσιάζει τέλος η αξιοποίηση τέφρας στην παραγωγή γεωπολυμερών [106].

#### **Αγροκαλλιέργεια (landfarming)**

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η διάθεση τέφρας με τη μέθοδο της αγροκαλλιέργειας, δηλαδή η ανακύκλωση μέσω ενσωμάτωσης σε υποβαθμισμένη ή ρυπασμένη καλλιεργήσιμη γη. Με τον τρόπο αυτό περιορίζεται η εξάντληση των θρεπτικών στοιχείων του εδάφους. Σε αυτό το είδος επεξεργασίας η τέφρα διασπείρεται σε μεγάλη έκταση. Σε τακτά χρονικά διαστήματα το έδαφος οργώνεται με κλασικά αγροτικά μηχανήματα, ώστε να εμπλουτίζεται με οξυγόνο, που είναι απαραίτητο για τη βιοαποικοδόμηση τυχόν οργανικών ρυπαντών, ενώ συχνά γίνεται συστηματική προσθήκη υγρασίας, και εάν κριθεί απαραίτητο και θρεπτικών.

Η μέθοδος αυτή είναι απλή στην εφαρμογή και δεν παρουσιάζει τεχνικές δυσκολίες, προϋποθέτει όμως τη διαθεσιμότητα μεγάλης έκτασης, καθώς το πάχος του υπό επεξεργασία εδαφικού στρώματος δε μπορεί να ξεπεράσει τα 60cm (όριο που αντιστοιχεί στο μέγιστο βάθος οργώματος των διαθέσιμων αγροτικών μηχανημάτων) [107]. Ο χρόνος παραμονής μέχρι την αξιοποίηση του βιοσταθεροποιημένου εδάφους ποικίλλει ανάλογα με την έκταση της ζημιάς και κυμαίνεται από 3-24 μήνες [108].



### 3.1 Γενικά περί της ακολουθούμενης μεθόδου

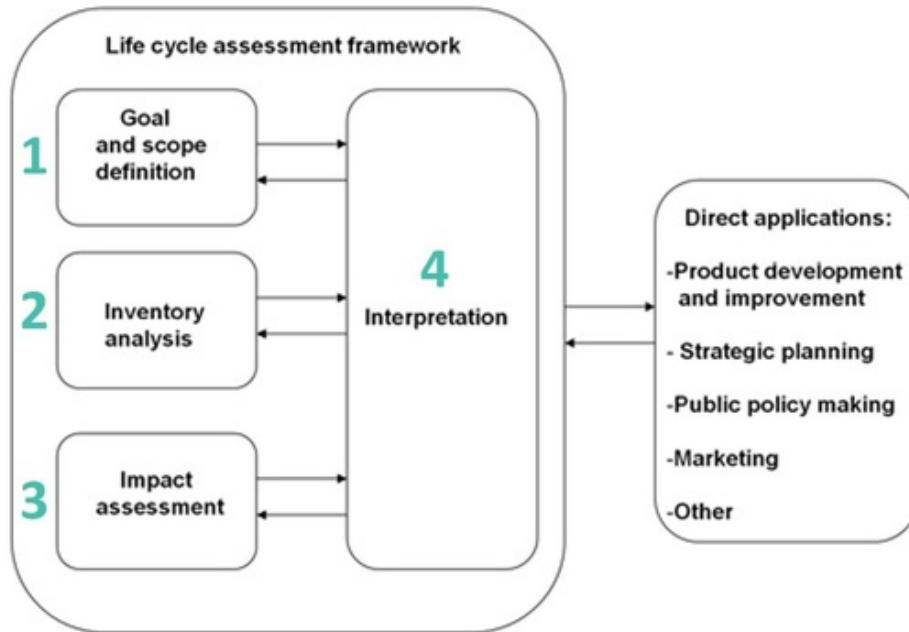
Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (στο εξής LCA) είναι ένα εργαλείο λήψης αποφάσεων για περιβαλλοντικά ζητήματα, το οποίο επιτρέπει την ποιοτική μελέτη, αλλά και την ποσοτικοποίηση του περιβαλλοντικού αντικτύπου τόσο υπαρχόντων όσο και μελλοντικών δραστηριοτήτων. Με τη μέθοδο αυτή αρχικά καταστρώνεται ένας κατάλογος δεδομένων για την περιβαλλοντική επιβάρυνση που οφείλεται στο υπό μελέτη σύστημα (ο αποκαλούμενος κατάλογος κύκλου ζωής, life cycle inventory, LCI) και κατόπιν αυτά εκφράζονται με αναλυτικές σχέσεις ως μερίδια συνεισφοράς σε γνωστές κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων, διεργασία που αποκαλείται εκτίμηση αντικτύπου του κύκλου ζωής (life cycle impact assessment - LCIA). Με το συνδυασμό των δύο αυτών διαδικασιών προσδιορίζονται και ιεραρχούνται τα σημεία της υπό μελέτη δραστηριότητας που μπορούν να τροποποιηθούν με στόχο τη βελτιστοποίηση του συνολικού περιβαλλοντικού αντικτύπου της και εκτιμάται το συνολικό δυναμικό περιβαλλοντικής βελτίωσης.

Τα πρότυπα του οργανισμού ISO (International Standards Organisation), και συγκεκριμένα τα ISO 14040:2006 και ISO 14044:2006 αναφέρουν ότι μία μελέτη ΑΚΖ οφείλει να εμπεριέχει τα ακόλουθα τέσσερα στάδια [67]:

- 1 Τον ορισμό του στόχου (goal) και του εύρους (scope) της μελέτης: εδώ ορίζονται τα όρια του υπό μελέτη συστήματος (χρονικά, γεωγραφικά, καθώς και όσον αφορά τις διεργασίες που λαμβάνονται υπόψη στη θεώρηση του κύκλου ζωής του συστήματος), το επιθυμητό επίπεδο λεπτομέρειας και ο σκοπός της μελέτης.
- 2 Την ανάλυση του καταλόγου απογραφής του κύκλου ζωής: σε αυτή τη φάση συλλέγονται τα απαραίτητα δεδομένα για την επίτευξη των στόχων της μελέτης, απαρτίζοντας τον κατάλογο απογραφής της μελέτης (life cycle inventory, LCI).
- 3 Την ανάλυση επιπτώσεων του κύκλου ζωής: στο στάδιο της ανάλυσης επιπτώσεων (life cycle impact assessment, LCIA), εξάγονται πληροφορίες χρήσιμες για την αποτίμηση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης του καταλόγου απογραφής, ώστε να αξιολογηθεί ο περιβαλλοντικός τους αντίκτυπος. Το στάδιο αυτό περιλαμβάνει κατ' ελάχιστον την ταξινόμηση σύμφωνα με καθιερωμένες κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων, καθώς και το χαρακτηρισμό, δηλαδή τη συσχέτιση κάθε κατηγορίας επιπτώσεων με ορισμένη είσοδο ή έξοδο του συστήματος.

4 Την ερμηνεία των αποτελεσμάτων: στο στάδιο αυτό, τα αποτελέσματα των προηγούμενων σταδίων συνοψίζονται και αναλύονται ως βάση για την εξαγωγή συμπερασμάτων, συστάσεων και λήψης αποφάσεων, σύμφωνα πάντα με το σκοπό και το πλαίσιο της μελέτης.

Τα τέσσερα στάδια μίας μελέτης AKZ φαίνονται σχηματικά στην εικόνα 3.1:



**Σχήμα 3.1:** Τα τέσσερα στάδια μίας μελέτης AKZ σύμφωνα με τα πρότυπα ISO 14040:2006 και ISO 14044:2006

Εφόσον από την υπό μελέτη μονάδα παράγονται ταυτόχρονα δύο διαφορετικά προϊόντα (ηλεκτρισμός και θερμότητα), και εφόσον δεν είναι εφικτός ο διαχωρισμός σε επιμέρους διεργασίες ή η διεύρυνση των ορίων του συστήματος ώστε να αποφευχθεί ο επιμερισμός του περιβαλλοντικού φορτίου, χρειάζεται να εφαρμοστεί κάποια μέθοδος επιμερισμού του περιβαλλοντικού φορτίου. Η χρησιμοποιούμενη κατά την Ευρωπαϊκή νομοθεσία μέθοδος [1] είναι η εξεργειακή κατανομή του φορτίου.

Σύμφωνα με την τροποποιημένη Οδηγία RED, Άρθρο 28, ο αντίκτυπος από την καύση βιοκαυσίμων υπολογίζεται [1] ως εξής:

$$E = e_{ec} + e_l + e_p + e_{td} + e_u - e_{sca} - e_{ccs} - e_{ccr} \quad (3.1)$$

Ενώ οι αντίστοιχοι συντελεστές της εξίσωσης επεξηγούνται στον Πίν. 3.1  
Η εξοικονόμηση εκπομπών δίνεται από τον τύπο [1]:

$$SAVING = (E_F(t) - E_B(t)) / E_F(t) \quad (3.2)$$

Όπου  $E_F$  είναι οι εκπομπές με καύση ορυκτών καυσίμων και  $E_B$  οι εκπομπές με καύση καυσίμων βιομάζας.

**Πίνακας 3.1:** Υπολογισμός εκπομπών καυσίμου σύμφωνα με την RED

$E$	= ολικές εκπομπές από την παραγωγή του καυσίμου πριν την ενεργειακή μετατροπή, g CO <sub>2</sub> eq/MJ
$e_{ec}$	= εκπομπές από την εξόρυξη ή καλλιέργεια πρώτων υλών, g CO <sub>2</sub> eq/MJ
$e_l$	= ετήσιες εκπομπές από αλλαγές στα αποθέματα άνθρακα λόγω αλλαγής χρήσης γης, g CO <sub>2</sub> eq/MJ
$e_p$	= εκπομπές από την κατεργασία, g CO <sub>2</sub> eq/MJ
$e_{td}$	= εκπομπές λόγω μεταφοράς και διανομής, g CO <sub>2</sub> eq/MJ
$e_u$	= εκπομπές από τη φάση χρήσης του καυσίμου (καύση), g CO <sub>2</sub> eq/MJ
$e_{sca}$	= εξοικονόμηση εκπομπών από συσσώρευση άνθρακα στο έδαφος μέσω βελτιωμένης αγροτικής διαχείρισης, g CO <sub>2</sub> eq/MJ
$e_{ccs}$	= emission savings from carbon capture and storage, g CO <sub>2</sub> eq/MJ
$e_{ccr}$	= εξοικονόμηση εκπομπών από δέσμευση και αντικατάσταση άνθρακα, g CO <sub>2</sub> eq/MJ

## 3.2 Τεκμηρίωση ακολουθούμενης μεθοδολογίας

Οι υποθέσεις εργασίας που θεωρήθηκαν κατά την εκπόνηση της μελέτης αυτής λήφθηκαν με βάση σχετική βιβλιογραφία [29, 45, 39]. Κατά σύμβαση οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου λόγω μεταβολών στις αποθήκες άνθρακα εξαιτίας χρήσης γης δε λαμβάνονται υπόψη στις αναλύσεις κύκλου ζωής που αφορούν την Ευρώπη και τη Βόρεια Αμερική, καθώς θεωρείται ότι ο εκπεμπόμενος βιογενής άνθρακας απορροφάται σχεδόν στιγμιαία μέσω της ανάπτυξης των φυτών [17]. Η παραδοχή αυτή δεν ισχύει σε πλανητικό επίπεδο, όπως είναι φυσικό, αφού εμφανίζεται μείωση των αποθηκών άνθρακα λόγω της αποψίλωσης των δασών.

Όσοσο στις περιοχές της Ευρώπης και της Βόρειας Αμερικής οι μελέτες καταγράφουν ανάπτυξη των δασών (για την Ευρώπη αυτό ισχύει για την τελευταία 60ετία). Η εξελισσόμενη αποψίλωση, κυρίως σε αναπτυσσόμενες χώρες, και άλλες συσχετιζόμενες αλλαγές χρήσης γης είναι υπεύθυνες και στις μέρες μας για ένα ποσοστό της τάξης του 12-15% των παγκόσμιων εκπομπών CO<sub>2</sub>. Τα ευρωπαϊκά δάση αποθηκεύουν άνθρακα, και ως εκ τούτου η ευρωπαϊκή δασική έκταση λειτουργεί σαν καταβόθρα άνθρακα. Έχει μάλιστα βρεθεί ότι απομακρύνει περίπου 0.5 Gt CO<sub>2</sub>/έτος [109].

## 3.3 Ορισμοί: στόχος και εύρος μελέτης

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι ο προσδιορισμός του περιβαλλοντικού αντικτύπου των σταθμών συμπαραγωγής βιομάζας νέας τεχνολογίας και η σύγκριση με υπάρχουσες ανθρακικές μονάδες. Διερευνάται επίσης η δυνατότητα περαιτέρω μείωσης του ανθρακικού αποτυπώματος των μονάδων μέσω της καύσης διαφορετικών ειδών καυσίμου και διαφορετικής προκατεργασίας. Δεδομένου ότι μελετάται ο πλήρης κύκλος ζωής, από την ανάπτυξη της βιομάζας που θα αξιοποιηθεί ως καύσιμο έως τη διαχείριση της τέφρας που θα προκύψει από την καύση, η παρούσα μελέτη ανήκει στην κατηγορία των “cradle-to-grave” αναλύσεων.

### Λειτουργική μονάδα, functional unit

Ο καθορισμός της λειτουργικής μονάδας του συστήματος είναι μείζονος σημασίας για τη διεξαγωγή και κατανόηση μίας μελέτης ανάλυσης κύκλου ζωής, ούτως ώστε τα αποτελέσματα που θα προκύψουν να είναι εκφρασμένα σε κοινή βάση για την απρόσκοπτη σύγκριση των διαφόρων σεναρίων. Είναι, με άλλα λόγια, η βάση για την ποσοτικοποίηση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης. Η συνήθης πρακτική που εφαρμόζεται στις περισσότερες περιπτώσεις, υποδεικνύει ότι η λειτουργική μονάδα θα πρέπει να επιλέγεται με τρόπο που να αντιστοιχεί στο σκοπό της ανάλυσης του κύκλου ζωής, όπως αυτός έχει καθοριστεί στο πρώτο βήμα εφαρμογής της μεθόδου. Για παράδειγμα, όταν

εφαρμόζεται η μέθοδος ανάλυσης κύκλου ζωής στον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όπως στη παρούσα εργασία, η επιλογή του ενός παραγόμενου MJ ηλεκτρισμού ( $1 \text{ MJ}_{el}$ ) από το μελετούμενο σύστημα ως λειτουργικής μονάδας του συστήματος χαρακτηρίζεται ιδανική, καθώς επιτρέπει την άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων διαφόρων συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η συγκεκριμένη επιλογή είναι και σύμφωνη με τη μέθοδο που προτείνεται από την Ευρωπαϊκή νομοθεσία [1].

#### **Όρια συστήματος**

Όπως και στην περίπτωση επιλογής της λειτουργικής μονάδας, όμοια και ο καθορισμός των ορίων του συστήματος αποτελεί πολύ σημαντικό μέρος μίας μελέτης ανάλυσης κύκλου ζωής. Η σπουδαιότητα αυτή γίνεται κατανοητή αν ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι με διαφορετικά όρια συστήματος μεταβάλλεται η συνολική επίδρασή του κύκλου ζωής της διεργασίας στο περιβάλλον, και κατά συνέπεια η ποιότητα των αποτελεσμάτων, ενώ καθίσταται πλέον αδύνατη η σύγκριση με παρόμοιες διεργασίες.

Η παρούσα μελέτη που αφορά ανάλυση κύκλου ζωής στον τομέα της συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας από βιομάζα, τα όρια του συστήματος περιλαμβάνουν την καλλιέργεια, συλλογή και μεταφορά της βιομάζας προς τη μονάδα προκατεργασίας, την ίδια την προκατεργασία, τη μεταφορά προς τη μονάδα συμπαραγωγής, τη μεταφορά, επεξεργασία και τελική διάθεση των αποβλήτων της προκατεργασίας (ανάντη διαδικασίες από την καύση - upstream processes), την ενεργειακή αξιοποίηση του καυσίμου στο σταθμό συμπαραγωγής (καύση - direct processes) και τη μεταφορά από το εργοστάσιο και επεξεργασία και τελική αξιοποίηση ή απόθεση των υπολειμμάτων της καύσης (κατάντη διαδικασίες από την καύση - downstream processes). Η ανέγερση και η κατεδάφιση της κτηριακής υποδομής για τις μονάδες προκατεργασίας και καύσης συμπεριλαμβάνεται στα όρια του συστήματος για όλα τα μελετούμενα σενάρια. Η μεταφορά της ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας προς τους τελικούς χρήστες δεν κρίνεται σκόπιμο να συμπεριληφθεί εντός των ορίων του μελετούμενου συστήματος. Η κατασκευή εξοπλισμού και εργαλείων δε συμπεριλαμβάνεται στα όρια του μελετούμενου συστήματος, σύμφωνα με τη μέθοδο που προτείνεται από την Ευρωπαϊκή νομοθεσία [1].

### **3.4 Κατάλογος απογραφής κύκλου ζωής, Life Cycle Inventory, LCI**

Η συλλογή των δεδομένων που απαρτίζουν τον κατάλογο απογραφής του κύκλου ζωής μίας διεργασίας είναι το πιο κρίσιμο κομμάτι της μελέτης, καθώς η ακρίβεια και η αντιπροσωπευτικότητα των δεδομένων καθορίζει την ποιότητα ολόκληρης της ανάλυσης [42]. Στην παρούσα εργασία, όλες οι παρασκηνακές / δευτερεύουσες διεργασίες μοντελοποιήθηκαν με βάση τα υπάρχοντα σετ δεδομένων της ecoinvent, ενώ οι διεργασίες καλλιέργειας, προκατεργασίας και καύσης της βιομάζας βασίστηκαν σε δημοσιευμένα δεδομένα από σχετική βιβλιογραφία.

Η προσέγγιση **μοντελοποίησης χαρακτηρισμού (attributitional modelling)** χρησιμοποιείται για τη σύνταξη του καταλόγου απογραφής LCI του συστήματος. Η μεθοδολογία μοντελοποίησης που ακολουθήθηκε είναι αυτή της Cut – Off Unit process system model από τις επιλογές της ecoinvent [110]. Σε ορισμένες διεργασίες εντός του συστήματος ανακύπτουν ζητήματα πολυλειτουργικότητας (multifunctionality). Αυτές είναι η παραλαβή του φλοιού δέντρου και η παραλαβή του περιβλήματος καρπών ελαιοφοίνικα. Για την αντιμετώπιση του ζητήματος αυτού ακολουθείται ο οικονομικός επιμερισμός περιβαλλοντικού φορτίου (economic allocation).

### **3.5 Ανάλυση περιβαλλοντικού αντικτύπου**

Για το στάδιο αυτό επιλέχθηκε η μέθοδος ανάλυσης επιπτώσεων ReCiPe 2016. Όσον αφορά το δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη, οι συντελεστές ισοδυναμίας που χρησιμοποιεί η μέθοδος αντλού-

νται από τη μεθοδολογία της IPCC [8], και παρουσιάζονται στον Πίν. 3.2:

**Πίνακας 3.2:** Δυναμικά θέρμανσης του πλανήτη αερίων θερμοκηπίου σύμφωνα με τη μέθοδο ReCiPe 2016

Δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη (GWP, kg CO <sub>2</sub> -eq/kg εκπομπής)	
CO <sub>2</sub>	1
CH <sub>4</sub>	34
CH <sub>4</sub> (fossil)	36
N <sub>2</sub> O	298

Η έκδοση της ReCiPe 2016 που χρησιμοποιείται είναι η midpoint, ακολουθώντας την ιεραρχική προοπτική (Hierarchist), που θεωρεί χρονικό ορίζοντα 100 χρόνων ώστε να προσφέρει μια μετριοπαθή εκτίμηση σε σχέση με τις άλλες δύο προοπτικές, που θέτουν χρονικό ορίζοντα τα 20 (ατομικιστική προοπτική) και τα 1000 χρόνια (εξισωτική προοπτική) αντίστοιχα. Οι μελετούμενες κατηγορίες επιπτώσεων (επίπεδο ανάλυσης "midpoint") σύμφωνα με την επιλεγμένη μέθοδο ανάλυσης ReCiPe 2016 [111] είναι:

- Εξάντληση πόρων (Mineral resource scarcity)
- Εξάντληση ορυκτών πόρων (Fossil resource scarcity)
- Υπερθέρμανση του πλανήτη (Global warming)
- Ευτροφισμός θαλάσσιων οικοσυστημάτων (Marine eutrophication)
- Ευτροφισμός οικοσυστημάτων γλυκού νερού (Freshwater eutrophication)
- Οξίνιση χερσαίων οικοσυστημάτων (Terrestrial acidification)
- Αλλαγή χρήσεων γης (Land use)
- Φωτοχημικός σχηματισμός όζοντος, αντίκτυπος στα χερσαία οικοσυστήματα (Ozone formation, Terrestrial ecosystems)
- Οικοτοξικότητα χερσαίων οικοσυστημάτων (Terrestrial ecotoxicity)
- Οικοτοξικότητα θαλάσσιων οικοσυστημάτων (Marine ecotoxicity)
- Οικοτοξικότητα οικοσυστημάτων γλυκού νερού (Freshwater ecotoxicity)
- Φωτοχημικός σχηματισμός όζοντος, αντίκτυπος στην ανθρώπινη υγεία (Ozone formation, Human health)
- Εξάντληση στρωβάδας του όζοντος (Stratospheric ozone depletion)
- Ιονίζουσα ακτινοβολία (Ionizing radiation)
- Σχηματισμός σωματιδίων (Fine particulate matter formation)
- Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογόνα (Human non-carcinogenic toxicity)
- Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογόνα (Human carcinogenic toxicity)

- Χρήση νερού (water consumption)

Οι βασικές κατηγορίες βλαβών (επίπεδο ανάλυσης "endpoint") σύμφωνα με την επιλεγμένη μέθοδο ανάλυσης ReCiPe 2016 είναι:

- Ανθρώπινη υγεία (Human Health)
- Οικοσυστήματα (Ecosystems)
- Πόροι (Resources)

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων, καθώς και η ερμηνεία τους παρουσιάζονται στα αντίστοιχα κεφάλαια.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

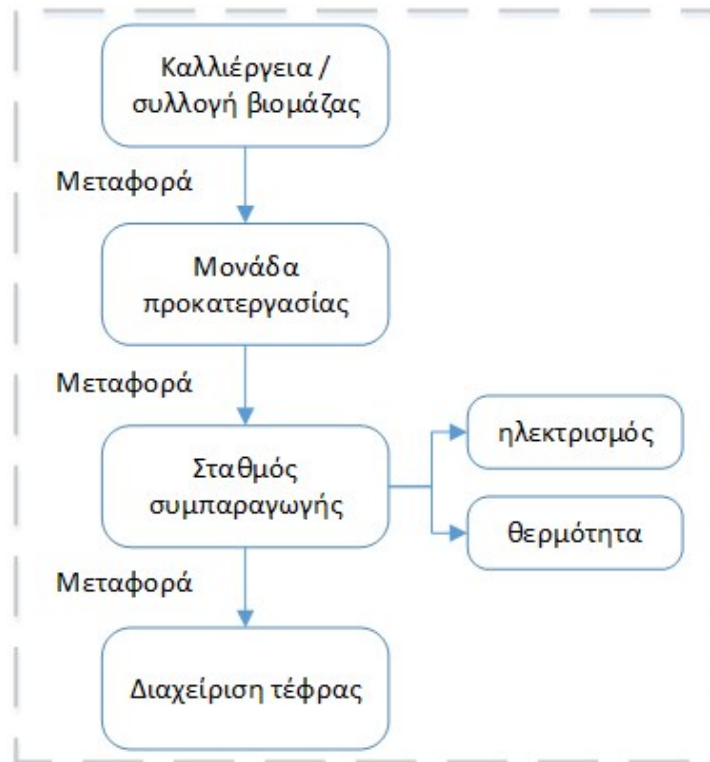
### ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΑ

Η πληρότητα των χρησιμοποιούμενων δεδομένων διαφέρει ανάλογα με την προέλευσή τους. Η βάση δεδομένων ecoinvent προτιμήθηκε όπου ήταν δυνατόν για τη συλλογή δεδομένων σχετικά με τις παρασκηνιακές διεργασίες, για λόγους πληρότητας και αξιοπιστίας, καθώς η συγκεκριμένη βάση δεδομένων διαθέτει μεγάλο εύρος κάλυψης σε πολλούς παραγωγικούς τομείς, αλλά και μακρόχρονη εμπειρία.

