



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΤΜΟΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΚΑΙ ΛΕΒΗΤΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΤΑΧΕΙΑΣ ΠΥΡΟΛΥΣΗΣ ΓΙΑ
ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΒΙΟΕΛΑΙΟΥ ΩΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΦΟΡΕΑ
ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΣΕ ΒΙΟΔΙΥΛΙΣΤΗΡΙΑ**

ΜΠΡΑΪΜΑΚΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

Επιβλέπων Καθηγητής : Καρέλλας Σωτήριος
Αθήνα, Φεβρουάριος 2013

Θα ήθελα να ευχαριστήσω το Δρ. Κ. Πανόπουλο
και τους υποψήφιους διδάκτορες Κ. Ατσόνιο και Χ. Χριστοδούλου
για την καθοδήγηση και τις πολύτιμες υποδείξεις τους
καθόλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	1
ABSTRACT	1
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	3
1. ΠΥΡΟΛΥΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ	6
1.1. Γενικά στοιχεία και ορισμοί.....	6
1.2. Η χημεία της πυρόλυσης βιομάζας.....	10
1.2.1. Μηχανισμός της διεργασίας	10
1.2.2. Επίδραση των συνθηκών αντίδρασης.....	12
1.3. Τεχνικά στάδια της διεργασίας	15
1.3.1. Χειρισμός και προετοιμασία της βιομάζας.....	16
1.3.2. Τεχνικά χαρακτηριστικά αντιδραστήρων ταχείας πυρόλυσης	18
1.4. Το βιοέλαιο.....	23
1.4.1. Χημική σύσταση	23
1.4.2. Ιδιότητες	25
2. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΠΥΡΟΛΥΣΗΣ	29
2.1. Δυσκολίες μοντελοποίησης	29
2.2. Υπολογισμός της σύστασης και της θερμογόνου ικανότητας των προϊόντων	30
2.2.1. Μαθηματική περιγραφή του μοντέλου	30
2.2.2. Εφαρμογή του μοντέλου σε Aspen Plus™	36
2.3. Υπολογισμός του ισοζυγίου ενέργειας της διεργασίας.....	37
2.3.1. Θερμότητα για την πυρόλυση	37
2.3.2. Μέθοδοι υπολογισμού της θερμότητας για την πυρόλυση.....	38
2.4. Αποτελέσματα μοντελοποίησης χημικής σύστασης και ισοζυγίου ενέργειας της διεργασίας.....	44
2.4.1. Εφαρμογή του μοντέλου για τον υπολογισμό της ποσότητας και της σύστασης των προϊόντων.....	44
2.4.2. Σύγκριση αποτελεσμάτων χημικής σύστασης με πειραματικά δεδομένα από βιβλιογραφία.....	47
2.4.3. Υπολογισμός του ισοζυγίου ενέργειας της διεργασίας	50
2.5. Μοντελοποίηση του ενεργειακού ισοζυγίου της ταχείας πυρόλυσης σε αναβράζουσα ρευστοποιημένη κλίνη ανακυκλοφορίας	51
3. ΣΥΛΛΟΓΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΒΙΟΕΛΑΙΟΥ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ.....	56

3.1.	Συλλογή και κόστος απόκτησης βιομάζας	56
3.1.1.	Πηγές βιομάζας.....	56
3.1.2.	Εφοδιαστικές αλυσίδες βιομάζας	59
3.1.3.	Κόστος απόκτησης βιομάζας	61
3.2.	Μετατροπή της βιομάζας σε βιοέλαιο	62
3.2.1.	Η βασική ιδέα.....	62
3.2.2.	Πλεονεκτήματα.....	64
3.3.	Αεριοποίηση βιοελαίου	65
3.3.1.	Γενικές αρχές	65
3.3.2.	Περιγραφή μονάδας αεριοποίησης βιοελαίου	68
3.4.	Μοντελοποίηση αεριοποίησης βιοελαίου	71
3.4.1.	Παραδοχές μοντελοποίησης.....	71
3.4.2.	Αποτελέσματα	73
4.	ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΒΙΟΕΛΑΙΟΥ	78
4.1.	Βασικές έννοιες και ορισμοί οικονομικής ανάλυσης	79
4.2.	Οικονομική ανάλυση μονάδας ταχείας πυρόλυσης.....	84
4.2.1.	Συνολικό Κεφάλαιο Επένδυσης	84
4.2.2.	Κόστος Συντήρησης και Λειτουργίας	90
4.3.	Μεταφορικά κόστη βιομάζας και βιοελαίου	94
4.3.1.	Βασικές έννοιες οικονομικής ανάλυσης κόστους μεταφοράς.....	94
4.3.2.	Κόστος μεταφοράς βιομάζας/βιοελαίου σε ενιαία απόσταση	99
4.3.3.	Κόστος συλλογής βιομάζας από κυκλική επιφάνεια	99
4.3.4.	Αποτελέσματα οικονομικής ανάλυσης κόστους μεταφοράς.....	103
4.3.5.	Υπολογισμός κόστους συλλογής βιομάζας για τη μονάδα ταχείας πυρόλυσης .	111
5.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	115
5.1.	Παράμετροι οικονομικής ανάλυσης.....	115
5.2.	Παρουσίαση οικονομικών αποτελεσμάτων μονάδας ταχείας πυρόλυσης	117
5.3.	Δυνατότητες παραγωγής βιοελαίου για εξοικονόμηση κόστους μεταφοράς του καυσίμου	126
6.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ -ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ	135
6.1.	Συμπεράσματα.....	135
6.2.	Προτάσεις για μελλοντική εργασία.....	136
7.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	137

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το πρώτο μέρος της παρούσας διπλωματικής εργασίας περιλαμβάνει βιβλιογραφική επισκόπηση της διεργασίας της ταχείας πυρόλυσης βιομάζας και των ιδιοτήτων του παραγόμενου βιοελαίου (Κεφάλαιο 1). Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η μοντελοποίηση της διεργασίας σε περιβάλλον Aspen PlusTM με σκοπό την πρόβλεψη της ποσότητας και της σύστασης των τελικών της προϊόντων (Κεφάλαιο 2). Παράλληλα, με βάση το μοντέλο που αναπτύσσεται, μελετάται το ενεργειακό ισοζύγιο της διεργασίας καθώς και η δυνατότητα εξασφάλισης της απαιτούμενης για την ολοκλήρωσή της θερμότητας μέσω της καύσης των μονίμων αερίων και του εξανθρακώματος για την περίπτωση αντιδραστήρα αναβράζουσας ρευστοποιημένης κλίνης (Κεφάλαιο 2). Επιπλέον, γίνεται πρωταρχική διερεύνηση της σύστασης του παραγόμενου αερίου σύνθεσης από την αεριοποίηση βιοελαίου (Κεφάλαιο 3). Τέλος, διεξάγεται οικονομοτεχνική ανάλυση μονάδας ταχείας πυρόλυσης βιομάζας και εξετάζεται η δυνατότητα μείωσης του κόστους μεταφοράς καυσίμου που προσφέρει το βιοέλαιο (Κεφάλαιο 4). Η παρουσίαση των τελικών αποτελεσμάτων γίνεται στο Κεφάλαιο 5. Στο τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας (Κεφάλαιο 6) συνοψίζονται τα κύρια συμπεράσματα ενώ ταυτόχρονα προτείνονται και θέματα για μελλοντική εργασία.

ABSTRACT

The first part of the present thesis includes a literature overview of biomass fast pyrolysis process as well as fuel properties of the produced bio-oil (Chapter 1). Continually, the process is modeled in Aspen PlusTM software with the aim to predict product yields and their respective compositions (Chapter 2). With the use of the developed model, the energy balance of the process as well as the capability of providing the required heat through combustion of the byproduct char and permanent gases is examined for a bubbling fluidized bed reactor unit (Chapter 2). Furthermore, a primary investigation of bio-oil derived syngas composition is conducted (Chapter 3). Lastly, a techno-economic analysis of a biomass fast pyrolysis unit is presented and the potential of bio-oil to reduce fuel transport cost is assessed (Chapter 4). The final results are presented in Chapter 5. In the last chapter (Chapter 6), the main conclusions are summarized and future work is proposed.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Από το δεύτερο μισό του 20^{ου} αιώνα, με την δραματική αύξηση της χρήσης των ορυκτών καυσίμων (άνθρακας, πετρέλαιο) για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και καυσίμων κίνησης, γίνονται ορατές οι αρνητικές συνέπειες της εξάρτησης από αυτά. Τέτοιες είναι η αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη μέσω των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (CO₂ και CH₄) και η περιβαλλοντική ρύπανση που προκαλείται από τις εκπομπές NO_x και SO_x. Ένα επιπλέον μειονέκτημα των ορυκτών καυσίμων είναι η περιορισμένη διαθεσιμότητά τους, η οποία εγείρει προβληματισμούς για τη μελλοντική βιωσιμότητα μιας ενεργειακής παραγωγής βασισμένης σε αυτά.

Για τους παραπάνω κυρίως λόγους, γίνεται προσπάθεια σταδιακής απαγκίστρωσης από την χρήση τους με την αντικατάστασή τους από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) . Οι ΑΠΕ περιλαμβάνουν την αιολική, υδροηλεκτρική, ηλιακή, γεωθερμική και, τέλος, την ενέργεια από τη βιομάζα. Η ανανεωσιμότητα της ενέργειας που προέρχεται από τη βιομάζα οφείλεται στο ότι προέρχεται από την ηλιακή ενέργεια, η οποία μετατρέπεται σε χημική μέσω της φωτοσύνθεσης κατά την ανάπτυξη των φυτικών οργανισμών. Παράλληλα, επειδή το CO₂ απορροφάται από το περιβάλλον ως βασικό συστατικό για την επιτέλεση της φωτοσύνθεσης, ενεργειακή αξιοποίηση ενός φυτού δεν επιβαρύνει με επιπλέον εκπομπές του CO₂ κατά τον κύκλο ζωής του [1].

Σήμερα, υπάρχουν οι εξής επιλογές όσον αφορά την παραλαβή και αξιοποίηση του ενεργειακού περιεχομένου της βιομάζας [1]:

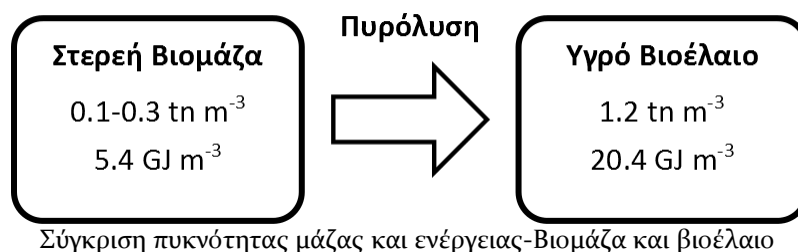
- Άμεση καύση
- Καύση έπειτα από επεξεργασία με φυσικές μεθόδους όπως ταξινόμηση, τεμαχισμός, συμπίεση και/ή ξήρανση με αέρα.
- Θερμοχημικές διεργασίες προκειμένου να γίνει αναβάθμιση του ενεργειακού και χημικού της περιεχομένου. Τέτοιες είναι η πυρόλυση και η αεριοποίηση.
- Βιολογικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα φυσικά, όπως η αναερόβια χώνευση και η ζύμωση, οι οποίες οδηγούν σε παραγωγή αερίων ή υγρών καυσίμων.

Αν και η βιομάζα ήδη παρέχει το 14 % της ενέργειας που παράγεται πρωτογενώς παγκοσμίως, οι μέθοδοι που συνήθως χρησιμοποιούνται για την αξιοποίησή της παραμένουν έως και σήμερα σε μεγάλο βαθμό ανεπαρκείς και αναποτελεσματικές [2]. Αυτό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στο γεγονός ότι η στερεή βιομάζα χαρακτηρίζεται από χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα και ως εκ τούτου η ανάπτυξη περισσότερο αποδοτικών εφαρμογών αξιοποίησής της περιορίζεται χωρικά γύρω από το σημείο παραγωγής της.

Η μετατροπή της βιομάζας από στερεή σε υγρή μορφή μπορεί να γίνει μέσω θερμοχημικών διεργασιών, όπως η καύση, η αεριοποίηση και η πυρόλυση [2]. Η πυρόλυση είναι η διεργασία θέρμανσης και συνακόλουθης χημικής αποδόμησης των οργανικών συστατικών της βιομάζας απουσία οξειδωτικού μέσου. Χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από τους αρχαίους πολιτισμούς για την παραγωγή κάρβουνου, ενώ πιο πρόσφατη χρήση της έγινε κατά τους δύο παγκοσμίους πολέμους για την παραγωγή

καυσίμων κίνησης, όταν τα ορυκτά καύσιμα απουσίαζαν. Τα τελευταία χρόνια, γίνεται προσπάθεια βελτιστοποίησης της διεργασίας για μεγιστοποίηση των προϊόντων υγρής φάσης, τα οποία συνολικά περιγράφονται με τον όρο **βιοέλαιο** (bio-oil), μέσω της ρύθμισης των συνθηκών της διεργασίας, η οποία σε αυτή την περίπτωση καλείται **ταχεία πυρόλυση** (fast pyrolysis).

Τα οφέλη από τη μετατροπή της στερεής βιομάζας σε βιοέλαιο ποικίλλουν. Ενδεικτικά, κάποια από αυτά είναι η ευκολία χειρισμού και αποθήκευσης του υγρού έναντι του στερεού καυσίμου. Παράλληλα, λόγω της υψηλότερης ενεργειακής του πυκνότητας, το βιοέλαιο παρουσιάζει σχετικά μειωμένο κόστος μεταφοράς, υποστηρίζοντας έτσι τη δυνατότητα χωρικής αποδέσμευσης της παραγωγής της βιομάζας και της τελικής αξιοποίησής της. Η αεριοποίηση του βιοελαίου επίσης παρουσιάζει πλεονεκτήματα έναντι της στερεής βιομάζας, καθώς είναι ομοιογενές καύσιμο, με χαμηλή περιεκτικότητα σε τέφρα, και κατ' επέκταση οι απαιτήσεις καθαρισμού του παραγόμενου αερίου σύνθεσης (syngas) είναι μειωμένες.



Μέσα στο παραπάνω πλαίσιο έρευνας και ανάπτυξης για την παραγωγή του βιοελαίου, πολλές προσπάθειες γίνονται στην κατεύθυνση της μοντελοποίησης της πυρόλυσης. Βασικός σκοπός τους είναι η πρόβλεψη της ποσότητας των προϊόντων που παράγονται και της σύστασής τους, καθώς και των θερμοφυσικών και θερμοδυναμικών μεγεθών που σχετίζονται με αυτά. Η προσομοίωση του βιοελαίου είναι επίσης χρήσιμη για την περαιτέρω αποτελεσματική μοντελοποίηση των διεργασιών όπου αυτό μετέχει (πχ αεριοποίηση). Το εγχείρημα αυτό εν γένει παρουσιάζει αρκετές δυσκολίες, καθότι κατά την ταχεία πυρόλυση δεν αποκαθίσταται χημική ισορροπία, ενώ η τελική σύσταση των προϊόντων είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στις συνθήκες κάτω από τις οποίες διεξάγεται η αντίδραση. Ακόμη, το πλήθος των τελικών και ενδιάμεσων προϊόντων που σχηματίζονται είναι πολύ μεγάλο, σημαντικό μέρος του οποίου παραμένει ακαθόριστο. Ο ακριβής μηχανισμός της χημικής μετατροπής της βιομάζας στα τελικά προϊόντα παραμένει έως σήμερα άγνωστος.

Εκτός από τη μοντελοποίηση της πυρόλυσης, αρκετή έρευνα προσανατολίζεται στον προσδιορισμό των δυνατοτήτων του βιοελαίου ως εναλλακτικού ενεργειακού φορέα, με σκοπό την ελαχιστοποίηση του κόστους των εφοδιαστικών αλυσίδων καυσίμου που προέρχεται από βιομάζα. Πιο συγκεκριμένα, αρκετό ενδιαφέρον έχει κερδίσει το σχήμα παραγωγής βιοελαίου σε αποκεντρωμένες περιοχές συλλογής βιομάζας σε αντίστοιχες μονάδες ταχείας πυρόλυσης και κατόπιν μεταφοράς του σε μεγαλύτερες κεντρικές

μονάδες, με σκοπό την μείωση των οικονομικών μεγεθών που σχετίζονται με τη μεταφορά καυσίμου.

Τόσο η μοντελοποίηση της πυρόλυσης, όσο και η οικονομική αξιολόγηση του σχήματος παραγωγής που περιγράφηκε, αποτελούν αντικείμενα της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

1. ΠΥΡΟΛΥΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η διεργασία της ταχείας πυρόλυσης. Αρχικά δίνονται οι ορισμοί των βασικών όρων που είναι απαραίτητοι για την κατανόηση της διεργασίας, η οποία παρουσιάζεται εκτενώς στη συνέχεια. Κατόπιν, περιγράφονται τα τεχνικά στάδια της διεργασίας καθώς και οι ιδιότητες του βιοελαίου ως καυσίμου.

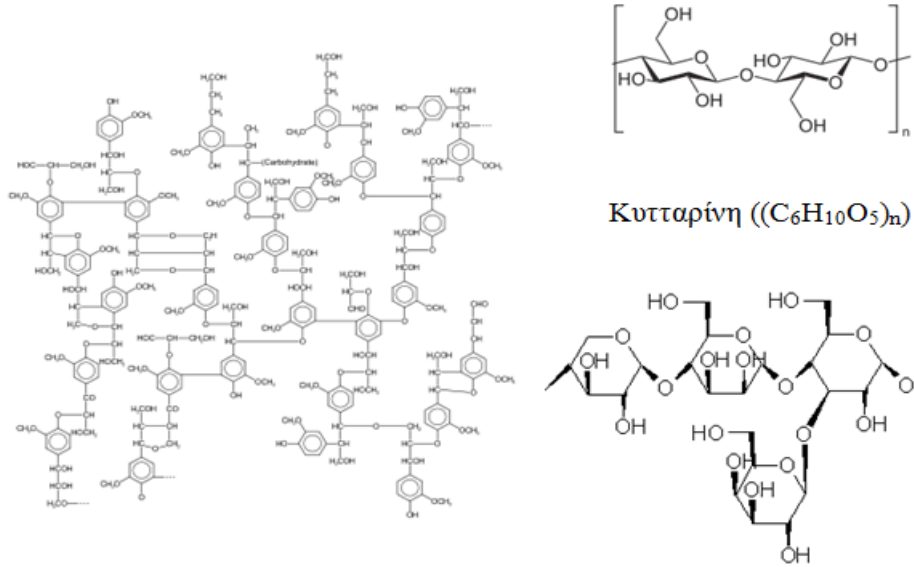
1.1. Γενικά στοιχεία και ορισμοί

Βιομάζα: πρόκειται για το σύνολο της οργανικής ύλης η οποία προέρχεται από όλους τους έμβιους οργανισμούς, είτε ζωϊκούς είτε φυτικούς [3]. Στην παρούσα εργασία, με τον όρο βιομάζα εννοείται το ποσό της ύλης αυτής που προέρχεται από φυτικούς οργανισμούς, όπως τα δέντρα και τα γεωργικά υπολείμματα. Η λέξη επομένως θα χρησιμοποιείται στη συνέχεια αποκλειστικά με αυτή τη σημασία.

Η κατηγορία αυτή της βιομάζας καλείται και λιγνοκυτταρική βιομάζα (lignocellulose biomass) και η ονομασία της προέρχεται από τη σύστασή της, η οποία περιλαμβάνει 3 βασικά δομικά πολυμερικά στοιχεία που περιγράφονται ακολούθως [4]:

- **Κυτταρίνη (Cellulose)** : Πρόκειται για ένα πολυμερές από γραμμικές αλυσίδες $C_6H_{12}O_5$. Αποτελεί το κύριο συστατικό του τοιχώματος των φυτικών κυττάρων [2]. Έχει συμπαγή κρυσταλλική δομή. Αποτελεί συνήθως το 45-50% w/w ξηρής ξυλώδους βιομάζας [4].
- **Ημικυτταρίνη (Hemi-cellulose)** : Πρόκειται για ένα μίγμα πολυσακχαριδών. Έχει πολύ μικρότερο μοριακό βάρος από την κυτταρίνη, η δε δομή της είναι περισσότερο ακαθόριστη, σε αντίθεση με αυτήν της πρώτης. Συνήθως καλύπτει το 20-40% w/w της ξηρής βιομάζας [4].
- **Λιγνίνη (Lignin)** : Η δομή της παρουσιάζει υψηλή πολυπλοκότητα [2]. Είναι πολυμερές που συντίθεται από αρωματικά μόρια υποκατεστημένου φαινυλοπροπανίου. Η σύστασή της στην ξηρή βιομάζα κυμαίνεται μεταξύ του 17-30% w/w [4].

Πέρα από τα 3 αυτά βασικά συστατικά, η βιομάζα περιέχει σε μικρότερες ποσότητες και κάποια μικρότερα οργανικά μόρια και πολυμερή εκχυλίσματα (extractives) καθώς και ανόργανα μεταλλικά στοιχεία (minerals) [5].



Σχήμα 1.1.1 Οι μοριακές δομές Κυτταρίνης, Λιγνίνης και Ημικυτταρίνης

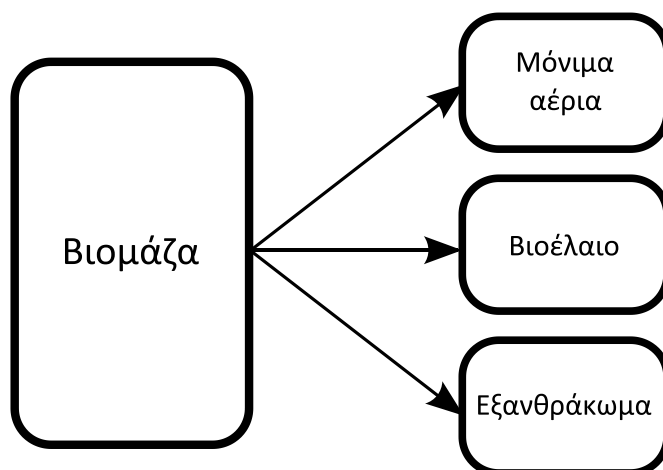
Από χημική άποψη, η βιομάζα αποτελείται από ένα στερεό μέρος χημικής σύστασης (C,H,O,N,S,Cl κλπ.), ένα μέρος τέφρας (ash), ενώ περιέχει και ένα μέρος υγρασίας. Ως τέφρα θεωρείται το σύνολο των ανόργανων ενώσεων που στις διεργασίες που αφορούν την παρούσα εργασία δε συμμετέχουν στις αντιδράσεις (αδρανές υλικό). Η αναλογία των παραπάνω στοιχείων λαμβάνει ένα εύρος τιμών, ανάλογα με το είδος και την ηλικία του φυτού από το οποίο προέρχεται η βιομάζα, αλλά και ανάλογα με την προέλευση και την χρονική περίοδο του έτους συλλογής. Μια τυπική σύσταση ωστόσο κατά C H O είναι 48-49% C, 5-6% H και 40-44% O [5].

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται κάποιες ενδεικτικές τιμές για τη στοιχειακή σύσταση και τη θερμογόνο δύναμη διαφόρων μορφών βιομάζας[6].

Καύσιμο	C %	H%	O%	N%	S%	Τέφρα %	Θερμογόνος ικανότητα (MJ/kg)
Ξύλο πεύκου	49,3	6	44,2	0,5	0,01	0,5	20,1
Άχυρο σίτου	49,6	6,2	43,6	0,6	n.a.	4,7	18,6
Μίσχανθος	49,5	6,2	43,6	0,6	n.a.	3,3	18,5
Ζαχαρότευτλο	49,5	6,2	43,8	0,5	n.a.	3,7	18,5

Πίνακας 1.1.1 Σύσταση και θερμογόνος ικανότητα διαφόρων ειδών βιομάζας [6]

Πυρόλυση βιομάζας: είναι η θερμοχημική διεργασία (thermochemical process) αποσύνθεσης (decomposition) που λαμβάνει χώρα κατά τη θέρμανση της βιομάζας, απουσία οξειδωτικού μέσου. Η θερμοκρασία της διεργασίας λαμβάνει τιμές από 400 έως πάνω από 1200 °C [5]. Κατά την πυρόλυση λαμβάνει χώρα αλλαγή σύστασης αλλά και φάσης της βιομάζας, καθώς από το αρχικό στερεό καύσιμο προκύπτουν προϊόντα σε στερεή, υγρή και αέρια κατάσταση, τα οποία είναι αντίστοιχα το εξανθράκωμα, το βιοέλαιο και τα μόνιμα αέρια.



Σχήμα 1.1.2 Πυρόλυση βιομάζας-προϊόντα

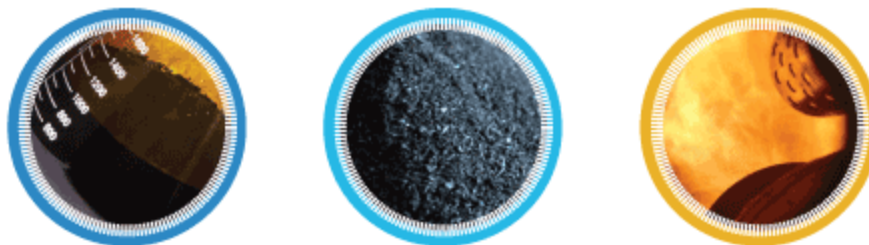
Τα προϊόντα της πυρόλυσης βιομάζας είναι τα εξής :

Εξανθράκωμα (*char* ή *bio-char*): Το εξανθράκωμα είναι το πλούσιο σε άνθρακα στερεό υπόλειμμα (solid residue) της διεργασίας. Η σύστασή του περιλαμβάνει ένα μέρος στοιχειακής σύστασης C-H-O-N-S, ανόργανα συστατικά και τέφρα (ash).

Βιοέλαιο (*bio-oil*) : Το βιοέλαιο πρόκειται για ένα υγρής φάσης μίγμα (20-30% κατά μάζα υγρασία) και ενός μεγάλου αριθμού (άνω των 300) οργανικών και ανόργανων ενώσεων σύστασης C-H-O-N-S, (tars) σε αναλογία μάζας 70-80% [7]. Εδώ πρέπει να τονιστεί η διαφορά της προέλευσης μεταξύ του ενός μέρους του νερού του βιοελαίου, το οποίο προέρχεται από την αρχική υγρασία της βιομάζας και του άλλου (το οποίο στο εξής θα καλείται πυρολυτικό ύδωρ-pyrolytic water) το οποίο σχηματίζεται από το H και O του στερεού C-H-O-N-S κομματιού του αρχικού καυσίμου μέσω της πυρόλυσης. Το νερό αυτό δεν είναι δυνατόν να διαχωριστεί από το υπόλοιπο μέρος του βιοελαίου με συμβατικές μεθόδους όπως η κλασματική απόσταξη [7]. Το βιοέλαιο περιέχει κι ένα πάρα πολύ μικρό ποσοστό στερεής τέφρας (<0.1% w/w).

Μόνιμα αέρια (*permanent gases*): είναι αέρια που δεν συμπυκνώνονται μετά το πέρας της διεργασίας. Τα είδη με την υψηλότερη συγκέντρωση είναι τα CO₂, CO, CH₄, H₂ [2].

Πρέπει να τονισθεί και πάλι ότι η ορολογία που υιοθετείται για το εξανθράκωμα (char) και των οργανικών του bio-oil (tars) δεν πρέπει να συγχέεται με τις έννοιες του μόνιμου άνθρακα και των πισσών αντίστοιχα.



Εικόνα 1.1.1. Βιοέλαιο, εξανθράκωμα και μόνιμα αέρια

Ενέργεια πυρόλυσης : πρόκειται για το ποσό ενέργειας που απαιτείται προκειμένου να ολοκληρωθεί η διεργασία ανά μονάδα μάζας της βιομάζας. Η ενέργεια που απαιτείται για τη διεργασία και η οποία καθορίζει το ενεργειακό της ισοζύγιο κατανέμεται σε δύο μέρη, ένα απαραίτητο για τη θέρμανση της βιομάζας στην απαιτούμενη θερμοκρασία κι ένα για την ολοκλήρωση των χημικών αντιδράσεων που περιλαμβάνει [8]. Αξίζει να σημειωθεί ότι η θέρμανση της βιομάζας και οι χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα δεν είναι δυο διαδοχικές διεργασίες, καθώς η έναρξη των αντιδράσεων γίνεται προτού η στερεή βιομάζα αποκτήσει την θερμοκρασία πυρόλυσης.

Η ενέργεια πυρόλυσης είναι καταρχήν απαραίτητη για τον κατάλληλο σχεδιασμό του αντιδραστήρα, αλλά και για τον καθορισμό λοιπών τεχνικών παραμέτρων της διεργασίας, ενώ πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν σε κάθε ανάλυση ενεργειακού ισοζυγίου, ειδικά όταν μελετώνται δυνατότητες αξιοποίησης της βιομάζας μέσα σε ένα γενικότερο πλάνο (αεριοποίηση, καύση). Παρόλ'αυτά, δεν υπάρχει προς το παρόν κάποια κοινώς αποδεκτή μεθοδολογία υπολογισμού της, καθώς αυτή είναι ακόμα δύσκολο να υπολογιστεί με πειραματικές μεθόδους [9], λόγω της πολυπλοκότητας της ίδιας της διεργασίας, της μεγάλης ανομοιογένειας που παρουσιάζουν τα είδη βιομάζας μεταξύ τους και των δυσκολιών που παρουσιάζονται στον υπολογισμό των θερμικών απωλειών του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται [8].

Συμβατική και ταχεία πυρόλυση: Η πυρόλυση κατηγοριοποιείται με κριτήριο το ρυθμό θέρμανσης (heating rate) της διεργασίας [4], στην συμβατική/αργή (conventional pyrolysis ή slow pyrolysis) και στην ταχεία (fast pyrolysis). Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί πως το όριο του ρυθμού θέρμανσης που καθορίζει το είδος της δεν είναι αυστηρά καθορισμένο [10]. Σε γενικές γραμμές είναι αποδεκτό πως για ρυθμούς θέρμανσης έως 10^{-10^2} C/s η πυρόλυση θεωρείται αργή, ενώ για ρυθμούς θέρμανσης τάξεως μεγέθους από 10^2-10^3 C/s η πυρόλυση θεωρείται ταχεία [10].

Μία ακόμη διαφορά μεταξύ της συμβατικής και της ταχείας πυρόλυσης, όσον αφορά τις συνθήκες διεξαγωγής τους, είναι ο χρόνος αντίδρασης. Όπως περιγράφεται και στη

συνέχεια, η ταχεία πυρόλυση συνοδεύεται από απότομη ψύξη (quenching) και συμπύκνωση των πτητικών προϊόντων εν μέσω της διεργασίας, προκειμένου μέρος αυτών να ανακτηθεί σε υγρή φάση. Κατά τη συμβατική πυρόλυση, αυτή η παρέμβαση ακαριαίας ψύξης των προϊόντων δε λαμβάνει χώρα. Έτσι, στην πρώτη περίπτωση (ταχεία πυρόλυση), ο χρόνος αντίδρασης είναι πολύ μικρότερος (~1 s [11]), καθώς διαρκεί μόλις μερικά δευτερόλεπτα, όταν στη δεύτερη περίπτωση μπορεί να διαρκεί από μερικά λεπτά έως και κάποιες ώρες [10]. Η ειδική περίπτωση της ταχείας πυρόλυσης όταν ο ρυθμός θέρμανσης είναι κοντά στους 10000 °C/min συχνά αποκαλείται και flash pyrolysis [12], [13].

