



---

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

Εργαστήριο Ατμοκινητήρων & Λεβήτων

Τομέας Θερμότητας της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών

---

## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

*«ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ  
ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΛΥΣΙΔΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ,  
ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ, ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ  
ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ  
ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΓΙΑ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ»*

### **Του Φοιτητή**

Κυριακάκη Νικόλαου

### **Επιβλέπων**

Καρέλλας Σωτήριος, Αναπληρωτής Καθηγητής,  
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2018



## Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε οικονομική αξιολόγηση των αλυσίδων παραγωγής, μεταφοράς και επεξεργασίας της βιομάζας με σκοπό την ενεργειακή αξιοποίηση της σε σταθμό συμπαραγωγής. Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται γενικές πληροφορίες σχετικά με την βιομάζα ως εναλλακτική μορφή καυσίμου. Στο δεύτερο κεφάλαιο αφού παρουσιαστεί η γενική ιδέα της παρούσας εργασίας παρατίθενται πληροφορίες σχετικά με τα τέσσερα είδη βιομάζας που θα χρησιμοποιηθούν (άχυρο, μίσχανθος, περίβλημα καρπού ελαιοφαινοκόδενδρου, φλοιός ξύλου) και το παγκόσμιο δυναμικό παραγωγής τους όπως βρέθηκαν στην βιβλιογραφία. Περιγράφονται επίσης εν συντομία οι τρεις τεχνολογίες προεπεξεργασίας (φρύξη, υδροθερμική ανθρακοποίηση, έκρηξη ατμού) που θα μελετηθούν καθώς και γενικές πληροφορίες για την καύση βιομάζας σε σταθμούς συμπαραγωγής. Στο τρίτο κεφάλαιο αναπτύσσεται η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να πραγματοποιηθεί η οικονομική αξιολόγηση. Αρχικά παρουσιάζεται η μεθοδολογία με την οποία υπολογίστηκαν οι απαιτούμενες δυναμικότητες των μονάδων προεπεξεργασίας της βιομάζας σύμφωνα με τις απαιτήσεις του σταθμού συμπαραγωγής χρησιμοποιώντας εκτιμήσεις που έγιναν από αντίστοιχες πειραματικές διατάξεις της βιβλιογραφίας. Στην συνέχεια δίνεται μια εκτίμηση για το κόστος παραγωγής του μίσχανθου ως ενεργειακή καλλιέργεια και μελετούνται τα κόστη παραγωγής και συλλογής της βιομάζας στους σταθμούς προεπεξεργασίας. Έπειτα παρατίθεται η μεθοδολογία οικονομικής αξιολόγησης των μονάδων προεπεξεργασίας με σκοπό τον υπολογισμό του κόστους παραγωγής της επεξεργασμένης βιομάζας. Ύστερα αναλύεται το μοντέλο διατροφικής μεταφοράς (συνδυασμός φορτηγών – τρένου) και συγκρίνεται με την αποκλειστική μεταφορά μέσω φορτηγών προκειμένου να βρεθεί το κόστος μεταφοράς της βιομάζας στον τελικό σταθμό συμπαραγωγής. Τέλος γίνεται μια εκτίμηση του κόστους παραγωγής ηλεκτρισμού στον σταθμό συμπαραγωγής χρησιμοποιώντας ως καύσιμο βιομάζα σε επεξεργασμένη και ακατέργαστη μορφή.

## **Abstract**

The objective of this diploma thesis is the economic evaluation of production, transportation and pre-treatment of biomass so it can be used for co-generation in a power plant. The first chapter presents general information on biomass as an alternative form of fuel. In the second chapter, after presenting the general idea of the present work, information is given on the four different types of biomass that are being used (wheat straw, miscanthus, palm oil empty fruit bunch, wood bark) and their global production potential as found in the literature. The three pre-treatment methods (Torrefaction, hydrothermal carbonization, steam explosion) to be studied as well as information on biomass combustion at co-generation plants are also briefly described. Initially the required feedstock capacities of the pretreatment plants are being calculated according to the fuel requirements of the co-generation plant. This calculation is using estimates made by corresponding experimental provisions in the literature. Then miscanthus production cost is being examined so are the costs of collection of biomass. Then the methodology used for the economic evaluation of the pre-treatment plants is being presented in order to calculate the production cost of pre-treated biomass. The intermodal transport model (truck / train combination) is then analyzed and compared to the road equivalent model in order to calculate the cost of transporting the biomass to the cogeneration plant. The cost of electricity is being presented in the final chapter for biomass in both raw and pre-treated form.

## Ευχαριστίες:

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή καθηγητή Ε.Μ.Π κ. Σωτήριο Καρέλλα για την δυνατότητα που μου παρείχε να ασχοληθώ με την παρούσα διπλωματική εργασία καθώς και τον υποψήφιο διδάκτορα Δημήτριο Γκριμέκη για την άψογη συνεργασία και τη μείζονος σημασίας βοήθεια του. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την στήριξη που μου παρείχε καθ όλη την διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

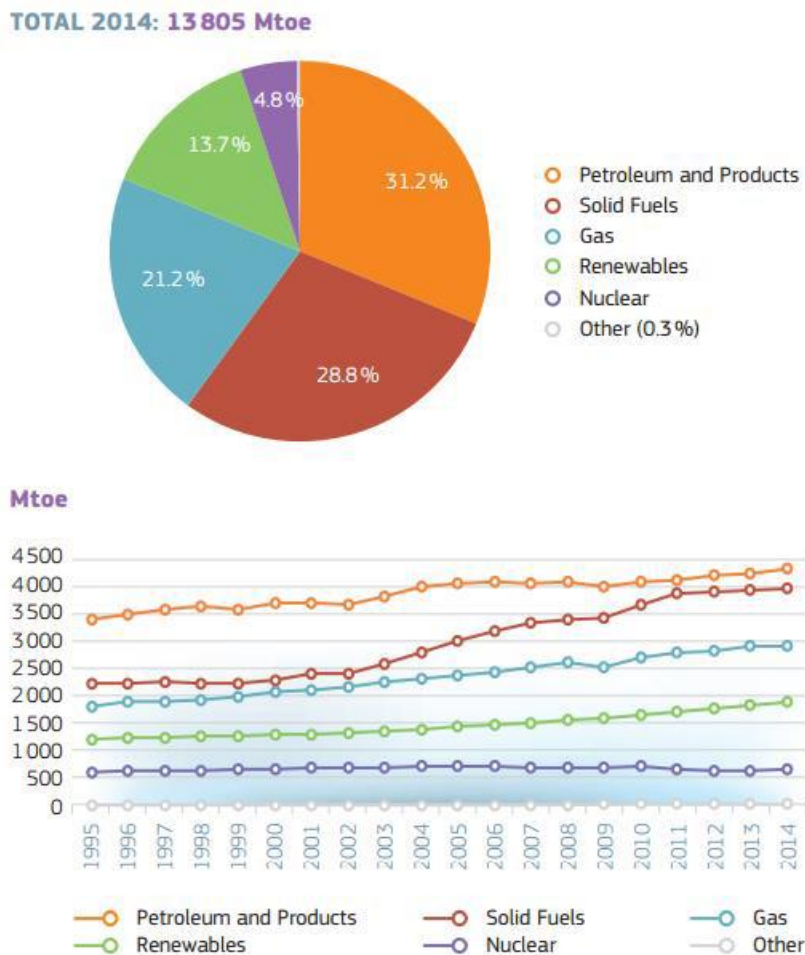
## Πίνακας Περιεχομένων

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
1.1.	Η παραγωγή ενέργειας στην Ευρώπη και στον κόσμο.....	7
1.2.	Η ανάγκη αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.....	8
1.3.	Βιομάζα.....	10
1.3.1.	Ορισμός της βιομάζας.....	10
1.3.2.	Παγκόσμιο Δυναμικό βιομάζας.....	11
1.3.3.	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα βιομάζας.....	12
1.4.	Στόχος της εργασίας.....	13
2.	ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ, ΣΥΛΛΟΓΗΣ, ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ, ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	14
2.1.	Η Βασική Ιδέα.....	14
2.2.	Εξεταζόμενα είδη βιομάζας.....	16
2.3.	Τεχνολογίες προεπεξεργασίας της βιομάζας.....	21
2.3.1.	Φρύξη (Torrefaction).....	22
2.3.2.	Υδροθερμική ανθρακοποίηση (Hydrothermal Carbonization- HTC).....	24
2.3.3.	Έκρηξη Ατμού (Steam Explosion - SE).....	25
2.4.	Καύση Βιομάζας σε σταθμούς Παραγωγής ενέργειας.....	26
3.	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΓΙΑ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ.....	27
3.1.	Ισοζύγια μάζας και ενέργειας.....	27
3.1.1.	Φρύξη.....	28
3.1.2.	Υδροθερμική ανθρακοποίηση.....	34
3.1.3.	Έκρηξη ατμού.....	39
3.2.	Κόστος παραγωγής – αγοράς βιομάζας.....	43
3.3.	Κόστος συλλογής βιομάζας.....	52
3.3.1.	Ακτίνα συλλογής.....	52
3.3.2.	Κόστος συλλογής βιομάζας.....	54
3.4.	Οικονομική αξιολόγηση μονάδων προεπεξεργασίας.....	60
3.4.1.	Σχήμα οικονομικής ανάλυσης και ορισμοί.....	60
3.4.2.	Μέθοδος υπολογισμού της συνολικής επένδυσης κεφαλαίου TCI.....	61
3.4.3.	Λειτουργικά κόστη.....	68
3.4.4.	Κόστος παραγωγής με ανάλυση χρηματοροών.....	72
3.4.5.	Κόστος παραγωγής με χρήση συντελεστών.....	77
3.5.	Κόστος μεταφοράς βιομάζας στον σταθμό συμπαραγωγής.....	79
3.6.	Ενεργειακή αξιοποίηση βιομάζας για συμπαραγωγή.....	89
4.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ.....	93
5.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ –ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ.....	119
5.1.	Συμπεράσματα.....	119
5.2.	Προτάσεις για μελλοντική εργασία.....	121
6.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	122

# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

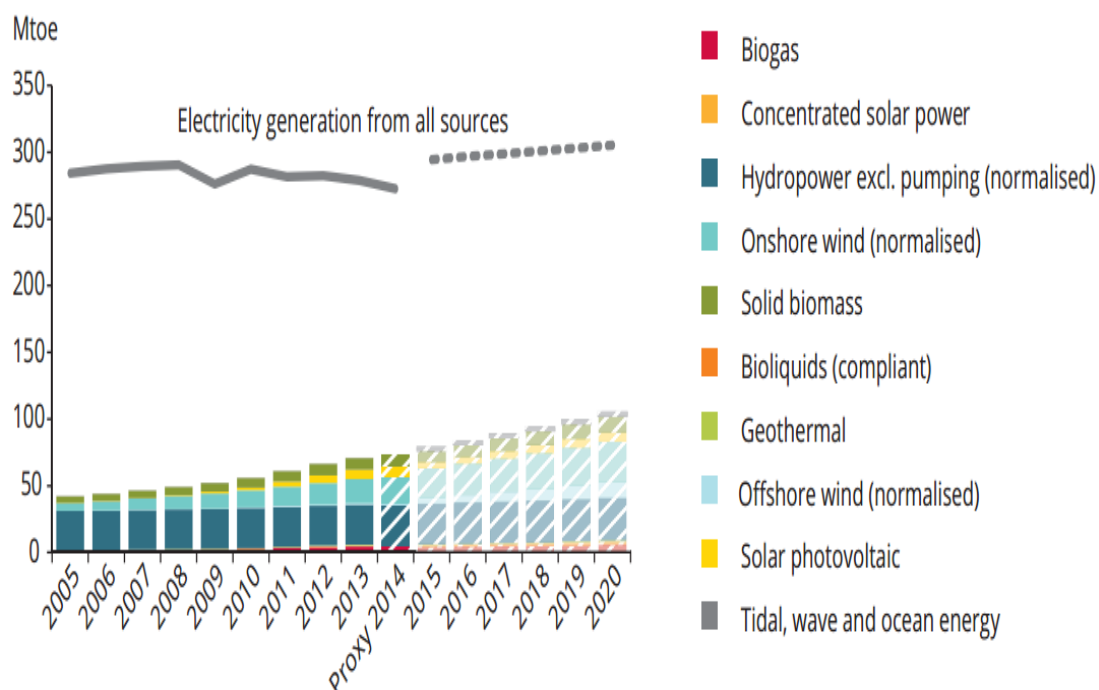
## 1.1. Η παραγωγή ενέργειας στην Ευρώπη και στον κόσμο

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα στον ευρωπαϊκό αλλά και στο διεθνή χώρο είναι η συνεχώς αυξανόμενη κατανάλωση ενέργειας. Το πρόβλημα αυτό σε συνδυασμό με την συνεχόμενη αύξηση της ρύπανσης του περιβάλλοντος έχει δημιουργήσει την ανάγκη αξιοποίησης και χρήσης εναλλακτικών πηγών ενέργειας. Στην εικόνα 1.1 παρουσιάζεται η ποσοστιαία κατανομή ενέργειας που παράγεται από τη χρήση διαφορετικών ειδών καυσίμων[1]. Όπως παρατηρείται η παραγόμενη ενέργεια από την αξιοποίηση ανανεώσιμων μορφών αυξάνεται συνεχώς τα τελευταία έτη. Παρόλα αυτά τα ορυκτά καύσιμα αποτελούν ακόμα το 80% της παγκόσμιας παραγόμενης ενέργειας.



Εικόνα 1.1: Ποσοστιαία κατανομή ενέργειας για διάφορα είδη καυσίμων[1].

Η ευρωπαϊκή ένωση θεωρείται πρωτοπόρος στην προώθηση και ανάπτυξη νέων τεχνολογιών με σκοπό την αξιοποίηση ανανεώσιμων μορφών ενέργειας, προκειμένου να μετριαστεί η μείωση των ρύπων και της μόλυνσης του περιβάλλοντος τα επόμενα χρόνια. Στην εικόνα 1.2 παρουσιάζεται η παραγωγή ενέργειας με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών στην ευρωπαϊκή ένωση αλλά και προβλέψεις που αφορούν τα επόμενα χρόνια[2].



Εικόνα 1.2: Παραγωγή ενέργειας με τη χρήση ανανεώσιμων μορφών[2].

Όπως φαίνεται στην εικόνα 1.2 η αιολική και η υδροηλεκτρική ενέργεια αποτελούν τις δύο κυριότερες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην Ευρώπη. Παρατηρείται όμως ότι η ενέργεια από την καύση βιομάζας αυξάνεται συνεχώς από το 2005 και υπολογίζεται πως τα επόμενα χρόνια θα αυξηθεί σε βαθμό που θα μπορεί να ανταγωνιστεί τις μέχρι σήμερα κυριότερες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, την αιολική και την υδροηλεκτρική.

## 1.2. Η ανάγκη αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Οι συνεχώς αυξανόμενες ενεργειακές απαιτήσεις σε παγκόσμια κλίμακα συνιστούν την ανάγκη αύξησης της παραγωγής ενέργειας. Τα ορυκτά καύσιμα και οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την εκμετάλλευσή τους έχουν εδραιωθεί ως κύρια πηγή ενέργειας για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών. Η εκτεταμένη όμως χρήση καυσίμων όπως ο λιγνίτης, το φυσικό αέριο και το πετρέλαιο προκαλούν αυξανόμενες φθορές στο περιβάλλον.

Ειδικότερα η καύση του πετρελαίου απελευθερώνει οξείδια του αζώτου, οξείδια του θείου και μόλυβδο. Η καύση των γαιανθράκων εκλύει αιθάλη και



διοξείδιο του άνθρακα στην ατμόσφαιρα λόγω της αντίδρασης του άνθρακα με το υδρογόνο. Η αιθάλη και τα αέρια αυτά συμβάλλουν στην εμφάνιση του φαινομένου της αιθαλομίχλης, η οποία εγκλωβίζεται στα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας προκαλώντας ποικίλα προβλήματα. Η αύξηση της ποσότητας του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα συμβάλλει στην δημιουργία του φαινομένου του θερμοκηπίου, κατά το οποίο η εξερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία μετά την ανάκλαση της στην επιφάνεια της γης εγκλωβίζεται στην ατμόσφαιρα έχοντας ως αποτέλεσμα την αύξηση της μέσης θερμοκρασίας στον πλανήτη [3]. Τα οξείδια αζώτου και θείου αναμιγνύονται με τους υδρατμούς της ατμόσφαιρας και σχηματίζουν οξέα που με τη βοήθεια της βροχής προκαλούν το φαινόμενο της όξινης βροχής. Μερικά από τα προβλήματα που προκαλεί το φαινόμενο της όξινης βροχής είναι η καταστροφή της γόνιμης γης, διαβρώσεις του εδάφους, καταστροφές σε δασικές εκτάσεις και αλλοιώσεις στη σύσταση του πόσιμου νερού. Πέρα από την μόλυνση που προκαλείται από τη καύση των συμβατικών καυσίμων, μόλυνση του περιβάλλοντος προκαλείται και από ατυχήματα κατά την μεταφορά καυσίμων όπως το πετρέλαιο προκαλώντας τεράστιες καταστροφές σε θάλασσες και ακτές.



Εικόνα 1.3:Φαινόμενο του θερμοκηπίου [3]

Η ολοένα και αυξανόμενη μόλυνση του περιβάλλοντος 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 πέντε αερίων της τάξεως του 5% τα επόμενα χρόνια σε σύγκριση πάντα με τις εκπομπές των αερίων από το 1990 έως το 2000. Κρίνεται λοιπόν αναγκαία η αξιοποίηση εναλλακτικών μορφών ενέργειας αλλά και η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας καθώς και η τεχνολογική ανάπτυξη τους.

## 1.3. Βιομάζα

### 1.3.1. Ορισμός της βιομάζας

Ως βιομάζα ορίζεται η ύλη που έχει βιολογική (οργανική) προέλευση. Ο όρος βιομάζα περιλαμβάνει δηλαδή οποιοδήποτε υλικό προέρχεται με άμεσο ή έμμεσο τρόπο από φυτικούς και ζωικούς οργανισμούς[4].

Η βιομάζα μπορεί να έχει την μορφή υπολειμμάτων όπως:

- υπολείμματα γεωργικών και δασικών καλλιεργειών (π.χ. κλαδιά, φύλλα, άχυρο)
- υπολείμματα επεξεργασίας γεωργικών προϊόντων (π.χ. πυρηνόξυλο, πυρήνες φρούτων κλπ),
- απόβλητα ζώων (π.χ. απόβλητα από κτηνοτροφία, πτηνοτροφία, χοιροστάσια κλπ)
- οργανικά απόβλητα (οργανικό τμήμα αστικών αποβλήτων)

Επίσης η βιομάζα μπορεί να προέρχεται από ενεργειακές καλλιέργειες.

- στις ενεργειακές καλλιέργειες περιλαμβάνονται πέρα από τα καλλιεργούμενα φυτά και κάποια άγρια φυτά. Παραδείγματα ενεργειακών καλλιεργειών είναι ο μίσχανθος, η αγριαγκινάρα, ο ευκάλυπτος, η ιτιά κ.α.



Εικόνα 1.4: Είδη βιομάζας

Τα συστατικά από τα οποία αποτελείται η βιομάζα είναι η κυτταρίνη, η ημικυτταρίνη και η λιγνίνη. Σε πολύ μικρότερες ποσότητες περιέχει επίσης και κάποια ανόργανα συστατικά τα οποία συναντάμε με τον όρο τέφρα. Η τέφρα ορίζεται ως το υπόλειμμα που παραμένει μετά την πλήρη καύση της καύσιμης ύλης[5]. Η τέφρα αποτελεί ένα ποσοστό μικρότερο του 10% των συστατικών της βιομάζας,

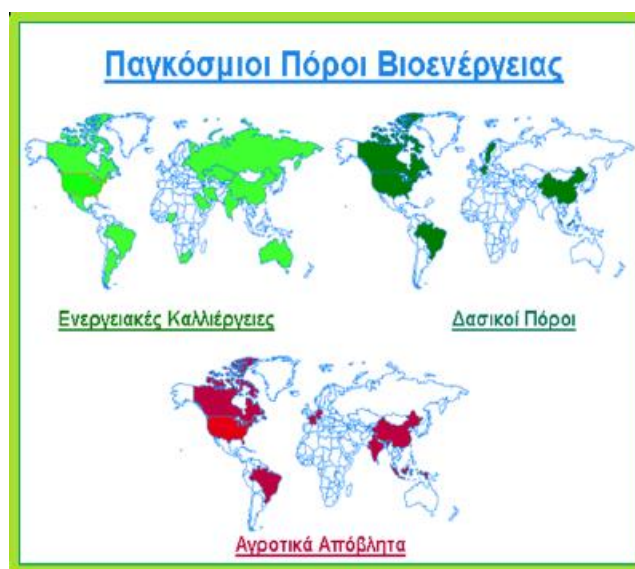
επηρεάζει όμως σημαντικά την ανάπτυξη της αλλά και την ποσότητα στην ενέργεια που παράγεται από την καύση της[6].

### 1.3.2. Παγκόσμιο Δυναμικό βιομάζας

Το δυναμικό της βιομάζας μπορεί να αναλυθεί στις εξής κατηγορίες[7]:

- 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, σύμφωνα με την μορφολογία 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 το οποίο μπορούμε να αξιοποιήσουμε οικονομικά.

Η παραγόμενη βιομάζα στον πλανήτη υπολογίζεται στα 172 δισεκατομμύρια τόνους ξηρού υλικού. Παρόλα αυτά οι τεράστιες αυτές ποσότητες βιομάζας δεν αξιοποιούνται και παραμένουν ανεκμετάλλευτες. Μόνο το 15% της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας συνδέεται με την αξιοποίηση της βιομάζας και αυτό περιλαμβάνει κυρίως πιο παραδοσιακές μορφές της όπως τα πέλλετ ξύλου[8]. Στην εικόνα 1.5 παρουσιάζονται οι πόροι βιοενέργειας (ενέργεια από την αξιοποίηση της βιομάζας) σε παγκόσμιο επίπεδο.



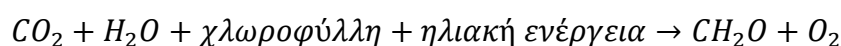
Εικόνα 1.5: Παγκόσμιοι πόροι βιοενέργειας

### 1.3.3. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα βιομάζας

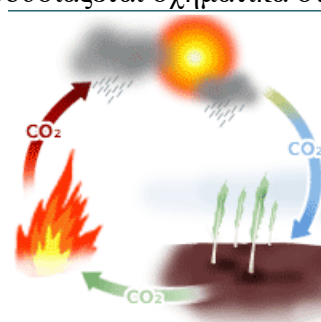
Στην ενότητα αυτή συνοψίζονται μερικά από τα βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της βιομάζας ως εξής[9]:

Πλεονεκτήματα:

- Η ενεργειακή αξιοποίηση της βιομάζας μέσω της καύσης δεν συμβάλλει στην αύξηση του φαινομένου του θερμοκηπίου. Αυτό συμβαίνει γιατί οι ποσότητες του άνθρακα που απελευθερώνονται κατά την καύση της βιομάζας δεσμεύονται εκ νέου από τα φυτά μέσω της διαδικασίας της φωτοσύνθεσης. Η χημική αντίδραση της φωτοσύνθεσης παρουσιάζεται παρακάτω:



Έτσι η καύση της βιομάζας έχει μηδενικό ισοζύγιο διοξειδίου του άνθρακα. Η διαδικασία που περιγράφηκε παρουσιάζεται σχηματικά στην εικόνα 1.6.



Εικόνα 1.6: Ανακύκλωση των ποσοτήτων CO<sub>2</sub> [10]

- Η βιομάζα περιέχει πολύ μικρές ποσότητες θείου κάτι που βοηθάει στον περιορισμό των εκπομπών του διοξειδίου του θείου (SO<sub>2</sub>). Η μείωση των εκπομπών αυτών βοηθάει με την σειρά της στον περιορισμό του φαινομένου της όξινης βροχής για τη δημιουργία του οποίου είναι κυρίως υπεύθυνο το διοξείδιο του θείου.
- Η αξιοποίηση της βιομάζας στον εγχώριο χώρο για την παραγωγή ενέργειας βοηθάει στην μείωση της εξάρτησης από εισαγόμενα καύσιμα και επομένως στην βελτίωση του εμπορικού ισοζυγίου αλλά και την εξοικονόμηση του συναλλάγματος.
- Η αξιοποίηση της βιομάζας συμβάλλει μέσω της δημιουργίας ενεργειακών καλλιεργειών και μονάδων παραγωγής της στην αύξηση των θέσεων εργασίας.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα κύρια μειονεκτήματα της αξιοποίησης της βιομάζας:

- Κύριο χαρακτηριστικό της βιομάζας είναι το μεγάλο ποσοστό υγρασίας που περιέχει στην ακατέργαστη μορφή της. Για την ενεργειακή αξιοποίηση της

απαιτείται η επεξεργασία της, προκειμένου να παραχθεί ένα προϊόν με βελτιωμένες ιδιότητες. Οι πιο συνήθεις μέθοδοι προεπεξεργασίας της βιομάζας είναι η φρύξη ή αλλιώς ήπια πυρόλυση (Torrefaction), η υδροθερμική ανθρακοποίηση (hydrothermal carbonization) και η έκρηξη ατμού (steam explosion). Στη συνέχεια της διπλωματικής εργασίας θα εξεταστούν οι προαναφερθέντες τεχνολογίες εκτενέστερα.

- Σε σύγκριση με τα ορυκτά καύσιμα η βιομάζα παρουσιάζει πολλά προβλήματα στα στάδια συγκομιδής ή παραγωγής, επεξεργασίας, μεταφοράς και αποθήκευσης της.
- το κόστος προμήθειας βιομάζας παραμένει πολύ υψηλό σε σχέση με τα συμβατικά καύσιμα.

## 1.4. Στόχος της εργασίας

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη των διεργασιών παραγωγής ή συγκομιδής, μεταφοράς, επεξεργασίας και ενεργειακής αξιοποίησης διαφορετικών ειδών βιομάζας με στόχο την ενεργειακή αξιοποίηση τους σε σταθμό συμπαραγωγής ενέργειας.

Θα εξεταστούν τέσσερα διαφορετικά είδη βιομάζας, το άχυρο σίτου, ο μίσχανθος, το περίβλημα από καρπό ελαιοφεινικόδενδρου και ο φλοιός ξύλου. Για την περίπτωση του μίσχανθου θα διερευνηθεί το κόστος παραγωγής του ως ένα είδος φυτού από ενεργειακές καλλιέργειες, με ανάλυση των διεργασιών, των μηχανημάτων αλλά και των καταναλώσεων μιας τέτοιας καλλιέργειας.

Στη συνέχεια μελετάται το κόστος συγκομιδής και μεταφοράς διαφορετικών ειδών βιομάζας, σε σταθμούς προεπεξεργασίας με σκοπό την ενεργειακή αναβάθμιση τους σε βιοκαύσιμα διαφορετικής μορφής και ενεργειακά αποδοτικότερων ιδιοτήτων. Για την προεπεξεργασία της βιομάζας εξετάζονται τρεις διαφορετικές μέθοδοι, η φρύξη (Torrefaction), η υδροθερμική ανθρακοποίηση (Hydrothermal carbonization) και η έκρηξη ατμού (steam explosion). Αναλύεται λοιπόν η περιγραφή των τριών αυτών μεθόδων προεπεξεργασίας και εξετάζεται η οικονομική βιωσιμότητα τους για διαφορετικά είδη βιομάζας μέσω του υπολογισμού του ετήσιου κόστους λειτουργίας τους.

Έπειτα αναλύεται το κόστος μεταφοράς του επεξεργασμένου προϊόντος βιομάζας με σκοπό την ενεργειακή αξιοποίηση αυτού σε σταθμό συμπαραγωγής στην περιοχή της Γερμανίας. Διερευνάται το κόστος μεταφοράς με την μέθοδο της διατροφικής μεταφοράς (χρήση τρένου – φορτηγών) και συγκρίνεται με την απλή μεταφορά μέσω φορτηγών.

Κατόπιν ελέγχεται η επίδραση της επεξεργασμένης βιομάζας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κατά την καύση της σε σταθμό συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού.

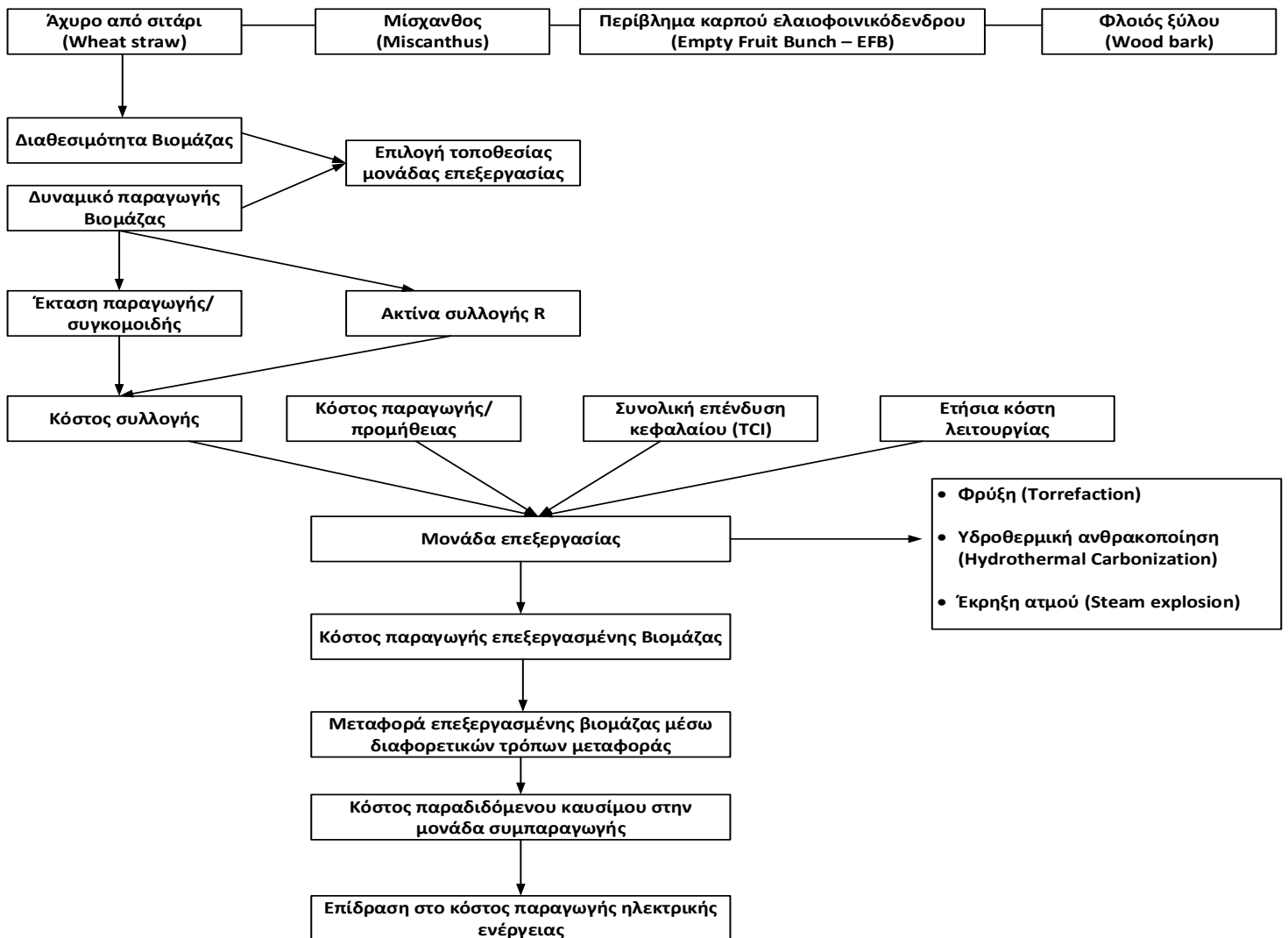
Τέλος θα γίνει σύγκριση αποτελεσμάτων τόσο του κόστους παραγωγής βιομάζας επεξεργασμένης με διαφορετικές μεθόδους προεπεξεργασίας, αλλά και του κόστους παραγωγής ηλεκτρισμού κατά την αξιοποίηση της στο σταθμό συμπαραγωγής.

## 2. ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ, ΣΥΛΛΟΓΗΣ, ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ, ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ

### 2.1. Η Βασική Ιδέα

Η παρούσα διπλωματική εργασία έρχεται να μελετήσει το κόστος επεξεργασίας τεσσάρων ειδών βιομάζας με τρεις διαφορετικές μεθόδους προεπεξεργασίας με σκοπό να υπολογισθεί το κόστος παραγωγής του επεξεργασμένου προϊόντος και να δειχθεί η επίδραση που έχει ως καύσιμο στην παραγωγή ηλεκτρισμού σε σταθμό συμπαραγωγής εγκατεστημένο στην περιοχή του Αμβούργου της Γερμανίας.

Στην εικόνα 2.1 παρουσιάζεται το μονογραμμικό διάγραμμα με τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την πορεία της διπλωματικής.



Εικόνα 2.1: Η βασική ιδέα.

Η εικόνα 2.1 περιγράφει τα εξής:

Αρχικά έγινε η επιλογή τεσσάρων ειδών βιομάζας προς εξέταση τα οποία θα περιγραφούν παρακάτω με διαφορετικά κριτήρια.

Πιο συγκεκριμένα επιλέγονται τα εξής είδη βιομάζας:

- Ο μίσχανθος ως φυτό ενεργειακής καλλιέργειας.
- Το άχυρο ως κύριο παραπροϊόν της παραγωγής του σιταριού κάτι που το καθιστά διαθέσιμο σε μεγάλες ποσότητες.
- Το περίβλημα καρπού ελαιοφαινόδενδρου ως παραπροϊόν της παραγωγής λαδιού από τον καρπό ελαιοφαινόδενδρου στις χώρες της νοτιοανατολικής Ασίας. Η βιομάζα αυτή βρίσκεται σε άφθονες ποσότητες καθώς θεωρείται σχεδόν απόβλητο.
- Ο φλοιός ξύλου ως βιομάζα ξυλώδους μορφής που μπορεί να βρεθεί σε αφθονία στη φύση.

Στην συνέχεια λόγω των τεράστιων ποσοτήτων βιομάζας που θα χρειαστούν για την λειτουργία του σταθμού συμπαραγωγής ελέγχεται η διαθεσιμότητα των παραπάνω ειδών βιομάζας, σύμφωνα με το διαθέσιμο θεωρητικό δυναμικό τους με σκοπό την καλύτερη επιλογή της χώρας όπου θα εγκατασταθεί η κάθε μονάδα προεπεξεργασίας της βιομάζας. Θα εκτιμηθούν επίσης οι τιμές αγοράς τους και θα εξεταστεί το κόστος καλλιέργειας του μίσχανθου ως ενεργειακό φυτό.

Έπειτα θα μελετηθεί το κόστος συλλογής των απαραίτητων κάθε φορά ποσοτήτων βιομάζας προκειμένου να τροφοδοτηθεί η μονάδα προεπεξεργασίας με συγκεκριμένο δυναμικό. Αυτό θα γίνει αναλύοντας την απαραίτητη έκταση γης που χρειαζόμαστε για την παραγωγή συγκεκριμένης ποσότητας βιομάζας και επομένως την ακτίνα στην οποία αυτή θα συλλέγεται.

Έπειτα θα αναλυθεί το κόστος παραγωγής της επεξεργασμένης βιομάζας για τις τρεις διαφορετικές μονάδες επεξεργασίας μέσω της εκτίμησης του συνολικού κεφαλαίου επένδυσης και των λειτουργικών κοστών της μονάδας.

Υστερα θα μελετηθεί το κόστος μεταφοράς της επεξεργασμένης βιομάζας στον σταθμό συμπαραγωγής. Θα μελετηθεί η περίπτωση της διατροφικής μεταφοράς με χρήση φορτηγών και τρένου και θα συγκριθεί με το αντίστοιχο κόστος μεταφοράς χρησιμοποιώντας μόνο φορτηγά.

Τέλος θα υπολογισθεί το κόστος του παραδιδόμενου καυσίμου στο σταθμό συμπαραγωγής και θα μελετηθεί η επίδραση του στο κόστος παραγωγής ηλεκτρισμού.

## 2.2. Εξεταζόμενα είδη βιομάζας

Κάποια από τα βασικά χαρακτηριστικά με βάση τα οποία μπορούν διαφορετικά είδη βιομάζας να συγκριθούν μεταξύ τους είναι:

- Η θερμογόνος ικανότητα του κάθε είδους
- Το ποσοστό υγρασίας που περιέχει η βιομάζα στην ακατέργαστη μορφή της
- Το ποσοστό άνθρακα και τέφρας

Στόχος της προεπεξεργασίας της βιομάζας είναι η ενεργειακή της αναβάθμιση έτσι ώστε ιδιότητες της όπως η θερμογόνος ικανότητα και το ποσοστό άνθρακα που περιέχει να προσεγγίζουν αυτές των ορυκτών καυσίμων. Στην εργασία αυτή εξετάζονται τέσσερα είδη βιομάζας με κριτήριο την άμεση διαθεσιμότητα τους σε μεγάλες ποσότητες παγκοσμίως. Πιο συγκεκριμένα τα είδη που εξετάζονται είναι:

- Ο μίσχανθος (*Miscanthus giganteus*)
- Ο φλοιός ξύλου (wood bark)
- Το άχυρο από σιτάρι (wheat straw)
- Περιβλήμα καρπών του ελαιοφαινόδεσδρου (Empty Fruit Bunch – EFB)

Στη συνέχεια παρουσιάζονται ορισμένες πληροφορίες για τα είδη βιομάζας που θα εξεταστούν και δίνονται πληροφορίες σχετικά με το διαθέσιμο δυναμικό παραγωγής τους.

### ο Μίσχανθος

Ανήκει στην κατηγορία βιομάζας που προέρχεται από ενεργειακές καλλιέργειες, φυτό που παράγεται δηλαδή με κύριο σκοπό την καύση του για παραγωγή ενέργειας.



Εικόνα 2.2: Μίσχανθος



Σε σύγκριση με άλλα είδη βιομάζας που προέρχονται από ενεργειακές καλλιέργειες ο μίσχανθος θεωρείται το καλύτερο ενεργειακό φυτό λόγω της υψηλής θερμογόνου ικανότητας αλλά και του χαμηλού ποσοστού υγρασίας μετά την συγκομιδή του[9], δύο από τα κύρια χαρακτηριστικά για τη μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης. Η στοιχειακή ανάλυση του μίσχανθου παρουσιάζεται στον πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Στοιχειακή ανάλυση μίσχανθου (σε ξηρή βάση)[11].

C	47.3%
H	5.87%
N	0.58%
O	41.49%
S	0.07%
Cl	0.171%
Τέφρα	4.71%
Υγρασία	10.25%
Κατώτερη θερμογόνος ικανότητα LHV(d.b)	17.65 [MJ/kg]
Χύδην πυκνότητα (bulk density) σε δέμα (bale)[12]	140 [Kg/m <sup>3</sup> ]
Ανώτερη θερμογόνος ικανότητα HHV(d.b)	18.94 [MJ/kg]

Επιπλέον έχει υψηλό δυναμικό παραγωγής το οποίο ποικίλει από χώρα σε χώρα. Ο μίσχανθος παράγεται κυρίως στις χώρες της Γαλλίας, της Ιταλίας και στο Ηνωμένο Βασίλειο. Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκε η παραγωγή του μίσχανθου στη χώρα της Ιταλίας λόγω αυξημένου δυναμικού παραγωγής (yield). Ορισμένα παραδείγματα τιμών απόδοσης παραγωγής είναι για την Γαλλία 15 ξηρούς τόνους ανά εκτάριο το χρόνο[13], για την Ιταλία 22.5 τόνους υγρής βιομάζας ανά εκτάριο το χρόνο[14] και για το Ηνωμένο βασίλειο 15 ξηρούς τόνους ανά εκτάριο το χρόνο[15]. Οι τιμές αυτές ποικίλουν ανάλογα με την εποχή την οποία γίνεται ο θερισμός του φυτού καθώς τον χειμώνα παρατηρείται αυξημένη απόδοση παραγωγής αλλά πολύ μεγάλα ποσοστά υγρασίας σε αντίθεση με τον θερισμό την εποχή της άνοιξης όπου τα επίπεδα υγρασίας κυμαίνονται στο 10-15% [16].

Ένα ακόμα κύριο χαρακτηριστικό του μίσχανθου είναι η δυνατότητα απορρόφησης θρεπτικών συστατικών των ριζών του από το έδαφος για τους επόμενους κύκλους ανάπτυξης του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα αυξημένα ποσοστά άνθρακα στην στοιχειακή του ανάλυση. Τέλος η ταχεία ανάπτυξή του (μέσος κύκλος ζωής 15 χρόνια) περιορίζουν την ανάγκη για χρήση μεγάλων ποσοτήτων φυτοφάρμακων.

- ο Φλοιός ξύλου

Η ερυθρελάτη (*Picea abies*) ένα από τα πιο διαδεδομένα είδη δέντρων στις χώρες της βόρειας Ευρώπης (Σουηδία ,Φινλανδία). Χρησιμοποιείται για την παραγωγή πριστής ξυλείας (sawn timber) και στρογγυλής ξυλείας (roundwood). Στατιστικά σχετικά με την ποσότητα φλοιού που παράγεται και χρησιμοποιείται είναι δύσκολο να ληφθούν. Ο λόγος για την έλλειψη των στατιστικών στοιχείων αυτών είναι ότι ο φλοιός συνήθως θεωρείται απόβλητο που πρέπει να απορριφτεί στο χαμηλότερο δυνατό κόστος[17].

Υπάρχουν ωστόσο στατιστικά στοιχεία σχετικά με την παραγωγή στρογγυλής ξυλείας και της χρήσης της. Δεδομένου ότι ο φλοιός ξύλου συνδέεται άμεσα με την στρογγυλή ξυλεία, μπορούν να ληφθούν έμμεσα πληροφορίες σχετικά με τις ποσότητες παραγόμενου φλοιού.

Η απόδοση παραγωγής δένδρων διαθέσιμων για κοπή εκτιμάται σε 427.5 m<sup>3</sup>/ha (ανά εκτάριο γης) σε υγρή βάση στην περιοχή της Σουηδίας [18]. Αυτό περιλαμβάνει 133 m<sup>3</sup>/ha ξυλεία από δένδρα με πολύ λεπτό κορμό.

Το μερίδιο των διάφορων τμημάτων ενός δένδρου ακολουθεί τα εξής ποσοστά:

- ο 78% στρογγυλή ξυλεία
- ο 10% φλοιός
- ο 8% κλαδιά
- ο 4% φύλλωμα

Τα ποσοστά των παραπροϊόντων που παράγονται σε ένα πριονιστήριο είναι:

- ο 46% πριστή ξυλεία (lumber)
- ο 15% πριονίδια
- ο 30% τσιπ ξύλου (ροκανίδι)
- ο 9% φλοιός

Τελικά το θεωρητικό δυναμικό παραγωγής του φλοιού ξύλου σύμφωνα με τα παραπάνω ποσοστά μπορεί να θεωρηθεί ίσο με 10.3 [tn/ha] από το κόψιμο δέντρων και 8.2 [tn/ha] από την ποσότητα που παράγεται στα πριονιστήρια.

Παρακάτω παρουσιάζονται η στοιχειακή ανάλυση του φλοιού από ξύλο στον πίνακα 2.2

Πίνακας 2.2: Στοιχειακή ανάλυση φλοιού από ξύλο (σε ξηρή βάση).[11]

C	50.10%
H	6.30%
N	0.32%
O	40.70%
S	0.02%
Cl	
Τέφρα	2.50%
Υγρασία	40%
Κατώτερη θερμογόνος ικανότητα LHV(d.b)	18.65 [MJ/kg]
Χύδη πυκνότητα (bulk density) στρογγυλής ξυλείας.[19]	399 [Kg/m <sup>3</sup> ]
Ανώτερη θερμογόνος ικανότητα HHV(d.b)	19.89 [MJ/kg]

- Άχυρο από σιτάρι

Το άχυρο αποτελεί είναι ένα είδος βιομάζας το οποίο υπάρχει σε αφθονία στις περισσότερες χώρες καθώς αποτελεί ένα από τα κύρια παραπροϊόντα της καλλιέργειας σιταριού. Αυτό το καθιστά διαθέσιμο για ενεργειακή αξιοποίηση. Παρόλα αυτά δύο βασικά μειονεκτήματα του είναι αφενός η χαμηλή χύδην πυκνότητά του που καθιστά δυσκολότερη τη μεταφορά του αλλά και τα υψηλά ποσά χλωρίου που παράγονται κατά την καύση του. Η απόδοση παραγωγής για το σιτάρι στη χώρα της Γερμανίας είναι 8.63 τόνους ανά εκτάριο γης[20]. Από αυτή την παραγωγή το 56% που παράγεται είναι σιτάρι ενώ το 44% είναι άχυρο[21]. Τέλος αναφέρεται πως ένα ποσοστό της παραγόμενης ποσότητας άχυρου θα πρέπει να παραμείνει στο πεδίο παραγωγής του για την συντήρηση του εδάφους. Έτσι θεωρείται πως μόνο το 70% της παραγόμενης ποσότητας άχυρου μπορεί να συλλεχτεί. Στον πίνακα 2.3 παρουσιάζεται η στοιχειακή ανάλυση του άχυρου από σιτάρι.

Πίνακας 2.3: Στοιχειακή ανάλυση άχυρου από σιτάρι (σε ξηρή βάση)[11]

C			47.3%
H			5.87%
N			0.58%
O			41.49%
S			0.07%
Cl			0.171
Τέφρα			4.71%
Υγρασία			10.25%
Κατώτερη	θερμογόνος	ικανότητα	
LHV(d.b)			17.65 [MJ/kg]
Χύδην πυκνότητα			
(bulk density)[22]			46-73 [Kg/m <sup>3</sup> ]
Ανώτερη	θερμογόνος	ικανότητα	
HHV(d.b)			18.94 [MJ/kg]

- Περίβλημα καρπών του ελαιοφαινοκόδενδρου



Εικόνα 2.3: Περίβλημα καρπού ελαιοφαινοκόδενδρου.[23]

Το ελαιοφαινικόδενδρο (palm oil tree) είναι μια πολυετή καλλιέργεια που συναντάται κυρίως στις χώρες της Μαλαισίας, Ινδονησίας και Ταϊλάνδης. Το συγκεκριμένο είδος βιομάζας παράγεται ως παραπροϊόν του καρπού του ελαιοφαινικόδενδρου το οποίο συναντάμε σε αφθονία στις χώρες που προαναφέρθηκαν καθιστώντας το έτσι αυτόματα ενδιαφέρον για μελέτη.

Ο καρπός του ελαιοφαινικόδενδρου (Fresh Fruit Bunch - FFB) περιέχει 20% λάδι, 25% ξηρούς καρπούς (5% πυρήνες, 13% φυτικές ίνες, 7% κέλυφος) και 23% περιβλήμα καρπού[24]. Η απόδοση παραγωγής καρπού ελαιοφαινικόδενδρου ανέρχεται στους 18.5 τόνους το εκτάριο γης και επομένως το η απόδοση παραγωγής του περιβλήματος του καρπού είναι 4.25 τόνους ανά εκτάριο γης.

Το μεγαλύτερο πρόβλημα στην ενεργειακή αξιοποίηση του περιβλήματος των καρπών του ελαιοφαινικόδενδρου προκύπτει στην περιεκτικότητα μεγάλου ποσοστού υγρασίας κάτι που το καθιστά δύσκολα επεξεργάσιμο.

Στον πίνακα 1.4 παρουσιάζεται η στοιχειακή ανάλυση του προαναφερθέντος είδους βιομάζας.

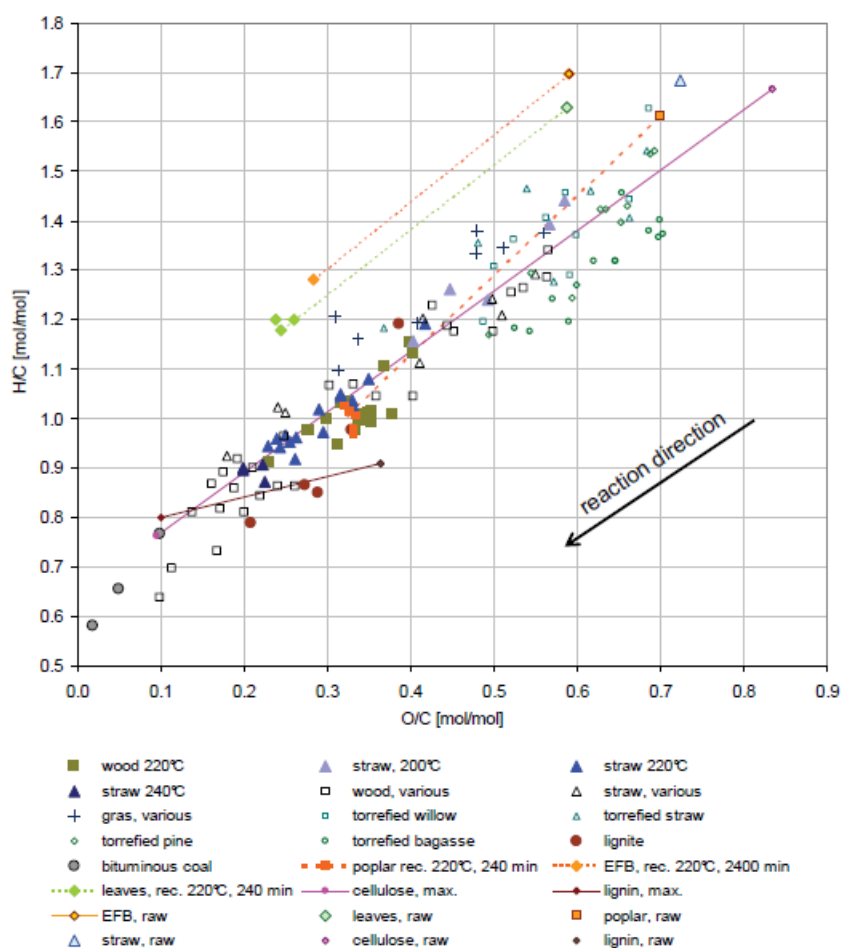
Πίνακας 1.3: Στοιχειακή ανάλυση περιβλήματος του καρπού από ελαιοφαινικόδενδρο (σε ξηρή βάση)[11].