#### 4.1 Γενική περιγραφή των διαδικασιών προσομοίωσης

Η ανάλυση κύκλου ζωής που διεξάχθηκε περιλαμβάνει τα στάδια του εφοδιασμού καυσίμων, της συλλογής, μεταφοράς και προκατεργασίας τους (συμπεριλαμβανόμενης της ανέγερσης της μονάδας πελλετοποίησης - προκατεργασίας), καθώς και της μεταφοράς προς το σταθμό συμπαραγωγής και της ανέγερσης, της λειτουργίας και της αποσυναρμολόγησης της μονάδας συμπαραγωγής, για την αξιολόγηση και τη σύγκριση του ισοδύναμου αποτυπώματος άνθρακα μεταξύ διαφορετικών περιπτώσεων. Η διαχείριση των αποβλήτων που προκύπτουν συμπεριλαμβάνεται σε κάθε στάδιο Η Κεντρική Ευρώπη (περιοχή του Αμβούργου, Γερμανία) επελέγη ως τόπος εγκατάστασης της μονάδας ΣΗΘ για όλα τα σενάρια τροφοδοσίας, ενώ σαν σενάριο αναφοράς θεωρήθηκε η ανέγερση μίας εγκατάστασης μεγάλης κλίμακας (θερμικής ισχύος καυσίμου  $200 \text{ MW}_{th}$  στην είσοδο του σταθμού).

Τα όρια του συστήματος παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.1:



**Σχήμα 4.1:** Όρια του υπό μελέτη συστήματος

Οι εκπομπές για κάθε καύσιμο υπολογίστηκαν σύμφωνα με τη μεθοδολογία που προτείνεται από την αναθεωρημένη RED [1].

## 4.2 Εξεταζόμενα σενάρια και μοντελοποίηση

### 4.2.1 Γενικές παραδοχές

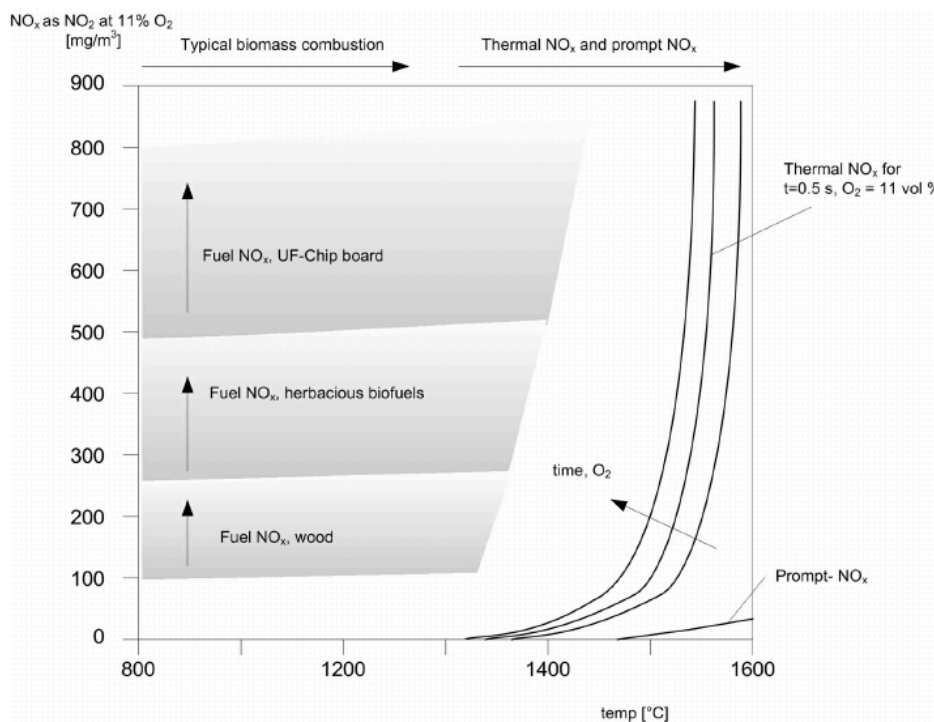
Μελετήθηκαν τρεις διαφορετικές εφοδιαστικές αλυσίδες καυσίμου, μία για τα ξυλώδη είδη (πελλέτες ξύλου και φλοιού), μία για τα άχυρα και πούδη (άχυρο σίτου και μίσχανθος) και μία για τα λοιπά γεωργικά υπολείμματα (περίβλημα καρπών ελαιοφώινικα). Σε όλες τις περιπτώσεις οι απώλειες κατά τη μεταφορά και αποθήκευση του καυσίμου θεωρήθηκαν ως 3% επί του ξηρού βάρους [112], ενώ τα φορτηγά (όπου αυτά χρησιμοποιήθηκαν) θεωρήθηκαν κλάσης EURO 4.

Για τη διεργασία της πελλετοποίησης χρησιμοποιήθηκε, λόγω έλλειψης πιο συγκεκριμένων δεδομένων, για όλα τα είδη βιομάζας το αντίστοιχο σετ δεδομένων για πελλέτες ξύλου της ecoinvent (Wood pellet production), τροποποιημένο ώστε να αντιπροσωπεύει τη λειτουργία μονάδας κατασκευής βιομηχανικών πελλετών χωρίς πρόσθετα (το αρχικό σετ περιείχε την προσθήκη αμύλου ως συγκολλητικού παράγοντα) και χωρίς το στάδιο της συσκευασίας των πελλετών σε σακούλες. Η κατανάλωση ηλεκτρισμού κατά την ξήρανση των πελλετών λαμβάνεται ως 0.31 kWh/kg H<sub>2</sub>O [113]. Για τις πελλέτες περιβλήματος καρπού ελαιοφώινικα προηγείται μηχανική αφυδάτωση, και κατόπιν ξήρανση σε ηλεκτρικό ξηραντήριο και τα υπόλοιπα στάδια της πελλετοποίησης.

Λόγω της μεγάλης διακύμανσης των εκπομπών από την καύση βιομάζας, ανάλογα με τα χημικά και φυσικά χαρακτηριστικά του εκάστοτε καυσίμου, καθώς και το είδος της εγκατάστασης καύσης, η συλλογή πειραματικών δεδομένων από την καύση των επιλεγμένων τύπων πρώτης ύλης σε λέβητες εμπορικής ή πιλοτικής κλίμακας που προσομοιάζουν τις επιλεγμένες τεχνικές και λειτουργικές προδιαγραφές είναι η προτιμώμενη μέθοδος για τη λήψη ρεαλιστικών δεδομένων. Ωστόσο δε στά-

θηκε δυνατή η λήψη πειραματικών μετρήσεων στο χρονικό διάστημα εκπόνησης της συγκεκριμένης μελέτης. Για το λόγο αυτό, λήφθηκε για τη διεργασία της καύσης ένα και μόνο σετ δεδομένων για τις εκπομπές από την καύση πελλετών ξύλου σε λέβητα κονιοποιημένου καυσίμου [114]. Το σετ αυτό ενσωματώθηκε στο τροποποιημένο σετ για την ηλεκτροπαραγωγή από λιγνίτη της ecoinvent (Electricity, high voltage RoW electricity production, lignite), ώστε να προκύψει ένα σετ δεδομένων αντιπροσωπευτικό για την κατασκευή και λειτουργία μίας μονάδας καύσης βιομάζας μεγάλης κλίμακας και σύγχρονης τεχνολογίας.

Η θερμοκρασία καύσης επιλέχθηκε στους 900 °C για λέβητα αναβράζουσας κλίνης και στους 1200 °C για λέβητα κονιοποιημένου καυσίμου, σύμφωνα με τις τυπικές θερμοκρασίες καύσης για κάθε τεχνολογία που αναφέρθηκαν στην αντίστοιχη ενότητα. Για τους βοηθητικούς λέβητες βιομάζας που θεωρήθηκαν για τις μονάδες προκατεργασίας, οι εκπομπές υπολογίστηκαν με κατάστρωση πρόχειρων ισοζυγίων μάζας, λαμβάνοντας υπόψη τη στοιχειακή σύνθεση του ανεπεξέργαστου καυσίμου κάθε φορά, θεωρώντας 100% δραστηριότητα της βιομάζας κατά την καύση (πλήρη καύση). Για τις εκπομπές θείου εκτιμάται εκπομπή στερεού στοιχειακού θείου 1%, με το υπόλοιπο 99% να οξειδώνεται κατά 95% προς SO<sub>2</sub> και κατά 4% προς SO<sub>3</sub>, τα οποία εκφράζονται αθροιστικά στο σετ εκπομπών ως ισοδύναμα SO<sub>2</sub>. Για τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου NO<sub>x</sub>, ακολουθείται η εξής προσέγγιση: θεωρείται ότι ο κυρίαρχος μηχανισμός σχηματισμού NO<sub>x</sub> για τις μελετούμενες συνθήκες είναι αυτός των fuel NO<sub>x</sub> (βλ. Σχ. 4.2).



**Σχήμα 4.2:** Μηχανισμοί παραγωγής NO<sub>x</sub> από καύση βιομάζας (Korpejan, Van Loo, 2012)

Για το μεθάνιο (CH<sub>4</sub>) είναι γνωστό ότι οξειδώνεται σχεδόν εξ ολοκλήρου σε θερμοκρασίες άνω των 700-800 °K [115], άρα είναι εύλογη η υπόθεση της πλήρους καύσης στα μελετούμενα θερμοκρασιακά εύρη. Υπόδειγμα των τροποποιήσεων που έγιναν στο σετ δεδομένων της ecoinvent για καύση ξύλου φαίνεται στον Πίν. 4.1. Οι εκπομπές εκφράστηκαν ανά μονάδα προϊόντος, ακολουθώντας εξεργειακή κατανομή, υποθέτοντας ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης ίσο με 34% και θερμικό ίσο με 51% (και άρα 85% συνολικό συντελεστή εκμετάλλευσης καυσίμου). Τυχόν πρόσθετα καύσης δελήφθηκαν υπόψιν στην κατάστρωση του σετ δεδομένων της καύσης.

**Πίνακας 4.1:** Υπόδειγμα των τροποποιήσεων στο σετ δεδομένων της ecoinvent ώστε να αναπαριστάται η καύση βιομάζας

Είσοδοι: πρώτες ύλες, καύσιμα, πόροι	
Ash transport, lorry 7.5-16 metric ton, EURO4	1.684E-5
Εκπομπές και διαχείριση αποβλήτων (kg/MJel )	
Dinitrogen monoxide	3.754E-06
Mercury	1.600E-04
TSP	1.205E-05
Nitrogen oxides	1.008E-05
Zinc	6.124E-06
Sulfur dioxide	1.778E-04
Water/m <sup>3</sup>	1.580E-06
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	1.976E-05
NMVOC, non-methane volatile organic compounds	5.334E-10
Methane, biogenic	7.902E-10
Carbon monoxide, biogenic	4.544E-09
Cadmium	2.766E-14
Dioxins	2.568E-11
Naphthalene	4.571E-09
Residue from cooling tower	1.552E-05
Wood ash, sanitary landfill	5.61E-04

Όσον αφορά την προκύπτουσα τέφρα βιομάζας, ελλείπει λεπτομερών σετ δεδομένων για τις εκπομπές από τα διαφορετικά σενάρια αξιοποίησής της επιλέχθηκε να εφαρμοστεί το επικρατέστερο σήμερα σενάριο της διάθεσης σε μονάδα υγειονομικής ταφής επικίνδυνων αποβλήτων. Η προκύπτουσα τέφρα για κάθε σενάριο ανά παραγόμενο MJ ηλεκτρικής ενέργειας υπολογίστηκε με βάση την περιεκτικότητα σε τέφρα του εξεταζόμενου κάθε φορά καυσίμου και ενσωματώθηκε στο σχετικό σετ δεδομένων της καύσης, θεωρώντας πλήρη καύση της απαραίτητης κάθε φορά ποσότητας βιομάζας ανάλογα με τη θερμογόνο ικανότητα του καυσίμου. Θεωρήθηκε μεταφορά με φορτηγό ωφέλιμου φορτίου 16 τόνων κλάσης EURO 4 για απόσταση 30 χιλιομέτρων έως το χώρο ταφής. Για την τέφρα βιομάζας επιλέχθηκε το σετ δεδομένων της ecoinvent για τη μοντελοποίηση τέφρας από καύση υπολειμμάτων ξύλου.

#### 4.2.2 Σενάριο 1α: Ακατέργαστες πελλέτες ξύλου

Για τις πελλέτες ξύλου επιλέχθηκε ως σενάριο αναφοράς η εισαγωγή τους από τον Καναδά (Quebec) (τροποποιημένο σετ δεδομένων ecoinvent: Wood pellet, measured as dry mass Ca-QCl wood pellet production). Ως εκ τούτου η απόσταση από το σημείο συλλογής ως τη μονάδα πελλετοποίησης ορίζεται στα 110 χλμ. [116]. Στον Καναδά λειτουργούσαν το 2013 19 μονάδες πελλετοποίησης με συνολική δυναμικότητα ενός εκατομμυρίου τόνων, ενώ μόνο 270.000 τόνοι πωλήθηκαν (120.000 στην Ευρώπη, 150.000 στις ΗΠΑ και 100.000 εγχώρια), αφήνοντας ένα απώλητο πλεόνασμα 630.000 τόνων [22].

Η απαιτούμενη θερμότητα για τη διεργασία θεωρείται ότι καλύπτεται από τη λειτουργία ενός λέβητα βιομάζας που τροφοδοτείται με υπολείμματα ξύλου, ως είθισται σε αυτού του είδους τις βιομηχανικές μονάδες (σετ δεδομένων ecoinvent: Heat, district or industrial, other than natural gas CA-QCl heat and power co-generation, wood chips, 6667 kW, state-of-the-art 2014), ενώ ο απαιτούμενος ηλε-

κτρισμός προέρχεται από το δίκτυο υψηλής τάσης της περιοχής του Κεμπέκ (ecoinvent: Electricity, high voltage CA-QC1 production mix). Η υγρασία των τοιπς ξύλου ελήφθη ως 28.6%, σύμφωνα με τη σχετική αναφορά της ecoinvent [110].

Η μεταφορά προς τη μονάδα ΣΗΘ λαμβάνει χώρα οδικώς για 200 χλμ. (με φορτηγό, για 50 χλμ. στον Καναδά και 150 στη Γερμανία) και μέσω θαλάσσιων μεταφορών (υπερωκεάνιο πλοίο) για 3430 ναυτικά μίλια ή 5500 χλμ. Η κατώτερη θερμογόνος ικανότητα (LHV) των πελλετών επιλέχθηκε στα 17.88 MJ/kg, ενώ η υγρασία στο 5,2% και η στοιχειακή σύσταση σύμφωνα με τη βάση δεδομένων Phyllis2.

#### 4.2.3 Σενάριο 1β: Φρυγμένες πελλέτες ξύλου

Για τις φρυγμένες πελλέτες ξύλου επιλέχθηκε ως βάση το σενάριο των ακατέργαστων πελλετών με εισαγωγή τους από τον Καναδά (Quebec). Ως εκ τούτου, όλες οι μεταφορές θα είναι ίδιες με του σεναρίου 1α. Η μονάδα προκατεργασίας θεωρείται ότι βρίσκεται στην ίδια τοποθεσία με τη μονάδα πελλετοποίησης, ως ενιαία μονάδα επεξεργασίας, ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας και μείωση του περιβαλλοντικού αντικτύπου. Για τους σκοπούς της παρούσας μελέτης θεωρήθηκε ότι η φρύξη διαδέχεται τη διεργασία της πελλετοποίησης, αντί να προηγείται αυτής, αν και υπάρχουν πολυάριθμες πιλοτικές μονάδες που ακολουθούν και τις δύο μεθόδους.

Η κατώτερη θερμογόνος ικανότητα (LHV) των πελλετών επιλέχθηκε στα 20.2 MJ/kg, το ποσοστό υγρασίας των πελλετών στο 4% και η στοιχειακή τους σύσταση σύμφωνα με τη βάση δεδομένων Phyllis2. Οι συνθήκες της διεργασίας ορίστηκαν ως εξής: η θερμοκρασία ως 250 °C και η χρονική διάρκεια ως 30 λεπτά, ενώ η απόδοση ως προς τη μάζα προϊόντος εκτιμήθηκε στο 80% [29]. Η απαιτούμενη θερμότητα επιλέχθηκε ως 1.1 MJ/kg φρυγμένης πελλέτας ξύλου [117], ενώ η κατανάλωση του ξηραντήρα ορίζεται στα 3 MJ/kg H<sub>2</sub>O εξατμ. [71].

Στην περίπτωση της φρύξης βιομάζας έγινε η εξής παραδοχή απλοποίησης: οι ανάγκες σε θερμότητα της διεργασίας θα καλύπτονται εν μέρει από καύση του παραγόμενου κατά την κατεργασία αερίου (torgas) στο λέβητα, οπότε και απαιτείται καύση μικρότερης ποσότητας συμπληρωματικού καυσίμου (π.χ. φυσικού αερίου) ή επιπλέον παροχή ακατέργαστης βιομάζας στη μονάδα φρύξης (στο δικό μας σενάριο). Οι συντελεστές εκπομπής για τους ρύπους της διεργασίας αντλήθηκαν από την έκθεση του NETL [118], ενώ οι εκπομπές του βοηθητικού λέβητα βιομάζας πάρθηκαν από τη μελέτη της Energinet [114]. Ο ηλεκτρισμός και για αυτό το σενάριο παρέχεται από το τοπικό δίκτυο υψηλής τάσης. Το σετ δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της παραγωγής ενός κιλού κατεργασμένων πελλετών φαίνεται στον Πίν. 4.2.

#### 4.2.4 Σενάριο 2α: Ακατέργαστες πελλέτες περιβλήματος καρπών ελαιοφοίνικα

Η καλλιέργεια και συλλογή της πρώτης ύλης θεωρείται ότι λαμβάνει χώρα στη Μαλαισία, καθώς αυτή είναι η πρώτη παγκοσμίως σε παραγωγή υπολειμματικής βιομάζας από EFB [119], ενώ οι σχετικές εκπομπές ρύπων λήφθηκαν από σχετική βιβλιογραφία [54]. Τα EFB θεωρήθηκαν προσεγγιστικά ως το 22.5% κατά βάρος της παραγωγής φρέσκων καρπών (FFB), ενώ ο καταμερισμός εκπομπών ακολούθησε το οικονομικό κριτήριο με συντελεστή για τα EFB ίσο με 1.3%. Τα υγρά απόβλητα από την επεξεργασία του φοινικελαίου θεωρήθηκε ότι δεν εμφανίζουν εμπορική αξία, και ως εκ τούτου δε συμμετέχουν στον καταμερισμό εκπομπών.

Η πρώτη ύλη θεωρείται ότι φτάνει στη μονάδα παραγωγής φοινικελαίου και πελλετοποίησης (θεωρήθηκε ενιαία διεργασία για μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος) με ποσοστό υγρασίας ίσο με 60%. Η μέγιστη επιτρεπόμενη περιεκτικότητα σε υγρασία για τη διεργασία της πελλετοποίησης είναι 15%, ως εκ τούτου η βιομάζα διέρχεται πρώτα από πρέσα αφυδάτωσης έως ότου η υγρασία φτάσει το 48% (κατανάλωση ηλεκτρισμού: 0.31 kWh/kg H<sub>2</sub>O), ενώ στη συνέχεια διέρχεται από ηλεκτρικό ξηραντήρα ο οποίος τροφοδοτείται από βοηθητικό λέβητα βιομάζας που καίει υπολειμματική βιομάζα (θεωρούμενη διεργασία ecoinvent: electricity, high voltage - heat and

**Πίνακας 4.2:** Κατάστρωση σετ δεδομένων για τη μοντελοποίηση της φρύξης ξύλου χρησιμοποιώντας διεργασίες της ecoinvent

	Τιμή	Μονάδα
Είσοδοι (α' ύλες, καύσιμα, ενέργεια)		
Wood pellet feedstock	1.25E+00	kg
Transport of ashes, lorry 3.5-7.5 metric tons, Euro4	1.04E-05	tkm
Heat consumption from biomass CHP unit	1.39E+00	MJ
Electricity consumption from biomass CHP unit	3.54E-01	KWh
Diesel consumption	6.91E-02	MJ
Εκπομπές		
Carbon dioxide, biogenic	2.49E-01	kg
Carbon monoxide, biogenic	6.92E-06	kg
Methane, biogenic	2.38E-07	kg
Sulfur dioxide	1.46E-07	kg
UHC, unburnt hydrocarbons	4.69E-07	kg
Nitrogen dioxide	6.23E-06	kg
Particulates, < 10 Um	7.69E-07	kg
NMVOC, non-methane volatile organic compounds	3.02E-07	kg
Dinitrogen monoxide	6.15E-08	kg
Cadmium	2.08E-11	kg
Mercury	3.07E-11	kg
Zinc	1.77E-10	kg
pcdd-f	1.08E-15	kg
PAHs	5.38E-04	kg
Naphthalene	1.78E-10	kg
Wood ash to sanitary landfill	3.46E-04	kg

power co-generation, wood chips, 6667 kW, state-of-the-art 2014, ΜΥ), ενώ οι εκπομπές του λαμβάνονται προσεγγιστικά με βάση τη μελέτη της Energinet [114]. Η πελλετοποίηση απαιτεί ηλεκτρισμό 0.1065 kWh/kg πελλέτας. Η πελλέτα ακατέργαστου EFB θεωρείται ότι παρουσιάζει ποσοστό υγρασίας 12% και θερμογόνο ικανότητα (LHV) ίση με 17.46 MJ/kg (σύμφωνα με πειράματα που έλαβαν χώρα στο TUM, Μόναχο, Γερμανία, απ' όπου λαμβάνεται και η στοιχειακή σύσταση της βιομάζας). Η διεργασία της ανέγερσης ενός φοινικελαιουργείου λαμβάνεται ως κοινή υποδομή τόσο για το φοινικελαιουργείο, όσο και για τη μονάδα πελλετοποίησης (ecoinvent: Oil mill construction, RoW).

Η μεταφορά λαμβάνει χώρα ως εξής: η μεταφορά της πρώτης ύλης στη μονάδα επεξεργασίας γίνεται με φορτηγό για 25 χλμ., ενώ η μεταφορά προς τη μονάδα ΣΗΘ γίνεται με υπερωκεάνιο πλοίο για 17005 χλμ. και με φορτηγό για 200 χλμ.

#### 4.2.5 Σενάριο 2β: Υδροθερμικώς κατεργασμένες πελλέτες περιβλήματος καρπών ελαιοφθίνικα

Ξανά λαμβάνεται ως χώρα προέλευσης η Μαλαισία, με τα ίδια σενάρια μεταφοράς. Οι συνθήκες κατεργασίας είναι: θερμοκρασία ίση με 230 °C και διάρκεια ίση με 4 ώρες. Τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας της μονάδας προκατεργασίας, που λαμβάνεται ως ενσωματωμένη στο φοινικελαιουργείο/πελλετόμυλο, λήφθηκαν από σχετική πηγή [29]. Η κατώτερη θερμογόνο ικανότητα λήφθηκε ως 25.56 MJ/kg, μαζί με τη στοιχειακή ανάλυση σύμφωνα με πειράματα που έλαβαν χώρα στο TUM,

Μόναχο, Γερμανία. Η συνολική κατανάλωση της μονάδας προκατεργασίας και πελλετοποίησης θεωρήθηκε ίση με 0.1426 kWh/kg HTC-προϊόντος ενώ οι εκπομπές του βοηθητικού λέβητα βιομάζας λαμβάνονται προσεγγιστικά με βάση τη μελέτη της Energinet [114], προσθέτοντας σ' αυτές τις υπολογιζόμενες με βάση τη σύσταση εκπομπές από την καύση του παραγόμενου αερίου (HTC-gas), θεωρώντας 99% μετατροπή του H<sub>2</sub>S προς SO<sub>x</sub> και 1% άκαυστο H<sub>2</sub>S. Η επεξεργασία του υγρού αποβλήτου από τον αντιδραστήρα προσομοιώνεται με χρήση σετ δεδομένων της ecoinvent για κατεργασία απόνερων μονάδας κατεργασίας αμύλου πατάτας, ως παραπλήσιας χημικής σύστασης, προσαρμόζοντας κατάλληλα τη δυναμικότητα της μονάδας βιολογικού καθαρισμού. Το σετ δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της παραγωγής ενός κιλού κατεργασμένων πελλετών φαίνεται στον Πίν. 4.3.