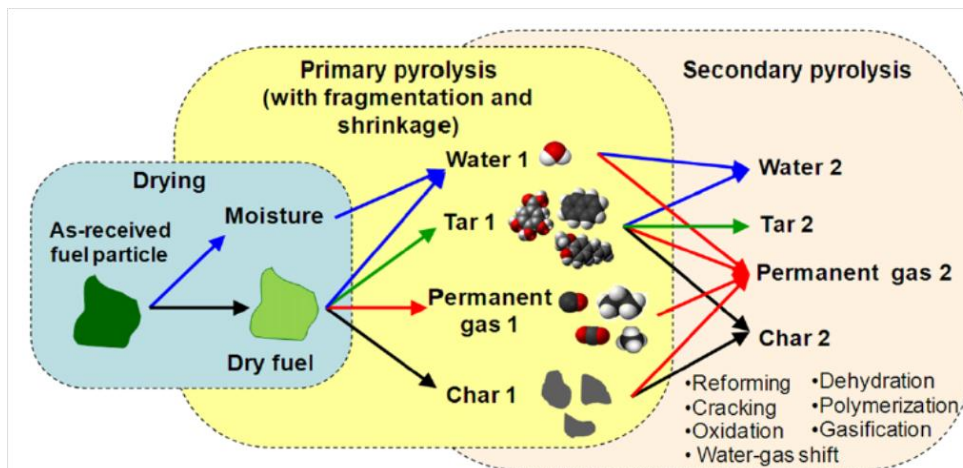
1.2. Η χημεία της πυρόλυσης βιομάζας

1.2.1. Μηχανισμός της διεργασίας

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η διεργασία της πυρόλυσης από χημική σκοπιά, περιγράφονται δηλαδή τα διάφορα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στο σωματίδιο της βιομάζας και αφορούν τις χημικές δομές που το απαρτίζουν.

Η διεργασία χαρακτηρίζεται από πολύ μεγάλη πολυπλοκότητα, όσον αφορά το πλήθος των χημικών αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα και των προϊόντων που σχηματίζονται κατά τη διάρκειά της [5]. Τα τρία πολυμερικά στοιχεία που απαρτίζουν την αρχική ποσότητα βιομάζας, κυτταρίνη, ημικυτταρίνη και λιγνίνη, κάτω από την επήρεια της θερμότητας που τους προσάγεται, αποδομούνται σε ένα πλήθος ενώσεων μικρότερου μοριακού βάρους [4]. Το φαινόμενο αυτό καλείται θερμική αποδόμηση (thermal degradation). Οι ενώσεις αυτές δύναται να συμμετέχουν εκ νέου σε αντιδράσεις μεταξύ τους (τύπου gas-gas reactions), σχηματίζοντας νέα προϊόντα, να αποδομηθούν περαιτέρω σε μικρότερα μόρια, αλλά και να αντιδράσουν με τα πρωταρχικά στοιχεία της βιομάζας (τύπου gas-solid reactions) [4],[6],[14].

Είναι φανερό πως η πυρόλυση βιομάζας λαμβάνει χώρα σε δύο ξεχωριστά αλλά όχι πάντα ευδιάκριτα μεταξύ τους στάδια, καθένα από τα οποία περιλαμβάνει τις δικές του θερμοχημικές αντιδράσεις. Έτσι, αφενός περιλαμβάνει το πρώτο στάδιο της πρωτεύουσας πυρόλυσης (primary pyrolysis) των πρωτεουσών αντιδράσεων (primary reactions), καθώς και ένα δεύτερο της δευτερεύουσας πυρόλυσης (secondary pyrolysis), αυτό των δευτερευουσών αντιδράσεων (secondary reactions). Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή της διεργασίας με τα στάδια αυτά για στερεή βιομάζα η οποία περιέχει κι ένα ποσό υγρασίας.



Σχήμα 1.2.1 Τα στάδια της πυρόλυσης και τα αντίστοιχα προϊόντα τους [10]

Πρωτεύουσες αντιδράσεις

- Σε πρώτη φάση, η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε σταδιακή εξάτμιση της υγρασίας (100 °C) και κατόπιν στην απελευθέρωση των πρωτευόντων οργανικών πτητικών ουσιών (primary volatiles) του καυσίμου (100-300 °C) [2] κυρίως από την περισσότερο ευαίσθητη στην θερμική αποδόμηση ημικυτταρίνη [4], σηματοδοτώντας την έναρξη της διεργασίας της πυρόλυσης. Στο ίδιο εύρος θερμοκρασιών οι δομές κυτταρίνης αποκτούν μικρότερο βαθμό πολυμερισμού [10].
- Οι αντιδράσεις που κυριαρχούν μέχρι τους 300°C είναι αφυδατώσεις και αντιδράσεις διάσπασης, οι οποίες γίνονται πιο έντονες ιδίως σε θερμοκρασίες υψηλότερες των 300 °C [12], καθώς αρχίζει και η μοριακή αποδόμηση της κυτταρίνης και της λιγνίνης [4].
- Η θερμοκρασία στην οποία θεωρείται πως ολοκληρώνονται οι παραπάνω πρωτεύουσες αντιδράσεις είναι οι 500 °C, χωρίς όμως το όριο αυτό να είναι απόλυτα ορισμένο [12].
- Ένα μέρος των πρωτευόντων πτητικών προϊόντων είναι συμπυκνώσιμο, δηλαδή μεταβαίνει στην υγρή φάση σε συνθήκες περιβάλλοντος (ambient conditions) και περιλαμβάνει μεγάλο πλήθος οργανικών δομών (tars). Το υπόλοιπο μέρος των πτητικών αυτών ουσιών αποτελείται από τα λεγόμενα μόνιμα αέρια, τα οποία παραμένουν στην αέρια φάση και μετά το τέλος της διεργασίας, δηλαδή όταν επανέλθουν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και ατμοσφαιρική πίεση.

Δευτερεύουσες αντιδράσεις [10]

- Εάν ο ρυθμός θέρμανσης και ο χρόνος παραμονής (residence time) επιτρέπουν την επίτευξη ακόμα υψηλότερων θερμοκρασιών αντίδρασης, άνω των 500 °C, η γενιά των προϊόντων της πρωτεύουσας πυρόλυσης (πρωτεύοντα προϊόντα), η οποία περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο, μπορεί να συμμετέχει σε επιπλέον αντιδράσεις.

- Οι δευτερεύουσες αυτές αντιδράσεις μπορεί να είναι αντιδράσεις διάσπασης, αλλά και πολυμερισμού, αφυδατώσεις οργανικών μορίων, αντιδράσεις οξειδωσης, αναμόρφωσης (reforming) και αεριοποίησης (gasification). Είναι δηλαδή αντιδράσεις που συμβαίνουν τόσο «παράλληλα», δηλαδή σε διαμοριακό επίπεδο, όσο και «σειριακά», δηλαδή αντιδράσεις μετασχηματισμού ενός μορίου. Αυτές έχουν σαν αποτέλεσμα μια ακόμα γενιά προϊόντων (δευτερεύοντα προϊόντα), αέριας, υγρής και στερεάς φάσης.
- Τα προϊόντα αυτά είναι αντίστοιχα αυτών της πρωτεύουσας πυρόλυσης (εξανθράκωμα, βιοέλαιο, μόνιμα αέρια), ωστόσο η σύστασή τους σε C, H, O καθώς και η μεταξύ τους αναλογία μάζας διαφέρει. Αν και δεν υπάρχει σαφές θερμοκρασιακό όριο άνω του οποίου παύουν οι δευτερεύουσες αντιδράσεις, έχει διαπιστωθεί πως οι περισσότερες αντιδράσεις διάσπασης συμβαίνουν έως και τους 750 °C [12]. Πρέπει να σημειωθεί πως οι πρωτεύουσες και δευτερεύουσες αντιδράσεις δε συμβαίνουν απαραίτητα διαδοχικά, αλλά μπορούν και ταυτόχρονα, σε διαφορετικά σημεία του σωματιδίου.

1.2.2. Επίδραση των συνθηκών αντίδρασης

Ενώ τα τελικά προϊόντα της πυρόλυσης μπορούν πάντα να ομαδοποιηθούν στις 3 παραπάνω κατηγορίες (εξανθράκωμα, βιοέλαιο και μόνιμα αέρια), η μεταξύ τους αναλογία μάζας αλλά και η χημική τους σύσταση μπορεί να ποικίλλει, ανάλογα με τις συνθήκες της αντίδρασης [10].

Ονομαστικά, αυτές είναι η σύσταση της βιομάζας (στοιχειακή ανάλυση, αναλογία συστατικών, περιεχόμενο τέφρας και εκχυλισμάτων, υγρασία), η θερμοκρασία της αντίδρασης, το μέγεθος των σωματιδίων που τροφοδοτούνται στον αντιδραστήρα και ο χρόνος παραμονής τους σε αυτόν και, τέλος, ο ρυθμός με τον οποίο παρέχεται θερμότητα στη βιομάζα [10].

Μέγεθος σωματιδίου βιομάζας

- Μικρό μέγεθος σωματιδίου επιταχύνει τις πρωτεύουσες αντιδράσεις, όπως την ξήρανση και την απελευθέρωση των πρωτευόντων πτητικών [10].
- Μεγαλύτερο μέγεθος εμποδίζει τα πτητικά να απελευθερωθούν από αυτό κατά την έναρξη της δευτερεύουσας πυρόλυσης, και άρα τόσο περισσότερο ευνοούνται οι αντιδράσεις αυτών [10].
- Όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος σωματιδίου τόσο ευνοούνται οι αντιδράσεις αφυδάτωσης των οργανικών ενώσεων, κι έτσι αυξάνεται η ποσότητα του πυρολυτικού ύδατος στο τελικό βιοέλαιο [10].

- Αύξηση του μεγέθους οδηγεί σε μικρότερη ποσότητα προϊόντων υγρής φάσης και υψηλότερη παραγωγή στερεού εξανθρακώματος [15].

Χρόνος παραμονής/αντίδρασης

- Μειωμένος χρόνος παραμονής δίνει μικρότερο περιθώριο στις δευτερεύουσες αντιδράσεις να λάβουν χώρα, κι έτσι αυξάνει τη σχετική αναλογία της σύστασης των πρωτευόντων προϊόντων έναντι των δευτερευόντων [10], [11].
- Εάν διαθέτουν αρκετό χρόνο, τα συμπυκνώσιμα πτητικά διασπώνται σε ελαφρότερα είδη, με αποτέλεσμα να επιτείνεται η παραγωγή μονίμων αερίων και να μειώνεται το ποσοστό του τελικού υγρού προϊόντος [10].
- Ταυτόχρονα ευνοούνται οι αντιδράσεις σχηματισμού εξανθρακώματος, έτσι για υψηλότερο χρόνο αντίδρασης παρατηρείται αύξησή του [15].
- Όταν ο μικρός χρόνος παραμονής συνοδεύεται από πολύ υψηλό ρυθμό θέρμανσης, κάτι που συμβαίνει στην περίπτωση της ταχείας πυρόλυσης, ελαχιστοποιείται το ποσό του στερεού υπολείμματος στα τελικά προϊόντα [16].

Θερμοκρασία

- Όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία της αντίδρασης, τόσο περισσότερο ευνοούνται οι αντιδράσεις μετατροπής των πρωτευόντων οργανικών υγρών σε μόνιμα αέρια [6], [10]. Για υψηλότερες θερμοκρασίες (500-800 °C) τα αέρια καταλαμβάνουν μεγαλύτερο μέρος των τελικών προϊόντων, και αντίστοιχα μειώνεται το ποσοστό των συμπυκνώσιμων οργανικών ενώσεων αλλά και του εξανθρακώματος [12].
- Σε χαμηλότερες θερμοκρασίες (400-500 °C), το κλάσμα μάζας του βιοελαίου είναι μεγαλύτερο, ενώ παράλληλα αυξάνεται και το ποσοστό του εξανθρακώματος [7], [15], [17].
- Αξίζει να σημειωθεί εδώ πως από πειράματα [12] έχει διαπιστωθεί πως η επίδραση της τελικής θερμοκρασίας είναι εντονότερη από αυτή του ρυθμού θέρμανσης της βιομάζας πάνω στη σύσταση των τελικών προϊόντων.

Καταλυτική επίδραση του εξανθρακώματος

Μία ακόμη παράμετρος που επηρεάζει την τελική σύσταση των προϊόντων είναι ο χρόνος επαφής και ανάμιξης του εξανθρακώματος με τα πρωτεύοντα πτητικά προϊόντα. Αυτό συμβαίνει διότι το εξανθράκωμα έχει πολύ συγκεκριμένη καταλυτική δράση σε αντιδράσεις διάσπασης των οργανικών πτητικών σε ενώσεις στερεάς φάσης, σε νερό και

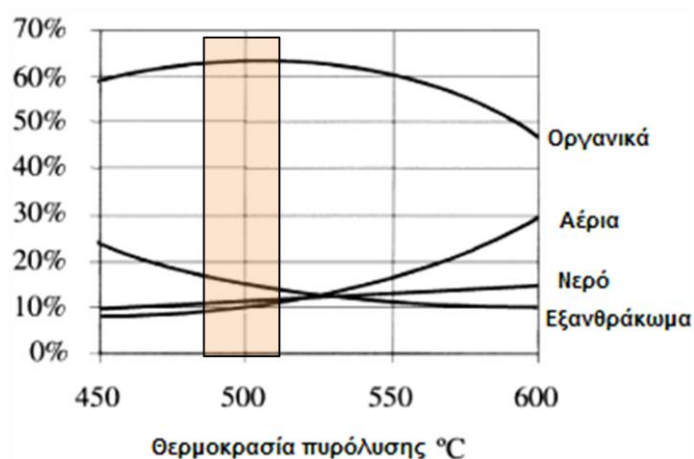
σε μόνιμα αέρια. Επομένως σε κάθε περίπτωση οδηγεί σε μείωση των προϊόντων υγρής φάσης που παράγονται [7], [18].

Στον παρακάτω πίνακα [6] δίνονται συνοπτικά τα κλάσματα μάζας των τριών φάσεων των προϊόντων της πυρόλυσης για ταχεία και συμβατική πυρόλυση, για διάφορες τιμές της μέγιστης θερμοκρασίας και για διάφορες τιμές χρόνου παραμονής των σωματιδίων στον αντιδραστήρα.

	Χρόνος παραμονής (s)	Ανώτερη θερμοκρασία (K)	Char	Liquid	Gas
Συμβατική πυρόλυση	1800	470	85-91	7-12	2-5
	1200	500	58-65	17-24	8-14
	900	550	44-49	26-30	16-22
	600	600	36-42	27-31	23-29
	600	650	32-38	28-33	27-34
	600	850	27-33	20-26	36-41
Αργή πυρόλυση	450	950	25-31	12-17	48-54
	200	600	32-38	28-32	25-29
	180	650	30-35	29-34	27-32
	120	700	29-33	30-35	32-36
	90	750	26-32	27-34	33-37
	60	850	24-30	26-32	35-43
Ταχεία πυρόλυση	30	950	22-28	23-29	40-48
	5	650	29-34	46-53	11-15
	5	700	22-27	53-59	12-16
	4	750	17-23	58-64	13-18
	3	800	14-19	65-72	14-20
	2	850	11-17	68-76	15-21
1	950	9-13	64-71	17-24	
Αεριοποίηση	1800	1250	7-11	4-7	82-89

Πίνακας 1.2.1 Θερμοκρασία, χρόνος παραμονής και αναλογία προϊόντων [6]

Στο ακόλουθο διάγραμμα [7] απεικονίζονται τα κλάσματα μάζας των διαφόρων συστατικών που αποτελούν τα τελικά προϊόντα σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας κατά την ταχεία πυρόλυση ξύλου, όπως αυτά αποτυπώνονται από πειραματικές μετρήσεις.



Σχήμα 1.2.2 Αναλογία των προϊόντων της ταχείας πυρόλυσης ξύλου [7]

Από πόσα εξηγήθηκαν στην περιγραφή του μηχανισμού της διεργασίας, είναι κατανοητό πως εάν στόχος της διεργασίας είναι η επίτευξη κατά το δυνατόν μέγιστων υγρών προϊόντων και δη βιοελαίου, τότε θα πρέπει να αποφευχθούν κατά το δυνατόν οι δευτερεύουσες αντιδράσεις που τείνουν να αυξήσουν την ποσότητα των μονίμων αερίων εις βάρος των οργανικών υγρών.

Πιο κάτω συνοψίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά και οι συνθήκες κάτω από τις οποίες η διεργασία της ταχείας πυρόλυσης οδηγεί σε μεγιστοποίηση της παραγωγής βιοελαίου, με βάση την ήδη υπάρχουσα εμπειρία [7], [18].

- Υψηλός ρυθμός παροχής θερμότητας στον αντιδραστήρα αλλά και στα αντιδρώντα σωματίδια. Για αυτό το σκοπό είναι απαραίτητο το μικρό τους μέγεθος (τάξεως των 3mm) [19]. Ο ρυθμός θέρμανσης της βιομάζας θα πρέπει να είναι 600-1000 W/cm² [19].
- Αυστηρά ελεγχόμενη θερμοκρασία κοντά στους 500 °C, καθώς σε αυτή έχουμε μεγιστοποίηση της παραγωγής των υγρών προϊόντων.
- Μικρός χρόνος παραμονής το πολύ 1 με 2 s προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι δευτερεύουσες αντιδράσεις [18].
- Γρήγορη αφαίρεση του παραγόμενου εξανθρακώματος, το οποίο δρα καταλυτικά για τις αντιδράσεις διάσπασης των πτητικών σε μόνιμα αέρια.
- Ταχεία ψύξη των πτητικών και των συμπυκνώσιμων ενδιάμεσων (πρωτευόντων) προϊόντων για την ανάκτηση του βιοελαίου.

Υπό τις παραπάνω συνθήκες, τυπικές τιμές για κλάσμα μάζας του κάθε προϊόντος είναι 70-75% βιοέλαιο, 10-20% εξανθράκωμα και 10-20% μόνιμα αέρια [7], [18], [19].

1.3. Τεχνικά στάδια της διεργασίας

Από τα ανωτέρω είναι φανερό πως στην περίπτωση που ο στόχος είναι η μεγιστοποίηση των προϊόντων υγρής φάσης (βιοέλαιο), θα πρέπει η διεργασία να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να προσεγγίζονται κατά το δυνατόν οι συνθήκες που επιτρέπουν κάτι τέτοιο. Πιο κάτω παρουσιάζονται τα βασικά τεχνικά στάδια που περιλαμβάνει η διαδικασία της ταχείας πυρόλυσης, τα οποία είναι τα εξής :

1. Συγκέντρωση και αποθήκευση βιομάζας
2. Άλεση και τεμαχισμός σε μικρά σωματίδια
3. Ξήρανση
4. Ταχεία Πυρόλυση
5. Διαχωρισμός εξανθρακώματος
6. Ανάκτηση συμπυκνώσιμων πτητικών (βιοέλαιο)

Τα τρία πρώτα στάδια αφορούν το χειρισμό και την προετοιμασία της βιομάζας και παρουσιάζονται στην επόμενη παράγραφο.

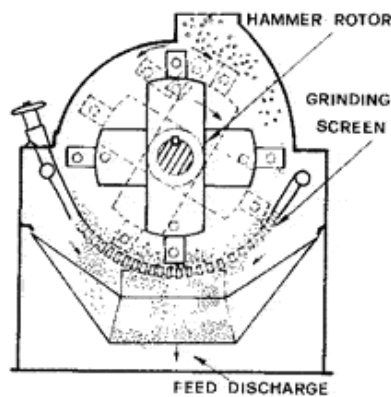
1.3.1. Χειρισμός και προετοιμασία της βιομάζας

Συγκέντρωση και αποθήκευση: Η βιομάζα αρχικά συγκεντρώνεται και αποθηκεύεται πλησίον του χώρου όπου λαμβάνει χώρα η διεργασία. Η μορφή στην οποία βρίσκεται μπορεί να είναι είτε chips, όταν είναι ξυλώδης, είτε μπάλες, στην περίπτωση αγροτικής προέλευσης αχυρώδους βιομάζας (πχ μίσχανθος, στάχυα). Ο τόπος που τελικά επιλέγεται για τη συγκέντρωσή της έχει σημασία για την οικονομικότητα του σχήματος ενεργειακής παραγωγής. Ο χώρος αποθήκευσης μπορεί να είναι ανοικτός, σε περίπτωση υψηλής θερμοκρασίας περιβάλλοντος ή ηλιοφάνειας, προκειμένου να επιτευχθεί φυσική ξήρανση της πρώτης ύλης έως ένα βαθμό. Αντιθέτως, σε περίοδο βροχοπτώσεων δεν ενδείκνυται η αποθήκευση σε εξωτερικό χώρο, καθώς η απορροφώμενη υγρασία προσθέτει επιπλέον ενεργειακές καταναλώσεις για τη διεργασία της ξήρανσης που ακολουθεί μετέπειτα.



Εικόνα 1.3.1. Chips ξύλου και μπάλες

Άλεση: Επειδή κατά την ταχεία πυρόλυση είναι απαραίτητη η επίτευξη πολύ υψηλών ρυθμών θέρμανσης, είναι σημαντικό τα σωματίδια της βιομάζας να έχουν κατά το δυνατόν μικρότερες διαστάσεις, καθώς έτσι υπάρχει υψηλός λόγος επιφάνειας ανά μονάδα όγκου του σωματιδίου που διευκολύνει τη μεταφορά θερμότητας [19]. Αυτό εξασφαλίζεται με τη χρήση μύλων που αλέθουν την αρχική βιομάζα και την κονιορτοποιούν. Ανάλογα με το είδος του αντιδραστήρα που χρησιμοποιείται, υπάρχουν διάφορα μέγιστα μεγέθη σωματιδίων που να επιτρέπουν επαρκή ρυθμό συναλλαγής θερμότητας. Ένας ακόμη λόγος που καθιστά την άλεση απαραίτητη είναι ότι το μικρότερο μέγεθος σωματιδίων βοηθά στην ευκολότερη απομάκρυνση του εξανθρακώματος από τα πτητικά, η οποία είναι αναγκαία για την αποφυγή δευτερευουσών αντιδράσεων όπου το εξανθράκωμα δρα καταλυτικά.



Σχήμα 1.3.1. Σφυροειδής μύλος άλεσης βιομάζας

Ξήρανση: Η συλλεχθείσα προς επεξεργασία βιομάζα υποβάλλεται σε ξήρανση πριν οδηγηθεί στον αντιδραστήρα. Η αφαίρεση της υγρασίας είναι απαραίτητη διότι αυτή μπορεί να απορροφήσει πολύ υψηλά ποσά ενέργειας με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας ατμοποίησης κατά την πυρόλυση, η οποία δεν είναι εξ'ολοκλήρου ανακτήσιμη κατά τη συμπύκνωση, κάνοντας έτσι τη διεργασία ενεργειακά δαπανηρότερη [19]. Ακόμα, η ξήρανση αποσκοπεί στη μείωση της περιεκτικότητας του τελικού βιοελαίου σε νερό και κατ'έπείταση την αύξηση της ενεργειακής του πυκνότητας [19].

Η ξήρανση μπορεί να επιτευχθεί είτε με φυσικό τρόπο, δηλαδή με έκθεση της βιομάζας στον ήλιο για ικανό χρονικό διάστημα, είτε με τη χρήση ρευμάτων θερμότητας (πχ μέσω ατμού) που παράγονται από την αξιοποίηση των παραπροϊόντων της διεργασίας (εξανθράκωμα, μόνιμα αέρια). Ο στόχος είναι η βιομάζα που εισέρχεται τον αντιδραστήρα να έχει περιεκτικότητα 5 έως 10 % w/w σε υγρασία [19]. Φυσικά, η ξήρανση απαιτεί κατανάλωση ενός ουσιώδους ποσού θερμότητας και επιβαρύνει ενεργειακά το ισοζύγιο της διεργασίας.



Εικόνα 1.3.2. Περιστρεφόμενος τυμπανοειδής ξηραντήρας

1.3.2. Τεχνικά χαρακτηριστικά αντιδραστήρων ταχείας πυρόλυσης

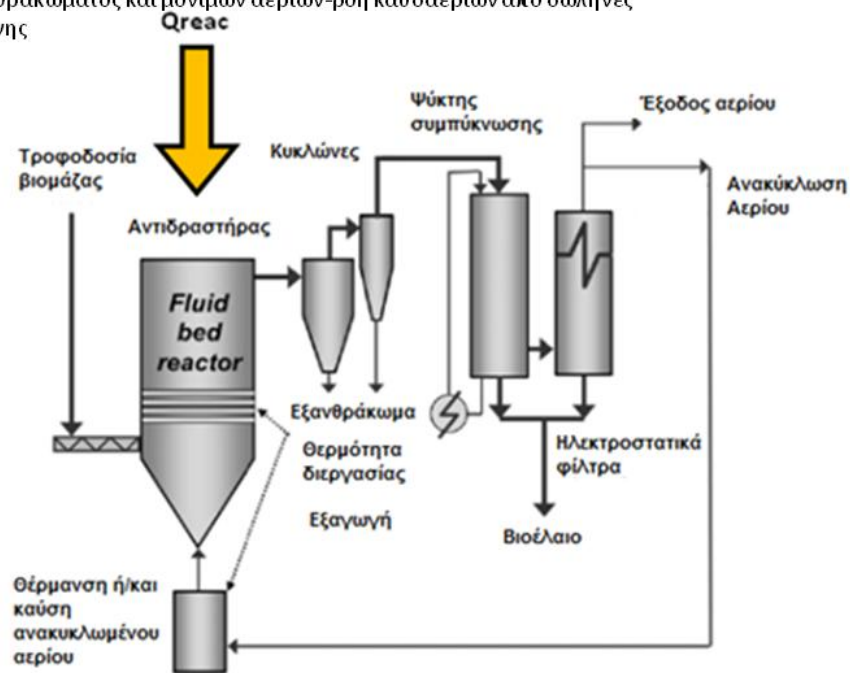
Καθώς ο αντιδραστήρας είναι ένα βασικό στοιχείο της όλης διεργασίας, αξίζει να αναφερθούν συνοπτικά τα βασικά χαρακτηριστικά των κατηγοριών των εμπορικά δημοφιλέστερων αντιδραστήρων και οι αρχές λειτουργίας τους.

- Αναβράζουσα ρευστοποιημένη κλίνη (Bubbling fluidized bed)

Γενικά στοιχεία και απαιτήσεις: Έχουν ιδιαίτερα διαδεδομένη εφαρμογή, με απλή κατασκευή και η λειτουργία, καλό έλεγχο της θερμοκρασίας, καθώς και πολύ υψηλή αποδοτικότητα στη μεταφορά θερμότητας στο στερεό σωματίδιο [5]. Το βιοέλαιο που παράγεται αποτελεί το 70-75 % της ξηρής βιομάζας που εισέρχεται στον αντιδραστήρα. Για την επίτευξη των απαραίτητων υψηλών ρυθμών θέρμανσης απαιτούνται σωματίδια αρκετά μικρού μεγέθους, το οποίο δεν πρέπει να ξεπερνά τα 2-3 mm [18], [19]. Το μικρό μέγεθος των σωματιδίων είναι επιπλέον απαραίτητο προκειμένου να εξασφαλίζεται η εξαγωγή του εξανθρακώματος από τον αντιδραστήρα, καθώς σε διαφορετική περίπτωση αυτό συσσωρεύεται στον αντιδραστήρα εμποδίζοντας τη ροή των προϊόντων [19].

Παροχή θερμότητας στον αντιδραστήρα

- Εισαγωγή αδρανούς θερμού αερίου ρευστοποίησης (N_2 , μόνιμα αέρια)
- Θέρμανση τοιχωμάτων αντιδραστήρα
- Καύση εξανθρακώματος και μονίμων αερίων-ροή καυσαερίων από σωλήνες εντός της κλίνης



Σχήμα 1.3.2. Αντιδραστήρας BFB και σύστημα συλλογής βιοελαίου [18]

Παροχή θερμότητας στον αντιδραστήρα : Ο πιο απλός τρόπος είναι μέσω της παροχής θερμού αερίου ρευστοποίησης στην κλίνη. Το αέριο αυτό θα πρέπει να είναι σχετικά αδρανές (πχ N_2, CO_2), καθώς η παρουσία οξυγόνου προκαλεί αντιδράσεις οξειδωσης ανταγωνιστικές των αντιδράσεων αποσύνθεσης που λαμβάνουν χώρα κατά την πυρόλυση. Γι' αυτό το λόγο, στην περίπτωση που χρησιμοποιείται καυσαέριο που προέρχεται από καύση των μονίμων αερίων ή εξανθρακώματος, θα πρέπει η καύση του να είναι στοιχειομετρική. Επίσης έχει διαπιστωθεί πως η θερμοκρασία του αερίου δεν πρέπει να είναι πολύ υψηλή, καθώς σε αυτή την περίπτωση οδηγεί σε αντιδράσεις διάσπασης των συμπυκνώσιμων πτητικών σε μόνιμα αέρια [9]. Γι' αυτό το λόγο, είναι προτιμότερη η χρήση αερίων σχετικά χαμηλότερης θερμοκρασίας και υψηλότερης παροχής [9].

Άλλοι τρόποι θέρμανσης του αντιδραστήρα είναι μέσω των επιφανειών συναλλαγής. Τέτοιες μπορεί να είναι είτε τα τοιχώματα του ίδιου του αντιδραστήρα, είτε θερμοσί σωλήνες που φέρουν καυσαέρια υψηλής θερμοκρασίας τα οποία προέρχονται από καύση του εξανθρακώματος [18]. Στην περίπτωση αυτή, το μίγμα των καυσαερίων δεν χρειάζεται να είναι πτωχό σε οξυγόνο, αφού δεν έρχεται σε άμεση επαφή με τη βιομάζα κι έτσι δεν υπάρχει η απαίτηση στοιχειομετρικής καύσης.

Στην περίπτωση της κλίνης ανακυκλοφορίας, είναι δυνατή η παροχή θερμότητας στον αντιδραστήρα με ανακυκλοφορία θερμής άμμου. Αυτή η μέθοδος θα παρουσιασθεί στην επόμενη παράγραφο.

Ο χρόνος παραμονής των στερεών σωματιδίων στον αντιδραστήρα, αλλά και των πτητικών πριν αυτά ψυχθούν είναι δυνατόν να ελεγχθεί μέσω της παροχής του αερίου που ρευστοποιεί την κλίνη.

Εξανθράκωμα: Ο διαχωρισμός του εξανθρακώματος από τα πτητικά πρέπει να γίνει το συντομότερο δυνατόν για την αποφυγή της αποδόμησης των συμπυκνώσιμων ουσιών σε μόνιμα αέρια και επιτυγχάνεται με την εγκατάσταση κυκλώνων υψηλής απόδοσης μετά την έξοδο του αντιδραστήρα και ενώ τα συμπυκνώσιμα πτητικά βρίσκονται ακόμα στην αέρια φάση, οπότε λαμβάνει χώρα φιλτράρισμα του θερμού αερίου (hot gas filtration) [18], [19]. Παρόλα αυτά, οι κυκλώνες δεν είναι ιδιαίτερα αποδοτικοί για τα μεγέθη των σωματιδίων εξανθρακώματος που παράγονται κατά την πυρόλυση, γι' αυτό και αναπόφευκτα ένα μέρος του καταλήγει στο βιοέλαιο [19]. Το παραγόμενο εξανθράκωμα που συλλέγεται και διαχωρίζεται αποτελεί το 15-20 % των τελικών προϊόντων, έχει όμως σχετικά υψηλό ενεργειακό περιεχόμενο (25% της ενέργειας της βιομάζας). Για αυτό το λόγο είναι δυνατόν να καεί προκειμένου να παραχθεί η θερμότητα που είναι αναγκαία για τη συντήρηση της διεργασίας. Σε διαφορετική περίπτωση όπου η αναγκαία θερμότητα προέρχεται από άλλες πηγές, το εξανθράκωμα διαχωρίζεται από την άμμο και εξάγεται [18].