C	45.53%
H	5.46%
N	0.45%
O	43.40%
S	0.04%
Cl	
Τέφρα	5.12%
Υγρασία	57.20%
Κατώτερη θερμογόνος ικανότητα LHV(d.b)	15.83 [MJ/kg]
Χύδη πυκνότητα (bulk density)[23]	350 [Kg/m <sup>3</sup> ]
Ανώτερη θερμογόνος ικανότητα HHV(d.b)	17.02 [MJ/kg]

### 2.3. Τεχνολογίες προεπεξεργασίας της βιομάζας.

Τα ορυκτά καύσιμα αποτελούν μέχρι σήμερα την κύρια πηγή ενέργειας στον πλανήτη. Παρόλα αυτά τα τελευταία χρόνια γίνεται προσπάθεια μείωσης της χρήσης τους προκειμένου να αντικατασταθούν με ανανεώσιμα καύσιμα. Μελετούνται έτσι τεχνολογίες προεπεξεργασίας της βιομάζας όπως η φρύξη (Torrefaction), η υδροθερμική ανθρακοποίηση (hydrothermal carbonization) και η έκρηξη ατμού (steam explosion) με σκοπό το τελικό παραγόμενο προϊόν να προσεγγίζει καλύτερα τις ιδιότητες των ορυκτών καυσίμων.

Η εικόνα 2.4 δείχνει το διάγραμμα γραμμομοριακών αναλογιών H/C (υδρογόνου προς άνθρακα) και O/C (οξυγόνου και άνθρακα). Χρησιμοποιείται για να περιγράψει τις χημικές ιδιότητες ενός προϊόντος. Βλέπουμε λοιπόν ότι με την επεξεργασία της βιομάζας οι ιδιότητες της προσεγγίζουν πλέον το φάσμα των ιδιοτήτων των ορυκτών καυσίμων.



Εικόνα 2.4: Διάγραμμα γραμμομοριακών αναλογιών.[25]

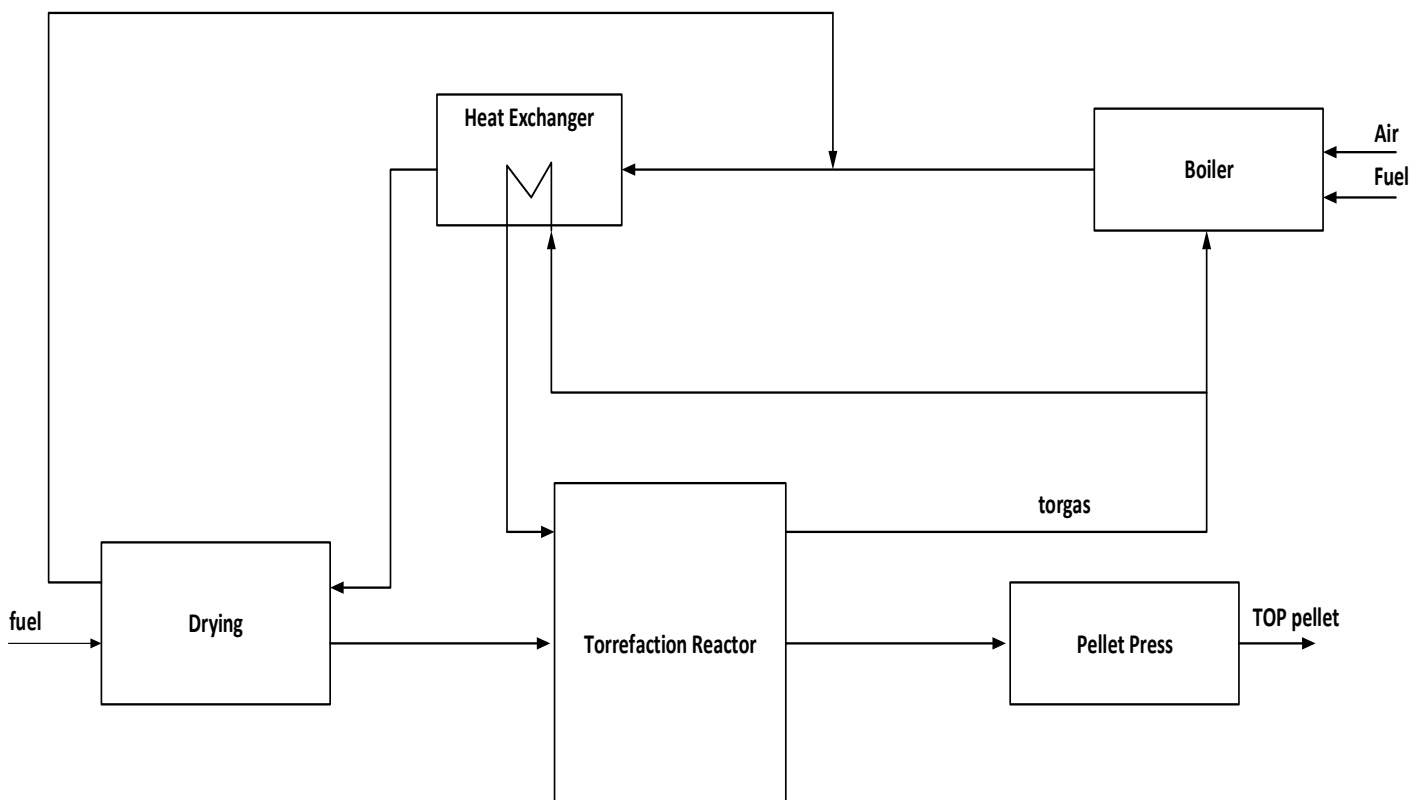
Ένα ακόμη πλεονέκτημα της προεπεξεργασίας της βιομάζας είναι η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα που παρουσιάζει το τελικό προϊόν μετά το πέρας της διεργασίας.

Πιο συγκεκριμένα η βιομάζα που έχει υποστεί επεξεργασία με τις προαναφερθέντες μεθόδους όταν συμπυκνωθεί με πελλετοποίηση παράγονται πελλέτες με μεγαλύτερη χύδην πυκνότητα από τις απλές πελλέτες ξύλου (wood pellets). Η μορφή της βιομάζας μετά την επεξεργασία δεν απαιτεί θρυμματισμό (milling) προκειμένου να πελλετοποιηθεί. Παρατηρείται επίσης βελτιωμένη αντοχή υλικού και επομένως μικρότερες απώλειες κατά την μεταφορά και την αποθήκευση του λόγω της υδροφοβικής πλέον φύσης που παρουσιάζει. Όλα αυτά έχουν ως αποτέλεσμα την μείωση του κόστους κατά την μεταφορά σε μεγάλες αποστάσεις, κάτι που αποτελεί αντικείμενο εξέτασης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Παρακάτω περιγράφονται οι τεχνολογίες προεπεξεργασίας που προαναφέρθηκαν.

### 2.3.1. Φρύξη (Torrefaction).

Η διεργασία της φρύξης ή ήπιας πυρόλυσης όπως αλλιώς ονομάζεται αποτελεί μια θερμική μέθοδο επεξεργασίας προϊόντων βιομάζας. Το μονογραμμικό διάγραμμα μιας τέτοιας επεξεργασίας παρουσιάζεται στο διάγραμμα 2.1.



Διάγραμμα 2.1: Φρύξη (Torrefaction)

Τα στάδια επεξεργασίας της εισερχόμενης βιομάζας περιγράφονται παρακάτω. Σημειώνεται πως στο εξεταζόμενο σύστημα ως καύσιμο στον λέβητα για την παραγωγή της απαιτούμενης θερμότητας για ξήρανση, χρησιμοποιείται το ίδιο είδος βιομάζας με αυτό που επεξεργαζόμαστε σε ακατέργαστη μορφή.

Το μονογραμμικό διάγραμμα της εικόνας 2.4 βασίζεται στο αντίστοιχο της διδακτορικής διατριβής[25].

#### *Περιγραφή διαδικασίας:*

Αρχικά η εισερχόμενη προς επεξεργασία βιομάζα ξηραίνεται σε ξηραντήρα πρώτου προωθηθεί στον αντιδραστήρα φρύξης.

Εκεί αποσυντίθεται σε συνθήκες 200 – 300°C σε ατμοσφαιρική πίεση με απουσία οξυγόνου. Παράγεται έτσι ένα προϊόν 70 – 90% του αρχικού του βάρους και 80 – 90% της αρχικής του ενέργειας με βελτιωμένες ιδιότητες.

Το υπόλοιπο 10 – 30% της βιομάζας μετατρέπεται σε πτητικά αέρια (torgas) τα οποία περιέχουν το 10 – 20% της ενέργειας της επεξεργαζόμενης βιομάζας και αποτελούνται από τα εξής στοιχεία[26]:

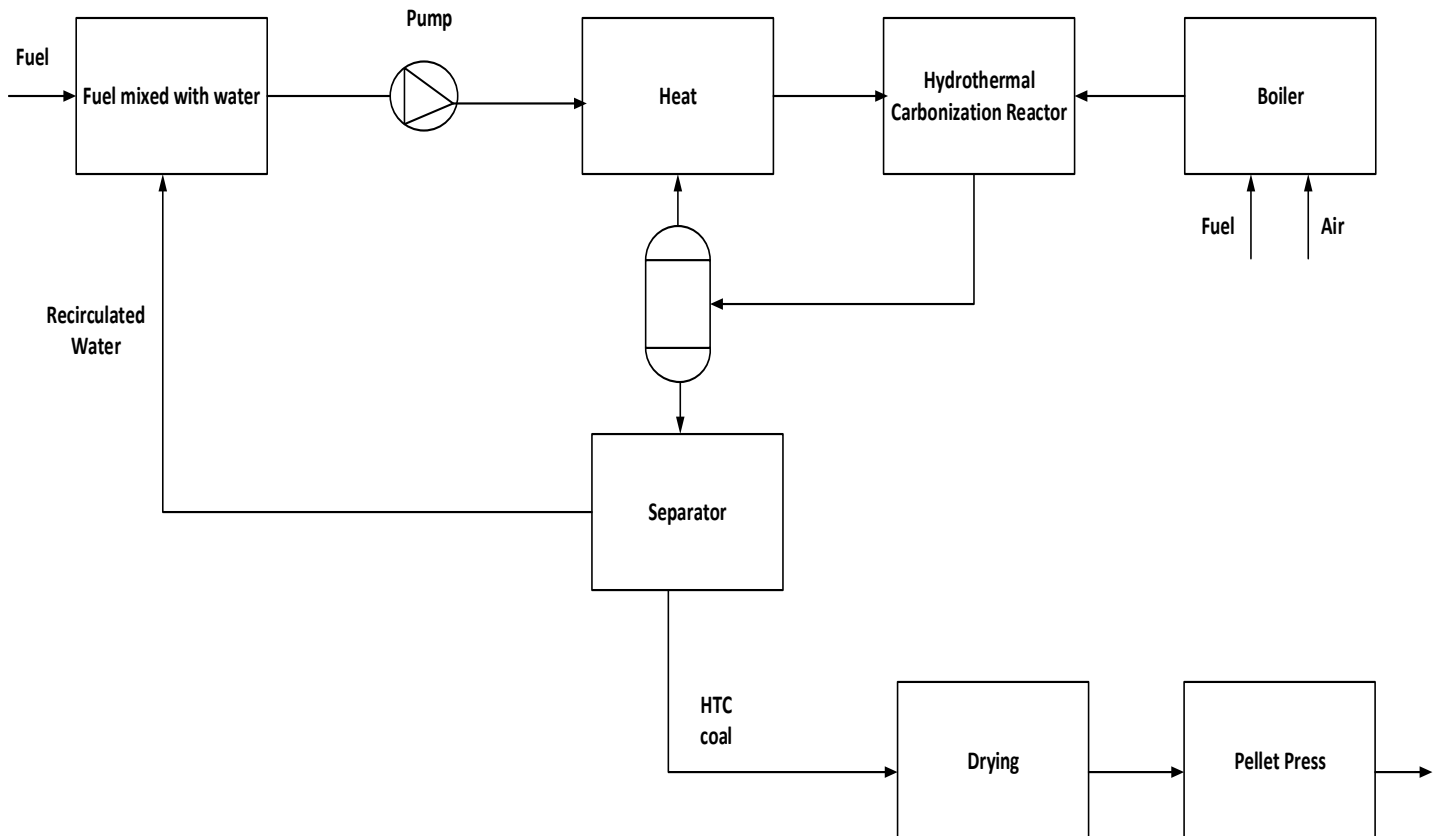
- CO<sub>2</sub>(διοξείδιο του άνθρακα)
- CO (μονοξείδιο του άνθρακα)
- H<sub>2</sub>O (νερό)
- μείγμα ελαφρών οξέων
- CH<sub>4</sub> (μεθάνιο)
- H<sub>2</sub> (αέριο υδρογόνου)

Τα πτητικά αυτά αέρια στη συνέχεια οδηγούνται στο λέβητα όπου καίγονται ταυτόχρονα με βιομάζα προκειμένου να καλυφθούν οι ενεργειακές απαιτήσεις της διαδικασίας της ξήρανσης. Ένα κομμάτι των αερίων αυτών χρησιμοποιείται για την κάλυψη των αναγκών θερμότητας στον αντιδραστήρα πυρόλυσης.

Τέλος η επεξεργασμένη βιομάζα συμπυκνώνεται με την διαδικασία της πελλετοποίησης. Το τελικό επεξεργασμένο προϊόν που συχνά συναντάμε την ονομασία TOP (torrefied pellets) έχει αυξημένη χύδην πυκνότητα ίση με 750 - 800 kg/m<sup>3</sup>, αυξημένη θερμογόνο ικανότητα και μειωμένη υγρασία της τάξεως του 5 – 10 %.

### 2.3.2. Υδροθερμική ανθρακοποίηση (Hydrothermal Carbonization- HTC).

Η υδροθερμική ανθρακοποίηση αποτελεί μια εξώθερμη διεργασία επεξεργασίας της βιομάζας. Το μονογραμμικό διάγραμμα μιας τέτοιας διεργασίας παρουσιάζεται στο διάγραμμα 2.2.



Διάγραμμα 2.2: Υδροθερμική Ανθρακοποίηση (Hydrothermal Carbonization)

#### Περιγραφή διαδικασίας[25]:

Η εισερχόμενη προς επεξεργασία βιομάζα αρχικά αναμιγνύεται με νερό και μετέπειτα εισέρχεται στον αντιδραστήρα αφού προθερμανθεί.

Η θερμοκρασία του αντιδραστήρα είναι 180 – 250°C και η πίεση ίση με την πίεση κορεσμού.

Το προϊόν που παράγεται χωρίζεται σε διαχωριστή και στη συνέχεια ξηραίνεται και συμπυκνώνεται σε πελλετοποιητή.

Η θερμότητα που ανακτάται στα ενδιάμεσα στάδια από τα δοχεία αποσυμπίεσης χρησιμοποιείται για να ξηράνει την βιομάζα πριν την είσοδο της στον αντιδραστήρα.

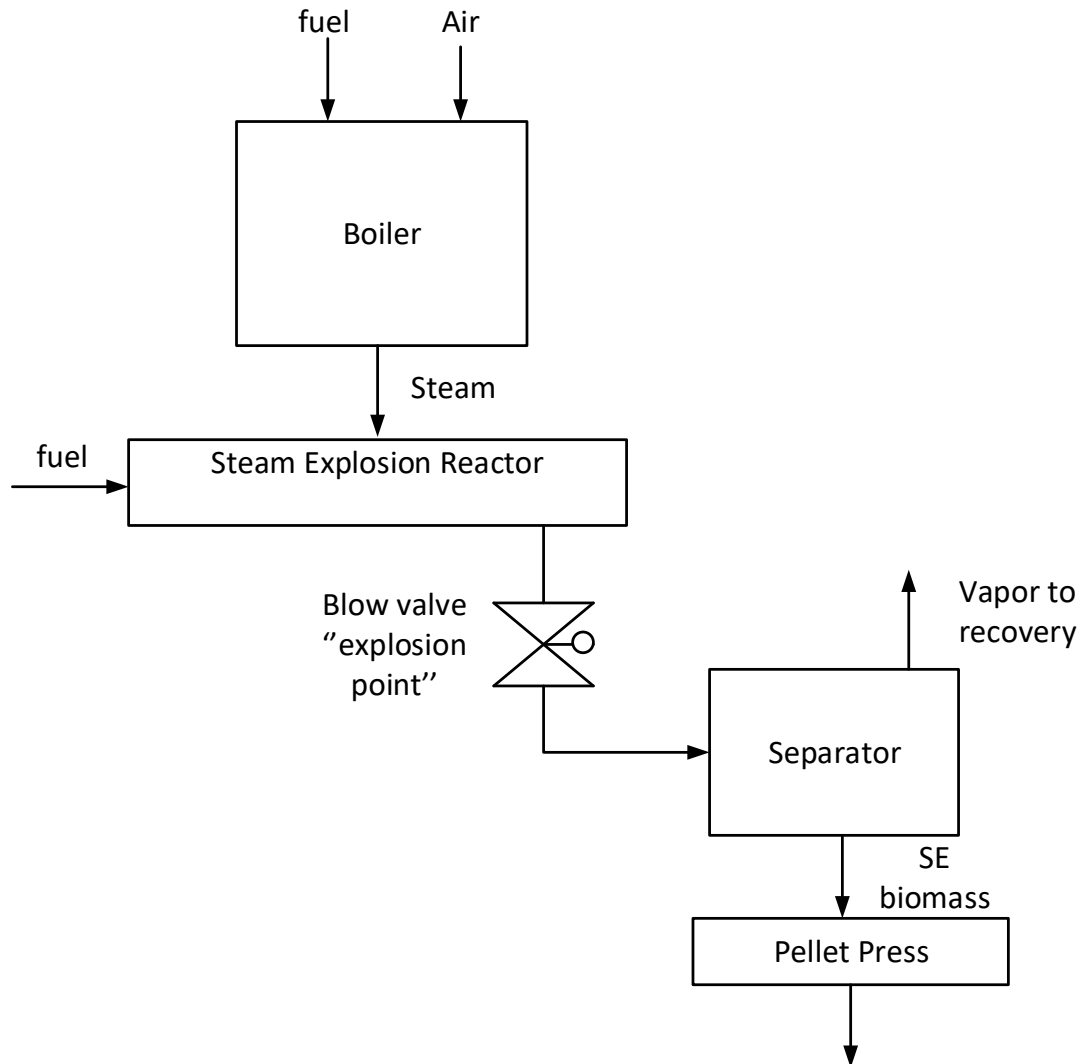
Η διαδικασία αυτή καλείται ξήρανση με μηχανικά μέσα. Με τον τρόπο αυτό καθιστάτε δυνατή η επεξεργασία ειδών βιομάζας με πολύ μεγάλη υγρασία. Συνήθως η μηχανική ξήρανση χρησιμοποιείται για την ξήρανση ειδών βιομάζας όπως το περίβλημα καρπού ελαιοφεινικόδενδρου με αρχικό ποσοστό υγρασίας 65% σε ποσοστά έως 40%. Η επεξεργασμένη τελική βιομάζα παρουσιάζει ποσοστό υγρασίας



της τάξεως του 10%, βελτιωμένη χύδην πυκνότητα ( $650 - 700 \text{ kg/m}^3$ ) και θερμογόνο ικανότητα σε σχέση με την ακατέργαστη βιομάζα.

### 2.3.3. Έκρηξη Ατμού (Steam Explosion - SE).

Η τεχνολογία προεπεξεργασίας βιομάζας μέσω έκρηξης ατμού παρουσιάζεται στο επόμενο διάγραμμα σύμφωνα με την βιβλιογραφία[27].



Διάγραμμα 2.3: Έκρηξη ατμού (Steam Explosion)

Η τεχνολογία της έκρηξης ατμού δεν είναι τόσο διαδεδομένη όσο οι δυο προηγούμενες που εξετάσαμε και εφαρμόζεται έως τώρα σε είδη βιομάζας ξυλώδους μορφής.

Πρόκειται για μια εξώθερμη αντίδραση που πραγματοποιείται σε δοχείο νερού σε θερμοκρασίες της τάξεως των  $200 - 260^\circ\text{C}$ , πίεση περίπου  $15 - 25\text{bar}$  και χρόνο παραμονής  $5 - 15$  λεπτά.[27]

Η απαιτούμενη θερμότητα προσδίδεται με την μορφή κορεσμένου ατμού από λέβητα.

Στην περίπτωση μας γίνεται η υπόθεση πως ο λέβητας αυτός χρησιμοποιεί το ίδιο είδος βιομάζας ως καύσιμο, με αυτό που επεξεργάζεται στην διεργασία.

Στην συνέχεια η βιομάζα εκτονώνεται σε ατμοσφαιρική πίεση θρυμματίζοντας το υλικό. Τέλος αφού διαχωριστεί το τελικό παραγόμενο προϊόν συμπυκνώνεται σε μορφή πελλέτας. Το τελικό προϊόν παρουσιάζει βελτιωμένη χύδη πυκνότητα αλλά και θερμογόνο ικανότητα σε σχέση με την ακατέργαστη βιομάζα.

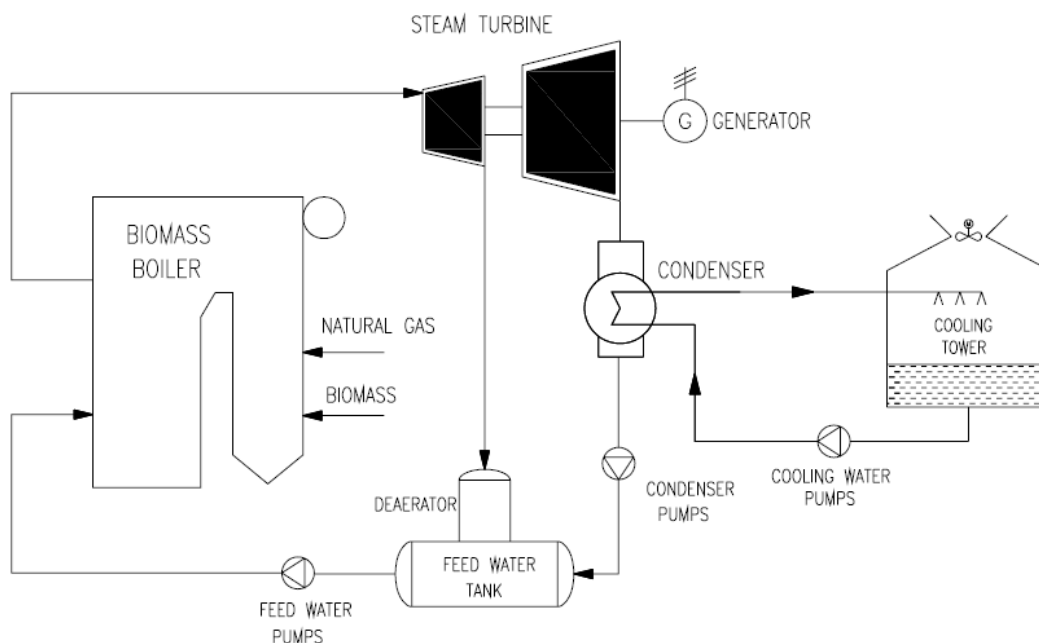
## 2.4. Καύση Βιομάζας σε σταθμούς Παραγωγής ενέργειας

Η βιομάζα χρησιμοποιείται ως εναλλακτικό καύσιμο τροφοδοσίας στους σταθμούς παραγωγής ενέργειας. Η ενεργειακή αξιοποίηση της πραγματοποιείται με καύση σε λέβητες κονιοποιημένου καυσίμου, εσχάρας και ρευστοποιημένης κλίνης.

Μπορεί έτσι να χρησιμοποιηθεί σε σταθμούς παραγωγής ενέργειας οι οποίοι χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα με μικρές τροποποιήσεις. Απαραίτητη συνθήκη για να γίνει αυτό είναι η βιομάζα να έχει την μορφή πελλέτας.

Σε κάθε άλλη περίπτωση όπως όταν η βιομάζα βρίσκεται σε ακατέργαστη μορφή απαιτείται αρχικά κονιοποίηση (pulverization) πρώτου τροφοδοτηθεί σε καυστήρες κονιοποιημένου καυσίμου κάτι που αυξάνει σημαντικά το κόστος της εγκατάστασης. Τα υψηλά ποσοστά σε υγρασία της ακατέργαστης βιομάζας περιορίζουν σε χαμηλά επίπεδα το βαθμό απόδοσης της μονάδας.

Για τους λόγους αυτούς η βιομάζα επεξεργάζεται πρώτα με τις διεργασίες που αναπτύχθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Έτσι η επεξεργασμένη βιομάζα με την μορφή πελλέτας μπορεί να τροφοδοτηθεί σε καυστήρες ρευστοποιημένης κλίνης (fluidized bed reactor) παράγοντας ενέργεια με μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης. Η εικόνα 2.5 περιγράφει έναν τυπικό σταθμό συμπαραγωγής.



Εικόνα 2.5: Σταθμός Παραγωγής Ενέργειας.[28]

### 3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΓΙΑ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ

#### 3.1. Ισοζύγια μάζας και ενέργειας.

Το σενάριο που θα εξεταστεί στην παρούσα διπλωματική εργασία αφορά την ενεργειακή αξιοποίηση επεξεργασμένης βιομάζας σε σταθμό συμπαραγωγής στην περιοχή του Αμβούργου της Γερμανίας.

Η μονάδα συμπαραγωγής θεωρείται πως έχει θερμική ισχύς καυσίμου ίση με 200MW, δηλαδή θερμική ισχύς στην είσοδο του σταθμού.

Ως καύσιμο χρησιμοποιείται αποκλειστικά βιομάζα που έχει επεξεργαστεί με φρύξη, υδροθερμική ανθρακοποίηση ή έκρηξη ατμού.

Η απαιτούμενη ποσότητα καυσίμου για θερμική ισχύς εισόδου ίση με 200MW είναι:

$$\dot{m}_{fuel} = \frac{Q_{thCHP,in}}{LHV_{torr,HTC,SE}} \quad (3.1.1)$$

Όπου,

$Q_{thCHP,in}$ : Η θερμική ισχύς εισόδου σε [MW]

$LHV_{torr,HTC,SE}$ : Η κατώτερη θερμογόνοος ικανότητα της επεξεργασμένης βιομάζας σε [MJ/kg].

$\dot{m}_{fuel} (torr/HTC/SE)$ : Η απαιτούμενη ποσότητα καυσίμου στον σταθμό συμπαραγωγής σε  $\left[ \frac{kg (torr/HTC/SE) biomass}{s} \right]$

Στην παρούσα ενότητα θα αναλυθούν τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας των διεργασιών προεπεξεργασίας προκειμένου να υπολογισθεί η δυναμικότητα παραγωγής της μονάδας προεπεξεργασίας σύμφωνα με τις απαιτήσεις καυσίμου  $\dot{m}_{fuel}$  από την εξίσωση 3.1.1 του σταθμού συμπαραγωγής.

Για τους υπολογισμούς των ισοζυγίων που ακολουθούν θεωρούμε τιμές συστάσεων από την βιβλιογραφία οι οποίες παρουσιάζονται στο τέλος κάθε μιας από τις επόμενες υποενότητες.

### 3.1.1. Φρύξη

Κατά την προεπεξεργασία μέσω φρύξης γίνεται η υπόθεση πως ο λέβητας που χρησιμοποιούμε για να την ξήρανση της εισερχόμενης βιομάζας τροφοδοτείται αποκλειστικά με βιομάζα ακατέργαστης μορφής του ίδιου είδους που χρησιμοποιείτε και στην ίδια την διεργασία. Ακολουθεί η μεθοδολογία εύρεσης των απωλειών μάζας στην συνολική διεργασία της φρύξης:

Η συνολική θερμότητα που απαιτείται για την διεργασία της φρύξης είναι:

$$Q_{total,torr} = Q_{dr} + Q_{torr} - Q_{torgas} \quad (3.1.2)$$

Όπου:

$Q_{dr}$ : η θερμότητα που απαιτείται για ξήρανση της βιομάζας σε  $\frac{MJ}{kg}$ .

$Q_{torr}$ : η θερμότητα που απαιτείται για την διεργασία της φρύξης σε  $\frac{MJ}{kg}$ .

$Q_{torgas}$ : η θερμότητα που περιέχουν τα καυσαέρια που παράγονται κατά την διεργασία της φρύξης όταν καούν στον λέβητα σε  $\frac{MJ}{kg}$ .

- Θερμότητα καυσαερίων  $Q_{torgas}$ :

Με γνωστή την στοιχειακή ανάλυση και την ανώτατη θερμογόνο ικανότητα της ακατέργαστης και επεξεργασμένης βιομάζας από τιμές της βιβλιογραφίας, μπορούμε να υπολογίσουμε την ενέργεια των καυσαερίων υπολογίζοντας την κατώτατη θερμογόνο ικανότητα για την επεξεργασμένη βιομάζα.

Παρακάτω παρατίθενται εξισώσεις υπολογισμού της ανώτερης και κατώτερης θερμογόνου ικανότητας για υγρή, ξηρή και ξηρή χωρίς τέφρα σύσταση [11].

$$HHV(OLS) = 1.87C^2 - 144C - 2802H + 63.8CH + 129N + 20147 \quad (3.1.3)$$

$$HHV(PLS) = 5.22C^2 - 319C - 1647H + 38.6CH + 133N + 21028 \quad (3.1.4)$$

$$HHVar = HHVdry \left(1 - \frac{w}{100}\right) \quad (3.1.5)$$

$$HHVdry = HHVdaf \left(1 - \frac{ash}{100}\right) \quad (3.1.6)$$

$$LHVdry = HHVdry - 2.443 * 8.936 \left(\frac{H}{100}\right) \quad (3.1.7)$$

$$LHVar = LHVdry \left(1 - \frac{w}{100}\right) - 2.443 \left(\frac{w}{100}\right) \quad (3.1.8)$$

$$LHVar = HHVar - 2.443 * \left[8.936 \left(\frac{H}{100}\right) * \left(1 - \frac{w}{100}\right) + \left(\frac{w}{100}\right)\right] \quad (3.1.9)$$

Όπου:

$C, H, N, O, w, ash$  : η ποσοστιαία ποσότητα άνθρακα, υδρογόνου, αζώτου, οξυγόνου υγρασίας και τέφρας στο κάθε στοιχείο.

$HHV(OLS), HHV(PLS)$ : Οι Εξισώσεις υπολογισμού της ανώτερης και κατώτερης θερμογόνου ικανότητας μέσω της στοιχειακής ανάλυσης σε  $\left[\frac{MJ}{kg}\right]$ .

Οι εξισώσεις 3.1.5 – 3.1.9 χρησιμοποιούνται για μετατροπές μεταξύ υγρής/ξηρής και ανώτερης/κατώτερης θερμογόνου ικανότητας.

Υπολογίζεται λοιπόν η ανώτερη θερμογόνου ικανότητα των καυσαερίων σύμφωνα με τον τύπο:

$$HHV_{torgas} = HHV_{torr} (1 - energy\ yield_{dry}) \quad (3.1.10)$$

Όπου:

$HHV_{torr}$ : η ανώτερη θερμογόνου ικανότητα της επεξεργασμένης βιομάζας με φρύξη σε  $\frac{MJ}{kg\ dry\ biomass}$ .

Και:

$$energy\ yield_{dry} = \left(\frac{HHV_{torr}}{HHV_{raw}}\right)_{dry} \quad (3.1.11)$$

Όπου,

$HHV_{raw}$ : Η ανώτερη θερμογόνου ικανότητα της ξηρής ακατέργαστης βιομάζας σε  $\left[\frac{MJ}{kg\ dry\ biomass}\right]$ .

Έπειτα από τη μετατροπή της ανώτερης θερμογόνου ικανότητας των καυσαερίων σε κατώτερη θερμογόνου ικανότητα χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις 3.1.5 – 3.1.9 παίρνουμε την θερμότητα που περιέχουν τα καυσαέρια σε  $\left[\frac{MJ}{kg\ dry\ biomass}\right]$  καθώς ισχύει:

$$Q_{torgas} = LHV_{torgas} * \eta, boiler_{gas} \quad (3.1.12)$$

Όπου:

$LHV_{torgas}$ : η κατώτερη θερμογόνου ικανότητα των καυσαερίων σε  $\left[\frac{MJ}{kg\ dry\ biomass}\right]$ .

$\eta, boiler_{gas}$ : ο βαθμός απόδοσης του λέβητα για καυσαέρια.  $\eta, boiler_{gas} = 0.95$

Στη συνέχεια γίνεται αναγωγή σε μονάδες  $\left[\frac{MJ}{kg\ dry\ torr\ biomass}\right]$  χρησιμοποιώντας το κλάσμα απόδοσης απώλειας μάζας που ορίζεται ως:

$$mass\ yield_{dry} = \frac{kg\ dry\ torr\ biomass}{kg\ dry\ biomass} \quad (3.1.13)$$

Όπου:

*kg dry torr biomass*: η ποσότητα ξηρής βιομάζας μετά την επεξεργασία της με φρύξη

*kg dry biomass*: η ποσότητα ξηρής ακατέργαστης βιομάζας.

Και δίνεται λαμβάνεται από τιμές της βιβλιογραφίας.

Διαιρώντας το αποτέλεσμα της εξίσωσης 3.1.11 με τον όρο  $mass\ yield_{dry}$  παίρνουμε την θερμότητα των καυσαερίων  $Q_{torgas}$  σε  $\left[ \frac{MJ}{kg\ dry\ torr\ biomass} \right]$ .

$$Q_{torgas} \left[ \frac{MJ}{kg\ dry\ torr\ biomass} \right] = \frac{Q_{torgas} \left[ \frac{MJ}{kg\ dry\ biomass} \right]}{mass\ yield_{dry}} \quad (3.1.14)$$

- Θερμότητα που απαιτείται για την διεργασία της φρύξης  $Q_{torr}$ :

Η θερμότητα που απαιτείται για την διεργασία της φρύξης λαμβάνεται από τιμές της βιβλιογραφίας σε  $\left[ \frac{MJ}{kg\ torr\ biomass} \right]$ . Πιο συγκεκριμένα για βιομάζα ξυλώδους μορφής (φλοιός ξύλου) λαμβάνεται ίση με  $0.9 \left[ \frac{MJ}{kg\ torr\ biomass} \right]$  ενώ για τα 3 υπόλοιπα είδη που εξετάζουμε (μίσχανθος, περίβλημα καρπού ελαιοφαινικόδενδρου, άχυρο) παίρνει την τιμή  $1.1 \left[ \frac{MJ}{kg\ torr\ biomass} \right]$ .

Για αναγωγή μεταξύ υγρών και ξηρών ποσοτήτων ισχύει γενικά ο τύπος:

$$kg\ dry = kg\ wet * (1 - w) \quad (3.1.15)$$

Διαιρώντας λοιπόν την λαμβάνουσα από βιβλιογραφία ποσότητα  $Q_{torr}$  με  $(1 - w_{torr})$  μετατρέπουμε σε μονάδες  $\left[ \frac{MJ}{kg\ dry\ torr\ biomass} \right]$ .

$$Q_{torr} \left[ \frac{MJ}{kg\ dry\ torr\ biomass} \right] = \frac{Q_{torr} \left[ \frac{MJ}{kg\ torr\ biomass} \right]}{(1 - w_{torr})} \quad (3.1.16)$$

- Θερμότητα για ξήρανση  $Q_{dr}$ :

Υπολογίζεται από την θερμότητα που απαιτείται για την διεργασία της ξήρανσης και την αφαιρούμενη υγρασία σε  $\left[ \frac{MJ}{kg \text{ wet biomass}} \right]$

$$Q_{dr} \left[ \frac{MJ}{kg \text{ wet biomass}} \right] = Q_{drying} \left[ \frac{MJ}{kg \text{ water}} \right] * N \left[ \frac{kg \text{ water}}{kg \text{ wet biomass}} \right] \quad (3.1.17)$$

Όπου:

$Q_{drying}$ : η θερμότητα που καταναλώνεται σε μια διεργασία ξήρανσης. Λαμβάνεται από τιμές της βιβλιογραφίας, σε  $\left[ \frac{MJ}{kg \text{ water}} \right]$ . Στην περίπτωση μας θεωρείται ίση με  $3 \left[ \frac{MJ}{kg \text{ water}} \right]$

$N$ : η αφαιρούμενη υγρασία, σε  $\left[ \frac{kg \text{ water}}{kg \text{ wet biomass}} \right]$

Η ποσότητα της αφαιρούμενης υγρασίας δίνεται από τον τύπο:

$$N = \frac{w_{raw} - w_{after \text{ drying}}}{1 - w_{after \text{ drying}}} \quad (3.1.18)$$

Όπου:

$w_{raw}$ : το ποσοστό υγρασίας της ακατέργαστης βιομάζας

$w_{after \text{ drying}}$ : το ποσοστό υγρασίας που έχει η βιομάζα μετά την ξήρανση της. Το ποσοστό αυτό θεωρείται σταθερό για τις διεργασίες όπου πραγματοποιείται ξήρανση και στην περίπτωση μας λαμβάνεται  $w_{after \text{ drying}} = 12 \%$  όταν απαιτείται ξήρανση.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί πως κατά την επεξεργασία μέσω φρύξης του άχυρου και του μίσχανθου δεν απαιτείται ξήρανση καθώς η αρχική τους υγρασία είναι μικρότερη από 12 %.

Διαιρώντας την ποσότητα  $Q_{dr}$  που υπολογίστηκε με τον όρο  $(1 - w_{torr})$  μετατρέπουμε αρχικά σε μονάδες  $\left[ \frac{MJ}{kg \text{ dry biomass}} \right]$ .

$$Q_{dr} \left[ \frac{MJ}{kg \text{ dry biomass}} \right] = \frac{Q_{dr} \left[ \frac{MJ}{kg \text{ wet biomass}} \right]}{(1 - w_{torr})} \quad (3.1.19)$$

Στη συνέχεια διαιρώντας επίσης με τον όρο  $mass \text{ yield}_{dry}$  που περιγράφεται στην εξίσωση 3.1.13 παίρνουμε την θερμότητα που απαιτείται για ξήρανση  $Q_a$  σε μονάδες  $\left[ \frac{MJ}{kg \text{ dry torr biomass}} \right]$ .

$$Q_{dr} \left[ \frac{MJ}{kg \text{ dry torr biomass}} \right] = \frac{Q_{dr} \left[ \frac{MJ}{kg \text{ dry biomass}} \right]}{mass \text{ yield}_{dry}} \quad (3.1.20)$$

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση 3.1.2 υπολογίζουμε τις συνολικές απαιτήσεις θερμότητας για την διεργασία της φρύξης.

Υπολογίζεται έτσι η ποσότητα ξηρής βιομάζας που καίγεται στον λέβητα για την παραγωγή ενός κιλού ξηρής επεξεργασμένης βιομάζας σε  $\left[ \frac{kg \text{ dry biomass}}{kg \text{ dry torr biomass}} \right]$

$$m_{boiler} \left[ \frac{kg \text{ dry biomass}}{kg \text{ dry torr biomass}} \right] = \frac{Q_{total, torr}}{LHV_{dry \text{ biomass}} * \eta, boiler_{biomass}} \quad (3.1.21)$$

Όπου:

$LHV_{dry \text{ biomass}}$ : η κατώτερη θερμογόνος ικανότητα της ξηρής ακατέργαστης βιομάζας, σε  $\left[ \frac{MJ}{kg \text{ dry biomass}} \right]$ .

$\eta, boiler_{biomass}$ : ο βαθμός απόδοσης του λέβητα για καύση βιομάζας. Στην περίπτωση μας ίσο με 0.8

Τελικά το ισοζύγιο μάζας της συνολικής προεπεξεργασίας μέσω φρύξης, δηλαδή η συνολική ποσότητα ξηρής ακατέργαστης βιομάζας που χρειαζόμαστε για να παράγουμε ένα κιλό ξηρής επεξεργασμένης βιομάζας είναι:

$$mass_{dry \text{ torr}} = \left( \frac{1}{mass \text{ yield}_{dry}} \right) + m_{boiler} \quad (3.1.22)$$

Όπου:

$mass_{dry \text{ torr}}$ , σε  $\left[ \frac{kg \text{ dry biomass}}{kg \text{ dry torr biomass}} \right]$ .

Για να μετατρέψουμε σε υγρές ποσότητες βιομάζας έχουμε:

$$\begin{aligned} mass_{torr} \left[ \frac{kg \text{ wet biomass}}{kg \text{ wet torr biomass}} \right] \\ = mass_{dry \text{ torr}} \left[ \frac{kg \text{ dry biomass}}{kg \text{ dry torr biomass}} \right] * \frac{(1 - w_{torr})}{(1 - w_{raw})} \end{aligned} \quad (3.1.23)$$

Ο όρος  $mass_{torr}$  εκφράζει πόσα συνολικά κιλά ακατέργαστης βιομάζας χρειαζόμαστε για να παράγουμε ένα κιλό επεξεργασμένης βιομάζας κατά την προεπεξεργασία μέσω φρύξης.

Το αντίστροφο της ποσότητας που βρέθηκε παραπάνω αποτελεί το κλάσμα συνολικής απόδοσης μάζας της διεργασίας.

Στον Πίνακα 3.1 περιγράφονται όλες οι παραδοχές που έγιναν για τον υπολογισμό του ισοζυγίου μάζας για την διεργασία της φρύξης.



Πίνακας 3.1: Παραδοχές υπολογισμών ισοζυγίου μάζας για την διεργασία φρύξης.

	Άχυρο (wheat straw) (250oC,30min)[29]		Μίσχανθος (miscanthus) (250oC,30min)[30]		Περίβλημα καρπού ελαιοφαινοκόδενδρου (EFB) (250oC,30min)[31]		Φλοιός ξύλου (wood bark) (225oC,30min)[32]		
	raw	torr	raw	torr	raw	torr	raw	torr	
Στοιχειακή ανάλυση (% d.b)	C	47.30%	49.60%	45.71%	49.91%	45.53%	46.75%	48.05%	54.08%
	H	6.80%	6.10%	5.94%	5.23%	5.46%	4.68%	5.93%	5.40%
	N	0.80%	0.90%	0.38%	0.59%	0.45%	1.27%	0.44%	0.52%
	O	37.70%	35.60%	43.93%	38.64%	43.40%	41.42%	43.41%	37.59%
	S	0%	0%	0%	0%	0.04%	0.12	0.05%	0.03%
	ash	6.30%	7.40%	4.04%	5.62%	5.12%	5.75%	2.11%	2.38%
	H2O	4.10%	5%	9.69%	2.30%	65%	5%	45%	5%
	HHV(d.b) [MJ/kg]	<b>18.9</b>	<b>19.8</b>	<b>18.36</b>	<b>21.8</b>	<b>17</b>	<b>17.7</b>	<b>20.14</b>	<b>21.11</b>
	Mass Yield (d.b)		<b>83.60%</b>		<b>81.10%</b>		<b>86%</b>		<b>90.15%</b>
	Energy Yield (d.b)		<b>87.20%</b>		<b>96.30%</b>		<b>89.39%</b>		<b>96.66%</b>
	Χύδην πυκνότητα πέλλετ (bulk density) [kg/m <sup>3</sup> ][33]		750		750		750		750
	Θερμότητα για ξήρανση [MJ/kg water][34]		3		3		3		3
	Θερμότητα για φρύξη [MJ/kg torr biomass][35]		1.1		1.1		1.1		0.9

### 3.1.2. Υδροθερμική ανθρακοποίηση.

Η μελέτη του ισοζυγίου μάζας θα πραγματοποιηθεί με χρήση και ανάλυση δεδομένων που βρέθηκαν από την βιβλιογραφία[25]

Σύμφωνα με τον ισολογισμό ισχύος της διδακτορικής διατριβής[25] η θερμική ισχύς που απαιτείται κατά την διεργασία είναι:

$$\begin{aligned} \text{Για την εισερχόμενη προς κατεργασία ποσότητα βιομάζας : } \dot{Q}_{fuel,in} \\ = 11851 \text{ KW}_{HHV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Για την εισερχόμενη ποσότητα βιομάζας στον καυστήρα : } \dot{Q}_{boiler,in} \\ = 793 \text{ KW}_{HHV} \end{aligned}$$

$$\text{Ισχύς καταναλώσεων ηλεκτρισμού : } P_{el} = 187 \text{ KW}_{el}$$

Αρχικά γίνεται αναγωγή ισχύος σε ενέργεια (KWh) για διεργασία μίας ώρας. Έτσι έχουμε:

$$Q_{fuel,in} = 11851 \text{ KW}h_{HHV}$$

$$Q_{boiler,in} = 793 \text{ KW}h_{HHV}$$

$$P_{el} = 187 \text{ KW}h_{el}$$

ή αντίστοιχα σε (MJ) έχουμε:

$$Q_{fuel,in} = 42663.6 \text{ MJ}$$

$$Q_{boiler,in} = 2854.8 \text{ MJ}$$

Στη συνέχεια με γνωστή την στοιχειακή ανάλυση και επομένως την ανώτατη θερμογόνο ικανότητα για το κάθε είδος βιομάζας σε επεξεργασμένη και ακατέργαστη μορφή από αντίστοιχη βιβλιογραφία μπορούμε να υπολογίσουμε την ποσότητα ξηρής βιομάζας για τα προαναφερθέντα ποσά ενέργειας.

Διαιρώντας λοιπόν με την ανώτερη θερμογόνο ικανότητα της ξηρής ακατέργαστης βιομάζας βρίσκουμε την ποσότητα ξηρής ακατέργαστης βιομάζας στην είσοδο κάθε διεργασίας σε (kg/h).

$$m_{fuel,in \text{ dry}} = \frac{42663.6}{HHV_{dry}} \quad (3.1.24)$$

$$m_{boiler,in\ dry} = \frac{2854.8}{HHV_{dry}} \quad (3.1.25)$$

Όπου:

$HHV_{dry}$ , η ανώτερη θερμογόνο ικανότητα της ξηρής ακατέργαστης βιομάζας σε  $\left[ \frac{MJ}{kg\ dry\ biomass} \right]$ .

Γνωρίζοντας το ποσοστό υγρασίας της ακατέργαστης βιομάζας από την στοιχειακή ανάλυση υπολογίζουμε τα κιλά υγρής ακατέργαστης βιομάζας σε (kg/h).

$$m_{fuel,in\ wet} = \frac{m_{fuel,in\ dry}}{(1 - w_{raw})} \quad (3.1.26)$$

$$m_{boiler,in\ wet} = \frac{m_{boiler,in\ dry}}{(1 - w_{raw})} \quad (3.1.27)$$

Το κλάσμα απόδοσης απώλειας μάζας για κάθε είδος βιομάζας λαμβάνει διαφορετικές τιμές ανάλογα τις συνθήκες της διεργασίας που πραγματοποιείται. Επομένως για κάθε είδος βιομάζας χρησιμοποιήθηκαν τιμές της βιβλιογραφίας από πειραματικές μετρήσεις. Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν παρατίθενται σε πίνακα στο τέλος της υποενότητας.

Το κλάσμα απόδοσης απώλειας μάζας ορίζεται ως εξής:

$$mass\ yield_{dry} = \frac{kg\ dry\ HTC\ biomass}{kg\ dry\ biomass} \quad (3.1.28)$$

Μπορούμε λοιπόν να υπολογίσουμε την ποσότητα ξηρής επεξεργασμένης βιομάζας στην έξοδο της διεργασίας της υδροθερμικής ανθρακοποίησης:

$$m_{fuel,out\ dry} = m_{fuel,in\ dry} * mass\ yield_{dry} \quad (3.1.29)$$

Γίνεται αναγωγή σε υγρή ποσότητα επεξεργασμένης βιομάζας με την γνωστή διαδικασία.

$$m_{fuel,out\ wet} = \frac{m_{fuel,out\ dry}}{(1 - w_{HTC})} \quad (3.1.30)$$

Όπου:

$w_{HTC}$ : το ποσοστό υγρασίας της επεξεργασμένης με υδροθερμική ανθρακοποίηση βιομάζας.

Τελικώς υπολογίζεται ισοζύγιο μάζας για την επεξεργασία μέσω υδροθερμικής ανθρακοποίησης, διαιρώντας την ποσότητα υγρής ακατέργαστης βιομάζας με την ποσότητα υγρής επεξεργασμένης βιομάζας.

Βρίσκουμε δηλαδή πόσα κιλά υγρής ακατέργαστης βιομάζας χρειαζόμαστε συνολικά για την παραγωγή ενός κιλού επεξεργασμένης βιομάζας.

$$mass_{HTC} \left[ \frac{kg \text{ wet biomass}}{kg \text{ wet HTC biomass}} \right] = \frac{m_{fuel,in \text{ wet}}}{m_{fuel,out \text{ wet}}} + \frac{m_{boiler,in \text{ wet}}}{m_{fuel,out \text{ wet}}} \quad (3.1.31)$$

Όπου:

$$mass_{HTC}, \text{ σε } \left[ \frac{kg \text{ wet biomass}}{kg \text{ wet HTC biomass}} \right].$$

Το αντίστροφο του ισοζυγίου μάζας που υπολογίστηκε αποτελεί το κλάσμα συνολικής απόδοσης απώλειας μάζας για την διεργασία της υδροθερμικής ανθρακοποίησης και εκφράζεται σε  $\left[ \frac{kg \text{ wet HTC biomass}}{kg \text{ wet biomass}} \right]$

Εκφράζεται επίσης η απαιτούμενη συνολική ηλεκτρική ισχύς της διεργασίας ανά κιλό παραγόμενου προϊόντος:

$$P_{el} \left[ \frac{KWh, el}{kg \text{ wet HTC biomass}} \right] = \frac{187 KWh_{el}}{m_{fuel,out \text{ wet}}} \quad (3.1.32)$$

Υπολογισμός παροχής νερού:

Στην διεργασία της υδροθερμικής ανθρακοποίησης καταναλώνονται μεγάλες ποσότητες νερού.

Για να γίνει αναγωγή της παροχής νερού που δίνεται από την βιβλιογραφία στην ποσότητα νερού που χρειαζόμαστε για διαφορετικά είδη βιομάζας ακολουθείται η εξής διαδικασία.

Από βιβλιογραφία [36] δίνεται η παροχή νερού στην είσοδο της διεργασίας για το σχηματισμό του υγρού μίγματος σε  $\left[ \frac{kg \text{ water}}{h} \right]$ :

$$\text{παροχή νερού στην είσοδο της διεργασίας (υγρο μίγμα)} = \dot{m}_{water,in} = 3714 \left[ \frac{kg \text{ water}}{h} \right]$$

Δίνεται επίσης η ποσότητα νερού στο ρεύμα που χρησιμοποιείται για την θέρμανση του αντιδραστήρα.

$$\text{παροχή νερού για την θέρμανση του αντιδραστήρα} = \dot{m}_{water,boiler} = 1019 \left[ \frac{kg \text{ water}}{h} \right]$$

Η συνολική παροχή νερού που απαιτείται κατά την διεργασία της ήπιας πυρόλυσης είναι:

$$\text{συνολική παροχή νερού} = \dot{m}_{water,total} = 4733 \left[ \frac{kg \text{ water}}{h} \right]$$

Η συνολική αυτή παροχή του νερού αφορά το υγρό μίγμα και περιέχει την υγρασία της εισερχόμενης ακατέργαστης βιομάζας.