**Πίνακας 4.3:** Κατάστρωση σετ δεδομένων για τη μοντελοποίηση της υδροθερμικής ανθρακοποίησης EFB χρησιμοποιώντας διεργασίες της ecoinvent

	Τιμή	Μονάδα
Είσοδοι (α' ύλες, καύσιμα, ενέργεια)		
efb extraction from integr. mill	4.068740534	kg
efb (raw) integr. pelletization	1	kg
Water consumption	5.236145	kg
Electricity, high voltage, CHP, wood chips, MY	0.1426	KWh
Εκπομπές		
TSP	6.89E-03	kg
Carbon dioxide, biogenic	5.05E-01	kg
Water	7.18E-01	kg
Particulates, < 10 um	2.31E-04	kg
Carbon monoxide, biogenic	1.09E-01	kg
Methane, biogenic	8.71E-04	kg
Hydrogen chloride	8.05E-02	kg
Nitrogen dioxide	2.28E-01	kg
Sulfur dioxide	8.27E-02	kg
Wastewater to treatment	1.46E-02	kg

#### 4.2.6 Σενάριο 3α: Ακατέργαστες πελλέτες φλοιού ξύλου

Ο φλοιός ερυθρελάτης θεωρείται ότι προέρχεται από την κεντρική Φινλανδία. Λόγω πληρότητας δεδομένων προτιμήθηκε για την καταγραφή ρύπων από τη δασική διαχείριση και συλλογή ξυλείας ένα σετ δεδομένων για τα Σουηδικά δάση [120]. Ο φλοιός υπολογίζεται προσεγγιστικά ως το 10% κατά βάρος της παραγωγής ακατέργαστης ξυλείας. Η ακατέργαστη ξυλεία συλλέγεται εντός ακτίνας 200 χιλιομέτρων από το πριονιστήριο/μονάδα πελλετοποίησης. Στη συνέχεια οι ακατέργαστες πελλέτες φλοιού μεταφέρονται προς τη μονάδα ΣΗΘ για συνολικά 200 χλμ. με φορτηγό εντός Φινλανδίας και Γερμανίας, 275 χλμ. με τρένο εντός Φινλανδικού εδάφους και για 1100 χλμ. με πλοίο (Ελσίνκι - Αμβούργο). Η κατώτερη θερμογόνο ικανότητα λήφθηκε ως 18.47 MJ/kg σύμφωνα με τη βάση δεδομένων Phyllis2.

Ο διαθέσιμος φλοιός στην κεντρική Φινλανδία ανέρχεται στις 110.000 τόνους/έτος ξηρής βιομάζας σύμφωνα με επαγγελματίες του χώρου, με 60% υγρασία, ποσότητα που δεν επαρκεί για την ετήσια τροφοδοσία μονάδας ΣΗΘ μεγάλης κλίμακας (απαιτούμενη παροχή καυσίμου 311.896 τόνους/έτος με βάση την κατώτερη θερμογόνο ικανότητα). Για το λόγο αυτό στην πρώτη ύλη προ-

στίθενται 177.000 ξηροί τόνοι ετησίως από τσιπς ερυθρελάτης από τα υπολείμματα της μονάδας κατεργασίας ξυλείας. Για απλοποίηση των υπολογισμών θεωρείται ότι οι ιδιότητες του καυσίμου είναι ίδιες με της πελλέτας από 100% φλοιό ερυθρελάτης. Η υγρασία των πελλετών λαμβάνεται ως 8%. Η κατανάλωση ηλεκτρισμού για το διαχωρισμό του φλοιού από την ξυλεία λαμβάνεται ως 0.104 kWh/kg ακατέργαστης ξυλείας, ενώ για την πελλετοποίηση ως 0.118 kWh/kg προϊόντος, ενώ ξανά ο ηλεκτρισμός θεωρείται ότι προέρχεται από μονάδα συμπαραγωγής που τροφοδοτείται με υπολειμματική βιομάζα και οι εκπομπές του λέβητα λαμβάνονται από τη μελέτη της Energinet [114].

#### 4.2.7 Σενάριο 3β: Πελλέτες φλοιού ξύλου κατεργασμένες με έκρηξη ατμού

Λαμβάνεται ως χώρα προέλευσης η Φινλανδία. Για απλοποίηση των υπολογισμών θεωρείται ότι οι ιδιότητες του καυσίμου είναι ίδιες με της πελλέτας από 100% φλοιό ερυθρελάτης. Η υγρασία των πελλετών λαμβάνεται ως 8% [121]. Η κατώτερη θερμογόνος ικανότητα λήφθηκε ως 18.416 MJ/kg σύμφωνα με πειράματα που έλαβαν χώρα στο TUM, Μόναχο, Γερμανία. Οι συνθήκες κατεργασίας λαμβάνονται ως εξής: θερμοκρασία 204 °C, χρονική διάρκεια 5 min, μέγιστη πίεση 17 bar. Για τις συνθήκες αυτές η απόδοση σε όρους ξηρής μάζας εκτιμάται στο 92% [122]. Το υγρό απόβλητο που προκύπτει μοντελοποιείται με βάση διεργασία της ecoinvent για διαχείριση τυπικής σύστασης υγρών αποβλήτων. Το σχετικό σετ δεδομένων παρουσιάζεται στον Πίν. 4.4

**Πίνακας 4.4:** Κατάστρωση σετ δεδομένων για τη μοντελοποίηση της έκρηξης ατμού φλοιού ξύλου χρησιμοποιώντας διεργασίες της ecoinvent

	Τιμή	Μονάδα
Είσοδοι (α' ύλης, καύσιμα, ενέργεια)		
Water, unspecified natural origin/kg	0.23913	kg
Wood pellet factory, RER production	0.00000002	p
Electricity, HV, CHP, wood chips, 6667 kW, FI, state-of-the-art 2014	0.118	kWh
Electricity, HV, CHP, wood chips, 6667 kW, FI, state-of-the-art 2014	0.02629104	kWh
Electricity, HV, CHP, wood chips, 6667 kW, FI, state-of-the-art 2014	0.31	kWh
Heat, industrial, FI, CHP, wood chips, 6667 kW, state-of-the-art 2014	0.857321514	MJ
Εκπομπές		
TSP	0.41997	g
Particulates, < 10 um	0.393	g
Particulates, < 2.5 um	0.393	g
Carbon monoxide	2.342	g
Sulfur dioxide	0.058	g
Nitrogen oxides	0.141	g
Dinitrogen monoxide	0.011	g
Methane	0.039	g
NMVOCs	0.203	g
Wastewater, average Europe without Switzerland treatment	5.022E-06	kg



Στην ενότητα αυτή παρατίθενται τα αποτελέσματα από την ανάλυση των εξεταζόμενων σεναρίων. Στα διαγράμματα επιπέδου “midpoint” σημειώνεται ότι παραλείπεται η κατηγορία επιπτώσεων του ευτροφισμού οικοσυστημάτων γλυκού νερού, καθώς οι απόλυτες τιμές των επιπτώσεων που αντιστοιχούν σε αυτή την κατηγορία βρέθηκαν πολύ μικρές (βλ. και τους αναλυτικούς πίνακες κάθε σεναρίου).

Για το ανθρακικό αποτύπωμα, η σύγκριση των αποτελεσμάτων για τον έλεγχο της επίτευξης των στόχων μείωσης εκπομπών πραγματοποιείται με τους συντελεστές που προτείνει η Οδηγία RED, αλλά και με την εγγύτερη τεχνολογία ηλεκτροπαραγωγής που πιθανότατα θα αντικατασταθεί από τις μελετούμενες διατάξεις, που είναι η ηλεκτροπαραγωγή από λιγνίτη στη Γερμανία και σύμφωνα με την ecoinvent το ανθρακικό της αποτύπωμα ανέρχεται σε 323 g CO<sub>2-eq</sub>/MJ<sub>el</sub>. Με βάση το αποτύπωμα της λιγνιτικής παραγωγής, εξάγονται οι παρακάτω μειώσεις εκπομπών: 92.85% για το σενάριο 1α, 90.25% για το 1β, 72.14% για το 2α, 75.05% για το 2β, 85.76% για το 3α και 85.98% για το 3β.

Όταν η σύγκριση γίνεται με βάση την Οδηγία RED, προκειμένου για λειτουργία μονάδας εντός του 2021 το ανώτατο όριο εκπομπών που προκύπτει είναι 36.6 g CO<sub>2-eq</sub>/MJ<sub>el</sub>. Τότε τα αποδεκτά σενάρια είναι μόνο τα 1α (23.1 g CO<sub>2-eq</sub>/MJ<sub>el</sub>), με 87.4% μείωση εκπομπών, και 1β (31.5 g CO<sub>2-eq</sub>/MJ<sub>el</sub>), με 82.8% μείωση εκπομπών. Σημειώνεται εδώ ότι για το 2026 ο στόχος μείωσης εκπομπών ανέρχεται στο 85%, επιτρέποντας πλέον μόνο τη χρήση ακατέργαστων πελλετών ξύλου από τον Καναδά (Σενάριο 1α).

Το καύσιμο με τις χειρότερες επιδόσεις είναι οι ακατέργαστες πελλέτες EFB με 90 g CO<sub>2-eq</sub>/MJ<sub>el</sub> ανθρακικό αποτύπωμα, ενώ τις καλύτερες επιδόσεις εμφανίζουν οι ακατέργαστες πελλέτες ξύλου. Στη διεργασία της υδροθερμικής ανθρακοποίησης, ωστόσο, φαίνεται ξεκάθαρα το περιβαλλοντικό όφελος έναντι της ακατέργαστης βιομάζας, καθώς οι κατεργασμένες πελλέτες EFB εμφανίζουν 10.4% χαμηλότερο ανθρακικό αποτύπωμα (στα 80.6 CO<sub>2-eq</sub>/MJ<sub>el</sub>). Αντίθετα, το όφελος λόγω της έκρηξης ατμού δεν είναι εξίσου εμφανές, πιθανότατα λόγω της χαμηλότερης θερμογόνου ικανότητας του καυσίμου που προκύπτει.

Όσον αφορά το αποτύπωμα νερού των σεναρίων που μελετήθηκαν, οι πελλέτες EFB που υποβλήθηκαν σε κατεργασία με HTC (Σενάριο 2β) ήταν το λιγότερο απαιτητικό σενάριο με μόνο 4.38 \* 10<sup>3</sup> m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O / MJ<sub>el</sub>, ενώ η υψηλότερη ζήτηση νερού υπολογίστηκε για τις φρυγμένες πελλέτες (Σενάριο 1β) ξύλου στα 5.58 \* 10<sup>3</sup> m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O / MJ<sub>el</sub>. Όσον αφορά το σχηματισμό σωματιδίων, το Σενάριο 2β ήταν το δυσμενέστερο με 6.1 \* 10<sup>3</sup> kg PM<sub>2.5</sub> eq/MJ<sub>el</sub> και το Σενάριο 1α το καλύτερο με 9.25 \* 10<sup>-5</sup> kg PM<sub>2.5</sub> eq/MJ<sub>el</sub>.

### **Ανάλυση ευαισθησίας**

Πραγματοποιήθηκε μια προκαταρκτική ανάλυση ευαισθησίας για τα Σενάρια 1α και 2α, αυξομειώνοντας την απόσταση μεταφοράς με πλοίο κατά 30%. Η αύξηση απέφερε για το Σενάριο 1α 14.11% αύξηση του ανθρακικού αποτυπώματος, ενώ η μείωση απέφερε μείωση 13.9% αντίστοιχα. Το Σενάριο 2β δεν πληροί τα όρια μείωσης εκπομπών, ούτε με τη μείωση της τάξης του 30%. Για τα ίδια σενάρια επιλέχθηκε η προμήθεια ηλεκτρισμού από το δίκτυο αντί των προεπιλεγέντων σεναρίων. Στο Σενάριο 1α ο αντίκτυπος ήταν σχεδόν αμελητέος (της τάξης του 1.5%), συμπέρασμα εύλογο καθώς η ηλεκτροπαραγωγή του Κεμπέκ πραγματοποιείται σε ποσοστό άνω του 96% από υδροηλεκτρικές μονάδες (στοιχεία Υπουργείου Ενέργειας Καναδά, 2015). Στο Σενάριο 2α εντοπίστηκε περαιτέρω αύξηση του ανθρακικού αποτυπώματος κατά 25% (112.5 g CO<sub>2-εq</sub>/MJ<sub>el</sub>). Οι πίνακες με τα αναλυτικά και τα συγκριτικά αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών βρίσκονται στο Παράρτημα.

**Πίνακας 5.1:** Σενάριο Ια - αποτελέσματα

Κατηγορία Επίπτωσης	Σύνολο	Παραγωγή πελλετών ξύλου	Ηλεκτρισμός (ΥΤ), ΣΗΘ με καύση πελλετών ξύλου	Μεταφορά ακατέργαστων πελλετών ξύλου προς μονάδα ΣΗΘ
Υπερθέρμανση του πλανήτη (kg CO <sub>2</sub> ,eq)	2.30E-02	7.84E-03	1.44E-03	1.37E-02
Εξάντληση του όζοντος (kg CFC-11eq)	2.87E-08	4.72E-09	1.76E-08	6.30E-09
Ιονίζουσα ακτινοβολία (kBq Co-60eq)	1.07E-03	5.35E-04	2.45E-05	5.15E-04
Φωτ. σχημ. όζοντος, ανθρώπινη υγεία (kg NO <sub>x</sub> ,eq)	2.70E-04	3.62E-05	8.32E-05	1.51E-04
Σχηματισμός σωματιδίων (μg PM2.5,eq)	9.24E-05	1.91E-05	1.11E-05	6.22E-05
Φωτ. σχημ. όζοντος, χερσαίων οικοσυστ/των (kg NO <sub>x</sub> ,eq)	2.74E-04	3.74E-05	8.44E-05	1.52E-04
Οξίνιση χερσαίων οικοσυστ/των (kg SO <sub>2</sub> ,eq)	2.54E-04	3.26E-05	3.48E-05	1.87E-04
Ευτροφισμός οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg Peq)	4.91E-06	2.77E-06	5.68E-07	1.57E-06
Ευτροφισμός θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg Neq)	3.59E-07	2.23E-07	2.37E-08	1.12E-07
Οικοτοξικότητα χερσαίων οικοσυστ/των (kg 1,4-DCBeq)	1.27E-01	4.27E-02	8.78E-03	7.52E-02
Οικοτοξικότητα οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg 1,4-DCBeq)	9.67E-04	2.62E-04	5.94E-04	1.10E-04
Οικοτοξικότητα θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg 1,4-DCBeq)	1.39E-03	3.72E-04	8.32E-04	1.89E-04
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογόνα (kg 1,4-DCBeq)	8.45E-04	4.14E-04	1.60E-04	2.70E-04
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογόνα (kg 1,4-DCBeq)	3.12E-02	7.34E-03	2.06E-02	3.27E-03
Χρήση γης (m <sup>2</sup> )	7.08E-02	7.05E-02	2.46E-05	3.05E-04
Εξάντληση πόρων μεταλλευμάτων (kg Cueq)	6.88E-05	3.42E-05	1.67E-05	1.80E-05
Εξάντληση ορυκτών πόρων (kg Oileq)	6.77E-03	2.13E-03	1.88E-04	4.45E-03
Χρήση νερού (m <sup>3</sup> )	5.15E-03	1.17E-04	4.99E-03	4.05E-05

**Πίνακας 5.2:** Σενάριο Iβ - αποτελέσματα

Κατηγορία Επένδυσης	Σύνολο	Ηλεκτρισμός (ΥΤ), ΣΗΘ με καύση φρυγμύ-νου ξύλου	Μεταφορά φρυγμύ-νων τετραετών προς μονάδα ΣΗΘ	Φρύξη τετραετών ξύλου
Υπερθέρμανση του πλάνητη (kg CO <sub>2</sub> .eq)	31.53E-3	1.55E-3	12.14E-3	17.84E-3
Εξάντληση του όζοντος (kg CFC-11eq)	59.85E-9	17.68E-9	5.58E-9	36.59E-9
Ιονίζουσα ακτινοβολία (kBq Co-60eq)	1.20E-3	28.00E-6	456.10E-6	714.17E-6
Φωτ. οχλημ. όζοντος, ανθρώπινη υγεία (kg NO <sub>x</sub> .eq)	420.40E-6	83.67E-6	133.26E-6	203.48E-6
Σχηματισμός σωματιδίων (μg PM2.5.eq)	134.13E-6	11.36E-6	55.02E-6	67.75E-6
Φωτ. οχλημ. όζοντος, χερσαίων οικοσυστ/των (kg NO <sub>x</sub> .eq)	425.90E-6	84.87E-6	134.51E-6	206.52E-6
Οξίνιση χερσαίων οικοσυστ/των (kg SO <sub>2</sub> .eq)	362.25E-6	35.38E-6	165.53E-6	161.35E-6
Ευτροφοισμός θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg Peq)	6.18E-6	918.37E-9	1.39E-6	3.88E-6
Ευτροφοισμός θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg Neq)	447.16E-9	24.82E-9	98.73E-9	323.62E-9
Ουκοτοξικότητα χερσαίων οικοσυστ/των (kg 1,4-DCBeq)	271.43E-3	9.21E-3	66.53E-3	195.69E-3
Ουκοτοξικότητα οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg 1,4-DCBeq)	2.70E-3	1.99E-3	97.72E-6	605.82E-6
Ουκοτοξικότητα θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg 1,4-DCBeq)	4.55E-3	2.79E-3	167.14E-6	1.59E-3
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογόνα (kg 1,4-DCBeq)	4.04E-3	199.51E-6	239.10E-6	3.60E-3
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογόνα (kg 1,4-DCBeq)	111.40E-3	70.17E-3	2.89E-3	38.34E-3
Χρήση γης (m <sup>2</sup> )	142.60E-3	39.14E-6	269.83E-6	142.29E-3
Εξάντληση πόρων μεταλλευμάτων (kg Cueq)	115.55E-6	16.90E-6	15.94E-6	82.72E-6
Εξάντληση ορυκτών πόρων (kg Oileq)	9.28E-3	224.25E-6	3.94E-3	5.12E-3
Χρήση νερού (m <sup>3</sup> )	5.58E-3	4.99E-3	35.84E-6	550.89E-6

**Πίνακας 5.3:** Σενάριο 2α - αποτελέσματα

Κατηγορία Επίπτωσης	Σύνολο	Παρααβή EFB από ελαιουργ- γείο	Πελλετοποίηση EFB	Μεταφορά EFB προς μονάδα προκατερ- γασίας	Μεταφορά πελλετών EFB προς μονάδα ΣΗΘ	Ηλεκτρισμός (ΥΤ), ΣΗΘ με καύση ακα- τέργαστων πελλετών EFB
Υπερθέρμανση του πλανήτη (kg CO <sub>2</sub> ,eq)	9.00E-02	3.84E-02	1.90E-03	1.12E-02	3.70E-02	1.53E-03
Εξάντληση του όζοντος (kg CFC-11eq)	9.20E-08	9.86E-09	4.26E-08	4.89E-09	1.70E-08	1.77E-08
Ιονίζουσα ακτινοβολία (kBq Co-60eq)	2.05E-03	3.27E-04	8.77E-06	2.71E-04	1.42E-03	2.74E-05
Φωτ. σχημ. όζοντος, ανθρώπινη υγεία (kg NO <sub>x</sub> ,eq)	6.92E-04	5.82E-05	5.76E-05	4.64E-05	4.46E-04	8.36E-05
Σχηματισμός σωματιδίων (μg PM2.5,eq)	3.86E-04	4.13E-05	1.32E-04	1.33E-05	1.88E-04	1.13E-05
Φωτ. σχημ. όζοντος, χερσαίων οικοσυστ/των (kg NO <sub>x</sub> ,eq)	7.06E-04	5.96E-05	6.44E-05	4.73E-05	4.50E-04	8.48E-05
Οξίνιση χερσαίων οικοσυστ/των (kg SO <sub>2</sub> ,eq)	7.57E-04	7.72E-05	4.09E-05	3.25E-05	5.72E-04	3.53E-05
Ευτροφισμός οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg P,eq)	1.17E-05	5.21E-06	1.13E-07	9.65E-07	4.55E-06	8.62E-07
Ευτροφισμός θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg N,eq)	6.65E-07	2.42E-07	5.78E-09	7.47E-08	3.17E-07	2.46E-08
Οικοτοξικότητα χερσαίων οικοσυστ/των (kg 1,4-DCBeq)	3.26E-01	7.45E-02	1.11E-03	1.22E-01	1.19E-01	9.14E-03
Οικοτοξικότητα οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg 1,4-DCBeq)	2.88E-03	6.25E-04	1.44E-05	2.11E-04	2.59E-04	1.77E-03
Οικοτοξικότητα θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg 1,4-DCBeq)	4.17E-03	9.10E-04	2.02E-05	3.48E-04	4.21E-04	2.47E-03
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογόνα (kg 1,4-DCBeq)	4.51E-03	3.28E-03	2.34E-05	2.76E-04	7.41E-04	1.93E-04
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογόνα (kg 1,4-DCBeq)	9.77E-02	2.05E-02	4.47E-04	7.47E-03	7.13E-03	6.22E-02
Χρήση γης (m <sup>2</sup> )	2.77E-03	1.87E-03	4.50E-06	4.04E-04	4.61E-04	3.68E-05
Εξάντληση πόρων μεταλλευμάτων (kg Cu,eq)	3.91E-04	2.97E-04	4.66E-06	2.63E-05	4.63E-05	1.69E-05
Εξάντληση ορυκτών πόρων (kg Oil,eq)	1.84E-02	2.55E-03	4.50E-05	3.82E-03	1.18E-02	2.18E-04
Χρήση νερού (m <sup>3</sup> )	5.35E-03	2.18E-04	9.62E-07	3.22E-05	1.06E-04	4.99E-03

**Πίνακας 5.4:** Σενάριο 2β - αποτελέσματα

Κατηγορία Επίπτωσης	Σύνολο	Μεταφορά EFB προς μονάδα προ-κατεργασίας	Μεταφορά HTC πέλαιτων προς EFB	Ηλεκτρισμός (ΤΤ), ΣΗΘ καύση πέλαιτων EFB με HTC	Πελλετοποίηση και Υδροθερμική Αναρκατοποίηση EFB
Υπερθέρμανση του πλανήτη (kg CO <sub>2</sub> ,eq)	8.06E-02	1.04E-02	2.53E-02	1.65E-03	4.33E-02
Εξάντληση του όζοντος (kg CFC-11eq)	8.03E-08	4.55E-09	1.16E-08	1.77E-08	4.64E-08
Ιονίζουσα ακτινοβολία (kBq Co-60eq)	1.59E-03	2.53E-04	9.69E-04	3.09E-05	3.36E-04
Φωτ. οχλημ. όζοντος, ανθρώπινη υγεία (kg NO <sub>x</sub> ,eq)	5.73E-04	4.32E-05	3.05E-04	8.41E-05	1.40E-04
Σχηματισμός σωματιδίων (μg PM2.5,eq)	6.12E-03	1.23E-05	1.28E-04	1.16E-05	5.97E-03
Φωτ. οχλημ. όζοντος, χερσαίων οικοσυστ/των (kg NO <sub>x</sub> ,eq)	5.84E-04	4.40E-05	3.07E-04	8.53E-05	1.47E-04
Οξίνιση χερσαίων οικοσυστ/των (kg SO <sub>2</sub> ,eq)	2.01E-02	3.02E-05	3.90E-04	3.59E-05	1.97E-02
Ευτροφισμός οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg P <sub>eq</sub> )	1.09E-05	8.98E-07	3.11E-06	1.21E-06	5.64E-06
Ευτροφισμός θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg N <sub>eq</sub> )	2.79E-06	6.95E-08	2.17E-07	2.57E-08	2.48E-06
Οικοτοξικότητα χερσαίων οικοσυστ/των (kg 1,4-DCBeq)	2.99E-01	1.13E-01	8.14E-02	9.56E-03	9.46E-02
Οικοτοξικότητα οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg 1,4-DCBeq)	4.22E-03	1.96E-04	1.77E-04	3.15E-03	6.95E-04
Οικοτοξικότητα θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg 1,4-DCBeq)	6.04E-03	3.24E-04	2.88E-04	4.41E-03	1.01E-03
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογόνα (kg 1,4-DCBeq)	4.21E-03	2.57E-04	5.06E-04	2.32E-04	3.21E-03
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογόνα (kg 1,4-DCBeq)	1.49E-01	6.95E-03	4.87E-03	1.11E-01	2.62E-02
Χρήση γης (m <sup>2</sup> )	1.40E-02	3.76E-04	3.15E-04	5.12E-05	1.32E-02
Εξάντληση πόρων μεταλλευμάτων (kg Cu <sub>eq</sub> )	3.66E-04	2.45E-05	3.16E-05	1.71E-05	2.93E-04
Εξάντληση ορυκτών πόρων (kg Oil <sub>eq</sub> )	1.48E-02	3.55E-03	8.03E-03	2.54E-04	2.98E-03
Χρήση νερού (m <sup>3</sup> )	4.38E-03	3.00E-05	7.25E-05	4.99E-03	-7.15E-04