Συλλογή πτητικών: Η συμπύκνωση των πτητικών γίνεται αφού αυτά διαχωριστούν από το εξανθράκωμα με την ραγδαία άμεση ψύξη τους στον συμπυκνωτή (quencher). Η απαγωγή θερμότητας γίνεται συνήθως με άμεση ψύξη, με ψεκάσμο ήδη παραχθέντος ψυχρού βιοελαίου [5], [11], [13] ή διαχωρίσιμου διαλύματος υδρογονανθράκων [5], ή και νερού [11]. Μία ακόμα επιλογή είναι η έμμεση απαγωγή θερμότητας με τη χρήση επιφανειών συναλλαγής [11]. Παρόλα αυτά η μέθοδος αυτή δεν ενδείκνυται καθώς οι συμπυκνωμένες ουσίες έχουν υψηλό ιξώδες και έτσι δύνανται να σχηματίσουν επικαθίσεις στις επιφάνειες συναλλαγής θερμότητας [5]. Η ανάκτηση του βιοελαίου που συμπυκνώνεται είναι μια πολύ σημαντική διαδικασία. Είναι απαραίτητη η κατά το δυνατόν διατήρηση των συστατικών που το απαρτίζουν, χωρίς αυτά να σπάσουν σε μόνιμα αέρια ή να πολυμεριστούν διαμορφώνοντας εξανθράκωμα [11].

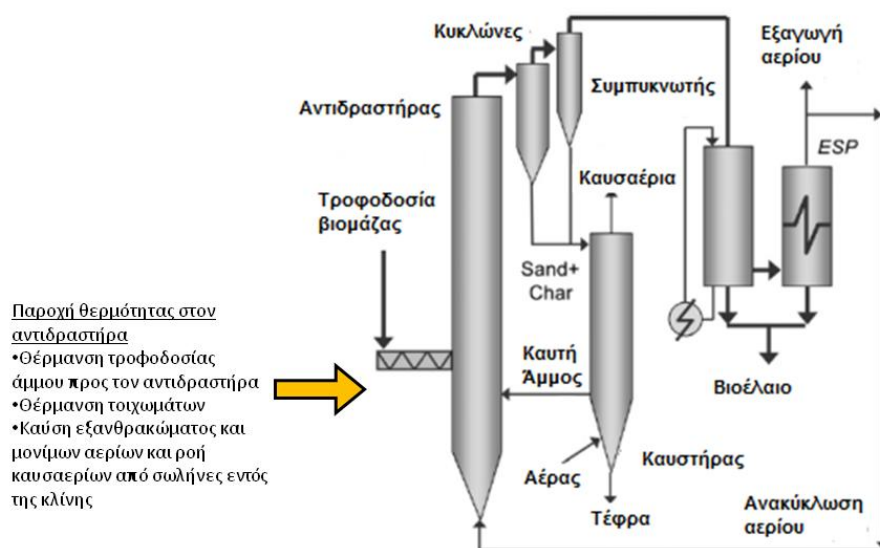
Ένα ιδιαίτερο πρόβλημα που σχετίζεται με την συμπύκνωση είναι η τάση των πτητικών να σχηματίζουν αερολύματα (aerosols) κατά την ψύξη τους, τα οποία πρέπει να απομακρύνονται. Για το σκοπό αυτό εγκαθίστανται κατάλληλες πλυντηρίδες (scrubbers) και ηλεκτροστατικά φίλτρα (electrostatic precipitators-ESP) μετά τον συμπυκνωτή [11], [18].

Μόνιμα αέρια: Τα μόνιμα αέρια που παράγονται μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη ρευστοποίηση της κλίνης αφού πρώτα καούν ή θερμανθούν, ώστε να παρέχουν κατ'αυτό τον τρόπο και επιπλέον θερμότητα στον αντιδραστήρα. Πρέπει να σημειωθεί και πάλι πως στην περίπτωση που τα αέρια καίγονται, θα πρέπει ο λόγος αέρα καύσης να είναι τέτοιος ώστε η περιεκτικότητα των καυσαερίων σε οξυγόνο να είναι κατά το δυνατόν μικρότερη προκειμένου να αποφευχθούν αντιδράσεις οξειδωσης της βιομάζας στον αντιδραστήρα οι οποίες έχουν σαν αποτέλεσμα τη μείωση του παραγόμενου βιοελαίου [19]. Σε περιπτώσεις που κρίνεται αποδοτικό, είναι δυνατή η καύση των αερίων για παραγωγή ατμού με σκοπό την ηλεκτροπαραγωγή [19].

- Ρευστοποιημένη κλίνη ανακυκλοφορίας (Circulating fluidized bed)

Γενικά στοιχεία και απαιτήσεις: Οι κλίνες αυτές μοιράζονται κάποια από τα χαρακτηριστικά των αναβράζουσων κλινών με τη βασική διαφορά ότι σε αυτές ο χρόνος παραμονής του εξανθρακώματος είναι υψηλότερος, ίδιος με αυτόν των πτητικών, καθότι αυτό δεν απομακρύνεται τόσο γρήγορα. Για αυτό το λόγο τα τελικά προϊόντα παρουσιάζουν υψηλότερη συγκέντρωση σε εξανθράκωμα, εκτός εάν υπάρξουν πρόσθετα μέτρα απομάκρυνσής του. Ακόμα, ο ρυθμός κίνησης της άμμου είναι 10 έως 20 φορές υψηλότερος, με υψηλότερο ενεργειακό κόστος για τη διεργασία λόγω της υψηλότερης πτώσης πίεσης στην κλίνη [19]. Οι κλίνες ανακυκλοφορίας παρουσιάζουν ωστόσο το πλεονέκτημα της δυνατότητας διαχείρισης υψηλότερων παροχών βιομάζας, κάτι που συμβαίνει στη βιομηχανία πετροχημικών [18].

Το μέγεθος των σωματιδίων της βιομάζας πρέπει να είναι σε αυτή την περίπτωση ακόμα μικρότερο (1-2 mm) από ότι στις αναβράζουσες κλίνες [19]. Αυτό συμβαίνει γιατί ο χρόνος παραμονής των σωματιδίων στον αντιδραστήρα κυμαίνεται από 0.5 έως 1 s κι έτσι τα μεγαλύτερου μεγέθους σωματίδια ενδέχεται να μην προλάβουν να απορροφήσουν αρκετή θερμότητα ώστε να αντιδράσουν [18]. Όπως και στην περίπτωση των αναβραζουσών κλινών, η ρευστοποίηση της κλίνης επιτυγχάνεται με τη χρήση των παραγόμενων μονίμων αερίων.



Σχήμα 1.3.3. Αντιδραστήρας CFB και σύστημα συλλογής βιοελαίου [17]

Εξανθράκωμα: Το εξανθράκωμα που συλλέγεται μαζί με την άμμο από τους κυκλώνες εισέρχεται σε έναν δεύτερο αντιδραστήρα καύσης όπου καίγεται με σκοπό την αναθέρμανση της άμμου που ανακυκλοφορεί στο εσωτερικό του αντιδραστήρα. Ο αντιδραστήρας αυτός μπορεί να είναι μια επίσης αναβράζουσα κλίνη ή κλίνη ανακυκλοφορίας [18].

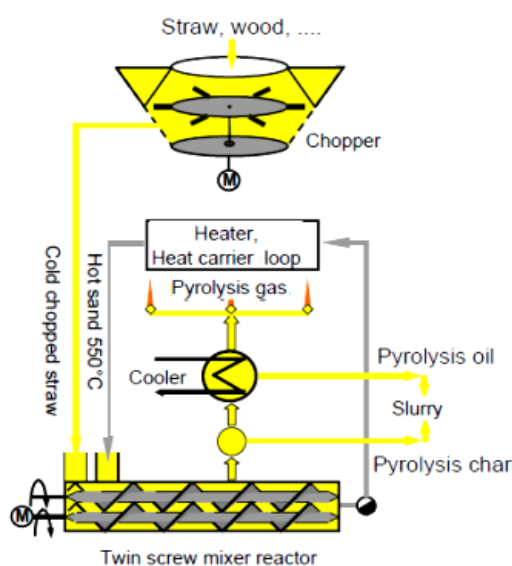
Συλλογή πτητικών: Η ταχεία ψύξη και συμπύκνωση των πτητικών δε διαφέρει στην ουσία από την περίπτωση της αναβράζουσας κλίνης, η οποία περιγράφηκε προηγουμένως. Η συνύπαρξη ουσιαστικά δύο κλινών για την ολοκλήρωση της διεργασίας καθιστά το όλο σύστημα περισσότερο πολύπλοκο σε σχέση με την απλή αναβράζουσα κλίνη που εξετάστηκε προηγουμένως και ογκοδέστερο, εξαιτίας της μεγαλύτερης ποσότητας άμμου που διακινείται [19]. Σαν αποτέλεσμα, υπεισέρχονται περισσότερες παράμετροι που πρέπει να ρυθμιστούν ώστε να εξασφαλίζονται οι επιθυμητές συνθήκες.

Παροχή θερμότητας στον αντιδραστήρα: Όπως και στους αντιδραστήρες αναβράζουσας ρευστοποιημένης κλίνης, η παροχή γίνεται με ανακυκλοφορία καυσαερίων από την καύση εξανθρακώματος και μονίμων αερίων. Από αυτή την άποψη, η διεργασία προσομοιάζει τη λειτουργία αεριοποιητή δίδυμων ρευστοποιημένων κλινών, με τη διαφορά ότι η θερμοκρασία του κύριου αντιδραστήρα είναι πολύ χαμηλότερη. Επιπλέον, είναι δυνατή η θέρμανση του αντιδραστήρα με την θέρμανση της τροφοδοτούμενης άμμου.

- Αντιδραστήρες ατέρμονος κοχλία (screw/auger reactors)

Σε αυτούς τους αντιδραστήρες η βιομάζα ωθείται με μηχανικό τρόπο και όχι με το μηχανισμό της ρευστοποίησης [18]. Από τη στιγμή που τα σωματίδια βιομάζας δεν έρχονται σε επαφή με κάποιο αέριο, η πρόσδοση θερμότητας σε αυτά γίνεται με ανακυκλοφορία θερμής άμμου. Η εν λόγω άμμος θερμαίνεται με τη βοήθεια χαλύβδινων ή κεραμικών σφαιρών, ή εξωτερικής θέρμανσης [18]. Είναι δύσκολο να επιτευχθεί μικρός χρόνος παραμονής της βιομάζας στον αντιδραστήρα, ενώ για τα πτητικά αυτός κυμαίνεται από 5 έως 30 s ανάλογα με το σχέδιο και το μέγεθός του. Το βασικό πλεονέκτημα των αντιδραστήρων ατέρμονος κοχλία είναι η δυνατότητα επεξεργασίας βιομάζας με μεγαλύτερο μέγεθος σωματιδίων, ή ακόμα και ετερογενούς σύστασης [18].

Μειονεκτούν ωστόσο, όσον αφορά την παραγωγή βιοελαίου, καθώς τα προϊόντα υγρής φάσης που δημιουργούνται είναι μικρότερης ποσότητας ενώ υψηλότερη είναι η παραγωγή εξανθρακώματος, σε σχέση με τους αντιδραστήρες ρευστοποιημένων κλινών. Στο KIT (Karlsruhe Institute of Technology) εφαρμόζεται η πρακτική της ανάμιξης του βιοελαίου με ένα μέρος του εξανθρακώματος. Έτσι, αντί του βιοελαίου υγρής φάσης, παράγεται ένα υδαρές (slurry) μίγμα βιοελαίου και εξανθρακώματος, το οποίο διαθέτει και υψηλότερο ενεργειακό περιεχόμενο.



Σχήμα 1.3.4. Αντιδραστήρας ατέρμονος κοχλία

Στον επόμενο πίνακα, ο οποίος βρίσκεται στην ιστοσελίδα [20] γίνεται μία τεχνική και τεχνολογική αποτίμηση διαφόρων ειδών αντιδραστήρων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ταχεία πυρόλυση.

Overview of fast pyrolysis reactor characteristics for bio-oil production

Property	Status	Bio-oil yield on dry biomass	Complexity	Feed size specification	Inert gas requirements	Specific reactor size	Scale up	Gas quality
Fluid bed	Commercial	75 wt.%	Medium	High	High	Medium	Easy	Low
CFB & Transported bed	Commercial	75 wt.%	High	High	High	Medium	Easy	Low
Rotating cone	Demonstration	70 wt.%	High	High	Low	Low	Medium	High
Entrained flow	Laboratory	60 wt.%	Medium	High	High	Medium	Easy	Low
Ablative	Laboratory	75 wt.%	High	Low	Low	Low	Difficult	High
Screw or Auger	Pilot	60 wt.%	Medium	Medium	Low	Low	Medium	High
Vacuum	None	60 wt.%	High	Low	Low	High	Difficult	Medium

Favourable feature
Moderate feature
Unfavourable feature

Commercial	2 t/h - 20 t/h
Demonstration	200-2000 kg/h
Pilot	20-200 kg/h
Laboratory	1-20 kg/h

Σχήμα 1.3.5 Χαρακτηριστικά αντιδραστήρων παραγωγής βιοελαίου [20]

1.4. Το βιοέλαιο

1.4.1. Χημική σύσταση

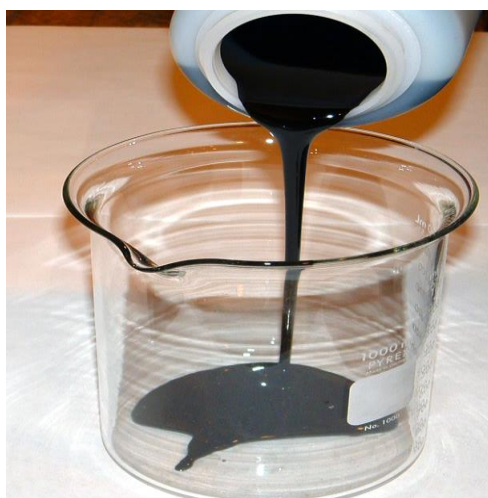
Δεδομένου ότι το βιοέλαιο είναι το τελικό προϊόν στην παραγωγή του οποίου αποσκοπεί η ταχεία πυρόλυση βιομάζας, αξίζει να αναφερθούν κάποια από τα βασικά του στοιχεία και ιδιότητές του, πέρα από όσα σημειώθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Μέχρι σήμερα, δεν έχουν οριστεί σε εθνικό ή διεθνές επίπεδο επίσημα χαρακτηριστικά καυσίμου για το βιοέλαιο, αν και κάποια πρωταρχικά στοιχεία έχουν προταθεί [19]. Στον παρακάτω πίνακα [22] δίνονται συγκεντρωμένες χημικές και φυσικές ιδιότητες διαφόρων μορφών βιοελαίου ποικίλης προέλευσης.

Η στοιχειακή αλλά και η τυπική σύσταση του βιοελαίου μπορεί να ποικίλλει σημαντικά, ανάλογα με το είδος βιομάζας από το οποίο προέρχεται και τις συνθήκες τις αντίδρασης κατά την οποία σχηματίστηκε.

	NREL 150 Pine	NREL 154 Oak	NREL 157 Switchgrass	NREL 160 Poplar	NREL 174 Poplar	NREL 175 Poplar	Ensyn Oak	No. 2 oil	No. 6 oil
Elemental (wt-% dry)									
C	56.3	55.6	69.9	64.4	59.3	57.1	58.0	87.3	87.7
H	6.5	5.0	6.7	7.0	6.6	6.6	6.3	12.9	10.3
O (by diff.)	36.9	39.2	22.4	28.3	33.8	36.3	35.8	-0.3	1.2
N	0.3	0.1	1.0	0.3	0.19	0.04	0.0	<0.01	0.48
S	-	-	-	-	0.00	0.04	-	0.1	0.80
Proximate (wt-%)									
ash	0.05	0.05	0.010	0.005	<0.001	<0.001	0.25	<0.001	0.07
water	18.5	16.1	30.2	29.7	27.2	20.6	21.5	0.0	2.3
volatiles	65.95	69.75	61.59	64.5	67.4	71.8	-	99.8	94.1
fixed C (by diff.)	15.5	14.1	8.2	5.8	5.4	7.6	-	0.1	3.6
total alkali (ppm)	80	130	22	29	14	13	860		
HHV (MJ/kg) ^a	18.7	18.9	21.1	19.0	17.5	17.6	19.1	43.8	40.9
LHV (MJ/kg) ^b	17.2	17.6	19.3	17.2	15.8	16.0	17.3	41.0	38.7
T _{ad} (K) ^c	1955	2113	1817	1761	1785	1846	1964	2229	2238
pH	2.9	2.8	3.0	3.1	-	2.8	2.8	•7 ^d	•7 ^d
viscosity (cSt) @ 40°C	44	115	6.2	22	11	18	33	2.6	-
density(g/ml) @ 40 °C	1.21	1.23	-	-	-	-	1.24	0.86	•0.95 ^d

Πίνακας 1.4.1. Σύσταση και ιδιότητες διαφόρων ειδών βιοελαίου [22]

Το βιοέλαιο έχει σκούρο καφέ χρώμα, και καπνώδη οσμή. Η εμφάνισή του είναι ομογενής και από μακροσκοπικής άποψης είναι μονοφασικό υγρό. Σε μικροσκοπικό επίπεδο, παρόλα αυτά, αποτελείται από πλήθος πολυφασικών δομών [21].



Εικόνα 1.4.1. Βιοέλαιο

Ένα μέρος της σύστασής του βιοελαίου είναι νερό, καθώς και κάποια στερεά υπολείμματα εξανθρακώματος και τέφρας που αναπόφευκτα καταλήγουν σε αυτό κατά

τη διεργασία της πυρόλυσης. Με φιλτράρισμα των πτητικών πριν τη συμπύκνωσή τους το τελικό ποσοστό τέφρας στο βιοέλαιο δεν ξεπερνά το 0.01% και των αλκαλικών μετάλλων τα 10 ppm [21]. Οι τιμές αυτές είναι κατά πολύ μικρότερες από τις αντίστοιχες όταν γίνεται μόνο χρήση κυκλώνων [19]. Το βιοέλαιο περιέχει ακόμα ένα πολύ μικρό ποσοστό εξανθρακώματος, που ανέρχεται στο 0.1% [23]. Το υπόλοιπο μέρος του συνίσταται σε ένα μίγμα μερικών εκατοντάδων υδρογονανθράκων [19], [21], ένα σημαντικό πλήθος των οποίων ακόμα δεν έχει ανιχνευθεί, λόγω των περιορισμών που υφίστανται στις υπάρχουσες αναλυτικές τεχνικές.

Τα οργανικά αυτά συστατικά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε πέντε ευρείες κατηγορίες : υδροξυαλδεύδες, υδροξυκετόνες, σάκχαρα, καρβοξυλικά οξέα και φαινόλες [19]. Η πλειοψηφία των οργανικών στοιχείων που απαντώνται στο βιοέλαιο βρίσκονται σε μικρές συγκεντρώσεις, καθώς μετά από το νερό, το χημικό με την υψηλότερη συγκέντρωση είναι η υδροξυακεταλδεύδη, με συγκέντρωση 10% κατά μάζα. Ακολουθούν το ακετικό και το φορμικό οξύ, με συγκεντρώσεις κατά μάζα 5 % και 3 % αντίστοιχα [19].

Η πολικότητα των συστατικών του βιοελαίου ποικίλλει. Έτσι αφενός περιέχει στοιχεία υψηλής πολικότητας (νερό, οξέα και αλκοόλες), χαμηλότερης πολικότητας (εστέρες, αιθέρες και φαινόλες) και στοιχεία μη πολικά (εξάνιο και άλλοι υδρογονάνθρακες) [21].

1.4.2. Ιδιότητες

Συνεκτικότητα: Η συνεκτικότητα των υγρών καυσίμων γενικότερα, άρα και του βιοελαίου, είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος καθώς επηρεάζει τη διαστασιολόγηση αντλιών και σωληνώσεων που τα διακινούν, ενώ καθορίζει τα σημεία λειτουργίας τους. Παράλληλα επηρεάζει τη λειτουργία των βαλβίδων ψεκασμού στην περίπτωση της έγχυσης τους σε θάλαμο καύσης, και κατ'επέκταση το μήκος της φλόγας που σχηματίζεται, την αποδοτικότητα της καύσης, και τα επίπεδα των ρύπων που εκπέμπονται [21], [22]. Εξαιτίας της παρουσίας μέρους εξανθρακώματος και συστατικών προερχόμενων από λιγνίνη υψηλού μοριακού βάρους, η συνεκτικότητα του βιοελαίου είναι ιδιαίτερα υψηλή. Παρόλ' αυτά, με την εφαρμογή βελτιωμένων τεχνολογιών στην απομάκρυνση του εξανθρακώματος και την έρευνα σε προσθετικά μείωσης της συνεκτικότητας, είναι δυνατή η ουσιαστικά μείωση του ιξώδους του βιοελαίου [22]. Η τιμή που λαμβάνει η συνεκτικότητα για διάφορα είδη βιοελαίου μπορεί να κυμαίνεται από 10 έως 100 cP στους 40 C [21] ή και 40 έως 100 cP [23].

Υγρασία: Το νερό, το οποίο καταλαμβάνει σημαντικό τμήμα της μάζας του βιοελαίου (25-30%), προέρχεται εν μέρει από την αρχική υγρασία της βιομάζας και εν μέρει από το πυρολυτικό ύδωρ. Η παρουσία του είναι αναπόφευκτη, και επιφέρει τόσο πλεονεκτήματα, όσο και μειονεκτήματα [10]. Αφενός, μειώνει την κατά μάζα θερμογόνο δύναμή του βιοελαίου. Παράλληλα, επειδή η διαλυτότητα των οργανικών πυρολυτικών υγρών στο νερό είναι περιορισμένη, στην περίπτωση που η περιεκτικότητα σε υγρασία

του βιοελαίου αυξηθεί υπερβολικά (άνω του 35% [22]), αυτό διαχωρίζεται σε δύο φάσεις, μία υδατώδη και μία οργανικής σύστασης. Το φαινόμενο αυτό καθιστά δυσχερή την εκμετάλλευση και τον χειρισμό του, γι'αυτό το λόγο πρέπει να αποφεύγεται όσο είναι δυνατόν η μείωση της υγρασίας της αρχικής βιομάζας που πυρολύεται [19]. Σε περίπτωση που το βιοέλαιο αεριοποιείται ή οξειδώνεται, η παρουσία του νερού μειώνει το βαθμό καύσης και την αδιαβατική θερμοκρασία φλόγας, ενώ οδηγεί σε πρόωρη εξάτμιση της υγρασίας και κατ'επέκταση σε δυσκολίες έγχυσης κατά την προθέρμανση. Από την άλλη, ωστόσο, η παρουσία του νερού μειώνει τη συνεκτικότητα του μίγματος. Επιπλέον, βοηθά στη μείωση εκπομπών ρυπαντών, και λόγω των χαμηλότερων θερμοκρασιακών προφίλ που προκαλεί η παρουσία του κατά την καύση, μειώνονται και οι εκπομπές NO_x [22]. Σε κάθε περίπτωση, το όποιο ποσό υγρασίας που περιέχει το βιοέλαιο είναι δύσκολο να απομακρυνθεί από αυτό με συμβατικές μεθόδους.

Οξυγόνο: Από χημικής απόψεως, το βιοέλαιο έχει υψηλή περεκτικότητα σε οξυγόνο (35-60% w/w) [21], αντίστοιχη με αυτή της βιομάζας από την οποία έχει προέλθει. Η έντονη αυτή παρουσία του οξυγόνου θεωρείται ο παράγοντας που το διαφοροποιεί περισσότερο σε σχέση με τα μη πολικά πετρελαιοειδή καύσιμα [21] με τα οποία, εξαιτίας των πολικών, οξυγονωμένων συστατικών του, δε μπορεί να αναμιχθεί. Ακόμη, η υψηλή περεκτικότητα του βιοελαίου σε οξυγόνο είναι ένας από τους λόγους της χαμηλής του θερμογόνου ικανότητας, ενώ παράλληλα έχει σαν αποτέλεσμα την χημική του αστάθεια [22] και τη διαβρωτικότητά του [21]. Οι αντιδράσεις συμπύκνωσης και πολυμερισμού στις οποίες συμμετέχει σε βάθος χρόνου οδηγούν σε αύξηση της κινηματικής του συνεκτικότητας και αύξηση της υγρασίας του που, όπως περιγράφηκε και προηγουμένως, αποτελούν σημαντικά τεχνικά εμπόδια στην εμπορική εκμετάλλευσή του [21], [22].

Τέφρα: Ενώ το μεγαλύτερο μέρος της τέφρας της αρχικής βιομάζας ενσωματώνεται στο στερεό εξανθράκωμα λόγω της σχετικά χαμηλής θερμοκρασίας της διεργασίας [21], [22] ένα πολύ μικρό ποσοστό αυτής αναπόφευκτα καταλήγει στο μίγμα του βιοελαίου. Το ποσοστό αυτό μπορεί να ποικίλλει και η τιμή του εξαρτάται, εκτός από την περιεκτικότητα της αρχικής βιομάζας σε τέφρα, από τις συνθήκες της διεργασίας και το είδος του αντιδραστήρα.

Τα μέταλλα που περιέχει η τέφρα θεωρούνται διαβρωτικά σε υψηλότερες θερμοκρασίες ενώ μπορούν να προκαλέσουν επικαθίσεις στις θερμικές συσκευές κατά την καύση του βιοελαίου [21]. Τα αλκαλικά μέταλλα καλίου και νατρίου μπορούν να τηχθούν και να κολλήσουν σε θερμές επιφάνειες όπως τα πτερύγια του στροβίλου και να τις διαβρώσουν [21], [22].

Παρολ' αυτά, η σύσταση του bio-oil σε τέφρα μετά από φιλτράρισμα των πτητικών κυμαίνεται γύρω στο 0.01 % [21], τιμή που θεωρείται ικανοποιητικά χαμηλή. Η συγκέντρωση των αλκαλικών μετάλλων, επίσης, δεν ξεπερνά τα 10 ppm [21].

Χημική ευστάθεια: Η χημική ευστάθεια του βιοελαίου είναι καθοριστικής σημασίας για τη δυνατότητα αποθήκευσής του μέχρι αυτό να αξιοποιηθεί ενεργειακά [19]. Σε

αντίθεση με τα συμβατικά πετρελαιοειδή, που μπορούν να αποθηκευθούν μέχρι και για έξι μήνες, ο μέγιστος χρόνος αποθήκευσης του βιοελαίου δεν πρέπει να ξεπερνά το διάστημα μερικών εβδομάδων έως μερικών μηνών [19].

Από τα προηγούμενα είναι φανερό πως η παρουσία του οξυγόνου καθιστά το βιοέλαιο ασταθές. Κατά την αποθήκευσή του λαμβάνουν χώρα πλήθος χημικών αντιδράσεων μεταξύ των συστατικών του [21]. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα άμεσα τελικά προϊόντα του δε βρίσκονται σε κατάσταση χημικής ισορροπίας, και τείνουν να την αποκαταστήσουν αντιδρώντας και σχηματίζοντας συστατικά υψηλότερου μοριακού βάρους [21]. Οι αντιδράσεις αυτές έχουν σαν αποτέλεσμα την μεταβολή της πολικότητάς του και κατά συνέπεια της διαλυτότητάς του, που μειώνεται, και του ιξώδους του, που αυξάνεται [10], [21].

Από έρευνες που έχουν γίνει για την εύρεση διαλυτών που εμποδίζουν τις αντιδράσεις μεταξύ των συστατικών του βιοελαίου που οδηγούν στη «γήρανσή» του, έχει βρεθεί πως η επίδρασή τους είναι εντονότερη όταν αυτοί προστεθούν σε νεαρής ηλικίας βιοέλαιο παρά σε μεγαλύτερης [19]. Χαρακτηριστική είναι η αποδοτικότητα της μεθανόλης ως διαλύτη, καθώς προσθήκη της σε ποσοστό 10% w/w. είναι ικανή να επιβραδύνει τη γήρανση του βιοελαίου έως και 17 φορές [19].

Ένας παράγοντας που επηρεάζει την ευστάθεια του βιοελαίου είναι και η θερμοκρασία. Σε υψηλότερες τιμές της, οι αντιδράσεις γήρανσης επιταχύνονται [21]. Κατά τη θέρμανση του βιοελαίου, διακρίνονται τέσσερα στάδια. Αρχικά γίνεται πιο παχύρρευστο. Στη συνέχεια, διαχωρίζονται οι φάσεις του. Στους 140 ° C διαμορφώνονται στερεές δομές από τις πυρολυτικές λιγνίνες, ενώ σε υψηλότερες θερμοκρασίες από αυτές παράγεται εξανθράκωμα και κωκ [21].

Θερμογόνος ικανότητα και στοιχεία καύσης: Η κατώτερη θερμογόνος ικανότητα του βιοελαίου βρίσκεται μεταξύ των 14-19 MJ/kg [21], [22]. Το βιοέλαιο συμπεριφέρεται αρκετά διαφορετικά από τα πετρελαιοειδή κατά την καύση. Αναφλέγεται πιο δύσκολα, αλλά καίγεται σταθερά. Η αδιαβατική θερμοκρασία φλόγας του κυμαίνεται από 1700 έως 2000 K, ενώ των συμβατικών καυσίμων από 2200 έως 2300 K. [22]. Ο στοιχειομετρικός λόγος αέρα καύσης είναι 7, ενώ για τα πετρελαιοειδή είναι γύρω στο 14 [22].

pH: Η παρουσία οργανικών οξέων, με χαρακτηριστικότητα το ακετικό και το φορμικό οξύ, έχει σαν αποτέλεσμα το βιοέλαιο να έχει pH από 2.6 έως 3.2 [22] και σύμφωνα με το [21] από 2 έως 4. Κατ'επέκταση, δεν είναι δυνατή η αποθήκευση και η μεταφορά του μέσα σε υλικά από συμβατικό χάλυβα. Επιπλέον, το βιοέλαιο είναι ιδιαίτερα διαβρωτικό στο αλουμίνιο και σε κράματα νικελίου. Η διαβρωτικότητά του αυξάνεται με αύξηση της θερμοκρασίας αλλά και αύξηση του περιεχομένου υγρασίας του [21]. Η λύση στο

παραπάνω πρόβλημα της μεταφοράς του είναι η χρήση δοχείων και δεξαμενών από ανοξείδωτο χάλυβα ή πολυπροπυλένιο [22], ή και κοβάλτιο [21].

Τοξικότητα και περιβάλλον : Προς το παρόν τα αποτελέσματα από μελέτες που έχουν γίνει σε διάφορα είδη βιοελαίου είναι πολύπλοκα και απαιτούν περισσότερη ανάλυση, ωστόσο το γενικό συμπέρασμα είναι πως το βιοέλαιο δεν εμπεριέχει σημαντικούς κινδύνους για την υγεία και το περιβάλλον [18].

2. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΠΥΡΟΛΥΣΗΣ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η μοντελοποίηση της διεργασίας της πυρόλυσης. Το πρώτο μέρος της μοντελοποίησης περιλαμβάνει την περιγραφή του μοντέλου πρόβλεψης της σύστασης και της αναλογίας των προϊόντων που προκύπτουν από την ταχεία πυρόλυση. Στη συνέχεια γίνεται η περιγραφή του ενεργειακού ισοζυγίου της, και παρουσιάζονται οι διάφορες μέθοδοι υπολογισμού της ενέργειας που είναι απαραίτητη για τη διεκπεραίωσή της. Τέλος, μέσω του Aspen PlusTM, γίνεται η εφαρμογή του μοντέλου με σκοπό τον υπολογισμό της ποσότητας του εξανθρακώματος που πρέπει να αξιοποιηθεί θερμικά για την κάλυψη των θερμικών καταναλώσεων της διεργασίας για αναβράζουσα ρευστοποιημένη κλίνη.