Για να βρούμε πόσα κιλά νερού χρειαζόμαστε για παραγωγή ενός κιλού ξηρής ακατέργαστης βιομάζας  $\left[ \frac{kg\ water}{kg\ dry\ HTC\ biomass} \right]$  χρησιμοποιούμε την εξίσωση 3.1.24.

$$\dot{m}_{water,process} \left[ \frac{kg\ water}{kg\ dry\ HTC\ biomass} \right] = \frac{\dot{m}_{water,total}}{m_{fuel,in\ dry}} \quad (3.1.33)$$

Η ποσότητα νερού που περιέχει η βιομάζα, υπολογιζόμενη με βάση την υγρασία είναι:

$$\dot{m}_{water,biomass} = \frac{w_{raw}}{1 - w_{raw}} \quad (3.1.34)$$

Επομένως η απαιτούμενη παροχή νερού σύμφωνα με το χρησιμοποιούμενο ισοζύγιο ισχύος για την εκτέλεση της διεργασίας σε  $\left[ \frac{kg\ water}{kg\ dry\ biomass} \right]$  είναι:

$$\dot{m}_{water,needed} = \dot{m}_{water,process} - \dot{m}_{water,biomass} \quad (3.1.35)$$

Τέλος γίνεται η αναγωγή σε μονάδες υγρής επεξεργασμένης με υδροθερμική ανθρακοποίηση βιομάζας  $\left[ \frac{kg\ water}{kg\ wet\ HTC\ biomass} \right]$ :

$$\begin{aligned} \dot{m}_{water,needed} \left[ \frac{kg\ water}{kg\ wet\ HTC\ biomass} \right] \\ = \dot{m}_{water,needed} \left[ \frac{kg\ water}{kg\ dry\ biomass} \right] * \left( \frac{1 - w_{HTC}}{mass\ yield_{dry}} \right) \end{aligned} \quad (3.1.36)$$

Με τις παραπάνω αναγωγές μπορούμε να υπολογίσουμε την παροχή νερού για διαφορετικά είδη και παροχές βιομάζας κατά την διεργασία της υδροθερμικής ανθρακοποίησης.

Στον πίνακα 3.2 παρουσιάζονται όλες οι παραδοχές που έγιναν για τους υπολογισμούς των ισοζυγίων μάζας κατά την διεργασία της υδροθερμικής ανθρακοποίησης.

Πίνακας 3.2: Παραδοχές υπολογισμών ισοζυγίου μάζας για την διεργασία της υδροθερμικής ανθρακοποίησης.

		Άχυρο (wheat straw) (200oC,6h)[37]		Μίσχανθος (miscanthus) (200oC,6h)[38]		Περίβλημα καρπού ελαιοφαινόδεσδρου (EFB) (220oC,4h)[25]		Φλοιός ξύλου (wood bark) (240oC,2h)[39]	
		raw	HTC	raw	HTC	raw	HTC	raw	HTC
Στοιχειακή ανάλυση (% d.b)	C	46%	51.2%	46.3%	57.5%	49.18%	65.06%	43.59%	64.65%
	H	6.8%	5.7%	5.93%	5.96%	7%	6.88%	6.15%	4.79%
	N	0.6%	0.5%	0.362%	0.26%	0.64%	0.83%	0.02%	0.01%
	O	37.6%	33.1%	45.57%	35.02%	38.59%	24.49%	46.65%	25.05%
	S	0.2%	0.2%	0.04%	0.02%	0.07%	0.06%	0	0
	ash	8.8%	9.3%	1.75%	2.75%	4.52%	2.68%	3.6%	5.5%
	H2O	6.3%	10%	7.38%	10%	65%	10%	45%	10%
	HHV(d.b) [MJ/kg]	<b>18.24</b>	<b>19.15</b>	<b>19.41</b>	<b>24.35</b>	<b>21.06</b>	<b>28.00</b>	<b>18.5</b>	<b>27</b>
Mass Yield (d.b)			<b>55%</b>		<b>65%</b>		<b>59%</b>		<b>42%</b>
Χύδην πυκνότητα (bulk density) [kg/m <sup>3</sup> ][36]			685		685		685		685
Raw biomass energy input [KW <sub>HHV</sub> ][25]			11851		11851		11851		11851
Biomass to boiler energy input [KW <sub>HHV</sub> ][25]			793		793		793		793
Total water input [kg water/h][36]			4733		4733		4733		4733

### 3.1.3. Έκρηξη ατμού

Το ισοζύγιο μάζας και ενέργειας κατά την προεπεξεργασία μέσω έκρηξης ατμού περιγράφεται με την παρακάτω μεθοδολογία.

Το κλάσμα απόδοσης απωλειών μάζας κατά την διεργασία της έκρηξης ατμού βρίσκεται από τιμές της βιβλιογραφίας και ορίζεται ως εξής:

$$mass\ yield_{dry} = \frac{kg\ dry\ SE\ biomass}{kg\ dry\ biomass} \quad (3.1.37)$$

Όπου:

*kg dry SE biomass*: η μάζα της ξηρής βιομάζας μετά την επεξεργασία της μέσω έκρηξης ατμού.

Θεωρούμε πως κατά την διεργασία έκρηξης ατμού η ποσότητα ατμού που χρειάζεται για την θέρμανση της βιομάζας, παράγεται από λέβητα που καίει το ίδιο είδος βιομάζας ως καύσιμο.

Η απαιτούμενη ενέργεια για παραγωγή κορεσμένου ατμού στους 204°C και πίεση 17 bar δίνεται από τον τύπο[40]:

$$Q_{steam} = \frac{m_{steam}(h_{steam} - Cpw * Tw)}{\eta_{boiler}} \quad (3.1.38)$$

Όπου:

*m<sub>steam</sub>*: η ποσότητα ατμού που απαιτείται για 1 kg ξηρής επεξεργασμένης βιομάζας σε  $\left[ \frac{kg\ steam}{kg\ dry\ SE\ biomass} \right]$

*h<sub>steam</sub>*: η ειδική ενθαλπία κορεσμένου ατμού σε  $\left[ \frac{KJ}{kg} \right]$

*Cpw* : η ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού σε  $\left[ \frac{KJ}{kg\ K} \right]$

*Tw* : η θερμοκρασία του νερού σε [K]

*η<sub>boiler</sub>* : ο βαθμός απόδοσης του λέβητα

*Q<sub>steam</sub>* : η απαιτούμενη ενέργεια για παραγωγή ατμού σε  $\left[ \frac{KJ}{kg\ dry\ SE\ biomass} \right]$

Η ποσότητα ατμού που καταναλώνεται κατά την διεργασία έκρηξης ατμού δίνεται ανά κιλό ξηρής βιομάζας από την βιβλιογραφία.[41]

$$m_{steam} = 1.3 \left[ \frac{kg\ steam}{kg\ dry\ biomass} \right]$$

Γίνεται αναγωγή σε κιλά ξηρής επεξεργασμένης βιομάζας διαιρώντας με το κλάσμα απόδοσης απώλειας μάζας.

$$m_{steam} \left[ \frac{kg \text{ steam}}{kg \text{ dry SE biomass}} \right] = \frac{m_{steam} \left[ \frac{kg \text{ steam}}{kg \text{ dry biomass}} \right]}{mass \text{ yield}_{dry}} \quad (3.1.39)$$

Η ειδική ενθαλπία κορεσμένου ατμού για 204°C και πίεση 17 bar δίνεται από πίνακες ιδιοτήτων κορεσμένου ατμού[42]:

$$h_{steam} = 2793.37 \left[ \frac{KJ}{kg} \right]$$

Η ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού στους 25 °C είναι:

$$C_{pw} = 4.18 \left[ \frac{KJ}{kg \text{ K}} \right]$$

Η θερμοκρασία του νερού είναι  $T_w = 25$  οC.

Ο βαθμός απόδοσης του λέβητα είναι  $\eta_{boiler} = 75\%$

Με γνωστή την στοιχειακή ανάλυση και την κατώτερη θερμογόνο ικανότητα ( $LHV_{wet}$ ) μπορούμε να υπολογίσουμε την ποσότητα βιομάζας που απαιτείται για την παραγωγή της παραπάνω ποσότητας ατμού.

$$m_{boiler} = \frac{Q_{steam}}{LHV_{wet}} \quad (3.140)$$

Όπου:

$$m_{boiler, \sigma\epsilon} \left[ \frac{kg \text{ wet biomass}}{kg \text{ dry SE biomass}} \right]$$

Μετατρέπουμε όπως στα προηγούμενα σε μονάδες ανά κιλό υγρής επεξεργασμένης βιομάζας.

$$m_{boiler} \left[ \frac{kg \text{ wet biomass}}{kg \text{ SE biomass}} \right] = m_{boiler} \left[ \frac{kg \text{ wet biomass}}{kg \text{ dry SE biomass}} \right] * (1 - w_{SE}) \quad (3.1.41)$$

Όπου:

$w_{SE}$ : το ποσοστό υγρασίας της επεξεργασμένης βιομάζας με έκρηξη ατμού.

Εκφράζουμε το κλάσμα απόδοσης απώλειας μάζας σε ποσότητες υγρής βιομάζας:

$$mass \text{ yield}_{wet} \left[ \frac{kg \text{ wet SE biomass}}{kg \text{ wet biomass}} \right] = mass \text{ yield}_{dry} \left( \frac{1 - w_{SE}}{1 - w_{raw}} \right) \quad (3.1.42)$$



Τέλος το ισοζύγιο μάζας για την διεργασία της έκρηξης ατμού είναι:

$$mass_{SE} = m_{boiler} \left[ \frac{kg \text{ wet biomass}}{kg \text{ SE biomass}} \right] + \left( \frac{1}{mass \text{ yield}_{wet}} \right) \quad (3.1.43)$$

Όπου,

$$mass_{SE}: \text{σε} \left[ \frac{kg \text{ wet biomass}}{kg \text{ SE biomass}} \right]$$

Το αντίστροφο της ποσότητας του ισοζυγίου μάζας που υπολογίσθηκε αποτελεί το κλάσμα συνολικής απόδοσης απώλειας μάζας της διεργασίας έκρηξης ατμού και υπολογίζεται σε μονάδες  $\left[ \frac{kg \text{ wet SE biomass}}{kg \text{ wet biomass}} \right]$ .

Στον πίνακα 3.3 παρουσιάζονται όλες οι παραδοχές που έγιναν για τους υπολογισμούς των ισοζυγίων μάζας της διεργασίας έκρηξης ατμού.

Πίνακας 3.3: Παραδοχές για τον υπολογισμό του ισοζυγίου μάζας για την διεργασία της έκρηξης ατμού.

		Φλοιός ξύλου (wood bark) (204oC,17bar,15min)	
		raw[43]	SE[43]
Στοιχειακή ανάλυση (% d.b)	C	52.92%	56.21%
	H	6.71%	6.87%
	N	0.39%	0.45%
	O	36.14%	31.82%
	S	0.26%	0.47%
	ash	3.58%	4.18%
	H2O	45%	7.25%
	HHV(d.b) [MJ/kg]	<b>20.35</b>	<b>21.52</b>
Mass Yield (d.b)[27]			<b>92%</b>
Χύδην πυκνότητα πέλλετ (bulk density) [kg/m <sup>3</sup> ][43]			700
Αναλογία ατμού/βιομάζας [kg steam/kg dry biomass][44]			1.3
Βαθμός απόδοσης λέβητα[40]			75%

Τέλος με γνωστά τα ισοζύγια μάζας για κάθε διεργασία από τους τύπους (3.1.23), (3.1.31), (3.1.43) και την απαιτούμενη ποσότητα καυσίμου στην μονάδα CHP όπως βρέθηκε από εξίσωση (3.1.1) υπολογίζεται η δυναμικότητα επεξεργασίας της εκάστοτε μονάδας για το κάθε διαφορετικό είδος βιομάζας από τον τύπο:

$$\dot{m}_{(torr/HTC/SE)} = \dot{m}_{fuel (torr/HTC/SE)} * mass_{(torr/HTC/SE)} \quad (3.1.44)$$

Όπου,

$\dot{m}_{(torr/HTC/SE)}$ : η δυναμικότητα επεξεργασίας των μονάδων προεπεξεργασίας μέσω φρύξης, υδροθερμικής ανθρακοποίησης και έκρηξης ατμού σε  $\left[ \frac{kg \text{ wet biomass}}{s} \right]$

### 3.2. Κόστος παραγωγής – αγοράς βιομάζας

Προκειμένου να υλοποιηθεί η οικονομική αξιολόγηση των μονάδων επεξεργασίας θα πρέπει πρώτα να διερευνηθεί το κόστος παραγωγής - αγοράς της βιομάζας.

Στην περίπτωση του μίσχανθου θα διερευνηθεί το κόστος καλλιέργειας του. Η περίπτωση αυτή παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς το φυτό αυτό αποτελεί ενεργειακή καλλιέργεια, αξιοποιείται δηλαδή αποκλειστικά ως καύσιμο για την κάλυψη αναγκών ενέργειας.

Τα υπόλοιπα είδη βιομάζας που εξετάζονται αποτελούν παραπροϊόντα άλλων διεργασιών και θεωρούνται σε πολλές περιπτώσεις ως απόβλητα. Επομένως ως κόστος παραγωγής για τα υπόλοιπα τρία είδη βιομάζας λογίζεται το κόστος που αγοράζονται από τα σημεία που βρίσκονται.

- Φλοιός ξύλου

Ο φλοιός ξύλου αποτελεί κύριο παραπροϊόν της επεξεργασίας στρογγυλής ξυλείας. Όπως αναφέρθηκε στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο ο φλοιός αποβάλλεται κατά το κόψιμο των δέντρων σε ένα δάσος και παράγεται ως παραπροϊόν στα πριονιστήρια κατά την επεξεργασία της στρογγυλής ξυλείας. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία [45] η τιμή πώλησης του φλοιού ξύλου στα πριονιστήρια όπου δεν το χρησιμοποιείται και θεωρείται απόβλητο ανέρχεται στα 10 – 30 [\$/tn]. Στην περίπτωση μας λαμβάνουμε μια μέση τιμή των 15 [\$/tn] ή εκφρασμένη σε ευρώ 12.75 [€/tn]. Λόγω μεγάλων διαθέσιμων ποσοτήτων ξυλείας στις χώρες της Σουηδίας, Νορβηγίας θεωρούμε πως η μονάδα επεξεργασίας για το συγκεκριμένο είδος βιομάζας θα βρίσκεται στην χώρα της Σουηδίας.

- Άχυρο από σιτάρι

Το άχυρο αποτελεί κύριο παραπροϊόν της καλλιέργειας του σιταριού. Το σιτάρι είναι το δεύτερο παγκοσμίως σε συγκομιδή δημητριακό και ο καρπός του χρησιμοποιείται για την παραγωγή αλευριού ζωοτροφών και ως πρώτη ύλη στην παρασκευή αλκοολούχων ποτών. Θεωρούμε λοιπόν πως μπορούμε να το προμηθευτούμε εύκολα σε μεγάλες ποσότητες. Η τιμή καλλιέργειας του σιταριού ανέρχεται στα 106 [€/tn] σύμφωνα με την βιβλιογραφία [46]. Όπως προαναφέρθηκε μια καλλιέργεια σίτου παράγει ποσότητα άχυρου ίση με 44% [21]. Έτσι για δυναμικό παραγωγής σιταριού 8.63 [tn wheat/ha] το κόστος καλλιέργειας σίτου υπολογίζεται 9.67 [€/tn].

Προκειμένου να γίνει εκτίμηση του κόστους του άχυρου από το παραπάνω κόστος χρησιμοποιούμε κατάλληλο οικονομικό συντελεστή αναγωγής όπου σύμφωνα με την βιβλιογραφία ισχύει [47] ότι το κόστος άχυρου ανέρχεται στο 12% του κόστους παραγωγής του σίτου (wheat straw/wheat = 12%). Τέλος θεωρώντας από το χωράφι πως μόνο το 70% του παραγόμενου άχυρου μπορεί να συλλεχθεί όπως αναφέραμε και στο κεφάλαιο 2, υπολογίζουμε τελική τιμή κόστους παραγωγής του άχυρου ίση με 12.75 €/tn. Στην περίπτωση θεωρούμε πως το συνολικό ετήσιο δυναμικό παραγωγής του άχυρου στην περιοχή της Γερμανίας (8.5 εκατομμύρια τόνους τον χρόνο) [20] μπορεί να καλύψει τις ανάγκες μας οπότε θεωρείται πως η μονάδα επεξεργασίας θα βρίσκεται επίσης στην περιοχή της Γερμανίας.

- Περίβλημα καρπού ελαιοφαινόδενδρου

Το περίβλημα καρπού ελαιοφαινόδενδρου μπορεί να θεωρηθεί ως απόβλητο κατά την διαδικασία παραγωγής λαδιού από τον καρπό του ελαιοφαινόδενδρου. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία βρέθηκε πως η τιμή προμήθειας ενός τέτοιου παραπροϊόντος στην περιοχή της Μαλαισίας με 65% ποσοστό υγρασίας ανέρχεται στα 3 [€/tn] τιμή που καθιστά την μελέτη χρησιμοποίησης του ως καύσιμο ιδιαίτερα ενδιαφέροντα.

Στην συνέχεια θα διερευνηθεί το κόστος παραγωγής του μίσχανθου.

Ο μίσχανθος ως ενεργειακή καλλιέργεια παράγεται με σκοπό την πλήρη αξιοποίηση του για την κάλυψη αναγκών ενέργειας. Για το λόγο αυτό παρουσιάζεται το παρών μοντέλο υπολογισμών σύμφωνα με την βιβλιογραφία [15], [48], όπου υπολογίζει αναλυτικά το κόστος παραγωγής μιας τέτοιας ενεργειακής καλλιέργειας.

Ο μέσος κύκλο ζωής της καλλιέργειας του μίσχανθου είναι τα 15 έτη.

Για την παραγωγή του απαιτούνται οι παρακάτω διεργασίες:

- ✓ Ενοικίαση γης (land rent)
- ✓ Αγορά ριζών (establishment)
- ✓ Οργωμα/προετοιμασία εδάφους (soil preparation)
- ✓ Φύτεμα ριζών (planting/seeding)
- ✓ Ενίσχυση με λίπασμα (fertilizing)
- ✓ Ψεκασμός με ζιζανιοκτόνο (herbicide)
- ✓ Θερισμός/συλλογή φυτού (harvesting)
- ✓ Φρεζάρισμα χωραφιού (rotarry cultivating)

Στην περίπτωση που εξετάζουμε επιλέχθηκε ως χώρα παραγωγής του μίσχανθου η Ιταλία καθώς σύμφωνα με την βιβλιογραφία εκεί παρατηρείται μεγαλύτερη τιμή απόδοσης παραγωγής (yield) ίση με 22.5 τόνους υγρής βιομάζας ανά εκτάριο γης. [14]

Το κόστος παραγωγής σε ευρώ ανά εκτάριο γης υπολογίζεται για τον μέσο όρο του αθροίσματος του συνολικού κόστους παραγωγής κάθε χρόνου για τα 15 αυτά έτη. Το κόστος κάθε διεργασίας υπολογίζεται με τον υπολογισμό του κόστους λειτουργίας των μηχανημάτων που είναι απαραίτητα για την εκτέλεση της διεργασίας.

#### Υπολογισμός κόστους λειτουργίας μηχανημάτων:

Το κόστος χρήσης των μηχανημάτων χωρίζεται επίσης σε σταθερά και μεταβλητά κόστη.

#### *Σταθερά κόστη (Total Fixed Costs):*

- ✓ Κόστος αγοράς μηχανήματος
- ✓ Κόστος επισκευών και συντήρησης
- ✓ Κόστος φύλαξης
- ✓ Κόστος ασφάλισης
- ✓ Γενικά έξοδα

Τα σταθερά κόστη υπολογίζονται σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$total\ fixed\ cost = D + RM + interest + St + I + GE \quad (3.2.1)$$

Όπου:

$D$  : Απόσβεση του κόστους αγοράς του μηχανήματος [€/yr]

$RM$  : Το κόστος συντήρησης και επισκευών [€/yr]

$interest$  : Κόστος τόκων [€/yr]

$St$  : Κόστος φύλαξης [€/yr]

$I$  : Κόστος ασφάλισης [€/yr]

$GE$ : Γενικά έξοδα [€/yr]

Η απόσβεση του κόστους αγοράς του μηχανήματος δίνεται από τον τύπο:

$$D = \frac{PP - resale\ value}{tech\ life * use} \quad (3.2.2)$$

Όπου:

$PP$  : Το κόστος απόκτησης του μηχανήματος [€]

$resale\ value$  : Η αξία μεταπώλησης του μηχανήματος [€]

$tech\ life$  : χρόνος ζωής μηχανήματος [h]

$use$  : η χρήση του μηχανήματος [h/yr]

Το κόστος συντήρησης και επισκευών υπολογίζεται με τον παρακάτω τύπο σύμφωνα με την βιβλιογραφία[49].

$$RM = RF1 * PP * \left( \frac{tech\ life}{1000} \right)^{RF2} \quad (3.2.3)$$

Όπου:

$RF1, RF2$  : συντελεστές επισκευής και συντήρησης λαμβάνουν τιμές σύμφωνα με την βιβλιογραφία[50]

Στην εικόνα 3.1 παρουσιάζονται οι τιμές των μεταβλητών  $RF1, RF2$  για διάφορα γεωργικά μηχανήματα.

Table 3 – Field efficiency, field speed, and repair and maintenance cost parameters

Machine	Field efficiency		Field speed				Estimated life	Total life R&M cost	Repa
	Range %	Typical %	Range mph	Typical mph	Range km/h	Typical km/h	h	% of list price	RF1
<b>TRACTORS</b>									
2 wheel drive & stationary							12 000	100	0.007
4 wheel drive & crawler							16 000	80	0.003
<b>TILLAGE &amp; PLANTING</b>									
Moldboard plow	70–90	85	3.0–6.0	4.5	5.0–10.0	7.0	2 000	100	0.29
Heavy-duty disk	70–90	85	3.5–6.0	4.5	5.5–10.0	7.0	2 000	60	0.18
Tandem disk harrow	70–90	80	4.0–7.0	6.0	6.5–11.0	10.0	2 000	60	0.18
(Coulters) chisel plow	70–90	85	4.0–6.5	5.0	6.5–10.5	8.0	2 000	75	0.28
Field cultivator	70–90	85	5.0–8.0	7.0	8.0–13.0	11.0	2 000	70	0.27
Spring tooth harrow	70–90	85	5.0–8.0	7.0	8.0–13.0	11.0	2 000	70	0.27
Roller-packer	70–90	85	4.5–7.5	6.0	7.0–12.0	10.0	2 000	40	0.16
Mulcher-packer	70–90	80	4.0–7.0	5.0	6.5–11.0	8.0	2 000	40	0.16
Rotary hoe	70–85	80	8.0–14.0	12.0	13–22.5	19.0	2 000	60	0.23
Row crop cultivator	70–90	80	3.0–7.0	5.0	5.0–11.0	8.0	2 000	80	0.17
Rotary tiller	70–90	85	1.0–4.5	3.0	2.0–7.0	5.0	1 500	80	0.36
Row crop planter	50–75	65	4.0–7.0	5.5	6.5–11.0	9.0	1 500	75	0.32
Grain drill	55–80	70	4.0–7.0	5.0	6.5–11.0	8.0	1 500	75	0.32
<b>HARVESTING</b>									
Corn picker sheller	60–75	65	2.0–4.0	2.5	3.0–6.5	4.0	2 000	70	0.14
Combine	60–75	65	2.0–5.0	3.0	3.0–6.5	5.0	2 000	60	0.12
Combine (SP) <sup>1)</sup>	65–80	70	2.0–5.0	3.0	3.0–6.5	5.0	3 000	40	0.04
Mower	75–85	80	3.0–6.0	5.0	5.0–10.0	8.0	2 000	150	0.46
Mower (rotary)	75–90	80	5.0–12.0	7.0	8.0–19.0	11.0	2 000	175	0.44
Mower-conditioner	75–85	80	3.0–6.0	5.0	5.0–10.0	8.0	2 500	80	0.18
Mower-conditioner (rotary)	75–90	80	5.0–12.0	7.0	8.0–19.0	11.0	2 500	100	0.16
Windrower (SP)	70–85	80	3.0–8.0	5.0	5.0–13.0	8.0	3 000	55	0.06
Side delivery rake	70–90	80	4.0–8.0	6.0	6.5–13.0	10.0	2 500	60	0.17
Rectangular baler	60–85	75	2.5–6.0	4.0	4.0–10.0	6.5	2 000	80	0.23
Large rectangular baler	70–90	80	4.0–8.0	5.0	6.5–13.0	8.0	3 000	75	0.10
Large round baler	55–75	65	3.0–8.0	5.0	5.0–13.0	8.0	1 500	90	0.43
Forage harvester	60–85	70	1.5–5.0	3.0	2.5–8.0	5.0	2 500	65	0.15
Forage harvester (SP)	60–85	70	1.5–6.0	3.5	2.5–10.0	5.5	4 000	50	0.03
Sugar beet harvester	50–70	60	4.0–6.0	5.0	6.5–10.0	8.0	1 500	100	0.59
Potato harvester	55–75	60	1.5–4.0	2.5	2.5–6.5	4.0	2 500	70	0.19
Cotton picker (SP)	60–75	70	2.0–4.0	3.0	3.0–6.0	4.5	3 000	80	0.11
<b>MISCELLANEOUS</b>									
Fertilizer spreader	60–80	70	5.0–10.0	7.0	8.0–16.0	11.0	1 200	80	0.63
Boom-type sprayer	50–80	65	3.0–7.0	6.5	5.0–11.5	10.5	1 500	70	0.41
Air-carrier sprayer	55–70	60	2.0–5.0	3.0	3.0–8.0	5.0	2 000	60	0.20
Bean puller-windrower	70–90	80	4.0–7.0	5.0	6.5–11.5	8.0	2 000	60	0.20
Beet topper/stalk chopper	70–90	80	4.0–7.0	5.0	6.5–11.5	8.0	1 200	35	0.28
Forage blower							1 500	45	0.22
Forage wagon							2 000	50	0.16
Wagon							3 000	80	0.19

Εικόνα 3.1: Τιμές των συντελεστών RF1,RF2[50]

Το κόστος φύλαξης  $St$  είναι ίσο με την τιμή του 1.75 % του κόστους αγοράς του μηχανήματος (PP)

Το κόστος ασφάλισης  $I$  είναι ίσο με την τιμή του 0.5 % του κόστους αγοράς του μηχανήματος (PP)

Τα γενικά έξοδα  $GE$  είναι ίσα με την τιμή του 3 % του κόστους αγοράς του μηχανήματος (PP)

Το κόστος τόκων υπολογίζεται με τον τύπο:

$$interest = \frac{(PP + resale\ value)}{2} * \frac{i}{use} \quad (3.2.4)$$

Όπου:

$I$  : το επιτόκιο αναγωγής , λαμβάνεται ίσο με 10 %

Μεταβλητά κόστη (Total Variable Costs):

- ✓ Κόστος καυσίμου
- ✓ Κόστος λίπανσης μηχανημάτων
- ✓ Κόστος εργασίας

Τα μεταβλητά λειτουργικά κόστη υπολογίζονται με τον τύπο:

$$\text{total variable costs} = f_c + L_c + labor_c \quad (3.2.5)$$

Όπου:

$f_c$  : Κόστος καυσίμου

$L_c$  : Κόστος λίπανσης μηχανημάτων

$labor_c$  : Κόστος εργασίας

Το κόστος καυσίμου υπολογίζεται:

$$f_c = f_p * f_L \quad (3.2.6)$$

Όπου:

$f_p$  : τιμή πετρελαίου [€/L]. Η τρέχουσα τιμή πετρελαίου κίνησης για την περιοχή της Ιταλίας είναι 1.4[€/L].

$f_L$  : κατανάλωση πετρελαίου [l/h]

Σύμφωνα με την ομοσπονδία ASAE(American Society of Agricultural Engineering)[50] η κατανάλωση καυσίμου των μηχανημάτων υπολογίζεται ως το 22 % της ισχύς (power) του μηχανήματος σε [KW]

Αντίστοιχα για το κόστος λίπανσης πολλαπλασιάζουμε την κατανάλωση λαδιών [l/h] με την τιμή λαδιού λίπανσης [€/L]

$$L_c = L_p * L_L \quad (3.2.7)$$

Όπου:

$L_p$  : τιμή λαδιού λίπανσης [€/L]. Η τιμή λαδιού λίπανσης λαμβάνεται ίσης με 3.4 [€/L].[51]

$L_L$  : κατανάλωση λαδιού [l/h]

Η κατανάλωση λαδιού υπολογίζεται από τον τύπο:[52]

$$L_L = 0.021 + 0.00059 * P \quad (3.2.8)$$

Όπου:

$P$  : η ισχύς του μηχανήματος σε [KW]

Το κόστος εργασίας είναι:

$$labor_c = 1.1 * labor_p \quad (3.2.9)$$

Όπου:

$labor_p$  : το μέσο κόστος εργασίας σε [€/h]

Στην εξίσωση 3.2.9 το μέσο κόστος εργασίας πολλαπλασιάζεται με τον αριθμό 1.1 έτσι ώστε να ληφθεί υπόψη ο μη παραγωγικός χρόνος που απαιτείται για μεταφορές, σέρβις, λίπανση κλπ.

Για την χώρα της Ιταλίας το μέσο κόστος εργασίας παίρνει την τιμή 27.8 [€/h] σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή στατιστική υπηρεσία.[53]

Επομένως το συνολικό κόστος του κάθε μηχανήματος δίνεται από το άθροισμα του σταθερού και του μεταβλητού κόστους των μηχανημάτων.

$$total\ cost = total\ fixed\ costs + total\ variable\ costs \quad (3.2.10)$$

Όπου:

$total\ cost$  : το συνολικό κόστος λειτουργίας μηχανήματος σε [€/h]

*Κόστος εκτέλεσης διεργασίας:*

Για την εύρεση του κόστους εκτέλεσης της κάθε διεργασίας θα πρέπει να βρεθούν τι είδους μηχανήματα χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση κάθε διεργασίας αλλά και την ικανότητα απόδοσης εργασίας, δηλαδή πόσες λειτουργεί ένα μηχάνημα για την απόδοση συγκεκριμένης ποσότητας παραγωγής ανά εκτάριο γης.

$$process\ cost = total\ cost_{machine} * working\ capacity \quad (3.2.11)$$

Όπου:

$total\ cost_{machine}$  : το άθροισμα του κόστους λειτουργίας των μηχανημάτων που χρησιμοποιούνται σε μια διεργασία σε [€/h]

$working\ capacity$  : η ικανότητα απόδοσης εργασίας κάθε μηχανήματος σε [h/ha]

Στον πίνακα 3.4 παρουσιάζονται τα απαιτούμενα μηχανήματα για την εκτέλεση κάθε μιας διεργασίας κατά την παραγωγή του μίσχανθου.

Πίνακας 3.4: Σύνολο απαιτούμενων μηχανημάτων για την εκτέλεση των διεργασιών παραγωγής του μίσχανθου[15]

Όργωμα και προετοιμασία εδάφους	Άροτρο (plough) Τρακτέρ 100KW
Φύτεμα ριζών	Μηχανή φύτευσης ριζών (rhizome planter) Τρακτέρ 75KW Μηχανικός καλλιεργητής εδάφους (power harrower) Τρακτέρ 75KW
Ενίσχυση με λίπασμα	Μηχανή διασκορπισμού λιπάσματος (fertilizer spreader) Τρακτέρ 60KW
Ψεκασμός με ζιζανιοκτόνο	Ψεκαστήρας (sprayer) Τρακτέρ 60KW Μηχανικός καλλιεργητής (weed cultivator) Τρακτέρ 60KW
Θερισμός/Συλλογή φυτού	Χορτο-συλλεκτο-δετική μηχανή (pull-type harvester-baler that delivers large bales) 3 Τρακτέρ 75KW 3 μηχανήματα φόρτωσης 2 τρέιλερ
Σκάψιμο εδάφους	Περιστροφικός καλλιεργητής εδάφους (rotary cultivator)



Στο σημείο αυτό επισημαίνεται πως πέρα από το κόστος χρήσης των μηχανημάτων σε κάποιες διεργασίες προστίθενται κάποια επιπλέον κόστη.

*Το κόστος ενοικίασης της γης:* Για ενοικίαση γης προς καλλιέργεια στην χώρα της Ιταλίας λαμβάνεται η τιμή κόστους 253 ευρώ ανά εκτάριο γης σύμφωνα με την βιβλιογραφία[54].

*Το κόστος αγοράς ριζών.* Σύμφωνα με την βιβλιογραφία[15] για την επίτευξη απόδοσης παραγωγής περίπου με 25 ξηρών τόνων μίσχανθου το εκτάριο η ποσότητα ριζών που χρειαζόμαστε είναι 2000 ρίζες ανά εκτάριο γης. Η τιμή αγοράς ριζών μίσχανθου βρέθηκε ίση με 0.65 ευρώ την ρίζα[55].

Κατά την διεργασία της λίπανσης υπολογίζονται επίσης το κόστος απόκτησης του λιπάσματος. Έτσι οι ποσότητες λιπάσματος που απαιτούνται και οι αντίστοιχες τιμές τους δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 3.5: Απαιτούμενες ποσότητες λιπασμάτων και τιμές αγοράς.

Λίπασμα για αναπλήρωση αζώτου (N)	74 [kg/ha/y]	200.56 [€/tn]
Λίπασμα για αναπλήρωση καλίου (K)	15 [kg/ha/y]	262.33 [€/tn]
Λίπασμα για αναπλήρωση φωσφόρου (P)	159 [kg/ha/y]	169.29 [€/tn]

Αντίστοιχα για την διεργασία του ψεκασμού με ζιζανιοκτόνο δίνονται η απαιτούμενες ποσότητες και οι τιμές τους.

Πίνακας 3.6: Απαιτούμενες ποσότητες ζιζανιοκτόνων και τιμές αγοράς.

Bromosynil/ioxynil/fluoxypyr	2[kg/ha]	32 [€/kg]
Triflex-tra	7.7 [kg/ha]	7.6 [€/kg]
Glyphosate	2.5 [kg/ha]	6.2 [€/kg]

Στον πίνακα 3.7 παρουσιάζεται η συχνότητα εκτέλεσης διεργασιών στα διάφορα στάδια παραγωγής του μίσχανθου.

Πίνακας 3.7: Συχνότητα εκτέλεσης διεργασιών στα διάφορα στάδια παραγωγής του μίσχανθου για κύκλο ζωής 15 έτη.[15]

Κατηγορία Κόστους	Διεργασίες που εκτελούνται	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	1	1	1	1	1
		0	1	2	3	4	5				0	1	2	3	4	5
Ενοίκιο	Ενοικίαση γης	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Προετοιμασία χωραφιού	Προετοιμασία εδάφους	1														
	Καλλιέργεια εδάφους με μηχανικό καλλιεργητή	2														
Προετοιμασία χωραφιού	Φύτεμα ριζών	1														
Λίπασμα	Ενίσχυση με λίπανση		2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1
Αντιμετώπιση ζιζανίων	Ψεκασμός	1														
	Όργωμα με weed cultivator	1	1													
Θερισμός/Συλλογή	Θερισμός		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Εργασίες καθαρισμού χωραφιού	Καλλιέργεια εδάφους με περιστροφικό καλλιεργητή															2
	Ψεκασμός															1

Με γνωστές τις τιμές ικανότητας απόδοσης εργασίας και έπειτα από υπολογισμό του κόστους των μηχανημάτων που χρησιμοποιούνται βρίσκουμε το κόστος για το σύνολο των διεργασιών που πραγματοποιούνται κάθε έτος.

Τέλος το ετήσιο κόστος παραγωγής του μίσχανθου (€/ha) υπολογίζεται ως η μέση τιμή του ετήσιου κόστους για τον κύκλο ζωής της καλλιέργειας.

Στον πίνακα 3.9 παρουσιάζονται τεχνικά στοιχεία των μηχανημάτων που χρησιμοποιήθηκαν για τους υπολογισμούς όπως βρέθηκαν στην βιβλιογραφία[15]

Πίνακας 3.9: Τεχνικά στοιχεία μηχανημάτων.

	Power (h y <sup>-1</sup> )	Depreciation (h y <sup>-1</sup> )	Use <sup>a</sup> price (ks)	Purchase	Repair cients	coeff- (see Table 4)		Fuel use (l h <sup>-1</sup> )	Lubrication (l h <sup>-1</sup> )	Storage (s h <sup>-1</sup> )	Insurance (s h <sup>-1</sup> )	General costs (s h <sup>-1</sup> )	Work capacity 2004 (h ha <sup>-1</sup> )	Work capacity 2030 (h ha <sup>-1</sup> )	Additional (kW) equipment	(y)
						RF 1	RF 2									
Tractor 60 kW	60	12	800	53	0.003	2.00	13	0.06	1.2	0.3	2.0	n/a	n/a			
Tractor 75 kW	75	12	800	72	0.003	2.00	17	0.07	1.6	0.4	2.7	n/a	n/a			
Tractor 100 kW	100	12	800	75	0.003	2.00	22	0.08	1.6	0.5	2.8	n/a	n/a			
Plough	n/a	20	70	27	0.290	1.80	n/a	n/a	6.7	1.9	11.6	1.30	1.30			88 kW tractor
Power harrower	n/a	20	70	11	0.230	1.40	n/a	n/a	2.9	0.8	4.9	0.40	0.40			75 kW tractor
Rhizomes planter	n/a	10	150	18	0.320	2.10	n/a	n/a	2.1	0.6	3.5	1.00	1.00			100 kW tractor
Drill	n/a	20	70	16	0.320	2.10	n/a	n/a	3.9	1.1	6.7	0.40	0.40			60 kW tractor
Roll	n/a	20	70	13	0.160	1.30	n/a	n/a	3.2	0.9	5.4	0.32	0.32			60 kW tractor
Fertilizer spreader	n/a	10	50	4.4	0.630	1.30	n/a	n/a	1.5	0.4	2.6	0.50	0.50			60 kW tractor
Sprayer	n/a	10	100	14	0.410	1.30	n/a	n/a	2.5	0.7	4.3	0.60	0.60			60 kW tractor
Weed cultivator	n/a	10	100	5.3	0.230	1.40	n/a	n/a	0.9	0.3	1.6	0.32	0.32			60 kW tractor
Mower	n/a	20	70	12	0.180	1.60	n/a	n/a	3.0	0.9	5.2	0.50	0.50			60 kW tractor
Mounted big baler <sup>b</sup>	n/a	5	400	123	0,000	5.40	1.5	9.2	10.0	103	1.08	400	0.70			Three 75 kW tractors and fork loaders; two trailers
Self-propelled chopper <sup>b</sup>	80	5	500	185	0.030	2.00	18	0.07	6.5	1.8	11.1	0.58	0.58			Two 75 kW tractors and trailers
Trailer	n/a	12	250	25	0.190	1.30	n/a	n/a	1.7	0.5	3.0	n/a	n/a			75 kW tractor
Fork	n/a	12	250	3.0	0.007	2.00	n/a	n/a	0.2	0.1	0.4	n/a	n/a			100 kW tractor
Rotary cultivator	n/a	12	40	10	0.270	1.40	n/a	n/a	4.5	1.3	7.8	0.80	0.80			100 kW tractor
Sources	d	d, a	d	b-f, h	a	a	a	a	d	d	d	a, d, g	See text			

### 3.3. Κόστος συλλογής βιομάζας

Θεωρούμε πως η συλλογή και επομένως η μεταφορά της βιομάζας πραγματοποιείται σε κύκλο ακτίνας  $R$  στο κέντρο του οποίου βρίσκεται η αντίστοιχη μονάδα προεπεξεργασίας.

Ο υπολογισμός του κόστους μεταφοράς της βιομάζας χωρίζεται στα εξής μέρη:

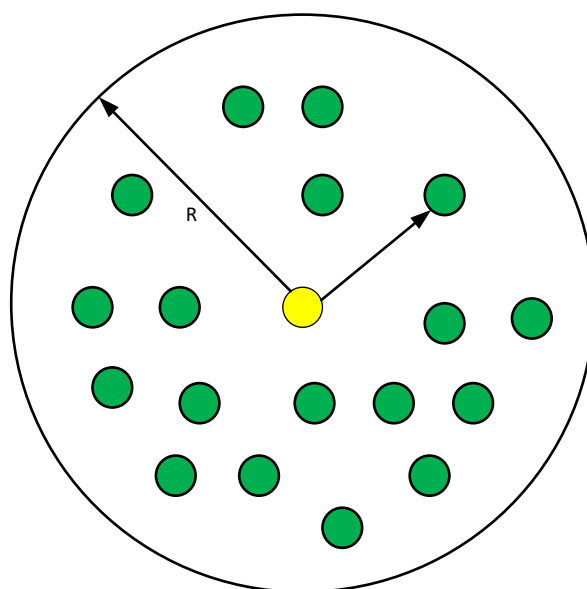
- Υπολογισμός της μέσης απόστασης μεταφοράς της βιομάζας σε κύκλο ακτίνας  $R$ .
- Ανάπτυξη μεθοδολογίας υπολογισμού του κόστους συλλογής βιομάζας με την χρήση φορτηγών.

#### 3.3.1. Ακτίνα συλλογής

Το μοντέλο που αναπτύσσεται παρακάτω σύμφωνα με την βιβλιογραφία[56], μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό των απαιτήσεων μεταφοράς για δεδομένη απόδοση παραγωγής βιομάζας (yield) και επεξεργασίας της σε κεντρική μονάδα.

Στην ανάπτυξη του παρακάτω μοντέλου υπολογισμών θεωρείται πως η βιομάζα παράγεται σε συγκεκριμένη έκταση γης  $A$ .

Θεωρώντας κυκλική έκταση στο κέντρο της οποίας βρίσκεται η μονάδα επεξεργασίας σύμφωνα με την εικόνα 3.2 δίνονται:



● Μονάδα προεπεξεργασίας    ● Σημεία Παραγωγής-αγοράς Βιομάζας

Εικόνα 3.2: Ακτίνα συλλογής

Η συνολική έκταση που απαιτείται για την παραγωγή βιομάζας ίσης με το δυναμικό επεξεργασίας  $\dot{q}_{(torr/HTC/SE)}$  της μονάδας προεπεξεργασίας είναι:

$$A = \frac{\dot{m}_{(torr/HTC/SE)}}{(yield) * \varphi} \quad (3.3.1)$$

Όπου,

$A$ : Η έκταση καλλιέργειας σε [ha].

$\dot{m}_{(torr/HTC/SE)}$ : η ποσότητα βιομάζας που επεξεργάζεται η μονάδα σε [tn/yr].

$yield$ : το δυναμικό παραγωγής της βιομάζας [tn/ha/y].

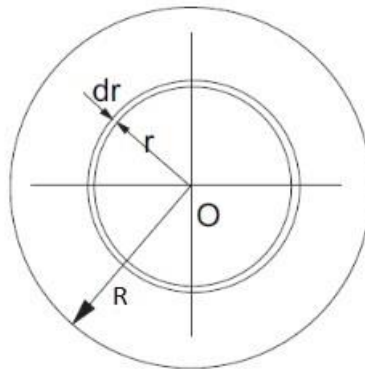
$\varphi$ : περιοριστική μεταβλητή εδάφους. Περιγράφει το πόσο αραιά είναι τα σημεία καλλιέργειας στην περιοχή  $A$ .

Για την βελτίωση της παραπάνω υπόθεσης, θεωρείται ότι η περιοχή συλλογής περιορίζεται σε κάποιο ποσοστό λόγω γεωγραφικών περιορισμών όπως ανομοιότητες εδάφους κλπ.

Χωρίζοντας τον πλήρη κύκλο σε  $n$  τμήματα το κλάσμα  $1/n$  περιγράφει το κομμάτι του κύκλου που γίνεται η παραγωγή

Έτσι η μέγιστη ακτίνα παραγωγής επομένως και συλλογής της βιομάζας είναι:

$$R = \sqrt{\frac{n * A}{\pi}} \quad (3.3.2)$$



Εικόνα 3.3: Επιφανειακή ολοκλήρωση περιοχής συλλογής.[57]

Εάν η αρχική επιφάνεια συλλογής της βιομάζας χωρισθεί σε στοιχειώδεις δακτυλίους πάχους  $dr$  όπως φαίνεται στην εικόνα 3.3 τότε με επιφανειακή ολοκλήρωση παίρνουμε την μέση απόσταση  $\bar{R}$ . Η απόσταση αυτή δείχνει την συνολική απόσταση μεταφοράς για την συλλογή της βιομάζας σε κάθε δακτύλιο  $dr$  στο κέντρο  $O$ . [58]

$$\bar{R} = \int_0^R \frac{2\pi r^2 dr}{\pi R^2} = \frac{2}{3} R \quad (3.3.3)$$

Συνοψίζοντας αντικαθιστώντας στην εξίσωση 3.3.3 την εξίσωση 3.3.2 η μέση απόσταση μεταφοράς για συλλογή της βιομάζας στο κέντρο κύκλου ακτίνας R είναι:

$$\bar{R} = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{n}{\varphi}} \sqrt{\frac{\dot{m}_{(torr/HTC/SE)}}{yield}} \quad (3.3.4)$$

Όπου,

$\dot{m}_{(torr/HTC/SE)}$ : Η δυναμικότητα επεξεργασίας της μονάδας προεπεξεργασίας σε [tn/yr]

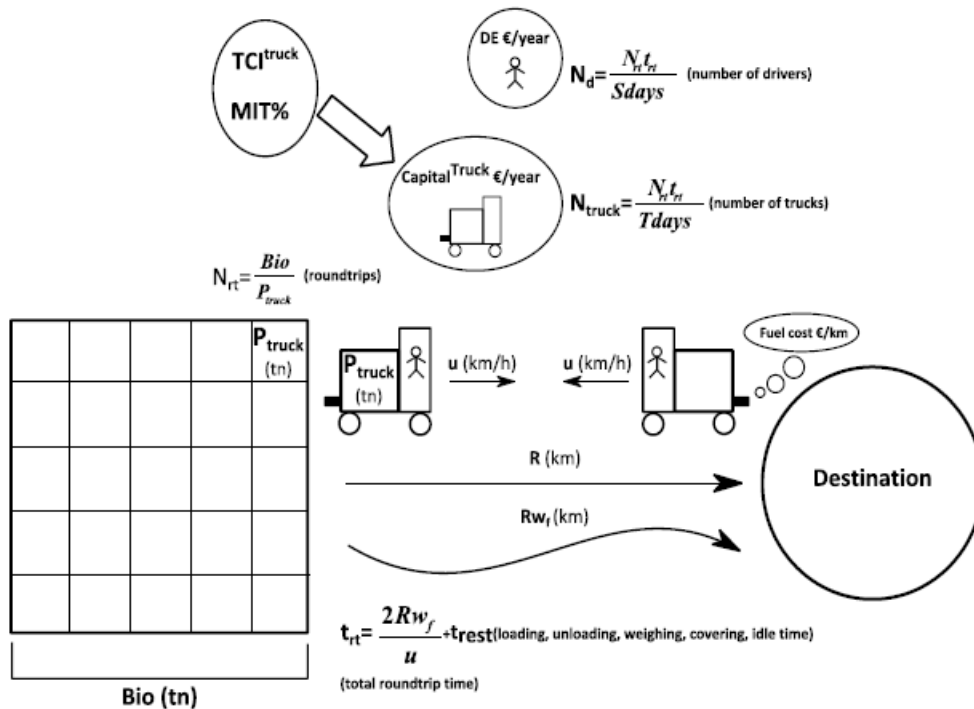
Για τους τελικούς υπολογισμούς ως θεωρούμε μια μέση περίπτωση για τους περιορισμούς n,φ δηλαδή

$$n = 8$$

$$\varphi = 0.4$$

### 3.3.2. Κόστος συλλογής βιομάζας.

Το κόστος μεταφοράς βιομάζας υπολογίζεται σύμφωνα με την βιβλιογραφία[59] με τους παρακάτω τύπους. Η διαδικασία υπολογισμού περιγράφεται σχηματικά στην εικόνα 3.4.



Εικόνα 3.4: Σχηματική απεικόνιση υπολογισμού του κόστους μεταφοράς. [59]

Το κόστος μεταφοράς χωρίζεται σε δυο συνιστώσες.

- Το συνολικό κεφάλαιο επένδυσης.
- Το κόστος συντήρησης και λειτουργίας.

*Συνολικό κεφάλαιο επένδυσης:*

Το συνολικό κεφάλαιο επένδυσης περιλαμβάνει το κόστος απόκτησης των φορτηγών. Τα οικονομικά στοιχεία για τις τιμές αγοράς των φορτηγών λαμβάνονται από την βιβλιογραφία[60].

Η νομοθεσία της ευρωπαϊκής ένωσης επιτρέπει την χρήση φορτηγών μέγιστου μικτού βάρους 40 τόνων [61] και καθαρού βάρους γύρω στους 28 τόνους καθώς το βάρος του τρέιλερ ανέρχεται σε 12 περίπου τόνους. Περιορισμός υπάρχει επίσης και στον μέγιστο όγκο φορτίου που μπορεί να μεταφερθεί ο οποίος σύμφωνα με την βιβλιογραφία είναι 120 m<sup>3</sup>. Λόγω του περιορισμού όγκου αυξάνονται σημαντικά τα κόστη μεταφοράς βιομάζας χαμηλής πυκνότητας όπως ο μίσχανθος και το άχυρο.

Το κόστος αγοράς του φορτηγού ανάγεται σε ετήσια παρούσα χρονική αξία σύμφωνα με τον τύπο:

$$TCI = TCI^{truck} * \frac{i}{1 - (1 + i)^{-N}} \quad (3.3.5)$$

Όπου,

$TCI$ : Το κόστος αγοράς φορτηγού σε [€]

$i$ : Το επιτόκιο αναγωγής

$N$ : ο μέσος κύκλος ζωής των φορτηγών σε [yr]

*Κόστη συντήρησης και λειτουργίας:*

Τα κόστη συντήρησης και λειτουργίας αποτελούνται από τις εξής συνιστώσες:

- Κόστος συντήρησης: Περιλαμβάνει το κόστος των ανταλλακτικών που θα χρησιμοποιηθούν και το σέρβις των φορτηγών.
- Κόστος μισθοδοσίας: Ο ετήσιος μισθός κάθε οδηγού. Η τιμή αυτή διαφέρει για κάθε περίπτωση που εξετάζουμε ανάλογα με την αντίστοιχη χώρα.
- Κόστος ασφάλισης: Το κόστος της οδικής ασφάλειας των οδηγών.