**Πίνακας 5.5:** Σενάριο 3α - αποτελέσματα

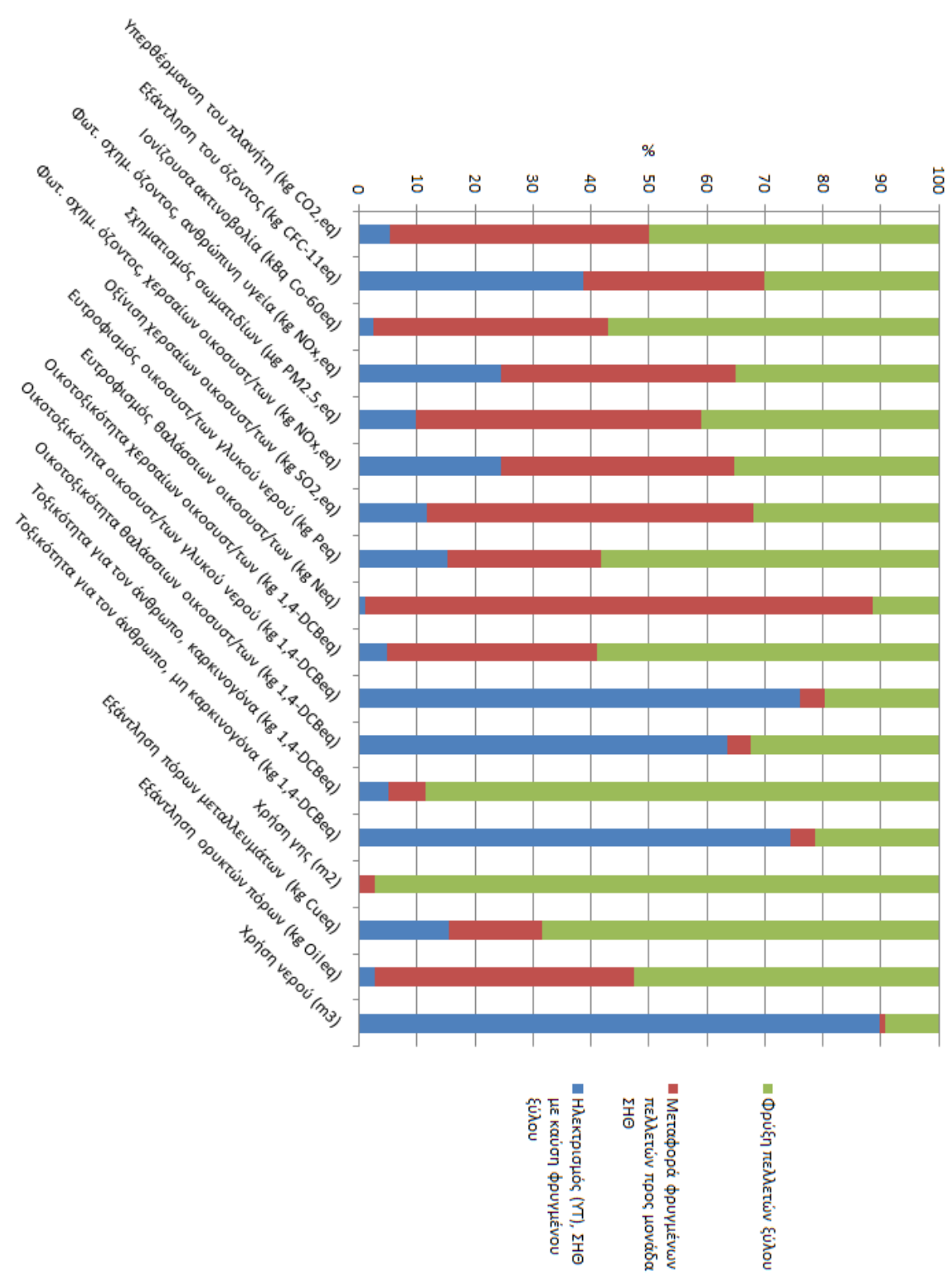
Κατηγορία Επίπτωσης	Σύνολο	Παραλαβή και πελατεποίηση φλοιού ξύλου	Εργασίες - συ-γκομιδή φλοιού ξύλου	Τσιπς θρελάτης από δάση με βιώσιμη διαχείριση	Μεταφορά ακατέργαστων πελετών προς μονάδα ΣΗΘ	Μεταφορά πρώτης ύλης στο πριονιστή-ριο	Ηλεκτρισμός (ΥΤ) - ΣΗΘ με καύση φλοιού ξύλου
Υπερέβραση του πλανήτη (kg CO <sub>2</sub> ,eq)	46.00E-03	23.40E-03	175.00E-06	5.84E-03	7.72E-03	7.22E-03	1.55E-03
Εξάντληση του όζοντος (kg CFC-11eq)	76.50E-09	46.40E-09	1.81E-09	3.78E-09	3.54E-09	3.30E-09	17.70E-09
Ιονίζουσα ακτινοβολία (kBq Co-60eq)	1.93E-03	826.00E-06	17.80E-06	105.00E-06	715.00E-06	238.00E-06	28.00E-06
Φωτ. σχημ. όζοντος, ανθρώπινη υγεία (kg NO <sub>x</sub> ,eq)	338.00E-06	130.00E-06	4.07E-06	30.00E-06	57.30E-06	33.10E-06	83.70E-06
Σχηματισμός σωματιδίων (μg PM2.5,eq)	199.00E-06	149.00E-06	932.00E-09	7.75E-06	20.70E-06	9.48E-06	11.40E-06
Φωτ. σχημ. όζοντος, χερσαίων οικοσυστ/των (kg NO <sub>x</sub> ,eq)	349.00E-06	137.00E-06	4.10E-06	31.30E-06	58.10E-06	34.00E-06	84.90E-06
Οξίνιση χερσαίων οικοσυστ/των (kg SO <sub>2</sub> ,eq)	333.00E-06	196.00E-06	4.01E-06	18.30E-06	57.80E-06	21.50E-06	35.40E-06
Ευτροφισμός οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg P <sub>eq</sub> )	28.50E-06	24.90E-06	21.10E-09	483.00E-09	1.73E-06	468.00E-09	921.00E-09
Ευτροφισμός θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg Neq)	2.26E-06	1.74E-06	211.00E-09	117.00E-09	119.00E-09	40.20E-09	24.80E-09
Οικοτοξικότητα χερσαίων οικοσυστ/των (kg 1,4-DCBeq)	807.00E-03	580.00E-03	313.00E-06	15.00E-03	66.60E-03	136.00E-03	9.21E-03
Οικοτοξικότητα οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg 1,4-DCBeq)	7.08E-03	4.80E-03	1.96E-06	50.70E-06	119.00E-06	103.00E-06	2.00E-03
Οικοτοξικότητα θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg 1,4-DCBeq)	10.00E-03	6.77E-03	3.07E-06	76.80E-06	194.00E-06	201.00E-06	2.80E-03
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογόνα (kg 1,4-DCBeq)	5.03E-03	4.27E-03	3.01E-06	112.00E-06	316.00E-06	129.00E-06	200.00E-06
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογόνα (kg 1,4-DCBeq)	227.00E-03	147.00E-03	59.50E-06	1.34E-03	3.69E-03	3.68E-03	70.50E-03
Χρήση γης (m <sup>2</sup> )	166.00E-03	21.90E-03	3.34E-06	143.00E-03	382.00E-06	577.00E-06	39.20E-06
Εξάντληση πόρων μεταλλευμάτων (kg Cueq)	864.00E-06	797.00E-06	304.00E-09	15.40E-06	21.70E-06	12.10E-06	16.90E-06
Εξάντληση ορυκτών πόρων (kg Oil <sub>eq</sub> )	12.50E-03	5.06E-03	189.00E-06	1.88E-03	2.46E-03	2.63E-03	224.00E-06
Χρήση νερού (m <sup>3</sup> )	5.24E-03	171.00E-06	2.53E-06	17.10E-06	35.10E-06	24.80E-06	4.99E-03

**Πίνακας 5.6:** Σενάριο 3β - ατοτελέσματα

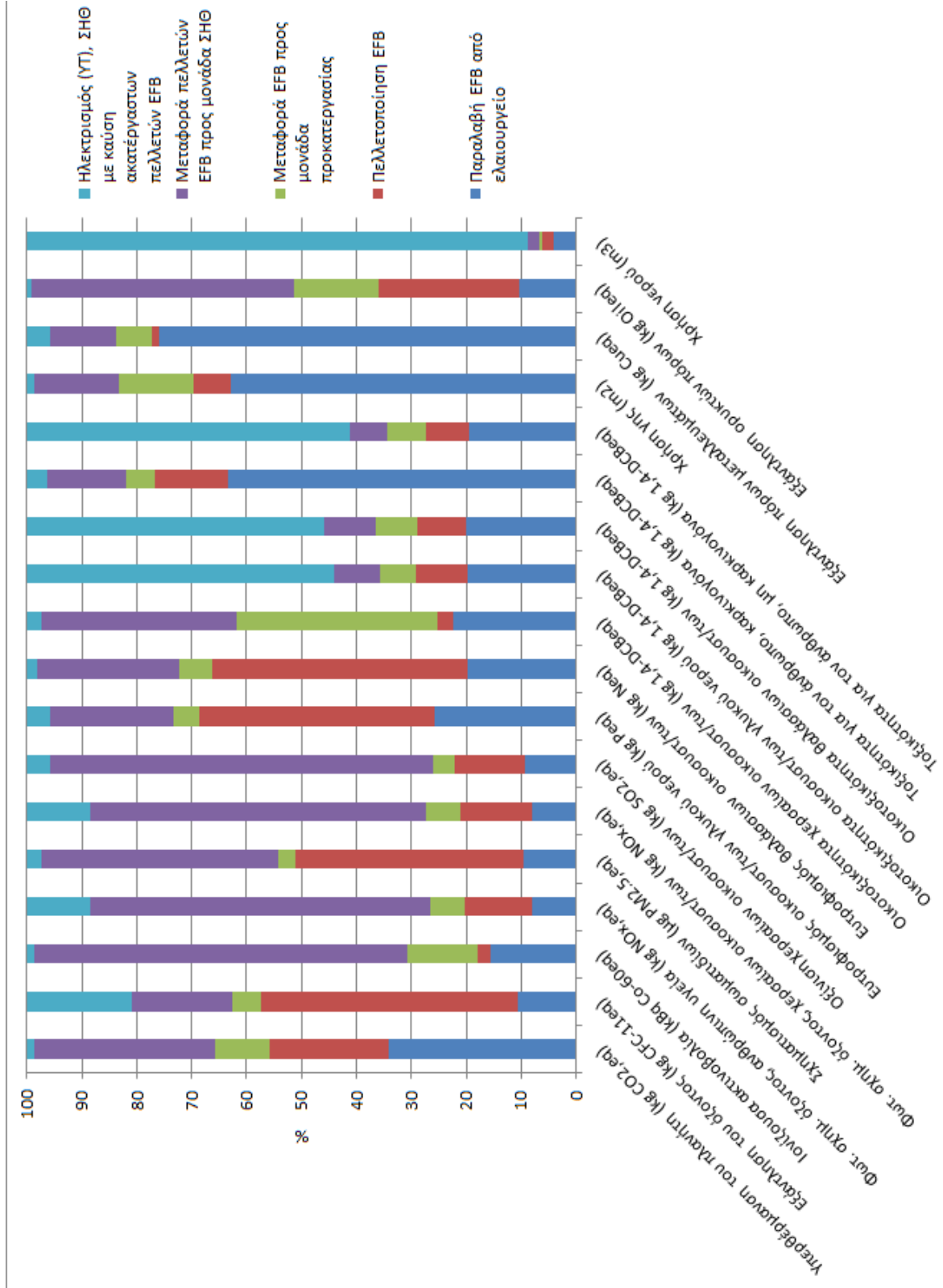
Κατηγορία Ειρήτωσης	Σύνολο	Παραγωγή, μετατροπή, SE φάσους ξύλου	Εργασίες συγκομιδή φάσους ξύλου	Τυρς θειάτης από με βιώσιμη διαχείριση	Μεταφορά SE προς SE	Μεταφορά ύλης στο προιονστή-ριο	Ηλεκτρισμός (ΤΤ) - ΣΗΘ με SE με μετα-λάτων φάσους ξύλου
Υπερθέβιαση του πλάστη (kg CO <sub>2</sub> .eq)	4.53E-02	2.19E-02	1.78E-04	5.92E-03	8.53E-03	7.33E-03	1.44E-03
Εξάντληση του όζοντος (kg CFC-11eq)	7.40E-08	4.35E-08	1.84E-09	3.83E-09	3.90E-09	3.34E-09	1.76E-08
Ιονίζουσα ακτινοβολία (kBq Co-60eq)	1.46E-03	7.73E-04	1.81E-05	1.07E-04	2.94E-04	2.42E-04	2.41E-05
Φωτ. οχημ. όζοντος, ανθρόπινη υγεία (kg NO <sub>x</sub> .eq)	3.30E-04	1.22E-04	4.15E-06	3.04E-05	5.63E-05	3.36E-05	8.32E-05
Σχηματισμός σωματιδίων (μg PM <sub>2.5</sub> .eq)	1.88E-04	1.39E-04	9.48E-07	7.86E-06	1.98E-05	9.61E-06	1.11E-05
Φωτ. οχημ. όζοντος, χερσαίων οκκουστ/των (kg NO <sub>x</sub> .eq)	3.40E-04	1.28E-04	4.17E-06	3.18E-05	5.72E-05	3.44E-05	8.44E-05
Οξείωση χερσαίων οκκουστ/των (kg SO <sub>2</sub> .eq)	3.16E-04	1.83E-04	4.08E-06	1.85E-05	5.40E-05	2.18E-05	3.47E-05
Ευροποιολός θαλάσσιων οκκουστ/των (kg Pec)	2.54E-05	2.33E-05	2.14E-08	4.90E-07	6.86E-07	4.74E-07	4.54E-07
Ευροποιολός θαλάσσιων οκκουστ/των (kg Nec)	2.08E-06	1.63E-06	2.15E-07	1.18E-07	5.44E-08	4.08E-08	2.36E-08
Οκκοξικότητα χερσαίων οκκουστ/των (kg 1,4-DCBec)	8.30E-01	5.43E-01	3.19E-04	1.52E-02	1.25E-01	1.38E-01	9.05E-03
Οκκοξικότητα οκκουστ/των γλυκού νερού (kg 1,4-DCBec)	4.89E-03	4.50E-03	1.99E-06	5.14E-05	1.05E-04	1.04E-04	1.26E-04
Οκκοξικότητα θαλάσσιων οκκουστ/των (kg 1,4-DCBec)	7.00E-03	6.34E-03	3.12E-06	7.79E-05	2.00E-04	2.04E-04	1.79E-04
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινολόγια (kg 1,4-DCBec)	4.55E-03	3.99E-03	3.06E-06	1.14E-04	1.57E-04	1.31E-04	1.48E-04
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινολόγια (kg 1,4-DCBec)	1.51E-01	1.38E-01	6.05E-05	1.36E-03	3.62E-03	3.73E-03	4.08E-03
Χρήση γης (m <sup>2</sup> )	1.67E-01	2.05E-02	3.40E-06	1.45E-01	5.27E-04	5.86E-04	2.11E-05
Εξάντληση πόρων μεταλλευμάτων (kg Cu <sub>eq</sub> )	8.05E-04	7.46E-04	3.09E-07	1.56E-05	1.33E-05	1.23E-05	1.67E-05
Εξάντληση ορυκτών πόρων (kg Oil <sub>eq</sub> )	1.27E-02	4.74E-03	1.92E-04	1.91E-03	3.00E-03	2.67E-03	1.89E-04
Χρήση νερού (m <sup>3</sup> )	5.22E-03	1.60E-04	2.58E-06	1.73E-05	2.80E-05	2.52E-05	4.99E-03



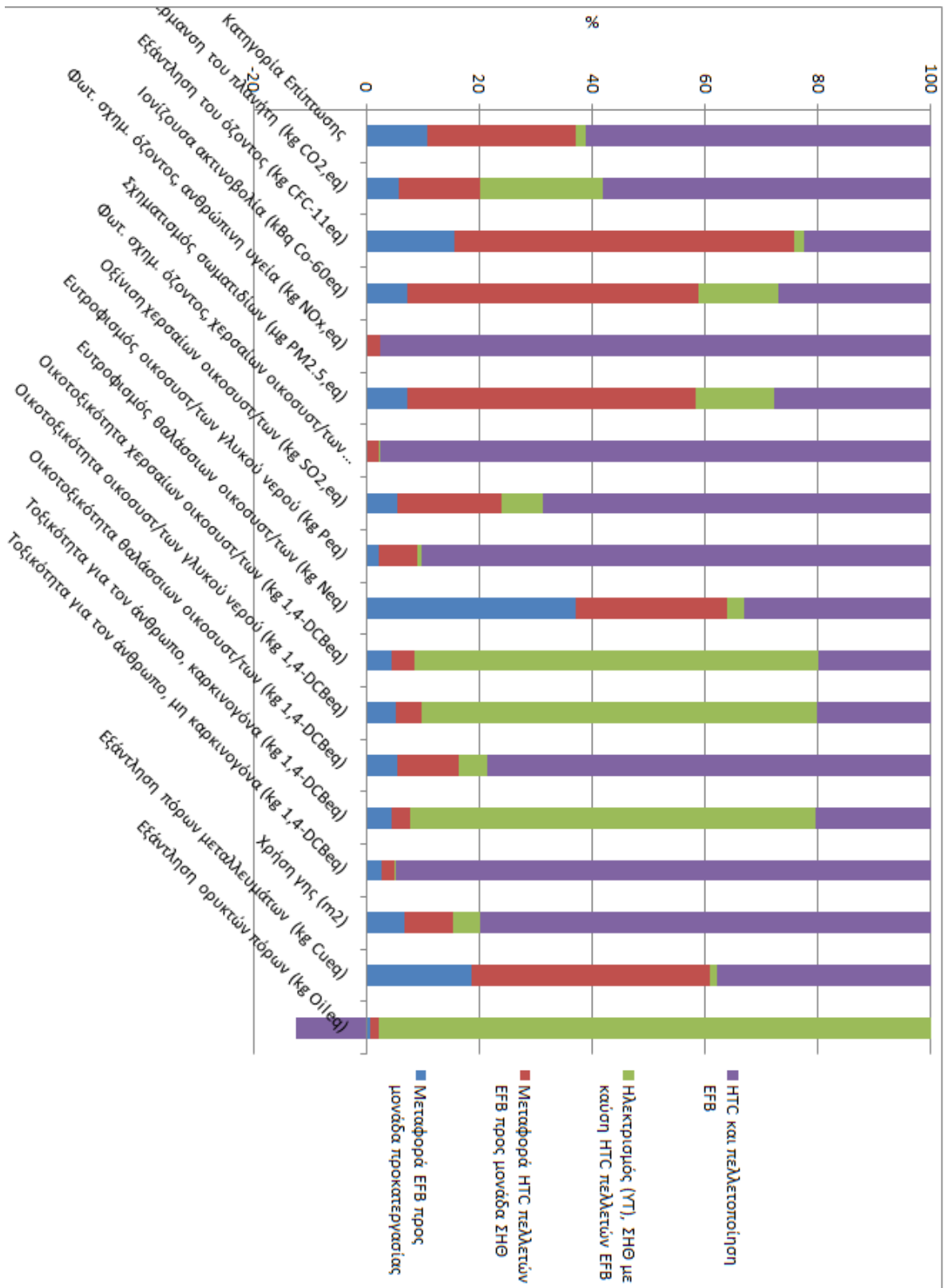




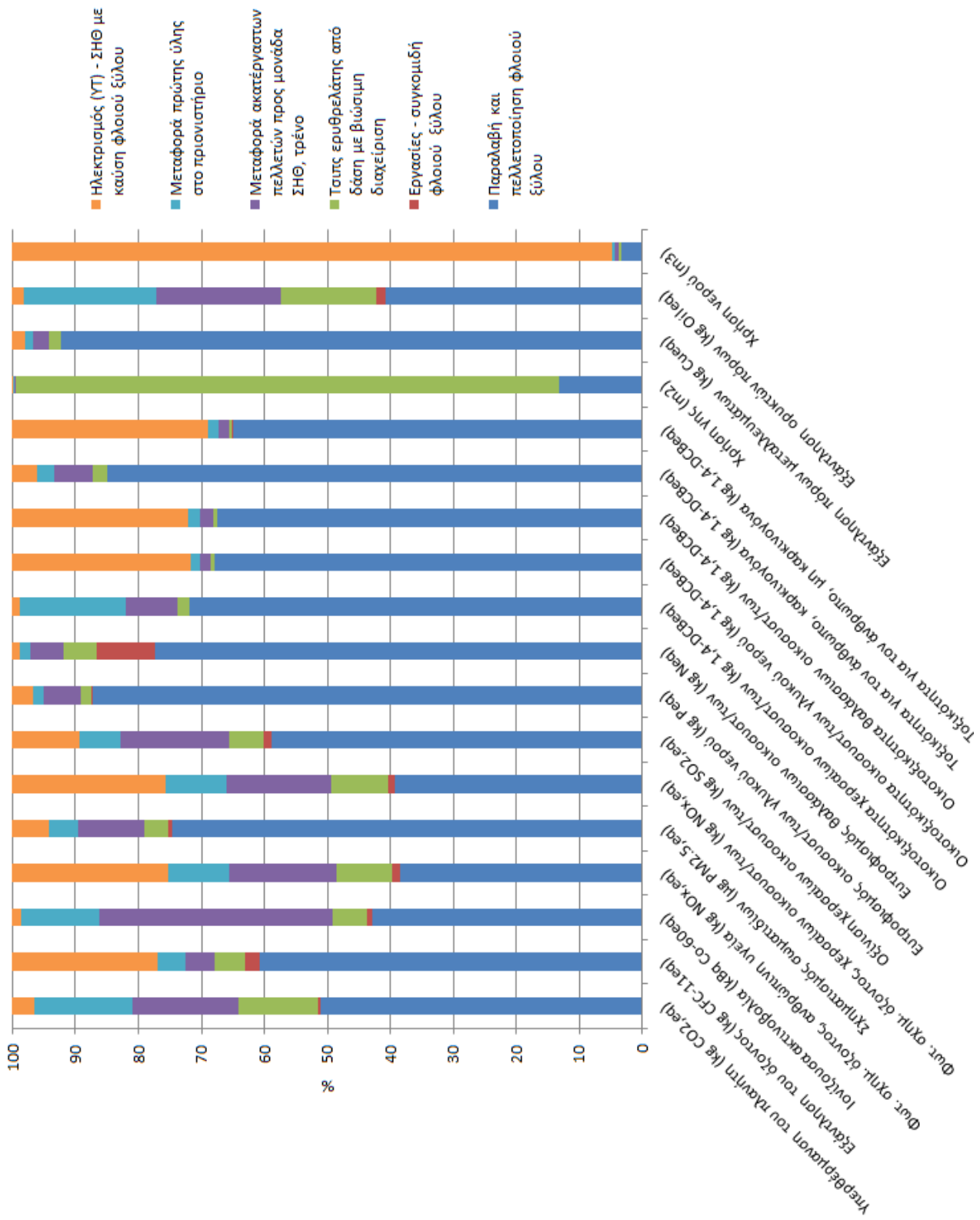
Σχήμα 5.2: Σενάριο Ιβ: συγκριτικά αποτελέσματα