2.1. Δυσκολίες μοντελοποίησης

Ο ρόλος που θα έχει ένα μοντέλο προσομοίωσης της ταχείας πυρόλυσης είναι να μπορεί να προβλέψει με σχετική ακρίβεια τη φύση και τις ιδιότητες των προϊόντων (ποσότητα, σύσταση, και θερμογόνο ικανότητα). Η δυσκολία που παρουσιάζεται σε μια αναλυτική μοντελοποίηση της πυρόλυσης έγκειται στο γεγονός ότι είναι δυσχερής η προσέγγισή της μέσω γνωστών μεθοδολογιών όπως η κινητική των αντιδράσεων, επειδή αυτές που λαμβάνουν χώρα είναι πολλές, μεγάλο μέρος των οποίων παραμένουν άγνωστες, και ο μηχανισμός τους δεν είναι ακόμη κατανοητός [13], [24]. Το δε σύστημά τους είναι πολυδιάστατο, ενώ τα ενδιάμεσα προϊόντα που σχηματίζονται δεν είναι πάντα γνωστά. Λόγω του μικρού χρόνου αντίδρασης η υπόθεση της χημικής ισορροπίας δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα, καθώς αυτή δεν επιτυγχάνεται κατά τη διεργασία. Ακόμη, λόγω της ευαισθησίας του μηχανισμού που ακολουθεί η αντίδραση σε πλήθος συνθηκών, δεν υπάρχει ακόμα ένα οριστικά καθολικά αποδεκτό μοντέλο χημικής κινητικής [26].

Εξάλλου, ο στόχος της παρούσας εργασίας είναι η οικονομική ανάλυση της διεργασίας της ταχείας πυρόλυσης, επομένως το μέγεθος που συγκεντρώνει το βασικό ενδιαφέρον είναι η πρόβλεψη της ενέργειας της διεργασίας, καθώς και τα θερμικά χαρακτηριστικά των προϊόντων, όπως η ενεργειακή τους πυκνότητα. Γι αυτό το λόγο, στο μοντέλο που αναπτύσσεται στην παρούσα εργασία η πρόβλεψη της σύστασης και της αναλογίας των παραγόμενων προϊόντων γίνεται ημιεμπειρικά μέσω συσχετίσεων-σχέσεων συναρτήσεων της θερμοκρασίας και της αρχικής σύστασης που έχουν προκύψει από πειραματικά δεδομένα και διατίθενται στην βιβλιογραφία.

2.2. Υπολογισμός της σύστασης και της θερμογόνου ικανότητας των προϊόντων

2.2.1. Μαθηματική περιγραφή του μοντέλου

Το πρώτο βήμα της μοντελοποίησης αποσκοπεί στην πρόβλεψη της ποσότητας των daf προϊόντων που παράγονται ανά daf kg βιομάζας και της daf σύστασής τους. Βασίζεται σε ένα εκτενές πλήθος δεδομένων που συγκεντρώθηκαν από πειράματα τόσο ταχείας όσο και συμβατικής πυρόλυσης σε διάφορες θερμοκρασίες για διαφορετικά είδη βιομάζας σε ποικίλους τύπους αντιδραστήρων και για διάφορες τιμές χρόνου αντίδρασης και κατανομές μεγέθους σωματιδίων [10]. Από τα πειραματικά αυτά δεδομένα διατυπώνονται ημ εμπειρικές συσχετίσεις για τον προσδιορισμό των ζητούμενων μεγεθών με θεμελιώδη παράμετρο την θερμοκρασία και τη σύσταση της αρχικής βιομάζας [10]. Για τους υπολογισμούς της θερμογόνου ικανότητας των αντιδρώντων και προϊόντων, καθώς και για τον υπολογισμό των ενθαλπιών τους, που είναι απαραίτητες για την εύρεση της ενέργειας της διεργασίας, γίνονται επιπλέον παραδοχές που εξηγούνται στη συνέχεια.

Τα πειραματικά δεδομένα [10] που αξιοποιούνται περιλαμβάνουν πάνω από 60 διαφορετικά είδη βιομάζας. Το μέγεθος και το σχήμα των σωματιδίων της βιομάζας που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζουν έντονη ποικιλομορφία (για παράδειγμα το μέγεθος κυμαίνεται μεταξύ 0,1 και 100 mm). Ακόμα, τα πειράματα έγιναν σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται μεταξύ 200 και 1000 $^{\circ}C$. Επιπλέον, ο ρυθμός θέρμανσης επίσης παρουσιάζει έντονη διακύμανση, καθώς κάποια από τα πειράματα είναι συμβατικής πυρόλυσης, ενώ άλλα ταχείας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το μοντέλο που αναπτύσσεται να έχει μεν μία γενικότερη περιγραφική ισχύ της διεργασίας της πυρόλυσης, αλλά να παρουσιάζει αποκλίσεις στην περίπτωση της ταχείας πυρόλυσης, η οποία αποτελεί το αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Για την καλύτερη μοντελοποίηση της ταχείας πυρόλυσης, το μοντέλο τροποποιείται ελαφρώς, όπως θα φανεί στη συνέχεια.

Οι συμβολισμοί και οι δείκτες που χρησιμοποιούνται δίνονται στον ακόλουθο πίνακα

Σύμβολα

$y_{a,b}$: κλάσμα μάζας του στοιχείου b στο συστατικό α

$Y_{a,b}$: αναλογία μάζας παραγόμενου προϊόντος b ανά kg συστατικού α

LHV_a : κατώτερη θερμογόνος ικανότητα συστατικού α

HHV_a : ανώτερη θερμογόνος ικανότητα συστατικού α

FC_a % ποσοστό σταθερού άνθρακα του συστατικού α (ξηρή βάση)-τυπική ανάλυση

VM_a % ποσοστό πτητικής ύλης του συστατικού α (ξηρή βάση)-τυπική ανάλυση

ASH_a % ποσοστό τέφρας του συστατικού α (ξηρή βάση)-τυπική ανάλυση

Συστατικά:

bio : βιομάζα

ch : εξανθράκωμα

bio-oil : βιοέλαιο

G : μόνιμα αέρια

tar : πίσσες-οργανικό μέρος βιοελαίου (ξηρό χωρίς τέφρα βιοέλαιο)

H₂O : πυρολυτικό ύδωρ (νερό που σχηματίζεται κατά τη διεργασία)

V : πτητικά

Δείκτες

daf : ξηρό χωρίς τέφρα συστατικό

db : ξηρό συστατικό

ar : ως έχει συστατικό

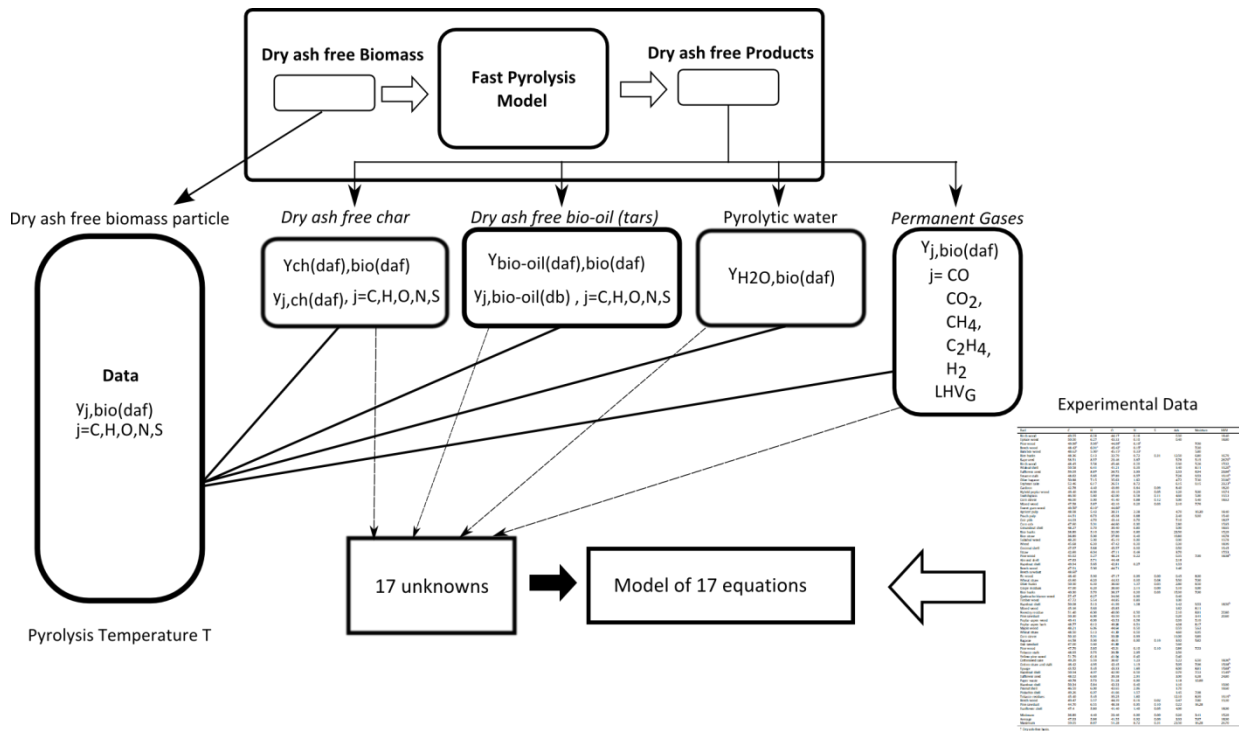
M : υγρασία συστατικού

ash : τέφρα

Πίνακας 2.2.1. Συμβολισμοί μοντελοποίησης

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται ο μηχανισμός βάσει του οποίου γίνεται το πρώτο βήμα της μοντελοποίησης της πυρόλυσης. Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται είναι η θερμοκρασία της διεργασίας, καθώς και η σύσταση της αρχικής βιομάζας. Από τις ημιεμπειρικές εξισώσεις του μοντέλου, γίνεται ο υπολογισμός της παραγόμενης ποσότητας των συστατικών των μονίμων αερίων, του daf εξανθρακώματος, του daf βιοελαίου και του πυρολυτικού ύδατος ανά kg daf βιομάζας. Παράλληλα, γίνεται υπολογισμός της daf σύστασης του εξανθρακώματος και του βιοελαίου για τα στοιχεία C, H, O, ενώ γίνεται και η πρόβλεψη της κατώτερης θερμογόνου ικανότητας του μίγματος μονίμων αερίων.

Υπάρχουν 17 συνολικά άγνωστοι προς εύρεση, οι οποίοι υπολογίζονται από την επίλυση του συστήματος των 17 εξισώσεων.



Σχήμα 2.2.1. Μηχανισμός μοντέλου πυρόλυσης [10]

Στον πίνακα της επόμενης σελίδας, παρατίθενται οι 17 εξισώσεις που χρησιμοποιούνται. Οι εξισώσεις αυτές αποτελούν ημιεμπειρικές συσχετίσεις με παράμετρο τη θερμοκρασία για τη στοιχειακή ανάλυση του εξανθρακώματος και του βιοελαίου, την ποσότητα του παραγόμενου εξανθρακώματος, και τις παραγόμενες ποσότητες των μονίμων αερίων. Οι εξισώσεις αυτές συμπληρώνονται από ένα σύστημα 4 εξισώσεων στοιχειακής ισορροπίας για τα C, H και O, καθώς και για τη θερμογόνο ικανότητα του μίγματος των μονίμων αερίων. Στην επόμενη σελίδα παρατίθενται σε πίνακα οι επιπλέον παραδοχές που γίνονται για την ολοκλήρωση της μοντελοποίησης, οι οποίες αφορούν την τέφρα και την υγρασία της αρχικής βιομάζας, τη θερμογόνο ικανότητα των διαφόρων συστατικών και την τυπική τους ανάλυση.

Ισοζύγιο μάζας

$$y_{bio(daf),bio(ar)} + y_{ash,bio(ar)} + y_{M,bio(ar)} = Y_{ch(daf),bio(ar)} + Y_{V,bio(ar)} + y_{ash,bio(ar)} + y_{M,bio(ar)} \quad (2.2.1)$$

$$Y_{V,bio(ar)} = Y_{bio-oil(daf),bio(ar)} + Y_{H_2O,bio(ar)} + Y_{G,bio(ar)} \quad (2.2.2)$$

$$Y_{G,bio(ar)} = Y_{C_2H_4,bio(ar)} + Y_{CH_4,bio(ar)} + Y_{CO_2,bio(ar)} + Y_{H_2,bio(ar)} + Y_{CO,bio(ar)} \quad (2.2.3)$$

Μοντέλο υπολογισμού στοιχειακής daf σύστασης προϊόντων-17 εξισώσεις [10]

Αέρια

$$Y_{H_2,bio(daf)} = 1.145 \cdot (1 - \exp(-0.11 \cdot 10^{-2} \cdot T))^{9.384} \quad R^2 = 0.94 \quad (2.2.4)$$

$$\frac{Y_{H_2,bio(daf)}}{Y_{CO,bio(daf)}} = 3 \cdot 10^{-4} + \frac{0.0429}{1 + \left(\frac{T}{632}\right)^{-7.23}} \quad R^2 = 0.73 \quad (2.2.5)$$

$$Y_{CH_4,bio(daf)} = -2.18 \cdot 10^{-4} + 0.146 \cdot Y_{CO,bio(daf)} \quad R^2 = 0.88 \quad (2.2.6)$$

$$LHV_G = -6.23 + 2.47 \cdot 10^{-2} \cdot T \quad R^2 = 0.78 \quad (2.2.7)$$

Εξανθράκωμα

$$Y_{ch(daf),bio(daf)} = 0.106 + 2.43 \cdot \exp(-0.66 \cdot 10^{-2} \cdot T) \quad R^2 = 0.56 \quad \star \quad (2.2.8)$$

$$y_{C,ch(daf)} = 0.93 - 0.92 \cdot \exp(-0.42 \cdot 10^{-2} \cdot T) \quad R^2 = 0.65 \quad (2.2.9)$$

$$y_{H,ch(daf)} = -0.41 \cdot 10^{-2} + 0.10 \cdot \exp(-0.24 \cdot 10^{-2} \cdot T) \quad R^2 = 0.75 \quad (2.2.10)$$

$$y_{O,ch(daf)} = 0.07 + 0.85 \cdot \exp(-0.48 \cdot 10^{-2} \cdot T) \quad R^2 = 0.56 \quad (2.2.11)$$

Βιοέλαιο

$$\frac{y_{C,bio-oil(db)}}{y_{C,bio(daf)}} = 1.05 + 1.9 \cdot 10^{-4} \cdot T \quad R^2 = 0.07 \quad (2.2.12)$$

$$\frac{y_{O,bio-oil(db)}}{y_{O,bio(daf)}} = 0.92 - 2.2 \cdot 10^{-4} \cdot T \quad R^2 = 0.07 \quad (2.2.13)$$

$$y_{H,bio-oil(db)} = 1 - (y_{C,bio-oil(db)} + y_{O,bio-oil(db)}) \quad (2.2.14)$$

$$y_{N,bio-oil(db)} = 0 \quad (2.2.15)$$

$$y_{S,bio-oil(db)} = 0 \quad (2.2.16)$$

Σύστημα εξισώσεων ισοζυγίου C,H,O

(2.2.17-20)

$$\begin{bmatrix} y_{C,bio-oil(db)} & y_{C,C_2H_4} & y_{C,CH_4} & y_{C,CO} & y_{C,CO_2} & 0 & 0 \\ y_{H,bio-oil(db)} & y_{H,C_2H_4} & 0 & 0 & 0 & y_{H,H_2O} & y_{H,H_2} \\ y_{O,bio-oil(db)} & 0 & 0 & y_{O,CO} & y_{O,CO_2} & y_{O,H_2O} & 0 \\ LHV_G & LHV_{C_2H_4} & LHV_{CH_4} & LHV_{CO} & 0 & LHV_G & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Y_{bio-oil(daf),bio(daf)} \\ Y_{C_2H_4,bio(daf)} \\ Y_{CH_4,bio(daf)} \\ Y_{CO,bio(daf)} \\ Y_{CO_2,bio(daf)} \\ Y_{H_2O,bio(daf)} \\ Y_{H_2,bio(daf)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{C,bio(daf)} - y_{C,ch(daf)} \cdot Y_{ch(daf),bio(daf)} \\ y_{H,bio(daf)} - y_{H,ch(daf)} \cdot Y_{ch(daf),bio(daf)} \\ y_{O,bio(daf)} - y_{O,ch(daf)} \cdot Y_{ch(daf),bio(daf)} \\ \left(\sum_j y_{j,bio(daf)} - Y_{ch(daf),bio(daf)} \cdot \sum_j y_{j,ch(daf)} \right) \cdot LHV_G \end{bmatrix}$$

Πίνακας 2.2.2. Σύνοψη εξισώσεων που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο πρόβλεψης της C,H,O σύστασης των daf προϊόντων και των ποσοτήτων τους, τη σύσταση των μονίμων αερίων και τη θερμογόνο δύναμή τους

Επιπλέον παραδοχές μοντέλου

Για την συνολική μοντελοποίηση της πυρόλυσης γίνονται κάποιες επιπλέον παραδοχές. Η τέφρα της αρχικής βιομάζας ενσωματώνεται στο εξανθράκωμα :

$$y_{ash,bio(ar)} = Y_{ch(db),bio(ar)} \cdot y_{ash,ch(db)} \quad (2.2.21)$$

$$y_{M,ch(ar)} = 0 \quad (2.2.22)$$

$$y_{M,bio(ar)} + Y_{H_2O,bio(ar)} = Y_{bio-oil(ar),bio(ar)} \cdot y_{M,bio-oil(ar)} \quad (2.2.23)$$

$$y_{ash,bio-oil(ar)} = 0$$

(2.2.24)

$$Y_{ch(ar),bio(db)} = 0.000958 \cdot T^2 - 1.099317 \cdot T + 323.405183 \quad R^2 = 0.99 \quad (2.2.25)$$

Η υγρασία του εξανθρακώματος είναι μηδενική :

$$y_{M,ch(ar)} = 0 \quad (2.2.26)$$

Η αρχική υγρασία της βιομάζας καθώς και το πυρολυτικό ύδωρ καταλήγουν στο βιοέλαιο

$$y_{M,bio(ar)} + Y_{H_2O,bio(ar)} = Y_{bio-oil(ar),bio(ar)} \cdot y_{M,bio-oil(ar)} \quad (2.2.27)$$

Το βιοέλαιο δεν περιέχει τέφρα :

$$y_{ash,bio-oil(ar)} = 0$$

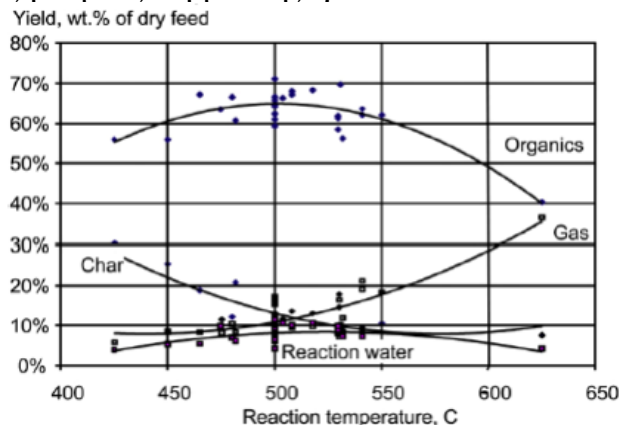
(2.2.28)

Για περιπτώσεις ταχείας πυρόλυσης υψηλών ρυθμών θέρμανσης κοντά στους 500 °C η ποσότητα του παραγόμενου εξανθρακώματος ανά μονάδα ξηρού καυσίμου περιγράφεται πιο ικανοποιητικά από την εξίσωση :

$$Y_{ch(ar),bio(db)} = 0.000958 \cdot T^2 - 1.099317 \cdot T + 323.405183 \quad R^2 = 0.99, \quad (2.2.29)$$

η οποία βρέθηκε με αναδρομή από διάγραμμα [18]

Η εξίσωση που υπάρχει στο [10] χρησιμοποιείται για εύρος ρυθμών θέρμανσης που περιλαμβάνει και χαμηλές τιμές, μέχρι και 10 °C/s, που στην πράξη δεν συναντώνται σε διεργασίες ταχείας πυρόλυσης. Το διάγραμμα [18] παριστάνει πειραματικές τιμές προϊόντων για υψηλούς ρυθμούς θέρμανσης, γιατί και είναι πιο ακριβές.



Σχήμα 2.2.2. Αναλογία προϊόντων ταχείας πυρόλυσης [18]

Έτσι τελικά η εξίσωση (2.2.8) αντικαθίσταται από την εξίσωση

$$Y_{ch(daf),bio(daf)} = Y_{ch(ar),bio(db)} + y_{ash,bio(ar)} \cdot (Y_{ch(ar),bio(db)} - 1) \quad (2.2.30)$$

Πίνακας 2.2.3. Επιπλέον παραδοχές μοντέλου

Θερμογόνος ικανότητα και τυπική ανάλυση των συστατικών

Για τη θερμογόνο ικανότητα των συστατικών, χρησιμοποιούνται διάφορες συσχετίσεις, οι οποίες συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα.

Σχέση	Εξίσωση	
Dulong (1880) [25]	$HHV_{db} = 0.3383C + 1.443(H - \frac{O}{8}) + 0.0942S (MJ / kg)$	(2.2.31)
Boie (1953) [25]	$HHV_{db} = 0.3517C + 1.1626H + 0.1047S - 0.111O (MJ / kg)$	(2.2.32)
Vondracek (1927)[25]	$HHV_{db} = (0.373 - 0.00026C) \cdot C + 1.444(H - (1/10)O) + 0.1047S (MJ / kg)$	(2.2.33)
IGT (1978)[25]	$HHV_{db} = 0.341C + 1.323H + 0.0685 - 0.0153A - 0.1194(O + N) (MJ / kg)$	(2.2.34)
Chaniwala (2001)[25]	$HHV_{db} = 0.3491C + 1.1783H + 0.1005S - 0.1034O - 0.0151N - 0.0211A (MJ / kg)$	(2.2.35)
Friedl (2005) [26]	$HHV_{db} = 3.55C^2 - 232C - 2230H + 51.2C \cdot H + 131N + 20600 (kJ / kg)$	(2.2.36)

Πίνακας 2.2.4. Προσεγγιστικές συσχετίσεις ανώτερης θερμογόνου ικανότητας [25], [26]

Στις παραπάνω σχέσεις, χρησιμοποιείται η % db σύσταση των στοιχείων και της τέφρας για τον υπολογισμό της θερμογόνου ικανότητας. Χρησιμοποιήθηκε η σχέση **Chaniwala** για το **βιοέλαιο** και το **εξανθράκωμα** και η σχέση **Friedl** για τη **βιομάζα**. Εάν η τιμή της βιομάζας είναι γνωστή πειραματικά, μπορεί να εισαχθεί από το χρήστη.

Η τυπική ανάλυση είναι απαραίτητη για επιπλέον θερμοδυναμικούς υπολογισμούς που παρουσιάζονται στην επόμενη παράγραφο. Η τυπική ανάλυση της βιομάζας ορίζεται από το χρήστη. Σε περίπτωση που δεν υπάρχουν στοιχεία, μια τυπική τιμή για το ποσοστό σταθερού άνθρακα της βιομάζας είναι 16%, οπότε το ποσοστό VM μπορεί να υπολογιστεί από τη διαφορά εάν το ποσοστό ASH είναι γνωστό. Για το βιοέλαιο και το εξανθράκωμα χρησιμοποιούνται τιμές που συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα :

Συστατικό	FC% (db)	VM% (db)	ASH% (db)	Moisture%
Βιοέλαιο	25 [28]	75 [28]	ο	Μοντέλο
Εξανθράκωμα	50 [27]	Διαφορά	Μοντέλο	ο

Πίνακας 2.2.5. Τυπική ανάλυση βιοελαίου και εξανθρακώματος

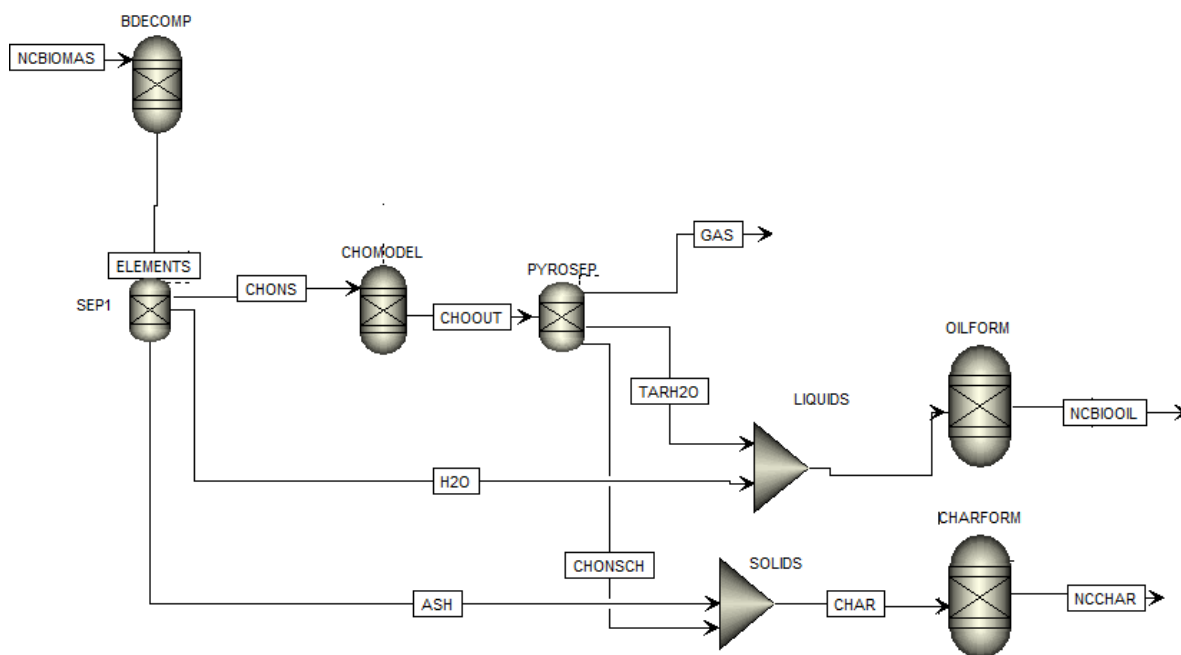
2.2.2. Εφαρμογή του μοντέλου σε Aspen Plus™

Στη συνέχεια παρουσιάζεται συνοπτικά η εφαρμογή του παραπάνω μοντέλου σε περιβάλλον Aspen Plus. Η αρχική βιομάζα ορίζεται ως Non-Conventional component στο ρεύμα NCBIOMAS ($T=25^{\circ}\text{C}$, $p=1\text{atm}$). Τα στοιχεία της βιομάζας (ultimate και proximate analysis σε ξηρή βάση) ορίζονται από το χρήστη. Στον RYIELD DECOMP η βιομάζα σπάει σε ρεύματα που περιέχουν τα στοιχεία της. Στον SEPARATOR SEP1 διαχωρίζονται τα στοιχεία που αποτελούν τη daf σύστασή της (C,H,O,N,S) από την τέφρα (ASH) και την υγρασία (H_2O), και στη συνέχεια εισέρχονται στον RYIELD CHOMODEL όπου με calculator επιλύονται οι εξισώσεις του μοντέλου. Στον SEPARATOR PYROSEP τα προϊόντα διαχωρίζονται ανάλογα με τη φάση στην οποία βρίσκονται σε αέρια (GAS), υγρά (TARH₂O) και στερεά (CHONSCH). Τα συστατικά του καθενός από τα τρία ρεύματα δίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

Ρεύμα	Συστατικά
CHONSCH (εξανθράκωμα)	CCHAR, HCHAR, ^{OC} HAR, N, S
TARH ₂ O (βιοέλαιο)	CTAR, HTAR, OTAR, H ₂ O
GAS (μόνιμα αέρια)	CO, CO ₂ , H ₂ , CH ₄ , C ₂ H ₄

Πίνακας 2.2.6. Κατανομή συστατικών του PYROSEP στα ρεύματα GAS, TARH₂O και CHONSCH

Το ρεύμα που περιέχει την αρχική τέφρα της βιομάζας ASH και το ρεύμα που περιέχει την υγρασία της (H_2O) ενώνονται με τα υπόλοιπα στερεά και υγρά προϊόντα αντίστοιχα στους MIXERS SOLIDS και LIQUIDS. Τα συστατικά που προκύπτουν ενοποιούνται στους RYIELD OILFORM και CHARFORM στα Non Conventional συστατικά που αποτελούν το βιοέλαιο και το εξανθράκωμα αντίστοιχα.



Σχήμα 2.2.3. Μοντέλο πυρόλυσης στο Aspen Plus™

Η θερμογόνος ικανότητα και η τυπική ανάλυση των προϊόντων υπολογίζεται με τη χρήση calculators όπου χρειάζεται, αλλιώς μπορεί να δοθεί από το χρήστη.

2.3. Υπολογισμός του ισοζυγίου ενέργειας της διεργασίας

Στην ανάλυση που ακολουθεί παρουσιάζονται τα ενεργειακά μεγέθη που αφορούν τη διεργασία της πυρόλυσης. Πιο κάτω, δίνονται οι όροι που θα χρησιμοποιηθούν και η σημασία τους.

2.3.1. Θερμότητα για την πυρόλυση

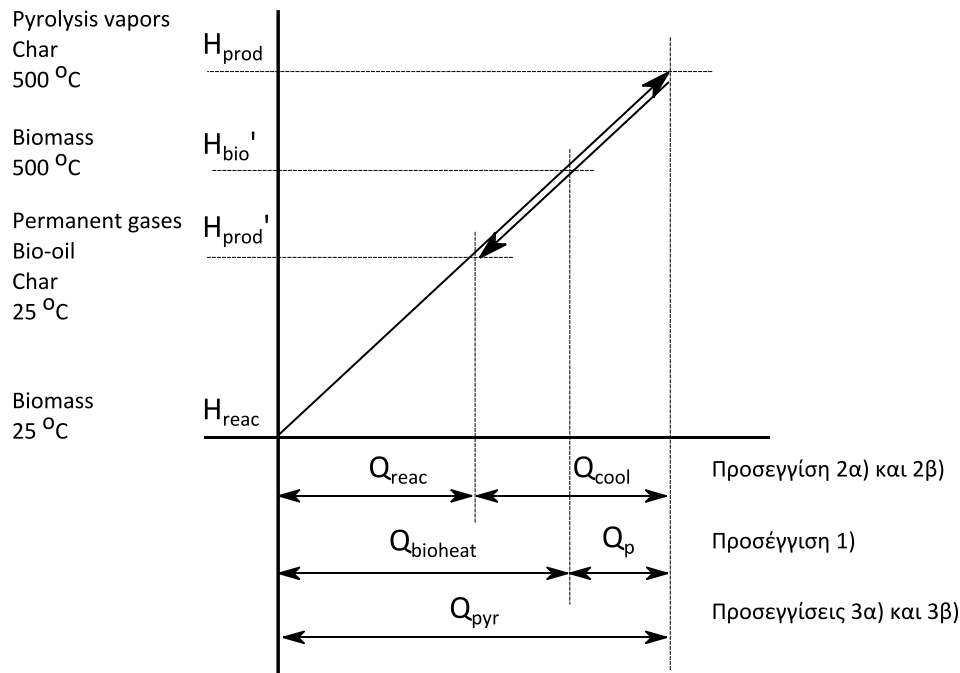
Θερμότητα για την πυρόλυση Q_{pyr} : είναι η ολική ποσότητα θερμικής ενέργειας που απαιτείται για την διενέργεια της πυρόλυσης [9]. Η ενέργεια αυτή είναι απαραίτητη για τη θέρμανση της βιομάζας και των ενδιάμεσων προϊόντων που σχηματίζονται καθόλη τη διάρκεια της διεργασίας (εξανθράκωμα, πρωτεύοντα πτητικά, πυρολυτικό ύδωρ κλπ) μέχρι την τελική θερμοκρασία αντίδρασης. Αφενός περιλαμβάνει την αισθητή θερμότητα θερμοκρασιακής μεταβολής τους, η οποία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ειδική θερμοχωρητικότητα τους. Ένα επιπλέον ποσό θερμότητας απαιτείται για την εξάτμιση των πρωτευόντων πτητικών προϊόντων, ενώ πρόσθετη θερμότητα είναι απαραίτητη για την αισθητή θέρμανση και εξάτμιση της υγρασίας που βρίσκεται στην αρχική βιομάζα. Τέλος, ένα ποσό θερμότητας είναι αναγκαίο για την αποδόμηση των χημικών δεσμών των οργανικών συστατικών της βιομάζας και τη χημική τους μετατροπή στα τελικά προϊόντα.