Στην συνέχεια παρουσιάζεται η μεθοδολογία υπολογισμού του κόστους μεταφοράς σε ευθεία απόσταση R.

Το πλήθος των απαιτούμενων δρομολογίων δίνεται από τον τύπο:

$$N_{rt} = \frac{\dot{m}_{(torr/HTC/SE)}}{P_{truck}} \quad (3.3.6)$$

Όπου,

$\dot{m}_{(torr/HTC/SE)}$ : Η συνολική ποσότητα βιομάζας προς μεταφορά σε [tn/yr].

$P_{truck}$ : Η χωρητικότητα του κάθε φορτηγού σε [tn].

Η πραγματική απόσταση λαμβάνεται ίση με δύο φορές την μέση απόσταση  $\bar{R}$  που υπολογίστηκε από τον τύπο (3.3.4) πολλαπλασιασμένη με έναν παράγοντα οδικής τύλιξης που παίρνει συνήθως την τιμή  $\sqrt{2}$  και δηλώνει την καμπυλότητα του πραγματικού δρομολογίου.

$$R_{rt} = 2\bar{R}w_f \quad (3.3.7)$$

Ο χρόνος που απαιτείται για την εκτέλεση ενός δρομολογίου με επιστροφής δίνεται:

$$t_{rt} = \frac{R_{rt}}{u} + t_{rest} \quad (3.3.8)$$

Όπου,

$u$ : Η μέση ταχύτητα οδήγησης σε [km/h].

$t_{rest}$ : Ο χρόνος που ο οδηγός δεν εργάζεται λόγω ξεκούρασης, φόρτωσης και εκφόρτωσης φορτίου, περιλαμβάνοντας επίσης πρόσθετες καθυστερήσεις κατά την διάρκεια του δρομολογίου. [h]

Το πλήθος των εργαζομένων που απαιτούνται είναι:

$$N_D = \frac{N_{rt}t_{rt}}{S * (days)} \quad (3.3.9)$$

Όπου,

$S$ : Ώρες εργασίας του κάθε οδηγού την ημέρα [h].

$days$ : Οι μέρες του χρόνου που εργάζονται οι οδηγοί. Υπολογίζεται με βάση τις αργίες ,5 ημέρες εργασίας την εβδομάδα και τις απαραίτητες άδειες. Στην περίπτωση μας χρησιμοποιήθηκε η τιμή 224 ημερών εργασίας το έτος.

Αντίστοιχα ο συνολικός αριθμός των φορτηγών που απαιτούνται είναι:

$$N_{truck} = \frac{N_{rt}t_{rt}}{T * (days)} \quad (3.3.10)$$

Όπου,

$T$ : Ο χρόνος που λειτουργεί το κάθε φορτηγό την ημέρα σε [h]. Εφόσον το δρομολόγιο που εκτελείται είναι μετ επιστροφής ο χρόνος αυτός ανέρχεται στις 16 ώρες.

Το πλήθος δρομολογίων που εκτελεί κάθε φορτηγό είναι:

$$N_{rt}^{truck} = \frac{N_{rt}}{N_{truck}} \quad (3.3.11)$$



Σύμφωνα με την εξίσωση 3.3.5 το ετήσιο κόστος για το κάθε φορτηγό ανοιγμένο στην παρούσα χρονική περίοδο δίνεται από τον τύπο:

$$Cost^{truck} = TCI^{truck} \left[ \frac{i}{1 - (1 + i)^{-N}} + MIT\% \right] + F_p F_c R_{rt} N_{rt}^{truck} \quad (3.3.12)$$

Όπου,

$MIT\%$ : Το κόστος συντήρησης ασφάλισης και φορολογίας. Σύμφωνα με την εκτελούμενη μεθοδολογία λαμβάνεται ίσο με 25%.

$F_p$ : Η τιμή αγοράς καυσίμου σε [€/L]. Η τιμή αυτή διαφέρει ανάλογα με την χώρα την οποία πραγματοποιείται η μεταφορά.

$F_c$ : Η κατανάλωση καυσίμου σε [L/km].

Στην εξίσωση 3.3.12 παρατηρείται ο πρώτος όρος είναι σταθερός και δεν μεταβάλλεται με την απόσταση μεταφοράς. Αντίθετα ο δεύτερος όρος εκφράζει κυρίως τα λειτουργικά έξοδα της μετακίνησης και μεταβάλλεται σε συνάρτηση με την απόσταση μεταφοράς  $\bar{R}$ .

Το συνολικό κόστος μεταφοράς περιλαμβάνει το άθροισμα του κόστους για τα φορτηγά και το κόστος μισθοδοσίας οδηγών.

Έτσι έχουμε:

$$Cost^{total} = N_{truck} Cost^{truck} + N_D * (DE) \quad (3.3.13)$$

Όπου,

$DE$ : Ο ετήσιο μισθός κάθε εργαζομένου σε [€/yr]

Με αντικατάσταση όλων των παραπάνω εξισώσεων στην εξίσωση 3.64 και έπειτα από εκτέλεση πράξεων έχουμε:

$$Cost^{total} = \frac{2\bar{R}w_f \dot{m}_{(torr/HTC/SE)}}{P_{truck} u * (days)} \left( \frac{Capital^{truck}}{T} + \frac{(DE)}{S} + F_p F_c u * days \right) + \left( \frac{Capital^{truck}}{T} + \frac{(DE)}{S} \right) \frac{\dot{m}_{(torr/HTC/SE)}}{P_{truck} * (days)} t_{rest} \quad (3.3.14)$$

Τέλος υπολογίζεται το ειδικό κόστος ανά τόνο μεταφοράς διαιρώντας την εξίσωση 3.3.14 με την συνολική μεταφερόμενη ποσότητα δηλαδή την δυναμικότητα παραγωγής της μονάδας προεπεξεργασίας  $\dot{q}_{(torr/HTC/SE)}$ .

$$SpCost^{total} = \frac{2\bar{R}w_f}{P_{truck} u * (days)} \left( \frac{Capital^{truck}}{T} + \frac{(DE)}{S} + F_p F_c u * days \right) + \left( \frac{Capital^{truck}}{T} + \frac{(DE)}{S} \right) \frac{t_{rest}}{P_{truck} * (days)} \quad (3.3.15)$$

Επομένως αντικαθιστώντας στον τύπο την απόσταση  $\bar{R}$  της εξίσωσης 3.3.4 παίρνουμε το κόστος συλλογής της βιομάζας στο κέντρο κύκλου ακτίνας R από τον τύπο:

*Collection cost*

$$= \frac{4w_f \sqrt{\frac{n}{\phi}} \sqrt{\frac{\dot{m}_{(torr/HTC/SE)}}{yield}}}{3P_{truck} u * (days)} \left( \frac{Capital^{truck}}{T} + \frac{(DE)}{S} + F_p F_c u * days \right) + \left( \frac{Capital^{truck}}{T} + \frac{(DE)}{S} \right) \frac{t_{rest}}{P_{truck} * (days)} \quad (3.3.16)$$

Για τον υπολογισμό της μέγιστης χωρητικότητας φορτηγών λήφθηκαν υπόψη οι νομικοί περιορισμοί που ισχύουν για την μεταφορά προϊόντων όπως αναφέρθηκε προηγουμένως[61]. Ο μέγιστος επιτρεπόμενος όγκος φορτίου σε ένα φορτηγό είναι 120 m<sup>3</sup> και το μέγιστο βάρος του 40 μικτούς τόνους με τρέιλερ 12 τόνων. Επομένως το μέγιστο καθαρό φορτίο που μπορεί να μεταφέρει ένα φορτηγό περιορίζεται είτε από τον όγκο είτε από το βάρος ανάλογα με το είδος της βιομάζας το οποίο μεταφέρεται.

Στην περίπτωση μας η χύδη πυκνότητα των ειδών βιομάζας προς μεταφορά είναι:

- Μίσχανθος σε μορφή δέματος (bales) : 140 kg/m<sup>3</sup>
- Άχυρο σε μορφή δέματος (bales) : 140 kg/m<sup>3</sup>
- Περίβλημα καρπού ελαιοφαικικόδενδρου : 350 kg/m<sup>3</sup>
- Φλοιός ξύλου : 350 kg/m<sup>3</sup>

Πολλαπλασιάζοντας την χύδη πυκνότητα με το μέγιστο επιτρεπόμενο όγκο των φορτηγών παίρνουμε το μέγιστο φορτίο που μεταφέρεται για κάθε είδος βιομάζας δηλαδή την χωρητικότητα του κάθε φορτηγού.

Παρατηρούμε ότι για τον μίσχανθο και το άχυρο η μεταφορά περιορίζεται από τον μέγιστο όγκο καθώς η ποσότητα που μπορεί να μεταφερθεί (16.8 tn) είναι μικρότερη της μέγιστης δυνατής ποσότητας μεταφοράς (28 tn).

Αντίθετα για το φλοιό ξύλου και τον καρπό ελαιοφαικικόδενδρου τα οποία αποτελούν είδη βιομάζας υψηλής πυκνότητας, η ποσότητα που μπορεί να μεταφερθεί σύμφωνα με τον μέγιστο επιτρεπόμενο όγκο (42 tn) υπερβαίνει το μέγιστο βάρος των 28 τόνων που μπορούμε να μεταφέρουμε και επομένως υπόκεινται σε περιορισμό βάρους.

Στον Πίνακα 3.10 αναφέρονται συγκεντρωτικά οι παραδοχές που έγιναν για τον υπολογισμό το κόστους συλλογής.

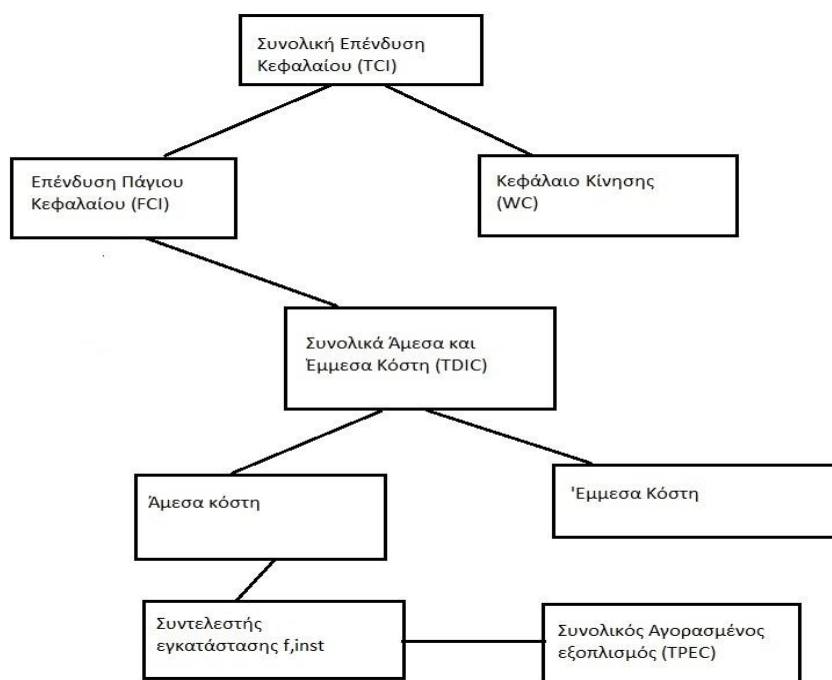
Πίνακας 3.10: Παράμετροι υπολογισμών κόστους συλλογής.

	Άχυρο	Μίσχανθος	Περίβλημα καρπού ελαιοφαινοκόδενδρου	Φλοιός ξύλου
Χωρητικότητα φορτηγού P, truck [tn]	16.8	16.8	28	28
Το κόστος αγοράς φορτηγού TCI[€] [60]	72964	72964	76268	76268
Κόστη Λειτουργίας και Συντήρησης MIT [TCI%]	25%	25%	25%	25%
Επιτόκιο $i$ [%]	10%	10%	10%	10%
Χρόνος ζωής οχήματος N[yr] [60]	7	7	6	6
Μισθός οδηγού [€/yr]	29000	21000	4816	32000
Κατανάλωση καυσίμου $F_c$ [L/km]	0.3	0.3	0.32	0.32
Τιμή προμήθειας καυσίμου $F_p$ [€/L]	1.17	1.2	0.48	1.2
Συντελεστής οδικής τύλιξης $w_f$	1.41	1.41	1.41	1.41
Χρόνος για εργασίες (φόρτωση ,ζύγιση φορτηγού, κάλυψη φορτίου) $t_{rest}$ [h]	0.5	0.5	0.5	0.5
Ταχύτητα φορτηγών $u$ [km/h]	50	50	50	50
Ημέρες εργασίας ανά έτος (days)	224	224	224	224
Ώρες ημερήσιας βάρδιας εργασίας οδηγών $S$ [h]	8	8	8	8
Ημερήσιος χρόνος λειτουργίας του κάθε φορτηγού $T$ [h]	16	16	16	16

### 3.4. Οικονομική αξιολόγηση μονάδων προεπεξεργασίας.

#### 3.4.1. Σχήμα οικονομικής ανάλυσης και ορισμοί

Στην ενότητα αυτή θα γίνει ανάλυση και επεξήγηση των οικονομικών όρων που χρησιμοποιούνται για την οικονομική αξιολόγηση μιας μονάδας προεπεξεργασίας[51]. Στην εικόνα 3.5 παρουσιάζεται το διάγραμμα ανάλυσης συνολικής επένδυσης κεφαλαίου για μια τέτοια μονάδα.



Εικόνα 3.5: Ανάλυση συνολικής επένδυσης κεφαλαίου

*Η Συνολική επένδυση κεφαλαίου (Total capital investment):*

Αποτελείται από το άθροισμα της επένδυσης πάγιου κεφαλαίου (*Fixed Capital Investment – FCI*) και του κεφαλαίου εργασίας (*Working Capital – WC*).

Αφορά την συνολική τιμή κόστους της μονάδας παραγωγής έτσι ώστε να είναι έτοιμη να λειτουργήσει.

### 3.4.2. Μέθοδος υπολογισμού της συνολικής επένδυσης κεφαλαίου TCI

Για τον υπολογισμό της συνολικής επένδυσης κεφαλαίου της μονάδας επεξεργασίας της βιομάζας θα ακολουθεί η μεθοδολογία που προτείνεται από την βιβλιογραφία[51].

Υπολογισμός κόστους αγορασμένου εξοπλισμού εγκατάστασης (Purchased equipment cost - PEC):

Για τον υπολογισμό του κόστους εξοπλισμού (π.χ. αντιδραστήρες, εναλλάκτες θερμότητας, συμπιεστές κλπ.) της μονάδας προεπεξεργασίας χρησιμοποιήθηκε ο κανόνας του συντελεστή έξι δεκάτων[51] σύμφωνα με τον οποίο έχουμε:

$$C_A = C_B X^{0.6} \quad (3.4.1)$$

Όπου,

$C_A$ : το κόστος εξοπλισμού της νέας μονάδας.

$C_B$ : το κόστος εξοπλισμού γνωστής από την βιβλιογραφία μονάδας με συγκεκριμένο δυναμικό λειτουργίας.

και

$$X = \frac{\dot{m}_{(torr/HTC/SE)}}{\dot{m}_{OLD}} \quad (3.4.2)$$

Ο κανόνας αυτός μας βοηθάει στην εκτίμηση του κόστους εξοπλισμού όταν δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα κόστους για συγκεκριμένο δυναμικό λειτουργίας. Μπορεί να γίνει έτσι εκτίμηση του κόστους του νέου εξοπλισμού με κλιμάκωση μεγέθους όταν είναι γνωστό το  $C_B$  για συγκεκριμένο δυναμικό λειτουργίας.

Το κόστος νέας παρόμοιας μονάδας ίδιου τύπου με δυναμικότητα ίση με  $X$  φορές τη δυναμικότητα της αρχικής είναι ίσο με  $X^{0.6}$  φορές το κόστος της αρχικής. Διευκρινίζεται πως για την χρήση της εξίσωσης 3.4.1 οι δυο εξοπλισμοί θα πρέπει να είναι ίδιου τύπου και υλικού κατασκευής.

Ο κανόνας του συντελεστή έξι δεκάτων δεν πρέπει να εφαρμόζεται για εξοπλισμό με δυναμικό λειτουργίας μεγαλύτερο της δεκαπλάσιας ποσότητας του αρχικού για την αποφυγή σφαλμάτων. Ο τύπος της εξίσωσης 3.4.1 μπορεί να γενικευθεί για το σύνολο του εξοπλισμού του νέου υπολογιζόμενου σταθμού όταν δεν είναι διαθέσιμο το κόστος του κάθε εξοπλισμού ξεχωριστά.

Το άθροισμα του κόστους όλου το εξοπλισμού αποτελεί το κόστος αγορασμένου εξοπλισμού PEC.

Στη συνέχεια γίνεται ο υπολογισμός του κόστους παραδιδόμενου εξοπλισμού (Total purchased equipment cost – TPEC) σύμφωνα με τον τύπο:

$$TPEC = \sum (PEC + f_1 PEC + f_2 PEC + \dots + f_n PEC) = PEC \sum (f_1 + f_2 + \dots + f_n) \quad (3.4.3)$$

Όπου:

PEC: το κόστος αγοράς του εξοπλισμού.

$f_1$ : πολλαπλασιαστικοί συντελεστές. Οι συντελεστές αυτοί εξαρτώνται από τον τύπο διεργασίας, τα υλικά κατασκευής του εξοπλισμού την τοποθεσία της μονάδας επεξεργασίας κλπ.

Έπειτα από τον υπολογισμό του κόστους παρατιδόμενου εξοπλισμού θα πρέπει να γίνει η αναγωγή των τιμών που βρέθηκαν σε τιμές στην παρούσα χρονική περίοδο. Η αναγωγή αυτή γίνεται με την χρησιμοποίηση δεικτών κόστους.

Δείκτες κόστους (cost indexes):

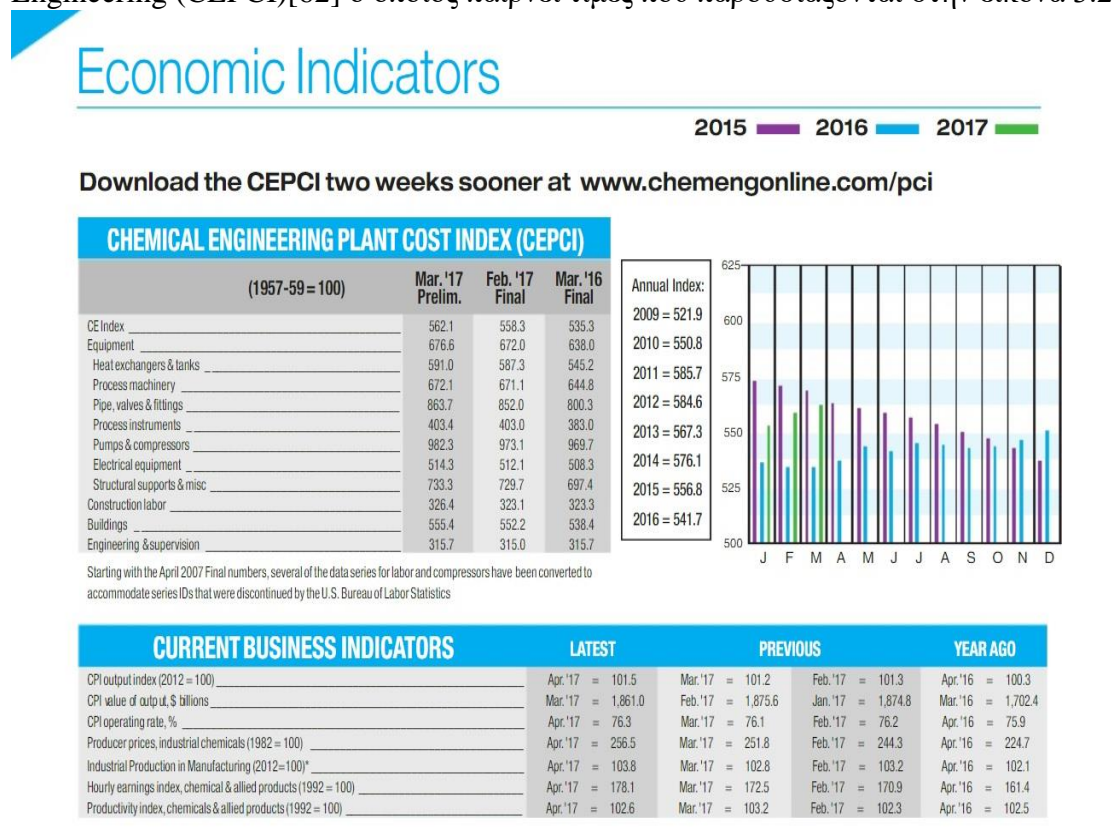
Τα υπολογιζόμενα κόστη μεταβάλλονται κατά την πάροδο του χρόνου εξαιτίας των διαφορετικών οικονομικών συνθηκών που επικρατούν όπως οι διαφορές στον πληθωρισμό, οι πόλεμοι και οι οικονομικές κρίσεις.

Προκειμένου να γίνει αναθεώρηση του κόστους του παρελθόντος σε δεδομένα αντιπροσωπευτικά για τις σημερινές συνθήκες χρησιμοποιούνται κάποιοι δείκτες κόστους.

Επομένως το κόστος για την τρέχουσα χρονική περίοδο δίνεται από τον τύπο:

$$\left( \frac{\text{κόστος τρέχουσας περιόδου} = \text{αρχικό κόστος} * \text{τιμή δείκτη τρέχουσας περιόδου}}{\text{τιμή δείκτη του χρόνου που υπολογίσθηκε το αρχικό κόστος}} \right) \quad (3.4.4)$$

Στη βιβλιογραφία αναφέρονται τρεις διαφορετικοί δείκτες κόστους. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα χρησιμοποιηθεί ο δείκτης κόστους του περιοδικού Chemical Engineering (CEPCI)[62] ο οποίος παίρνει τιμές που παρουσιάζονται στην εικόνα 3.2



Εικόνα 3.6: Δείκτες κόστους CEPCI[62]

Σύμφωνα με τον Timmerhaus[51] θεωρούμε έναν νέο συντελεστή εγκατάστασης ο οποίος ορίζεται ως το άθροισμα των παραπάνω συντελεστών ( $f_{\text{installation}}$ ). Πολλαπλασιάζοντας τον συντελεστή αυτό με το κόστος παραδιδόμενου εξοπλισμού της μονάδας προκύπτει το συνολικό άμεσο κόστος της εγκατάστασης (Direct Cost Investment – DCI). Έτσι έχουμε:

$$DCI = TPEC * f_{\text{installation}} \quad (3.4.5)$$

Στη συνέχεια θα περιγραφούν αναλυτικά οι συνιστώσες που αποτελούν τα άμεσα κόστη (DCI) της εγκατάστασης.

Άμεσα κόστη (Direct cost investment – DCI):

Περιλαμβάνουν τα κόστη που σχετίζονται με την κατασκευή της εγκατάστασης. Αυτά αναλύονται στα παρακάτω.

Συνολικός αγορασμένος εξοπλισμός (Total Purchased Equipment Cost - TPEC):

Περιλαμβάνει το κόστος αγοράς εξοπλισμού της εγκατάστασης (π.χ. αντιδραστήρες, εναλλάκτες θερμότητας, συμπιεστές κλπ.).

Κόστος Εγκατάστασης αγορασμένου εξοπλισμού (Purchased equipment installation):

Πρόκειται για το κόστος εγκατάστασης του συνολικού αγορασμένου εξοπλισμού. Το κόστος εγκατάστασης αγορασμένου εξοπλισμού κυμαίνεται μεταξύ 25-55 % του συνολικού αγορασμένου εξοπλισμού.

Όργανα μέτρησης και συστήματα ελέγχου ( instrumentation and controls):

Αφορά τα κόστη αγοράς και εγκατάστασης βοηθητικού εξοπλισμού όπως όργανα που χρησιμοποιούνται για μετρήσεις και το κόστος συστημάτων ελέγχου. Το κόστος αυτό εξαρτάται από το ποσό ελέγχου που απαιτείται στην μονάδα και κυμαίνεται μεταξύ 8-50 % του συνολικού κόστους αγορασμένου εξοπλισμού.

Σωληνώσεις (piping):

Αφορά την αγορά των σωληνώσεων και των βανών που χρησιμοποιούνται για την διεργασία. Περιλαμβάνει επίσης το κόστος σύνδεσης και τοποθέτησης αυτών αλλά και την προμήθεια υλικών απαραίτητων για τις συνδέσεις. Το κόστος των σωληνώσεων μπορεί να φτάσει μέχρι και το 80 % του κόστους συνολικού αγορασμένου εξοπλισμού.

Ηλεκτρικά συστήματα (electrical systems):

Περιλαμβάνει το κόστος καλωδίων ρεύματος, φωτισμού, μετασχηματιστών, κλπ. Κυμαίνεται σε τιμές 15 – 30 % του συνολικού κόστους αγορασμένου εξοπλισμού. Για διεργασίες επεξεργασίας στερεού προϊόντος.

Κτήρια (buildings including services):

Περιλαμβάνεται οτιδήποτε κόστος σχετίζεται με τα κτήρια της εγκατάστασης αλλά και τα υδραυλικά, τη θέρμανση, τον εξαερισμό κλπ.

*Βελτιώσεις οικοπέδου (yard improvements):*

Αφορά τα κόστη εξομάλυνσης του εδάφους, δημιουργίας δρόμων και οτιδήποτε άλλο σχετίζεται με το οικόπεδο στο οποίο είναι εγκατεστημένη η μονάδα διεργασίας. Είναι περίπου το 10 – 20 % του συνολικού κόστους αγορασμένου εξοπλισμού.

Στον πίνακα 3.11 παρουσιάζεται η μεθοδολογία υπολογισμού του συντελεστή εγκατάστασης για τις μονάδες επεξεργασίας που εξετάζουμε.

<u>Πίνακας 3.11: Άμεσα κόστη μονάδας προεπεξεργασίας</u>	
Συνολικό Κόστος Αγορασμένου Εξοπλισμού (TPEC)	100 %
Εγκατάσταση αγορασμένου εξοπλισμού	45 %
Όργανα και συστήματα ελέγχου	18 %
Σωληνώσεις	16 %
Ηλεκτρικά Συστήματα	10 %
Κτίρια (συμπεριλαμβανομένων υπηρεσιών)	25 %
Βελτιώσεις οικοπέδου	15 %
Εγκαταστάσεις εξυπηρέτησης	40 %
<b>Άμεσα κόστη εγκατάστασης (DCI)</b>	<b>269% του TPEC</b>

Έμμεσα κόστη (Indirect Costs – IC):

Τα έμμεσα κόστη αναλύονται στις παρακάτω υποκατηγορίες.

*Αμοιβή εργολάβου και νομικά έξοδα:*

Αφορούν τα κόστη που σχετίζονται με τις περιβαλλοντικές απαιτήσεις αλλά και τα κόστη των συμβολαίων.

*Κατασκευαστικά έξοδα:*

Περιλαμβάνουν τα κόστη αγοράς του εξοπλισμού κατασκευής, την μισθοδοσία των εργατών που σχετίζονται με την κατασκευή, την ασφάλιση τους και φόρους.

*Υπηρεσίες μηχανικών και επίβλεψη:*

Αφορά οτιδήποτε σχετίζεται με τις υπηρεσίες που παρέχουν μηχανικοί σχετικά με την ανέγερση της μονάδας επεξεργασίας. Το κόστος αυτό καλύπτει το κόστος για ταξίδια, επικοινωνία αλλά και τα λογιστικά κόστη.



*Απρόοπτα έξοδα (contingency):*

Περιλαμβάνει το κόστος για οτιδήποτε απρόοπτο μπορεί να συμβεί στην μονάδα επεξεργασίας.

Τα έμμεσα κόστη υπολογίζονται και αυτά ως ποσοστό του συνολικού αγορασμένου εξοπλισμού σύμφωνα με τα στοιχεία του πίνακα 3.12.

Αμοιβή εργολάβου και νομικά έξοδα	21 %
Κατασκευαστικά έξοδα	39 %
Υπηρεσίες μηχανικών και επίβλεψη	33 %
Απρόοπτα έξοδα	35 %
<b>Έμμεσα κόστη εγκατάστασης (IC)</b>	<b>128 % του TPEC</b>

Το άθροισμα των άμεσων και των έμμεσων κοστών της εγκατάστασης δίνουν την επένδυση πάγιου κεφαλαίου η οποία ορίζεται ως εξής:

*Επένδυση πάγιου κεφαλαίου (Fixed Capital investment – FCI):*

Το συνολικό κεφάλαιο που χρειαζόμαστε για την αγορά και εγκατάσταση του εξοπλισμού της μονάδας επεξεργασίας αλλά και επιμέρους άλλα κόστη.

*Κεφάλαιο κίνησης (Working Capital):*

Το κεφάλαιο κίνησης είναι ένα ποσό που διατίθεται για την εξασφάλιση της βιωσιμότητας και της ομαλής λειτουργίας της εγκατάστασης. Το κεφάλαιο κίνησης είναι το σύνολο των χρημάτων που διατίθενται για:

- ο Τις πρώτες ύλες και προμήθειες υλικών.
- ο Την αποθήκευση των τελικών προϊόντων και την επεξεργασία των ημιτελών.
- ο Τους εισπρακτέους λογαριασμούς.
- ο Την μηνιαία πληρωμή των λειτουργικών εξόδων, όπως μισθούς, προμήθεια υλικών διεργασίας.
- ο Τους πληρωτέους λογαριασμούς
- ο Τους πληρωτέους φόρους

Σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν και το διάγραμμα της Εικόνας 3.13 για τον υπολογισμό της συνολικής επένδυσης κεφαλαίου έχουμε:

Συνολικό Κόστος Αγορασμένου Εξοπλισμού (TPEC)	100 %
Συντελεστής εγκατάστασης f, installation	269 %
Άμεσα κόστη (DIC)	269 % TPEC
Έμμεσα κόστη (IC)	128 % TPEC
Επένδυση Πάγιου Κεφαλαίου (FCI)	397 % TPEC
Κεφάλαιο κίνησης (WC)	70 % TPEC
Συνολική Επένδυση κεφαλαίου (TCI)	467 % TPEC

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα κόστη εξοπλισμού όπως βρέθηκαν στην βιβλιογραφία, σύμφωνα με τα οποία έγινε η κοστολόγηση του αρχικού συνολικού κόστους αγορασμένου εξοπλισμού (TPEC) για τις τρεις διαφορετικές μονάδες επεξεργασίας βιομάζας που εξετάζουμε.

Για τις μονάδες προεπεξεργασίας φρύξης και υδροθερμικής ανθρακοποίησης τα κόστη εξοπλισμού βρέθηκαν από την βιβλιογραφία με την μορφή του άμεσου κόστους δηλαδή συμπεριλαμβανομένου του κόστους εγκατάστασης, δίνοντας παράλληλα και τον συντελεστή εγκατάστασης που χρησιμοποιήθηκε για κάθε κομμάτι του εξοπλισμού.

Για την μονάδα φρύξης έχουμε:

Πίνακας 3.14: Κόστη εξοπλισμού και συντελεστές κλιμάκωσης για τον υπολογισμό κόστους εξοπλισμού για την νέα μονάδα φρύξης.[25]

Δυναμικότητα επεξεργασίας: 10 [tn dry biomass/h] ,2012  
Έτος: 2014

	DCI [Μ€]	$f_{\text{installation}}$	Συντελεστής κλιμάκωσης
Ξηραντήρας	1.64	2.46	0.6
Αντιδραστήρας φρύξης	2.5	2.46	0.72
Καυστήρας	0.61	2.46	0.66
Εναλλάκτης θερμότητας	0.35	2.46	0.59
Συμπιεστής πτητικών αερίων (torgas)	0.52	2.46	0.84
Συμπιεστής καυσαερίων	0.17	2.46	0.84
Συσκευή ψύξης	0.13		0.5
Πελλετοποιητής	1.26	2.46	0.71
Χειρισμός και αποθήκευση πέλλετ	0.6	2.46	0.66

Διαιρώντας το άμεσο κόστος DCI με τον συντελεστή εγκατάστασης βρίσκουμε το κόστος εξοπλισμού της μονάδας επεξεργασίας.

Ο αντιδραστήρας που χρησιμοποιείται στην μονάδα της βιβλιογραφίας είναι τύπου κινούμενης κλίνης και έχει μέγιστο δυναμικό λειτουργίας 12.5 [tn/h].

Επομένως η αρχική κλιμάκωση της εξεταζόμενης μονάδας θα γίνει για μέγιστη δυναμικότητα επεξεργασίας ίση με 12.5 tn/h. Για μεγαλύτερες παροχές θεωρείται παράλληλη χρήση του ίδιου εξοπλισμού.

Πρέπει δηλαδή να ισχύει:

$$r = \frac{\dot{m}_{(torr/HTC/SE)}}{n} \leq 12.5, n = 1, 2, \dots, i \quad (3.4.6)$$

Όπου,

$n$ : ο αριθμός των παράλληλων εξοπλισμών και παίρνει μόνο ακέραιες τιμές.

$r$ : η δυναμικότητα επεξεργασίας στην οποία γίνεται η αρχική κλιμάκωση κόστους.

Έχοντας υπολογίσει το νέο κόστος για δυναμικότητα επεξεργασίας  $r$  πολλαπλασιάζουμε με τον αριθμό  $n$  για να βρούμε το ζητούμενο κόστος της νέας μονάδας.

Τέλος τα κόστη εξοπλισμού που βρέθηκαν από την βιβλιογραφία ισχύουν για την τότε χρονική περίοδο. Με χρήση των δεικτών κόστους ανάγεται το τελικό κόστος στην παρούσα χρονική περίοδο.

Για την μονάδα υδροθερμικής ανθρακοποίησης:

Πίνακας 3.15: Κόστη εξοπλισμού και συντελεστές κλιμάκωσης για τον υπολογισμό κόστους εξοπλισμού για την νέα μονάδα υδροθερμικής ανθρακοποίησης.[36]

Δυναμικότητα επεξεργασίας :12 [tn wet biomass/h]		
Έτος υπολογισμών: 2012		
	DCI [Μ€]	$f_{\text{installation}}$
Αντιδραστήρας	3.51	2.46
Αντλία	1.01	2.46
Δοχείο εκτόνωσης	1	2.46
Διαχωριστής	1.39	2.46
Ξηραντήρας	1.27	2.46
Πελλετοποιητής	0.62	2.46
Αποθήκευση και χειρισμός πέλλετ	0.3	2.46
Κοχλιωτό τροφοδοτικό	0.15	2.46
Εναλλάκτες θερμότητας	0.62	2.46
Ψύκτες	0.54	2.46
Ανεμιστήρες	0.05	2.46
Καυστήρας	0.51	2.46

Για την μονάδα υδροθερμικής ανθρακοποίησης δεν αναφέρονται περιορισμοί επομένως η κλιμάκωση πραγματοποιείται για την δυναμικότητα επεξεργασίας της νέας μονάδας  $\dot{q}_{(torr/HTC/SE)}$  με χρήση του κανόνα των έξι δεκάτων που περιγράφει η εξίσωση (3.4.1). Χρησιμοποιώντας τους κατάλληλους δείκτες κόστους υπολογίζεται το κόστος εξοπλισμού της νέας μονάδας.

Για την μονάδα έκρηξης ατμού δεν βρέθηκε αναλυτική κοστολόγηση του εξοπλισμού λόγω περιορισμένης βιβλιογραφίας. Από την βιβλιογραφία [44] βρέθηκε μια εκτίμηση του συνολικού κόστους κεφαλαίου (TCI) για μονάδα δυναμικότητας επεξεργασίας 72.7 [tn/h]. Από την ίδια πηγή θεωρείτε πως το συνολικό κόστος κεφαλαίου (TCI) είναι 4 φορές το κόστος του συνολικού εξοπλισμού (TPEC). Συνοψίζοντας:

Πίνακας 3.16: Κόστος συνολικής επένδυσης κεφαλαίου για την μονάδα έκρηξης ατμού.[44]

Δυναμικότητα επεξεργασίας: 72.7[tn dry biomass/h]		
Έτος υπολογισμών: 1990		
	TCI [Μ€]	TCI/PEC
Total investment	74.2	4

Εκτιμώντας το κόστος εξοπλισμού της μονάδας που περιγράφεται στον πίνακα 3.16 βρίσκουμε με κλιμάκωση μεγέθους το κόστος εξοπλισμού για την νέα μονάδα προεπεξεργασίας όπως στα προηγούμενα και ανάγουμε το κόστος στην παρούσα χρονική στιγμή με χρήση των δεικτών κόστους.

### 3.4.3. Λειτουργικά κόστη

Στη συνέχεια της οικονομικής ανάλυσης για τον υπολογισμό του κόστους παραγωγής της επεξεργασμένης βιομάζας είναι απαραίτητο να υπολογισθούν και τα λειτουργικά κόστη μιας μονάδας επεξεργασίας. Τα κόστη αυτά σχετίζονται άμεσα με την διαδικασία παραγωγής και χωρίζονται σε δυο κατηγορίες, τα Σταθερά και τα Μεταβλητά λειτουργικά κόστη.

#### ➤ Σταθερά Λειτουργικά κόστη:

Περιλαμβάνει τα κόστη που μεταβάλλονται ελάχιστα έως καθόλου για διαφορετικές ποσότητες επεξεργασίας. Αυτά αναλύονται στις εξής συνιστώσες.

#### *Συντήρηση και επισκευές (maintenance and repairs):*

Το κόστος που αφορά την συντήρηση της εγκατάστασης και επισκευής των βλαβών που προκύπτουν. Εκφράζεται συνήθως ως το 2% της επένδυσης πάγιου κεφαλαίου (FCI).

#### *Ασφάλιση και φορολογία (insurance and taxes):*

Εξαρτάται από την περιοχή στην οποία βρίσκεται εγκατεστημένη η μονάδα επεξεργασίας και την υπάρχουσα νομοθεσία. Το ετήσιο κόστος φόρων και ασφάλειας ανέρχεται στο 2 % της επένδυσης πάγιου κεφαλαίου.

#### *Γενικά Έξοδα (overhead expenses):*

Τα κόστη που αφορούν γενικά έξοδα της μονάδας παραγωγής όπως κόστη προμήθειας μηχανημάτων που δεν σχετίζονται άμεσα με την διεργασία υπολογίζονται ίσα με το 60 % της μισθοδοσίας στην μονάδα επεξεργασίας.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω στον πίνακα 3.17 έχουμε:

Συντήρηση και επισκευές	7 % FCI
Ασφάλιση και φορολογία	2 % FCI
Γενικά Έξοδα	15 % μισθών

➤ Μεταβλητά λειτουργικά κόστη:

Τα μεταβλητά λειτουργικά κόστη σχετίζονται άμεσα με την παραγωγική διαδικασία της διεργασίας. Αναλύονται στα παρακάτω.

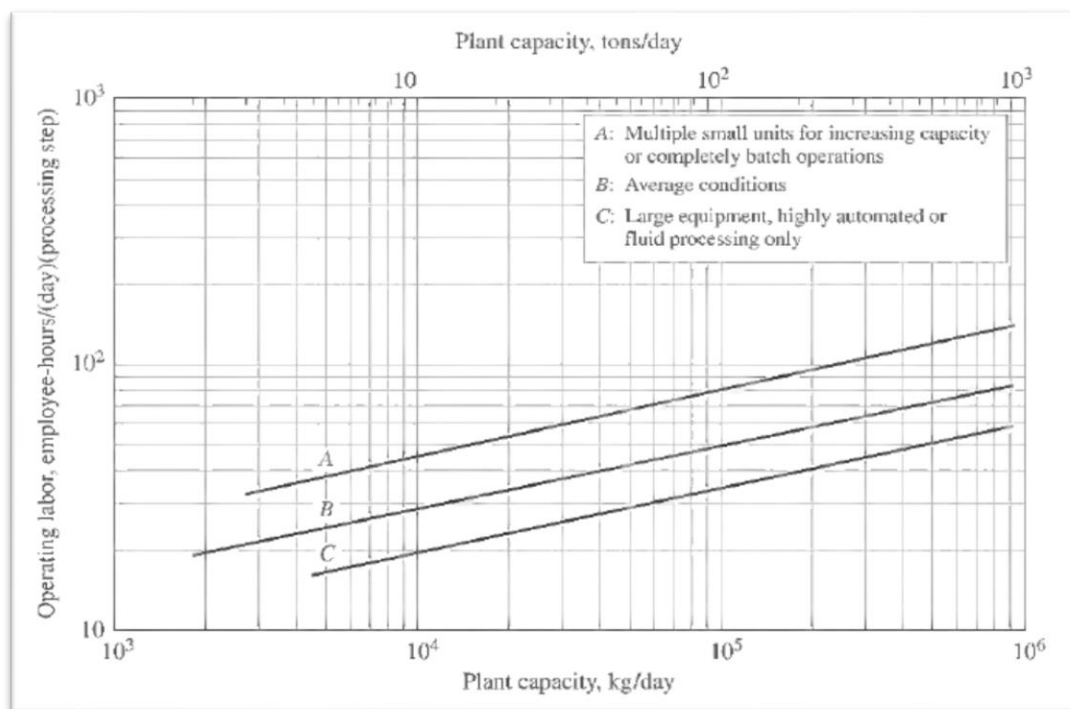
Καταναλώσεις εξοπλισμού:

Τέτοιες συνήθως είναι οι καταναλώσεις ηλεκτρισμού, νερού και πετρελαίου.

Κόστος εργασίας:

Περιλαμβάνει το κόστος απασχόλησης των εργαζομένων στην μονάδα επεξεργασίας. Για τον υπολογισμό του κόστους αυτών ακολουθήθηκε η μεθοδολογία της βιβλιογραφίας[51].

Σύμφωνα με το σχήμα της εικόνας 3.7 μπορούμε να υπολογίσουμε τις απαιτούμενες εργατοώρες ανά ημέρα και αριθμό διεργασιών που πραγματοποιούνται στην μονάδα επεξεργασίας σε συνάρτηση με την δυναμικότητα παραγωγής της μονάδας επεξεργασίας για ποσότητες παραγόμενης επεξεργασμένης βιομάζας.



Εικόνα 3.7: Εργατοώρες/ημέρα/διεργασία.[51]

Αρχικά υπολογίζεται ο αριθμός των διεργασιών που εκτελούνται κατά την συνολική επεξεργασία της βιομάζας. Ως διεργασία ορίζεται οποιαδήποτε διεργασία πραγματοποιείται στο σύνολο της μονάδας κατεργασίας, με τον αντίστοιχο εξοπλισμό της όπως π.χ. ξήρανση, φρύξη κλπ.

Στην περίπτωση μας η κατεργασία της φρύξης χωρίζεται στις ακόλουθες πέντε διεργασίες:

- Χειρισμός Βιομάζας
- Ξήρανση
- Φρύξη
- Πελλετοποίηση
- Αποθήκευση

Στην προεπεξεργασία μέσω υδροθερμικής ανθρακοποίησης και έκρηξης ατμού έχουμε τέσσερις διεργασίες:

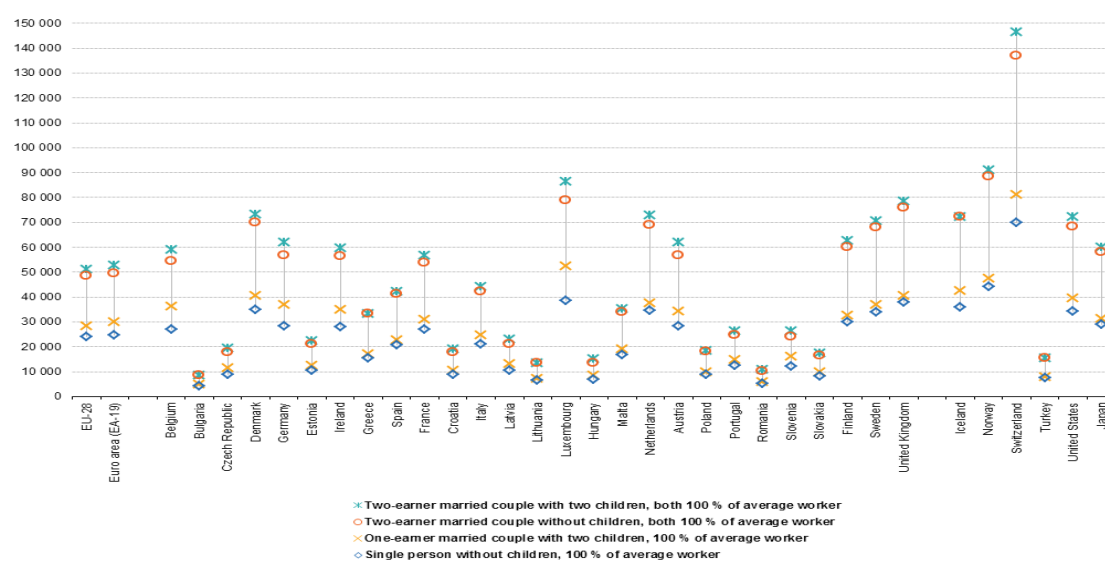
- Χειρισμός Βιομάζας
- Υδροθερμική ανθρακοποίηση / Έκρηξη ατμού
- Πελλετοποίηση
- Αποθήκευση

Στη συνέχεια θεωρώντας ότι ο μέσος χρόνος εργασίας ενός εργάτη είναι 8 ώρες την ημέρα μπορούμε να υπολογίσουμε τον απαραίτητο αριθμό εργατών σύμφωνα με τον τύπο:

$$\text{αριθμός εργατών} = \frac{(\text{απαιτούμενες εργατοώρες /ημέρα/διεργασία}) * (\text{αριθμό διεργασιών})}{8} \quad (3.4.7)$$

Τέλος πολλαπλασιάζοντας τον αριθμό των εργατών με τον μέσο μισθό εργαζομένου προκύπτει το ετήσιο κόστος εργασίας.

Ο μέσος μισθός εργαζομένων για κράτη της Ευρωπαϊκής Ένωσης παρουσιάζεται στην εικόνα 3.8.



Note: Cyprus, not available.  
Source: Eurostat (online data code: earn\_nt\_net)

Εικόνα 3.8: Μέσος μισθός εργαζομένων στην Ευρωπαϊκή Ένωση.[64]

**Κόστος πρώτης ύλης:**

Περιλαμβάνει το κόστος προμήθειας της πρώτης ύλης που χρησιμοποιείται κατά την προεπεξεργασία της βιομάζας.

Στην περίπτωση μας ως κόστος πρώτης ύλης εννοούμε το κόστος προμήθειας βιομάζας. Αυτό αναλύεται στις εξής δυο συνιστώσες:

- ◆ Κόστος παραγωγής – αγοράς βιομάζας
- ◆ Κόστος μεταφοράς βιομάζας στο σταθμό επεξεργασίας.

Στον πίνακα 3.18 συγκεντρώνονται οι παραδοχές που έγιναν για τον υπολογισμό των μεταβλητών λειτουργικών κοστών σε κάθε περίπτωση.

Πίνακας 3.18: Παράμετροι υπολογισμού για τα μεταβλητά λειτουργικά κόστη.

	Άχυρο	Μίσχανθος	Περίβλημα καρπού ελαιοφαινοειδένδρου	Φλοιός ξύλου
Εργατοώρες εργατών την ημέρα	8	8	8	8
Μέσος ετήσιος μισθός [€]	29000	21000	4816	32000
Τιμή πετρελαίου [€/L]	1.1	1.4	0.47	1.4
Τιμής ηλεκτρικής ενέργειας [€/kwh]	0.12	0.12	0.0674	0.07
Τιμή αγοράς βιομάζας [€/tn]	10.75	34.52 (3.2.11)	3	12.45
Τιμή νερού [€/m <sup>3</sup> ]	0.67	0.67	0.67	0.67
<b>Φρύξη</b>				
Αριθμός διεργασιών	5	5	5	5
Καταναλώσεις πετρελαίου (diesel) [MJ/kg torr biomass][65]	0.0413	0.0413	0.0413	0.0413
Τιμή πετρελαίου [€/L]	1.1	1.4	0.47	1.4
Καταναλώσεις ηλεκτρισμού [KWh/kg torr biomass] [65]	0.2336	0.2336	0.2336	0.2336
<b>Υδροθερμική ανθρακοποίηση</b>				
Αριθμός διεργασιών	4	4	4	4
Κατανάλωση νερού [kg water/kg HTC biomass] (3.1.36)	3.34	3.01	0.93	2.83
Καταναλώσεις ηλεκτρισμού [kwh/kg HTC biomass] (3.1.32)	0.1619	0.1619	0.1619	0.1619
<b>Έκρηξη ατμού</b>				
Αριθμός διεργασιών	4	4	4	4
Καταναλώσεις ηλεκτρισμού [kwh/kg dry biomass] [41]				0.31
Νερό ψύξης [kg water/kg dry biomass][41]				5.7
Καταναλώσεις νερού [kg water/kg dry biomass][41]				1.9

Με γνωστές τις τιμές του κόστους κεφαλαίου και του συνολικού κόστους λειτουργίας μπορούμε να υπολογίσουμε το κόστος παραγωγής επεξεργασμένης βιομάζας με δύο διαφορετικούς τρόπους που παρουσιάζονται παρακάτω.

#### 3.4.4. Κόστος παραγωγής με ανάλυση χρηματορροών

Έπειτα από τον υπολογισμό της συνολικής επένδυσης κεφαλαίου TCI και των συνολικών λειτουργικών κοστών της μονάδας επεξεργασίας υπολογίζεται το κόστος παραγωγής της επεξεργασμένης βιομάζας με ανάλυση χρηματορροών[63]. Η ανάλυση που θα χρησιμοποιηθεί ονομάζεται *ανάλυση προεξοφλημένων χρηματορροών* και προκειμένου να γίνει κατανοητή πρέπει πρώτα να ορισθούν κάποιοι βασικοί οικονομικοί όροι.

*Επιτόκιο αναγωγής (Interest rate – i):*

Το επιτόκιο αναγωγής εκφράζει τον ρυθμό με τον οποίο η αξία του χρήματος μειώνεται κατά την πάροδο του χρόνου. Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της παρούσας αξίας ενός μελλοντικού ποσού ή της μελλοντική αξίας ενός σημερινού ποσού. Το επιτόκιο αναγωγής στην περίπτωση μας λαμβάνεται ίσο με 10 %.

*Καθαρή παρούσα αξία (Net Present value - NPV):*

Η καθαρή παρούσα αξία ορίζεται ως το άθροισμα των καθαρών χρηματορροών κάθε χρόνου ανοιγμένο στην παρούσα αξία του.

Υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

$$NPV = \sum_0^N \frac{CF_t}{(1+i)^t} \quad (3.4.8)$$

Όπου:

$N$ : τα χρόνια ζωής της μονάδας επεξεργασίας.