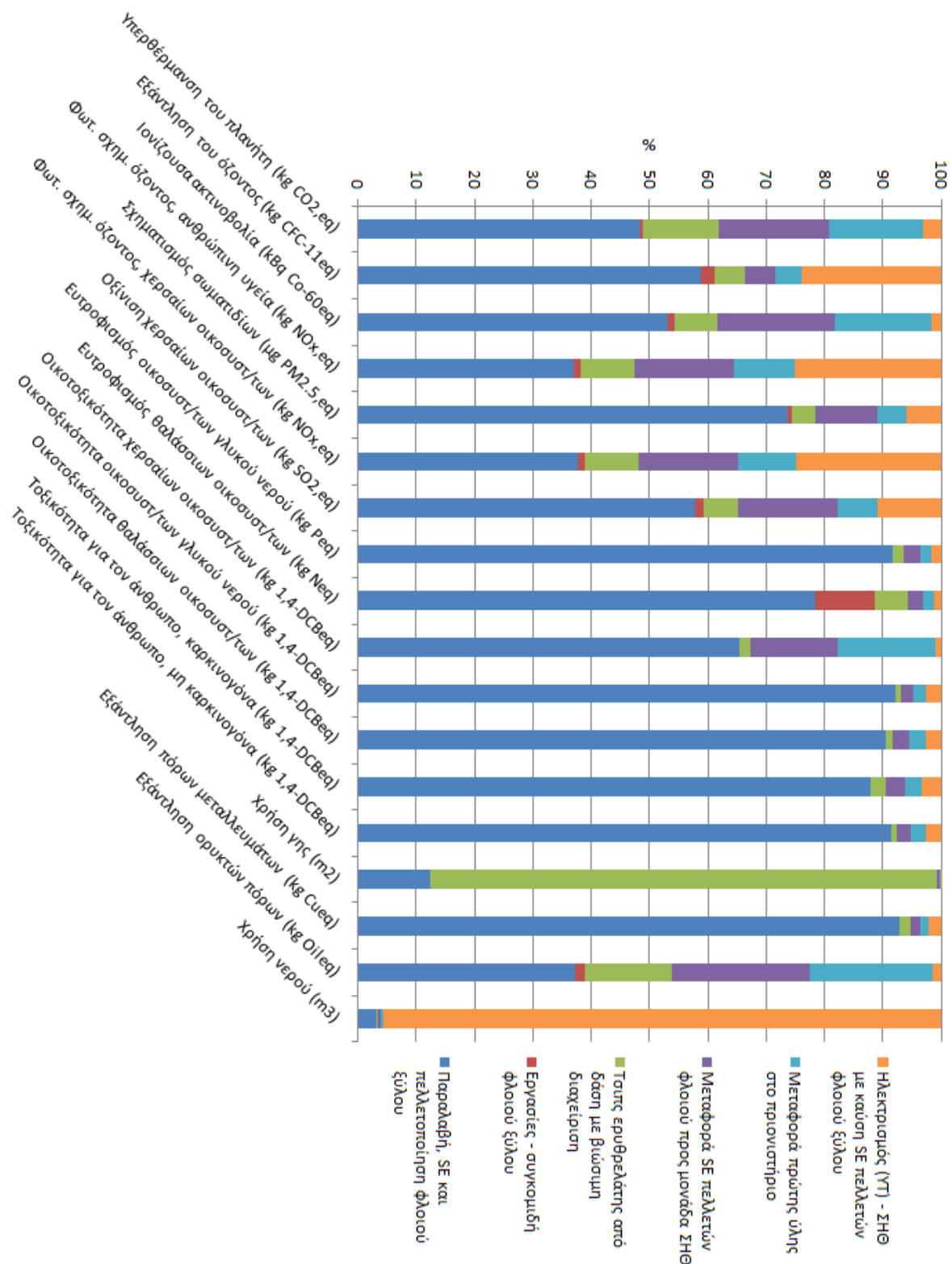
Σχήμα 5.3: Σενάριο 2α: συγκριτικά αποτελέσματα



Σχήμα 5.4: Σενάριο 2β: συγκριτικά αποτελέσματα



Σχήμα 5.5: Σενάριο 3α: συγκριτικά αποτελέσματα



Σχήμα 5.6: Σενάριο 3β: συγκριτικά αποτελέσματα

#### 6.1 Συμπεράσματα

Όσον αφορά τις εκπομπές από την καύση βιομάζας, η ποιότητα των δεδομένων ήταν ένα μείζον ζήτημα, καθώς το σετ δεδομένων στο οποίο βασίστηκε η παρούσα ανάλυση αντανακλά καύση βιομάζας σε παλαιότερης τεχνολογίας μονάδες από τη θεωρούμενη στα πλαίσια της εργασίας, και με παλαιωμένα συστήματα ελέγχου εκπομπών. Παρά το γεγονός ότι οι εμπορικοί προμηθευτές πελλετών και λεβήτων βιομάζας ισχυρίζονται ότι με νεότερα μοντέλα προκύπτει καθαρότερη καύση, στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας δεν βρέθηκαν διαθέσιμα πρόσφατα δεδομένα καύσης βιομάζας για να υποστηρίξουν αυτούς τους ισχυρισμούς.

Είναι πιθανό ότι τα νέα, προηγμένα συστήματα αντιρρύπανσης μπορούν να μειώσουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με την καύση βιομάζας, παρόλο που το καθένα τους φέρει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα που σχετίζεται με την κατασκευή και τη χρήση του (κυρίως η εξόρυξη και μεταφορά των υλικών κατασκευής, αλλά και η εξόρυξη και ο διαρκής ανεφοδιασμός χημικών αναλώσιμων).

Φυσικά, για να εξεταστούν πιο διεξοδικά τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα καύσης κάθε είδους βιομάζας, είναι απαραίτητη η χρήση ξεχωριστού σετ δεδομένων ανά είδος καυσίμου, επεξεργασίας και τύπο λέβητα (αλλά και συστημάτων αντιρρύπανσης). Συνήθως τα σετ αυτά προκύπτουν από εργαστηριακής έως πιλοτικής κλίμακας πειραματικές μετρήσεις, οι οποίες στη συνέχεια ανάγονται στις συνθήκες λειτουργίας μιας εμπορικής κλίμακας μονάδας με χρήση εμπειρικών ή ημιεμπειρικών συσχετίσεων. Στο διάστημα εκπόνησης της παρούσας εργασίας δε στάθηκε δυνατό να βρεθούν πειραματικά δεδομένα για πιλοτικές μονάδες με τις μελετούμενες τροφοδοσίες και τεχνολογίες καύσης και προκατεργασίας, και για το λόγο αυτό προτιμήθηκε η αξιοποίηση ενός μόνο σετ δεδομένων για όλα τα είδη καυσίμων βιομάζας. Η επιλογή αυτή δεν προκάλεσε σοβαρά προβλήματα ανακρίβειας στη μελέτη, καθώς, όπως αποδείχτηκε και από τα υπό μελέτη σενάρια, ο κύριος όγκος των εκπομπών προκύπτει από τα στάδια καλλιέργειας, συλλογής και προκατεργασίας της βιομάζας.

#### 6.2 Μελλοντική εργασία

Κρίνεται σημαντικό να διερευνηθεί λεπτομερέστερα η χημική σύσταση, οι φυσικοχημικές ιδιότητες και η διεργασία της καύσης των θερμοχημικά επεξεργασμένων πελλετών βιομάζας. Η προσομοίωση των διεργασιών προκατεργασίας και πελλετοποίησης, αλλά και της καύσης αυτής καθεαυτής, ελλείψει εργαστηριακών και λοιπών υποδομών που θα διευκόλυναν την πειραματική διερεύνηση,

μπορεί να εκπονηθεί σε πακέτο λογισμικού όπως το AspenPlus. Χρήσιμη είναι η πιο λεπτομερής καταγραφή των καταναλώσεων νερού, ειδικά σε μονάδες συνεχούς λειτουργίας, κάτι που σπανίζει στη βιβλιογραφία. Η δυναμική μοντελοποίηση του συνολικού θερμοδυναμικού κύκλου μπορεί να πραγματοποιηθεί επίσης με πακέτα λογισμικού, όπως π.χ. το AspenPlus ή πιο εξειδικευμένα πακέτα λογισμικού όπως το Apros, ώστε να διερευνηθεί ο αντίκτυπος της χρήσης βιομάζας σε διαφορετικά συστήματα ενεργειακής αξιοποίησης, όπως π.χ. σε λέβητα ρευστοποιημένης κλίνης ή σε αεριοποιητή.

Για την προσαρμογή του μοντελοποιημένου συστήματος ώστε να μελετηθεί η καύση βιομάζας σε λέβητα ρευστοποιημένης κλίνης, μπορεί να προστεθεί στο σετ δεδομένων της διεργασίας της καύσης η κατανάλωση 4 γραμμαρίων πυριτικής άμμου ανά παραγόμενη ηλεκτρική κιλοβατώρα [97] ως αναπλήρωση του υλικού της κλίνης, καθώς και καύση 8.5 γραμμαρίων diesel ανά παραγόμενο GJ ηλεκτρικής ενέργειας ως κατανάλωση προθέρμανσης της κλίνης σε συνθήκες εκκίνησης (start-up) [123].

Όσον αφορά τα εναλλακτικά σενάρια διαχείρισης της τέφρας, για τη μοντελοποίηση της διεργασίας της αγροκαλλιέργειας, ελλείπει πειραματικών δεδομένων μπορεί να χρησιμοποιηθεί η διεργασία της βάσης δεδομένωνecoinvent 3, “treatment of wood ash mixture, pure, landfarming RoW”, προσβάσιμη μέσω του λογισμικού SimaPro. Ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος της διασποράς της τέφρας επιμερίζεται εξ ολοκλήρου (100%) στην καύση της βιομάζας [124].



- [1] E. Commission, “Proposal for a directive of the european parliament and of the council on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast).” *Official Journal of the European Union*, Φεβρουάριος 2017. Brussels, Belgium.
- [2] E. Commission, “Directive 2009/28/EC of the european parliament and of the council of 23 april 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing directives 2001/77/ec and 2003/30/ec,” *Official Journal of the European Union*, vol. 5, p. 2009, 2009.
- [3] P. Agreement, “United nations framework convention on climate change,” *Paris, France*, 2015.
- [4] E. Commission, “Agriculture and rural development > agriculture and bioenergy, επίσημα στοιχεία,” Φεβρουάριος 2017. επίσκεψη: 10/9/2017.
- [5] T. Nussbaumer, “Combustion and co-combustion of biomass: fundamentals, technologies, and primary measures for emission reduction,” *Energy & fuels*, vol. 17, no. 6, pp. 1510–1521, 2003.
- [6] Δ. Τζαγκαράκης, “Ενεργειακή αξιοποίηση αγροτικών υπολειμμάτων σε μορφή βιοξυλάνθρακα σε υβριδικές κυψέλες καυσίμου άμεσης τροφοδοσίας στερεών καυσίμων,” 2017. Ελλάδα.
- [7] Z. Szabó, “Europe’s sustainable biomass potential is substantial,” Νοέμβριος 2015. επίσκεψη: 3/12/2017.
- [8] O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, *et al.*, “Ipcc special report on renewable energy sources and climate change mitigation,” *Prepared By Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK*, 2011.
- [9] R. Matthews, N. Mortimer, J. P. Lesschen, T. J. Lindroos, L. Sokka, A. Morris, P. Henshall, C. Hatto, O. Mwabonje, J. Rix, *et al.*, “Carbon impacts of biomass consumed in the EU: quantitative assessment,” *Final project report, project DG ENER C*, vol. 1, 2015.
- [10] P. McKendry, “Energy production from biomass (part 1): overview of biomass,” *Bioresource Technology*, vol. 83, no. 1, pp. 37 – 46, 2002. Reviews Issue.
- [11] M. Cremers, “IEA bioenergy task 32–deliverable 4–technical status of biomass co-firing,” *KEMA, Arnhem, the Netherlands*, 2009.

- [12] A. Camia, N. Robert, K. Jonsson, R. Pilli, S. G. Condado, R. L. Lozano, M. van der Velde, T. Ronzon, P. G. Albusac, M. Robert, *et al.*, “Biomass production, supply, uses and flows in the european union-first results from an integrated assessment,” 2018.
- [13] W. Ελλάς, “Δασοπονία,” Οκτώβριος 2014. επίσκεψη: 3/12/2017.
- [14] D. Thrän, D. Peetz, K. Schaubach, S. Backéus, L. Benedetti, L. Bruce, *et al.*, *Global wood pellet industry and trade study 2017*. IEA Bioenergy Task 40, 2017.
- [15] E. B. Association, “Aebiom 2015 annual report.” Key findings, Δεκέμβριος 2015. Brussels, Belgium.
- [16] T. D, *Global Wood Pellet Industry Market and Trade Study*. France: International Energy Agency, 2011.
- [17] E. Commission, “FORESTSPECS (wood bark and peat based bioactive compounds, speciality chemicals, and remediation materials: from innovations to applications).” Final Report Summary, Οκτώβριος 2014. Helsinki, Finland.
- [18] M. Parikka, “Global biomass fuel resources,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 27, no. 6, pp. 613 – 620, 2004. Pellets 2002. The first world conference on pellets.
- [19] K. Kemppainen, “WP1: Spruce bark for bioenergy.” Bioefficiency project presentation, Απρίλιος 2017. Metsä Fibre, Helsinki.
- [20] Hedman, M., Joronen, T, “Steam explosion tests and efb-biomass potential.” Bioefficiency project deliverable, Μάρτιος 2017. Valmet, Helsinki.
- [21] D. K. Ng, R. R. Tan, D. C. Foo, and M. M. El-Halwagi, *Process Design Strategies for Biomass Conversion Systems*. John Wiley & Sons, 2015.
- [22] Junginger M, *International Bioenergy Trade, History, status & outlook on securing sustainable bioenergy supply, demand and markets*. USA: Springer, 2014.
- [23] E. Jäppinen, O.-J. Korpinen, J. Laitila, and T. Ranta, “Greenhouse gas emissions of forest bioenergy supply and utilization in finland,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 29, pp. 369–382, 2014.
- [24] S. I. Karlsson-Vinkhuyzen, “The united nations and global energy governance: past challenges, future choices,” *Global Change, Peace & Security*, vol. 22, no. 2, pp. 175–195, 2010.
- [25] K. Bracmort, “Is biopower carbon neutral?,” Congressional Research Service, Library of Congress, 2011.
- [26] H. Bachram, “Climate fraud and carbon colonialism: the new trade in greenhouse gases,” *Capitalism Nature Socialism*, vol. 15, no. 4, pp. 5–20, 2004.
- [27] E. Johnson, “Goodbye to carbon neutral: Getting biomass footprints right,” *Environmental impact assessment review*, vol. 29, no. 3, pp. 165–168, 2009.
- [28] D. R. Nhuchhen, P. Basu, and B. Acharya, “A comprehensive review on biomass torrefaction,” *International Journal of Renewable Energy & Biofuels*, vol. 2014, pp. 1–56, 2014.
- [29] B. Erlach, “Biomass upgrading technologies for carbon-neutral and carbon-negative electricity generation,” 2014.

- [30] J. Koppejan and S. Van Loo, *The handbook of biomass combustion and co-firing*. Routledge, 2012.
- [31] P. McKendry, “Energy production from biomass (part 2): conversion technologies,” *Bioresource technology*, vol. 83, no. 1, pp. 47–54, 2002.
- [32] R. Saidur, E. Abdelaziz, A. Demirbas, M. Hossain, and S. Mekhilef, “A review on biomass as a fuel for boilers,” *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 15, no. 5, pp. 2262–2289, 2011.
- [33] G. Simbolotti, “Biomass for power generation and chp,” *IEA Energy Technology Essentials*, 2007.
- [34] K. Sartor, S. Quoilin, and P. Dewallef, “Simulation and optimization of a chp biomass plant and district heating network,” *Applied Energy*, vol. 130, pp. 474–483, 2014.
- [35] J. Servert, G. San Miguel, D. Lpez, *et al.*, “Hybrid solar-biomass plants for power generation; technical and economic assessment,” *Global NEST Journal*, vol. 13, no. 3, pp. 266–276, 2011.
- [36] W. bioenergy association, “WBA global bioenergy statistics 2016,” *report*, 2016.
- [37] Agora Energiewende and Sandbag, “The european power sector in 2017. state of affairs and review of current developments,” Ιανουάριος 2018. Βερολίνο, Γερμανία.
- [38] O. Eriksson, G. Finnveden, T. Ekvall, and A. Björklund, “Life cycle assessment of fuels for district heating: A comparison of waste incineration, biomass-and natural gas combustion,” *Energy policy*, vol. 35, no. 2, pp. 1346–1362, 2007.
- [39] J. Grundström *et al.*, “Life cycle assessment of torrefied biomass intended for co-firing in an existing coal-fired power plant,” 2017.
- [40] D. Thrän, J. Witt, K. Schaubach, J. Kiel, M. Carbo, J. Maier, C. Ndibe, J. Koppejan, E. Alakangas, S. Majer, *et al.*, “Moving torrefaction towards market introduction—technical improvements and economic-environmental assessment along the overall torrefaction supply chain through the sector project,” *Biomass and bioenergy*, vol. 89, pp. 184–200, 2016.
- [41] V. Forgie and R. Andrew, “Life cycle assessment of using straw to produce industrial energy in new zealand,” *Landcare Research and New Zealand Centre for Ecological Economics Technical Report May*, 2008.
- [42] F. Cherubini, “Ghg balances of bioenergy systems—overview of key steps in the production chain and methodological concerns,” *Renewable Energy*, vol. 35, no. 7, pp. 1565–1573, 2010.
- [43] B. Wahlund, J. Yan, and M. Westermarck, “Increasing biomass utilisation in energy systems: A comparative study of CO<sub>2</sub> reduction and cost for different bioenergy processing options,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 26, no. 6, pp. 531 – 544, 2004.
- [44] Y. Zhang, J. Mckechnie, D. Cormier, R. Lyng, W. Mabee, A. Ogino, and H. L. Maclean, “Life cycle emissions and cost of producing electricity from coal, natural gas, and wood pellets in ontario, canada,” *Environmental science & technology*, vol. 44, no. 1, pp. 538–544, 2009.
- [45] G.-A. Tsalidis, Y. Joshi, G. Korevaar, and W. de Jong, “Life cycle assessment of direct co-firing of torrefied and/or pelletised woody biomass with coal in the netherlands,” *Journal of cleaner production*, vol. 81, pp. 168–177, 2014.
- [46] N. S. Bentsen, M. W. Jack, C. Felby, and B. J. Thorsen, “Allocation of biomass resources for minimising energy system greenhouse gas emissions,” *Energy*, vol. 69, no. Supplement C, pp. 506 – 515, 2014.

- [47] L. Reijnders, “Conditions for the sustainability of biomass based fuel use,” *Energy policy*, vol. 34, no. 7, pp. 863–876, 2006.
- [48] A. Thakur, C. E. Canter, and A. Kumar, “Life-cycle energy and emission analysis of power generation from forest biomass,” *Applied Energy*, vol. 128, pp. 246–253, 2014.
- [49] J. Giuntoli, A. Agostini, S. Caserini, E. Lugato, D. Baxter, and L. Marelli, “Climate change impacts of power generation from residual biomass,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 89, pp. 146–158, 2016.
- [50] R. Parajuli, S. Løkke, P. A. Østergaard, M. T. Knudsen, J. H. Schmidt, and T. Dalgaard, “Life cycle assessment of district heat production in a straw fired chp plant,” *biomass and bioenergy*, vol. 68, pp. 115–134, 2014.
- [51] L. Elghali, R. Clift, P. Sinclair, C. Panoutsou, and A. Bauen, “Developing a sustainability framework for the assessment of bioenergy systems,” *Energy Policy*, vol. 35, no. 12, pp. 6075–6083, 2007.
- [52] F. Sebastián, J. Royo, and M. Gómez, “Cofiring versus biomass-fired power plants: Ghg (greenhouse gases) emissions savings comparison by means of lca (life cycle assessment) methodology,” *Energy*, vol. 36, no. 4, pp. 2029–2037, 2011.
- [53] C. Wolf, D. Klein, G. Weber-Blaschke, and K. Richter, “Systematic review and meta-analysis of life cycle assessments for wood energy services,” *Journal of Industrial Ecology*, vol. 20, no. 4, pp. 743–763, 2016.
- [54] J. H. Schmidt, “Life assessment of rapeseed oil and palm oil. ph. d. thesis, part 3: Life cycle inventory of rapeseed oil,” 2007.
- [55] D. Agar, J. Gil, D. Sanchez, I. Echeverria, and M. Wihersaari, “Torrefied versus conventional pellet production – a comparative study on energy and emission balance based on pilot-plant data and eu sustainability criteria,” *Applied Energy*, vol. 138, pp. 621 – 630, 2015.
- [56] G. Guest, R. M. Bright, F. Cherubini, O. Michelsen, and A. H. Strømman, “Life cycle assessment of biomass-based combined heat and power plants: Centralized versus decentralized deployment strategies,” *Journal of Industrial Ecology*, vol. 15, no. 6, pp. 908–921, 2011.
- [57] P. Adams, J. Shirley, and M. McManus, “Comparative cradle-to-gate life cycle assessment of wood pellet production with torrefaction,” *Applied Energy*, vol. 138, pp. 367 – 380, 2015.
- [58] A. R. Proto, J. Bacenetti, G. Macrì, and G. Zimbalatti, “Roundwood and bioenergy production from forestry: Environmental impact assessment considering different logging systems,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 165, pp. 1485–1498, 2017.
- [59] G. M. Dias, N. W. Ayer, K. Kariyapperuma, N. Thevathasan, A. Gordon, D. Sidders, and G. H. Johannesson, “Life cycle assessment of thermal energy production from short-rotation willow biomass in southern ontario, canada,” *Applied Energy*, vol. 204, pp. 343–352, 2017.
- [60] S. Muench and E. Guenther, “A systematic review of bioenergy life cycle assessments,” *Applied Energy*, vol. 112, pp. 257 – 273, 2013.
- [61] H. Holmberg, M. Tuomaala, T. Haikonen, and P. Ahtila, “Allocation of fuel costs and co2-emissions to heat and power in an industrial chp plant: Case integrated pulp and paper mill,” *Applied energy*, vol. 93, pp. 614–623, 2012.