Για τον αναλυτικό υπολογισμό της θερμότητας της διεργασίας είναι απαραίτητη η ακριβής γνώση της ειδικής θερμοχωρητικότητας της βιομάζας και των ενδιάμεσων σχηματιζόμενων προϊόντων, η ενθαλπία εξάτμισής τους, καθώς και η τιμή της θερμικής ενέργειας που είναι απαραίτητη για τη χημική μετατροπή στα τελικά προϊόντα της διεργασίας. Κάτι τέτοιο όμως περιέχει εγγενείς δυσκολίες, καθώς ο μηχανισμός της αντίδρασης δεν είναι πλήρως κατανοητός, και δεν είναι σαφές σε ποιες ακριβώς θερμοκρασίες σχηματίζονται τα διάφορα προϊόντα, μέρος των οποίων είναι άγνωστο [29]. Φαίνεται πως προς το παρόν είναι δύσκολη η ακριβής πρόβλεψη της ενέργειας της πυρόλυσης από θεωρητικές/αναλυτικές εξισώσεις [8]. Αυτό οφείλεται στην πολυπλοκότητα των φαινομένων αλλαγής φάσης και σύστασης που λαμβάνουν χώρα στον αντιδραστήρα, η οποία έχει ως αποτέλεσμα οι τιμές των θερμοχημικών ιδιοτήτων των συστατικών να αλλάζουν με τρόπο δύσκολο να προσδιοριστεί [8], [30].

Πειραματικές τιμές που έχουν κατά καιρούς αναφερθεί για την τιμή της συνολικής θερμότητας για την ταχεία πυρόλυση διαφόρων ειδών ξηρής βιομάζας σε διάφορες θερμοκρασίες κυμαίνονται μεταξύ 207-434 kJ/kg (500 °C) [2], 385-646 kJ/kg (400 °C) [8], 800-1600 kJ/kg (500°C) [30].

2.3.2. Μέθοδοι υπολογισμού της θερμότητας για την πυρόλυση

Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, η θερμότητα για την πυρόλυση μπορεί να εκφραστεί με διάφορους τρόπους. Ανάλογα με τον τρόπο εκφρασής της, ακολουθούνται διαφορετικές μεθοδολογίες για τον υπολογισμό της τιμής της.



Σχήμα 2.3.1. Θερμότητα για την πυρόλυση, θερμότητα ψύξης προϊόντων και ενέργεια αντίδρασης πυρόλυσης

Προσέγγιση 1

Η θερμότητα για την πυρόλυση προσεγγίζεται σύμφωνα με κάποιους συγγραφείς [2], [9] ως άθροισμα δύο μερών.

- Το πρώτο μέρος περιλαμβάνει την ενέργεια που είναι απαραίτητη για την αύξηση της θερμοκρασίας των αντιδρώντων μέχρι τη θερμοκρασία της διεργασίας. Για λόγους απλούστευσης, το ποσό αυτό θερμότητας περιγράφεται ως αισθητή θερμότητα αύξησης της θερμοκρασίας της βιομάζας μέχρι τη θερμοκρασία της αντίδρασης:

$$Q_{bioheat} = m_{bio} \cdot \int_{T_o}^{T_{react}} Cp_{bio} \cdot dT \quad (2.3.1.)$$

Μία πιο ακριβής σχέση [8], η οποία λαμβάνει υπόψιν το μετασχηματισμό μέρους της βιομάζας σε εξανθράκωμα κατά την αύξηση της θερμοκρασίας της είναι η εξής :

$$Q_{heat} = \int_{T_o}^{T_{react}} Cp_{bio} m_{bio} dT + \int_{T_o}^{T_{react}} Cp_{char} m_{char} dT \quad (2.3.2.)$$

- Το δεύτερο μέρος της θερμικής ενέργειας που είναι απαραίτητη για την πυρόλυση αφορά την ενέργεια χημικής μετατροπής των αντιδρώντων στα τελικά προϊόντα στην θερμοκρασία της αντίδρασης.

$$Q_p = m_{bio} \cdot \Delta H_p \quad (2.3.3.)$$

Όπου η ειδική θερμότητα της πυρόλυσης συμβολίζεται με τον όρο ΔH_p .

Με βάση την εξίσωση (2.3.1.) η θερμότητα για την πυρόλυση βιομάζας είναι το άθροισμα των δύο ποσοτήτων θερμότητας που περιγράφηκαν και δίνεται από την εξίσωση [2] :

$$Q_{pyr} = Q_{bioheat} + Q_p = m_{bio} \cdot \left(\int_{T_o}^{T_{react}} C_{p_{bio}} \cdot dT + \Delta H_p \right) \quad (2.3.4.)$$

Η προσέγγιση της ενέργειας για την πυρόλυση μέσω της παραπάνω εξίσωσης βασίζεται στην παραδοχή πως η βιομάζα αρχικά θερμαίνεται μέχρι τη θερμοκρασία αντίδρασης διατηρώντας τη σύστασή της και κατόπιν λαμβάνει χώρα ο χημικός μετασχηματισμός της και η αλλαγή φάσης της, δίνοντας τα τελικά προϊόντα. Για τον υπολογισμό της τιμής Q_{pyr} χρησιμοποιείται η ειδική θερμοχωρητικότητα της βιομάζας $C_{p_{bio}}$, ενώ απαραίτητη είναι και η τιμή της ενθαλπίας χημικής μετατροπής ΔH_p .

- Ειδική θερμοχωρητικότητα της βιομάζας $C_{p_{bio}}$

Εξαιτίας της ποικιλομορφίας της βιομάζας, η ειδική θερμοχωρητικότητά της λαμβάνει διάφορες τιμές ανάλογα με το είδος της. Στη βιβλιογραφία εμφανίζονται διάφορες τιμές που κυμαίνονται ανάλογα με το είδος υπό εξέταση από 0.9 kJ/kgK έως και 2.3 kJ/kgK [2], [8]. Στην πράξη, δεν υπάρχει απόλυτα ακριβής τρόπος να υπολογιστεί η απαιτούμενη για τη θέρμανση της βιομάζας θερμότητα. Στο Aspen PlusTM, η θερμοχωρητικότητα της βιομάζας προσεγγίζεται από την συσχέτιση Kiron, η οποία δίνει αποτελέσματα κοντά σε αυτά που αναφέρονται πειραματικά. Σύμφωνα με τη συσχέτιση αυτή, η βιομάζα θεωρείται ως μίγμα υγρασίας, τέφρας, μόνιμου άνθρακα, πρωτεύουσας και δευτερεύουσας πτητικής ύλης. Η συνολική θερμοχωρητικότητα προκύπτει ως σταθμισμένο άθροισμα των επιμέρους θερμοχωρητικοτήτων των παραπάνω συστατικών.

$$C_{p_{bio}} = \sum_i y_{i,bio(db)} \cdot C_{p_i} \quad (2.3.5.)$$

$$i = M, FC, VM_{pr}, VM_{sec}, ASH$$

Για κάθε ένα από τα παραπάνω συστατικά, η θερμοχωρητικότητα δίνεται από μία πολυωνυμική συσχέτιση τρίτου βαθμού σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία, με τη χρήση κατάλληλων συντελεστών.

$$Cp_i = a_{1,i} + a_{2,i} \cdot T + a_i \cdot T^2 + a_{4,i} \cdot T^3 \quad (2.3.6.)$$

- Ενθαλπία χημικής μετατροπής ΔH_p

Η ενθαλπία χημικής μετατροπής Q_p , η οποία καλείται και θερμότητα της πυρόλυσης, διακατέχεται κι αυτή από ένα βαθμό αβεβαιότητας. Σε γενικές γραμμές η αντίδραση χημικής μετατροπής αναφέρεται έως ενδόθερμη, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις και ως εξώθερμη [2], [8], [9]. Υπάρχει ωστόσο γενική συμφωνία πως τουλάχιστον το στάδιο της πρωτεύουσας πυρόλυσης είναι ελαφρώς ενδόθερμο [29]. Κάποιοι ερευνητές υποθέτουν πως η ταχεία πυρόλυση είναι αθερμική μέχρι τη θερμοκρασία των 700 °C και γίνεται ολοένα και πιο ενδόθερμη με περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας [29].

Επιπλέον, η ολική ενέργεια για την πυρόλυση είναι θεμελιωδώς συνδεδεμένη με το εκάστοτε είδος βιομάζας που αντιδρά, και έτσι οι πειραματικές τιμές έχουν περιορισμένο εύρος ισχύος. Ακόμα όμως και στην περίπτωση που είναι γνωστή η ολική ενέργεια για την πυρόλυση, είναι αρκετά δυσχερής ο προσδιορισμός του μέρους που αφορά τη χημική μετατροπή και του μέρους που αφορά την αύξηση της θερμοκρασίας του συστήματος [8], [9].

Στο [9] αναφέρεται η σχέση Antal, η οποία είναι μια γραμμική συσχέτιση μεταξύ της ενέργειας της χημικής μετατροπής και της παραγόμενης ποσότητας εξανθρακώματος, η οποία βασίζεται σε πειράματα πυρόλυσης κυτταρίνης σε διάφορες πιέσεις :

$$\Delta H_p = 553 - 3142 \cdot F_c \quad (J / kg) \quad (2.3.7.)$$

Όπου F_c είναι το κλάσμα μάζας του παραγόμενου εξανθρακώματος της διεργασίας. Σύμφωνα με την παραπάνω προσέγγιση, η ολική ενέργεια για την πυρόλυση δίνεται από την εξίσωση :

$$Q_{pyr} = m_{bio} \cdot \left(\int_{T_c}^{T_{react}} Cp_{bio} \cdot dT + 553 - 3142 \cdot Y_{ch(ar),bio(ar)} \right) \quad (2.3.8.)$$

Προσέγγιση 2

Η ενέργεια για την πυρόλυση μπορεί να εκφραστεί ως διαφορά ενθαλπίας μεταξύ των προϊόντων της διεργασίας στην θερμοκρασία της αντίδρασης και της ενθαλπίας της αρχικής βιομάζας στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Επομένως είναι

$$Q_{pyr} = H_{prod} - H_{react} \quad (2.3.9.)$$

όπου

H_{prod} : Η ενθαλπία των προϊόντων της πυρόλυσης (εξανθράκωμα, πτητικά) στους 500 °C.

H_{reac} : Η ενθαλπία της αρχικής βιομάζας στους 25 °C

Για τον υπολογισμό της Q_{pyr} είναι αναγκαίος ο υπολογισμός της παραπάνω διαφοράς ενθαλπίας. Η ενθαλπία κάθε συστατικού i στη θερμοκρασία T δίνεται από την εξίσωση :

$$H_i(T) = H_{f,i}(T_{\text{ref}}) + \int_{T_{\text{ref}}}^T C_{p_i}(T) \cdot dT \quad (2.3.10.)$$

όπου $H_{f,i}(T_{\text{ref}})$ είναι η ενθαλπία σχηματισμού του ίστού συστατικού σε μια θερμοκρασία αναφοράς T_{ref} .

Για τη χρήση της παραπάνω εξίσωσης, είναι απαραίτητη η γνώση της ενθαλπίας σχηματισμού και των θερμοφυσικών ιδιοτήτων (θερμοχωρητικότητα και λανθάνουσα θερμότητα αλλαγής φάσης) της βιομάζας και όλων των ουσιών που συμμετέχουν στα προϊόντα. Αυτό συνιστά μια κύρια δυσκολία στην περίπτωση της ταχείας πυρόλυσης βιομάζας, καθώς, όπως προαναφέρθηκε, η ακριβής σύσταση των πτητικών στη θερμοκρασία της αντίδρασης παραμένει κατά ένα μεγάλο μέρος άγνωστη, και για αυτό το λόγο είναι δυσχερής ο θεωρητικός υπολογισμός τόσο της ειδικής τους θερμοχωρητικότητας, όσο και της λανθάνουσας θερμότητας μετάβασής τους από την υγρή στην αέρια φάση. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται στην παρούσα εργασία, με την παραδοχή πως η σύσταση των συμπυκνώσιμων πτητικών στη θερμοκρασία της αντίδρασης είναι ίδια με τη σύσταση του βιοελαίου, αφού αυτό ψυχθεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Εάν οριστεί ως H_{prod} η ενθαλπία των προϊόντων της πυρόλυσης αφού αυτά έχουν ψυχθεί στη θερμοκρασία των 25°C (βιοέλαιο, εξανθράκωμα, μόνιμα αέρια), η ενέργεια ψύξης τους από τη θερμοκρασία της πυρόλυσης (και αντίστροφα κατά τη θέρμανσή τους στη θερμοκρασία αυτή) είναι ίση με

$$Q_{\text{cool}} = H_{\text{prod}} - H_{\text{prod}}' \quad (2.3.11.)$$

Η θερμότητα για την πυρόλυση είναι ίση με το άθροισμα της ενέργειας της αντίδρασης και της θερμότητας ψύξης Q_{cool} .

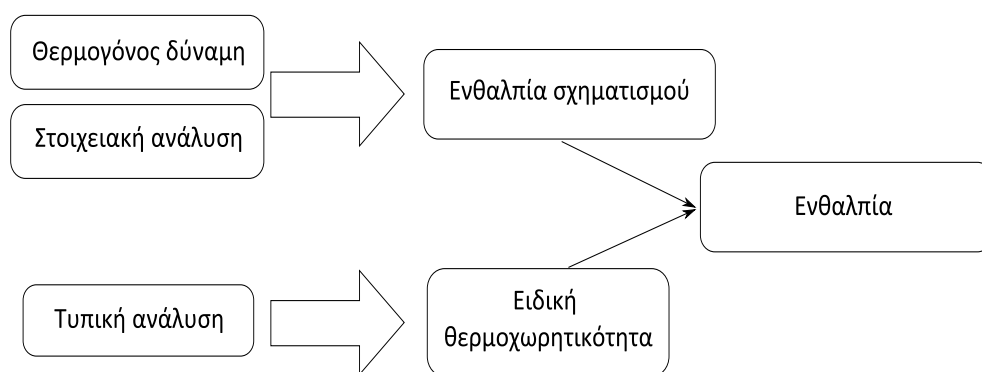
$$Q_{\text{pyr}} = H_{\text{prod}} - H_{\text{prod}}' + H_{\text{prod}}' - H_{\text{reac}} = Q_{\text{reac}} + Q_{\text{cool}} \quad (2.3.12.)$$

- Υπολογισμός Q_{reac}

Η ενθαλπία των αερίων προϊόντων μπορεί εύκολα να υπολογιστεί θεωρητικά, δεδομένης της σύστασής τους, που είναι γνωστή από το μοντέλο. Για τη βιομάζα, το εξανθράκωμα και το βιοέλαιο στο AspenPlus εφαρμόζεται το HCOALGEN, ένα γενικό μοντέλο υπολογισμού της ενθαλπίας ενός συστατικού χρησιμοποιώντας συσχετίσεις μεταξύ της θερμογόνου ικανότητας, της ενθαλπίας σχηματισμού και της ειδικής του θερμοχωρητικότητας. Πιο συγκεκριμένα, η ειδική θερμοχωρητικότητα υπολογίζεται

με τη συσχέτιση Kίρον, η οποία περιγράφηκε προηγουμένως, ενώ η ενθαλπία σχηματισμού του συστατικού υπολογίζεται με βάση τη θερμογόνο του ικανότητα και τη σύστασή του, με την υπόθεση πως η καύση του οδηγεί σε πλήρη οξείδωση όλων των στοιχείων που το αποτελούν. Πρέπει να σημειωθεί πως η μέθοδος αυτή υπολογισμού της ενθαλπίας σχηματισμού είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στην τιμή που λαμβάνει η θερμογόνος ικανότητα, καθώς 1% σφάλμα στην εκτίμησή της οδηγεί σε 50% σφάλμα στον υπολογισμό της τιμής της ενθαλπίας σχηματισμού. Κατ'επέκταση, υπεισέρχεται μια σχετική ανακρίβεια υπολογισμού των ενθαλπιών της βιομάζας, του βιοελαίου και του εξανθρακώματος, λόγω της μη απολύτως ακριβούς τιμής της θερμογόνου τους ικανότητας. Η στοιχειακή σύσταση του εξανθρακώματος, του βιοελαίου, καθώς και η σύσταση του μίγματος μονίμων αερίων υπολογίζονται από το μοντέλο.

Μοντέλο υπολογισμού ενθαλπίας HCOALGEN



Σχήμα 2.3.2. Βήματα υπολογισμό ενθαλπίας βάσει του μοντέλου HCOALGEN

- Υπολογισμός Q_{cool}

Το C_p των μονίμων αερίων είναι γνωστό αναλυτικά και του εξανθρακώματος περιγράφεται με ικανοποιητική ακρίβεια από το την προσέγγιση Kίρον. Για τον υπολογισμό της ενέργειας θέρμανσης του βιοελαίου, ακολουθήθηκαν δύο προσεγγίσεις.

2α) Κατά την προσέγγιση αυτή, η ποσότητα θέρμανσης του βιοελαίου στη θερμοκρασία της διεργασίας υπολογίζονται θεωρώντας το ως Non Conventional στερεό, και ακολουθώντας τα βήματα του μοντέλου HCOALGEN.

2β) Κατά τη δεύτερη προσέγγιση, το βιοέλαιο μοντελοποιείται ως μίγμα νερού και οργανικών conventional συστατικών με γνωστές ιδιότητες, με την υπόθεση πως οι θερμοφυσικές του ιδιότητες προσομοιάζουν αυτές του μίγματος. Η σύσταση οργανικών ενώσεων που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία λαμβάνεται από το [31] και δίνεται στον ακόλουθο πίνακα :

Συστατικό	Σύσταση
Acetic acid	33.3 % vol
Acetol	33.3 % vol
Guaiacol	33.3 % vol

Πίνακας 2.3.1. Σύσταση οργανικού μέρους βιοελαίου [31]

Προσέγγιση 3

Δύο σχέσεις υπολογισμού της συνολικής ενέργειας για την πυρόλυση παρουσιάζονται στο [29]. Σύμφωνα με την πρώτη σχέση, γίνεται η υπόθεση πως η βιομάζα δεν αντιδρά καθόλου κατά τη θέρμανσή της μέχρι τη θερμοκρασία των 250 °C. Από αυτή τη θερμοκρασία κι έπειτα, αρχίζει η αποδόμη της με την απελευθέρωση ελαφρών οργανικών μορίων (μεθανόλη, ακετόλη, ακετικό οξύ κλπ) και αερίων ειδών. Στους 300 °C, αρχίζει η παραγωγή πυρολυτικού ύδατος, ενώ στους 350 °C σχηματίζονται τα πρωτεύοντα βαρύτερα οργανικά προϊόντα. Τα μόνιμα αέρια σχηματίζονται καθόλου το εύρος θέρμανσης της βιομάζας απευθείας από την αρχική της σύσταση. Ο παραπάνω μηχανισμός αντίδρασης άμεσης εξέλιξης προϊόντων, όπως καλείται, βασίζεται στην υπόθεση πως όλες οι αντιδράσεις χημικού μετασχηματισμού λαμβάνουν χώρα μεταξύ των δύο ακραίων θερμοκρασιών που περιγράφηκαν (250 έως και 350 °C) με απευθείας σχηματισμό των τελικών προϊόντων. Σύμφωνα με τον παραπάνω μηχανισμό, το συνολικό ποσό της ενέργειας ταχείας πυρόλυσης βιομάζας δίνεται από την εξίσωση :

- Προσέγγιση 3α)
$$Q_{pyr} = 991.5 + 3392 \frac{w}{1 - (w + a)} \text{ kJ / kg} \quad (2.3.13.)$$

Όπου w και a η περιεκτικότητα της βιομάζας σε υγρασία και τέφρα αντίστοιχα.

Σύμφωνα με τη δεύτερη προσέγγιση, τα τελικά προϊόντα δεν απελευθερώνονται απευθείας από την αρχική βιομάζα, αλλά σχηματίζονται μέσω διαδοχικών αντιδράσεων. Ο ατμός απελευθερώνεται από τους πόρους της στους 135 °C, τα ελαφρύτερα οργανικά μόρια στους 150 °C, και τα βαρύτερα γύρω στους 250 °C. Τα μόνιμα αέρια σχηματίζονται μέσω της διάσπασης των βαρέων οργανικών μορίων. Έτσι, η ενέργεια για την πυρόλυση δίνεται από την εξίσωση :

- Προσέγγιση 3β)
$$Q_{pyr} = 1332.9 + 3702.7 \frac{w}{1 - (w + a)} \text{ kJ / kg} \quad (2.3.14.)$$

Οι δύο παραπάνω σχέσεις είναι της ίδιας μορφής και δίνουν την ενέργεια για την πυρόλυση σαν συνάρτηση μόνον της τέφρας και της υγρασίας της αρχικής βιομάζας. Για περιπτώσεις εμπορικής εφαρμογής της ταχείας πυρόλυσης, όπου τα είδη βιομάζας πριν εισέλθουν στον αντιδραστήρα έχουν σχετικά παρόμοια περιεκτικότητα σε υγρασία λόγω της ξήρανσης που έχει προηγηθεί, το ποσό της ενέργειας εξαρτάται για διαφορετικά είδη βιομάζας μόνον από το ποσό τέφρας που περιέχουν.

2.4. Αποτελέσματα μοντελοποίησης χημικής σύστασης και ισοζυγίου ενέργειας της διεργασίας

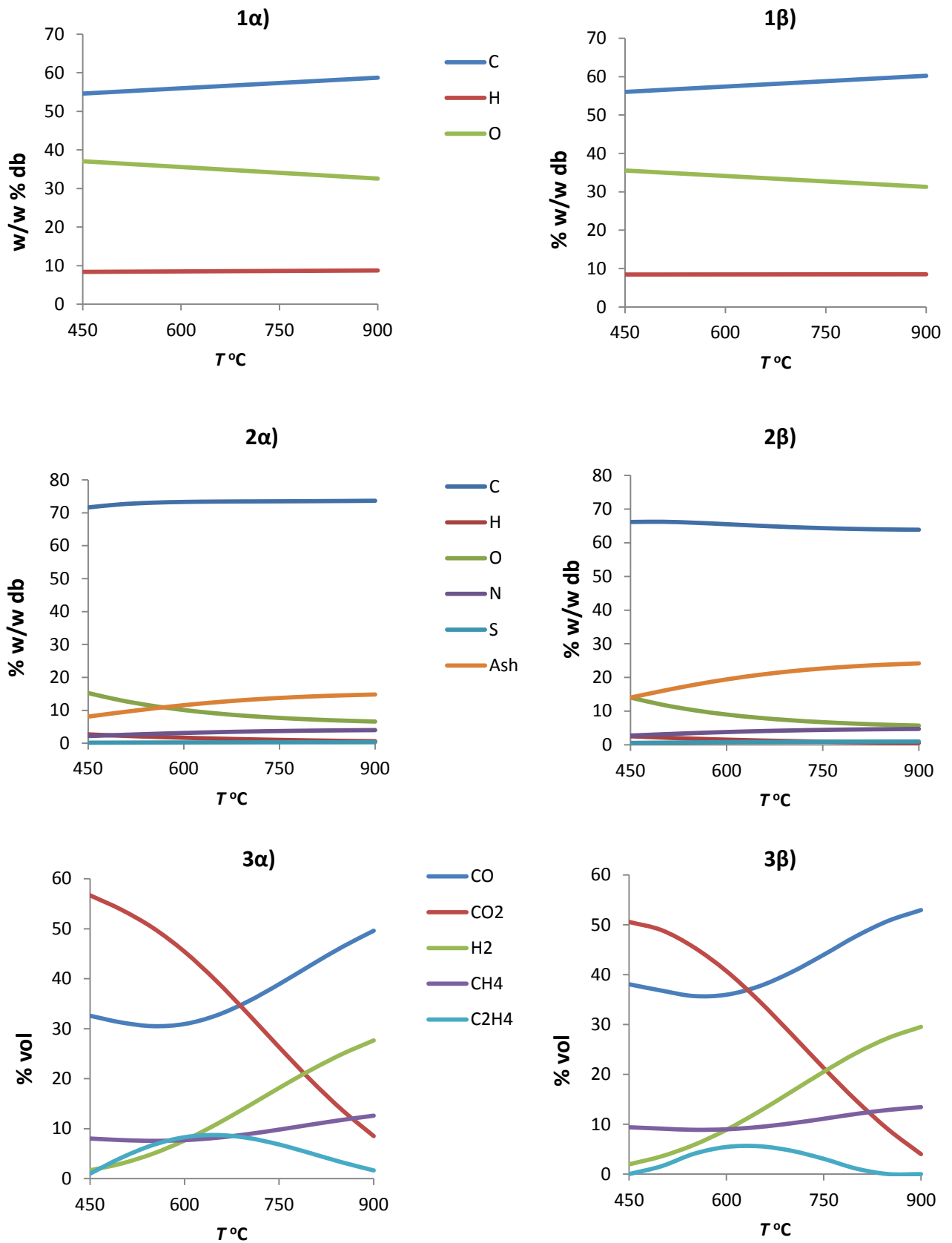
2.4.1. Εφαρμογή του μοντέλου για τον υπολογισμό της ποσότητας και της σύστασης των προϊόντων

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του μοντέλου για 3 είδη βιομάζας, chips ξύλου ιτιάς, μίσχανθο και άχυρο σίτου. Η σύσταση και η θερμογόνος ικανότητα των ειδών αυτών βρέθηκε από το Wood Fuels Handbook [32] και παρουσιάζεται στον ακόλουθο πίνακα. Η υγρασία λαμβάνεται ίση με 7% σε κάθε περίπτωση, καθώς υποτίθεται ξήρανση πριν την πυρόλυση.

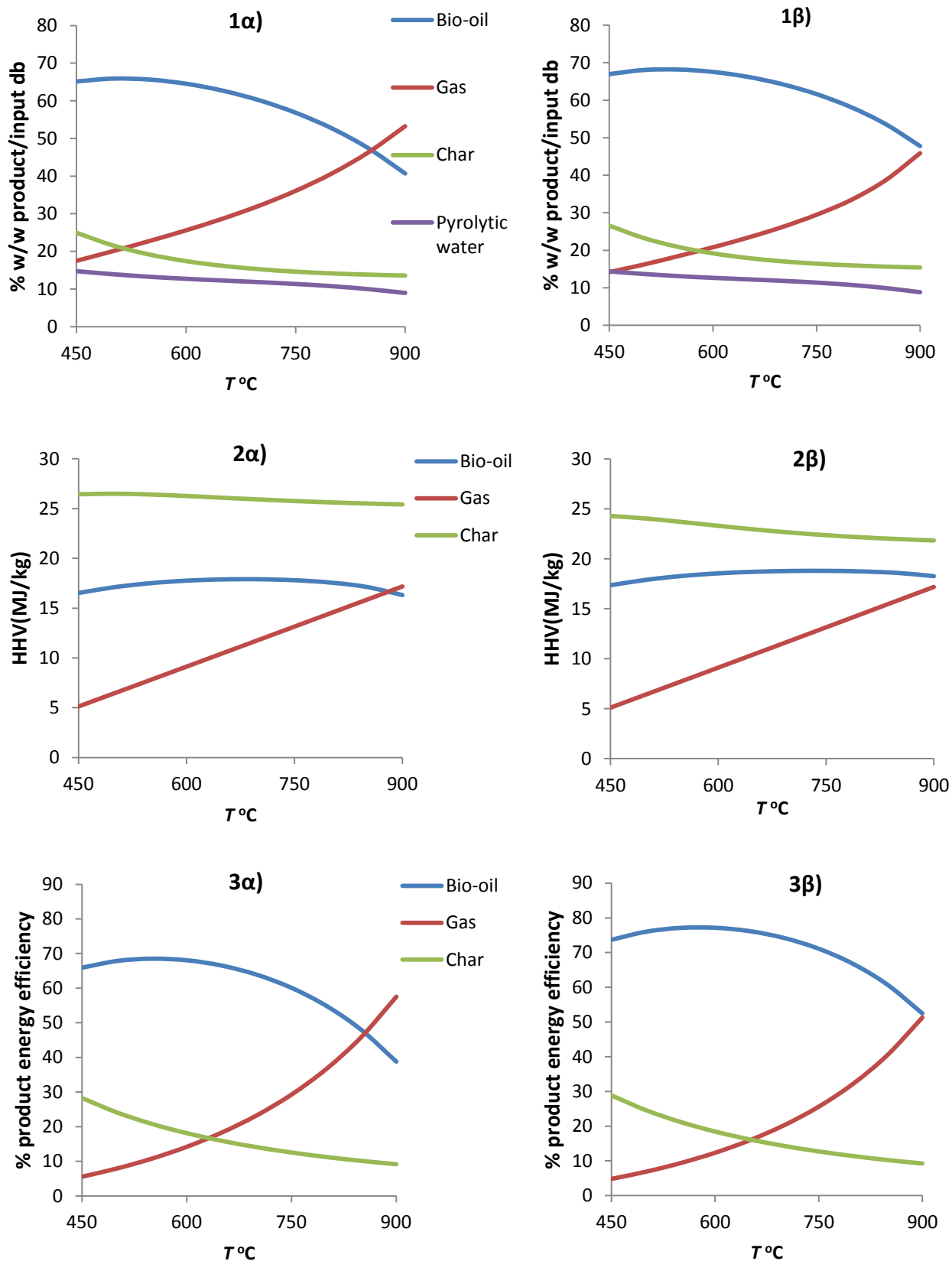
Βιομάζα	Σύσταση % w/w db και υγρασία	Θερμογόνος ικανότητα (db)
Chips ξύλου ιτιάς	C=47.1% H=6.1% O=44.2% N=0.54% S=0.045% Ash=2.0% Moisture=7%	18.4 MJ/kg
Μίσχανθος	C=47.5% H=6.2% O=41.7% N=0.73% S=0.150% Ash=3.9% Moisture=7%	17.6 MJ/kg

Πίνακας 2.4.1. Στοιχειακή, τυπική ανάλυση και θερμογόνος δύναμη βιομάζας [32]

Στα διαγράμματα απεικονίζεται η σύσταση κατά μάζα του εξανθρακώματος και του βιοελαίου σε ξηρή βάση και η κατά όγκο σύσταση του μίγματος των μονίμων αερίων για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας, από 450 έως και 900 °C. Τα επόμενα διαγράμματα παριστάνουν την ποσότητα των παραγόμενων προϊόντων ανά μονάδα μάζας ξηρής αρχικής βιομάζας, την ανώτερη θερμογόνο τους ικανότητα (σε ως έχει βάση) και την ενεργειακή τους απόδοση.