$CF_t$ : η καθαρή χρηματορροή τη χρονική στιγμή  $t$ .

$i$ : το επιτόκιο αναγωγής.

*Εσωτερικός βαθμός απόδοσης (Internal rate of Return – IRR):*

Ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης ορίζεται ως το προεξοφλητικό επιτόκιο που εξισώνει την παρούσα αξία των αναμενόμενων ταμειακών ροών με την παρούσα αξία του αρχικού κεφαλαίου επένδυσης.

Είναι δηλαδή ο ρυθμός με τον οποίο η καθαρή παρούσα αξία των χρηματορροών τείνει να γίνει ίση με το αρχικό κόστος της επένδυσης κεφαλαίου, επομένως η καθαρή παρούσα αξία τείνει να γίνει ίση με το μηδέν.

$$NPV = \sum_0^N \frac{CF_t}{(1+IRR)^t} = 0 \quad (3.4.9)$$



➤ Ανάλυση προεξοφλημένων χρηματοροών (Discounted Cash Flow Rate Of Return – DCFROR)

Ένα παράδειγμα ανάλυσης χρηματοροών με την μέθοδο των προεξοφλημένων χρηματοροών παρουσιάζεται στον πίνακα 3.19. Ο χρονικός ορίζοντας της επένδυσης, δηλαδή τα χρόνια ζωής της μονάδας επεξεργασίας ορίζονται ως 25 έτη. Για κάθε έτος υπολογίζονται τα έσοδα από την πώληση τις επεξεργασμένης βιομάζας θέτοντας μια τιμή πώλησης όπως και τα λειτουργικά έξοδα.

Θεωρούμε πως η κατασκευή της μονάδας επεξεργασίας πραγματοποιείται τα πρώτα 3 έτη στα οποία δεν υπολογίζεται έσοδα και κόστη λειτουργίας. Υπολογίζεται έτσι το καθαρό κέρδος για κάθε έτος και ανάγεται στην παρούσα αξία του.

Το άθροισμα της παρούσας αξίας για κάθε έτος αποτελεί την καθαρά παρούσα αξία.

Μέσω της λειτουργίας Goal Seek στο Microsoft excel υπολογίζεται η ελάχιστη τιμή πώλησης επεξεργασμένης βιομάζας έτσι ώστε να μηδενίζεται η καθαρά παρούσα αξία (NPV=0). Η τιμή αυτή πώλησης της επεξεργασμένης βιομάζας αποτελεί την ελάχιστη τιμή που πρέπει να κοστίζει τον προϊόν της εγκατάστασης προκειμένου η επένδυση να είναι βιώσιμη.

Πίνακας 3.8: Ανάλυση Χρηματοροών με μέθοδο DCFROF.

Έτος	Εκροές	Εισροές	Κόστη λειτουργίας	Μεικτά αποτελέσματα	Απόσβεση κεφαλαίου	Καθαρά αποτελέσματα προ φόρων	Φόρος	Καθαρό κέρδος	Καθαρές ροές	Συντελεστής προεξόφλησης	Παρούσα Αξία	
-2	5.1004								-5.1004416	1.21	-6.17	
-1	38.253								-38.253312	1.1	-42.07	
0	20.402								-20.401767	1	-20.40	
1		30.98813	23.42	7.56	7.74503974	-	0.18	-	7.56	7.56325237	0.909	6.87
...		...			...				...	...	...	...
25		30.98813	23.42	7.56	0		7.56	-	7.56	7.56325237	0.092	0.698
											NPV	0.00

Παρακάτω επεξηγούνται οι όροι του πίνακα 3.19.

*Έτος:*

Τα χρόνια ζωής της μονάδας επεξεργασίας βιομάζας ή τα χρόνια ζωής της επένδυσης. Στην περίπτωση μας και για τις τρεις μονάδες επεξεργασίας θεωρείται κύκλος ζωής 25 έτη. Στον πίνακα η περίοδος 0 αναφέρεται στο παρών και τα έτη -3,-2,-1 είναι τα χρόνια κατασκευής της μονάδας.

*Εκροές:*

Περιλαμβάνει οτιδήποτε έχει σχέση με την επένδυση κεφαλαίου που δαπανάται για την κατασκευή της μονάδας. Αφορά κόστη εξοπλισμού, υλικών κλπ. Εκροές έχουμε μόνο τα έτη -3,-2,-1 έως ότου δηλαδή ξεκινήσει η λειτουργία της εγκατάστασης. Σύμφωνα με τον Timmerhaus[51] το πρώτο χρόνο κατασκευής δαπανάται το 8 % του συνολικού κόστους κεφαλαίου, τον 2<sup>ο</sup> το 60 % και τον τρίτο το 32 %.

*Εισροές:*

Αποτελούν τα έσοδα της εγκατάστασης από την πώληση της επεξεργασμένης βιομάζας.

*Κόστη Λειτουργίας:*

Περιλαμβάνουν τα συνολικά μεταβλητά κόστη κάθε έτους.

*Μεικτά Αποτελέσματα:*

Υπολογίζονται ως εξής

$$\text{Μεικτά Αποτελέσματα} = \text{Εισροές} - \text{Εκροές} - \text{Κόστη λειτουργίας}$$

*Απόσβεση κεφαλαίου:*

Σύμφωνα με τον Timmerhaus υπολογίζονται με την μέθοδο MACRS (Modified Accelerated Cost Recovery System).

Η απόσβεση κεφαλαίου είναι ένα λογιστικό και όχι πραγματικό ποσό. Ουσιαστικά αφορά τις φθορές που υπόκειται ο εξοπλισμός της εγκατάστασης με αποτέλεσμα να χάνει την αξία του με την πάροδο του χρόνου. Αντικατοπτρίζει δηλαδή το ποσό των χρημάτων που θα πρέπει να έχει αποθηκευμένα μια μονάδα προκειμένου να αγοραστεί νέος εξοπλισμός σε περίπτωση που χρειαστεί.

Στον πίνακα 3.20 παρουσιάζονται οι συντελεστές απόσβεσης κεφαλαίου της μεθόδου MACRS όπως βρέθηκαν στην βιβλιογραφία[51]. Στην περίπτωση που εξετάζουμε επιλέγεται περίοδος ανάκτησης ίσης με 7 έτη. Οι συντελεστές απόσβεσης του πίνακα 3.20 πολλαπλασιάζονται με την επένδυση πάγιου κεφαλαίου FCI προκειμένου να υπολογισθεί το κόστος απόσβεσης για κάθε έτος.

Πίνακας 3.20: Συντελεστές Απόδοσης MACRS[51]

Έτος ανάκτησης	Περίοδος ανάκτησης					
	3 έτη	5 έτη	7 έτη	10 έτη	15 έτη	20 έτη
	Συντελεστής απόσβεσης, %					
1	33.33	20	14.29	10	5	3.75
2	44.45	32	24.49	18	9.5	7.219
3	14.81	19.2	17.49	14.4	8.55	6.677
4	7.41	11.52	12.49	11.52	7.7	6.177
5		11.52	8.93	9.22	6.93	5.713
6		5.76	8.92	7.37	6.23	5.285
7			8.93	6.55	5.9	4.888
8			4.46	6.55	5.9	4.522
9				6.56	5.91	4.462
10				6.55	5.9	4.461
11				3.28	5.91	4.462
12					5.9	4.461
13					5.91	4.462
14					5.9	4.461
15					5.91	4.462
16					2.95	4.461
17						4.462
18						4.461
19						4.462
20						4.461
21						2.231

*Καθαρά αποτελέσματα προ φόρων:*

Υπολογίζονται ως εξής

*Καθαρά αποτελέσματα προ φόρων = Μεικτά αποτελέσματα – Αποσβέσεις*

*Φόρος:*

Ο φόρος που πληρώνεται κάθε έτος για τα έσοδα της εγκατάστασης. Στην περίπτωση μας που η τιμή πώλησης της επεξεργασμένης βιομάζας χρησιμοποιείται μόνο ως θεωρητική τιμή για τον υπολογισμό του κόστους παραγωγής, ο φόρος τίθεται ίσος με 0.

*Καθαρό Κέρδος:*

Υπολογίζονται ως εξής

*Καθαρό Κέρδος = Καθαρά αποτελέσματα – φόρος*

*Καθαρές ροές:*

Αποτελεί το άθροισμα του καθαρού κέρδους και των εκροών για κάθε έτος. Εκροές υπάρχουν μόνο στα 3 έτη κατασκευής της μονάδας στα οποία οι καθαρές ροές έχουν αρνητικό πρόσημο.

*Συντελεστής προεξόφλησης:*

Ο συντελεστής που ανάγει το κόστος κάθε έτους στην παρούσα αξία. Υπολογίζεται από τον τύπο που ακολουθεί:

$$d_n = \frac{1}{(1 + i)^n} \quad (3.4.10)$$

Όπου,

*i* : το επιτόκιο αναγωγής όπως ορίστηκε στην αρχή της ενότητας.

*n* : το εκάστοτε έτος της τρέχουσας χρηματορροής.

*Παρούσα Αξία:*

Για την παρούσα αξία έγινε αναφορά στην αρχή της ενότητας. Υπολογίζεται με πολλαπλασιασμό του συντελεστή προεξόφλησης με τις καθαρές ροές.

Το άθροισμα της παρούσας αξίας για κάθε έτος υπολογίζει την καθαρή παρούσα αξία NPV

### 3.4.5. Κόστος παραγωγής με χρήση συντελεστών

Σύμφωνα με τον Timmerhaus[51] το κόστος παραγωγής αναλύεται στις συνιστώσες του πίνακα 3.21.

Πίνακας 3.21: Επιμέρους συνιστώσες κόστους παραγωγής επεξεργασμένης βιομάζας. [51]

<b>Ετήσια μεταβλητά κόστη λειτουργίας (Total variable production costs)</b>	
Προμήθεια πρώτης ύλης	Κόστος αγοράς και Συλλογής βιομάζας
Προσωπικό εργασίας	Κόστος εργασίας
Επίβλεψη προσωπικού εργασίας	(15 %) Κόστος εργασίας
Καταναλώσεις εξοπλισμού	Καταναλώσεις ηλεκτρισμού, νερού κλπ.
Συντήρηση και επισκευές	(7 %) FCI
Προμήθεια υλικών λειτουργίας	(15 %) Κόστος συντήρησης και επισκευών
<b>Ετήσιες πάγιες επιβαρύνσεις</b>	
Φορολογία	(2 %) FCI
Ασφάλιση	(2 %) FCI
Απόσβεση κεφαλαίου αρχικής επένδυσης	TCI/N
Γενικά Έξοδα	(15 %) Κόστος εργασίας
<b>Κόστος παραγωγής</b>	

Οι συνιστώσες αυτές έχουν αναλυθεί προηγουμένως στο ίδιο κεφάλαιο.  
Με την συγκεκριμένη μέθοδο υπολογισμού του κόστους παραγωγής η απόσβεση του κεφαλαίου της αρχικής επένδυσης υπολογίζεται με την μέθοδο της γραμμικής απόσβεσης (straight line depreciation) από τον παρακάτω τύπο.

$$d = \frac{TCI}{N} \quad (3.4.11)$$

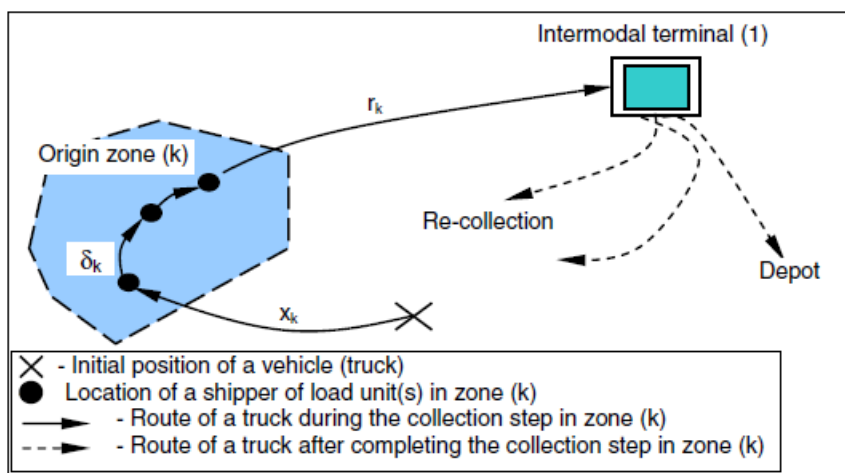
Όπου,

$N$ : τα έτη ζωής της μονάδας επεξεργασίας.

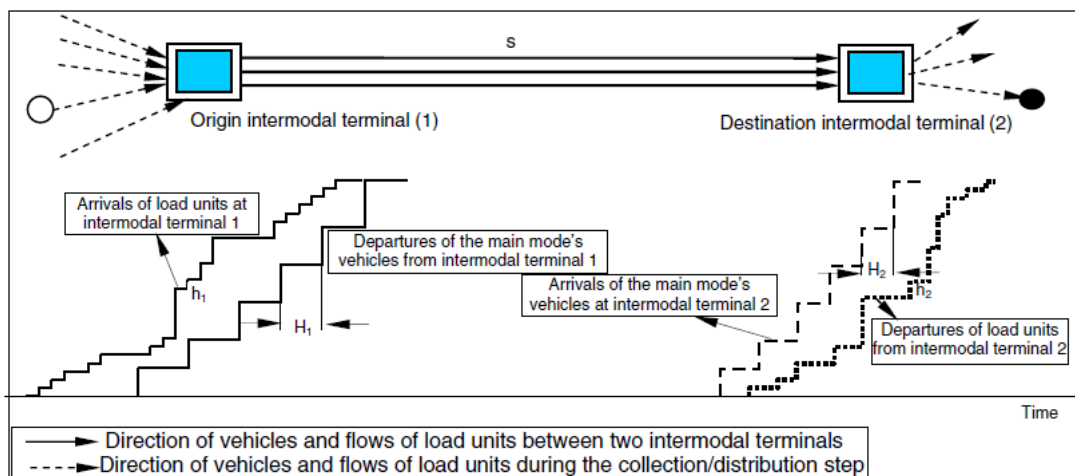
### 3.5. Κόστος μεταφοράς βιομάζας στον σταθμό συμπαραγωγής.

Στην ενότητα αυτή θα μελετηθεί το κόστος μεταφοράς της βιομάζας με την μέθοδο της διατροφικής μεταφοράς και θα συγκριθεί με το αντίστοιχο κόστος της απλής μεταφοράς μέσω φορτηγών προκειμένου να βρεθεί η οικονομικά συμφέρουσα περίπτωση.[66]

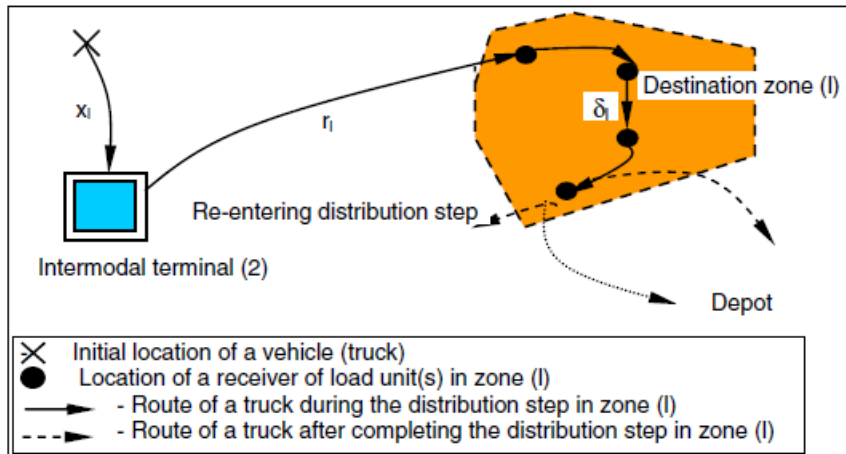
Η διατροφική μεταφορά συνδυάζει δύο ή περισσότερα διαφορετικά μέσα μεταφοράς προκειμένου να μεταφερθεί η βιομάζα στον σταθμό συμπαραγωγής. Το μοντέλο διατροφικής μεταφοράς παρουσιάζεται στις παρακάτω εικόνες.



a) Collection in the 'shipper' area



b) Line haul between two intermodal terminals



c) Distribution in the 'receiver' area

Η 1<sup>η</sup> εικόνα δείχνει την περιοχή συλλογής της βιομάζας. Θεωρούμε πως η βιομάζα βρίσκεται συγκεντρωμένη σε κεντρικό σημείο το οποίο μπορεί να αποτελεί είτε την μονάδα προεπεξεργασίας, είτε κεντρικό σημείο αποθήκευσης του συνόλου ακατέργαστης βιομάζας έπειτα από την αρχική συλλογή της. Τα φορτηγά ξεκινάνε από το αρχικό σημείο στο οποίο βρίσκονται με ενδιάμεση στάση το σημείο συγκέντρωσης της βιομάζας όπου η βιομάζα φορτώνεται με προορισμό το σημείο που βρίσκεται ο σταθμός αφετηρίας A του τρένου.

Στην 2<sup>η</sup> εικόνα περιγράφεται η μεταφορά μεταξύ των δυο σταθμών τρένου. Έπειτα από την αρχική μεταφορά μέσω φορτηγών στον σταθμό αφετηρίας A η βιομάζα μεταφέρεται μέσω τρένου στον τερματικό σταθμό B συνολικής απόστασης D από τον αρχικό σταθμό A.

Η 3<sup>η</sup> εικόνα δείχνει την περιοχή διανομής. Κατά την διαδικασία αυτή η βιομάζα αφού φορτωθεί πάλι σε φορτηγά ίδιου τύπου με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στην περιοχή συλλογής, διανέμεται στο σημείο τελικού προορισμού όπου στην περίπτωση μας είναι το σημείο της μονάδας συμπαραγωγής στην περιοχή του Αμβούργου της Γερμανίας.

Το ισοδύναμο μοντέλο μεταφοράς με αποκλειστική χρήση φορτηγών, περιλαμβάνει την απευθείας μεταφορά της βιομάζας από το σημείο συγκέντρωσης της στον τελικό προορισμό, δηλαδή το σημείο όπου είναι εγκατεστημένη η μονάδα συμπαραγωγής.

Τα κόστη σε ένα δίκτυο μεταφορών όπως αυτό που περιγράφεται παραπάνω μπορούν να χωρισθούν σε δυο κατηγορίες. Αυτές είναι:

#### Κόστος λειτουργίας των μέσων μεταφοράς (Internal Costs):

Περιλαμβάνει όλα τα κόστη που σχετίζονται με την άμεση λειτουργία των μέσων μεταφοράς:

- Το κόστος ιδιοκτησίας των φορτηγών.
- Το κόστος εργασίας.
- Την ασφάλιση των εργαζομένων.
- Το κόστος συντήρησης και επισκευών.
- Τις καταναλώσεις των μέσων μεταφοράς.
- Τους φόρους και τα τέλη που καταβάλλονται.



*Κόστη που οφείλονται σε εξωτερικούς παράγοντες (External Costs):*

Περιλαμβάνουν τα κόστη που δεν σχετίζονται άμεσα με την λειτουργία των μέσων μεταφοράς. Κάποια είδη τέτοιων επιβαρύνσεων είναι:

- Τα τροχαία ατυχήματα και τις αντίστοιχες υλικές ζημιές
- Την ρύπανση του περιβάλλοντος
- Κόστη από καθυστερήσεις λόγω κυκλοφοριακή συμφόρησης

Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα βήματα που περιγράφουν τα δυο συστήματα μεταφοράς.

#### Διατροπική μεταφορά (Intermodal Transport).

*Περιοχή συλλογής βιομάζας:*

Θεωρούμε πως χρησιμοποιούμε φορτηγά ίδιου τύπου, μικτού βάρους 40 τόνων και καθαρού ωφέλιμου φορτίου 28 τόνων σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς. Το κάθε φορτηγό διανύει μια απόσταση περίπου 50 χιλιομέτρων προκειμένου να μεταφέρει το απαιτούμενο φορτίο βιομάζας στον τερματικό σταθμό Α.

*Μεταφορά βιομάζας μέσω τρένου:*

Για απλούστευση του μοντέλου θεωρούμε σταθερά και ίσα διαστήματα μεταξύ του κάθε δρομολογίου που πραγματοποιείται.

Τα τρένα που χρησιμοποιούνται για την μεταφορά της βιομάζας μεταξύ των σταθμών θεωρούνται ίδιου τύπου. Στην περίπτωση μας χρησιμοποιήθηκε τρένο αποτελούμενο από 26 βαγόνια και 1 βαγόνι που περιλαμβάνει την μηχανή του τρένου. Το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο που μπορεί να μεταφέρει το κάθε βαγόνι είναι ίσο με 50 τόνους. Τα μεγέθη αυτά αφορούν τρένο συνολικού μήκους 550 μέτρων.[67]

*Περιοχή διανομής βιομάζας:*

Χρησιμοποιούνται φορτηγά ίδιου τύπου με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στην περιοχή συλλογής. Θεωρείται πως το κάθε φορτηγό διανύει απόσταση περίπου 50 χιλιομέτρων προκειμένου να μεταφέρει το απαιτούμενο φορτίο στον σταθμό συμπαραγωγής.

Δίνονται λοιπόν Οι εξισώσεις που περιγράφουν ένα τέτοιο σύστημα.

Για τις περιοχές συλλογής και διανομής το κόστος μεταφοράς περιγράφεται από το ίδιο σύστημα εξισώσεων. Έτσι έχουμε:

Για το κόστος λειτουργίας σε [€/yr] έχουμε:

$$C_{1/k} = \left( \frac{\dot{m}_{fuel}}{\lambda_{truck} * M} \right) C_{o/k}(d_k) \quad (3.5.1)$$

Όπου,

$\dot{m}_{fuel}$ : Η συνολική προς μεταφορά ποσότητα βιομάζας σε [tn/yr]

$\lambda_{truck}$ : Συντελεστής που δηλώνει την επιστροφή του άδειου φορτηγού στο αρχικό σημείο.

$M$ : Η ποσότητα βιομάζας που μπορεί να μεταφέρει κάθε φορηγό σε [tn]  
 $C_{o/k}(d_k)$ : Το κόστος λειτουργίας του κάθε φορηγού. Δίνεται στην περίπτωση μας για φορηγά μικτού φορτίου 40 τόνων σε συνάρτηση με την απόσταση που διανύουν και εκφράζεται σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο [68] σε [€/km (vehicle)]

$$C_{o/k}(d_k) = 5.46 * d^{-0.278} \quad (3.5.2)$$

Για το κόστος που οφείλεται σε εξωτερικούς παράγοντες σε [€/yr] έχουμε:

$$C_{2/k} = \left( \frac{\dot{m}_{fuel}}{\lambda_{truck} * M} \right) C_{e/k}(d_k) \quad (3.5.3)$$

Όπου,

$C_{e/k}(d_k)$ : Το κόστος που οφείλεται σε εξωτερικούς παράγοντες του κάθε φορηγού. Δίνεται επίσης για φορηγά μικτού φορτίου 40 τόνων σε συνάρτηση με την απόσταση που διανύουν και εκφράζεται σύμφωνα με τον τύπο [68] σε [€/km (vehicle)]

$$C_{e/k}(d_k) = 9.88 * d^{-0.624} \quad (3.5.4)$$

Το άθροισμα όλων των παραπάνω μας δίνει το συνολικό κόστος για την περιοχή της συλλογής και διανομής αντίστοιχα σύμφωνα με τον τύπο:

$$C_{c/d} = \sum_1^2 C_{i/k} = \left( \frac{\dot{m}_{fuel}}{\lambda_{truck} * M} \right) C_{o/k}(d_k) + \left( \frac{\dot{m}_{fuel}}{\lambda_{truck} * M} \right) C_{e/k}(d_k) \quad (3.5.5)$$

Για την μεταφορά της βιομάζας μεταξύ των δυο σταθμών τρένου (line haul) το κόστος περιγράφεται με τις εξής εξισώσεις:

Το κόστος λειτουργίας του τρένου δίνεται σε [€/yr].

$$C_{1/lh} = \left( \frac{\dot{m}_{fuel}}{q} \right) C_o(W, q, D) \quad (3.5.6)$$

Όπου,

$\dot{m}_{fuel}$ : Η συνολική προς μεταφορά ποσότητα βιομάζας σε [tn/yr]

$q$ : Το φορτίο που μεταφέρει κάθε τρένο σε [tn].

$C_o(W, q, D)$ : Το κόστος λειτουργίας του τρένου σε συνάρτηση με το μικτό βάρος του  $W$ : το καθαρό ωφέλιμο φορτίο μεταφοράς  $q$  και της απόστασης  $D$  μεταξύ των δυο σταθμών του τρένου.

Το κόστος λειτουργίας  $C_o(W, q, D)$  δίνεται από τον παρακάτω τύπο[66] και εκφράζεται σε [€/train]:

$$C_o(W, q, D) = (4.60n_l + 0.144n_w + 0.3) * D + 12.98(n_l + n_w) + 5.6q + 0.0019WD + \left(0.227 * 10^{-6} \frac{u^2}{\ln(D)} + 0.000774\right) WD + 33n_d \left(t_{dp} + \frac{D}{u} + dl\right) \quad (3.5.7)$$

Όπου,

$W$ : Το μικτό βάρος του τρένου [tn]

$q$ : το φορτίο που μεταφέρει κάθε τρένο [tn].

$D$  : Η απόσταση μεταξύ των δυο σταθμών του τρένου.

$n_l$ : Ο αριθμός των μηχανών του τρένου. Στην περίπτωση μας θεωρούμε 1 μηχανή ανά τρένο

$n_w$ : Ο αριθμός των βαγονιών του τρένου. Στην περίπτωση μας όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως χρησιμοποιούμε τρένο αποτελούμενο από 26 βαγόνια.

$u$  : Η μέση ταχύτητα του τρένου σε [km/h].

$n_d$ : Ο αριθμός των οδηγών που χειρίζονται κάθε τρένο. Στην περίπτωση μας θεωρούμε 2 οδηγούς για κάθε δρομολόγιο.

$t_{dp}$ : Ο χρόνος προετοιμασίας και ξεκούρασης κάθε οδηγού πριν και μετά από κάθε δρομολόγιο σε [h]. Στην περίπτωση μας θεωρούμε τον χρόνο αυτό ίσο με 0.5h

$dl$ : Η αναμενόμενη χρονική καθυστέρηση της κάθε αμαξοστοιχίας σε [h]

Στην παραπάνω εξίσωση ο πρώτος όρος σχετίζεται με την απόσβεση κεφαλαίου και το κόστος συντήρησης και επισκευών.

Ο δεύτερος όρος αφορά το κόστος συναρμολόγησης και αποσυναρμολόγησης της αμαξοστοιχίας σε κάθε τερματικό σταθμό.

Ο τρίτος όρος δείχνει το κόστος φόρτωσης και εκφόρτωσης του απαιτούμενο φορτίου στην αμαξοστοιχία.

Ο τέταρτος όρος αφορά το κόστος χρήσης της εγκατάστασης.

Ο πέμπτος όρος περιγράφει το κόστος κατανάλωσης ενέργειας σε κάθε διαδρομή.

Ο τελευταίος όρος αφορά το κόστος εργασίας των οδηγών.

Το μικτό βάρος του τρένου υπολογίζεται:

$$W = w + q = (n_l w_l + n_w w_w) + n_w (\lambda_{train} * q_c) \quad (3.5.8)$$

Όπου,

$w$ : Το βάρος του άδειου τρένου [tn]

$q$ : το φορτίο που μεταφέρει κάθε τρένο [tn].

$w_l$  : Το βάρος του βαγονιού που βρίσκεται η μηχανή του τρένου. Στην περίπτωση μας λαμβάνεται βάρος 89 τόνων.[66]

$\lambda_{train}$ : Συντελεστής που δηλώνει την πιθανότητα ένα τρένο να μην ταξιδεύει πάντα γεμάτο. Λαμβάνεται ίσο με 0.75

$q_c$ : Το καθαρό ωφέλιμο φορτίο που μπορεί να μεταφέρει κάθε βαγόνι σε [tn]. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο που μπορεί να μεταφέρει κάθε βαγόνι. Στην περίπτωση μας όπως προαναφέρθηκε τι μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο μεταφοράς είναι ίσο με 50 τόνους για κάθε βαγόνι.

$n_w$ : Ο αριθμός των βαγονιών του τρένου.

$w_w$ : Το βάρος άδειου βαγονιού[tn]. Λαμβάνεται ίσο με 24 [tn].

Το κόστος που οφείλεται σε εξωτερικούς παράγοντες για την μεταφορά μεταξύ των δυο σταθμών του τρένου δίνεται από τον τύπο:

$$C_{2/1h} = \left( \frac{\dot{m}_{fuel}}{q} \right) C_e(W, q, D) + \dot{m}_{fuel}(c_{e1} + c_{e2}) \quad (3.5.9)$$

Όπου,

$\dot{m}_{fuel}$ : Η συνολική προς μεταφορά ποσότητα βιομάζας σε [tn/yr]

$q$ : Το φορτίο που μεταφέρει κάθε τρένο σε [tn].

$C_e(W, q, D)$ : Το κόστος κάθε τρένου που οφείλεται σε εξωτερικούς παράγοντες κατά την εκτέλεση του δρομολογίου σε [€/train].

$c_{e1,2}$ : Το κόστος εξαιτίας εξωτερικών παραγόντων στους δυο σταθμούς τρένου. Από την βιβλιογραφία[66] δίνεται  $c_{e1,2} = 0.0549 \left[ \frac{\text{€}}{\text{tn}} \right]$

Το κόστος  $C_e(W, q, D)$  υπολογίζεται σε [€/train] σύμφωνα με την εξίσωση:

$$C_e(W, q, D) = (0.000128WD + 0.00549q) + \left( 1.889 * 10^{-7} \frac{u^2}{\ln(D)} + 0.00064 \right) WD + 5.6D \quad (3.5.10)$$

Όπου οι εμφανιζόμενες μεταβλητές έχουν περιγραφεί παραπάνω

Στην παραπάνω εξίσωση ο πρώτος όρος σχετίζεται με τις υλικές ζημιές και τα τροχαία ατυχήματα.

Ο δεύτερος όρος δείχνει το σχετικό κόστος που προκαλείται από την ρύπανση του περιβάλλοντος.

Ο τελευταίος αναφέρεται στις καθυστερήσεις λόγω κυκλοφοριακής συμφόρησης.

Το συνολικό κόστος μεταφοράς μεταξύ δυο τερματικών σταθμών δίνεται τελικά από τον τύπο:

$$C_{lh} = \sum_1^2 C_{i/1h} = \left( \frac{\dot{m}_{fuel}}{q} \right) C_o(W, q, D) + \left( \frac{\dot{m}_{fuel}}{q} \right) C_e(W, q, D) + \dot{m}_{fuel}(c_{e1} + c_{e2}) \quad (3.5.11)$$

Το συνολικό κόστος μεταφοράς σε [€/yr] είναι:

$$C_F = C_c + C_{lh} + C_d \quad (3.5.12)$$

Τέλος αν διαιρέσουμε το τελικό κόστος  $C_F$  με την συνολική ποσότητα βιομάζας  $\dot{m}_{fuel}$  και την απόσταση μεταξύ των δυο σταθμών τρένου  $D$  υπολογίζεται το ειδικό κόστος μεταφοράς της βιομάζας σε [€/tn km] με την χρήση της διατροπικής μεθόδου.

### Μεταφορά με χρήση φορτηγών (Road network).

Η μεταφορά βιομάζας μέσω φορτηγών μπορεί να μοντελοποιηθεί χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις για την περιοχή συλλογής/διανομής στην διατροφική μέθοδο μεταφοράς που αναφέρθηκε προηγουμένως, αν θέσουμε ως  $d$  την συνολική απόσταση μεταφοράς της βιομάζας από το σημείο συγκέντρωσης έως τον σταθμό συμπαραγωγής  $D$ .

Διαιρώντας την εξίσωση (3.5.5) με την απόσταση μεταφοράς  $D$  και την συνολική ποσότητα βιομάζας  $\dot{m}_{fuel}$  προκύπτει το κόστος μεταφοράς της βιομάζας σε [€/tn km] με χρήση φορτηγών.

### Κόστος παραδιδόμενου καυσίμου στον σταθμό συμπαραγωγής.

Το κόστος παραδιδόμενου καυσίμου στον σταθμό συμπαραγωγής δίνεται από το άθροισμα του κόστους παραγωγής επεξεργασμένης βιομάζας και του κόστους μεταφοράς αυτής στον σταθμό συμπαραγωγής από τον τύπο:

$$C_{fuel} = (\text{Κόστος παραγωγής επεξεργασμένης βιομάζας}) + (C_F * D) \quad (3.5.13)$$

Όπου,

$C_F$ : Το κόστος μεταφοράς επεξεργασμένης βιομάζας σε [€/tn km].

$D$ : Η συνολική απόσταση μεταφοράς σε [km].

Πιο συγκεκριμένα για τις αποστάσεις μεταφοράς:

- Θεωρούμε ότι ο μίσχανθος παράγεται στην περιοχή της Ιταλίας από όπου και μεταφέρεται. Η απόσταση μεταφοράς  $D$  τίθεται ίση με 1000 km και ως τρόπος μεταφοράς επιλέγεται μια από τις δυο περιπτώσεις που αναλύθηκαν στην ενότητα 3.5
- Για την περίπτωση του άχυρου από σιτάρι θεωρείται πως η χώρα προμήθειας είναι η Γερμανία οπότε η απόσταση μεταφοράς  $D$  είναι 150 km. Ως τρόπος μεταφοράς επιλέγεται επίσης ένας από τους τρόπους που αναλύθηκαν στην ενότητα 3.5
- Η χώρα προμήθειας του περιβλήματος καρπού ελαιοφαινοειδούς είναι η Μαλαισία. Θεωρείται λοιπόν πως η επεξεργασμένη βιομάζα μεταφέρεται αρχικά σε απόσταση  $D$  ίση με 150 km στο κοντινότερο λιμάνι με χρήση μίας από τις μεθόδους που αναπτύχθηκαν στην ενότητα 3.5. Στη συνέχεια υπολογίζεται το κόστος μεταφοράς του με τελικό προορισμό το λιμάνι του Αμβούργου για  $D$  ίσο με 17100 km. Με βάση την βιβλιογραφία[69] το κόστος μεταφοράς βιομάζας μέσω πλοίου είναι:

$$C_{ship} = 0.01 \frac{\$}{tn km} = 0.0083 \frac{\text{€}}{tn km} \quad (3.5.14)$$

- Για την περίπτωση του φλοιού ξύλου θεωρούμε ως χώρα προμήθειας την Σουηδία. Αρχικά με μία από τις μεθόδους που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 3.5 υπολογίζουμε το κόστος μεταφοράς στο κοντινότερο λιμάνι για απόσταση ίση με 250 km. Έπειτα με χρήση της εξίσωσης (3.5.14) για απόσταση μεταφοράς ίση με 740 km υπολογίζουμε το κόστος μεταφοράς της στην μονάδα συμπαραγωγής.

Σημειώνεται πως οι αποστάσεις που αναφέρθηκαν υπολογίσθηκαν με χρήση του google maps και αποτελούν αληθοφανή δεδομένα.

Το κόστος παραδιδόμενου καυσίμου προκύπτει σε μονάδες [€/tn] επεξεργασμένης βιομάζας].

Για να μετατρέψουμε το κόστος παραδιδόμενου καυσίμου σε μονάδες [€/MWh] διαιρούμε με την θερμογόνο ικανότητα του καυσίμου αφού πρώτα την μετατρέψουμε σε κατάλληλες μονάδες. Η μετατροπή αυτή εκφράζεται με τον τύπο:

$$LHV \left[ \frac{MWh}{tn} \right] = LVH \left[ \frac{MJ}{kg} \right] * \frac{1}{3.6} \quad (3.5.15)$$

Όπου,

LHV: Η κατώτερη θερμογόνος ικανότητα κάθε επεξεργασμένου καυσίμου από τους πίνακες της ενότητας 3.1

Στους πίνακες 3.22 3.23 παρουσιάζονται οι παραδοχές εφαρμογής του μοντέλου της διατροφικής μεταφοράς που μελετήθηκε.

Πίνακας 3.22: Παραδοχές εφαρμογής του μοντέλου διατροφικής μεταφοράς για μεταφορά επεξεργασμένης βιομάζας.

	Άχυρο	Μίσχανθος	Περίβλημα καρπού ελαιοφαινικόδενδρου	Φλοιός ξύλου
<i>Φορτηγά</i>				
Χωρητικότητα φορτηγών, M[tn]	28	28	28	28
Απόσταση μονάδας προεπεξεργασίας – τερματικού A, d[km]	50	50	50	50
$\lambda_{truck}$	0.5	0.5	0.5	0.5
<i>Τρένο</i>				
<b>Απόσταση μονάδας προεπεξεργασίας – μονάδας CHP D [km]</b>	<b>150</b>	<b>1000</b>	<b>150 (λιμάνι)</b>	<b>250(λιμάνι)</b>
Χωρητικότητα τρένου q[tn]	975	975	975	975
Βάρος άδειου τρένου[tn]	713	713	713	713
Μικτό βάρος τρένου W[tn]	1688	1688	1688	1688
Αριθμός βαγονιών $n_w$	26	26	26	26
Χωρητικότητα βαγονιού $q_c$ [tn]	50	50	50	50
$\lambda_{train}$	0.75	0.75	0.75	0.75
Αριθμός μηχανών $n_i$	1	1	1	1
Βάρος βαγονιού μηχανής $w_1$ [tn]	89	89	89	89
Βάρος άδειου βαγονιού $w_w$ [tn]	24	24	24	24
Αριθμός οδηγών τρένου για κάθε δρομολόγιο $n_d$	2	2	2	2
Μέση ταχύτητα τρένου u [km/h]	60	60	60	60
Χρόνος προετοιμασίας $t_{dp}$ [h]	0.5	0.5	0.5	0.5
Αναμενόμενες καθυστερήσεις $d_l$ [h]	1	1	1	1
Εξωτερικά κόστη τερματικών σταθμών $c_{e1,2}$ [€/tn]	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549

Πίνακας 3.23: Παραδοχές εφαρμογής του μοντέλου διατροφικής μεταφοράς για μεταφορά ακατέργαστης βιομάζας.

	Άχυρο	Μίσχανθος	Περίβλημα καρπού ελαιοφαινικόδενδρου	Φλοιός ξύλου
<i>Φορτηγά</i>				
Χωρητικότητα φορτηγών, M[tn]	16.8	16.8	28	28
Απόσταση μονάδας προεπεξεργασίας – τερματικού A, d[km]	50	50	50	50
$\lambda_{truck}$	0.5	0.5	0.5	0.5
<i>Τρένο</i>				
<b>Απόσταση μονάδας προεπεξεργασίας – μονάδας CHP D [km]</b>	<b>150</b>	<b>1000</b>	<b>150 (λιμάνι)</b>	<b>250(λιμάνι)</b>
Χωρητικότητα τρένου q[tn]	409.5	409.5	975	975
Βάρος άδειου τρένου[tn]	713	713	713	713
Μικτό βάρος τρένου W[tn]	1122.5	1122.5	1688	1688
Αριθμός βαγονιών $n_w$	26	26	26	26
Μέγιστο φορτίο λόγω περιορισμού όγκου κάθε βαγονιού (150 m <sup>3</sup> )	21	21	52	52
Χωρητικότητα βαγονιού $q_c$ [tn]	21	21	50	50
$\lambda_{train}$	0.75	0.75	0.75	0.75
Αριθμός μηχανών $n_i$	1	1	1	1
Βάρος βαγονιού μηχανής $w_1$ [tn]	89	89	89	89
Βάρος άδειου βαγονιού $w_w$ [tn]	24	24	24	24
Αριθμός οδηγών τρένου για κάθε δρομολόγιο $n_d$	2	2	2	2
Μέση ταχύτητα τρένου u [km/h]	60	60	60	60
Χρόνος προετοιμασίας $t_{dp}$ [h]	0.5	0.5	0.5	0.5
Αναμενόμενες καθυστερήσεις $d_l$ [h]	1	1	1	1
Εξωτερικά κόστη τερματικών σταθμών $c_{e1,2}$ [€/tn]	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549



### 3.6. Ενεργειακή αξιοποίηση βιομάζας για συμπαραγωγή.

Στη παρούσα υποενότητα θα παρουσιαστεί η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε για τον υπολογισμό του κόστους παραγωγής ηλεκτρισμού σε σταθμό συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού.

Οι παραδοχές που γίνονται για την μονάδα παραγωγής ενέργειας είναι:

- Θερμική ισχύς εισόδου  $Q_{th,in} = 200MW$
- Συνολικός βαθμός απόδοσης  $\eta_{chp} = 85\%$
- Θερμικός βαθμός απόδοσης  $\eta_{th} = 85\%$
- Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης  $\eta_{el} = 85\%$

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία το ετήσιο κόστος παραγωγής ηλεκτρισμού σε έναν σταθμό συμπαραγωγής υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο.[70]

$$C_{el,yr} = CAPEX + OPEX - (Heat_{sale,yr}) \quad (3.6.1)$$

Όπου,

$CAPEX$ : Τα συνολικά σταθερά κόστη σε [€/yr]

$OPEX$ : Το μεταβλητά λειτουργικά κόστη του σταθμού συμπαραγωγής σε [€/yr].

$Heat_{sale,yr}$ : Τα κέρδη από την πώληση θερμότητας στον σταθμό συμπαραγωγής.

Παρακάτω αναλύονται ξεχωριστά οι όροι που περιγράφηκαν προηγουμένως.

*Συνολικά σταθερά Κόστη (CAPEX).*

Περιλαμβάνει το άθροισμα του κόστους συνολικής επένδυσης κεφαλαίου και των σταθερών λειτουργικών κοστών της εγκατάστασης συμπαραγωγής.

Το αρχικό συνολικό κόστος επένδυσης ανάγεται στην παρούσα χρονική περίοδο σε [€/yr] σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$TCI_{CHP} = TCI * \frac{i}{1 - (1 + i)^{-N}} \quad (3.6.2)$$

Όπου,

$i$ : Το επιτόκιο αναγωγής. Στην περίπτωση μας λαμβάνεται ίσο με 10 %.

$N$ : Η διάρκεια ζωής της μονάδας συμπαραγωγής. Η διάρκεια ζωής μια τυπικής μονάδας συμπαραγωγής είναι ίση με 30 έτη.

Από την βιβλιογραφία παίρνουμε μια εκτίμηση για το συνολικό κόστος επένδυσης ενός σταθμού συμπαραγωγής που χρησιμοποιεί βιομάζα ως καύσιμο. [71]

Το συνολικό κόστος ενός τέτοιου σταθμού ανέρχεται στα 4200 [€/KW<sub>el</sub>].

Για την περίπτωση μας ισχύει:  $KW_{el} = Q_{th,in} * \eta_{el} = 60MW$

Επομένως γίνεται μια εκτίμηση του συνολικού κόστους επένδυσης:

$TCI = 250M€$

Τα σταθερά λειτουργικά κόστη της μονάδας εκφράζονται σε [€/yr] και σχετίζονται με την συντήρηση, την ασφάλεια και την φορολογία. Από την βιβλιογραφία [71] παίρνουμε μια εκτίμηση του μεγέθους αυτού ίση με 92 [€/KW<sub>el</sub>] και επομένως έχουμε:

$$V_{fix} = 5,500,000 \left[ \frac{\text{€}}{\text{yr}} \right]$$

Το σύνολο των σταθερών κοστών δίνεται τελικά από τον τύπο:

$$CAPEX = TCI_{CHP} + V_{fix} \quad (3.6.3)$$

*Συνολικά Μεταβλητά λειτουργικά κόστη (OPEX):*

Περιλαμβάνουν τα κόστη που σχετίζονται με την άμεση λειτουργία του σταθμού συμπαραγωγής.

Ορίζονται ως το άθροισμα του κόστους παραδιδόμενου καυσίμου σε [€/MWh] και των μεταβλητών κοστών λειτουργίας του σταθμού σε [€/MWh] πολλαπλασιασμένο με την θερμική ισχύς στην είσοδο του σταθμού τις ετήσιες ώρες λειτουργίας του.

$$OPEX = (C_{fuel} + V_{var}) * Q_{th,in} * \left( \frac{h}{yr} \right) \quad (3.6.4)$$

Όπου,

$Q_{th,in}$ : Η θερμική ισχύς εισόδου σε [MW].

$OPEX$ : σε [€/yr]

Ως ετήσιες ώρες λειτουργίας ενός τέτοιου σταθμού θεωρούμε τις 8000 ώρες το χρόνο.

Το κόστος παραδιδόμενου καυσίμου στο σταθμό συμπαραγωγής υπολογίζεται με όσα προαναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα.

Τα μεταβλητά υπολογίζονται από προσεγγιστική τιμή μιας μονάδας συμπαραγωγής από την βιβλιογραφία[70] προσαυξανόμενης με το κόστος απόθεσης τέφρας στην κάθε περίπτωση.

Έτσι έχουμε:

$$V_{var} = 5 \frac{\text{€}}{MWh} + C_{ash} \quad (3.6.5)$$

Όπου,

Από βιβλιογραφία μια προσέγγιση τιμής των μεταβλητών λειτουργικών κοστών είναι

$$5 \frac{\text{€}}{MWh}$$

$C_{ash}$ : Το κόστος απόθεσης τέφρας ως απόβλητο της καύσης της βιομάζας.

Το κόστος απόθεσης τέφρας υπολογίζεται για το κάθε είδος βιομάζας ως εξής:

$$C_{ash} = ash(\%) * m_{fuel} * (P_{ash}) \quad (3.6.6)$$

Όπου,

$P_{ash}$ : Η τιμή απόθεσης τέφρας που από βιβλιογραφία[25] βρέθηκε ίση με 50 [€/tn ash]

Κέρδη από την πώληση θερμότητας ( $Heat_{sale,yr}$ ):

Υπολογίζονται από τον παρακάτω τύπο:

$$(Heat_{sale,yr}) = C_{heat} * Q_{th,in} * \eta_{th} * \left(\frac{h}{yr}\right)_{heat} \quad (3.6.7)$$

Όπου,

$C_{heat}$ : Η τιμή πώλησης θερμότητας. Στην περίπτωση μας θεωρούμε ένα σχετικό εύρος τιμής πώλησης από 30 έως 40 [€/MWh].

Η τιμή αυτή προκύπτει προσεγγιστικά από το κόστος παραγωγής θερμότητας με χρήση φυσικού αερίου.

Σύμφωνα με την ευρωπαϊκή υπηρεσία στατιστικών δεδομένων Eurostat, βρίσκουμε πως το κόστος του φυσικού αερίου, δηλαδή η τιμή αγοράς του ανέρχεται στο ποσό των 31 [€/MWh] για την περιοχή της Γερμανίας. Θεωρώντας ένα μέσο συντελεστή απόδοσης για την καύση του φυσικού αερίου ίσο με  $\eta_{gas} = 0.9$  υπολογίζουμε το κόστος παραγωγής θερμότητας για φυσικό αέριο. Η τιμή αυτή στην περίπτωση μας είναι:

$$C_{heat,gas} = \frac{Pr_{heat,gas}}{\eta_{gas}} = 34.4 \left[ \frac{\text{€}}{MWh} \right]$$

Ο όρος  $\left(\frac{h}{yr}\right)_{heat}$  εκφράζει τις ώρες που ο σταθμός συμπαραγωγής μπορεί να πουλάει θερμότητα στο δίκτυο. Εξετάστηκε για ώρες πώλησης θερμότητας ίσης με 6000 h/yr.

Τέλος διαιρώντας το κόστος παραγωγής ηλεκτρισμού σε [€/yr] που βρέθηκε από την εξίσωση (3.6.1) με τις ώρες που μπορούμε να πουλάμε ηλεκτρισμό το χρόνο και την αποδιδόμενη ηλεκτρικής ισχύς παίρνουμε το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε [€/MWh].

Τελικά έχουμε:

$$C_{el} = \frac{C_{el,yr}}{Q_{th,in} * \eta_{el} * \left(\frac{h}{yr}\right)_{el}} \quad (3.6.8)$$

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι παραδοχές που έγιναν για το κόστος παραγωγής ηλεκτρισμού:

Πίνακας 3.24: Παραδοχές υπολογισμών κόστους ηλεκτρισμού.

Συνολικό κόστος επένδυσης TCI [€]	250,000,000
Επιτόκιο αναγωγής $i$	10%
Διάρκεια ζωής $N$	30
Σταθερά λειτουργικά κόστη $V_{fix}$ [€/yr]	5,500,000
Μεταβλητά λειτουργικά κόστη (εκτός τέφρας) [€/MWh]	5
Θερμική ισχύς εισόδου $Q_{th,in}$ [MW]	200
Θερμικός βαθμός απόδοσης $\eta_{th}$	55%
Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης $\eta_{el}$	30%
Τιμή πώλησης θερμότητας [€/MWh]	30-40
Ωρες πώλησης ηλεκτρισμού το χρόνο $\left(\frac{h}{yr}\right)_{el}$	8000
Ωρες πώλησης θερμότητα το χρόνο $\left(\frac{h}{yr}\right)_{heat}$	6000

## 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της οικονομικής αξιολόγησης μέσω της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Αρχικά θα παρατεθούν τα ισοζύγια μάζας που βρέθηκαν σύμφωνα με την ανάλυση της ενότητας 3.1 έτσι ώστε να δειχθεί το μέγεθος δυναμικότητας επεξεργασίας της κάθε μονάδας και να συγκριθούν για διαφορετικά είδη βιομάζας

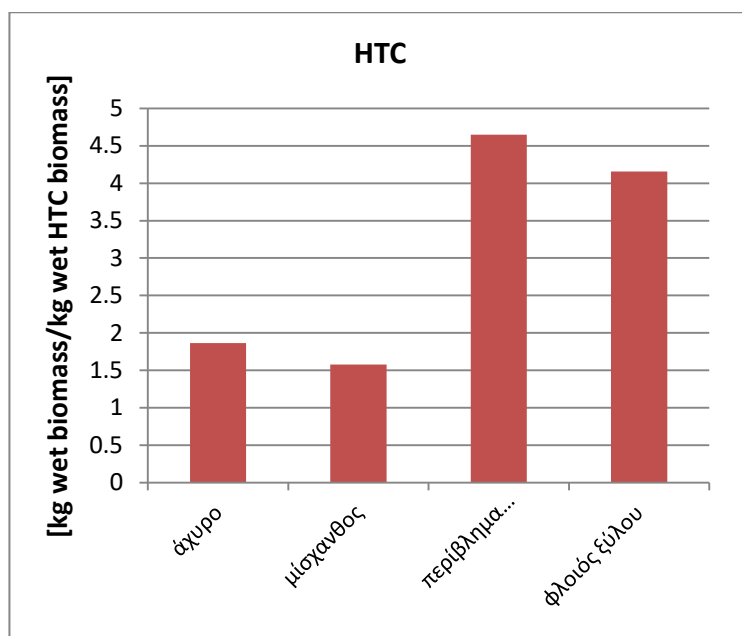
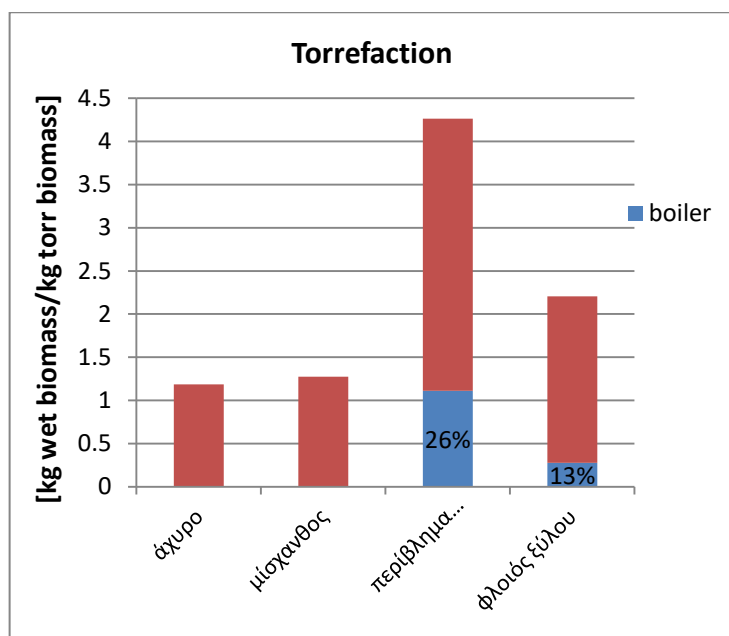
Στην συνέχεια εν συντομία δίνεται το κόστος παραγωγής του μίσχανθου όπως υπολογίστηκε με τις εξισώσεις της ενότητας 3.2 αλλά και οι ακτίνες μεταφοράς που χρησιμοποιήθηκαν για την συλλογή της βιομάζας στην μονάδας προεπεξεργασίας.