- [62] L. Luo, E. van der Voet, G. Huppes, and H. A. U. De Haes, "Allocation issues in LCA methodology: a case study of corn stover-based fuel ethanol," *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 14, no. 6, pp. 529–539, 2009.
- [63] S. González-García, B. Mola-Yudego, and R. J. Murphy, "Life cycle assessment of potential energy uses for short rotation willow biomass in Sweden," *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 18, no. 4, pp. 783–795, 2013.
- [64] Y. W. Weldu, G. Assefa, and O. Jolliet, "Life cycle human health and ecotoxicological impacts assessment of electricity production from wood biomass compared to coal fuel," *Applied Energy*, vol. 187, pp. 564–574, 2017.
- [65] M. Röder, C. Whittaker, and P. Thornley, "How certain are greenhouse gas reductions from bioenergy? life cycle assessment and uncertainty analysis of wood pellet-to-electricity supply chains from forest residues," *Biomass and Bioenergy*, vol. 79, no. Supplement C, pp. 50 – 63, 2015. The 22nd European Biomass Conference and Exhibition held in Hamburg, June 2014.
- [66] C. Perilhon, D. Alkadee, G. Descombes, and S. Lacour, "Life cycle assessment applied to electricity generation from renewable biomass," *Energy Procedia*, vol. 18, no. Supplement C, pp. 165 – 176, 2012. Terragreen 2012: Clean Energy Solutions for Sustainable Environment (CESSE).
- [67] K. Kelly, M. McManus, and G. Hammond, "An energy and carbon life cycle assessment of industrial chp (combined heat and power) in the context of a low carbon uk," *Energy*, vol. 77, no. Supplement C, pp. 812 – 821, 2014.
- [68] G. Blengini, E. Brizio, M. Cibrario, and G. Genon, "LCA of bioenergy chains in piedmont (italy): A case study to support public decision makers towards sustainability," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 57, no. Supplement C, pp. 36 – 47, 2011.
- [69] J. Hansson, F. Martinsson, and M. Gustavsson, "Greenhouse gas performance of heat and electricity from wood pellet value chains–based on pellets for the swedish market," *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, vol. 9, no. 4, pp. 378–396, 2015.
- [70] J. McKechnie, B. Saville, and H. L. MacLean, "Steam-treated wood pellets: Environmental and financial implications relative to fossil fuels and conventional pellets for electricity generation," *Applied Energy*, vol. 180, pp. 637–649, 2016.
- [71] Y. Wang, K. Winans, Y. Shao, M. Matovic, and J. Whalen, "Life cycle assessment of biomass integrated gasification combined cycle in cement industry," in *The seventh international conference on environmental science and technology, Houston, Texas, USA, 2014*.
- [72] D. Dressler, A. Loewen, and M. Nelles, "Life cycle assessment of the supply and use of bioenergy: impact of regional factors on biogas production," *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 17, no. 9, pp. 1104–1115, 2012.
- [73] J. Cleary and J. P. Caspersen, "Comparing the life cycle impacts of using harvest residue as feedstock for small-and large-scale bioenergy systems (part i)," *Energy*, vol. 88, pp. 917–926, 2015.
- [74] D. Maraver, A. Sin, F. Sebastián, and J. Royo, "Environmental assessment of cchp (combined cooling heating and power) systems based on biomass combustion in comparison to conventional generation," *Energy*, vol. 57, pp. 17–23, 2013.
- [75] M. Goedkoop, M. Oele, A. de Schryver, M. Vieira, and S. Hegger, "Simapro database manual methods library," *PRé Consultants, The Netherlands*, pp. 22–25, 2008.

- [76] M. Morales, J. Quintero, R. Conejeros, and G. Aroca, "Life cycle assessment of lignocellulosic bioethanol: environmental impacts and energy balance," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 42, pp. 1349–1361, 2015.
- [77] E. Jäppinen, O.-J. Korpinen, and T. Ranta, "The effects of local biomass availability and possibilities for truck and train transportation on the greenhouse gas emissions of a small-diameter energy wood supply chain," *BioEnergy Research*, vol. 6, no. 1, pp. 166–177, 2013.
- [78] M. Zeymer, K. Meisel, A. Clemens, and M. Klemm, "Technical, economic, and environmental assessment of the hydrothermal carbonization of green waste," *Chemical Engineering & Technology*, vol. 40, no. 2, pp. 260–269, 2017.
- [79] M. T. Reza, J. Andert, B. Wirth, D. Busch, J. Pielert, J. G. Lynam, and J. Mumme, "Hydrothermal carbonization of biomass for energy and crop production," *Applied Bioenergy*, vol. 1, no. 1, 2014.
- [80] S. Kang, X. Li, J. Fan, and J. Chang, "Characterization of hydrochars produced by hydrothermal carbonization of lignin, cellulose, d-xylose, and wood meal," *Industrial & engineering chemistry research*, vol. 51, no. 26, pp. 9023–9031, 2012.
- [81] G. K. Parshetti, S. K. Hoekman, and R. Balasubramanian, "Chemical, structural and combustion characteristics of carbonaceous products obtained by hydrothermal carbonization of palm empty fruit bunches," *Bioresource technology*, vol. 135, pp. 683–689, 2013.
- [82] N. D. Berge, K. S. Ro, J. Mao, J. R. Flora, M. A. Chappell, and S. Bae, "Hydrothermal carbonization of municipal waste streams," *Environmental science & technology*, vol. 45, no. 13, pp. 5696–5703, 2011.
- [83] S. M. Heilmann, J. S. Molde, J. G. Timler, B. M. Wood, A. L. Mikula, G. V. Vozhdayev, E. C. Colosky, K. A. Spokas, and K. J. Valentas, "Phosphorus reclamation through hydrothermal carbonization of animal manures," *Environmental science & technology*, vol. 48, no. 17, pp. 10323–10329, 2014.
- [84] J. Poerschmann, I. Baskyr, B. Weiner, R. Koehler, H. Wedwitschka, and F.-D. Kopinke, "Hydrothermal carbonization of olive mill wastewater," *Bioresource technology*, vol. 133, pp. 581–588, 2013.
- [85] B. Erlach, B. Harder, and G. Tsatsaronis, "Combined hydrothermal carbonization and gasification of biomass with carbon capture," *Energy*, vol. 45, no. 1, pp. 329 – 338, 2012. The 24th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy, ECOS 2011.
- [86] P. C. Bergman and J. H. Kiel, "Torrefaction for biomass upgrading," in *Proc. 14th European Biomass Conference, Paris, France*, vol. 2005, pp. 17–21, 2005.
- [87] D. A. Agar, "A comparative economic analysis of torrefied pellet production based on state-of-the-art pellets," *Biomass and Bioenergy*, vol. 97, pp. 155–161, 2017.
- [88] J. Koppejan, S. Sokhansanj, S. Melin, and S. Madrali, "IEA bioenergy task 32 report final report," *Status overview of torrefaction technologies. Enschede*, 2012.
- [89] P. Bergman, "Combined torrefaction and pelletisation," *The TOP process*, 2005.
- [90] W. Stelte, "Steam explosion for biomass pre-treatment," *Danish Technological Institute*, 2013.

- [91] P. S. Lam, S. Sokhansanj, X. T. Bi, C. J. Lim, and S. H. Larsson, “Drying characteristics and equilibrium moisture content of steam-treated douglas fir (*pseudotsuga menziesii* l.),” *Bioresource technology*, vol. 116, pp. 396–402, 2012.
- [92] A. Evans, V. Strezov, and T. J. Evans, “Sustainability considerations for electricity generation from biomass,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 5, pp. 1419 – 1427, 2010.
- [93] A. Bridgwater, “Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 91, no. 2, pp. 87 – 102, 2003. Chemreactor - 15 S.I.
- [94] G. Jungmeier, H. Schwaiger, C. Panoutsou, B. Hillring, M. Flyktman, M. Gerard, N. Krajnc, N. Mihailov, F. Akgun, and C. Bruton, “Survey of existing chp plants with solid biomass in europe,” in *Proceedings of Second World Biomass Conference, Rome*, pp. 1741–1744, 2004.
- [95] M. J. Prins, K. J. Ptasiński, and F. J. Janssen, “More efficient biomass gasification via torrefaction,” *Energy*, vol. 31, no. 15, pp. 3458–3470, 2006.
- [96] L. Nunes, J. Matias, and J. Catalão, “Mixed biomass pellets for thermal energy production: A review of combustion models,” *Applied Energy*, vol. 127, pp. 135–140, 2014.
- [97] E. K. Vakkilainen, ed. Butterworth-Heinemann, 2017.
- [98] E. Commission, “Best available techniques (bat). reference document for large combustion plants,” 2016.
- [99] S. Vassilev, D. Baxter, L. Andersen, and C. Vassileva, “An overview of the composition and application of biomass ash. part 2. potential utilisation, technological and ecological advantages and challenges,” *Fuel*, 2013.
- [100] I. Obernberger and K. Supancic, “Possibilities of ash utilisation from biomass combustion plants,” in *Proceedings of the 17th European biomass conference & exhibition*, vol. 29, 2009.
- [101] K. Korpijärvi *et al.*, “Energiantuotannon tuhkien jalostaminen maanrakennuskäyttöön [processing of fly ash for earth construction],” *VTT Tiedotteita—VTT Research Notes*, vol. 2499, 2009.
- [102] M. Berra, T. Mangialardi, and A. E. Paolini, “Reuse of woody biomass fly ash in cement-based materials,” *Construction and Building Materials*, vol. 76, pp. 286–296, 2015.
- [103] Y. Magnusson, *Environmental Systems Analysis for utilisation of bottom ash in ground constructions*. 2005.
- [104] Van Dijen Frans, ENGIE Lab Laborelec, “Valorisation of biomass ash”, draft report,” 2017.
- [105] W. framework Directive, “98/EC of the european parliament and of the council of 19 november 2008 on waste and repealing certain directives,” *Official Journal L*, vol. 312, no. 22, p. 11, 2008.
- [106] J. R. Pels, D. S. de Nie, and J. H. Kiel, “Utilization of ashes from biomass combustion and gasification,” in *14th European Biomass Conference & Exhibition*, 2005.
- [107] Μ. Ντούλα, “Βιοαποκατάσταση εδαφών,” *Ινστιτούτο Εδαφολογίας Αθηνών, Εθνικό Ίδρυμα Αγροτικής Έρευνας*, 2009.
- [108] S. Environment Protection Authority, “Best practice note: Landfarming,” *State of NSW and Environment Protection Authority*, 2014.

- [109] D. Environnement, “Proceeding of the workshop on “forestry protection: Preparing forests for climate change”,” 2010.
- [110] G. Wernet, C. Bauer, B. Steubing, J. Reinhard, E. Moreno-Ruiz, and B. Weidema, “The ecoinvent database version 3 (part i): overview and methodology,” *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 21, no. 9, pp. 1218–1230, 2016.
- [111] M. Huijbregts, Z. Steinmann, P. Elshout, G. Stam, F. Verones, M. Vieira, A. Hollander, M. Zijp, and R. van Zelm, “ReCiPe 2016: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level Report I: Characterization,” 2016.
- [112] X. Lu, M. R. Withers, N. Seifkar, R. P. Field, S. R. Barrett, and H. J. Herzog, “Biomass logistics analysis for large scale biofuel production: case study of loblolly pine and switchgrass,” *Bioresource technology*, vol. 183, pp. 1–9, 2015.
- [113] H. T. Luk, T. Y. G. Lam, A. O. Oyedun, T. Gebreegziabher, and C. W. Hui, “Drying of biomass for power generation: A case study on power generation from empty fruit bunch,” *Energy*, vol. 63, pp. 205–215, 2013.
- [114] M. Nielsen, O. Nielsen, and M. Thomsen, “Emissions from decentralised chp plants 2007. national environmental research institute, aarhus university, aarhus, denmark,” 2010.
- [115] I. Fishtik, A. Alexander, R. Datta, and D. Geana, “A thermodynamic analysis of hydrogen production by steam reforming of ethanol via response reactions,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 25, no. 1, pp. 31–45, 2000.
- [116] F. Magelli, K. Boucher, H. T. Bi, S. Melin, and A. Bonoli, “An environmental impact assessment of exported wood pellets from canada to europe,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 33, no. 3, pp. 434–441, 2009.
- [117] R. Zwart, U. L. Pommer, A. Nordin, C. J. Gil, and J. Lemus, “Production of solid sustainable energy carriers from biomass by means of torrefaction,” in *Energy Research Centre of the Netherlands. Presented at the 5th International Freiburg Conference on IGCC & XiL Technologies*, pp. 21–24, 2012.
- [118] N. E. T. Laboratory, “NETL life cycle inventory data – srwc biomass torrefaction for coal-biomass cofiring, operation.,” 2012.
- [119] E. Kalkman, S. Trompert, and R. Strijbos, “Biomass residuals in the palm oil & rice industry. a risky business or a huge opportunity?,” *Amsterdam Research Project, Amsterdam*, 2009.
- [120] S. Berg and E.-L. Lindholm, “Energy use and environmental impacts of forest operations in sweden,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 13, no. 1, pp. 33–42, 2005.
- [121] J.-A. Kasurinen, “Developing a tool for techno-economic analysis of pulp mill integrated biorefineries,” 2016.
- [122] T. Joronen, P. Björklund, and M. Bolhär-Nordenkamp, “High quality fuel by steam explosion,” *Proceeding from the European Biomass Conference, 14-18th of May 2017*.
- [123] J. Hong, C. Xu, J. Hong, X. Tan, and W. Chen, “Life cycle assessment of sewage sludge co-incineration in a coal-based power station,” *Waste Management*, vol. 33, no. 9, pp. 1843 – 1852, 2013.



- [124] R. Itten, M. Stucki, and N. Jungbluth, "Life cycle assessment of burning different solid biomass substrates. swiss confederation department of environment," *Transportation, Energy, and Communication*, June, 2011.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: ΛΟΙΠΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

**Πίνακας 7.1:** Σενάριο 1α, +30% μεταφορά με πλοίο - αποτελέσματα

Κατηγορία Επίπτωσης	Σύνολο	Παραγωγή πελατών ξύλου	Ηλεκτρισμός (ΤΤ), ΣΗΘ με καύση πελατών ξύλου	Μεταφορά ακατέργαστων πελατών ξύλου προς μονάδα ΣΗΘ
Υπερθέρμανση του πλανάτη (kg CO <sub>2</sub> .eq)	26.36E-3	7.97E-3	1.44E-3	16.95E-3
Εξάντληση του όζοντος (kg CFC-11eq)	30.22E-9	4.79E-9	17.64E-9	7.79E-9
Ιονίζουσα ακτινοβολία (kBq Co-60eq)	1.20E-3	534.93E-6	24.55E-6	640.78E-6
Φωτ. οχημ. όζοντος, ανθρώπινη υγεία (kg NO <sub>x</sub> .eq)	311.26E-6	36.39E-6	83.19E-6	191.67E-6
Σχηματισμός σωματιδίων (μg PM2.5.eq)	109.98E-6	19.21E-6	11.13E-6	79.64E-6
Φωτ. οχημ. όζοντος, γεωσφαιρικών οκκοσυστ/των (kg NO <sub>x</sub> .eq)	315.45E-6	37.66E-6	84.38E-6	193.41E-6
Οξίνιση γεωσφαιρικών οκκοσυστ/των (kg SO <sub>2</sub> .eq)	308.15E-6	32.90E-6	34.77E-6	240.48E-6
Ευτροφισμός οκκοσυστ/των γλυκού νερού (kg Peq)	5.34E-6	2.79E-6	567.53E-9	1.98E-6
Ευτροφισμός θαλάσσιων οκκοσυστ/των (kg Neg)	388.46E-9	224.62E-9	23.74E-9	140.09E-9
Οικοτοξικότητα γεωσφαιρικών οκκοσυστ/των (kg 1,4-DCBeq)	133.18E-3	43.27E-3	8.78E-3	81.13E-3
Οικοτοξικότητα οκκοσυστ/των γλυκού νερού (kg 1,4-DCBeq)	1.01E-3	282.50E-6	594.13E-6	130.98E-6
Οικοτοξικότητα θαλάσσιων οκκοσυστ/των (kg 1,4-DCBeq)	1.45E-3	397.59E-6	832.48E-6	220.95E-6
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογόνα (kg 1,4-DCBeq)	910.76E-6	414.91E-6	160.40E-6	335.45E-6
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογόνα (kg 1,4-DCBeq)	31.93E-3	7.49E-3	20.64E-3	3.80E-3
Χρήση γης (m <sup>2</sup> )	70.98E-3	70.63E-3	24.60E-6	325.83E-6
Εξάντληση πόρων μεταλλευμάτων (kg Cueq)	72.88E-6	34.29E-6	16.66E-6	21.93E-6
Εξάντληση ορυκτών πόρων (kg Oileq)	7.78E-3	2.13E-3	188.05E-6	5.46E-3
Χρήση νερού (m <sup>3</sup> )	5.45E-3	404.17E-6	4.99E-3	49.60E-6

**Πίνακας 7.2:** Σενάριο 1α, -30% μεταφορά με πλοίο - αποτελέσματα

Κατηγορία Επίπτωσης	Σύνολο	Παραγωγή πελλετών ξύλου	Ηλεκτρισμός (ΥΤ), ΣΗΘ με καύση πελλετών ξύλου	Μεταφορά ακατέργαστων πελλετών ξύλου προς μονάδα ΣΗΘ
Υπερθέρμανση του πλανήτη (kg CO <sub>2</sub> ,eq)	19.89E-3	7.97E-3	1.44E-3	10.49E-3
Εξάντληση του όζοντος (kg CFC-11eq)	27.25E-9	4.79E-9	17.64E-9	4.81E-9
Ιονίζουσα ακτινοβολία (kBq Co-60eq)	949.26E-6	534.93E-6	24.55E-6	389.78E-6
Φωτ. σχημ. όζοντος, ανθρώπινη υγεία (kg NO <sub>x</sub> ,eq)	229.01E-6	36.39E-6	83.19E-6	109.43E-6
Σχηματισμός σωματιδίων (μg PM2.5,eq)	75.00E-6	19.21E-6	11.13E-6	44.66E-6
Φωτ. σχημ. όζοντος, χερσαίων οικοσυστ/των (kg NO <sub>x</sub> ,eq)	232.56E-6	37.66E-6	84.38E-6	110.52E-6
Οξίνιση χερσαίων οικοσυστ/των (kg SO <sub>2</sub> ,eq)	201.19E-6	32.90E-6	34.77E-6	133.53E-6
Ευτροφισμός οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg Peq)	4.51E-6	2.79E-6	567.53E-9	1.16E-6
Ευτροφισμός θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg Neq)	331.35E-9	224.62E-9	23.74E-9	82.98E-9
Οικοτοξικότητα χερσαίων οικοσυστ/των (kg 1,4-DCBeq)	121.25E-3	43.27E-3	8.78E-3	69.19E-3
Οικοτοξικότητα οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg 1,4-DCBeq)	966.43E-6	282.50E-6	594.13E-6	89.81E-6
Οικοτοξικότητα θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg 1,4-DCBeq)	1.39E-3	397.59E-6	832.48E-6	156.71E-6
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογόνα (kg 1,4-DCBeq)	780.13E-6	414.91E-6	160.40E-6	204.81E-6
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογόνα (kg 1,4-DCBeq)	30.87E-3	7.49E-3	20.64E-3	2.74E-3
Χρήση γης (m <sup>2</sup> )	70.94E-3	70.63E-3	24.60E-6	283.84E-6
Εξάντληση πόρων μεταλλευμάτων (kg Cueq)	65.03E-6	34.29E-6	16.66E-6	14.08E-6
Εξάντληση ορυκτών πόρων (kg Oileq)	5.76E-3	2.13E-3	188.05E-6	3.44E-3
Χρήση νερού (m <sup>3</sup> )	5.43E-3	404.17E-6	4.99E-3	31.37E-6

**Πίνακας 7.3:** Σενάριο 1α, παραγωγή ηλεκτρισμού από το δίκτυο - αποτελέσματα

Κατηγορία Επίλυσης	Σύνολο	Παραγωγή πελατών ξύλου	Ηλεκτρισμός (ΤΤ), ΣΗΘ με καύση πελατών ξύλου	Μεταφορά ακατέργαστων πελατών ξύλου προς μονάδα ΣΗΘ
Υπερέπιμωση του πλανάτη (kg CO <sub>2</sub> .eq)	2.31E-02	7.97E-03	1.44E-03	1.37E-02
Εξάντληση του όζοντος (kg CFC-11eq)	2.87E-08	4.79E-09	1.76E-08	6.30E-09
Ιονίζουσα ακτινοβολία (kBq Co-60eq)	1.07E-03	5.35E-04	2.45E-05	5.15E-04
Φωτ. οχημ. όζοντος, ανθρώπινη υγεία (kg NO <sub>x</sub> .eq)	2.70E-04	3.64E-05	8.32E-05	1.51E-04
Σχηματισμός σωματιδίων (μg PM2.5.eq)	9.25E-05	1.92E-05	1.11E-05	6.22E-05
Φωτ. οχημ. όζοντος, γεωσφαιερικών (kg NO <sub>x</sub> .eq)	2.74E-04	3.77E-05	8.44E-05	1.52E-04
Οξίνιση γεωσφαιερικών (kg SO <sub>2</sub> .eq)	2.55E-04	3.29E-05	3.48E-05	1.87E-04
Ευτροφισμός οικουστ/των γλυκού νερού (kg Peq)	4.93E-06	2.79E-06	5.68E-07	1.57E-06
Ευτροφισμός θαλάσσιων οικουστ/των (kg Neq)	3.60E-07	2.25E-07	2.37E-08	1.12E-07
Οικοτοξικότητα γεωσφαιερικών (kg 1,4-DCBeq)	1.27E-01	4.33E-02	8.78E-03	7.52E-02
Οικοτοξικότητα οικουστ/των γλυκού νερού (kg 1,4-DCBeq)	9.87E-04	2.82E-04	5.94E-04	1.10E-04
Οικοτοξικότητα θαλάσσιων οικουστ/των (kg 1,4-DCBeq)	1.42E-03	3.98E-04	8.32E-04	1.89E-04
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογόνα (kg 1,4-DCBeq)	8.45E-04	4.15E-04	1.60E-04	2.70E-04
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογόνα (kg 1,4-DCBeq)	3.14E-02	7.49E-03	2.06E-02	3.27E-03
Χρήση γης (m <sup>2</sup> )	7.10E-02	7.06E-02	2.46E-05	3.05E-04
Εξάντληση πόρων μεταλλευμάτων (kg Cueq)	6.90E-05	3.43E-05	1.67E-05	1.80E-05
Εξάντληση ορυκτών πόρων (kg Oileq)	6.77E-03	2.13E-03	1.88E-04	4.45E-03
Χρήση νερού (m <sup>3</sup> )	5.44E-03	4.04E-04	4.99E-03	4.05E-05

**Πίνακας 7.4:** Σενάριο Ιβ, παροχή ηλεκτρισμού από το δίκτυο - αποτελέσματα

Κατηγορία Επίπτωσης	Σύνολο	Ηλεκτρισμός (ΥΤ), ΣΗΘ με καύση φρυγμέ-νου ξύλου	Μεταφορά φρυγμέ-νων πελλετών προς μονάδα ΣΗΘ	Φρύξη πελλετών ξύλου
Υπερθέρμανση του πλανήτη (kg CO <sub>2</sub> ,eq)	46.09E-3	1.55E-3	4.51E-3	40.02E-3
Εξάντληση του όζοντος (kg CFC-11eq)	72.44E-9	17.68E-9	2.07E-9	52.69E-9
Ιονίζουσα ακτινοβολία (kBq Co-60eq)	2.60E-3	28.00E-6	160.05E-6	2.41E-3
Φωτ. σχημ. όζοντος, ανθρώπινη υγεία (kg NO <sub>x</sub> ,eq)	364.30E-6	83.67E-6	36.30E-6	244.33E-6
Σχηματισμός σωματιδίων (μg PM2.5,eq)	140.52E-6	11.36E-6	13.78E-6	115.38E-6
Φωτ. σχημ. όζοντος, χερσαίων οικοσυστ/των (kg NO <sub>x</sub> ,eq)	369.71E-6	84.87E-6	36.79E-6	248.05E-6
Οξίνιση χερσαίων οικοσυστ/των (kg SO <sub>2</sub> ,eq)	315.71E-6	35.38E-6	39.46E-6	240.87E-6
Ευτροφισμός οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg P <sub>eq</sub> )	14.79E-6	918.37E-9	413.63E-9	13.46E-6
Ευτροφισμός θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg N <sub>eq</sub> )	4.23E-6	24.82E-9	31.38E-9	4.17E-6
Οικοτοξικότητα χερσαίων οικοσυστ/των (kg 1,4-DCBeq)	269.23E-3	9.21E-3	52.31E-3	207.71E-3
Οικοτοξικότητα οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg 1,4-DCBeq)	3.01E-3	1.99E-3	49.07E-6	964.37E-6
Οικοτοξικότητα θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg 1,4-DCBeq)	4.96E-3	2.79E-3	91.22E-6	2.08E-3
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογόνα (kg 1,4-DCBeq)	4.60E-3	199.51E-6	85.02E-6	4.32E-3
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογόνα (kg 1,4-DCBeq)	119.89E-3	70.17E-3	1.64E-3	48.08E-3
Χρήση γης (m <sup>2</sup> )	133.94E-3	39.14E-6	219.69E-6	133.68E-3
Εξάντληση πόρων μεταλλευμάτων (kg Cueq)	116.10E-6	16.90E-6	6.68E-6	92.53E-6
Εξάντληση ορυκτών πόρων (kg Oileq)	12.53E-3	224.25E-6	1.55E-3	10.76E-3
Χρήση νερού (m <sup>3</sup> )	5.26E-3	4.99E-3	14.32E-6	256.26E-6