Σχήμα 2.4.1. Επίδραση της θερμοκρασίας σε **1)** τη στοιχειακή σύσταση του βιοελαίου (w/w% db), **2)** τη στοιχειακή σύσταση του εξανθρακώματος (w/w % db) **3)** τη σύσταση του μίγματος των μονίμων αερίων (% vol) για chips ξύλου ιτιάς **α)** και **β)** μίσχανθο



Σχήμα 2.4.2. Επίδραση της θερμοκρασίας σε 1) αναλογία των προϊόντων (w/w% product/ input db), 2) τη θερμογόνο ικανότητα των προϊόντων (HHV(MJ/kg)) 3) την ενεργειακή απόδοση των προϊόντων (% $HHV_{prod} M_{prod} / HHV_{biomass} M_{biomass}$) για chips ξύλου ιτιάς α) και β) μίσχανθο

Τα αποτελέσματα βρίσκονται σε συμφωνία με τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την περιγραφή του μηχανισμού της αντίδρασης στο Κεφάλαιο 1. Οι αναλογίες των προϊόντων (εξανθράκωμα, βιοέλαιο, μόνιμα αέρια) έχουν μεγάλη εξάρτηση από τη θερμοκρασία. Συγκεκριμένα στις χαμηλότερες θερμοκρασίες παράγεται περισσότερο στερεό εξανθράκωμα, και λιγότερα πτητικά είδη. Αυτό μπορεί να ερμηνευθεί και από το μηχανισμό της αντίδρασης, καθώς σε αυτές τις θερμοκρασίες προλαβαίνουν να γίνουν σε μεγάλο βαθμό οι αντιδράσεις αποδόμησης της βιομάζας. Παράλληλα, οι δευτερεύουσες αντιδράσεις, οι οποίες έχουν σαν αποτέλεσμα την αύξηση των πτητικών ειδών γίνονται ελάχιστα ή και καθόλου, με αποτέλεσμα τις μικρές αναλογίες οργανικών υγρών και μονίμων αερίων. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες, αντίθετα, επικρατούν οι δευτερεύουσες αντιδράσεις αποδόμησης των μεγαλύτερων οργανικών μορίων σε μικρότερα μόρια των αερίων. Για αυτό το λόγο, μειώνεται τόσο το ποσοστό των οργανικών υγρών, όσο και του εξανθρακώματος αλλά και του πυρωλυτικού ύδατος.

Η στοιχειακή σύσταση του βιοελαίου, σύμφωνα με το μοντέλο, παρουσιάζει πολύ χαμηλή εξάρτηση από τη θερμοκρασία. Η αναλογία των στοιχείων του παρουσιάζει μια σταθερή σχέση, ανάλογα με την αντίστοιχη αναλογία τους στην αρχική βιομάζα. Το ίδιο ισχύει σε γενικές γραμμές και για τη σύσταση του εξανθρακώματος.

2.4.2. Σύγκριση αποτελεσμάτων χημικής σύστασης με πειραματικά δεδομένα από βιβλιογραφία

Στη συνέχεια, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου, με αντίστοιχα αποτελέσματα πειραμάτων που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία ([33], [34], [35]). Η σύγκριση αφορά πειράματα ταχείας πυρόλυσης στους 500 °C. Η σύσταση κάθε είδους βιομάζας δίνεται στον ακόλουθο πίνακα :

	C (% db)	H (% db)	O (% db)	N (% db)	S (% db)	Ash (% db)	Moisture (% ar)
Πεύκο [34]	45,7	6	48,3	0,2	0	0,8	10
Ευκάλυπτος [34]	46,4	5,9	47,6	0,2	0	0,4	5
Πευκοβελόνες [34]	46,8	6	47,1	0,2	0	0,5	5
Γιαπωνέζικος κέδρος [34]	48,8	6,1	45,1	0,2	0	0,4	5
Κίτρινη λεύκα [35]	48,8	6,5	44,5	0,2	0	0,58	8
Ρόκα καλαμποκιού [36]	47,35	5,9	38,07	0,69	0,18	1,94	6,8
Φύλλα καλαμποκιού [36]	46,6	4,99	40,05	0,79	0,22	4,88	2,5

Πίνακας 2.4.2. Σύσταση ειδών βιομάζας που χρησιμοποιούνται για σύγκριση του μοντέλου με πειραματικά αποτελέσματα

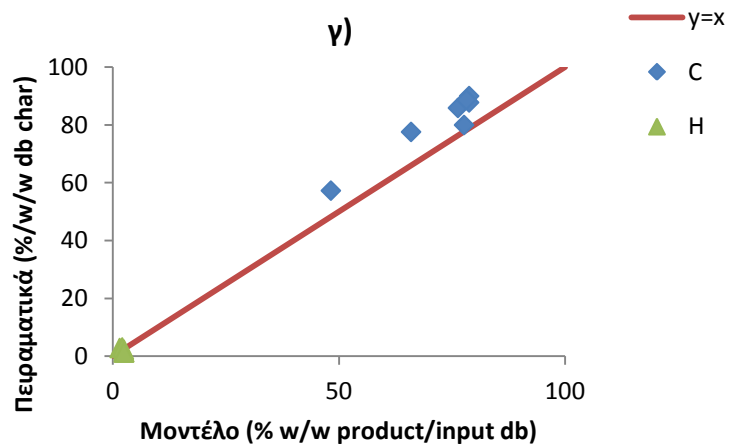
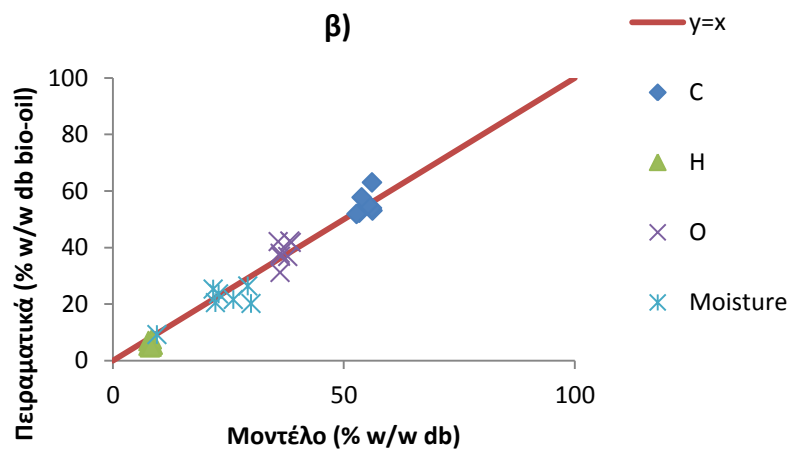
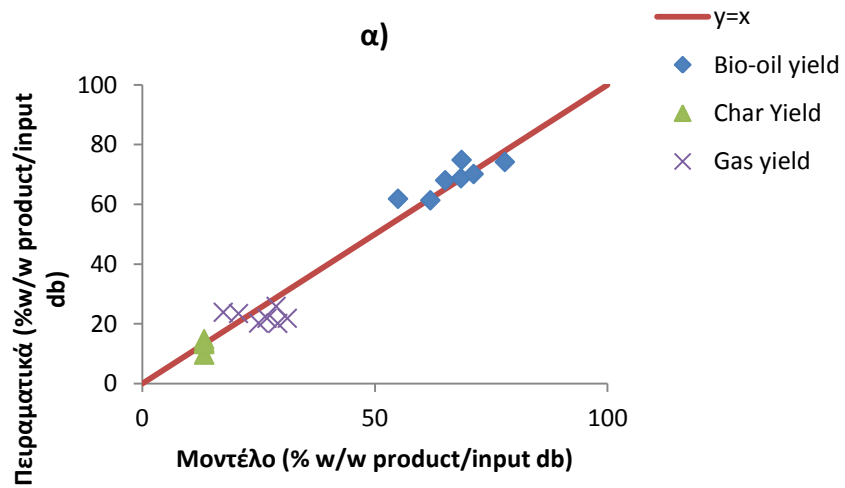
Το μοντέλο διαφοροποιείται στις 2 περιπτώσεις όσον αφορά τον υπολογισμό της αναλογίας του παραγόμενου εξανθρακώματος. Έτσι, σε περιπτώσεις πολύ υψηλών θέρμανσης και για θερμοκρασίες κοντά στους 500 βαθμούς χρησιμοποιείται η εξίσωση (2.2.29) :

$$Y_{ch(ar),bio(db)} = 0.000958 \cdot T^2 - 1.099317 \cdot T + 323.405183$$

η οποία είναι περισσότερο ακριβής. Όλες οι άλλες παράμετροι του μοντέλου παραμένουν ίδιες.

Από τη σύγκριση των προβλέψεων του μοντέλου με τα πειραματικά δεδομένα, μπορούν να διαπιστωθούν τα εξής :

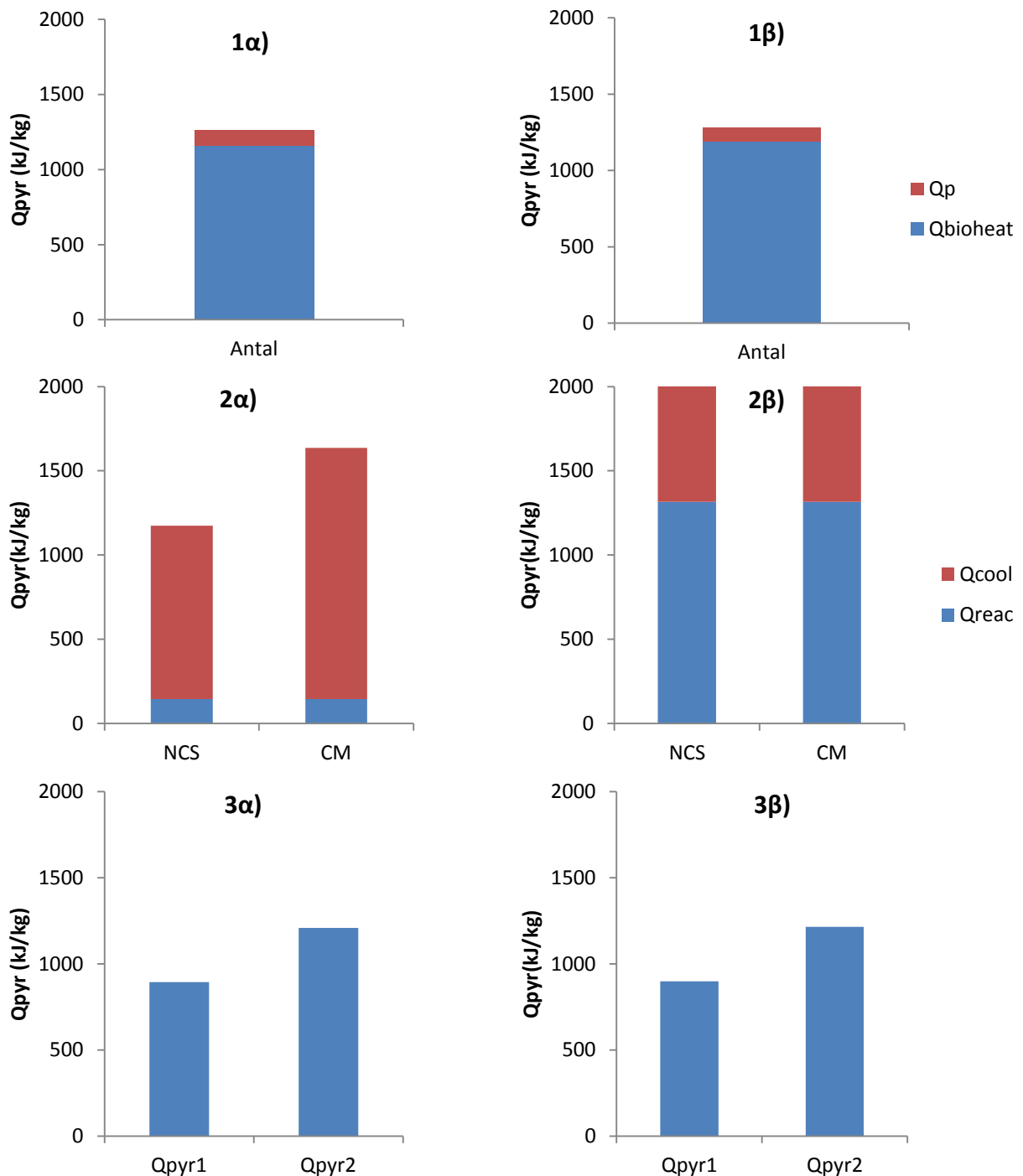
- Η πρόβλεψη της αναλογίας μάζας του εξανθρακώματος, του βιοελαίου και των μονίμων αερίων γίνεται γενικά με ικανοποιητική ακρίβεια. Παρατηρείται όμως μια τάση υπερεκτίμησης της ποσότητας των μονίμων αερίων.
- Από όλα τα πειράματα διαπιστώνεται πώς το μοντέλο τείνει να υποεκτιμά το ποσοστό άνθρακα του εξανθρακώματος και να υπερεκτιμά ελαφρώς το ποσοστό υγρασίας του βιοελαίου



Σχήμα 2.4.3. Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου (άξονας x) με πειραματικά αποτελέσματα από βιβλιογραφία (άξονας y) για **α)** ποσότητες προϊόντων (% w/w product/input db) **β)** σύσταση του βιοελαίου (% w/w db bio-oil) και **γ)** σύσταση του εξανθρακώματος ((% w/w db char)

2.4.3. Υπολογισμός του ισοζυγίου ενέργειας της διεργασίας

Ο υπολογισμός του ισοζυγίου ενέργειας της διεργασίας γίνεται για τα δύο είδη βιομάζας που εξετάστηκαν και στην παράγραφο 2.4.1. (chips ξύλου και μίσχανθο), σύμφωνα με τις προσεγγίσεις που παρουσιάστηκαν.



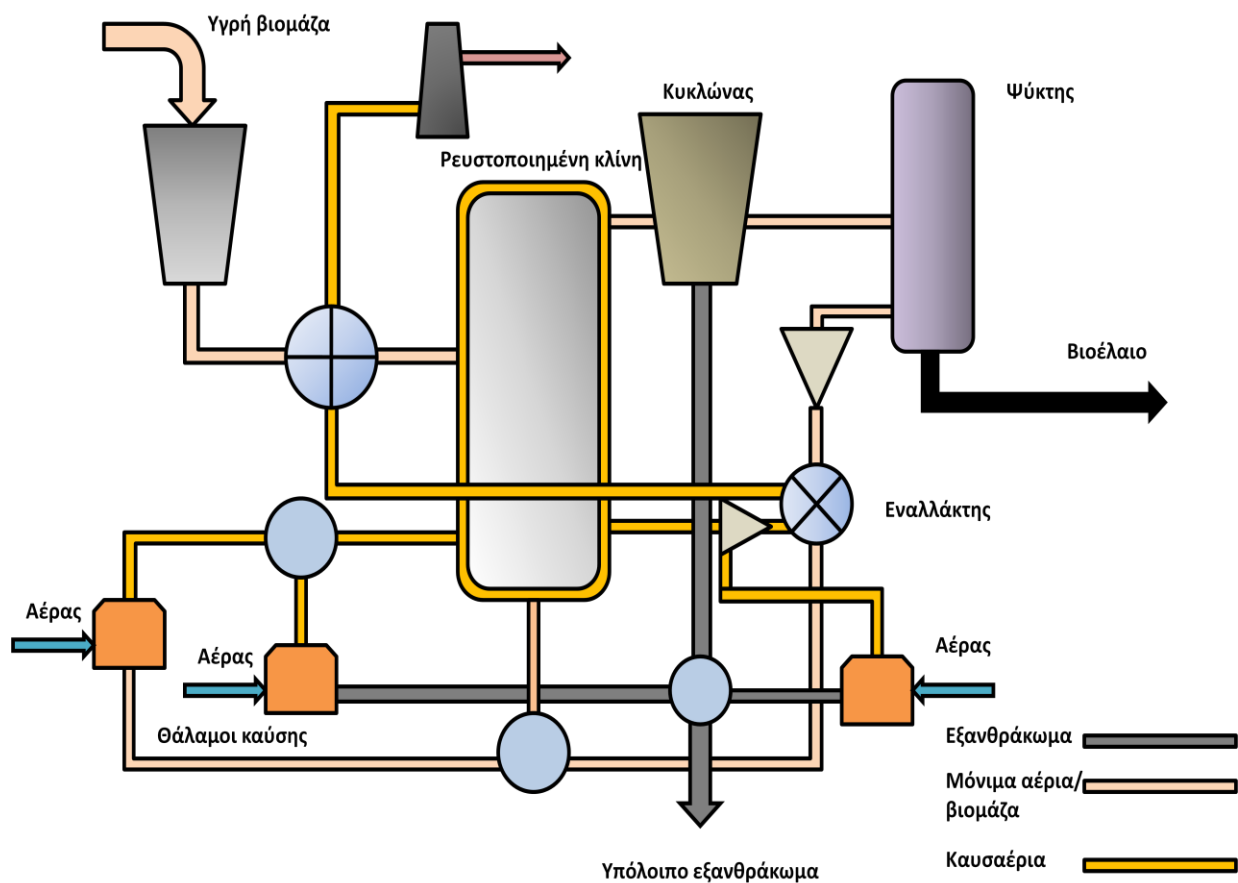
Σχήμα 2.4.4. Υπολογισμός της ενέργειας για την πυρόλυση με τις μεθοδολογίες 1) Σχέση Antal, 2) Non Conventional Solid (NCS) και Conventional Mixture (CM) και 3) εξισώσεις (2.3.13-14) για α) chips ξύλου και β) μίσχανθο

Παρατηρείται πως σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις η διεργασία της πυρόλυσης εμφανίζεται να είναι ενδόθερμη, με τιμές που κυμαίνονται βάσει όλων των προσεγγίσεων και των εξεταζόμενων ειδών βιομάζας μεταξύ των 850 και 2500 kJ/kg. Τα αποτελέσματα αυτά είναι κατά τάξη μεγέθους κοντά σε τιμές που απαντώνται στη βιβλιογραφία αν και σχετικά υψηλότερα. Παρόλα αυτά, σε γενικές γραμμές τα πειραματικά δεδομένα που υπάρχουν είναι πολύ περιορισμένα και έτσι δεν είναι δυνατός ο επαρκής και ακριβής έλεγχος και η επαλήθευση των ανωτέρω αποτελεσμάτων. Εξάλλου, η διασταύρωση με πειραματικά δεδομένα είναι επισφαλής, καθώς οι συνθήκες οι συνθήκες μέτρησης και ελέγχου διαφέρουν από περίπτωση σε περίπτωση [8], [9].

Ωστόσο, από τα αποτελέσματα είναι σαφής η ενδοθερμικότητα της αντίδρασης, ενώ δίνεται μια προσεγγιστική εκτίμηση του αναγκαίου ποσού παροχής θερμότητας στον αντιδραστήρα. Πρέπει να παρατηρηθεί πως οι προσεγγίσεις 2α και 2β (HCOALGEN), απαιτούν την κατά το δυνατόν ακριβή εκτίμηση της θερμογόνου ικανότητας της βιομάζας, καθώς μικρές αποκλίσεις από την πραγματική τιμή της μπορούν να επηρεάσουν σε πολύ μεγάλο βαθμό την υπολογιζόμενη τιμή της ενέργειας της αντίδρασης.

2.5. Μοντελοποίηση του ενεργειακού ισοζυγίου της ταχείας πυρόλυσης σε αναβράζουσα ρευστοποιημένη κλίνη ανακυκλοφορίας

Στην παρούσα ενότητα γίνεται μοντελοποίηση της διεργασίας της ταχείας πυρόλυσης σε αναβράζουσα ρευστοποιημένη κλίνη ανακυκλοφορίας, με σκοπό την μελέτη της κάλυψης του απαιτούμενου ποσού θερμότητας που υπολογίζεται στην προηγούμενη παράγραφο από την καύση του εξανθρακώματος και των μονίμων αερίων που παράγονται. Η απλοποιημένη διάταξη που μελετάται απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.



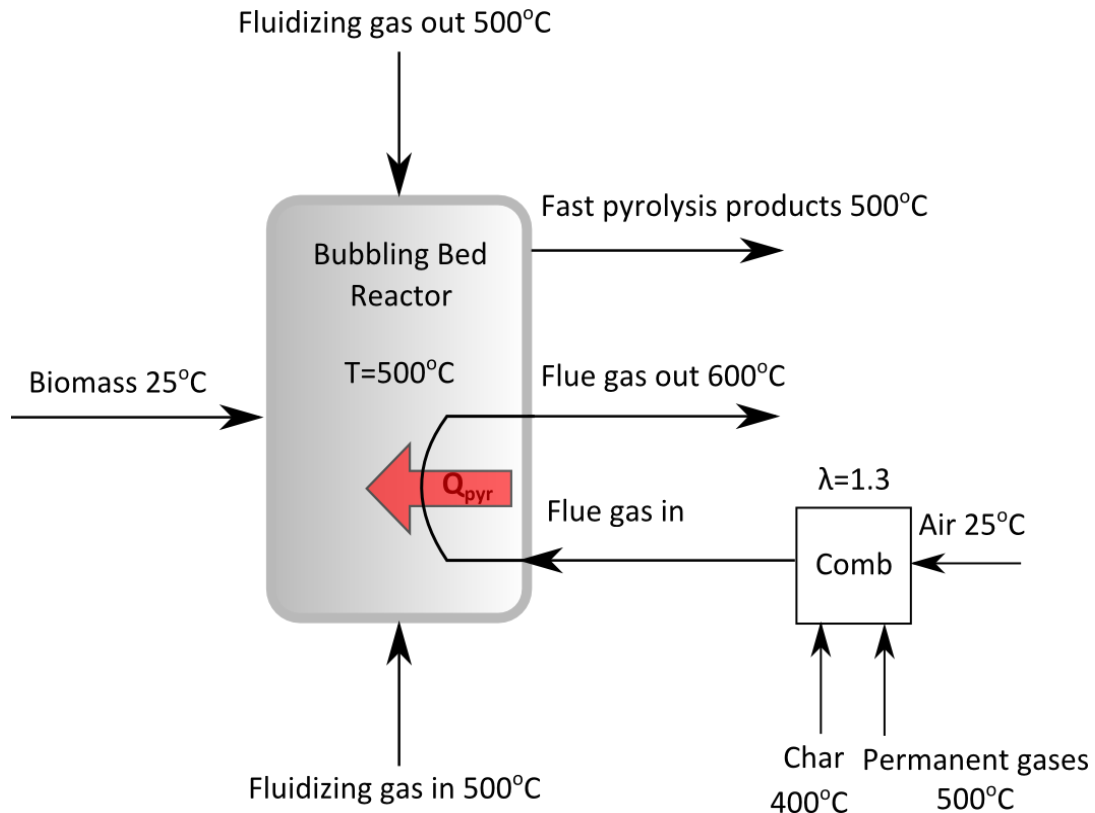
Σχήμα 2.5.1. Απλοποιημένη διαγραμματική απεικόνιση μονάδας ταχείας πυρόλυσης ρευστοποιημένης κλίνης

Η μοντελοποίηση έγινε με βάση τις εξής παραδοχές :

Παροχή της θερμότητας στον αντιδραστήρα

- Η πυρόλυση λαμβάνει χώρα στη θερμοκρασία των 500 °C.
- Η ρευστοποίηση της κλίνης γίνεται με τη χρήση ενός μέρους των μονίμων αερίων, καθώς η απουσία O_2 στο αέριο ρευστοποίησης είναι απαραίτητη για την αποφυγή αντιδράσεων καύσης. Αν και η παροχή του αερίου ρευστοποίησης ανά kg τροφοδοτούμενης βιομάζας εξαρτάται από το σχεδιασμό της κλίνης, γίνεται η υπόθεση πως είναι τέτοια ώστε η ενέργεια αναθέρμανσης των μονίμων αερίων να είναι 600 kJ/kg βιομάζας [36]. Το υπόλοιπο ποσό των μονίμων αερίων που δε χρησιμοποιείται για τη ρευστοποίηση καίγεται για την παροχή θερμότητας στον αντιδραστήρα.
- Η παροχή της ενέργειας της διεργασίας στην κλίνη γίνεται έμμεσα, με κυκλοφορία στο μανδύα και τις σωληνώσεις της καυσαερίων που προέρχονται από την καύση του μέρους των μονίμων αερίων που δε χρησιμοποιείται για τη ρευστοποίηση και του εξανθράκωματος.
- Το εξανθράκωμα και τα καυσαέρια που καίγονται για την παροχή θερμότητας στην κλίνη καίγονται με $\lambda_{ch}=1.3$ και $\lambda_g=1.2$ αντίστοιχα. Επειδή η κλίνη βρίσκεται

στη θερμοκρασία των 500 °C, η παροχή θερμότητας πρέπει να γίνεται σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Γι'αυτό το λόγο, η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από την κλίνη ορίζεται ίση με 600°C. Με βάση αυτά τα δεδομένα υπολογίζεται το ποσοστό του εξανθρακώματος που χρησιμοποιείται για τη θέρμανση του αντιδραστήρα (θερμικές απώλειες 3%).

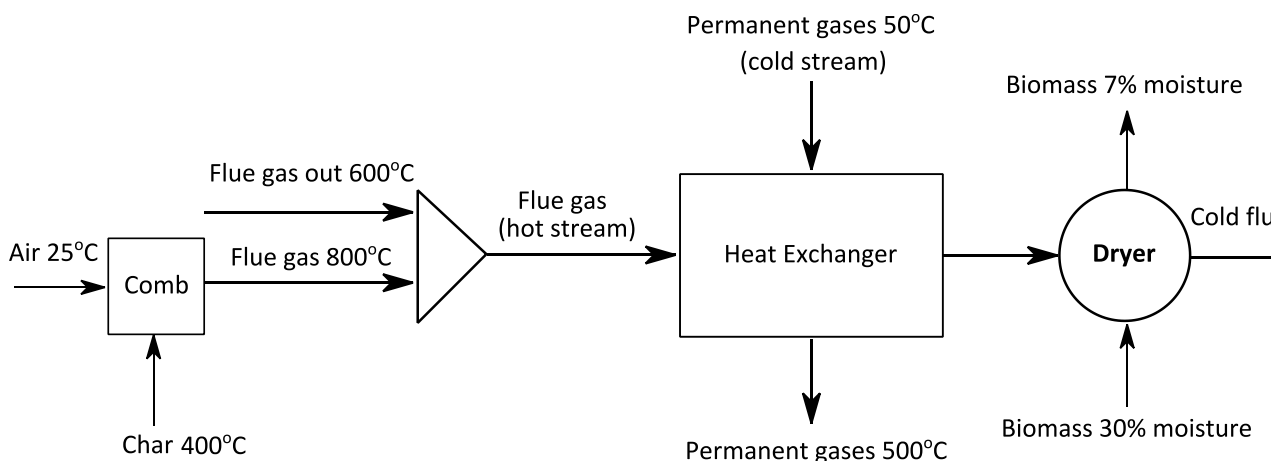


Σχήμα 2.5.2. Ισοζύγιο ενέργειας και παροχή θερμότητας στον αντιδραστήρα

Αναθέρμανση αερίου ρευστοποίησης και ξήρανση βιομάζας

- Μετά την έξοδό τους από τον ψύκτη, τα μόνιμα αέρια βρίσκονται στη θερμοκρασία των 50 °C. Πριν διαχωριστούν θερμαίνονται στη θερμοκρασία των 500 °C.
- Η θέρμανσή τους γίνεται με εναλλάκτη, το θερμό ρεύμα του οποίου αποτελείται από τα καυσαέρια θέρμανσης του αντιδραστήρα και καυσαέρια καύσης πρόσθετου ποσού εξανθρακώματος που χρησιμοποιείται για την κάλυψη των υπόλοιπων θερμικών καταναλώσεων της μονάδας.
- Το εξανθράκωμα που απομακρύνεται στους κυκλώνες, πριν από την ψύξη και τη συμπύκνωση των πτητικών, βρίσκεται σε θερμοκρασία ίση με 100°C κατώτερη από την θερμοκρασία της κλίνης, και στην περίπτωση της παρούσας εφαρμογής ίση με 400 °C.
- Η παροχή του αέρα καύσης του πρόσθετου εξανθρακώματος ορίζεται ώστε ο αντιδραστήρας να είναι σχεδόν αδιαβατικός, και η θερμοκρασία των καυσαερίων να είναι ίση με 800°C.

- Η τελική θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από την εγκατάσταση είναι 180 °C. Η θερμοκρασία αυτή είναι τεχνικά εφικτή με τη δεδομένη τεχνολογία. Το ποσό του πρόσθετου εξανθρακώματος που χρησιμοποιείται ορίζεται ώστε κατά την ψύξη των καυσαερίων που εξέρχονται από τον εναλλάκτη μέχρι αυτή τη θερμοκρασία να παρέχεται η θερμότητα που απαιτείται για την ξήρανση της βιομάζας.



Σχήμα 2.5.3. Αναθέρμανση αερίου ρευστοποίησης και ξήρανση της βιομάζας με καύση πρόσθετου εξανθρακώματος

Επιπλέον παραδοχές :

- Η ενέργεια για την πυρόλυση υπολογίζεται από την εξίσωση (2.3.8.) :

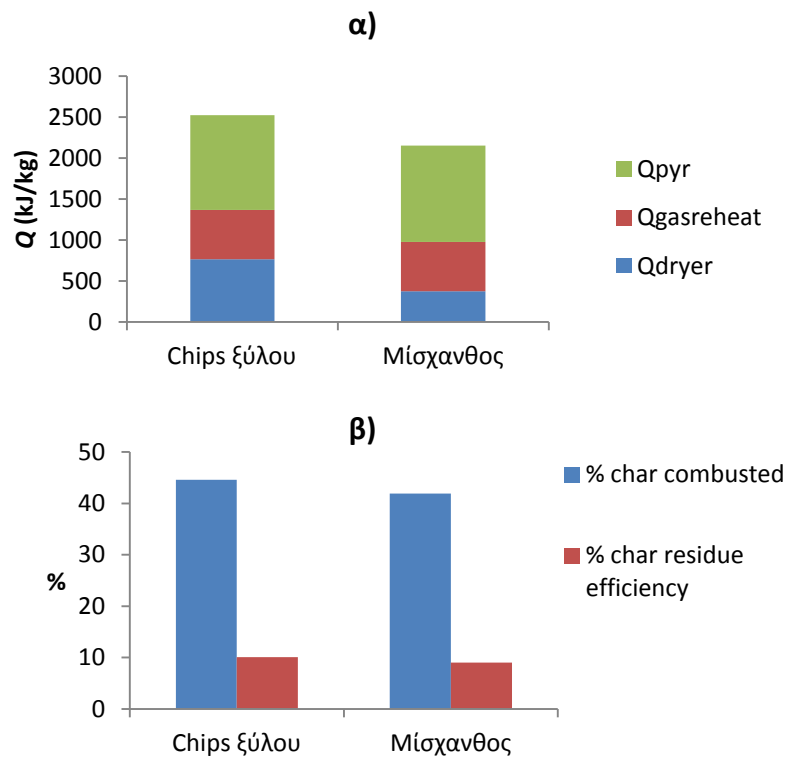
$$Q_{pyr} = m_{bio} \cdot \left(\int_{T_o}^{T_{rac}} C_{p_{bio}} \cdot dT + 553 - 3142 \cdot Y_{ch(ar),bio(ar)} \right)$$

- Η αρχική υγρασία της βιομάζας ορίζεται 30 % w/w για τα chips ξύλου και 15% w/w για το μίσχανθο

Η μοντελοποίηση που παρουσιάστηκε δεν λαμβάνει υπόψιν τις ιδιαίτερες τεχνικές λεπτομέρειες και απαιτήσεις της διεργασίας. Στόχος όμως είναι μια πρωταρχική διερεύνηση της δυνατότητας να παράγεται η ενέργειά της από την καύση των προϊόντων, και έπειτα ο προσεγγιστικός προσδιορισμός του ποσού εξανθρακώματος που απαιτείται για την κάλυψή της. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αποτελέσματα που προέκυψαν για διάφορα είδη βιομάζας για ταχεία πυρόλυση στους 500 °C. Τα δεδομένα για τα είδη βιομάζας για τα οποία έγινε η μοντελοποίηση είναι τα ίδια με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο.