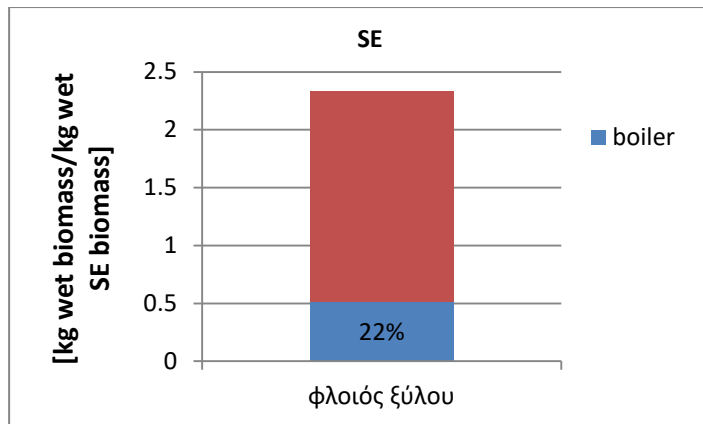
Έπειτα παρουσιάζεται το κόστος παραγωγής της επεξεργασμένης βιομάζας για κάθε μια διεργασία αλλά και η επίδραση που έχει η αλλαγή ορισμένων παραδοχών που πήραμε όπως το επιτόκιο αναγωγής και η τιμή αγοράς της βιομάζας στην τιμή του κόστους επεξεργασίας.

Με χρήση της μεθοδολογίας της ενότητας 3.5 και με βάση τις παραδοχές αποστάσεων που έγιναν δίνεται το κόστος παραδιδόμενου καυσίμου στην κεντρική μονάδα συμπαραγωγής. Συγκρίνεται επίσης το κόστος αυτό με το αντίστοιχο της μεταφοράς βιομάζας ακατέργαστης μορφής έτσι ώστε να διερευνηθεί αν συμφέρει τελικώς η προεπεξεργασία της βιομάζας πριν την μεταφορά της για τις αποστάσεις που θεωρήθηκαν.

Τέλος παρουσιάζεται η επίδραση της επεξεργασμένης βιομάζας στο κόστος παραγωγής ηλεκτρισμού στην μονάδα συμπαραγωγής σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως.

### Ισοζύγια μάζας και δυναμικότητες επεξεργασίας.





Εικόνα 4.1: Ισοζύγια μάζας διεργασιών.

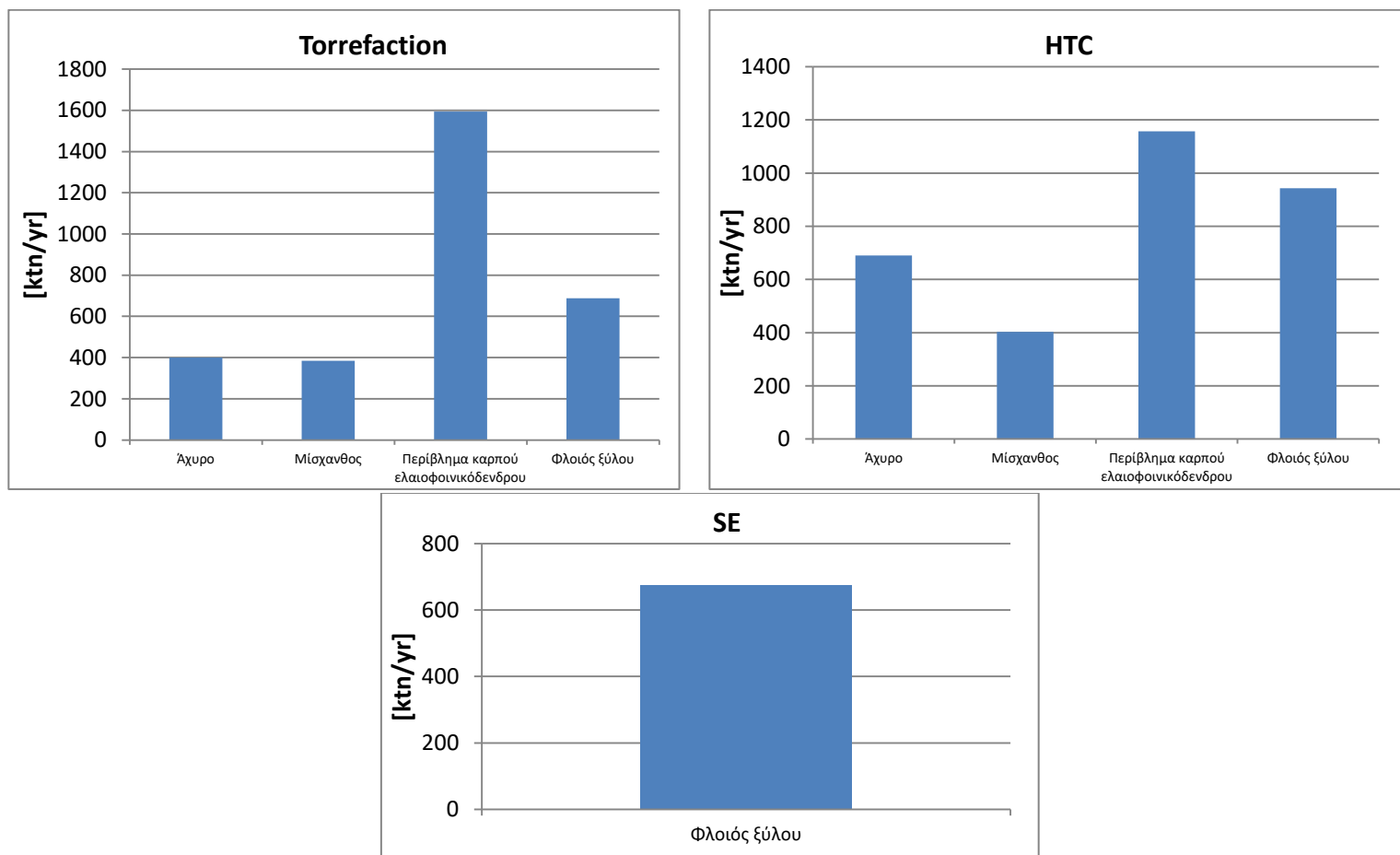
Αρχικά παρουσιάζονται τα ισοζύγια μάζας που βρέθηκαν από την ενότητα 3.1 τα οποία δείχνουν πόσα κιλά ακατέργαστης βιομάζας χρειαζόμαστε για την παραγωγή ενός κιλού επεξεργασμένης μορφής έτσι ώστε να υπολογισθεί η δυναμικότητα επεξεργασίας της κάθε μονάδας.

Όπως παρατηρούμε ο φλοιός ξύλου και το περίβλημα καρπού ελαιοφαινόδενδρου λόγω των υψηλών ποσοστών υγρασίας στην ακατέργαστη μορφή τους παρουσιάζουν μεγαλύτερα ισοζύγια μάζας. Πιο συγκεκριμένα κατά την προεπεξεργασία μέσω φρύξης του περιβλήματος καρπού ελαιοφαινόδενδρου το 26% της ακατέργαστης βιομάζας καταναλώνεται στον λέβητα για την διεργασία της ξήρανσης. Το αντίστοιχο ποσοστό για τον φλοιό ξύλου είναι 13%.

Για την διεργασία της υδροθερμικής ανθρακοποίησης το περίβλημα καρπού ελαιοφαινόδενδρου και ο φλοιός ξύλου παρουσιάζουν χαμηλή κατώτερη θερμογόνο ικανότητα (5.35 [MJ/kg] και 8.33 [MJ/kg] αντίστοιχα), υψηλά ποσοστά υγρασίας αλλά και μικρή τιμή κλάσματος απόδοσης μάζας (59% και 42%) . Επομένως σε σχέση με τα άλλα δυο εξεταζόμενα είδη βιομάζας παρουσιάζουν υψηλότερα ισοζύγια μάζας.

Για την διεργασία της έκρηξης ατμού το 22% του συνόλου της βιομάζας που προμηθευόμαστε καταναλώνονται στον λέβητα για παραγωγή ατμού.

Στην συνέχεια παρουσιάζεται η δυναμικότητα επεξεργασίας της κάθε μονάδας προεπεξεργασίας σύμφωνα με τα στοιχεία που δίνονται στους πίνακες της ενότητας 3.1.

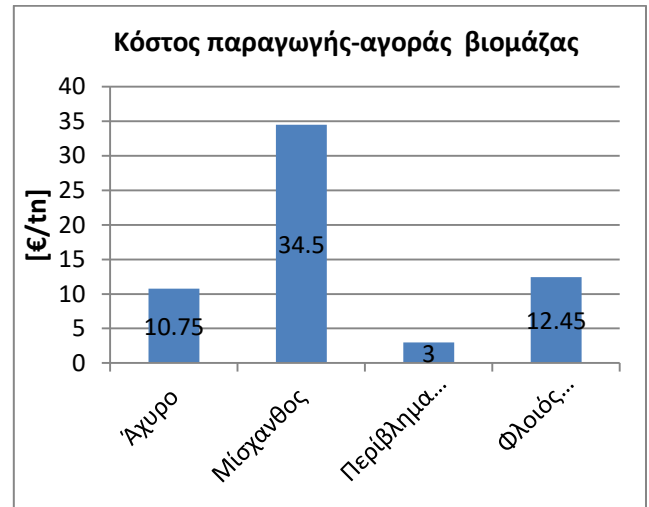
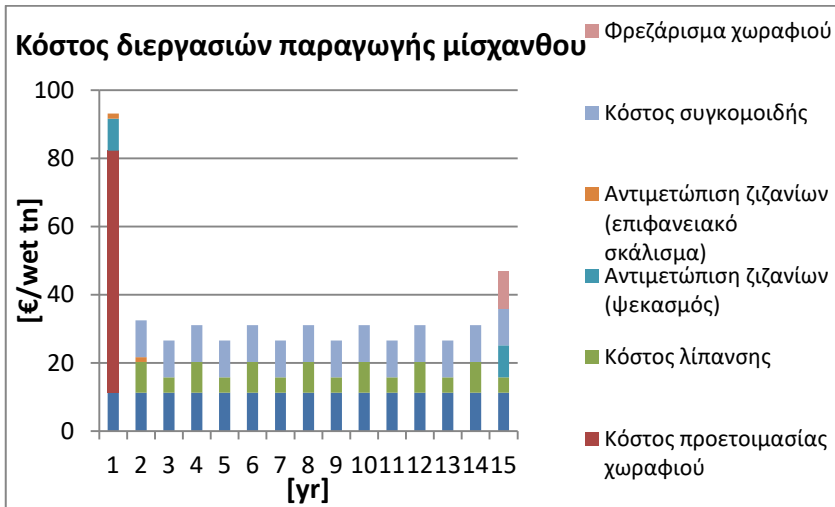


Εικόνα 4.2: Δυναμικότητα επεξεργασίας μονάδων προεπεξεργασίας.

Από τα στοιχεία του πίνακα 3.1 βλέπουμε πως για την διεργασία της φρύξης στους 250°C το επεξεργασμένο περίβλημα καρπού ελαιοφαινοκόδενδρου έχει πολύ μικρότερη ανώτερη θερμογόνο ικανότητα σε σχέση με τα υπόλοιπα είδη βιομάζας (μόλις 17.7 MJ/kg). Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με το υψηλό ισοζύγιο μάζας που παρουσιάζει η επεξεργασία του οδηγεί σε πολύ μεγάλη δυναμικότητα επεξεργασίας της μονάδος προεπεξεργασίας.

Στην διεργασία της υδροθερμικής ανθρακοποίησης από τον πίνακα 3.2 παρατηρούμε πως η θερμογόνος ικανότητα του άχυρου είναι επίσης χαμηλή σε σχέση με τα υπόλοιπα είδη που εξετάστηκαν (μόλις 19.15 MJ/kg) και επομένως παρουσιάζει αυξημένη δυναμικότητα επεξεργασίας. Στην περίπτωση του φλοιού ξύλου αυτό οφείλεται στο χαμηλό κλάσμα απόδοσης απώλειας μάζας (42%) που δίνει η βιβλιογραφία.

Κόστος παραγωγής μίσχανθου.

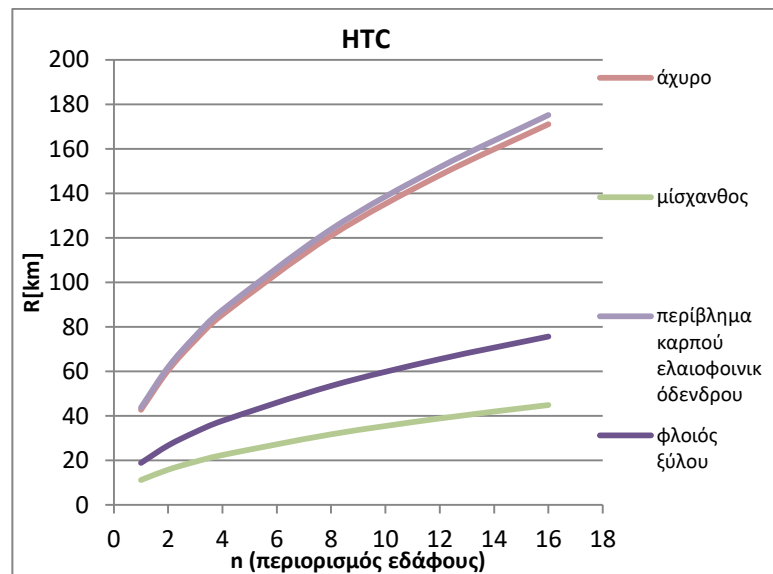
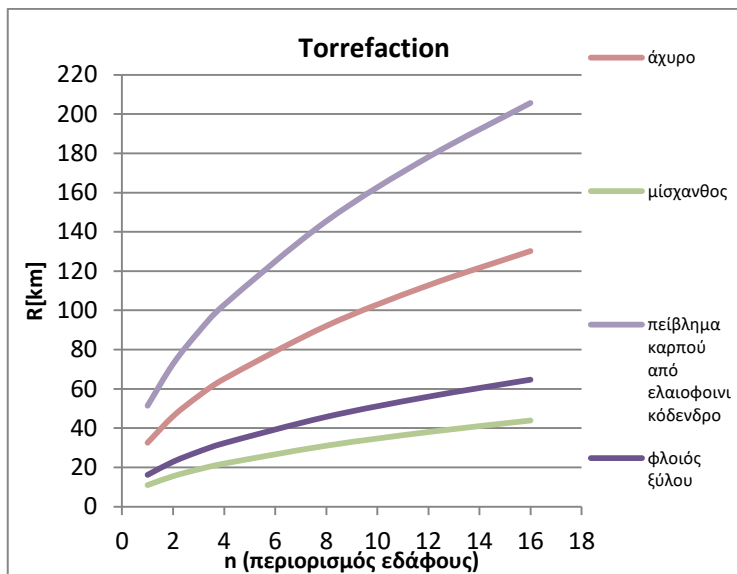


Εικόνα 4.3: Κόστος παραγωγής - αγοράς βιομάζας

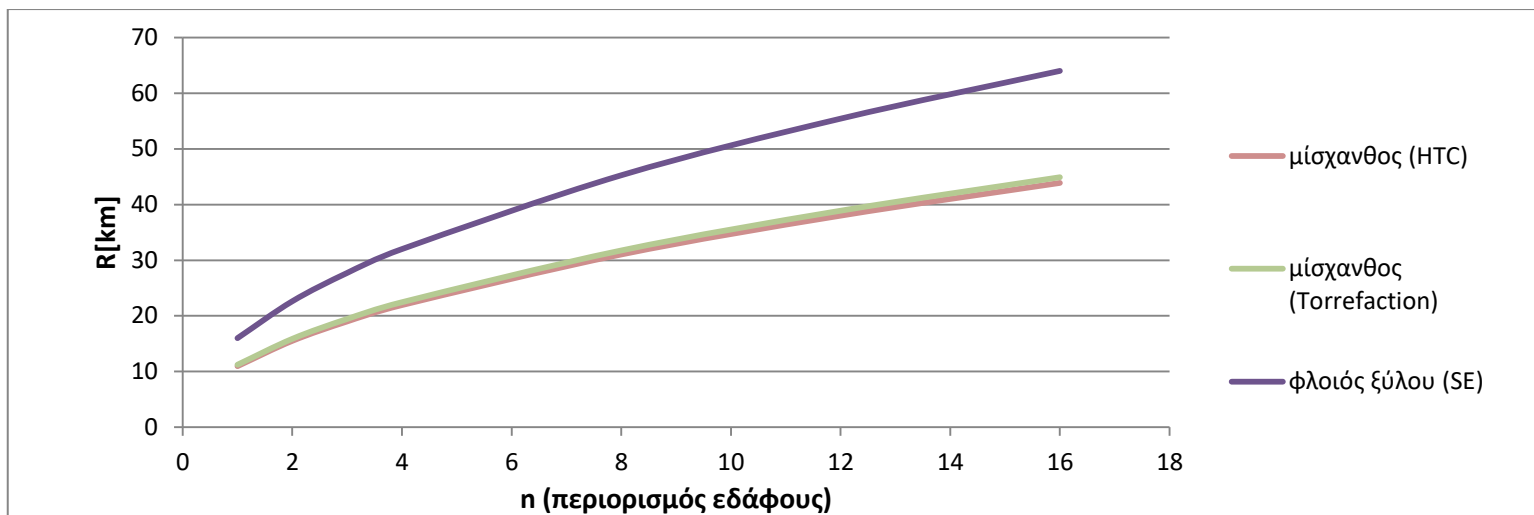
Από τον μέσο όρο του πρώτου διαγράμματος σύμφωνα με τις εξισώσεις της ενότητας 3.2 προκύπτει το κόστος παραγωγής του μίσχανθου 34.5 [€/tn]. Στην δεξιά εικόνα συγκρίνονται οι τιμές αγοράς των υπόλοιπων τριών ειδών με το κόστος παραγωγής του μίσχανθου.

Ακτίνες συλλογής R:

Παρουσιάζονται οι υπολογιζόμενες ακτίνες συλλογής για κάθε διεργασία.



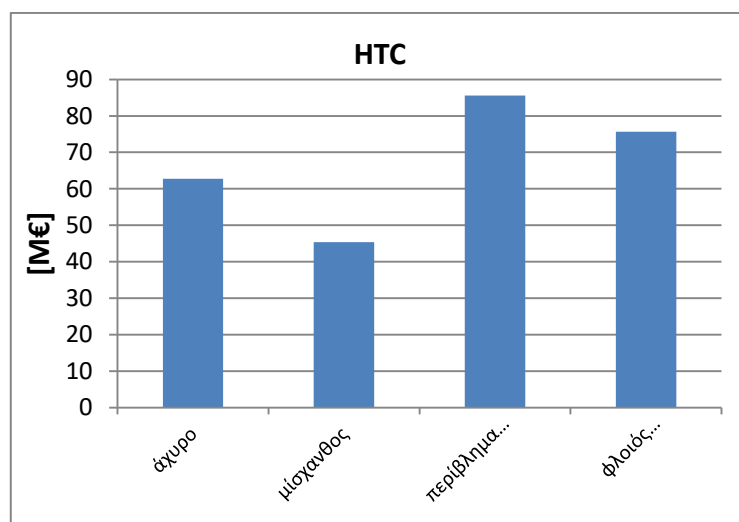
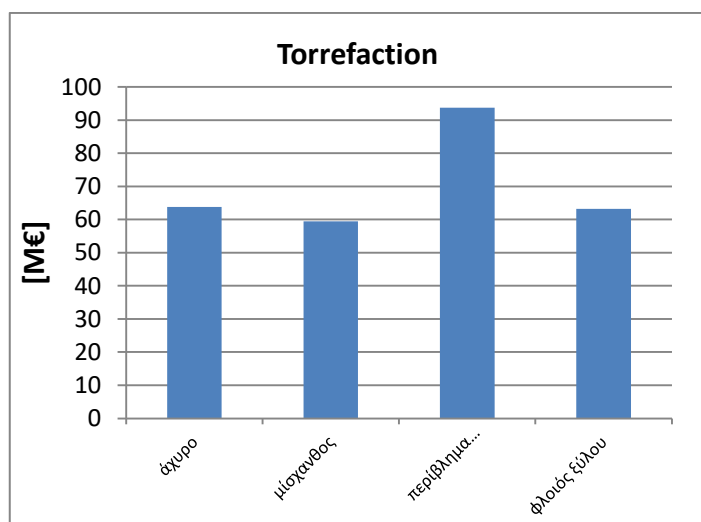


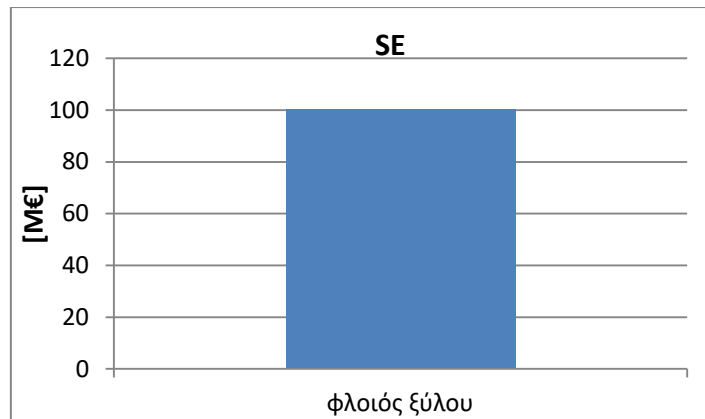


Εικόνα 4.4: Ακτίνες συλλογής R.

Όπως είναι λογικό οι μεγαλύτερες ακτίνες συλλογής παρατηρούνται για τα είδη βιομάζας με χαμηλό δυναμικό παραγωγής όπως το άχυρο (2.65 [tn/ha/y]) και το περίβλημα καρπού ελαιοφαινόδενδρου (4.25 [tn/ha/y]). Στο τελευταίο διάγραμμα παρουσιάζεται το είδος βιομάζας με την χαμηλότερη ακτίνα συλλογής για κάθε μέθοδο προεπεξεργασίας. Παρατηρούμε επίσης ότι όσο αυξάνεται ο γεωγραφικός περιορισμός n τόσο αυξάνει η ακτίνα συλλογής της βιομάζας και επομένως αυξάνεται το κόστος συλλογής της. Στην περίπτωση μας επιλέξαμε μια μέση τιμή για τον περιορισμό εδάφους θεωρώντας πως στον κύκλο ακτίνας R μόνο το 1/8 θα είναι διαθέσιμο για παραγωγή επομένως και συλλογή της βιομάζας (n=8).

Κόστος συνολικής επένδυσης μονάδων προεπεξεργασίας.





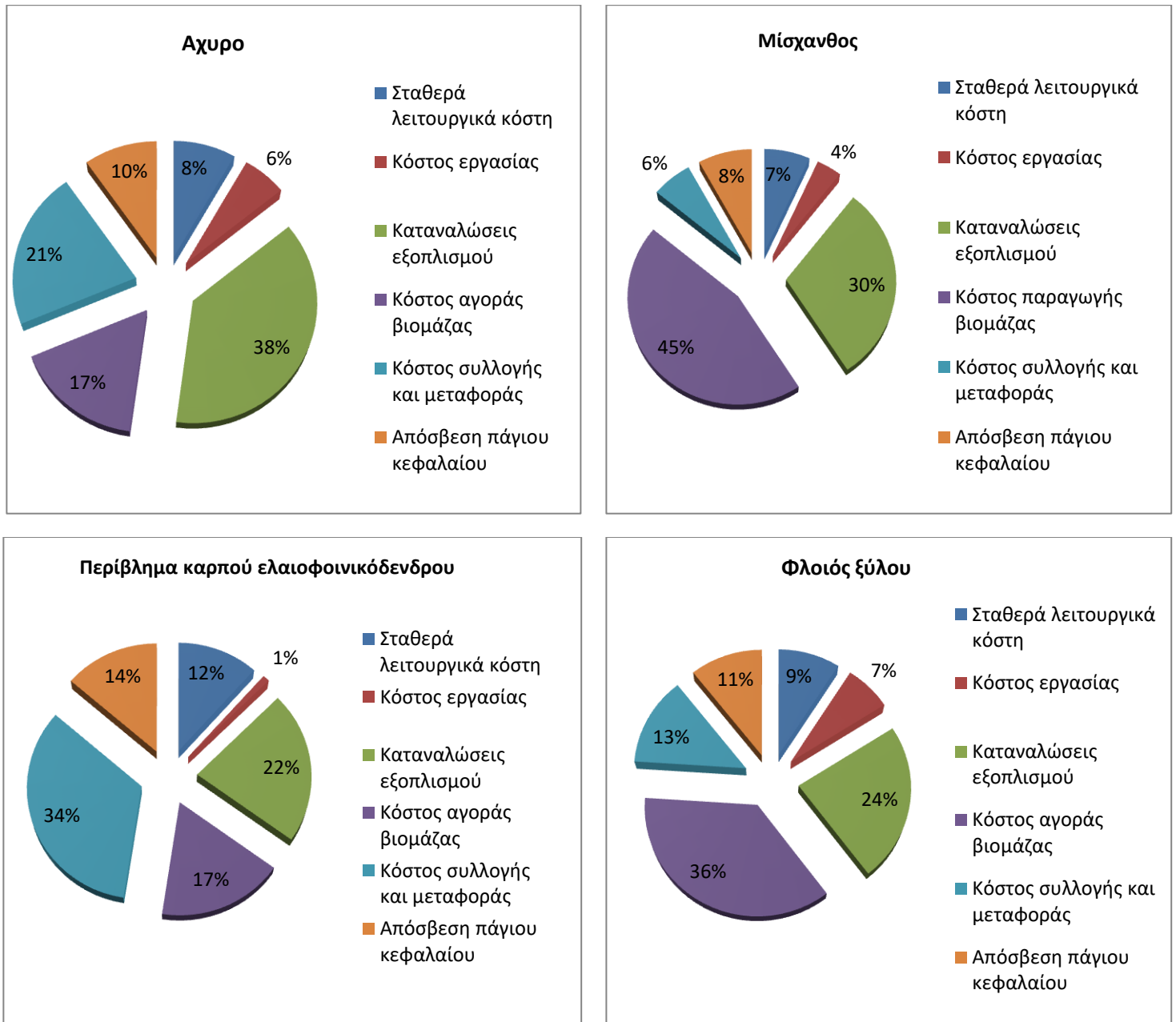
Εικόνα 4.5: Κόστος συνολικής επένδυσης κεφαλαίου (TCI).

Τα κόστη συνολικής επένδυσης κεφαλαίου αυξάνονται κατά αναλογία με την αύξηση της δυναμικότητας επεξεργασίας της κάθε μονάδας προεπεξεργασίας, ακολουθούν δηλαδή τις αναλογίες της εικόνας 4.2.

Παρόλα αυτά παρατηρούμε πως στην μονάδα φρύξης το κόστος συνολικής επένδυσης κεφαλαίου παρουσιάζεται αυξημένο λόγω του περιορισμού μέγιστης δυναμικότητας επεξεργασίας στον αντιδραστήρα. Στην περίπτωση αυτή θυμίζουμε ότι θεωρήθηκαν παράλληλες μονάδες μηχανημάτων επομένως το κόστος επένδυσης αυξήθηκε αναλόγως.

Όσον αφορά την μονάδα προεπεξεργασίας μέσω έκρηξης ατμού θυμίζουμε πως τα δεδομένα σύμφωνα με τα οποία έγινε η κλιμάκωση κόστους στην δυναμικότητα της νέας μονάδος λήφθηκαν από πηγή χρονολογίας του 1990, καθώς δεν βρέθηκε κάποια άλλη πηγή για μονάδες υψηλής δυναμικότητας επεξεργασίας του εύρους που μελετάται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Ετήσιο κόστος λειτουργίας μονάδων προεπεξεργασίας.



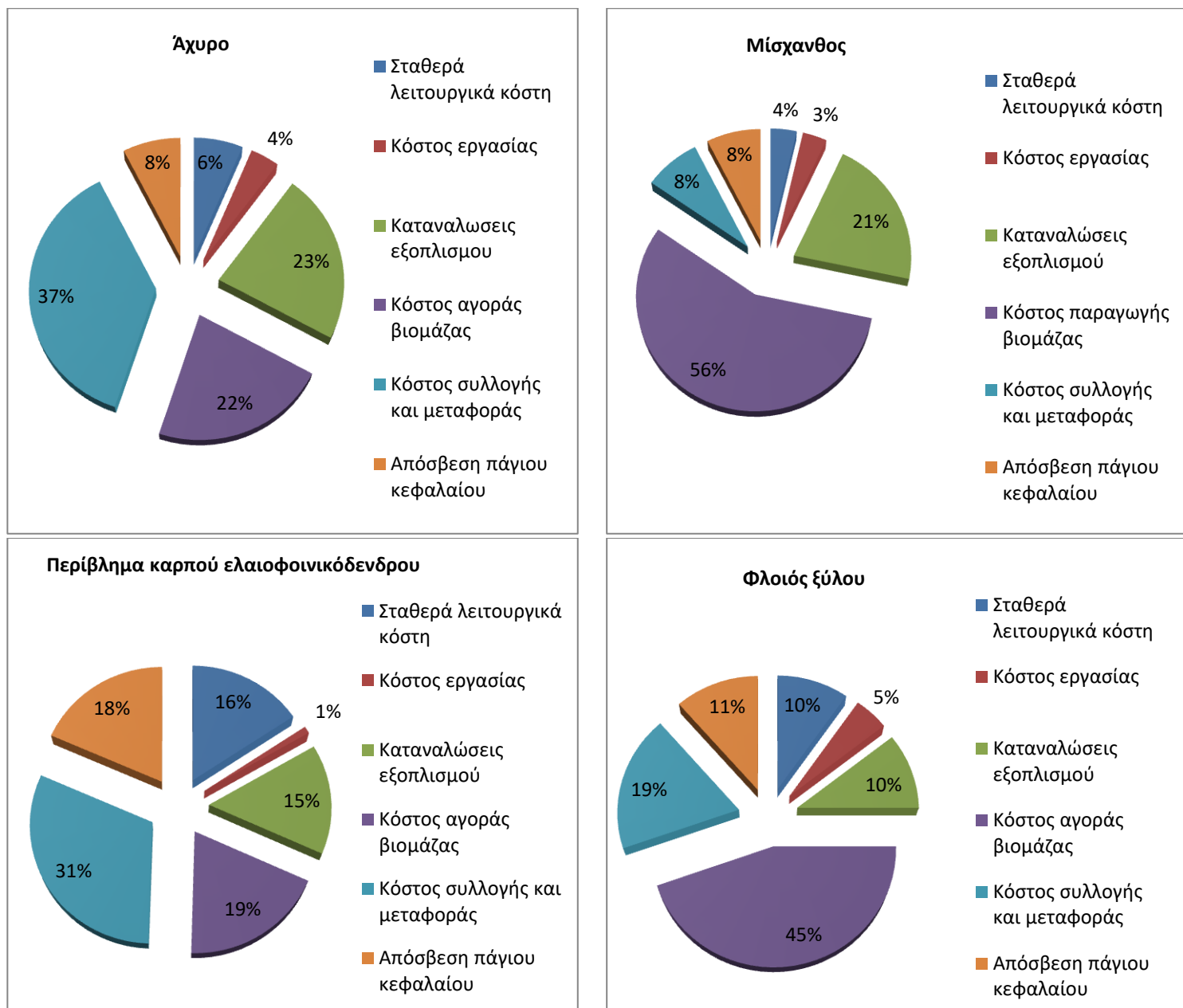
Εικόνα 4.6: Ετήσιο κόστος λειτουργίας μονάδων φρύξης.

Όπως είναι λογικό τα σταθερά λειτουργικά κόστη και το κόστος απόσβεσης πάγιου κεφαλαίου είναι αυξημένα στην περίπτωση επεξεργασίας του περιβλήματος ελαιοφαικιδένδρου λόγω μεγαλύτερης δυναμικότητας επεξεργασίας της μονάδας. Παρόλα αυτά στην συγκεκριμένη περίπτωση τα κόστη καταναλώσεων και εργασίας είναι πολύ μειωμένα λόγω χαμηλών μισθών και τιμών προμήθειας των πρώτων υλών εφόσον η μονάδα θεωρείται εγκατεστημένη στην Μαλαισία.

Η υψηλότερη τιμή κόστους παραγωγής – αγοράς βιομάζας εμφανίζεται για την περίπτωση του μίσχανθου όπως είναι λογικό. Το υψηλό ποσοστό στις καταναλώσεις εξοπλισμού στην περίπτωση επεξεργασίας του άχυρου οφείλεται στην

αυξημένη τιμή προμήθειας, πρώτων υλών και ηλεκτρισμού καθώς η μονάδα προεπεξεργασίας βρίσκεται εγκατεστημένη στην Γερμανία.

Τέλος το κόστος συλλογής είναι μεγαλύτερο στις περιπτώσεις συλλογής του άχυρου και του περιβλήματος καρπού ελαιοφαινοκόδενδρου όπως σχολιάστηκε και προηγουμένως καθώς από τη χαμηλή απόδοση παραγωγής τους προκύπτει μεγάλη ακτίνα συλλογής επομένως και αποστάσεις μεταφοράς.

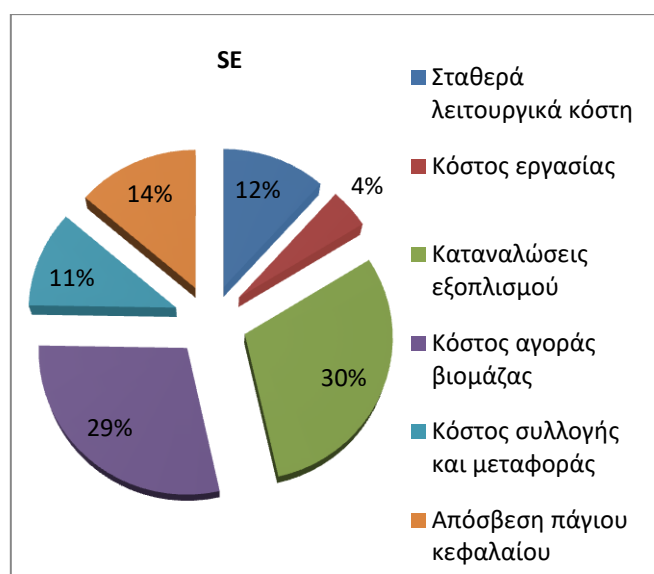


Εικόνα 4.7: Ετήσιο κόστος λειτουργίας μονάδων υδροθερμικής ανθρακοποίησης.

Στην εικόνα 4.7 παρουσιάζεται το ετήσιο κόστος λειτουργίας των μονάδων προεπεξεργασίας μέσω υδροθερμικής ανθρακοποίησης. Στις μονάδες προεπεξεργασίας με υδροθερμική ανθρακοποίηση παρατηρείται γενικά μειωμένο κόστος σε καταναλώσεις εξοπλισμού σε σχέση με τις αντίστοιχες μονάδες φρύξης και έκρηξης ατμού.

Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα κόστη αυτά περιλαμβάνουν κυρίως καταναλώσεις νερού που είναι αρκετά φθηνότερο στην τιμή αγοράς του. Στην περίπτωση του μίσχανθου τα κόστη παραγωγής του ξεπερνούν το 50% του συνολικού κόστους λειτουργίας της μονάδας. Αυτό σημαίνει πως σε ενδεχόμενη μείωση της τιμής παραγωγής του το συνολικό κόστος παραγωγής θα μειωνόταν σημαντικά. Κάτι τέτοιο μπορεί να επιτευχθεί αν η παραγωγή του γινόταν σε άλλη χώρα από την Ιταλία που εξετάστηκε στην παρούσα διπλωματική, καθώς έτσι θα μειωνόντουσαν κόστη που αφορούν τα ενοίκια γης την τιμή των λιπασμάτων κλπ. Το ίδιο ισχύει και για την περίπτωση επεξεργασίας του φλοιού ξύλου.

Για τα δυο είδη με υψηλά ποσοστά υγρασίας (φλοιός ξύλου, περίβλημα καρπού ελαιοφαινόδενδρου) παρατηρούνται μειωμένες καταναλώσεις εξοπλισμού. Αυτό οφείλεται στις μειωμένες ποσότητες νερού που συμπληρώνουμε για την εκτέλεση της διεργασίας. Το κόστος συλλογής και σε αυτή την περίπτωση είναι αυξημένο για τα δύο είδη με χαμηλό δυναμικό παραγωγής (άχυρο, περίβλημα καρπού ελαιοφαινόδενδρου). Τέλος το αυξημένο κόστος απόσβεσης πάγιου κεφαλαίου στην περίπτωση του περιβλήματος καρπού ελαιοφαινόδενδρου οφείλεται στην μεγάλη δυναμικότητα επεξεργασίας της μονάδος.

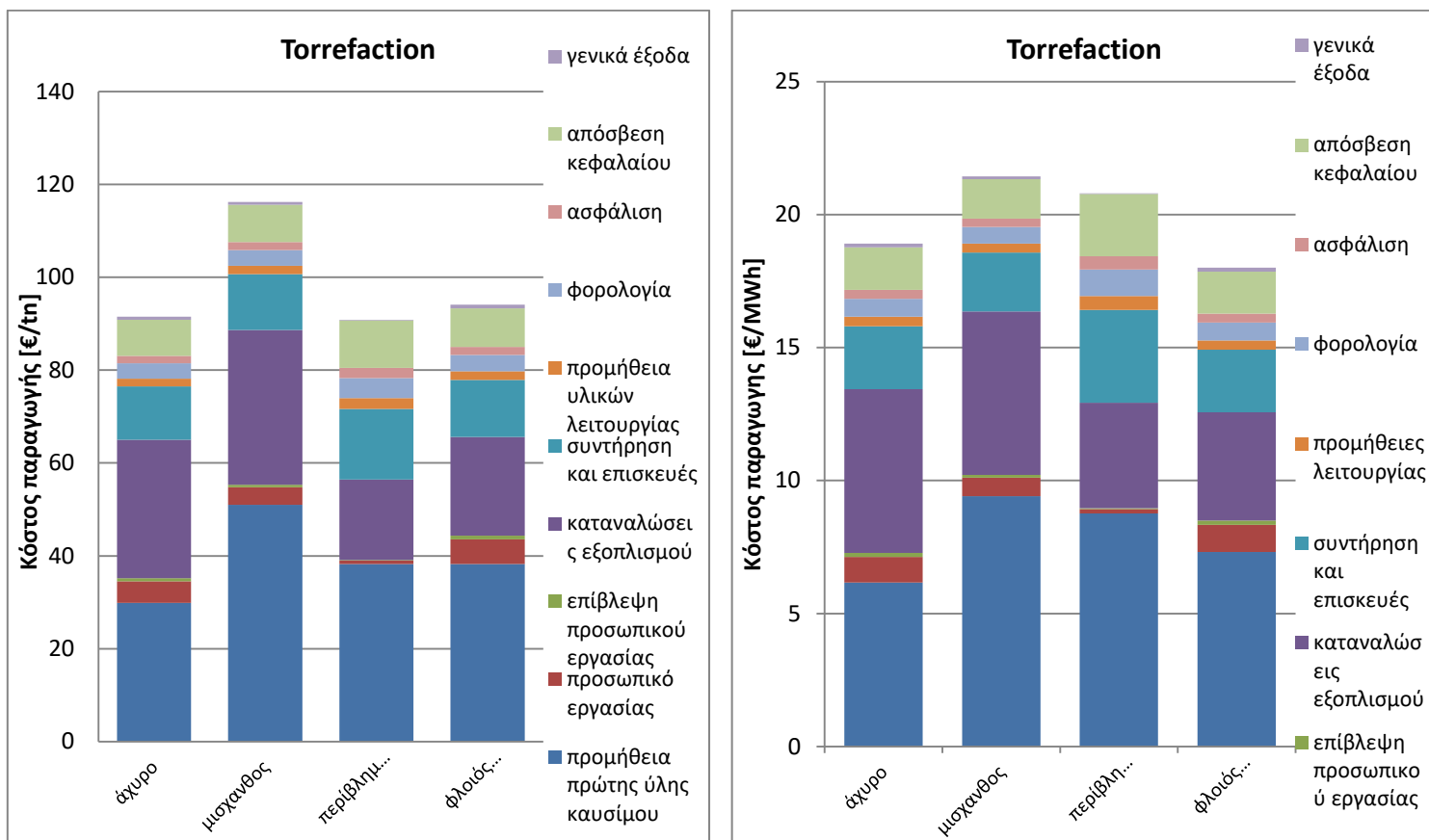


Εικόνα 4.8: Ετήσιο κόστος λειτουργίας μονάδας έκρηξης ατμού

Η μονάδα προεπεξεργασίας μέσω έκρηξης ατμού παρουσιάζει ισορροπημένα κόστη όπως περιμέναμε καθώς και η τιμή αγοράς φλοιού ξύλου και η δυναμικότητα επεξεργασίας που βρέθηκαν συμβάλλουν σε ένα τέτοιο αποτέλεσμα.

### Κόστος παραγωγής επεξεργασμένης βιομάζας.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του κόστους παραγωγής της επεξεργασμένης βιομάζας με διαφορετικές μεθόδους προεπεξεργασίας.



Εικόνα 4.9: Κόστος παραγωγής επεξεργασμένης βιομάζας μέσω φρύξης.

Το κόστος παραγωγής επεξεργασμένης βιομάζας σε μορφή πέλλετ ποικίλει σύμφωνα με την βιβλιογραφία και κυμαίνεται στο εύρος 90 – 135 [€/tn] παραγόμενης επεξεργασμένης βιομάζας[72]. Στην περίπτωση μας τα αποτελέσματα συμφωνούν με την βιβλιογραφία. Το κόστος παραγωγής του επεξεργασμένου μίσχανθου είναι αυξημένο λόγω μεγάλου κόστους παραγωγής και συλλογής της απαιτούμενης βιομάζας.

Το κόστος παραγωγής σε [€/MWh] δίνεται διαιρώντας το κόστος παραγωγής ανά τόνο με την κατώτερη θερμογόνο ικανότητα υγρής επεξεργασμένης βιομάζας ( $LHV_{wet}$ ) σε [MWh/tn] όπως υπολογίσθηκαν από τους τύπους (3.1.3 – 3.1.9) από την ανώτατη θερμογόνο ικανότητα που δινόταν στην βιβλιογραφία. Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται οι τιμές αυτές προκειμένου να υπάρχει καλύτερη αντίληψη των αποτελεσμάτων.

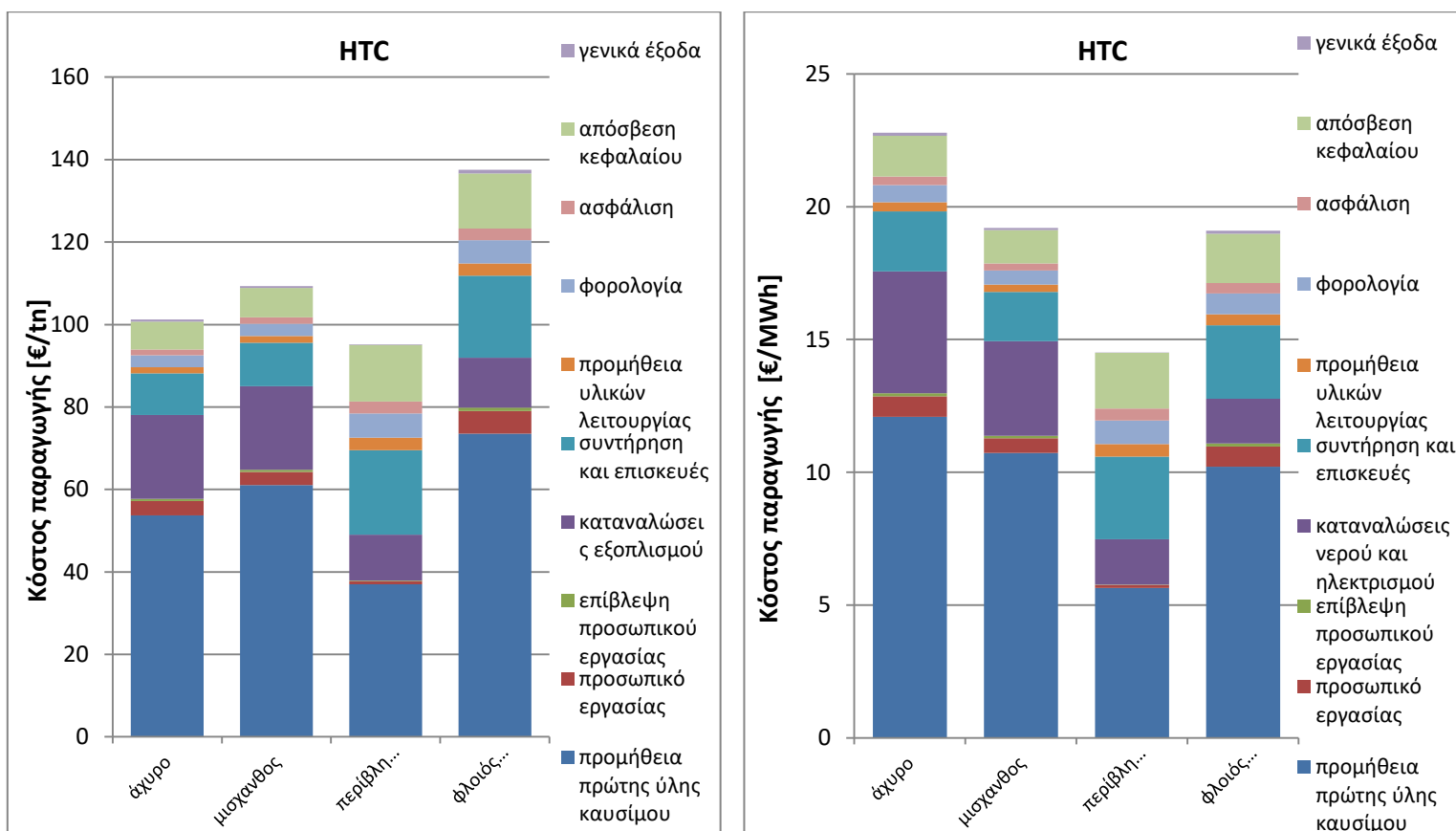
Πίνακας 4.1: Κατώτερη θερμογόνος ικανότητα επεξεργασμένης βιομάζας [MJ/kg]

	Άχυρο	Μίσχανθος	Περίβλημα καρπού ελαιοφαινόδεσδρου	Φλοιοός ξύλου
Φρύξη				
LHV <sub>wet</sub>	<b>17.42</b>	<b>19.51</b>	<b>15.72</b>	<b>18.81</b>
Υδροθερμική ανθρακοποίηση				
LHV <sub>wet</sub>	<b>16</b>	<b>20.5</b>	<b>23.61</b>	<b>25.92</b>
Έκρηξη ατμού				
LHV <sub>wet</sub>				<b>18.4</b>

Όπως παρατηρούμε στην περίπτωση επεξεργασίας του περιβλήματος καρπού ελαιοφαινόδεσδρου με φρύξη δεν αυξάνεται σημαντικά η θερμογόνος ικανότητα του στους 250°C. Από τον πίνακα 3.1 φαίνεται πως η ανώτατη θερμογόνος ικανότητα του μετά την επεξεργασία του αυξάνεται μόνο 0.7 [MJ/kg][31].

Παρόλα αυτά στην βιβλιογραφία η μελέτη επεξεργασίας του περιβλήματος καρπού ελαιοφαινόδεσδρου μέσω φρύξης είναι περιορισμένη καθώς λόγω της υψηλής υγρασίας του επεξεργάζεται συνήθως μέσω της μεθόδου της υδροθερμικής ανθρακοποίησης.

Λόγω των όσων αναφέρθηκαν παραπάνω το κόστος επεξεργασίας του περιβλήματος ελαιοφαινόδεσδρου μέσω φρύξης παρουσιάζει αυξημένη τιμή. Τα υπόλοιπα τρία είδη βιομάζας κινούνται στο αναμενόμενο εύρος τιμών κόστους επεξεργασίας.



Εικόνα 4.9: Κόστος παραγωγής επεξεργασμένης βιομάζας μέσω υδροθερμικής ανθρακοποίησης.