**Πίνακας 7.5:** Σενάριο 2α, -30% μεταφορά πλώλου - αποτελέσματα

Κατηγορία Ειρήτωσης	Σύνολο	Παραγωγή	Πελάετροποίηση	Μεταφορά	Μεταφορά	Ηλεκτρισμός (ΤΤ), ΣΗΘ με καύση ακα- τέργαστων πτελέτων ΕFB
		ΕFB ελαουπγείο από	ΕFB	ΕFB μονάδα κατεργασίας ππο-	ΣΗΘ ππο-	
Υπερθέβιαση του πλάστη (kg CO <sub>2</sub> .eq)	1.02E-01	3.84E-02	2.44E-02	1.12E-02	2.68E-02	1.53E-03
Εξάντληση του όζοντος (kg CFC-11eq)	8.80E-08	9.86E-09	4.33E-08	4.89E-09	1.23E-08	1.77E-08
Ιονίζουσα ακτινοβολία (kBq Co-60eq)	1.70E-03	3.27E-04	4.65E-05	2.71E-04	1.02E-03	2.74E-05
Φωτ. οχημ. όζοντος, ανθρόπινη υγεία (kg NO <sub>x</sub> .eq)	5.92E-04	5.82E-05	8.72E-05	4.64E-05	3.17E-04	8.36E-05
Σχηματισμός σωματιδίων (μg PM <sub>2.5</sub> .eq)	3.79E-04	4.13E-05	1.80E-04	1.33E-05	1.33E-04	1.13E-05
Φωτ. οχημ. όζοντος, χερσαίων οικουστ/των (kg NO <sub>x</sub> .eq)	6.05E-04	5.96E-05	9.45E-05	4.73E-05	3.19E-04	8.48E-05
Οξίνιση χερσαίων οικουστ/των (kg SO <sub>2</sub> .eq)	6.51E-04	7.72E-05	1.03E-04	3.25E-05	4.03E-04	3.53E-05
Ευροποιμός οικουστ/των γλυκού νερού (kg Peg)	1.90E-05	5.22E-06	8.72E-06	9.65E-07	3.24E-06	8.62E-07
Ευροποιμός θαλάσσιων οικουστ/των (kg Neq)	1.14E-06	2.43E-07	5.71E-07	7.47E-08	2.27E-07	2.46E-08
Οικοτοξικότητα χερσαίων οικουστ/των (kg 1,4-DCBeq)	3.16E-01	7.45E-02	1.04E-02	1.22E-01	1.00E-01	9.14E-03
Οικοτοξικότητα οικουστ/των γλυκού νερού (kg 1,4-DCBeq)	3.09E-03	6.25E-04	2.90E-04	2.11E-04	1.94E-04	1.77E-03
Οικοτοξικότητα θαλάσσιων οικουστ/των (kg 1,4-DCBeq)	4.46E-03	9.10E-04	4.08E-04	3.48E-04	3.20E-04	2.47E-03
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογόνα (kg 1,4-DCBeq)	4.98E-03	3.28E-03	6.96E-04	2.76E-04	5.35E-04	1.93E-04
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογόνα (kg 1,4-DCBeq)	1.04E-01	2.05E-02	8.23E-03	7.47E-03	5.45E-03	6.22E-02
Χρήση γης (m <sup>2</sup> )	2.90E-03	1.87E-03	2.00E-04	4.04E-04	3.94E-04	3.68E-05
Εξάντληση πόρων μεταλλευμάτων (kg Cuq)	3.79E-04	2.97E-04	5.08E-06	2.63E-05	3.39E-05	1.69E-05
Εξάντληση ορυκτών πόρων (kg Oilq)	2.14E-02	2.55E-03	6.28E-03	3.82E-03	8.56E-03	2.18E-04
Χρήση νερού (m <sup>3</sup> )	5.44E-03	2.18E-04	1.20E-04	3.22E-05	7.74E-05	4.99E-03



**Πίνακας 7.6:** Σενάριο 2α, +30% μεταφορά πλίου - αποτελεσίματα

Κατηγορία Επίπτωσης	Σύνολο	Παραλαβή EFB από ελαιουργείο	Πελλετοποίηση EFB	Μεταφορά EFB προς μονάδα προ-κατεργασίας	Μεταφορά πελλετών προς μονάδα ΣΗΘ	Ηλεκτρισμός (ΤΤ), ΣΗΘ με καύση ακατέργαστων πελλετών EFB
Υπερθέρμανση του πλανήτη (kg CO <sub>2</sub> ,eq)	1.00E-01	3.84E-02	1.90E-03	1.12E-02	4.72E-02	1.53E-03
Εξάντληση του όζοντος (kg CFC-11eq)	9.67E-08	9.86E-09	4.26E-08	4.89E-09	2.17E-08	1.77E-08
Ιονίζουσα ακτινοβολία (kBq Co-60eq)	2.45E-03	3.27E-04	8.77E-06	2.71E-04	1.82E-03	2.74E-05
Φωτ. σχημ. όζοντος, ανθρόπινη υγεία (kg NO <sub>x</sub> ,eq)	8.22E-04	5.82E-05	5.76E-05	4.64E-05	5.76E-04	8.36E-05
Σχηματισμός σωματιδίων (μg PM2.5,eq)	4.41E-04	4.13E-05	1.32E-04	1.33E-05	2.43E-04	1.13E-05
Φωτ. σχημ. όζοντος, θερασίων οικοσυστ/των (kg NO <sub>x</sub> ,eq)	8.37E-04	5.96E-05	6.44E-05	4.73E-05	5.81E-04	8.48E-05
Οξίνιση θερασίων οικοσυστ/των (kg SO <sub>2</sub> ,eq)	9.26E-04	7.72E-05	4.09E-05	3.25E-05	7.40E-04	3.53E-05
Ευτροφισμός οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg P,eq)	1.30E-05	5.21E-06	1.13E-07	9.65E-07	5.86E-06	8.62E-07
Ευτροφισμός θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg N,eq)	7.55E-07	2.42E-07	5.78E-09	7.47E-08	4.07E-07	2.46E-08
Οικοτοξικότητα θερασίων οικοσυστ/των (kg 1,4-DCBeq)	3.45E-01	7.45E-02	1.11E-03	1.22E-01	1.38E-01	9.14E-03
Οικοτοξικότητα οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg 1,4-DCBeq)	2.94E-03	6.25E-04	1.44E-05	2.11E-04	3.24E-04	1.77E-03
Οικοτοξικότητα θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg 1,4-DCBeq)	4.27E-03	9.10E-04	2.02E-05	3.48E-04	5.23E-04	2.47E-03
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογόνα (kg 1,4-DCBeq)	4.72E-03	3.28E-03	2.34E-05	2.76E-04	9.47E-04	1.93E-04
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογόνα (kg 1,4-DCBeq)	9.94E-02	2.05E-02	4.47E-04	7.47E-03	8.80E-03	6.22E-02
Χρήση γης (m <sup>2</sup> )	2.84E-03	1.87E-03	4.50E-06	4.04E-04	5.27E-04	3.68E-05
Εξάντληση πόρων μεταλλευμάτων (kg Cu,eq)	4.03E-04	2.97E-04	4.66E-06	2.63E-05	5.87E-05	1.69E-05
Εξάντληση ορυκτών πόρων (kg Oil,eq)	2.16E-02	2.55E-03	4.50E-05	3.82E-03	1.50E-02	2.18E-04
Χρήση νερού (m <sup>3</sup> )	5.38E-03	2.18E-04	9.62E-07	3.22E-05	1.35E-04	4.99E-03

**Πίνακας 7.7:** Σενάριο 2α, παροχή ηλεκτρισμού από το δίκτυο - απορρέοντα

Κατηγορία Ειρώσεως	Σύνολο	Παραγωγή EFB από ελαιουργείο		Περίτροπηση EFB		Μεταφορά EFB προς μονάδα προ-κατεργασίας		Μεταφορά EFB προς μονάδα SHΘ		Ηλεκτρισμός (ΤΤ), SHΘ με κύση ακε-τέργαστων πετρελίων EFB
		EFB από ελαιουργείο	EFB	EFB προς μονάδα προ-κατεργασίας	EFB προς μονάδα SHΘ	SHΘ				
Υπερθέγνωση του πλάστη (kg CO <sub>2</sub> .eq)	112.53E-3	38.42E-3	24.38E-3	11.17E-3	37.03E-3	1.53E-3				
Εξάντληση του όζοντος (kg CFC-11eq)	92.74E-9	9.86E-9	43.29E-9	4.89E-9	17.03E-9	17.67E-9				
Ιονίζουσα ακτινοβολία (kBq Co-60eq)	2.09E-3	327.27E-6	46.52E-6	271.40E-6	1.42E-3	27.45E-6				
Φωτ. οχημ. όζοντος, ανθρόπινη υγεία (kg NO <sub>x</sub> .eq)	721.80E-6	58.23E-6	87.18E-6	46.40E-6	446.40E-6	83.59E-6				
Σχηματισμός σωματιδίων (µg PM <sub>2.5</sub> .eq)	434.28E-6	41.32E-6	180.45E-6	13.26E-6	187.94E-6	11.32E-6				
Φωτ. οχημ. όζοντος, χερσαίων οκκουστ/των (kg NO <sub>x</sub> .eq)	736.28E-6	59.58E-6	94.46E-6	47.31E-6	450.13E-6	84.79E-6				
Οξείωση χερσαίων οκκουστ/των (kg SO <sub>2</sub> .eq)	819.55E-6	77.22E-6	103.00E-6	32.49E-6	571.55E-6	35.28E-6				
Ευροποιολός οκκουστ/των γλυκού νερού (kg Pec)	20.32E-6	5.22E-6	8.72E-6	964.66E-9	4.55E-6	861.86E-9				
Ευροποιολός θαλάσσιων οκκουστ/των (kg Nec)	1.23E-6	242.69E-9	570.95E-9	74.71E-9	317.12E-9	24.64E-9				
Οικοτοξικότητα χερσαίων οκκουστ/των (kg 1,4-DCBeq)	334.93E-3	74.54E-3	10.38E-3	121.66E-3	119.21E-3	9.14E-3				
Οικοτοξικότητα οκκουστ/των γλυκού νερού (kg 1,4-DCBeq)	3.15E-3	625.19E-6	290.08E-6	210.83E-6	259.25E-6	1.77E-3				
Οικοτοξικότητα θαλάσσιων οκκουστ/των (kg 1,4-DCBeq)	4.56E-3	910.39E-6	408.08E-6	348.00E-6	421.39E-6	2.47E-3				
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογόνια (kg 1,4-DCBeq)	5.19E-3	3.28E-3	695.57E-6	276.14E-6	740.68E-6	193.21E-6				
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογόνια (kg 1,4-DCBeq)	105.52E-3	20.51E-3	8.23E-3	7.47E-3	7.13E-3	62.19E-3				
Χρήση γης (m <sup>2</sup> )	2.97E-3	1.87E-3	199.67E-6	403.75E-6	460.64E-6	36.80E-6				
Εξάντληση πόρων μεταλλευμάτων (kg Cuq)	391.12E-6	296.55E-6	5.08E-6	26.32E-6	46.31E-6	16.86E-6				
Εξάντληση ορυκτών πόρων (kg Oilq)	24.63E-3	2.55E-3	6.28E-3	3.82E-3	11.76E-3	218.42E-6				
Χρήση νερού (m <sup>3</sup> )	5.47E-3	218.42E-6	119.86E-6	32.24E-6	106.21E-6	4.99E-3				

**Πίνακας 7.8:** Σενάριο 3α, παροχή ηλεκτρισμού από το δίκτυο - αποτελέσματα

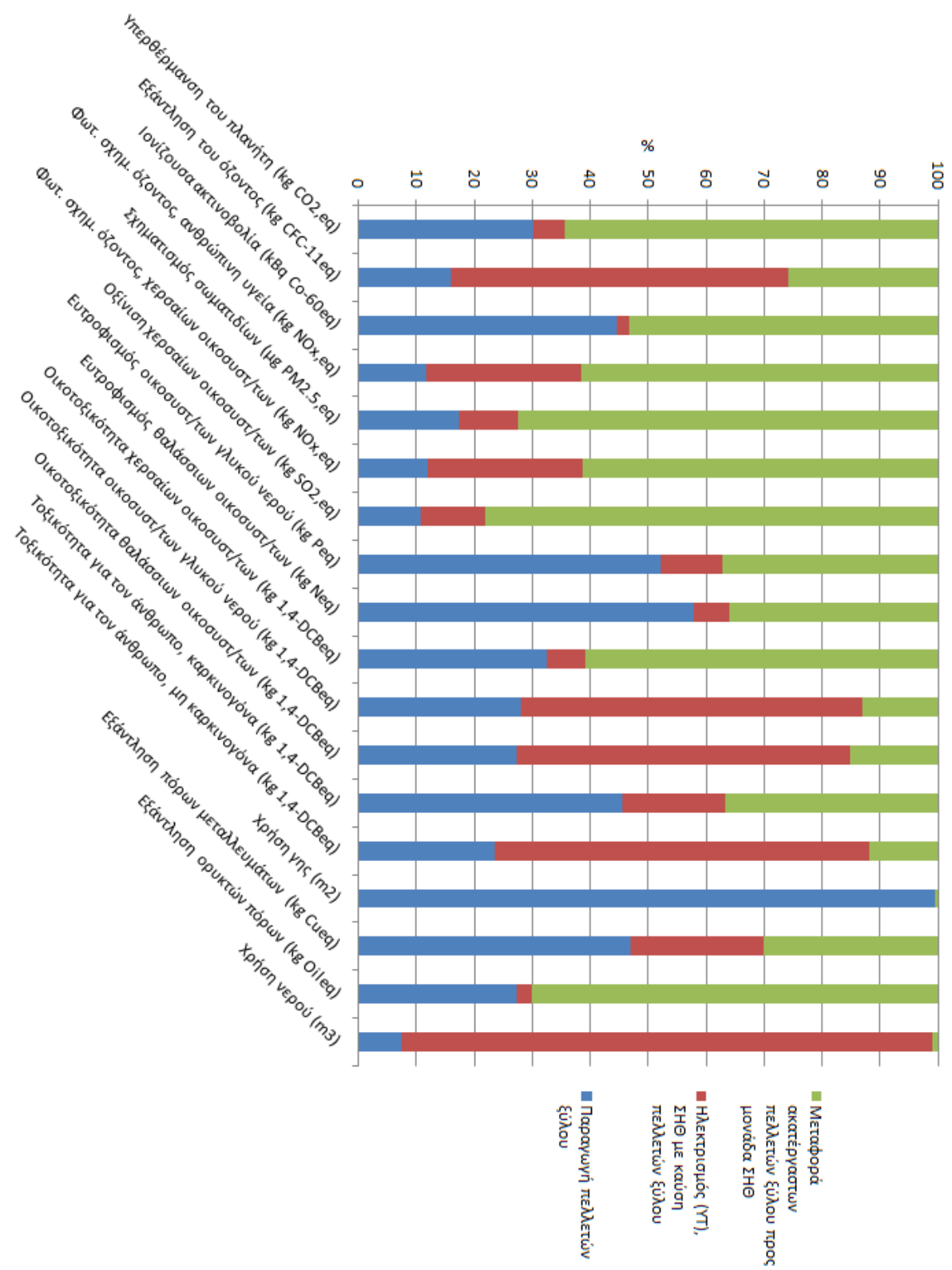
Κατηγορία Επίπτωσης	Σύνολο	Παραλαβή και πελετοποίηση φλοιού ξύλου	Εργασίες συγκομιδή φλοιού ξύλου	- Τσιπς θρελάκης από δάση με βιώσιμη διαχείριση	ερευνητική	Μεταφορά ακατέργαστων πελετών προς μονάδα ΣΗΘ, τρένο	Μεταφορά πρώτης ύλης στο πριονιστήριο	Ηλεκτρισμός (ΥΤ) - ΣΗΘ με καύση φλοιού ξύλου
Υπερθέρμανση του πλανήτη (kg CO <sub>2</sub> ,eq)	50.76E-3	28.26E-3	175.08E-6	5.84E-3	7.72E-3	7.22E-3	7.22E-3	1.55E-3
Εξάντληση του όζοντος (kg CFC-11eq)	71.22E-9	41.12E-9	1.81E-9	3.78E-9	3.54E-9	3.30E-9	3.30E-9	17.68E-9
Ιονίζουσα ακτινοβολία (kBq Co-60eq)	9.63E-3	8.52E-3	17.76E-6	105.15E-6	714.64E-6	238.32E-6	238.32E-6	28.03E-6
Φωτ. σχημ. όζοντος, ανθρόπινη υγεία (kg NO <sub>x</sub> ,eq)	309.98E-6	101.83E-6	4.07E-6	29.98E-6	57.31E-6	33.11E-6	33.11E-6	83.67E-6
Σχηματισμός σωματιδίων (μg PM2.5,eq)	196.27E-6	146.04E-6	931.56E-9	7.75E-6	20.72E-6	9.48E-6	9.48E-6	11.36E-6
Φωτ. σχημ. όζοντος, χερσαίων οικοσυστ/των (kg NO <sub>x</sub> ,eq)	320.32E-6	107.95E-6	4.10E-6	31.33E-6	58.10E-6	33.96E-6	33.96E-6	84.87E-6
Οξίνιση χερσαίων οικοσυστ/των (kg SO <sub>2</sub> ,eq)	319.57E-6	182.61E-6	4.01E-6	18.26E-6	57.81E-6	21.50E-6	21.50E-6	35.38E-6
Ευτροφισμός οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg P,eq)	29.91E-6	26.29E-6	21.06E-9	482.95E-9	1.73E-6	467.74E-9	467.74E-9	920.65E-9
Ευτροφισμός θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg N,eq)	2.45E-6	1.94E-6	211.06E-9	116.82E-9	119.20E-9	40.19E-9	40.19E-9	24.82E-9
Οικοτοξικότητα χερσαίων οικοσυστ/των (kg 1,4-DCBeq)	780.96E-3	553.96E-3	313.04E-6	15.03E-3	66.61E-3	135.84E-3	135.84E-3	9.21E-3
Οικοτοξικότητα οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg 1,4-DCBeq)	7.09E-3	4.82E-3	1.96E-6	50.67E-6	118.77E-6	102.65E-6	102.65E-6	2.00E-3
Οικοτοξικότητα θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg 1,4-DCBeq)	10.04E-3	6.76E-3	3.07E-6	76.77E-6	193.98E-6	200.97E-6	200.97E-6	2.80E-3
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογόνα (kg 1,4-DCBeq)	5.10E-3	4.34E-3	3.01E-6	112.33E-6	316.19E-6	128.81E-6	128.81E-6	199.76E-6
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογόνα (kg 1,4-DCBeq)	220.43E-3	141.17E-3	59.49E-6	1.34E-3	3.69E-3	3.68E-3	3.68E-3	70.49E-3
Χρήση γης (m <sup>2</sup> )	149.26E-3	5.25E-3	3.34E-6	143.01E-3	381.91E-6	577.23E-6	577.23E-6	39.23E-6
Εξάντληση πόρων μεταλλευμάτων (kg Cu,eq)	868.41E-6	802.06E-6	304.12E-9	15.35E-6	21.69E-6	12.11E-6	12.11E-6	16.90E-6
Εξάντληση ορυκτών πόρων (kg Oil,eq)	13.60E-3	6.21E-3	188.54E-6	1.88E-3	2.46E-3	2.63E-3	2.63E-3	224.49E-6
Χρήση νερού (m <sup>3</sup> )	5.41E-3	337.14E-6	2.53E-6	17.07E-6	35.06E-6	24.83E-6	24.83E-6	4.99E-3