Από τα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται πως το μεγαλύτερο μέρος της απαιτούμενης ενέργειας (50%) είναι αυτό που απαιτείται για τη θέρμανση της βιομάζας και τη χημική μετατροπή της στα τελικά προϊόντα. Το υπόλοιπο μέρος κατανέμεται ισόποσα μεταξύ της

ενέργειας αναθέρμανσης του αερίου ρευστοποίησης και της θερμότητας ξήρανσης της βιομάζας. Και στις δύο περιπτώσεις είναι αναγκαία η καύση περίπου του 40% w/w του εξανθρακώματος, ενώ το ποσό που περισσεύει έχει ενεργειακή απόδοση ίση με περίπου 9% της αρχικής βιομάζας.



Σχήμα 2.5.4. α) θερμικές καταναλώσεις μονάδας ταχείας πυρόλυσης Q (kJ/kg) β) ποσοστό καύσης παραγόμενου εξανθρακώματος (% w/w) και ενεργειακή απόδοση υπόλοιπου ($\% \frac{HHV_{prod} M_{prod}}{HHV_{biomass} M_{biomass}}$)

3. ΣΥΛΛΟΓΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΒΙΟΕΛΑΙΟΥ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή της εργασίας, ένα από τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζει η μετατροπή της αρχικής στερεής βιομάζας σε βιοέλαιο μέσω της ταχείας πυρόλυσης είναι η δυνατότητα τοπικής και χρονικής αποδέσμευσης της παραγωγής της και της τελικής αξιοποίησης του ενεργειακού και χημικού της περιεχομένου. Έτσι, το βιοέλαιο μπορεί να παίζει το ρόλο ενός αποδοτικού φορέα καυσίμου μεταξύ γεωγραφικά απομακρυσμένων περιοχών, διευρύνοντας παράλληλα το πεδίο των τελικών χρήσεων της αρχικής βιομάζας. Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται συνοπτική αναφορά στα στάδια μέσω των οποίων η βιομάζα συλλέγεται από τις διάφορες πηγές της και προετοιμάζεται για αξιοποίηση ως καύσιμο και τα οποία συμβάλλουν στο τελικό κόστος απόκτησής της. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το εναλλακτικό σχήμα χρησιμοποίησης του βιοελαίου ως ενεργειακού φορέα αντί της βιομάζας, και τα πλεονεκτήματά του. Στο τέλος του κεφαλαίου γίνεται η περιγραφή της αεριοποίησης του βιοελαίου, η οποία αποτελεί μία πολλά υποσχόμενη διεργασία και παρουσιάζονται κάποια πρωταρχικά αποτελέσματα σχετικά με τις ιδιότητες του αερίου σύνθεσης που παράγεται για διάφορες θερμοκρασίες και πιέσεις χρησιμοποιώντας το Aspen PlusTM.

3.1. Συλλογή και κόστος απόκτησης βιομάζας

3.1.1. Πηγές βιομάζας

Η βιομάζα κατηγοριοποιείται σε δύο είδη, τη λιγνοκυτταρινούχο και την ποώδη.

- Λιγνοκυτταρινούχος βιομάζα

Η λιγνοκυτταρινούχος βιομάζα περιλαμβάνει διάφορα ξυλώδη είδη, τα οποία ανάλογα με τη μορφή και το μέγεθός τους ομαδοποιούνται σε κούτσουρα, chips, κομμάτια ξύλου, πελλέτες και μπριγκέτες. Η φαινομενική πυκνότητα (bulk density) της ξυλώδους βιομάζας κυμαίνεται μεταξύ 250 kg/m³ (τεμάχια ξύλου) έως και 750 kg/m³ (πελλέτες) [37]. Η υγρασία της άλλοτε λαμβάνει τιμές γύρω στο 10% w/w (πελλέτες) και άλλοτε μπορεί να φτάσει και το 30% w/w (chips) [37]. Οι βασικές πηγές λιγνοκυτταρινούχου βιομάζας είναι οι εξής :

Δασική βιομάζα

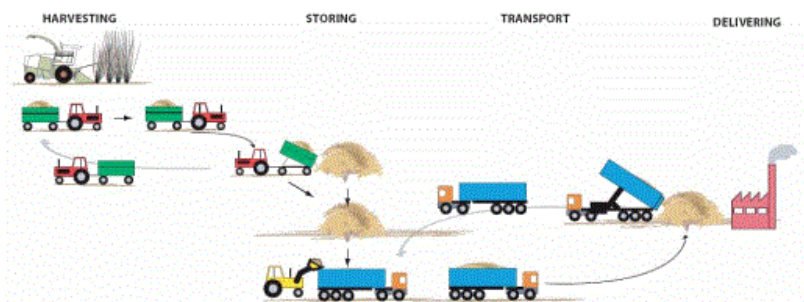
Η πλουσιότερη πηγή λιγνοκυτταρινούχου βιομάζας είναι οι δασικές εκτάσεις. Οι δασικές αυτές εκτάσεις μπορεί να υλοτομούνται είτε αποκλειστικά για την παραγωγή

ξυλώδους καυσίμου, είτε για άλλους σκοπούς (προϊόντα ξυλείας) και μέρος των υπολειμμάτων να συλλέγεται ως καύσιμο για μονάδες παραγωγής ενέργειας ή χημικών διεργασιών. Η υλοτόμηση των δένδρων μπορεί να είναι είτε πλήρης (αποψίλωση-clear cut), οπότε η δασική έκταση εκκαθαρίζεται ολοκληρωτικά, είτε επιλεκτική (selective cut), με μερική εκκαθάριση της δασικής περιοχής. Εκτάσεις με δασική βιομάζα υψηλής πυκνότητας βρίσκονται στη Βόρεια και Κεντρική Ευρώπη καθώς και στη σκανδιναβική χερσόνησο [37]. Η προμήθεια βιομάζας μέσω συμβατικής ξυλοκομίας των παρθένων δασών λειτουργεί σε σχετικά μεγάλη χρονική κλίμακα [38], και η παραγωγή είναι άμεσα εξαρτώμενη από το βαθμό αύξησης ή μείωσης του δάσους. Ένα ακόμα μειονέκτημα της ξυλώδους βιομάζας από τα παρθένα δάση είναι η υψηλή περιεκτικότητα σε φλοιό, ακαθαρσίες και λάσπη [38], ενώ μπορεί να έχει πολύ υψηλή υγρασία, άνω του 60% w/w.

Το πρόβλημα της απαίτησης σταθερά υψηλού ρυθμού παραγωγής βιομάζας λύνεται με τις ενεργειακές καλλιέργειες ξύλου. Μέσω αυτών είναι δυνατή η εκμετάλλευση της αυξημένης ετήσιας ανά εκτάριο παραγωγής των νεότερων φυτών, τα οποία καλλιεργούνται αποκλειστικά με σκοπό της χρήση τους ως καύσιμο. Υπάρχουν διάφορες κατηγορίες ενεργειακών καλλιεργειών, με κυριότερες τις δασοπονικές καλλιέργειες μικρού περίτροπου χρόνου (Short rotation coppice) και τη δασοκομία σύντομης αμειψισποράς (Short rotation forestry).

Δασοπονικές καλλιέργειες μικρού περίτροπου χρόνου/βραχυχρόνια αμειψισπορά

Για τις καλλιέργειες αυτές επιλέγονται είδη υψηλού ρυθμού ανάπτυξης, όπως οι λεύκες, η ιτιά και ο ευκάλυπτος, τα οποία κόβονται σχεδόν ολοκληρωτικά το χειμώνα, και ξανααναπτύσσονται την επόμενη περίοδο του χρόνου [38]. Οι καλλιέργειες αυτές χαρακτηρίζονται από υψηλή εκμηχάνιση της διαδικασίας συγκομιδής, ο κύκλος της οποίας διαρκεί συνήθως από 2 έως 4 χρόνια [38]. Η συλλεγόμενη βιομάζα χρησιμοποιείται ως καύσιμο αφού εξαχθεί από το χωράφι στη μορφή chips, με ποσοστό υγρασίας γύρω στο 45 (ευκάλυπτος)-60 (λεύκα) % w/w. Λόγω των ευνοϊκών συνθηκών καλλιέργειας, η απόδοσή των χωραφιών μπορεί να ξεπεράσει τους 15 dry tn/ha [37].



Εικόνα 3.1.1. Στάδια συλλογής βιομάζας από δασοπονικές καλλιέργειες μικρού περίτροπου χρόνου

Δασοκομία σύντομης αμειψισποράς

Η δασοκομία σύντομης αμειψισποράς έχει αρκετές ομοιότητες με τις δασοπονικές καλλιέργειες, με τη διαφορά ότι σε αυτή την περίπτωση ο κύκλος συγκομιδής κυμαίνεται μεταξύ 8 και 20 ετών [38], ενώ το παραγόμενο ξύλο συνήθως χρησιμοποιείται από τη βιομηχανία και όχι ως καύσιμο. Τα δέντρα κόβονται όταν η διάμετρος του κορμού τους είναι μεταξύ 10-20 cm [38]. Είδη που καλλιεργούνται είναι όπως και στην προηγούμενη περίπτωση οι λεύκες, οι ευκάλυπτοι αλλά και οξιές και πεύκα [37],[38].

Άλλες πηγές ξυλώδους βιομάζας εκτός των παρθένων δασών και των ενεργειακών καλλιεργειών είναι τα υπολείμματα από γεωργικές καλλιέργειες (κλαδέματα και εκρίζωση), τα δάση πλατύφυλλων-φυλλοβόλων, τα δέντρα που προέρχονται από αστικά πάρκα και ανεμοφράκτες, η βιομηχανία στερεού ξύλου (πχ πριονιστήρια, βιομηχανία χαρτοπολτού) και τροφίμων κλπ. Πρέπει να σημειωθεί πως όσον αφορά τα υπολείμματα ξυλώδους βιομάζας από γεωργικές καλλιέργειες, η ποιότητά τους είναι σχετικά χαμηλή εξαιτίας της σχετικά μεγάλης περιεκτικότητάς τους σε τέφρα και σε φλοιό.

- **Ποώδης βιομάζα**

Η ποώδης βιομάζα περιλαμβάνει μη ξυλώδη καύσιμα, τα οποία αποτελούν προϊόντα γεωργίας και είναι πλούσια σε υδρογονάνθρακες (πχ στάρι, χόρτα, ρύζι, πατάτες κλπ). Τα ποώδη είδη παραδοσιακά προορίζονταν αποκλειστικά για χρήση ως τρόφιμα και δεν χρησιμοποιούνταν για παραγωγή ενέργειας, κάτι που άλλαξε σχετικά πρόσφατα, με αρκετή αντιπαράθεση να εστιάζεται στο δίλημμα «φαγητό ή ενέργεια». Οι μορφές στις οποίες απαντώνται είναι δεμάτια/μπάλες (bales) πυκνότητας 150 kg/m³ πελλέτες πυκνότητας 600-650 kg/m³, φλοιοί και κελύφη/πυρήνες [37]. Οι κύριες πηγές της ποώδους βιομάζας είναι οι εξής :

Ενεργειακές καλλιέργειες

Αντίστοιχα με τις ενεργειακές καλλιέργειες ξυλώδους βιομάζας, οι ενεργειακές καλλιέργειες ποώδους βιομάζας περιλαμβάνουν φυτά και χόρτα που καλλιεργούνται αποκλειστικά για χρήση στον τομέα βιοενέργειας. Το βασικότερο πλεονέκτημά τους είναι η δυνατότητα επίτευξης υψηλών αποδόσεων παραγωγής ανά στρέμμα και κατά συνέπεια βελτιωμένη οικονομικότητα. Τα φυτά που χρησιμοποιούνται μπορεί να είναι βρώσιμα είδη πλούσια σε έλαια και άμυλο (καλαμπόκι, σιτηρά, ελαιοκράμβη, ηλιάνθος) με σκοπό την παραγωγή υγρών καυσίμων (βιοντήζελ και βιοαιθανόλη) 1^{ης} γενιάς. Πιο πρόσφατα, συνηθίζεται η καλλιέργεια «λιγνοκυτταρινούχων» ειδών ποώδους βιομάζας με χαμηλότερη περιεκτικότητα σε έλαιο/άμυλο και τα οποία είναι πλούσια σε κυτταρίνη, ημικυτταρίνη και λιγνίνη, για την παραγωγή βιοκαυσίμων 2^{ης} γενιάς (μίσχανθος, switchgrass). Οι ενεργειακές καλλιέργειες ποώδους βιομάζας, ανάλογα με τον κύκλο ζωής των φυτών που χρησιμοποιούνται, διακρίνονται σε

πολυετείς, διάρκειας 10-15 ετών (φάλαρις, μίσχανθος, switchgrass, γιγάντιο καλάμι και αγριαγκινάρα) και ετήσιες (ινώδες σόργο, κενάφ, κάνναβη, σιτηρά, ελαιοκράμβη). Η απόδοση των ενεργειακών καλλιεργειών ποώδους βιομάζας είναι αρκετά υψηλή, με το μίσχανθο να αποδίδει έως και 14 dry tn/ha [38].

Αγροτικά υπολείμματα

Περιλαμβάνουν παραπροϊόντα που μένουν στο χωράφι από την παραγωγή καλλιεργειών που προορίζονται για τροφές και ίνες (άχυρο σιτηρών ρυζιού, υπολείμματα αραβόσιτου). Τα αγροτικά υπολείμματα δεν έχουν διατροφική αξία για τους ανθρώπους, όμως μπορούν να βρουν τελικές χρήσεις ανταγωνιστικές προς την παραγωγή βιοενέργειας (πχ εκτροφή ζώων, παραγωγή χαρτοπολτού) [37].

3.1.2. Εφοδιαστικές αλυσίδες βιομάζας

Είναι σαφές από τα προηγούμενα πως ανάλογα με το είδος και την προέλευση της βιομάζας, η μέθοδος και κατ'επέκταση το κόστος συγκομιδής της και μεταφοράς της από το χώρο παραγωγής της στο χώρο της τελικής της αξιοποίησης μπορεί να ποικίλλει. Τα διαδοχικά βήματα μέσω των οποίων η βιομάζα συλλέγεται στην πρωταρχική της μορφή και τελικά καταλήγει ως προϊόν έτοιμο για τελική χρήση διαμορφώνουν τις εφοδιαστικές αλυσίδες.

Τα θεμελιώδη στάδια μίας εφοδιαστικής αλυσίδας βιομάζας είναι τα εξής [37] :

- **Συγκομιδή (Harvest)** : είναι η διαδικασία συλλογής της βιομάζας σε πρωτογενή μορφή. Η βιομάζα μπορεί να συλλέγεται είτε ως υπόλειμμα μιας κύριας δραστηριότητας (πχ γεωργικά υπολείμματα/υπολείμματα τροφίμων) είτε ως κύριο προϊόν μιας διεργασίας (υλοτόμηση, ενεργειακές καλλιέργειες). Στην περίπτωση της συλλογής της βιομάζας από βιομηχανικές διεργασίες η συλλογή μπορεί να απουσιάζει ως ξεχωριστό στάδιο. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται εξαρτάται από το είδος της βιομάζας (ξυλώδης ή ποώδης) και την προέλευσής της (παρθένα δάση, καλλιέργειες). Παράλληλα πρέπει να σημειωθεί πως στην περίπτωση ποώδους βιομάζας, η συλλογή γίνεται μέσα σε ένα πολύ στενό χρονικό περιθώριο πριν οι κακές καιρικές συνθήκες την καταστήσουν μη πρακτική ή αδύνατη [37]. Οι περιοχές συγκομιδής ξυλώδους βιομάζας είναι συχνά δυσκολότερα προσβάσιμες (πχ παρθένα δάση) εισάγοντας πρόσθετες δυσκολίες σε αυτό το στάδιο.
- **Απομάκρυνση (Extraction)** : στην περίπτωση που ο χώρος συλλογής της βιομάζας δεν είναι οδικά προσβάσιμος, κατά την εξαγωγή η συλλεχθείσα βιομάζα συγκεντρώνεται σε ένα χώρο (landing) με σύνδεση στο οδικό δίκτυο.

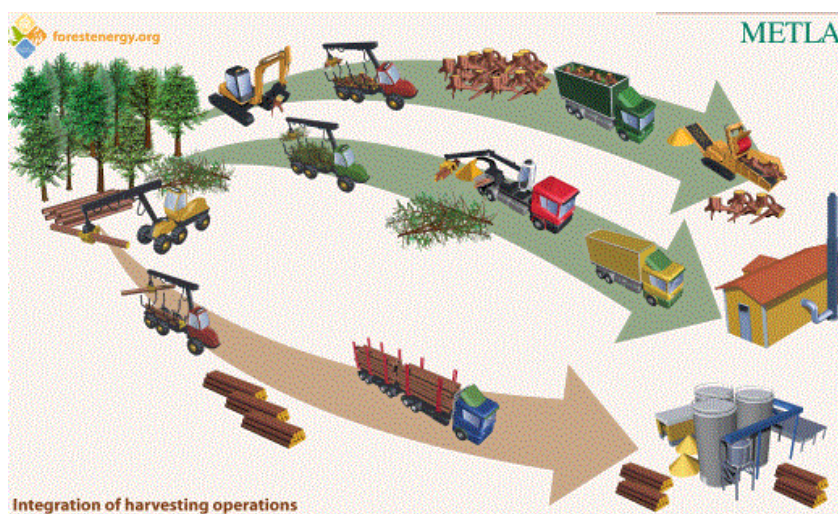
- **Μετατροπή/μείωση μεγέθους (Transformation/size reduction)** : περιλαμβάνει τις διαδικασίες αρχικής επεξεργασίας της βιομάζας, οι οποίες διευκολύνουν το χειρισμό, τη μεταφορά, τη δυνατότητα αποθήκευσης και βελτιώνουν την ποιότητά της. Τέτοιες διαδικασίες είναι για παράδειγμα η συμπίεση, η κονιορτοποίηση, ο καθαρισμός από ανεπιθύμητα μέρη κλπ. Η ξυλώδης βιομάζα συνήθως μετατρέπεται σε chips ή πελέτες, ενώ η ποώδης σε μπάλες, ανάλογα πάντα με τις ιδιαίτερες απαιτήσεις της διεργασίας στην οποία πρόκειται να χρησιμοποιηθεί. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για μετατροπή και μείωση μεγέθους περιλαμβάνει τεμαχιστές (chippers), σχίστες (shredders), μύλους και σπαστήρες.



Εικόνα 3.1.2. Μορφές βιομάζας μετά το μετασχηματισμό της

- **Μεταφορά της βιομάζας (Transport)**: πρόκειται για τη μεταφορά της βιομάζας από την περιοχή εξαγωγής της στη μονάδα επεξεργασίας της. Στην περίπτωση που ο τελικός προορισμός βρίσκεται κοντά στην περιοχή συγκομιδής, η διαδικασία της μεταφοράς μπορεί να ταυτίζεται με την απομάκρυνση. Η ξυλώδης βιομάζα έχει υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα κι έτσι η μεταφορά της είναι οικονομικά λιγότερο επιζήμια από τη μεταφορά της χαμηλής ενεργειακής πυκνότητας ποώδους βιομάζας.
- **Ξήρανση (Drying)**: Αναπόφευκτα η βιομάζα έχει ένα ποσοστό υγρασίας, το οποίο είναι ανεπιθύμητο καθώς μειώνει την ως έχει θερμογόνο ικανότητα του καυσίμου, μειώνει το βαθμό απόδοσης της καύσης του και αυξάνει το κόστος μεταφοράς και αποθήκευσής του. Σε γενικές γραμμές η ξυλώδης βιομάζα έχει υψηλότερο ποσοστό υγρασίας απ'ότι η ποώδης. Πέρα από τη φυσική ξήρανση της βιομάζας (αεροξήρανση), μπορούν να εφαρμοστούν και μέθοδοι βεβιασμένης ξήρανσης, εάν το απαιτεί η διεργασία, πριν ή και μετά τη συγκομιδή της [38]. Οι περισσότερες διεργασίες απαιτούν χαμηλή υγρασία της βιομάζας που δεν πρέπει να ξεπερνά το 15 % w/w [38].

- **Αποθήκευση (Storage)** : η αποθήκευση είναι ένα αναπόφευκτο στάδιο κάθε εφοδιαστικής αλυσίδας στερεής βιομάζας. Μία βασική παράμετρος που καθορίζει τις συνθήκες και τις απαιτήσεις αποθήκευσης είναι η βιοαποικοδομησιμότητα της βιομάζας [37], [38] και η ικανότητά της να απορροφά την υγρασία στην οποία εκτίθεται [38]. Η αποθήκευση είναι επίσης απαραίτητη στην περίπτωση που η βιομάζα πρόκειται να χρησιμοποιηθεί σε μονάδες ενεργειακής και χημικής μετατροπής καθ'ότι βοηθαι στην βελτίωση της ποιότητάς της (με μείωση της υγρασίας και αποφυγή απωλειών μάζας). Επίσης οι απαιτήσεις αποθήκευσης παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο όταν ο χρόνος συγκομιδής διαφέρει από το χρόνο μεταγωγής της στη μονάδα επεξεργασίας (πχ ποώδης βιομάζα). Η μετακίνηση της βιομάζας από και προς το χώρο αποθήκευσης της πορεί να γίνεται με διάφορους τρόπους, όπως κοχλίες, πνευματικά συστήματα, συστήματα μάντων και εκφορτωτές.
- **Ομογενοποίηση:** η ομογενοποίηση αφορά τόσο το μέγεθος και το σχήμα της βιομάζας, όσο τη σύσταση και την υγρασία της. Ο λόγος που είναι χρήσιμη είναι η καλύτερη απόδοση των διαφόρων διεργασιών (πχ αεριοποίηση, καύση, πυρόλυση) όταν το καύσιμο έχει σταθερή ποιότητα [37].



Εικόνα 3.1.3. Εφοδιαστικές αλυσίδες δασικής βιομάζας [37]

3.1.3. Κόστος απόκτησης βιομάζας

Όλα τα παραπάνω στάδια των εφοδιαστικών αλυσίδων συνεισφέρουν στο συνολικό κόστος προμήθειας της βιομάζας.

Το κόστος αυτό σύμφωνα με τη βιβλιογραφία λαμβάνει τιμές που παρουσιάζουν έντονη διακύμανση, από 20 έως και 100€/tn [2], [36], [39] καθώς εξαρτάται από παράγοντες που μπορούν να διαφοροποιούνται αρκετά. Τέτοιοι παράγοντες είναι το είδος και η προέλευση της βιομάζας, ο τρόπος συλλογής της και η απαραίτητη πρωτογενής επεξεργασία της, οι εν δυνάμει εναλλακτικές χρήσεις της, η σχέση προσφοράς και ζήτησής της στην αγορά κλπ. Ένας ακόμη βασικός παράγοντας με επιρροή στην τιμή

προμήθειας της βιομάζας συνίσταται στο κόστος μεταφοράς της, το οποίο είναι άμεση συνάρτηση της απόστασης μεταξύ της τοποθεσίας συλλογής της και της μονάδας επεξεργασίας της.

Οι βασικές συνιστώσες που απαρτίζουν την τελική τιμή προμήθειας της βιομάζας είναι οι εξής [37] :

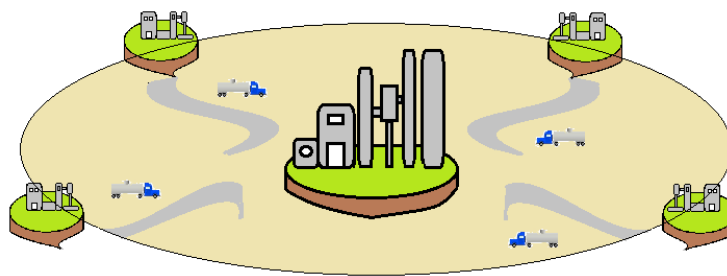
- Κόστος γης (ενοίκια, φορολογία)
- Κόστος καλλιέργειας (φύτευση, εργασία και συντήρηση χωραφιού, άρδευση, λιπάσματα-διασπορά τέφρας)
- Κόστος συγκομιδής (εξοπλισμός συλλογής, επεξεργασίας, και τοπικής μεταφοράς)
- Κόστος αποθήκευσης (κατασκευή, συντήρηση και φύλαξη αποθηκευτικών χώρων)
- Κόστος οδοποιίας (στην περίπτωση που η βιομάζα βρίσκεται σε οδικά απομονωμένη περιοχή)
- Κόστος μεταφοράς βιομάζας

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, μελετάται η οικονομικότητα του σχήματος αποκεντρωμένης μετατροπής της συλλεχθείσας βιομάζας σε βιοέλαιο με κεντρικό ενδιαφέρον την δυνατότητα μείωσης του κόστους μεταφοράς του ενεργειακού προϊόντος. Για αυτό το λόγο, το κύριο βάρος της μελέτης επικεντρώνεται σε αυτή την παράμετρο. Κατά συνέπεια, το κόστος καυσίμου της βιομάζας εξαιρουμένου του κόστους μεταφοράς δεν εκτιμάται αναλυτικά αλλά πρόκειται να αποτελέσει αντικείμενο ανάλυσης ευαισθησίας, με βάση τιμές που απαντώνται στη βιβλιογραφία. Αντίθετα, το κόστος μεταφοράς και συλλογής βιομάζας αλλά και του βιοελαίου αναλύεται ενδελεχώς στο επόμενο κεφάλαιο.

3.2. Μετατροπή της βιομάζας σε βιοέλαιο

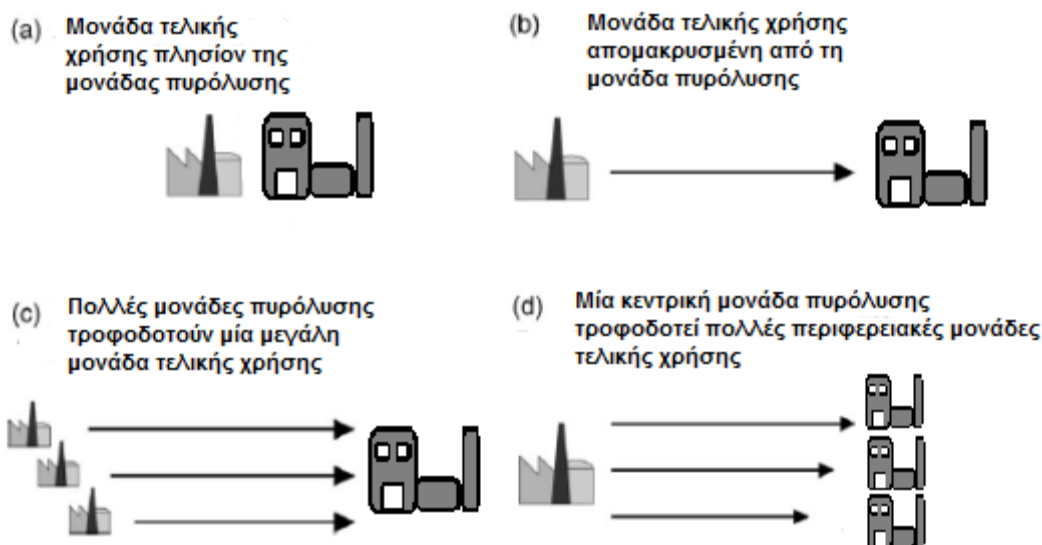
3.2.1. Η βασική ιδέα

Στην παρούσα εργασία, μελετάται το σχήμα αποδεσμευμένης συλλογής βιομάζας σε αποκεντρωμένες μονάδες πυρόλυσης πλησίον του τόπου παραγωγής της, μετατροπής αυτής σε βιοέλαιο και κατόπιν μεταφοράς του σε άλλες κεντρικές μονάδες, το οποίο απεικονίζεται απλουστευτικά στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 3.2.1. Το σχήμα παραγωγής βιοελαίου υπό εξέταση

Αντίστοιχα με το παραπάνω σχήμα, μπορούν να προκύψουν και άλλα εναλλακτικά, τα οποία απεικονίζονται ακολούθως [40].



Σχήμα 3.2.2. Σχήματα παραγωγής βιοελαίου και τελικής χρήσης του [40]

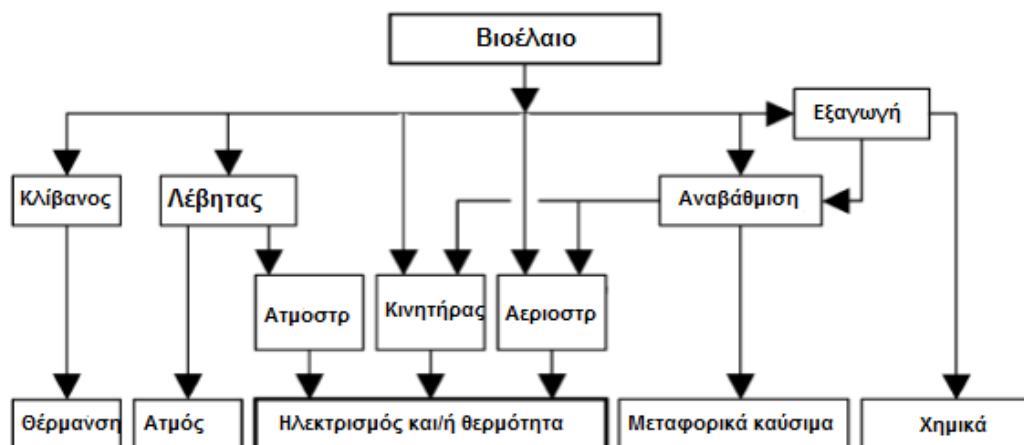
Στην περίπτωση (a) η ταχεία πυρόλυση γίνεται στον ίδιο χώρο με την τελική αξιοποίηση του βιοελαίου. Σε αυτή την περίπτωση υφίστανται περιορισμοί στην παραγωγή τελικού προϊόντος (ηλεκτρισμός/χημικά) λόγω της περιορισμένης διαθεσιμότητας της βιομάζας η οποία θα πρέπει να συγκεντρώνεται σε μια περιορισμένη περιοχή γύρω από τη μονάδα.

Στην περίπτωση (b) το βιοέλαιο παράγεται σε απομακρυσμένη περιοχή όπου λαμβάνει χώρα η συλλογή και η πυρόλυση της βιομάζας και κατόπιν μεταφέρεται σε κάποια άλλη για περαιτέρω επεξεργασία. Σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση, το σχήμα είναι επιβαρυνόμενο με το κόστος μεταφοράς του βιοελαίου, όμως πλέον γίνεται εκμετάλλευση της υψηλής ενεργειακής πυκνότητάς του. Είναι σημαντική η κατάλληλη μελέτη των διαφόρων παραμέτρων του σχήματος, όπως η παραγωγή βιομάζας, το κόστος τροφοδοσίας, η παραγωγή βιοελαίου και η απόσταση μεταφοράς του, ώστε να είναι βιώσιμο οικονομικά και τεχνικά το σενάριο.