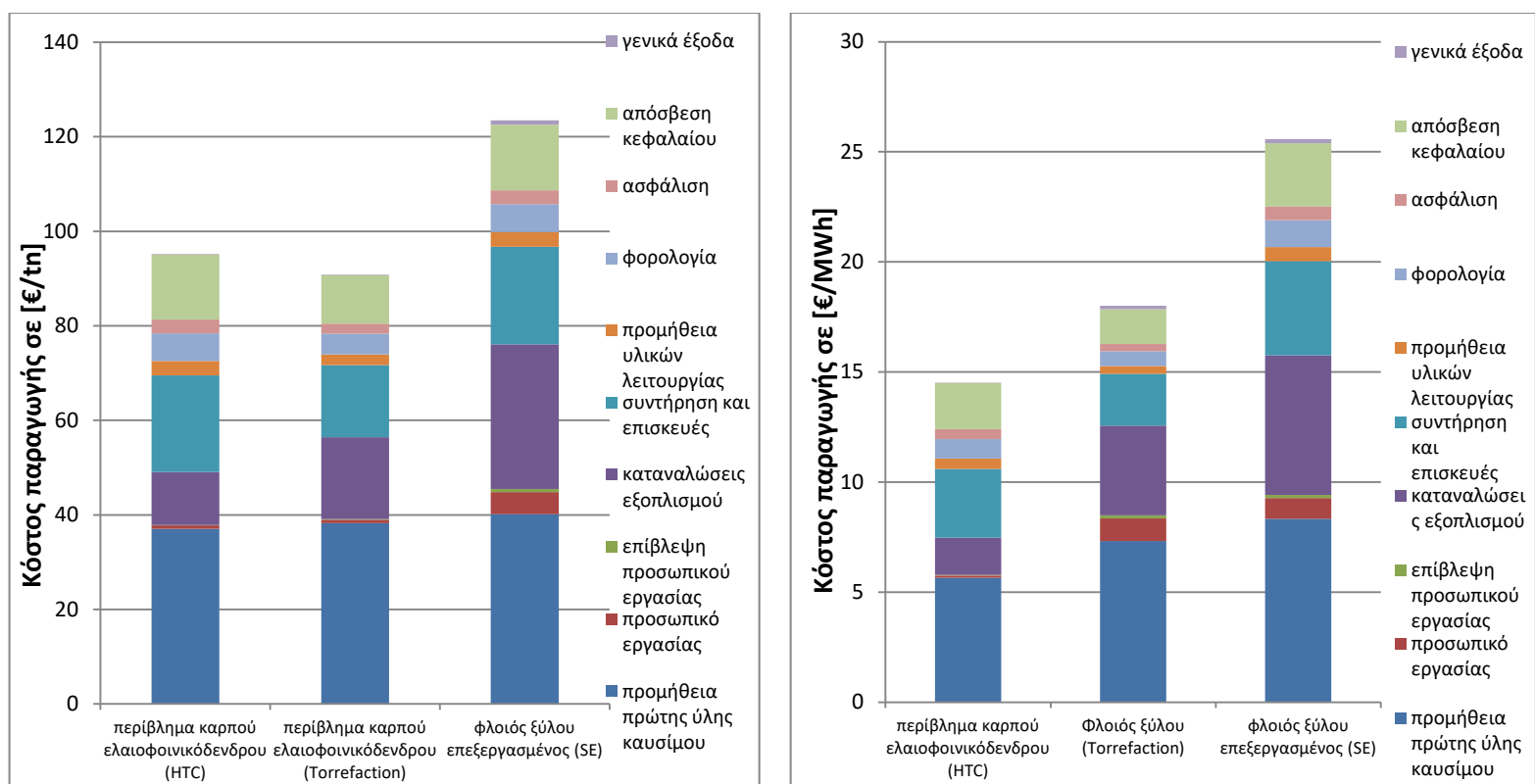
Στην εικόνα 4.9 παρατηρούμε πως το κόστος παραγωγής επεξεργασμένης βιομάζας από φλοιό ξύλου σε [€/tn] είναι ιδιαίτερα αυξημένο. Αυτό οφείλεται στις υψηλές απώλειες μάζας που παρουσιάζει κατά την επεξεργασία του καθώς σύμφωνα με τον πίνακα 3.2 η τιμή του κλάσματος απόδοσης απωλειών μάζας είναι μόλις 42%. Όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα αυτό επηρεάζει σημαντικά το ισοζύγιο μάζας της διεργασίας του και επομένως την δυναμικότητα επεξεργασίας της μονάδος.

Στην μετατροπή του κόστους παραγωγής σε [€/MWh] χρησιμοποιήθηκαν επίσης τα μεγέθη του πίνακα 4.1. Παρατηρούμε ότι η υδροθερμική ανθρακοποίηση του άχυρου στους 200°C δεν αυξάνει σημαντικά την θερμογόνο ικανότητα του (από 18.24 σε 19.5 [MJ/kg], πίνακας 3.2). Επίσης παρουσιάζει μικρό ποσοστό απόδοσης απώλειας μάζας (55% σε σύγκριση με τον μίσχανθο και το περίβλημα καρπού ελαιοφαινόδενδρου που δίνουν 59% και 65% αντίστοιχα). Όλα τα παραπάνω συντελούν στο αυξημένο κόστος παραγωγής σε σχέση με τα υπόλοιπα είδη βιομάζας.

Όσον αφορά το περίβλημα καρπού ελαιοφαινόδενδρου, σύμφωνα με την διδακτορική διατριβή[25] από την οποία αντλήθηκαν τα δεδομένα μας, το επεξεργασμένο προϊόν παρουσιάζει πολύ βελτιωμένη θερμογόνο ικανότητα αλλά και υψηλότερο κλάσμα απόδοσης απώλειας μάζας. Αυτό σε συνδυασμό με το αρχικά μειωμένο κόστος παραγωγής του λόγω παραγωγής του στην Μαλαισία μας δίνει πολύ μειωμένο κόστος παραγωγής.

Ο φλοιός ξύλου παρουσιάζει την υψηλότερη τελική θερμογόνο ικανότητα μετά την επεξεργασία του. Αυτό οφείλεται εν μέρει στο ότι τα δεδομένα αντλήθηκαν για επεξεργασία βιομάζας στους 240°C καθώς αυτή ήταν και η μόνη διαθέσιμη για το συγκεκριμένο είδος βιομάζας[39]. Ένα εύλογο εύρος τιμών κόστους αγοράς του θεωρείται τα 15 – 20 [€/MWh], οπότε οι τιμές που υπολογίστηκαν μπορούν να θεωρηθούν λογικές λαμβάνοντας υπόψη όσα προαναφέρθηκαν, για τις τιμές της θερμογόνου ικανότητας σύμφωνα με τις οποίες υπολογίστηκαν τα παραπάνω μεγέθη.





Εικόνας 4.10: Σύγκριση κόστους παραγωγής για διαφορετικές μεθόδους προεπεξεργασίας.

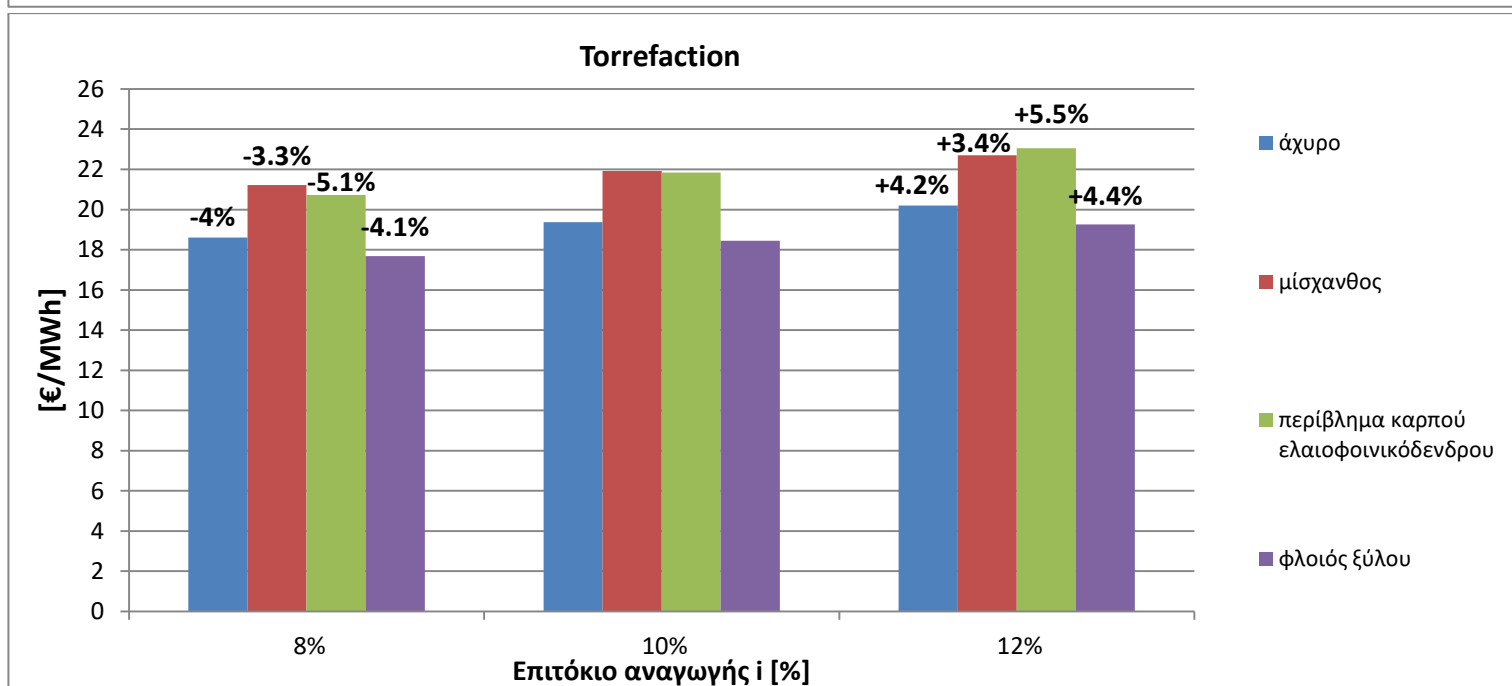
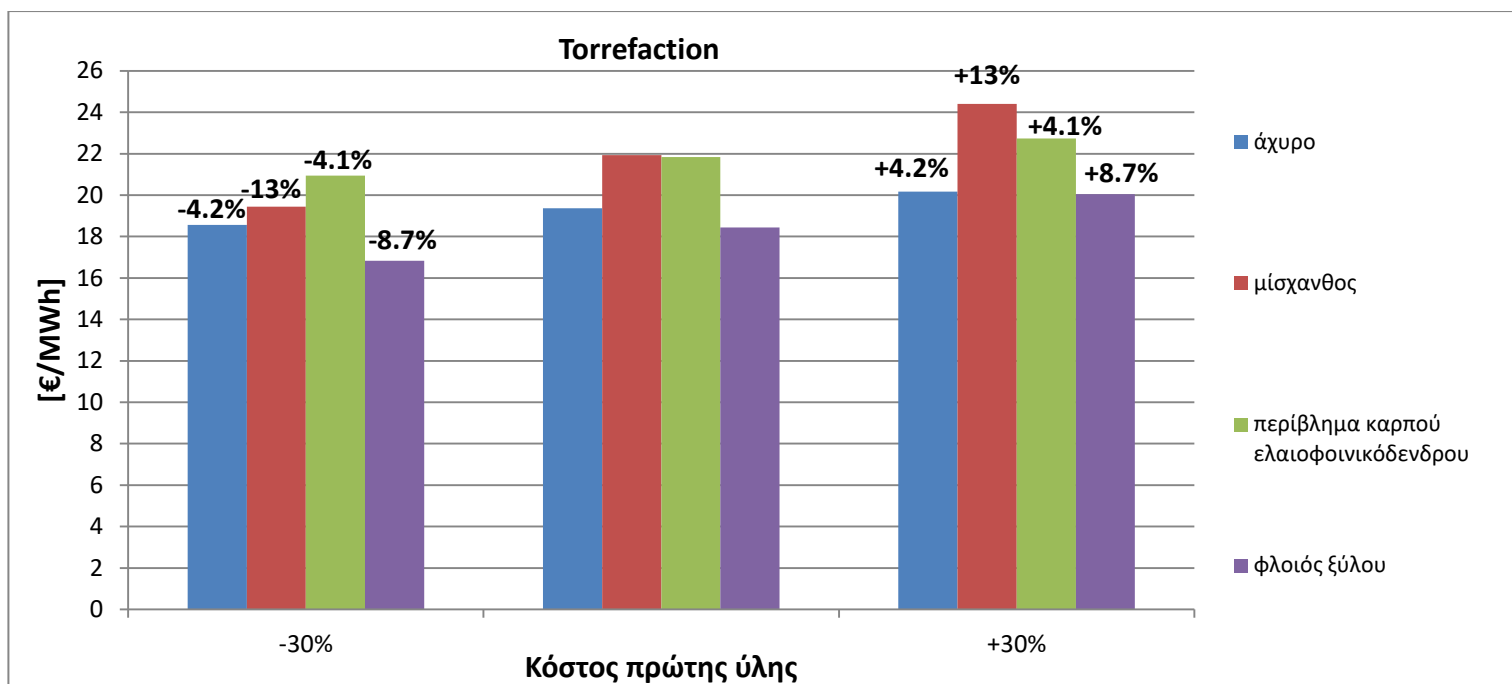
Στην εικόνα 4.10 γίνεται σύγκριση του κόστους παραγωγής για τις οικονομικά αποδοτικότερες περιπτώσεις κάθε μεθόδου προεπεξεργασίας.

Παρατηρούμε ότι το κόστος παραγωγής του φλοιού ξύλου μέσω έκρηξης ατμού παρουσιάζεται αυξημένο σε σύγκριση με τις άλλες μεθόδους επεξεργασίας. Αυτό οφείλεται στο μεγάλο κόστος συνολικής επένδυσης που ενδεχομένως παρουσιάζει ανακρίβεια λόγω παλαιότητας της πηγής από την οποία αντλήθηκαν τα δεδομένα[44].

Κόστος παραγωγής επεξεργασμένης βιομάζας για μεταβολές του κόστους παραγωγής – αγοράς βιομάζας και του επιτοκίου αναγωγής  $i$  :

Στου παρακάτω πίνακες παρουσιάζεται μια ανάλυση ευαισθησίας του κόστους παραγωγής επεξεργασμένης βιομάζας σχετικά με την μεταβολή του κόστους παραγωγής – αγοράς βιομάζας και του επιτοκίου αναγωγής ( $i$ ). Εξετάζονται δυο περιπτώσεις:

- Το κόστος παραγωγής επεξεργασμένης βιομάζας για -30% και +30% του κόστους παραγωγής – αγοράς της ακατέργαστης βιομάζας.
- Το κόστος παραγωγής επεξεργασμένης βιομάζας για επιτόκια 8% και 12%.



Εικόνα 4.11:Ανάλυση ευαισθησίας κόστους παραγωγής επεξεργασμένης βιομάζας μέσω φρύξης

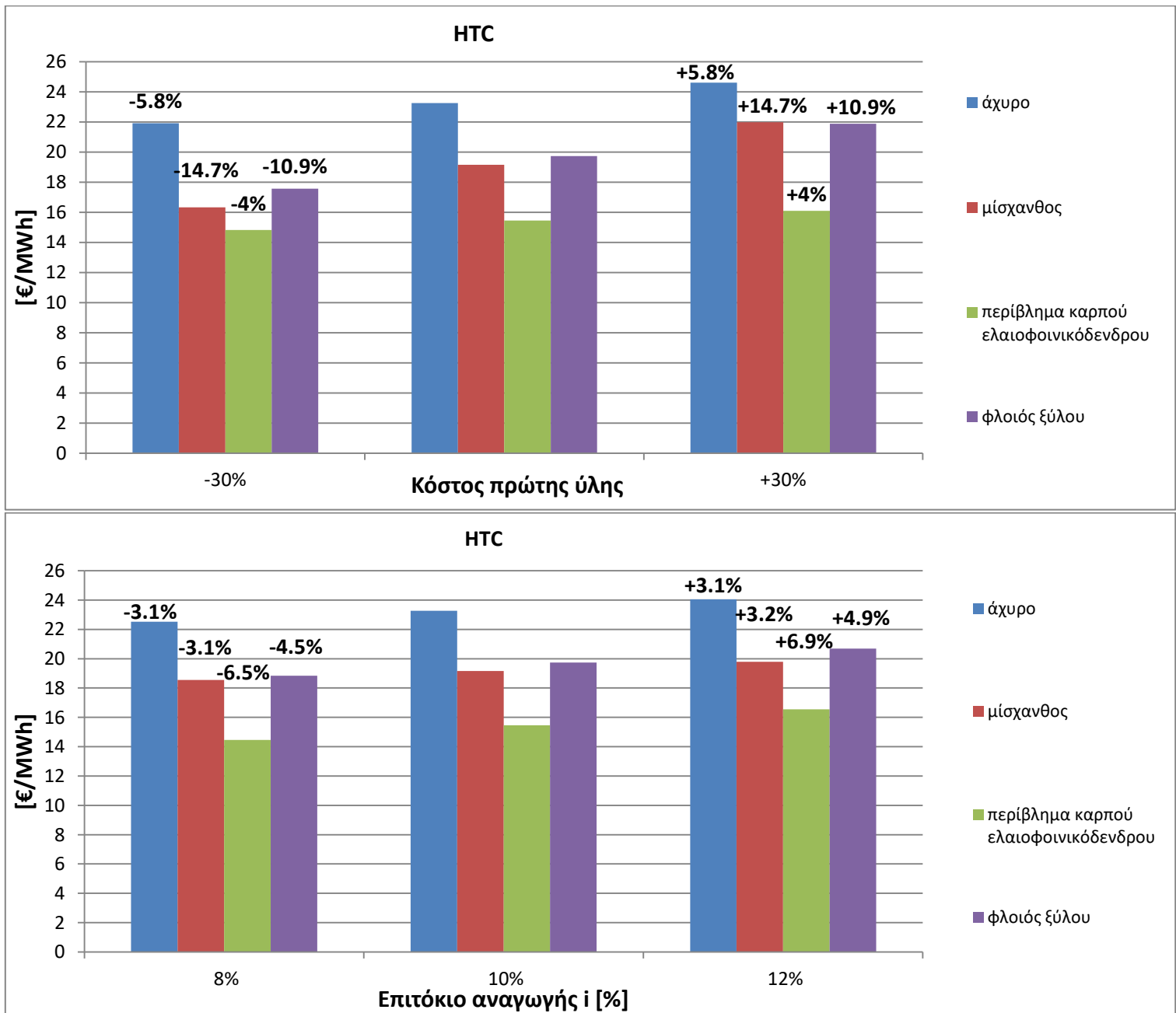
Στην 1<sup>η</sup> εικόνα παρουσιάζεται η μεταβολή του κόστους παραγωγής επεξεργασμένης βιομάζας όταν μεταβάλλεται το κόστος πρώτης ύλης κατά 30%.

Παρατηρούμε, όπως είναι λογικό, ότι η μεγαλύτερη μεταβολή σημειώνεται στην περίπτωση του μίσχανθου (13%) όπου το αρχικό κόστος παραγωγής του είναι πολύ μεγαλύτερο των υπολοίπων. Επομένως συμπεραίνουμε πως μια ενδεχόμενη μείωση του κόστους παραγωγής του θα επέφερε πολύ μικρότερο κόστος επεξεργασίας καθιστώντας το ακόμα πιο ανταγωνιστικό ως καύσιμο.

Στην περίπτωση του ξύλου το κόστος επεξεργασίας μεταβάλλεται κατά 8%. Αυτό οφείλεται στην υψηλή συνεισφορά του κόστους πρώτης ύλης σε ποσοστιαία βάση στο ετήσιο κόστος λειτουργίας της μονάδας καθώς σε αυτή την περίπτωση

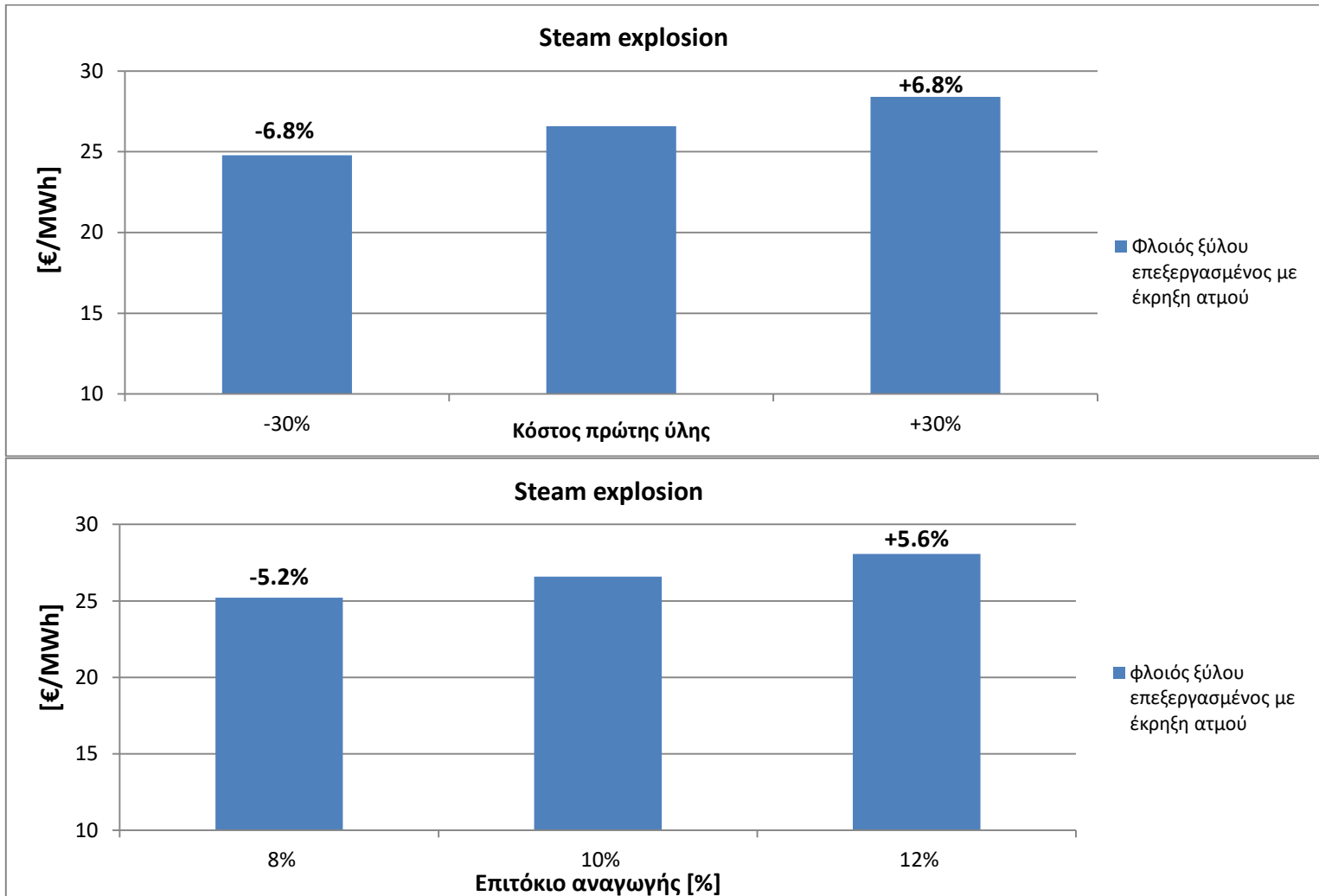
όπως σχολιάστηκε παραπάνω το κόστος συλλογής της βιομάζας είναι πολύ μικρότερο του κόστους αγοράς της καθώς το ξύλο παρουσιάζει αυξημένο δυναμικό παραγωγής (yield).

Όσον αφορά την μεταβολή του κόστους επεξεργασίας για διαφορετικά επιτόκια αναγωγής παρατηρούμε πως η ποσοστιαία μεταβολή του ακολουθεί την δυναμικότητα επεξεργασίας της κάθε μονάδος και επομένως παρουσιάζεται μεγαλύτερη στην περίπτωση που επεξεργαζόμαστε περίβλημα καρπού ελαιοφαινοκόδενδρου.



Εικόνα 4.12: Ανάλυση ευαισθησίας κόστους παραγωγής επεξεργασμένης βιομάζας μέσω υδροθερμικής ανθρακοποίησης

Όπως και στην περίπτωση της φρύξης έτσι και σε αυτή της επεξεργασίας μέσω υδροθερμικής ανθρακοποίησης η μεταβολή κόστους πρώτους ύλης επηρεάζει περισσότερο την περίπτωση του μίσχανθου και μετέπειτα του φλοιού ξύλου όπως είδαμε παραπάνω. Η μεταβολή στο επιτόκιο αναγωγής επηρεάζει περισσότερο την περίπτωση του επεξεργαζόμενου περιβλήματος καρπού ελαιοφαινοκώδεενδρου λόγω της μεγάλης δυναμικότητας επεξεργασίας της μονάδος.

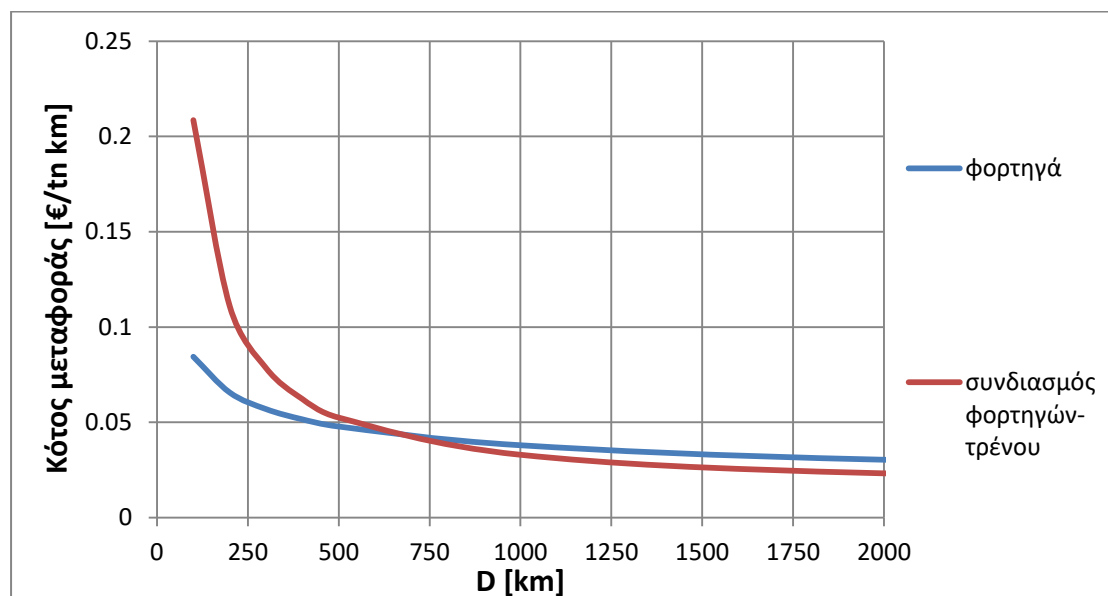


Εικόνα 4.13: Ανάλυση ευαισθησίας κόστους παραγωγής επεξεργασμένης βιομάζας μέσω έκρηξης ατμού.

Στην διεργασία έκρηξης ατμού η μεταβολή του επιτοκίου αναγωγής επιφέρει μεγαλύτερη ποσοστιαία μεταβολή του κόστους παραγωγής σε σχέση με τις άλλες μεθόδους προεπεξεργασίας. Αυτό οφείλεται στην μεγάλη δυναμικότητα επεξεργασίας της μονάδος που εξετάζουμε.

Τέλος η ποσοστιαία μεταβολή 6.8% στο κόστος παραγωγής σε συνάρτηση με το μεταβαλλόμενο κόστος της πρώτης ύλης οφείλεται στο μικρό κόστος μεταφοράς του υλικού του ξύλου λόγω μεγάλης απόδοσης παραγωγής και επομένως μικρής ακτίνας συλλογής του.

Σύγκριση κόστους διατροφικής – απλής μεταφοράς μέσω φορητών.



Εικόνα 4.14: Σύγκριση κόστους διατροφικής μεταφοράς με το κόστος μεταφοράς μέσω φορητών.

Όπως παρατηρούμε στην εικόνα 4.14 η μεταφορά με χρήση συνδυασμού τρένου και φορητών συμφέρει για συνολικές αποστάσεις μεταφοράς μεγαλύτερες των 600 km. Με γνώμονα αυτό το συμπέρασμα και τις παραδοχές που θεωρήθηκαν για τις αποστάσεις μεταφοράς παρατηρούμε πως η χρήση τρένου θα απέδιδε καλύτερα μόνο για την περίπτωση μεταφοράς του μίσχανθου όπου θεωρήθηκε πως μεταφέρεται σε απόσταση χιλίων χιλιομέτρων ( $D = 1000\text{km}$ ). Σε κάθε άλλη περίπτωση θεωρήθηκε μεταφορά μέσω φορητών είτε απευθείας στον σταθμό συμπαραγωγής για την περίπτωση του άχυρου είτε στο κοντινότερο λιμάνι για τα άλλα δυο είδη βιομάζας όπως προαναφέρθηκε στην ενότητα 3.5.

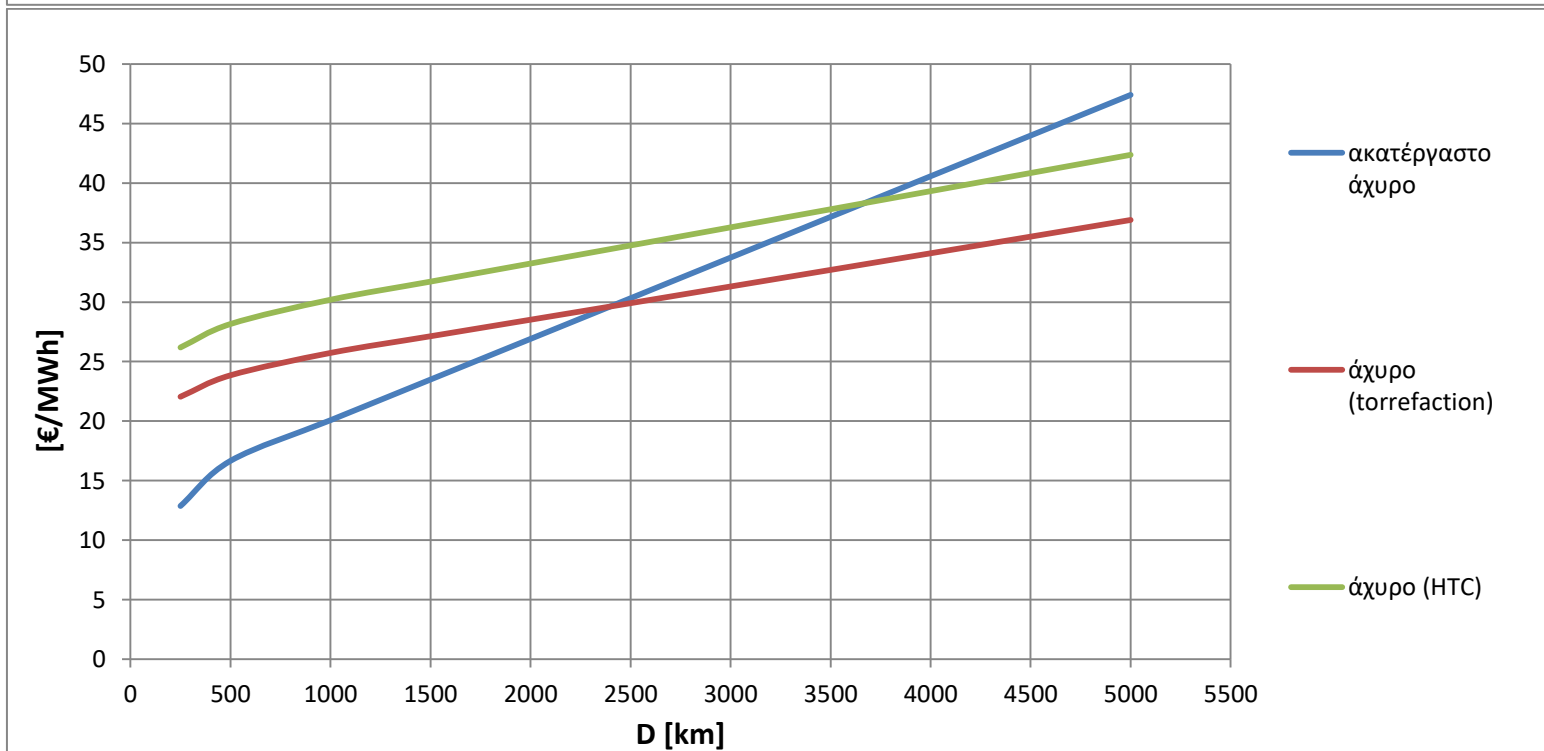
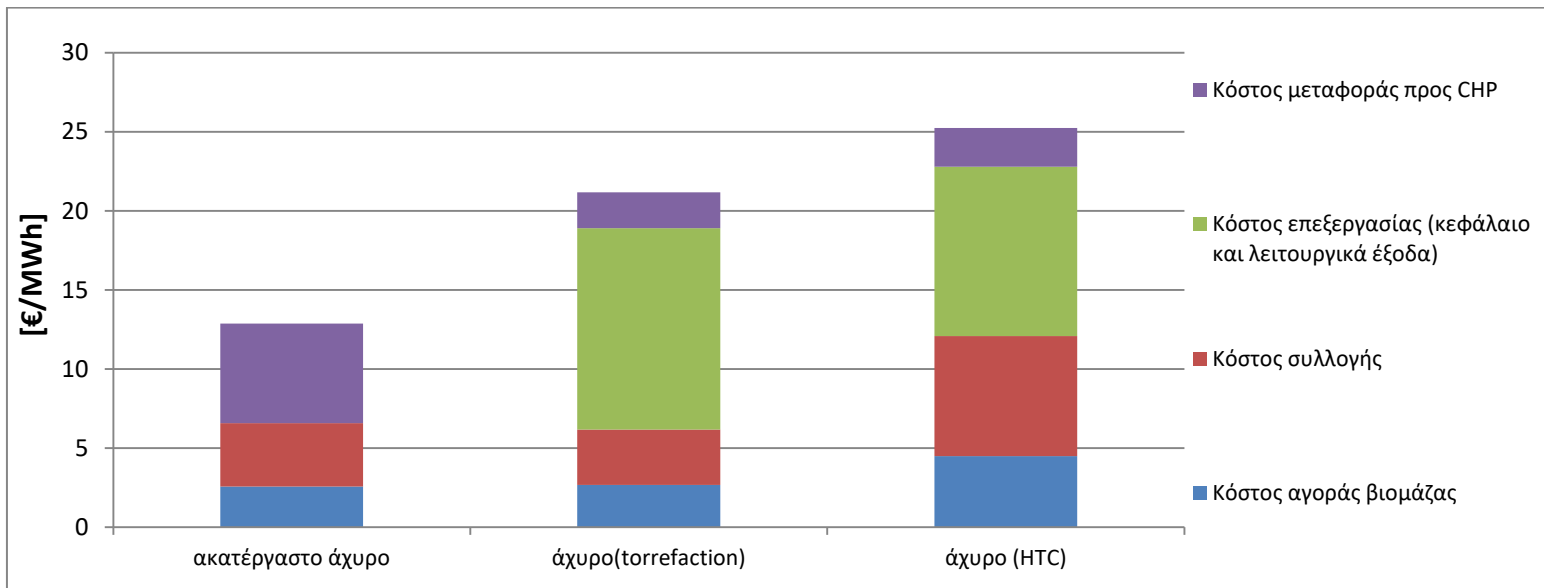
Κόστος παραδιδόμενου καυσίμου στον σταθμό συμπαραγωγής.

Στην συνέχεια θα παρουσιαστεί το κόστος παραδιδόμενου καυσίμου στην είσοδο του σταθμού συμπαραγωγής για κάθε είδος βιομάζας και θα συγκριθεί με το αντίστοιχο κόστος της ακατέργαστης μορφής.

Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι υπολογισμοί για τις περιπτώσεις ακατέργαστης βιομάζας έγιναν χρησιμοποιώντας ακριβώς την ίδια μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 3 για το κόστος παραγωγής – αγοράς, κόστος συλλογής κλπ.

Στο κόστος συλλογής βιομάζας σε ακατέργαστη μορφή προστίθεται κόστος αποθήκευσης της βιομάζας ίσο με 3 [€/tn][73].

- Άχυρο

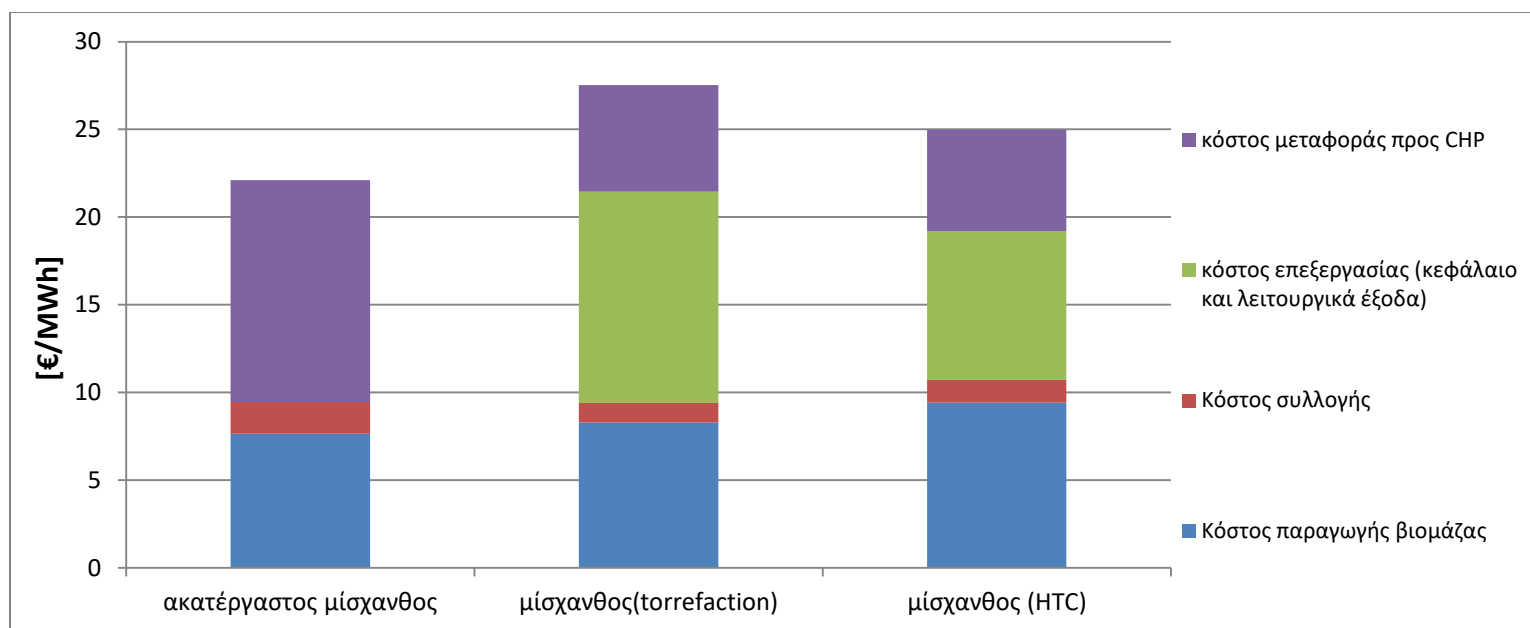


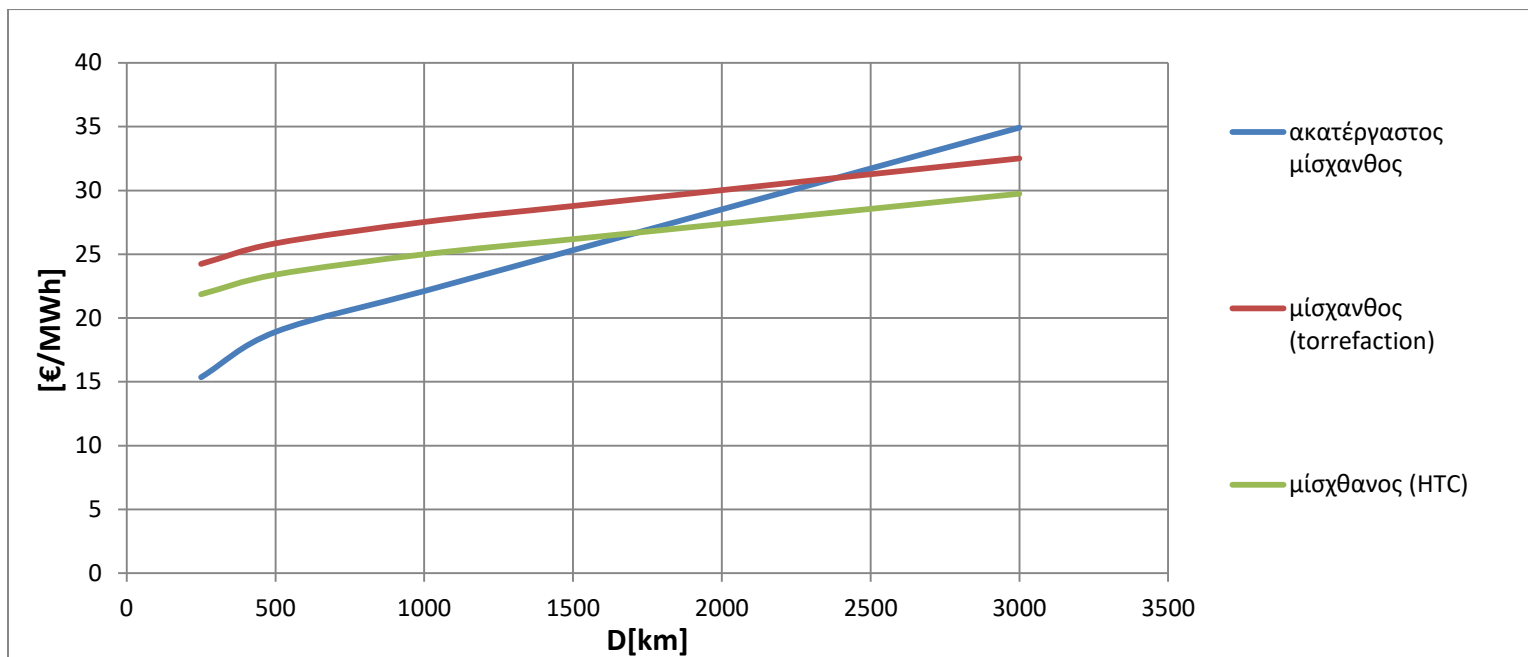
Εικόνα 4.15: Κόστος παραδιδόμενου καυσίμου (Άχυρο).

Στην εικόνα 4.15 παρατηρούμε ότι το επεξεργασμένο άχυρο παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερο κόστος παραδιδόμενου καυσίμου σε σχέση με το αντίστοιχο σε ακατέργαστη μορφή. Αυτό οφείλεται στην μικρή απόσταση μεταφοράς (100 km) που έχει οριστεί. Έτσι τα κέρδη από το κόστος μεταφοράς που στην περίπτωση της ακατέργαστης μορφής είναι μεγαλύτερο δεν φθάνουν για να εξισορροπήσουν το κόστος επεξεργασίας.

Στην 2<sup>η</sup> εικόνα φαίνεται πως η μεταφορά του επεξεργασμένου μέσω φρύξης άχυρου συμφέρει για αποστάσεις μεγαλύτερες των 2400 km ενώ για άχυρο επεξεργασμένο μέσω υδροθερμικής ανθρακοποίησης για αποστάσεις μεγαλύτερες των 3600 km. Η μεταφορά του άχυρου σε τέτοιες αποστάσεις θεωρείται λογική καθώς στην περίπτωση που εξετάσαμε θεωρήθηκε ιδανικά πως η προμήθεια της συνολικής απαιτούμενης ποσότητας βιομάζας μπορεί να γίνει από μια μόνο περιοχή και συγκεκριμένα πολύ κοντά στον σταθμό συμπαραγωγής. Σε μια πιο ρεαλιστική περίπτωση που θα έπρεπε να μεταφέρουμε τεράστιες ποσότητες άχυρου από διαφορετικές χώρες οι συνολικές αποστάσεις μεταφοράς θα ξεπερνούσαν τα 3000km και επομένως θα ήταν αναγκαία η επεξεργασία του πριν την μεταφορά του.

- Μίσχανθος



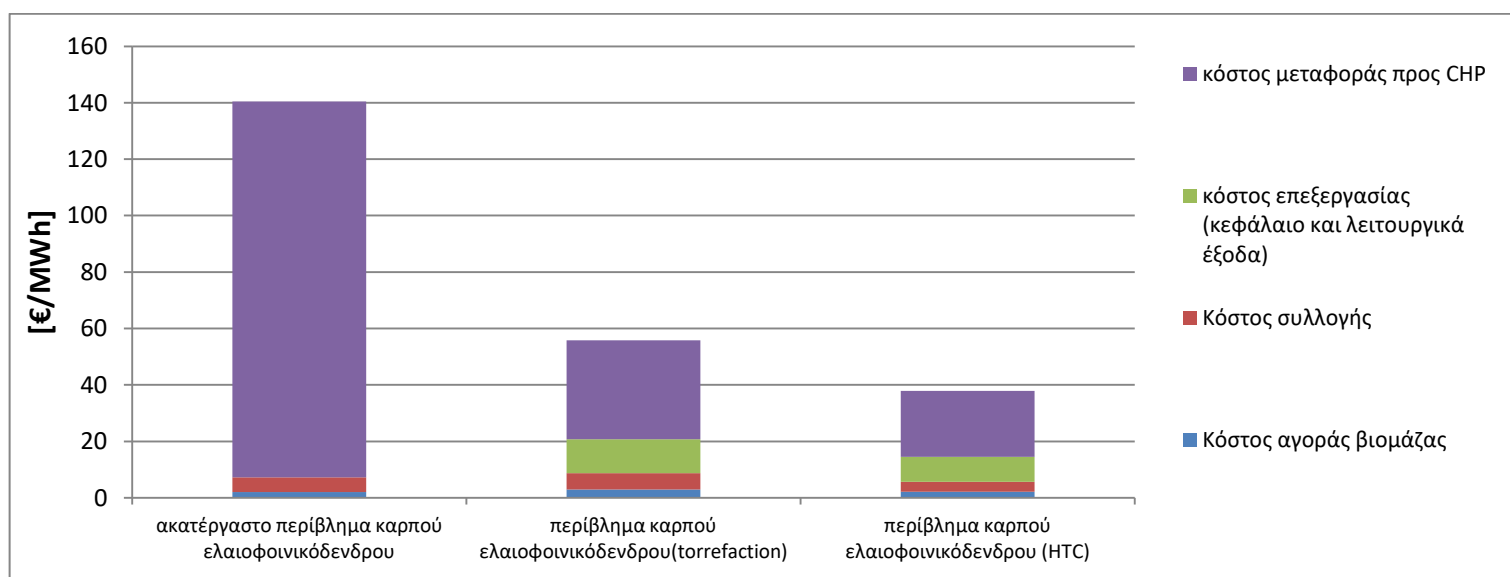


Εικόνα 4.16: Κόστος παραδιδόμενου καυσίμου (Μίσχανθος)

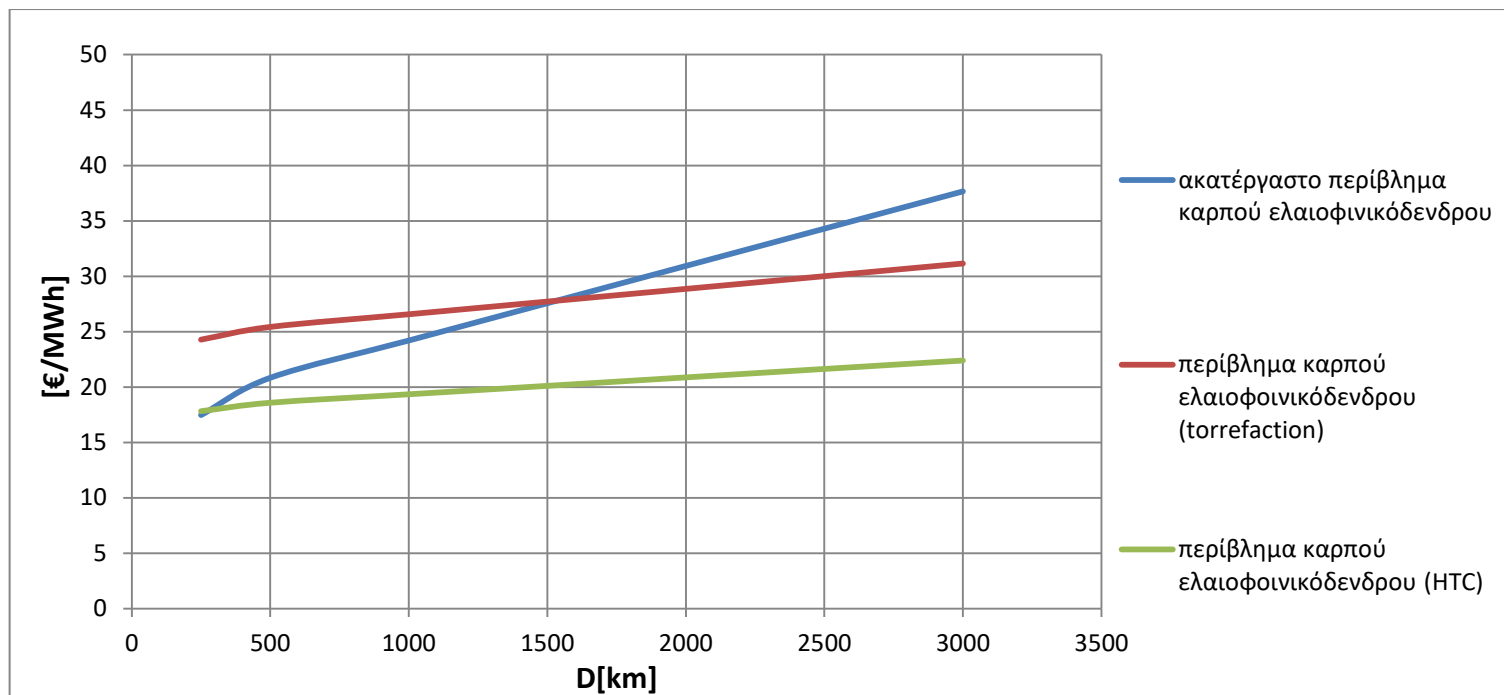
Σύμφωνα με την εικόνα 4.16 το κόστος παραδιδόμενου καυσίμου για την περίπτωση του μίσχανθου υπολογίζεται χαμηλότερο από αυτό της ακατέργαστης μορφής του σε απόσταση μεταφοράς  $D = 1000\text{km}$  όπως είχε οριστεί.