**Πίνακας 7.9:** Σενάριο 3α, μεταφορά χωρίς τρένο - ατοτελέσματα

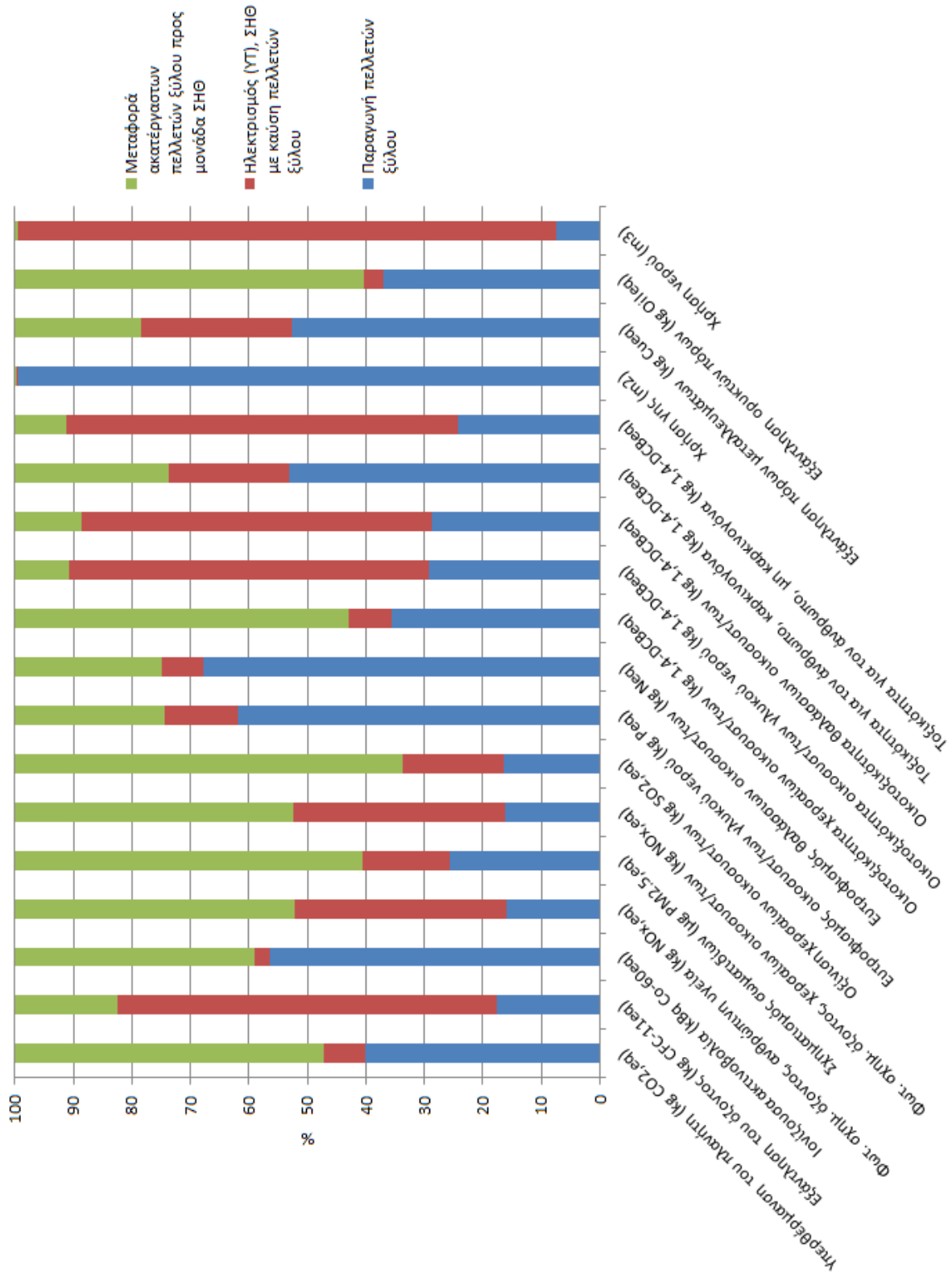
Κατηγορία Ειρώσεως	Σύνολο	Παραλαβή και πελάστηση φύλου Ξύλου	Εργασίες συγκομιδή για παραλαβή φύλου Ξύλου	- Τοις επι- με δίαγνωση	Μεταφορά ακατέργαστων πρώτων προς στο πρώην- πιο	Μεταφορά ύλης κτύ - ΣΗΘ με ξύλου	
Υπερθέλιση του πλάστη (kg CO <sub>2</sub> .eq)	47.35E-3	23.45E-3	175.08E-6	5.84E-3	9.11E-3	7.22E-3	1.55E-3
Εξάντληση του όζοντος (kg CFC-11eq)	77.17E-9	46.44E-9	1.81E-9	3.78E-9	4.17E-9	3.30E-9	17.68E-9
Ιονίζουσα ακτινοβολία (kBq Co-60eq)	1.53E-3	826.27E-6	17.76E-6	105.15E-6	313.82E-6	238.32E-6	28.03E-6
Φωτ. οχημ. όζοντος, ανθρόπινη υγεία (kg NO <sub>x</sub> .eq)	341.30E-6	130.34E-6	4.07E-6	29.98E-6	60.12E-6	33.11E-6	83.67E-6
Σχηματισμός σωματιδίων (μg PM <sub>2.5</sub> .eq)	199.27E-6	148.55E-6	931.56E-9	7.75E-6	21.20E-6	9.48E-6	11.36E-6
Φωτ. οχημ. όζοντος, χερσαίων οκκουστ/των (kg NO <sub>x</sub> .eq)	352.34E-6	136.92E-6	4.10E-6	31.33E-6	61.15E-6	33.96E-6	84.87E-6
Οξείωση χερσαίων οκκουστ/των (kg SO <sub>2</sub> .eq)	332.65E-6	195.78E-6	4.01E-6	18.26E-6	57.72E-6	21.50E-6	35.38E-6
Ευροποιολός θαλάσσιων οκκουστ/των (kg Pec)	27.53E-6	24.90E-6	21.06E-9	482.95E-9	732.86E-9	467.74E-9	920.65E-9
Ευροποιολός θαλάσσιων οκκουστ/των (kg Nec)	2.19E-6	1.74E-6	211.06E-9	116.82E-9	58.08E-9	40.19E-9	24.82E-9
Οκκοξικότητα χερσαίων οκκουστ/των (kg 1,4-DCBeq)	873.87E-3	580.34E-3	313.04E-6	15.03E-3	133.13E-3	135.84E-3	9.21E-3
Οκκοξικότητα οκκουστ/των γλυκού νερού (kg 1,4-DCBeq)	7.07E-3	4.80E-3	1.96E-6	50.67E-6	111.82E-6	102.65E-6	2.00E-3
Οκκοξικότητα θαλάσσιων οκκουστ/των (kg 1,4-DCBeq)	10.06E-3	6.77E-3	3.07E-6	76.77E-6	213.21E-6	200.97E-6	2.80E-3
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινολόγια (kg 1,4-DCBeq)	4.88E-3	4.27E-3	3.01E-6	112.33E-6	167.86E-6	128.81E-6	199.76E-6
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινολόγια (kg 1,4-DCBeq)	226.93E-3	147.49E-3	59.49E-6	1.34E-3	3.87E-3	3.68E-3	70.49E-3
Χρήση γης (m <sup>2</sup> )	166.11E-3	21.92E-3	3.34E-6	143.01E-3	562.67E-6	577.23E-6	39.23E-6
Εξάντληση πόρων μεταλλευμάτων (kg Cuq)	856.31E-6	797.41E-6	304.12E-9	15.35E-6	14.23E-6	12.11E-6	16.90E-6
Εξάντληση ορυκτών πόρων (kg Oilq)	13.20E-3	5.06E-3	188.54E-6	1.88E-3	3.21E-3	2.63E-3	224.49E-6
Χρήση νερού (m <sup>3</sup> )	5.24E-3	170.77E-6	2.53E-6	17.07E-6	29.93E-6	24.83E-6	4.99E-3

**Πίνακας 7.10:** Σενάριο 3β, παραγωγή ηλεκτρισμού από το δίκτυο - αποτελέσματα

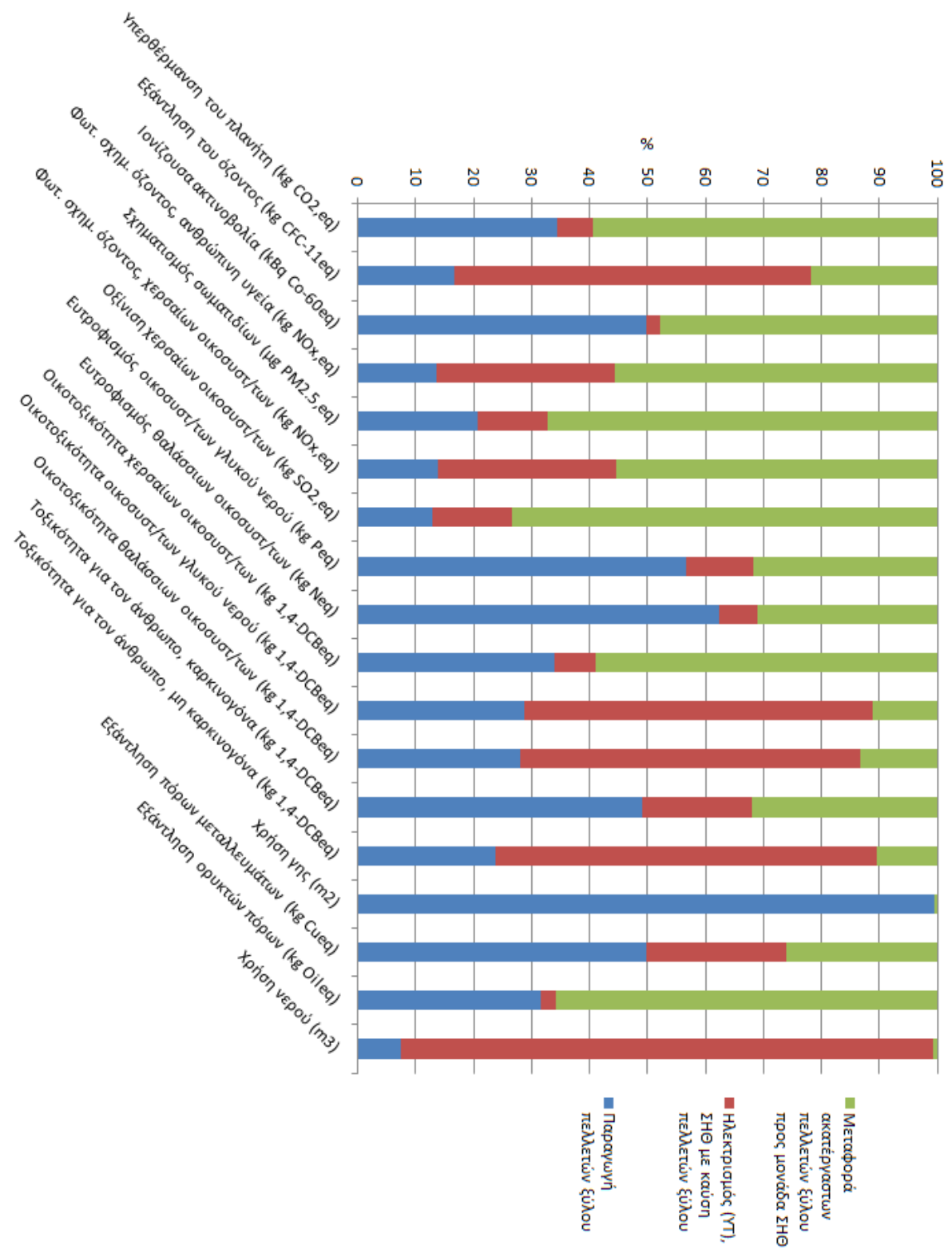
Κατηγορία Επίπτωσης	Σύνολο	Παραλαβή, SE και πέλετο-ποίηση φίλοιού ξύλου	Εργασίες συγκομιδή φίλοιού ξύλου	- Τσιπς θρελάκης από δάση με βιώσιμη διαχείριση	ερευ- δάση	Μεταφορά SE πελλετών φίλοιού προς μονάδα ΣΗΘ	Μεταφορά πρώτης ύλης στο πριονιστή-ριο	Ηλεκτρισμός (ΥΤ) - ΣΗΘ με καύση SE πελλετών φίλοιού ξύλου
Υπερθέρμανση του πλανήτη (kg CO <sub>2</sub> ,eq)	62.41E-03	39.01E-03	178.14E-06	5.92E-03	8.53E-03	7.33E-03	1.44E-03	
Εξάντληση του όζοντος (kg CFC-11eq)	83.36E-09	52.80E-09	1.84E-09	3.83E-09	3.90E-09	3.34E-09	17.64E-09	
Ιονίζουσα ακτινοβολία (kBq Co-60eq)	24.19E-03	23.51E-03	18.07E-06	106.66E-06	293.76E-06	241.74E-06	24.15E-06	
Φωτ. σχημ. όζοντος, ανθρώπινη υγεία (kg NO <sub>x</sub> ,eq)	329.83E-06	122.22E-06	4.15E-06	30.41E-06	56.28E-06	33.58E-06	83.19E-06	
Σχηματισμός σωματιδίων (μg PM2.5,eq)	201.19E-06	151.83E-06	947.86E-09	7.86E-06	19.84E-06	9.61E-06	11.10E-06	
Φωτ. σχημ. όζοντος, χερσαίων οικοσυστ/των (kg NO <sub>x</sub> ,eq)	340.41E-06	128.38E-06	4.17E-06	31.78E-06	57.25E-06	34.44E-06	84.38E-06	
Οξίνιση χερσαίων οικοσυστ/των (kg SO <sub>2</sub> ,eq)	344.28E-06	211.16E-06	4.08E-06	18.52E-06	54.03E-06	21.81E-06	34.68E-06	
Ευτροφισμός οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg P,eq)	30.05E-06	27.93E-06	21.42E-09	489.88E-09	686.02E-09	474.45E-09	453.54E-09	
Ευτροφισμός θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg N,eq)	2.75E-06	2.30E-06	214.75E-09	118.49E-09	54.37E-09	40.77E-09	23.65E-09	
Οικοτοξικότητα χερσαίων οικοσυστ/των (kg 1,4-DCBeq)	826.21E-03	539.18E-03	318.51E-06	15.25E-03	124.62E-03	137.79E-03	9.05E-03	
Οικοτοξικότητα οικοσυστ/των γλυκού νερού (kg 1,4-DCBeq)	5.07E-03	4.68E-03	1.99E-06	51.40E-06	104.67E-06	104.12E-06	126.15E-06	
Οικοτοξικότητα θαλάσσιων οικοσυστ/των (kg 1,4-DCBeq)	7.25E-03	6.58E-03	3.12E-06	77.87E-06	199.58E-06	203.85E-06	178.94E-06	
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογόνα (kg 1,4-DCBeq)	4.91E-03	4.35E-03	3.06E-06	113.94E-06	157.13E-06	130.65E-06	148.27E-06	
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογόνα (kg 1,4-DCBeq)	152.07E-03	139.22E-03	60.53E-06	1.36E-03	3.62E-03	3.73E-03	4.08E-03	
Χρήση γης (m <sup>2</sup> )	158.12E-03	11.91E-03	3.40E-06	145.06E-03	526.71E-06	585.51E-06	21.11E-06	
Εξάντληση πόρων μεταλλευμάτων (kg Cu,eq)	831.92E-06	773.76E-06	309.44E-09	15.57E-06	13.32E-06	12.28E-06	16.67E-06	
Εξάντληση ορυκτών πόρων (kg Oil,eq)	16.78E-03	8.82E-03	191.84E-06	1.91E-03	3.00E-03	2.67E-03	189.17E-06	
Χρήση νερού (m <sup>3</sup> )	5.76E-03	700.01E-06	2.58E-06	17.31E-06	28.02E-06	25.18E-06	4.99E-03	



**Σχήμα 7.1:** Σενάριο Ια, παροχή ηλεκτρισμού από το δίκτυο, +30% μεταφορά - συγκριτικά αποτελέσματα



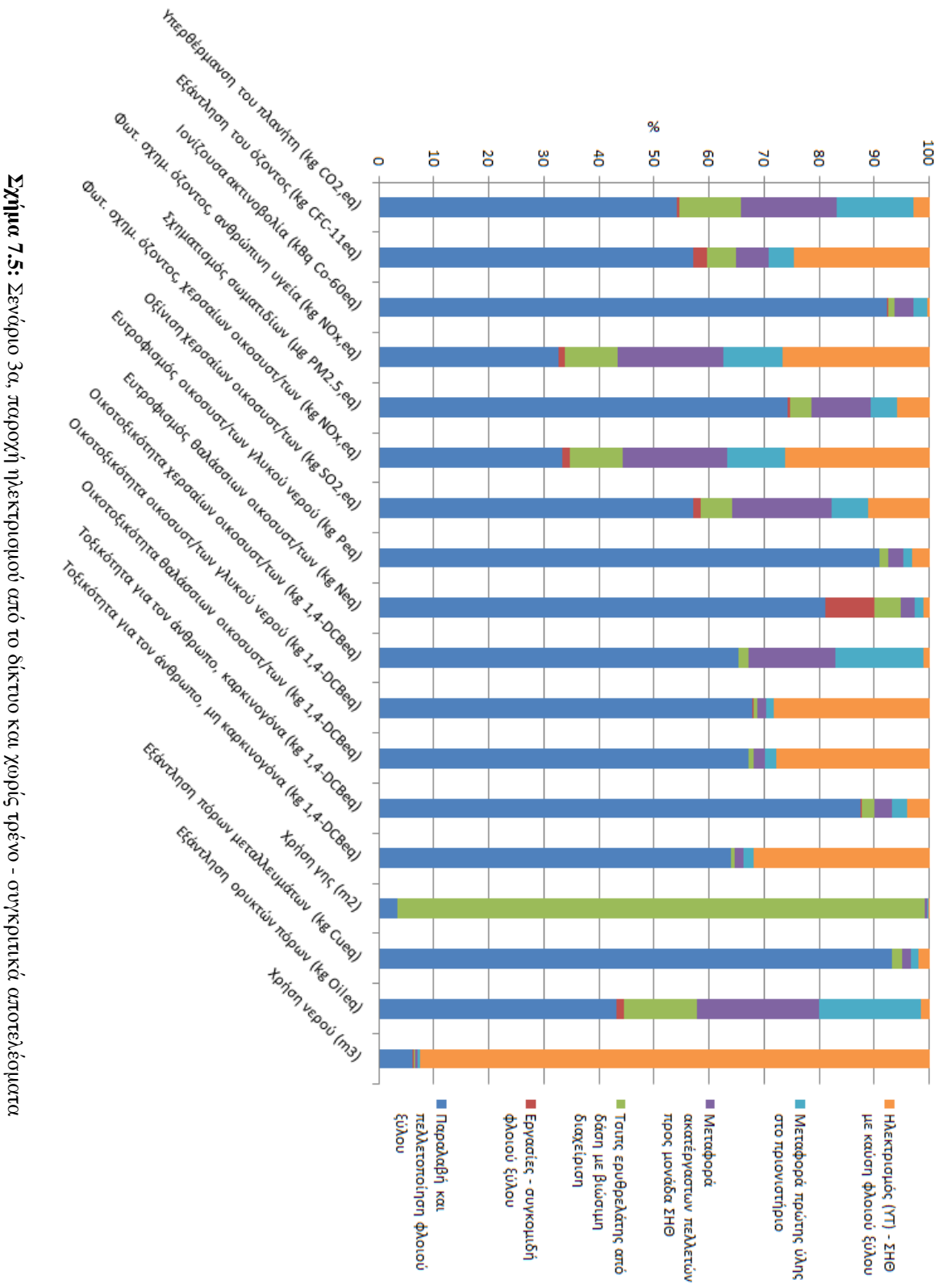
Σχήμα 7.2: Σενάριο 1α, παροχή ηλεκτρισμού από το δίκτυο, -30% μεταφορά - συγκριτικά αποτελέσματα



Σχήμα 7.3: Σενάριο 1α, παροχή ηλεκτρισμού από το δίκτυο - συγκριτικά αποτελέσματα

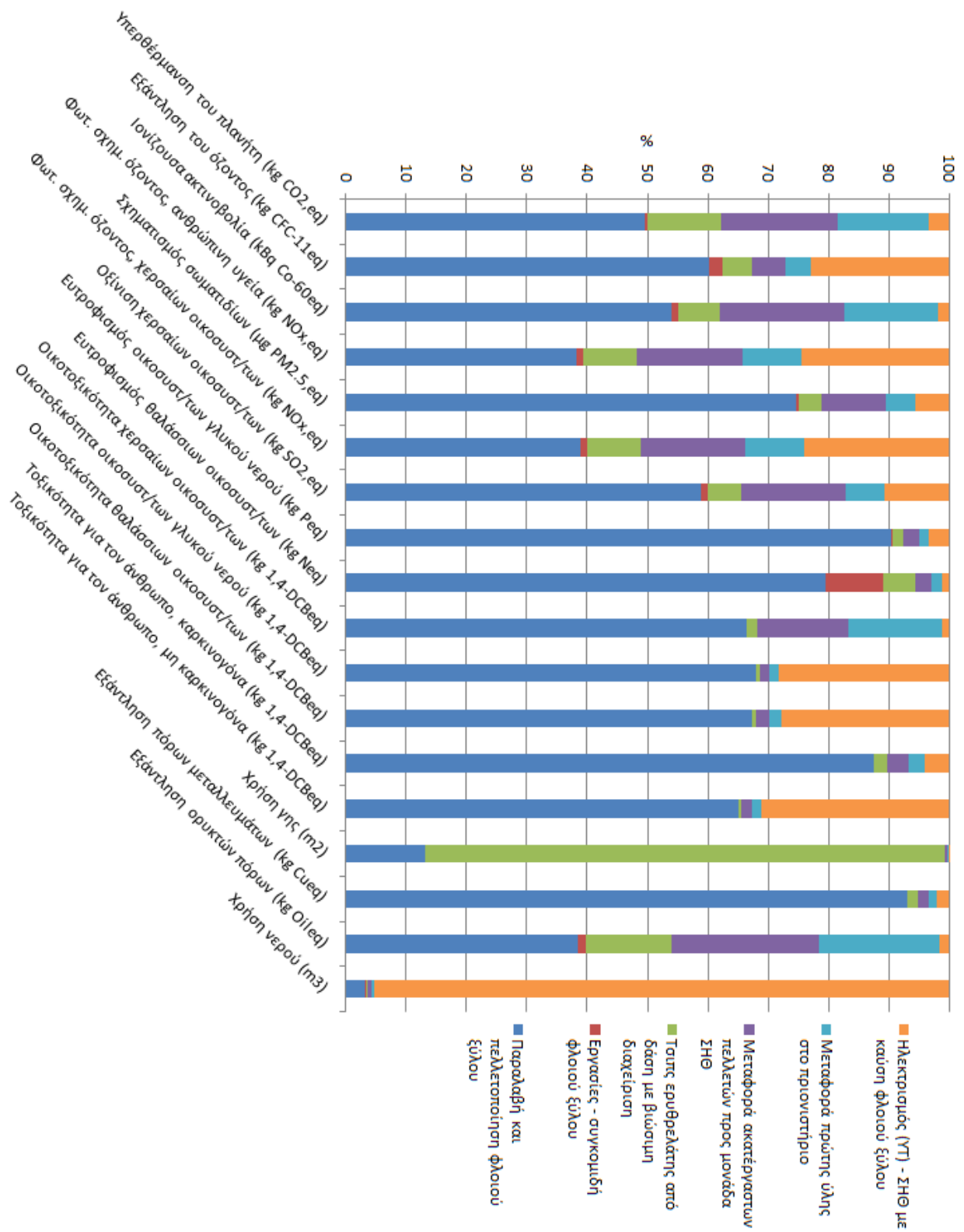




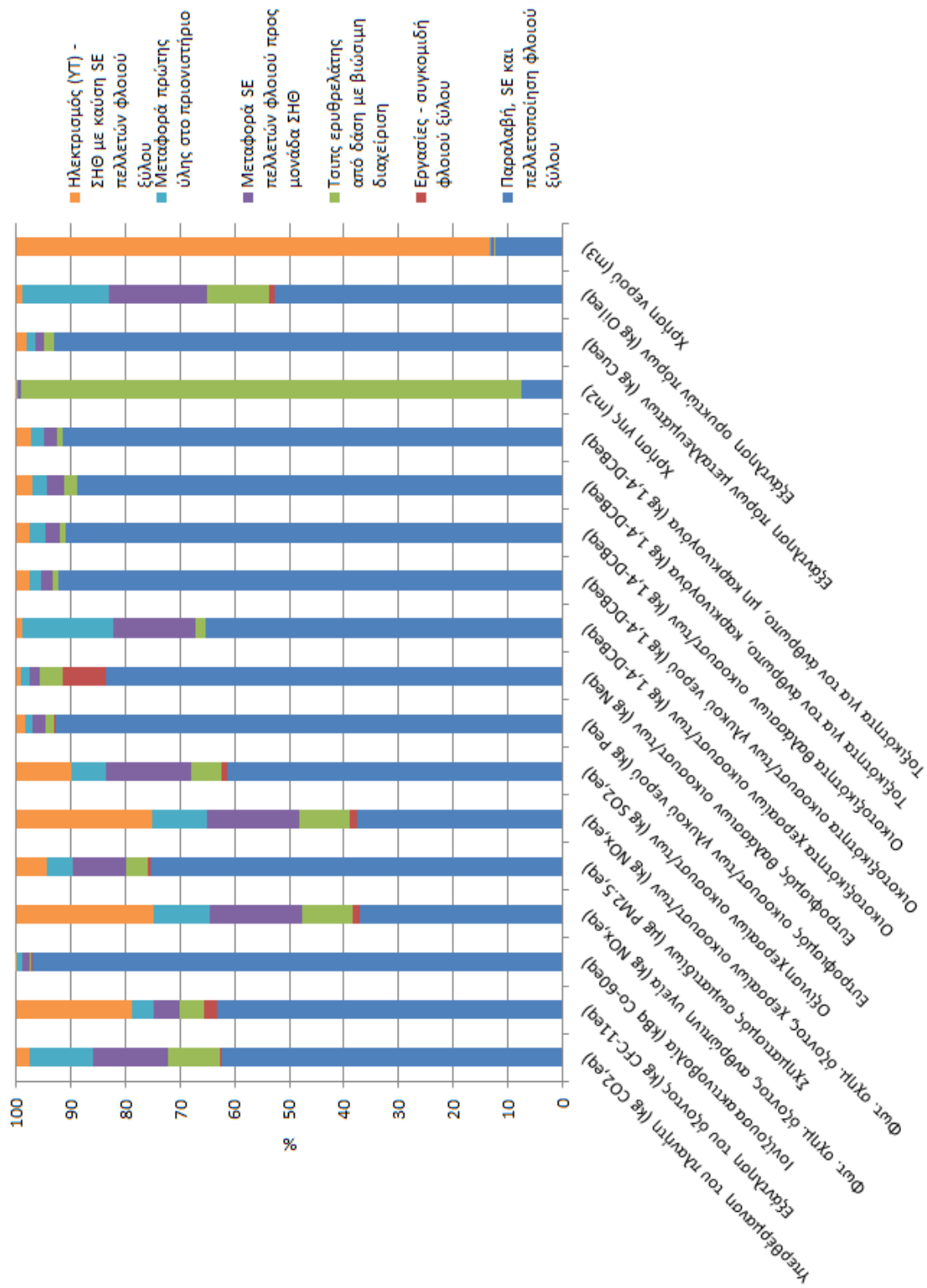


Σχήμα 7.5: Σενάριο 3α, παροχή ηλεκτρισμού από το δίκτυο και γωρίς τρένο - συγκριτικά αποτελέσματα.





Σχήμα 7.7: Σενάριο 3α, χωρίς μεταφορά με τρένο - συγκριτικά αποτελέσματα



Σχήμα 7.8: Σενάριο 3β, παροχή ηλεκτρισμού από το δίκτυο - συγκριτικά αποτελέσματα