Στην 2<sup>η</sup> εικόνα παρατηρούμε πως η μεταφορά του επεξεργασμένου με υδροθερμική ανθρακοποίηση μίσχανθου συμφέρει μετά τα 1750 km ενώ για την επεξεργασία με φρύξη τα κόστη εξισορροπούνται στην απόσταση των 2400 km. Όπως αναφέραμε και παραπάνω τέτοιες αποστάσεις μεταφοράς είναι λογικές σε μια ρεαλιστική περίπτωση.

- Περίβλημα καρπού ελαιοφαινόδενδρου







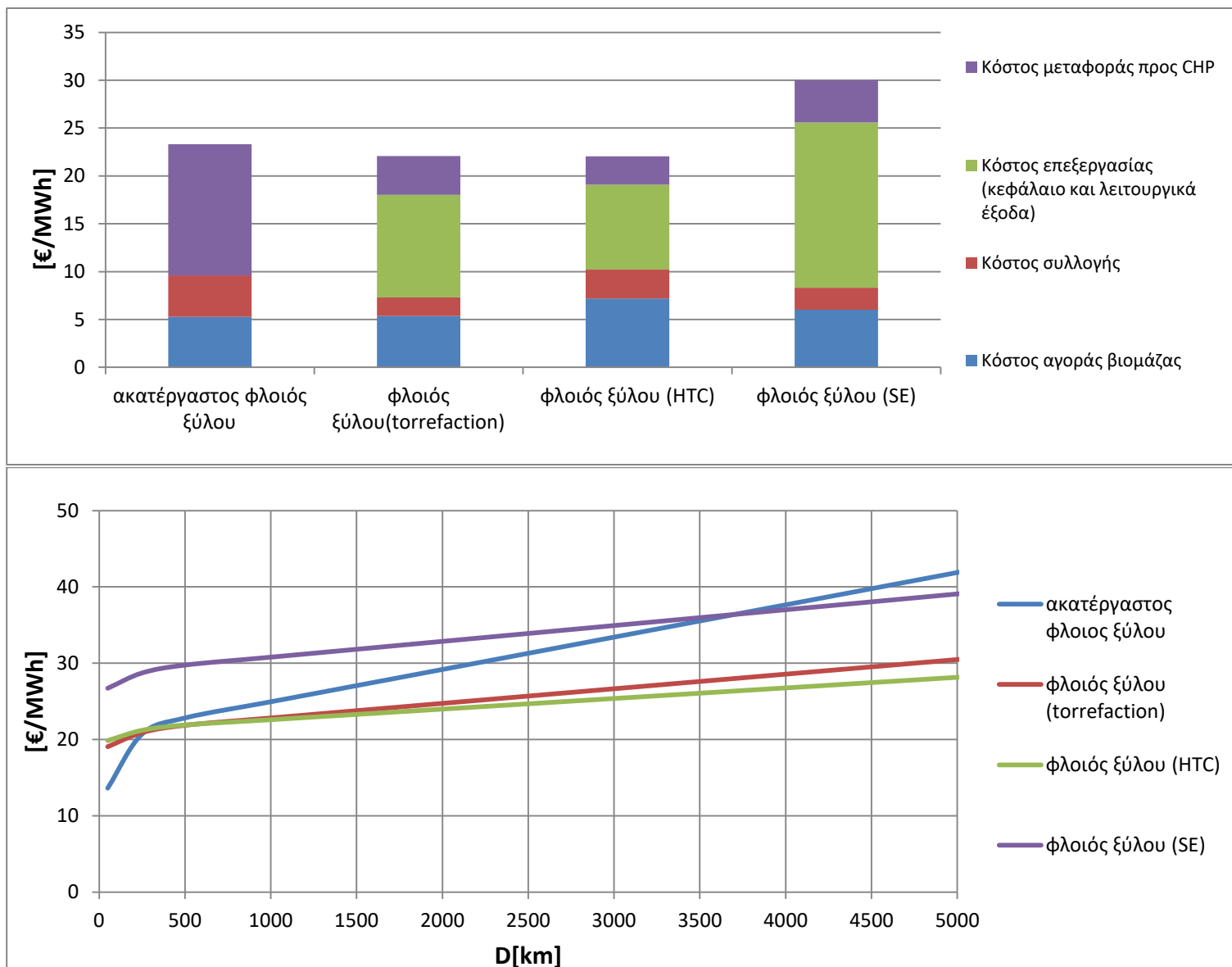
Εικόνα 4.17: Κόστος παραδιδόμενου καυσίμου (Περίβλημα καρπού ελαιοφινικόδενδρου)

Όπως ήταν λογικό για ένα είδος βιομάζα με τόσο υψηλό ποσοστό υγρασίας και μικρής χύδην πυκνότητας, το κόστος παραδιδόμενου καυσίμου σε ακατέργαστη μορφή ξεπερνάει κατά πολύ αυτό της επεξεργασμένης μορφής για απόσταση  $D = 150\text{km}$  έως το λιμάνι και  $D = 17100\text{ km}$  μεταφορά με πλοίο στο λιμάνι του Αμβούργου. Καύσιμα σαν αυτά θα πρέπει να επεξεργάζονται τουλάχιστον σε μορφή πέλλετ πριν μεταφερθούν σε τόσο μεγάλες αποστάσεις.

Το κόστος παραδιδόμενου καυσίμου στην περιοχή της Γερμανίας είναι πάρα πολύ υψηλό και επομένως δεν προτείνεται η μεταφορά του σε τόσο μεγάλες αποστάσεις, παρόλα αυτά θα μπορούσε να αποτελέσει μια πολύ ενδιαφέρουσα περίπτωση εναλλακτικού καυσίμου για αξιοποίηση την περιοχή της νοτιανατολικής Ασίας.

Από την 2<sup>η</sup> εικόνα βλέπουμε πως η επεξεργασία μέσω φρύξης είναι οικονομικά συμφέρουσα για αποστάσεις μεγαλύτερες των  $1500\text{ km}$ . Παρόλα αυτά θυμίζουμε πως η θερμογόνος ικανότητα της επεξεργασμένης μέσω φρύξης βιομάζας σε αυτή την περίπτωση ήταν ιδιαίτερα χαμηλή σε σχέση με την αντίστοιχη της υδροθερμικής ανθρακοποίησης. Για την τελευταία παρατηρούμε πως η επεξεργασία της συμφέρει για μεταφορά σε αποστάσεις μόλις  $250\text{km}$  κάτι πολύ λογικό με βάση τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν.

- Φλοιός ξύλου



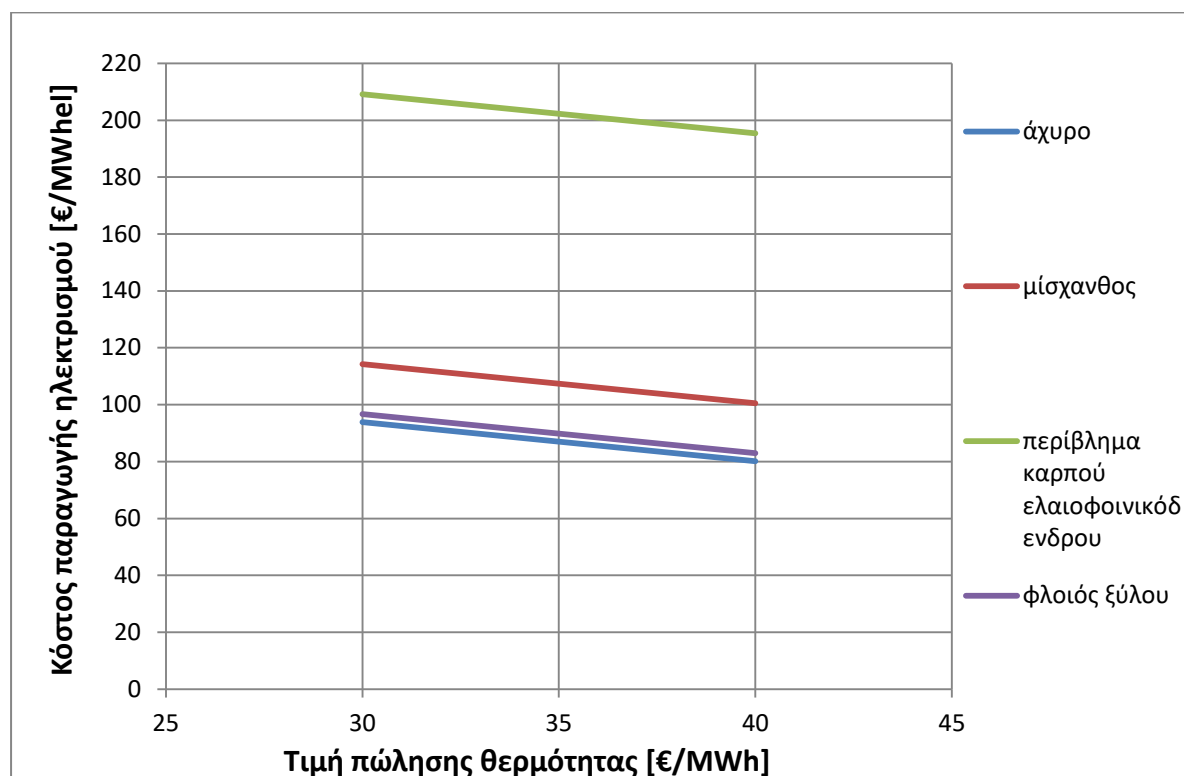
Εικόνα 4.18: Κόστος παραδιδόμενου καυσίμου (Φλοιός ξύλου)

Σύμφωνα με την εικόνα 4.18 το κόστος παραδιδόμενου καυσίμου είναι οριακά μικρότερο για τις περιπτώσεις επεξεργασμένης βιομάζας με φρύξη και υδροθερμική ανθρακοποίηση από αυτό της ακατέργαστης μορφής αλλά μεγαλύτερο για την περίπτωση της έκρηξης ατμού. Θυμίζουμε ότι η απόσταση μεταφοράς που είχαμε ορίσει ήταν ίση με 150 km για μεταφορά στο λιμάνι μέσω φορτηγών και 740 km για μετέπειτα μεταφορά στον σταθμό συμπαραγωγής μέσω πλοίου.

Από την 2<sup>η</sup> εικόνα συμπεραίνουμε πως η επεξεργασία του φλοιού ξύλου συμφέρει για αποστάσεις μεγαλύτερες των 400km, συμπέρασμα λογικό καθώς πρόκειται για ένα είδος βιομάζας με υψηλό ποσοστό υγρασίας και χύδη πυκνότητας μικρότερο αυτού της επεξεργασμένης μορφής. Για τον επεξεργασμένο φλοιό ξύλου μέσω έκρηξης ατμού το κόστος μεταφοράς εξισορροπείται για απόσταση  $D = 3750\text{km}$ , απόσταση πολύ μεγαλύτερη από τις άλλες δυο περιπτώσεις. Οι λόγοι που μπορεί να συμβαίνει κάτι τέτοιο έχουν αναλυθεί πολλές φορές στις προηγούμενες περιπτώσεις.

### Κόστος παραγωγής ηλεκτρισμού.

Τέλος θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα σχετικά με το κόστος παραγωγής ηλεκτρισμού σε μια μονάδα συμπαραγωγής σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 3.7.

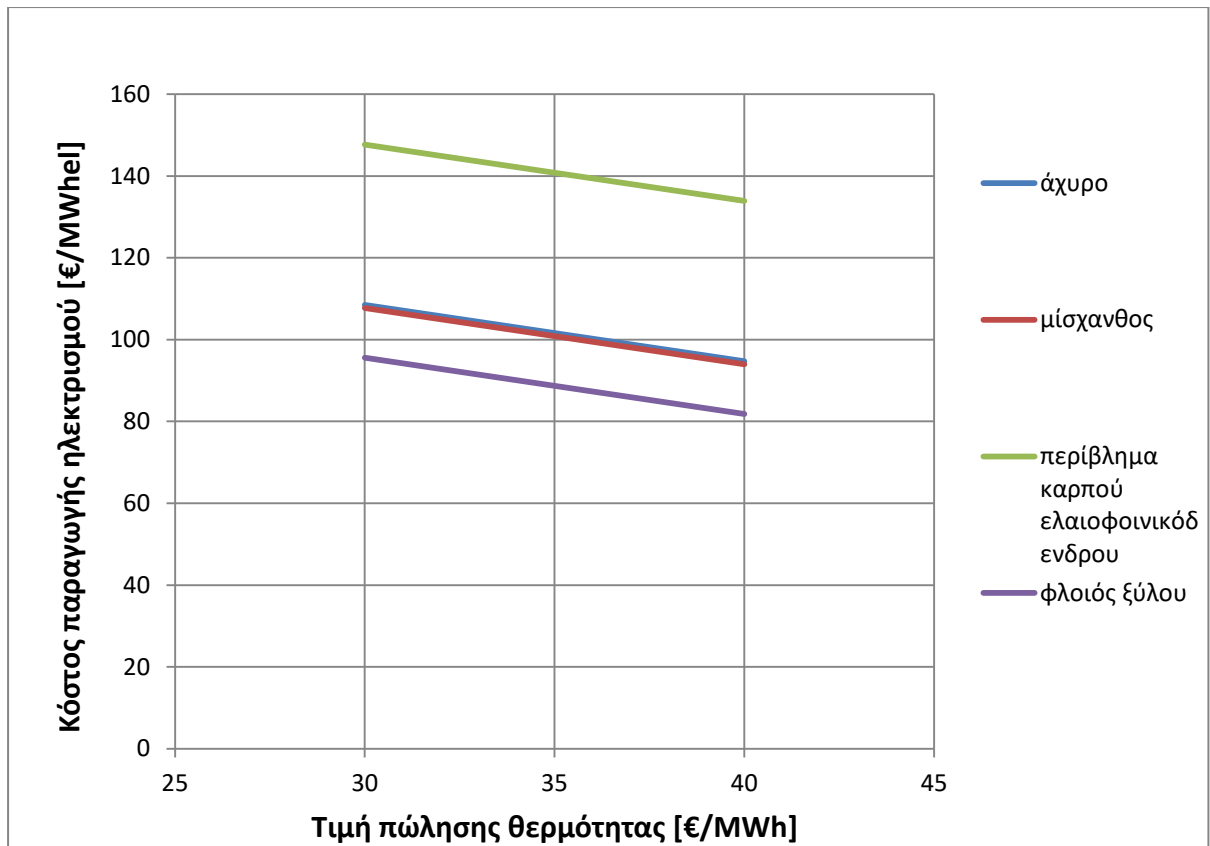


Εικόνα 4.19: Κόστος παραγωγής ηλεκτρισμού για επεξεργασμένη βιομάζα μέσω φρύξης

Στην εικόνα 4.19 παρατηρούμε πως το κόστος παραγωγής ηλεκτρισμού με επεξεργασμένο μέσω φρύξης περίβλημα καρπού ελαιοφαινόδενο, ανέρχεται σε πάρα πολύ υψηλά επίπεδα λόγω αυξημένου κόστους παραδιδόμενου καυσίμου και επομένως όπως προαναφέρθηκε δεν προτείνεται η χρήση του σε τόσο μεγάλες αποστάσεις μεταφοράς ούτε έπειτα από επεξεργασία.

Το επεξεργασμένο άχυρο και ο φλοιός ξύλου παρουσιάζουν περίπου το ίδιο κόστος παραγωγής ηλεκτρισμού λόγω σχεδόν ίδιας τιμής παραδιδόμενου καυσίμου.

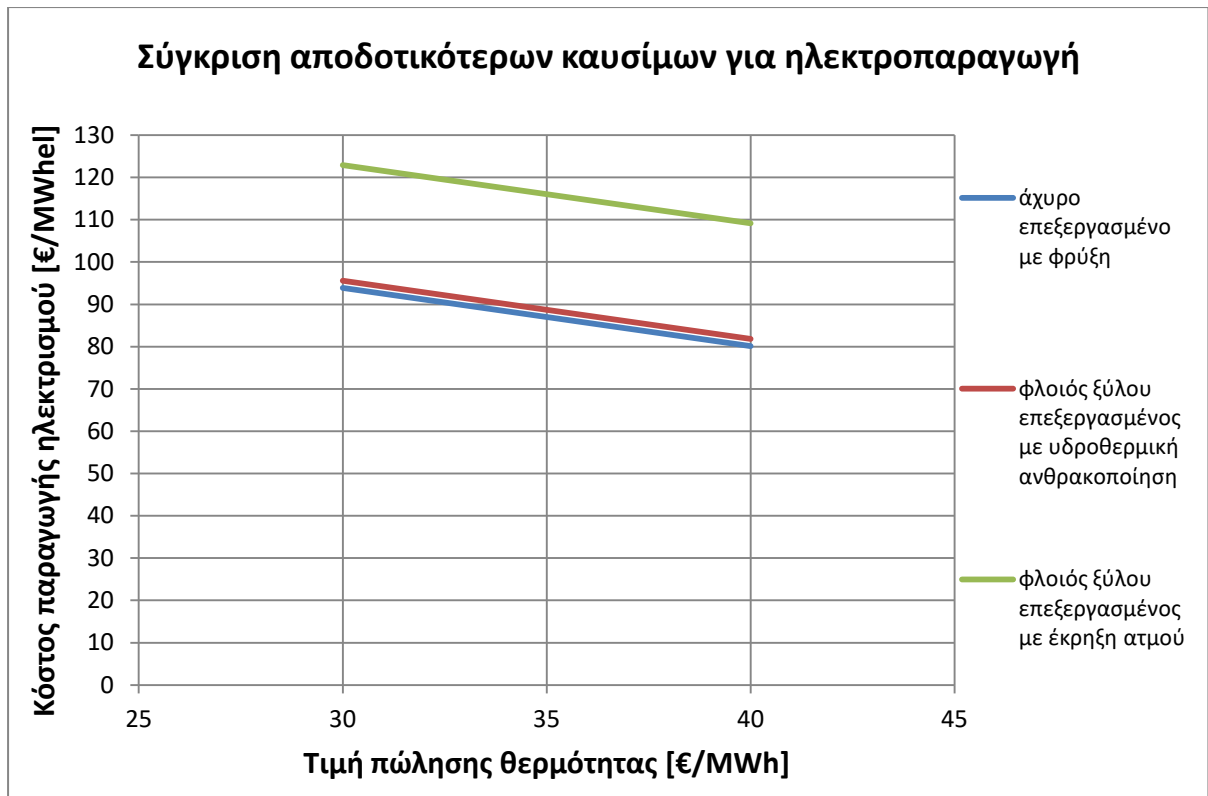
Για τιμή πώλησης θερμότητας γύρω στα 35 €/MWh σύμφωνα με το κόστος παραγωγής θερμότητας με χρήση φυσικού αερίου όπως αναλύθηκε στην ενότητα 3.6, παρατηρούμε πως το κόστος ηλεκτροπαραγωγής ανέρχεται στα 90 €/MWh<sub>el</sub> για τον φλοιό ξύλου και λίγο χαμηλότερα 87 €/MWh<sub>el</sub> για το άχυρο. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία το κόστος παραγωγής ηλεκτρισμού προκειμένου να θεωρείται οικονομικά βιώσιμη μια μονάδα συμπαραγωγής δεν πρέπει να ξεπερνά τα 100 €/MWh<sub>el</sub>[74]. Επομένως για την περίπτωση του φλοιού ξύλου και του άχυρου η ηλεκτροπαραγωγή θεωρείται συμφέρουσα ενώ οριακά μη συμφέρουσα αποτελεί η χρήση μίσχανθου επεξεργασμένο με φρύξη ως καύσιμο, καθώς το κόστος παραγωγής ηλεκτρισμού ανέρχεται στα 110 €/MWh.



Εικόνα 4.20: Κόστος παραγωγής ηλεκτρισμού για επεξεργασμένη βιομάζα μέσω υδροθερμικής ανθρακοποίησης.

Στην εικόνα 4.20 παρατηρούμε πολύ υψηλό κόστος παραγωγής ηλεκτρισμού στην περίπτωση που ως καύσιμο χρησιμοποιείται το επεξεργασμένο περίβλημα από καρπό ελαιοφαινικόδενδρου. Για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω η χρησιμοποίηση για τόσο μεγάλη απόσταση μεταφοράς κρίνεται ασύμφορη.

Παρατηρούμε πως το κόστος παραγωγής ηλεκτρισμού υπολογίζεται στα 101 [€/MWh<sub>e</sub>] για την περίπτωση χρήσης καυσίμου από επεξεργασμένο άχυρο και μίσχανθο. Μια τέτοια περίπτωση κρίνεται οριακά μη συμφέρουσα σύμφωνα με το όριο των 100 [€/MWh<sub>e</sub>] που πρέπει να παράγουμε έτσι ώστε η επένδυση να είναι οικονομικά βιώσιμη. Καλύτερη περίπτωση καυσίμου για παραγωγή ενέργειας αποτελεί ο επεξεργασμένος φλοιός ξύλου καθώς το κόστος παραγωγής ηλεκτρισμού υπολογίζεται 11.3% (88.7 [€/MWh<sub>e</sub>]) χαμηλότερο από το όριο των 100 [€/MWh<sub>e</sub>]. Αυτό οφείλεται στο χαμηλό κόστος παραδιδόμενου καυσίμου που παρουσιάζει, λόγω της υψηλής θερμογόνου ικανότητας της επεξεργασμένης μορφής του ( $LHV_{wet}$  25.92 [MJ/kg]) όπως βρέθηκε στην βιβλιογραφία, αλλά και της μικρής σχετικά απόστασης μεταφοράς του σε σχέση με τις υπόλοιπες περιπτώσεις.



Εικόνα 4.21: Σύγκριση αποδοτικότερων καυσίμων για ηλεκτροπαραγωγή

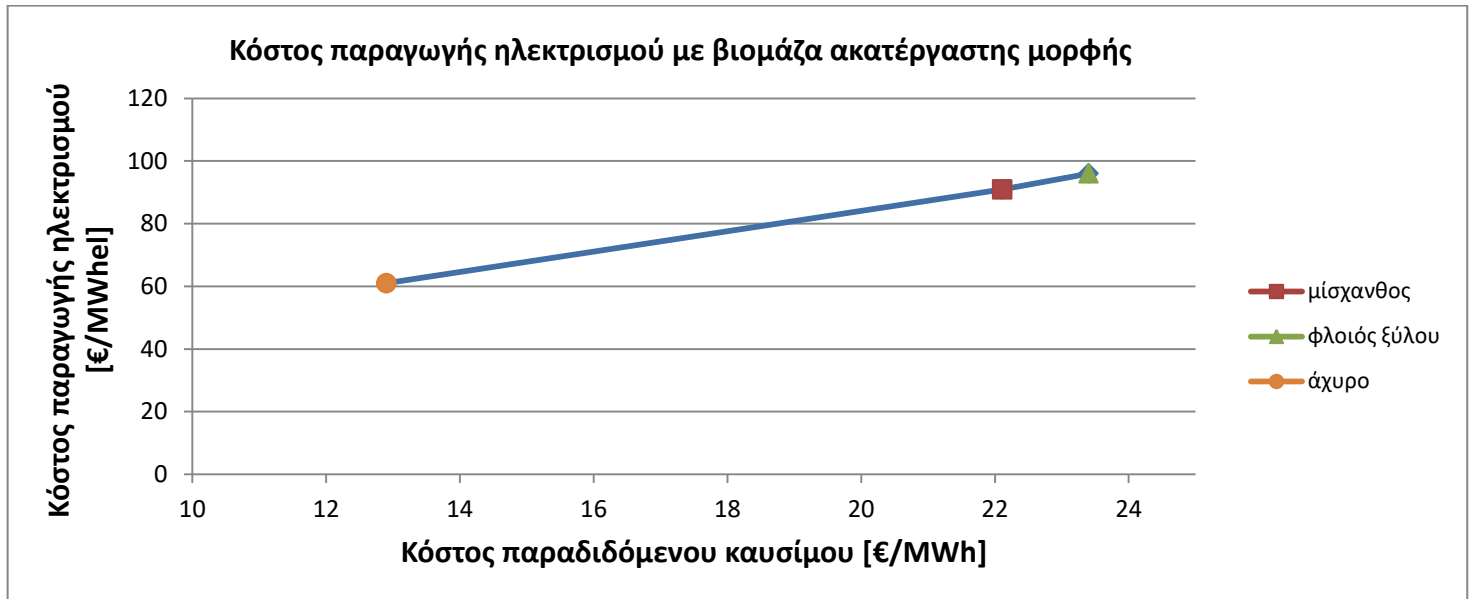
Αρχικά από την εικόνα 4.21 συμπεραίνουμε πως η παραγωγή ηλεκτρισμού με καύσιμο φλοιού ξύλου επεξεργασμένο με έκρηξη ατμού δεν είναι οικονομικά συμφέρουσα.

Τα οικονομικά αποδοτικότερα καύσιμα με βάση τις παραδοχές που έγιναν είναι ο φλοιός ξύλου επεξεργασμένος με υδροθερμική ανθρακοποίηση και το άχυρο επεξεργασμένο μέσω φρύξης.

Όσον αφορά το φλοιό ξύλου επεξεργασμένου με υδροθερμική ανθρακοποίηση όπως εξηγήσαμε και παραπάνω το μειωμένο κόστος παραγωγής ηλεκτρισμού οφείλεται στην υψηλή θερμογόνο ικανότητα που παρουσιάζει στην επεξεργασμένη μορφή του ( $LHV_{wet} 25.92 [MJ/kg]$ ).

Το χαμηλότερο κόστος παραγωγής ηλεκτρισμού δίνεται για την περίπτωση που χρησιμοποιούμε ως καύσιμο άχυρο επεξεργασμένο μέσω φρύξης και οφείλεται κυρίως στην μικρή απόσταση μεταφοράς που ορίσαμε.

Κόστος ηλεκτροπαραγωγής με καύσιμο βιομάζα σε ακατέργαστη μορφή:



Εικόνα 4.22: Κόστος παραγωγής ηλεκτρισμού με χρήση ακατέργαστης βιομάζας.

Στην εικόνα 4.22 παρουσιάζεται το κόστος παραγωγής ηλεκτρισμού με καύσιμο την ακατέργαστη βιομάζα για τις αποστάσεις που θεωρήθηκαν. Σημειώνεται ότι η παραπάνω καμπύλη υπολογίσθηκε χρησιμοποιώντας την κοστολόγηση της μονάδας συμπαραγωγής για χρήση επεξεργασμένων καυσίμων σε μορφή πέλλετ για απλοποίηση υπολογισμών. Στην πραγματικότητα προκειμένου να γίνει η καύση της βιομάζας σε ακατέργαστη μορφή, θα έπρεπε να εγκατασταθεί επιπλέον εξοπλισμός κονιοποίησης του καυσίμου αλλά και άλλες τροποποιήσεις. Κάτι τέτοιο θα είχε ως συνέπεια την αύξηση του συνολικού κεφαλαίου επένδυσης και του μεταβλητού κόστους λειτουργίας, επομένως και του συνολικού κόστους παραγωγής ηλεκτρισμού. Η παραπάνω καμπύλη δηλαδή θα ήταν αυξημένη περίπου κατά 8% - 10% και επομένως τα κόστη ηλεκτρισμού που θα εξετάσουμε.

Όπως παρατηρούμε το κόστος παραγωγής ηλεκτρισμού χρησιμοποιώντας ακατέργαστο άχυρο είναι πολύ μικρό κάτι που οφείλεται στην πολύ μικρή απόσταση μεταφοράς που θεωρήθηκε. Παρόλα αυτά το κόστος παραγωγής ηλεκτρισμού στις περιπτώσεις χρήσης μίσχανθου και φλοιού ξύλου είναι μεγαλύτερο από τις αντίστοιχες τιμές των επεξεργασμένων καυσίμων.

Το κόστος παραγωγής ηλεκτρισμού με ακατέργαστο περίβλημα καρπού ελαιοφαινοκόδενδρου δεν εξετάζεται καθώς παρουσιάζει ακραία τιμή λόγω των τεράστιων μεταφορικών εξόδων σε τόσο μεγάλες αποστάσεις.

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ –ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

### 5.1. Συμπεράσματα

Ο στόχος της παρούσα διπλωματικής εργασίας ήταν η μελέτη των αλυσίδων παραγωγής, μεταφοράς, επεξεργασίας και οικονομικής αξιολόγησης της βιομάζας με σκοπό την ενεργειακή αξιοποίηση της σε σταθμό συμπαραγωγής θερμικής ισχύς εισόδου 200MW στην περιοχή της Γερμανίας. Αρχικά βρέθηκαν τα ισοζύγια μάζας της κάθε διεργασίας, δηλαδή πόσα κιλά ακατέργαστης βιομάζας χρειαζόμαστε για την παραγωγή ενός κιλού επεξεργασμένου προϊόντος για τα τέσσερα διαφορετικά είδη βιομάζας.

Οι υπολογισμοί αυτοί έδειξαν πως για είδη βιομάζας με υψηλά ποσοστά υγρασίας όπως το περίβλημα καρπού ελαιοφαινοκόδενδρου και ο φλοιός ξύλου απαιτεί μονάδα προεπεξεργασίας με πολύ μεγαλύτερο δυναμικό επεξεργασίας έτσι ώστε να καλυφθούν οι ανάγκες του σταθμού συμπαραγωγής. Το δυναμικό επεξεργασίας των μονάδων που επεξεργάζονταν τα δυο προαναφερθέντα είδη θα πρέπει να είναι τρεις (1200 [ktn/yr] για επεξεργασία του περιβλήματος καρπού ελαιοφαινοκόδενδρου μέσω υδροθερμικής ανθρακοποίησης) έως και τέσσερις (1600 [ktn/yr] για επεξεργασία του περιβλήματος καρπού ελαιοφαινοκόδενδρου μέσω φρύξης) φορές μεγαλύτερο σε σχέση με μονάδες που επεξεργάζονται άλλα είδη βιομάζας προκειμένου να παράγουν την ίδια ποσότητα καυσίμου. Αυτό επηρεάζει με την σειρά του όλα τα κόστη που σχετίζονται με την επεξεργασία της βιομάζας.

Αρχικά τα κόστη συλλογής της βιομάζας παρουσιάζονται μειωμένα για τις περιπτώσεις συλλογής του μίσχανθου και του φλοιού ξύλου λόγω της αυξημένης απόδοσης παραγωγής τους. Επίσης λόγω του περιορισμού που τέθηκε για το μέγιστο δυναμικό λειτουργίας του αντιδραστήρα στην μονάδα φρύξης τα κόστη εξοπλισμού και επομένως το κόστος της συνολικής επένδυσης παρουσιάζονται αυξημένα σε σύγκριση με τις άλλες δυο μονάδες. Όσον αφορά την μονάδα προεπεξεργασίας μέσω έκρηξης ατμού λόγω παλαιότητας της πηγής από την οποία αντλήθηκαν τα δεδομένα δεν μπορούν να θεωρηθούν πολύ αξιόπιστα και επιφέρουν περεταίρω μελέτη καθώς η βιβλιογραφία είναι πολύ περιορισμένη για μονάδες με μεγάλες δυναμικότητες επεξεργασίας.

Η μονάδα προεπεξεργασίας άχυρου θεωρήθηκε εγκατεστημένη στην Γερμανία επομένως τα λειτουργικά κόστη παρουσιάζονται αυξημένα (υψηλότεροι μίσθοι, υψηλότερο κόστος ηλεκτρισμού, υψηλότερο κόστος νερού κλπ) σε σχέση με αυτή που θεωρείται εγκατεστημένη στην περιοχή της Μαλαισίας και επεξεργάζεται περίβλημα καρπού ελαιοφαινοκόδενδρου.

Το κόστος παραγωγής επεξεργασμένης βιομάζας σε [€/tn] υπολογίστηκε στο εύρος 90 – 120 [€/tn] συμφωνώντας στις περισσότερες περιπτώσεις με το εύρος τιμών που δίνεται στην βιβλιογραφία. Επειδή οι υπολογισμοί έγιναν χρησιμοποιώντας τιμές θερμογόνου ικανότητας αντλούμενες από την βιβλιογραφία σύμφωνα με πραγματικές μετρήσεις επεξεργασίας των συγκεκριμένων ειδών βιομάζας, δεν μπορεί να γίνει άμεση σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών ειδών βιομάζας που επεξεργαζόμαστε. Ειδικότερα χαμηλότερο κόστος παραγωγής επεξεργασμένης βιομάζας παρατηρήθηκε για την επεξεργασία περιβλήματος καρπού ελαιοφαινοκόδενδρου μέσω υδροθερμικής ανθρακοποίησης (14.5 [€/MWh]), παρόλο την υψηλή δυναμικότητα επεξεργασίας της μονάδος. Αυτό οφείλεται στην υψηλή θερμογόνο ικανότητα του παραγόμενου

προϊόντος όπως βρέθηκε στην βιβλιογραφία ( $HHV_{dry} = 28.017$  [MJ/kg]), στην χαμηλή τιμή αγοράς του (3 [€/tn]) και στα χαμηλά κόστη λειτουργίας της μονάδας καθώς είναι εγκατεστημένη στην Μαλαισία. Όλα τα παραπάνω το καθιστούν μια ιδιαίτερα καλή περίπτωση πρώτης ύλης για επεξεργασία με σκοπό την μετέπειτα χρησιμοποίηση του ως καύσιμο.

Το κόστος παραγωγής επεξεργασμένης βιομάζας στις υπόλοιπες περιπτώσεις υπολογίζεται στα ίδια περίπου επίπεδα, ίσο με 19 [€/MWh]. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι λόγω του αυξημένου κόστους αγοράς εξοπλισμού στην μονάδα προεπεξεργασίας μέσω φρύξης τα μεγέθη αυτά παρουσιάζονται ελαφρώς αυξημένα. Σε αντίθετη περίπτωση όπου δεν είχε θεωρηθεί περιορισμός στην δυναμικότητα λειτουργίας του αντιδραστήρα φρύξης το κόστος παραγωγής μέσω της μονάδας φρύξης θα ήταν σε πολλές περιπτώσεις μικρότερο από το αντίστοιχο της υδροθερμικής ανθρακοποίησης.

Σύμφωνα με τις υποθέσεις που έγιναν για τις αποστάσεις μεταφοράς βρέθηκε πως στην περίπτωση μας όπου η μονάδα συμπαραγωγής βρίσκεται στην Γερμανία η χρήση του περιβλήματος καρπού ελαιοφεινικόδενδρου ως καύσιμο δεν συμφέρει καθώς πρέπει να μεταφερθεί σε απόσταση 17100 km. Παρουσιάζει λοιπόν ένα πολύ μεγάλο κόστος παραδιδόμενου καυσίμου και σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν σχετικά με το χαμηλό κόστος παραγωγής του η χρησιμοποίηση του ως καύσιμο θα συνέφερε σε μικρότερες αποστάσεις κυρίως στις χώρες της νοτιοανατολικής Ασίας.

Εξετάζοντας το κομμάτι του κόστους παραγωγής ηλεκτρισμού στην μονάδα συμπαραγωγής παρατηρήσαμε πως για τις αποστάσεις μεταφοράς που θεωρήθηκαν και τις αντίστοιχες ιδιότητες των επεξεργασμένων ειδών βιομάζας όπως βρέθηκαν στην βιβλιογραφία για τιμή πώλησης θερμότητας ίση με 35 [€/MWh] οι οικονομικά συμφέρουσες περιπτώσεις καυσίμου ήταν:

- Επεξεργασμένο μέσω φρύξης άχυρο (87 €/MWh<sub>el</sub>)
- Επεξεργασμένος μέσω φρύξης φλοιός ξύλου (90 €/MWh<sub>el</sub>)
- Επεξεργασμένος μέσω υδροθερμικής ανθρακοποίησης φλοιός ξύλου (88.7 €/MWh<sub>el</sub>)

Οριακά οικονομικά συμφέρουσα περίπτωση αποτελεί το επεξεργασμένο άχυρο μέσω υδροθερμικής ανθρακοποίησης και ο επεξεργασμένος με την ίδια μέθοδο μίσχανθος.



## 5.2. Προτάσεις για μελλοντική εργασία

Στην διπλωματική αυτή εργασία δόθηκε ιδιαίτερη βαρύτητα στις τρεις διαφορετικές τεχνολογίες προεπεξεργασίας που αναλύθηκαν. Μελετήθηκαν τέσσερα διαφορετικά είδη βιομάζας προκειμένου να συγκριθούν μεταξύ τους στο πως αποδίδει καλύτερα το καθένα με διαφορετικές τεχνολογίες προεπεξεργασίας. Παρόλα αυτά για τις αποστάσεις μεταφοράς που τέθηκαν ως μια ρεαλιστική περίπτωση λίγα είδη βιομάζας αποτελούσαν οικονομικά συμφέρουσες περιπτώσεις επεξεργασμένου καυσίμου. Συγκρίνοντας τα κόστη παραδιδόμενου καυσίμου της επεξεργασμένης βιομάζας με αυτά στην ακατέργαστη μορφή της παρατηρήσαμε πως η επεξεργασία τους πριν την μεταφορά τους συνέφερε μόνο για τα δυο καύσιμα υψηλής υγρασίας (φλοιός ξύλου, περίβλημα καρπού ελαιοφαινόδενδρου). Τέτοιου είδους καύσιμα πρέπει να επεξεργάζονται τουλάχιστον με την μορφή της πελλετοποίησης πρώτου μεταφερθούν. Έτσι μια καλή πρόταση για μελλοντική εργασία θα ήταν η σύγκριση του κόστους παραδιδόμενου καυσίμου για βιομάζα που έχει υποστεί μόνο πελλετοποίηση. Μια τέτοια μελέτη θα είχε νόημα έτσι ώστε να εξεταστεί σε τι αποστάσεις μεταφοράς η προεπεξεργασία μέσω πελλετοποίησης δίνει καλύτερα αποτελέσματα σε σύγκριση με τις τεχνολογίες προεπεξεργασίας που εξετάστηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Θα μπορούσε επίσης να εξεταστεί το κόστος που απαιτείται για την μετατροπή του εξοπλισμού των λιγνιτικών σταθμών συμπαραγωγής έτσι ώστε να μπορούν να χρησιμοποιούν βιομάζα ως καύσιμο (retrofitting).

Τέλος ενδιαφέρον παρουσιάζει η κοστολόγηση των ρύπων που παράγονται στα στάδια παραγωγής, συλλογής, επεξεργασίας, μεταφοράς και ενεργειακής αξιοποίησης της βιομάζας όπως αυτά που αναλύθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία.

## 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. *Commision, EU Energy in figures 2016.*
2. *International Energy Agency, IEA, August 2016.*
3. *Κέντρο περιβαλλοντικής εκπαίδευσης Καστοριάς, ΚΠΕ Καστοριάς.*
4. Γούλας, Σ.Γ. and S.G. Goulas, *Αξιολόγηση συμπαραγωγικής μονάδας με χρήση βιομάζας και τεχνολογίας stirling.* 2010.
5. Zhang, L., C.C. Xu, and P. Champagne, *Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass.* Energy Conversion and Management, 2010. **51**(5): p. 969-982.
6. Κουφοδήμος, Γ., *Καθαρισμός αερίου αεριοποίησης για χρήση σε μηχανές εσωτερικής καύσης ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους.* 2009, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ). Σχολή Πολυτεχνική. Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών. Τομέας Ενεργειακός. Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Θερμοδυναμικής.
7. Τζαγκαράκης, Δ., *Ενεργειακή αξιοποίηση αγροτικών υπολειμμάτων σε μορφή βιοζυλάνθρακα σε υβριδικές κυψέλες καυσίμων άμεσης τροφοδοσίας στερεών καυσίμων.* 2017.
8. *Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ).* .
9. Μανέλης, Γ.Χ. and G.C. Manelis, *Τεχνοοικονομική μελέτη ενεργειακών καλλιέργειών για την παραγωγή και εκμετάλλευση βιομάζας.* 2012.
10. *BBC news.*
11. *Phyllis2, Database for biomass and waste,* <https://www.ecn.nl/phyllis2/Home/Help>.
12. Dunnett, A., C. Adjiman, and N. Shah, *Biomass to heat supply chains: applications of process optimization.* Process Safety and Environmental Protection, 2007. **85**(5): p. 419-429.
13. Morandi, F., A. Perrin, and H. Østergård, *Miscanthus as energy crop: Environmental assessment of a miscanthus biomass production case study in France.* Journal of Cleaner Production, 2016. **137**: p. 313-321.
14. Blengini, G.A., et al., *LCA of bioenergy chains in Piedmont (Italy): a case study to support public decision makers towards sustainability.* Resources, Conservation and Recycling, 2011. **57**: p. 36-47.
15. Smeets, E.M., I.M. Lewandowski, and A.P. Faaij, *The economical and environmental performance of miscanthus and switchgrass production and supply chains in a European setting.* Renewable and sustainable energy reviews, 2009. **13**(6-7): p. 1230-1245.
16. Lewandowski, I., et al., *Environment and harvest time affects the combustion qualities of Miscanthus genotypes.* Agronomy Journal, 2003. **95**(5): p. 1274-1280.
17. Corder, S.E., *Properties and uses of bark as an energy source.* 1976.
18. Röder, M., 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, 2015. **79**: p. 50-63.
19. Berg, S. and E.-L. Lindholm, *Energy use and environmental impacts of forest operations in Sweden.* Journal of Cleaner Production, 2005. **13**(1): p. 33-42.
20. <https://knoema.com/FAOPRDSC2017/production-statistics-crops-crops-processed?country=1000780-germany&item=1001650-wheat>.
21. Brankatschk, G. and M. Finkbeiner, *Application of the Cereal Unit in a new allocation procedure for agricultural life cycle assessments.* Journal of Cleaner Production, 2014. **73**: p. 72-79.
22. [https://www.academia.edu/10072070/Bulk\\_density\\_of\\_wet\\_and\\_dry\\_wheat\\_straw\\_and\\_switchgrass\\_particles](https://www.academia.edu/10072070/Bulk_density_of_wet_and_dry_wheat_straw_and_switchgrass_particles).
23. Kerdsuwan, S. and K. Laohalidanond, *Renewable energy from palm oil empty fruit bunch,* in *Renewable energy-trends and applications.* 2011, InTech.
24. Schmidt, J.H., *Life assessment of rapeseed oil and palm oil. Ph. D. thesis, Part 3: Life cycle inventory of rapeseed oil.* 2007.
25. Erlach, B., *Biomass upgrading technologies for carbon-neutral and carbon-negative electricity generation.* 2014.
26. Uslu, A., *PRE-TREATMENT TECHNOLOGIES, AND THEIR EFFECTS ON THE INTERNATIONAL BIOENERGY SUPPLY CHAIN LOGISTICS.* Report: NWS-I-2005-27. Utrecht University, the Netherlands, 2005.
27. *Steam exploded pellets made from bark and residues - a new possible value stream for the pulp and paper industry. MATTIAS ERIXON, PETER BJÖRKLUND.*

28. Servert, J., G. San Miguel, and D. Lopez, *Hybrid solar-biomass plants for power generation; Technical and economic assessment*. Global NEST Journal, 2011. **13**(3): p. 266-276.
29. Bridgeman, T., et al., *Torrefaction of reed canary grass, wheat straw and willow to enhance solid fuel qualities and combustion properties*. Fuel, 2008. **87**(6): p. 844-856.
30. Xue, G., et al., *Impact of torrefaction on properties of Miscanthus × giganteus relevant to gasification*. Fuel, 2014. **121**: p. 189-197.
31. Uemura, Y., et al., *Torrefaction of oil palm wastes*. Fuel, 2011. **90**(8): p. 2585-2591.
32. Wang, L., et al., *Effect of torrefaction on physiochemical characteristics and grindability of stem wood, stump and bark*. Applied Energy, 2017.
33. Bergman, P., *Combined torrefaction and pelletisation*. The TOP process, 2005.
34. Adams, P., J. Shirley, and M. McManus, *Comparative cradle-to-gate life cycle assessment of wood pellet production with torrefaction*. Applied Energy, 2015. **138**: p. 367-380.
35. *CEREA STRAW TORREFACTION: RESULTS ON PILOT PLANT TEST*. CENER. [https://sector-project.eu/fileadmin/downloads/presentations/3DO\\_11\\_3.pdf](https://sector-project.eu/fileadmin/downloads/presentations/3DO_11_3.pdf).
36. Stemann, J., B. Erlach, and F. Ziegler, *Hydrothermal carbonisation of empty palm oil fruit bunches: Laboratory trials, plant simulation, carbon avoidance, and economic feasibility*. Waste and Biomass Valorization, 2013. **4**(3): p. 441-454.
37. Reza, M.T., et al., *Hydrothermal carbonization (HTC) of wheat straw: Influence of feedwater pH prepared by acetic acid and potassium hydroxide*. Bioresource technology, 2015. **182**: p. 336-344.
38. Wilk, M. and A. Magdziarz, *Hydrothermal carbonization, torrefaction and slow pyrolysis of Miscanthus giganteus*. Energy, 2017. **140**: p. 1292-1304.
39. Gao, P., et al., *Preparation and characterization of hydrochar from waste eucalyptus bark by hydrothermal carbonization*. Energy, 2016. **97**: p. 238-245.
40. Lam, P.S., *Steam explosion of biomass to produce durable wood pellets*. 2011, University of British Columbia.
41. Zimbaridi, F., E. Ricci, and G. Braccio, *Technoeconomic study on steam explosion application in biomass processing*. Applied biochemistry and biotechnology, 2002. **98**(1-9): p. 89-99.
42. [https://www.engineeringtoolbox.com/saturated-steam-properties-d\\_457.html](https://www.engineeringtoolbox.com/saturated-steam-properties-d_457.html).
43. *Steam explosion tests and EFB-biomass potential*. Merja Hedman . Tero Joronen . Valmet.
44. Schell, D., et al., *A technical and economic analysis of acid-catalyzed steam explosion and dilute sulfuric acid pretreatments using wheat straw or aspen wood chips*. Applied biochemistry and biotechnology, 1991. **28**(1): p. 87.
45. *Opportunities for using Sawmill Residues in Australia*/  
<http://www.fwpa.com.au/images/processing/PRB280-1112-Opportunities-for-using-Sawmill-Residues-in-Australia-2013.pdf>.
46. *Agricultural and Resource Economics. The University of Tennessee Institute of Agriculture* <https://ag.tennessee.edu/arec/Pages/budgets.aspx>.
47. Li, X., et al., *Life cycle assessment of densified wheat straw pellets in the Canadian Prairies*. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2012. **17**(4): p. 420-431.
48. Huisman, W., P. Venturi, and J. Molenaar, *Costs of supply chains of Miscanthus giganteus*. Industrial Crops and Products, 1997. **6**(3-4): p. 353-366.
49. *AAEA. Commodity costs and returns estimation handbook*. Ames, Iowa, U.S.A.: American Agricultural Economics Association; 2000. p. 566.
50. [https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE\\_DOCUMENTS/16/nrcs143\\_009503.pdf](https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/16/nrcs143_009503.pdf).
51. Peters, M.S., et al., *Plant design and economics for chemical engineers*. Vol. 4. 1968: McGraw-Hill New York.
52. *Huisman W, Venturi P, Molenaar J. Cost calculations of production chains of Miscanthus giganteus*. Wageningen, the Netherlands: Wageningen Agricultural University; 1997. p. 45 plus Appendixes.
53. <http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/refreshTableAction.do?tab=table&plugin=1&pcode=tps00173&language=en>.
54. [https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/sites/iee-projects/files/projects/documents/refuel\\_biomass\\_resources\\_potential\\_and\\_related\\_costs.pdf](https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/sites/iee-projects/files/projects/documents/refuel_biomass_resources_potential_and_related_costs.pdf).
55. <http://mapleriverfarms.com/sales.php>.
56. Overend, R.P., *The average haul distance and transportation work factors for biomass delivered to a central plant*. Biomass, 1982. **2**(1): p. 75-79.
57. Singh, J., B. Panesar, and S. Sharma, *A mathematical model for transporting the biomass to biomass based power plant*. Biomass and bioenergy, 2010. **34**(4): p. 483-488.

58. Paolucci, N., F. Bezzo, and A. Tugnoli, *A two-tier approach to the optimization of a biomass supply chain for pyrolysis processes*. Biomass and Bioenergy, 2016. **84**: p. 87-97.
59. Μπραϊμάκης, Κ.Α. and Κ.Λ. Braimakis, *Οικονομοτεχνική Μελέτη της Ταχείας Πυρόλυσης για Παραγωγή Βιοελαίου ως Ενεργειακού Φορέα Μεταφοράς Βιομάζας σε Βιοδιυλιστήρια*. 2013.
60. [http://ukerc.rl.ac.uk/pdf/Truck\\_Best\\_Operational\\_Efficiency.pdf](http://ukerc.rl.ac.uk/pdf/Truck_Best_Operational_Efficiency.pdf).
61. Li, Y., et al., *Economic impact of combined torrefaction and pelletization processes on forestry biomass supply*. Gcb Bioenergy, 2017. **9**(4): p. 681-693.
62. <http://www.chemengonline.com/site/plant-cost-index/>.
63. Κουγιουμτζής, Μ.-Α.Π. and Μ.-Α.Π. Κουγιουμτζής, *Τεχνο-Οικονομική Μελέτη Βιοδιυλιστηρίου*. 2014.
64. [http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Wages\\_and\\_labour\\_costs](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Wages_and_labour_costs).
65. Tsalidis, G.-A., et al., *Life cycle assessment of direct co-firing of torrefied and/or pelletised woody biomass with coal in The Netherlands*. Journal of cleaner production, 2014. **81**: p. 168-177.
66. Janic, M., *An assessment of the performance of the European long intermodal freight trains (LIFTS)*. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2008. **42**(10): p. 1326-1339.
67. Flodén, J., *Rail freight costs-Some basic cost estimates for intermodal transport*. 2011.
68. Janic, M., *Modelling the full costs of an intermodal and road freight transport network*. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2007. **12**(1): p. 33-44.
69. Searcy, E., et al., *The relative cost of biomass energy transport*. Applied biochemistry and biotechnology, 2007. **137**(1-12): p. 639-652.
70. Lantz, M., *The economic performance of combined heat and power from biogas produced from manure in Sweden—A comparison of different CHP technologies*. Applied Energy, 2012. **98**: p. 502-511.
71. *Capital Cost Estimates for Utility Scale Electricity Generating Plants*. [https://www.eia.gov/analysis/studies/powerplants/capitalcost/pdf/capcost\\_assumption.pdf](https://www.eia.gov/analysis/studies/powerplants/capitalcost/pdf/capcost_assumption.pdf).
72. Agar, D.A., *A comparative economic analysis of torrefied pellet production based on state-of-the-art pellets*. Biomass and bioenergy, 2017. **97**: p. 155-161.
73. Marvin, W.A., et al., *Economic optimization of a lignocellulosic biomass-to-ethanol supply chain*. Chemical Engineering Science, 2012. **67**(1): p. 68-79.
74. *EPA Combined Heat and Power Partnership. Representative Biomass CHP System Cost and Performance Profiles*.