Η περίπτωση (c) αποτελεί γενίκευση της (b). Η παραγωγή βιοελαίου γίνεται σε διάφορους περιφερειακούς απομακρυσμένους κόμβους του σχήματος, και η περαιτέρω επεξεργασία/αξιοποίησή του σε έναν άλλο, κεντρικό κόμβο. Λόγω της υψηλότερης

τροφοδοσίας, είναι δυνατή η λειτουργία κεντρικών μονάδων μεγαλύτερης ισχύος και άρα μικρότερου ειδικού κόστους.

Η περίπτωση (d) αποτελεί αντιστροφή της περίπτωσης (c), καθώς η πυρόλυση γίνεται σε ένα κεντρικό κόμβο του συστήματος και κατόπιν το βιοέλαιο μεταφέρεται σε αποκεντρωμένα σημεία όπου λαμβάνει χώρα η τελική του χρήση.



Σχήμα 3.2.3. Σχήματα τελικής αξιοποίησης του βιοελαίου [40]

Η τελική χρήση του βιοελαίου, ανάλογα με την οδό που ακολουθείται, μπορεί να είναι παραγωγή θερμότητας (μέσω άμεσης καύσης), παραγωγή ατμού, ηλεκτρισμός ή συνδυασμένη παραγωγή ισχύος και θερμότητας (μέσω ατμοπαραγωγών, ΜΕΚ και αεριοτροβίλων), καύσιμα κίνησης ή και χημικά [40]. Στα πλαίσια των διαφόρων αυτών αναγκών που μπορεί να καλύψει το βιοέλαιο και ανάλογα με τις τεχνολογίες που διατίθενται, ενδέχεται να περνά από κάποια ενδιάμεσα βήματα διεργασιών. Τέτοια είναι για παράδειγμα, η αναβάθμιση της ποιότητάς του με χρήση καταλυτών και χημική επεξεργασία ή η αεριοποίηση και η κατάλληλη διαχείριση του παραγόμενου αερίου σύνθεσης.

3.2.2. Πλεονεκτήματα

Τα πλεονεκτήματα των διαφόρων αυτών σχημάτων αποδεδειγμένης παραγωγής βιομάζας και αξιοποίησης του ενεργειακού/χημικού της περιεχομένου έπεται από μετατροπή της ποικίλλουν. Η βιομάζα στην αρχική μορφή της παράγεται συνήθως σε αγροτικές, αποκεντρωμένες περιοχές, όπου οι υπάρχουσες τεχνολογικές υποδομές δεν επιτρέπουν την αποτελεσματική επεξεργασία της και την αναβάθμισή της. Επειδή η ενεργειακή της πυκνότητα είναι αρκετά χαμηλή (5 GJ/m^3) [32], καθίσταται δυσχερής και ασύμφορη η μεταφορά της σε περιοχές μακριά από το σημείο παραγωγής της. Έτσι, οι δυνατότητες αξιοποίησης του ενεργειακού της περιεχομένου περιορίζονται συχνά στην τοπική καύση της για παραγωγή θερμότητας, η οποία όμως δεν είναι ενεργειακά

αποδοτική διαδικασία. Χάρη στην υγρή φάση του, το βιοέλαιο είναι καύσιμο με μεγαλύτερη ευκολία στο χειρισμό, ενώ η διακίνηση και αποθήκευσή του είναι ευκολότερη, με μικρότερες απαιτήσεις. Λόγω της υψηλότερης ενεργειακής του πυκνότητας (20 GJ/m^3) [18] έναντι της βιομάζας, έχει μικρότερο κόστος μεταφοράς και μπορεί να λειτουργήσει ως αποδοτικός ενεργειακός φορέας. Επομένως στην περίπτωση αναβάθμισής της βιομάζας σε βιοέλαιο, αυτό μπορεί να τροφοδοτηθεί ευχερέστερα σε κεντρικές μονάδες παραγωγής ενέργειας (μηχανές ντήζελ, αεριοστρόβιλοι σε σύζευξη με ατμοπαραγωγό) ή χημικής επεξεργασίας (βιοδιυλιστήρια), όπου η εκμετάλλευσή του γίνεται με μεγαλύτερη αποδοτικότητα. Παράλληλα, η συγκέντρωση κατά το δυνατόν μεγαλύτερης ποσότητας καυσίμου βιοελαίου σε κεντρικές μονάδες επιτρέπει την λειτουργία μονάδων υψηλότερης ισχύος που μπορούν να επωφεληθούν από οικονομίες κλίμακας. Κάτι τέτοιο δεν είναι δυνατόν σε αποκεντρωμένες μονάδες μικρότερου μεγέθους.

Επιπλέον πλεονεκτήματα του βιοελαίου σχετίζονται με την προοπτική της αεριοποίησής του. Η συμπίεσή του σε υψηλές πιέσεις όπου λαμβάνουν χώρα διεργασίες Fischer-Tropsch και σύνθεσης μεθανόλης (30 και 80 bar αντίστοιχα) από το παραγόμενο αέριο είναι ευκολότερη με χρήση αντλιών. Παράλληλα, το βιοέλαιο είναι, σε αντίθεση με τη βιομάζα, καύσιμο ομοιογενές. Δεν είναι απαραίτητη η προεπεξεργασία του (πχ άλεση) και η ξήρανσή του πριν την είσοδό του στον αντιδραστήρα αεριοποίησης. Ακόμη, η περιεκτικότητά του σε τέφρα είναι αρκετά μικρότερη και έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση των απαιτήσεων καθαρισμού του παραγόμενου αερίου σύνθεσης. Τα πλεονεκτήματα αυτά έχουν ιδιαίτερη σημασία για εγκαταστάσεις βιοδιυλιστηρίων ή και παραγωγής ενέργειας όπως μονάδες Integrated Gasification Combustion Cycle (IGCC).

3.3. Αεριοποίηση βιοελαίου

3.3.1. Γενικές αρχές

Η αεριοποίηση αποτελεί, μετά την πυρόλυση, το δεύτερο τμήμα του σχήματος που εξετάζεται στην παρούσα εργασία. Είναι η απαραίτητη πρωταρχική διεργασία που λαμβάνει χώρα στην περίπτωση που τελικός στόχος της αξιοποίησης του βιοελαίου είναι χημικά ή καύσιμα κίνησης, ενώ αποτελεί ενδιάμεσο βήμα και στην περίπτωση που σκοπός είναι η παραγωγή ενέργειας (πχ σε μια μονάδα IGCC).

Η αεριοποίηση είναι η θερμοχημική μετατροπή σε αυξημένη θερμοκρασία μιας ανθρακούχου τροφοδοσίας σε αέριο μονίμων, μη συμπυκνώσιμων αερίων, το οποίο φέρει το ενεργειακό της περιεχόμενο. Πρόκειται για μια σύνθετη διεργασία η οποία περιλαμβάνει τόσο εξώθερμες, όσο και ενδόθερμες αντιδράσεις, αλλά συνολικά είναι ενδόθερμη [41]. Ανάλογα με τον τρόπο που παρέχεται η απαιτούμενη θερμική ενέργεια

στον αντιδραστήρα, κατηγοριοποιούνται οι διάφορες διεργασίες αεριοποίησης. Από τη μία, αυτή μπορεί να παραχθεί από μερική οξείδωση της τροφοδοσίας, η οποία επιτυγχάνεται με υποστοιχειομετρική παροχή οξυγόνου στον αντιδραστήρα. Σε άλλες περιπτώσεις, η παροχή θερμότητας είναι αλλοθέρμη, και διεξάγεται με χρήση ενός άλλου ενεργειακού φορέα (πχ ένα θερμό αέριο) [41].

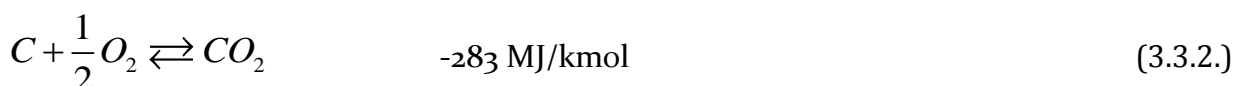
Ανεξαρτήτως της μεθόδου που ακολουθείται η αεριοποίηση διακρίνεται στα ακόλουθα στάδια. Κατ'αρχάς, μέχρι τη θερμοκρασία των 200 °C, η υγρασία των σωματιδίων εξατμίζεται. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται περισσότερο, ξεκινά η θερμική και πυρολυτική αποσύνθεση. Μέχρι τους 500 βαθμούς, το 80% της μάζας της αρχικής τροφοδοσίας απελευθερώνεται με τη μορφή πτητικών, αφήνοντας ένα στερεό υπόλοιπο εξανθρακώματος και τέφρας. Κατά την οξείδωση, μέρος των ενδιάμεσων προϊόντων αντιδρούν με το οξυγόνο και σχηματίζουν CO και CO₂. Οι εξώθερμες αυτές αντιδράσεις καύσης δημιουργούν θερμοκρασίες που φτάνουν στο ύψος των 2000 °C και παρέχουν την απαραίτητη ενέργεια για τη διεργασία. Κατά το τελευταίο σκέλος της διεργασίας, μεταξύ των 800 και 1100 °C, λαμβάνουν χώρα αντιδράσεις αναγωγής και σχηματίζονται τα επιθυμητά συστατικά του αερίου, όπως H₂, και CO, με μείωση των CO₂ και H₂O. Με αύξηση της θερμοκρασίας αεριοποίησης παρέχεται το ποσό θερμότητας που είναι απαραίτητο για την την πραγματοποίηση των ενδόθερμων αντιδράσεων παραγωγής H₂ και CO [41].

Οι κύριες αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά την αεριοποίηση είναι οι ακόλουθες :

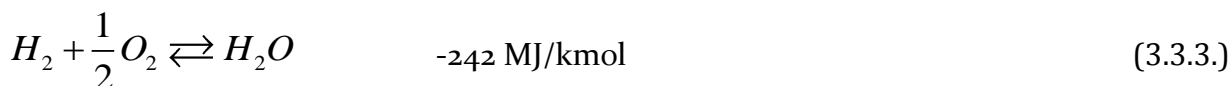
Αεριοποίηση άνθρακα



Καύση άνθρακα



Καύση υδρογόνου



Water-Gas shift reaction



Αντίδραση Boudouard

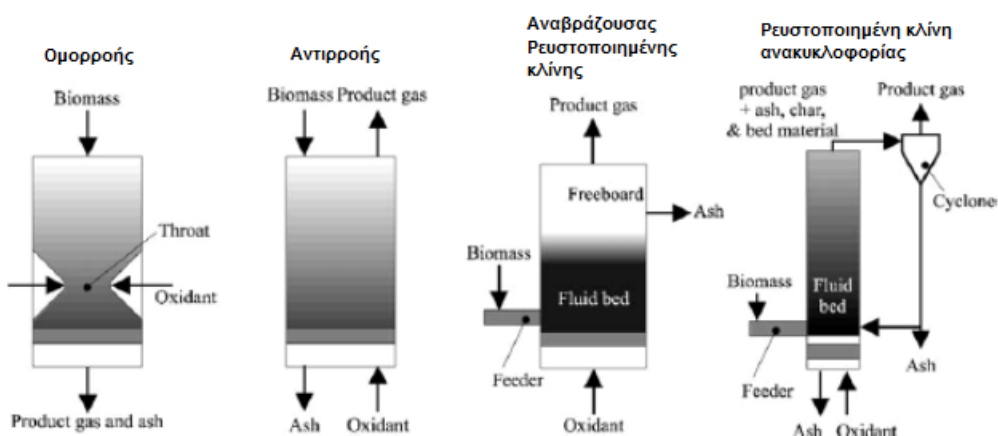


Αντίδραση αναμόρφωσης μεθανίου



Το τελικό προϊόν αέριο σύνθεσης και περιλαμβάνει κυρίως τα είδη CO₂, CO, H₂ και CH₄ ενώ περιέχει και ένα τμήμα υγρασίας.

Οι βασικές κατηγορίες αντιδραστήρων αεριοποίησης βιομάζας φαίνονται στο παρακάτω σχήμα [40]



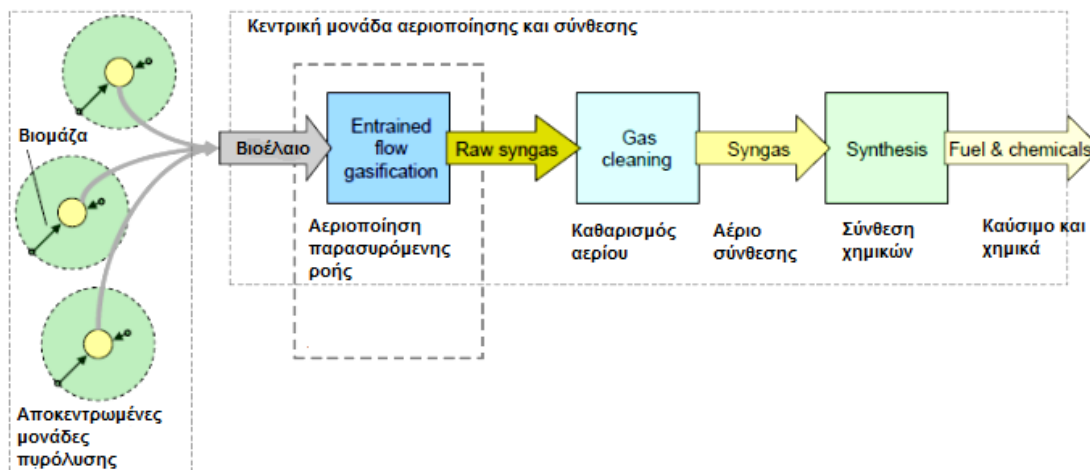
Σχήμα 3.3.1. Είδη αντιδραστήρων αεριοποίησης [40]

Αεριοποίηση βιοελαίου

Ενώ η αεριοποίηση στερεής βιομάζας είναι διαδεδομένη, η κεντρική αεριοποίηση του βιοελαίου που έχει παραχθεί αποκεντρωμένα είναι μια σχετικά πρόσφατη ιδέα.

Ιδιαίτερη έμφαση έχει δοθεί τον τελευταίο καιρό στην αεριοποίηση όχι μόνο του καθαρού βιοελαίου, αλλά και του εξανθρακώματος που παράγεται κατά την πυρόλυση βιομάζας (slurry). Μέσω της ενσωμάτωσης του εξανθρακώματος στο βιοέλαιο, αυξάνεται πολύ περισσότερο το ενεργειακό περιεχόμενο του τελικού προϊόντος/ενεργειακού φορέα, και οι όποιες απώλειες αποδοτικότητας υπεισέρχονται λόγω της μεταφοράς του εξομαλύνονται περισσότερο. Ωστόσο τίθεται το ζήτημα της κάλυψης της ενέργειας της πυρόλυσης, στην περίπτωση που η καύση των μονίμων αερίων δεν επαρκεί. Παράλληλα, είναι γνωστό πως η παρουσία του εξανθρακώματος μειώνει δραστικά τη συνεκτικότητά του και επιταχύνει τη γήρανσή του, όπως περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται διαγραμματικά η διεργασία της αεριοποίησης μίγματος βιοελαίου και εξανθρακώματος που έχει παραχθεί από ταχεία πυρόλυση, ο καθαρισμός του αερίου προϊόντος, και η σύνθεση από αυτό καυσίμων και χημικών.



Σχήμα 3.3.2. Κεντρική μονάδα αεριοποίησης βιοελαίου και σύνθεσης χημικών

3.3.2. Περιγραφή μονάδας αεριοποίησης βιοελαίου

Αντιδραστήρας αεριοποίησης

Υπάρχουν τρεις βασικές κατηγορίες αντιδραστήρων αεριοποίησης, οι σταθερής κλίνης (fixed bed), ρευστοποιημένης κλίνης (fluidized bed) και παρασυρόμενης ροής (entrained flow). Στην παρούσα εργασία η αεριοποίηση μοντελοποιείται με βάση παρασυρόμενης ροής αντιδραστήρα, ενώ η πρόσδοση θερμότητας γίνεται με μερική οξείδωση της τροφοδοσίας, που είναι και το συνθεθέστερο στην περίπτωση του βιοελαίου.

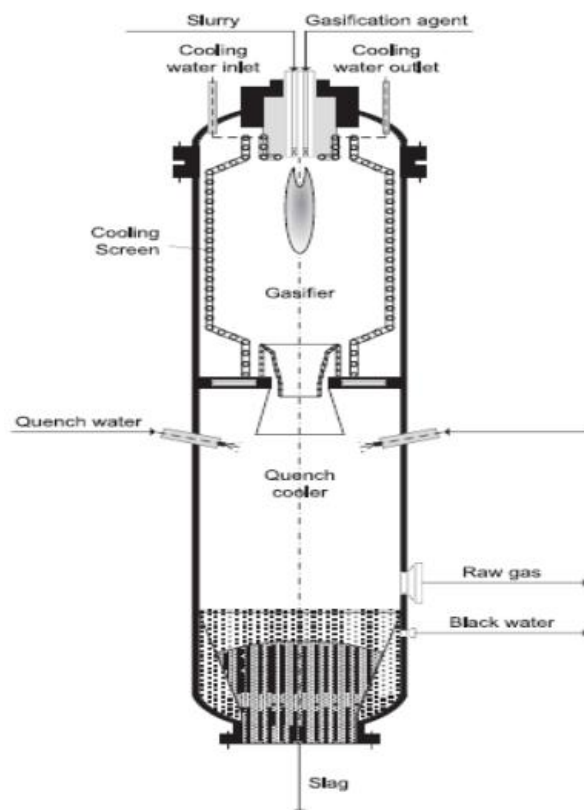
Η επιλογή του αντιδραστήρα παρασυρόμενης ροής έγινε διότι αυτή η κατηγορία αντιδραστήρων μπορεί να διαχειρίζεται υψηλότερες παροχές, οι οποίες είναι απαραίτητες για την οικονομικότητα του σχήματος. Ακόμα ένας λόγος είναι η μικρή περιεκτικότητα πηλάνων που έχει το παραγόμενο αέριο, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών αντίδρασης, που έχει σαν αποτέλεσμα την απλοποίηση του καθαρισμού του και την αύξηση της συνολικής αποδοτικότητας [41]. Τέλος, στους αντιδραστήρες αυτούς η τέφρα που τήκεται προσκολλάται στα τοιχώματα, ρέει προς τα κάτω, και τελικά στερεοποιείται δημιουργώντας ένα προστατευτικό στρώμα σκωρίας για τις σωληνώσεις νερού ψύξης, εμποδίζοντας την επαφή τους με την υψηλής θερμοκρασίας διαβρωτική υγρή τέφρα. Ωστόσο, λόγω της σκωρίας και της υγρασίας που μπορεί να περιέχει το slurry, τίθενται αυστηροί περιορισμοί στην επιλογή των υλικών του αντιδραστήρα [6].

Το βιοέλαιο εγχύεται εντός της ζώνης αντίδρασης στο επάνω μέρος του αντιδραστήρα, αφού πρώτα έχει αντληθεί σε υψηλή πίεση, σε ομοροπή με το οξυγόνο ή τον ενεργειακό φορέα της αεριοποίησης (πχ ατμός). Η θερμοκρασία σε αυτή την περιοχή είναι ιδιαίτερα υψηλή και κυμαίνεται από 1200 έως 2000 C (οι αντιδράσεις γίνονται σε θερμοκρασία 1200 °C), προκειμένου να διασφαλισθεί υψηλός βαθμός μετατροπής για μικρούς χρόνους παραμονής [41]. Ακόμα, σε αυτές τις θερμοκρασίες εξασφαλίζεται η τήξη των ανόργανων

συστατικών και εμποδίζεται ο σχηματισμός πρισμών, ενώ καθίσταται δυνατή η μετατροπή τάξεως 99%. Η πίεση παίρνει τιμές από 40 έως 80 bar. Όσο μεγαλύτερη είναι η πίεση, τόσο μικρότερο χρειάζεται να είναι το μέγεθος του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται, ενώ ταυτόχρονα αυξάνεται η δυναμικότητα επεξεργασίας της μονάδας και οι απαιτήσεις αντοχής των υλικών, με αντίκτυπο στην οικονομικότητα. Γύρω από τα τοιχώματα του αντιδραστήρα βρίσκονται σπειροειδείς σωληνώσεις που φέρουν ψυκτικό νερό με σκοπό την ρύθμιση της θερμοκρασίας.

Το αέριο που παράγεται αποτελείται κυρίως από CO , H_2 , υδρατμό, CO_2 , CH_4 , υψηλότερους υδρογονάνθρακες και άλλες ακαθαρσίες που πρέπει να απομακρύνονται για να αποφευχθεί η δηλητηρίαση των καταλυτών σύνθεσης. Αφού σχηματιστεί, το αέριο διοχετεύεται μαζί με τη σκωρία στο κατώτερο μέρος του αντιδραστήρα, όπου με ρίψη υπόψυκτου θερμοκρασίας 220-250 °C (ανάλογα με την πίεση της διεργασίας) γίνεται η ψύξη του, που αποτελεί το δεύτερο μέρος της διεργασίας. Μέσω αυτής επιτυγχάνεται καθαρισμός από διάφορες ακαθαρσίες όπως τέφρα, αιθάλη και άλατα.

Η σκωρία που συσσωρεύεται στο κάτω μέρος του αντιδραστήρα μπορεί, ανάλογα με τη σύστασή της, να χρησιμοποιηθεί είτε ως κατασκευαστικό μέταλλο είτε ως λίπασμα, δημιουργώντας έτσι επιπλέον οικονομικές εισροές.



Σχήμα 3.3.3. Αντιδραστήρας αεριοποίησης παρασυρόμενης ροής

Μονάδα διαχωρισμού αέρα (Air Separation Unit)

Για την παροχή του υπό πίεση οξυγόνου στον αντιδραστήρα αεριοποίησης είναι απαραίτητη η παραγωγή του από μια μονάδα ASU, η οποία το διαχωρίζει από το άζωτο του ατμοσφαιρικού αέρα. Η χρήση μιας μονάδας ASU έχει σαν αποτέλεσμα το παραγόμενο αέριο σύνθεσης να έχει υψηλότερη θερμογόνο ικανότητα καθώς η περιεκτικότητά του σε αδρανές άζωτο είναι αμελητέα. Από την άλλη, η μονάδα αυτή παίζει πολύ σπουδαίο ρόλο στην οικονομικότητα του σχήματος παραγωγής, καθώς αποτελεί ένα πολύ μεγάλο μέρος του κόστους επένδυσης, ενώ συνεισφέρει σημαντικά και στο κόστος λειτουργίας λόγω των υψηλών της ενεργειακών καταναλώσεων [41]. Αντίκτυπο στην οικονομική αποδοτικότητα έχει και η δυνατότητα πώλησης του αζώτου που παράγεται από τη μονάδα ως παραπροϊόν.

Τα βασικά στοιχεία που συγκροτούν την ASU είναι ο συμπιεστής αέρα, η μονάδα ψυχρής απόσταξης (distillation cold box) και ο συμπιεστής αζώτου.

Μονάδες επεξεργασίας και χειρισμού τροφοδοσίας

Περιλαμβάνουν εξοπλισμό εκφόρτωσης του βιοελαίου, δεξαμενές ανάμιξης ώστε να διατηρείται ομογενής η σύσταση του, και αντίστοιχα συστήματα άντλησης από το χώρο αποθήκευσής του μέχρι τον αντιδραστήρα. Ο χώρος αποθήκευσης εξαρτάται από το φορτίο της εγκατάστασης και το μέγεθός του επιλέγεται με βάση το πλήθος ημερών αυτονομίας λειτουργίας, δηλαδή χωρίς έξωθεν τροφοδοσία της όλης μονάδας. Παράλληλα, αναγκαίο είναι και ένα σύστημα προθέρμανσης του βιοελαίου πριν αυτό εισέλθει στον αντιδραστήρα (στους 120 °C περίπου).

Μονάδες επεξεργασίας του αερίου σύνθεσης

Το αέριο που εξέρχεται από τον αεριοποιητή είναι κορεσμένο σε νερό και βρίσκεται σε θερμοκρασία 220 έως 250 °C, ανάλογα με τη θερμοκρασία και την παροχή του νερού ψύξης που τροφοδοτείται στον αντιδραστήρα.

Σε πρώτη φάση, το αέριο διέρχεται από πλυντηρίδες για να καθαριστεί από σωματίδια σκόνης επικίνδυνα για τους καταλύτες που χρησιμοποιούνται. Στην περίπτωση που ο παράγων αεριοποίησης είναι μόνο το οξυγόνο, είναι απαραίτητη η ρύθμιση της αναλογίας H₂ και CO στο αέριο σύνθεσης. Για αναλογία 1:1, το 11% περίπου του αερίου θα πρέπει να οδηγηθεί σε έναν water-gas-shift reactor, ενώ για 2:1 το ποσοστό αυτό τετραπλασιάζεται. Από το υπόλοιπο του νερού που έχει μείνει στο αέριο, ένα μέρος απομακρύνεται σε μια πλυντηρίδα νερού και μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί για τη συμπύκνωση του θερμού αερίου του αεριοποιητή, ενώ το υπόλοιπο νερό αφαιρείται με την ψύξη του αερίου στους 50 °C.

3.4. Μοντελοποίηση αεριοποίησης βιοελαίου

3.4.1. Παραδοχές μοντελοποίησης

Στην παρούσα εργασία η αεριοποίηση του βιοελαίου γίνεται σε θεωρητικό επίπεδο, χωρίς να λαμβάνονται υπόψιν λεπτομερείς τεχνικές πτυχές της διεργασίας. Ο στόχος του μοντέλου που ακολουθεί είναι να γίνει μια βασική πρωταρχική διερεύνηση της σύστασης του παραγόμενου αερίου σύνθεσης από το βιοέλαιο για διάφορες θερμοκρασίες και πιέσεις και της δυνατότητας παραγωγής από αυτό μεθανόλης. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον της ανάλυσης που ακολουθεί έχει η εξακρίβωση της ποσότητας παραγόμενου μεθανίου, καθώς η παρουσία του είναι ανεπιθύμητη όταν σκοπός της συνολικής διεργασίας είναι η παραγωγή μεθανόλης.

Η αεριοποίηση προσεγγίζεται ικανοποιητικά ως διεργασία θερμοδυναμικής και χημικής ισορροπίας και οι υπολογισμοί των προϊόντων που προκύπτουν καθώς και των αντίστοιχων αναλογιών τους γίνονται σύμφωνα με τις αναλυτικές εξισώσεις με απαίτηση της ελαχιστοποίησης της ελεύθερης ενέργειας Gibbs. Η ελεύθερη ενέργεια Gibbs δίνεται από την εξίσωση :

$$G = H - T \cdot S \quad (3.4.1.)$$

όπου H , T και S είναι η ενθαλπία, η θερμοκρασία και η εντροπία του συστήματος αντίστοιχα. Κατ'αυτό τον τρόπο, τα προϊόντα και οι αντίστοιχες συστάσεις τους που θεωρείται πως συμμετέχουν στην θερμοδυναμική και χημική ισορροπία είναι αυτά που δίνουν ελαχιστοποίηση του G .

Το απαιτούμενο για τη διεργασία ποσό θερμότητας προσδίδεται στον αντιδραστήρα με μερική καύση του καυσίμου. Η καύση γίνεται με ρεύμα οξυγόνου (σύστασης 95%) , το οποίο παράγεται από μονάδα διαχωρισμού αέρα. Η πίεση παροχής του οξυγόνου είναι ίση με την πίεση της διεργασίας, και ίση με αυτή του εγχυόμενου στον αντιδραστήρα βιοελαίου. Η θερμοκρασία προθέρμανσής του αποτελεί αντικείμενο παραμετρικής μελέτης και λαμβάνει διάφορες τιμές, από 100 έως και 350 °C.

Οι θερμοκρασίες αεριοποίησης που μελετήθηκαν είναι 850, 1000 και 1200 °C, οι οποίες είναι τυπικές θερμοκρασίες για την εν λόγω διεργασία. Οι τιμές της πίεσης για τις οποίες έγινε μελέτη λαμβάνουν τιμές 1, 5, 10, 20, 30 και 80 bar, οι οποίες είναι και τυποποιημένες τιμές πίεσης διαφόρων εμπορικών αντιδραστήρων.

Ως προϊόντα του αντιδραστήρα ορίζονται τα H_2O , CO_2 , CO , H_2 , O_2 , N_2 , Ar , CH_4 , H_2S , NH_3 , C , C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 , C_3H_8 , SO_2 , C_7H_8 και C_6H_6 . Η τιμή της παροχής οξυγόνου στον αντιδραστήρα και κατ'επέκταση ο λόγος ισοδυναμίας καύσης λ-ER (equivalence ratio) υπολογίζεται με βάση τον μηδενισμό των θερμικών απωλειών (αδιαβατική

λειτουργία) αφήνοντας ένα περιθώριο σφάλματος 3% επί της προσδιδόμενης θερμότητας μέσω του καυσίμου στον αντιδραστήρα.

Το βιοέλαιο ορίζεται ως Non Conventional συστατικό. Η σύστασή του λαμβάνεται ως μία τυπική σύσταση βιοελαίου προερχόμενου από ξυλώδη βιομάζα [18], η οποία έχει ως εξής :

Στοιχειακή	ανάλυση	
% w/w db		56
C		6
H		38
O		0,1
N		0,01
S		0
Ash		
<hr/>		
Τυπική	ανάλυση	
%w/w db		
FixedCarbon		25
Volatile Matter		75
<hr/>		
Moisture (%)		25

Πίνακας 3.4.1. Τυπική σύσταση βιοελαίου [18]

Η θερμογόνο δύναμή του βιοελαίου και κατ'επέκταση η ενθαλπία του από τη σχέση (2.2.36.) :

$$HHV_{ch} = 0.3491 \cdot C\% + 1.1783 \cdot H\% + 0.1005 \cdot S\% - 0.1034 \cdot O\% - 0.0151 \cdot N\% - 0.0211 \cdot ASH\% \text{ (MJ / kg)}$$

Η θερμοκρασία του βιοελαίου είναι 25°, ενώ η πίεσή του ίση με την τιμή της πίεσης της διεργασίας.

Η σύσταση του αερίου σύνθεσης όπως αυτό εξέρχεται από τον αντιδραστήρα υπολογίζεται σε υγρή βάση για τις θερμοκρασίες και πιέσεις διερεύνησης. Παράλληλα γίνονται υπολογισμοί της θερμογόνου ικανότητάς του και του ποσοστού της θερμογόνου ικανότητας του CH₄ επί αυτής.

3.4.2. Αποτελέσματα

1200 °C

Πίεση	1 bar	5 bar	10 bar	20 bar	30 bar	80 bar
CO % vol	38,30	38,30	38,30	38,29	38,29	38,20
CO % vol	10,37	10,37	10,37	10,38	10,39	10,47
H ₂ % vol	30,21	30,20	30,20	30,18	30,15	29,91
CH ₄ % vol	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03	0,21
H ₂ O % vol	20,18	20,18	20,18	20,19	20,20	20,27
LHV db (MJ/nm ³)	10,15	10,15	10,15	10,15	10,15	10,20
LHV _{CH₄} / LHV _{comb} (%)	0,00	0,00	0,01	0,06	0,13	0,90

Πίνακας 3.4.2. Χαρακτηριστικά αερίου σύνθεσης-1200°C

1000 °C

Πίεση	1 bar	5 bar	10 bar	20 bar	30 bar	80 bar
CO % vol	37,78	37,77	37,74	37,63	37,44	36,10
CO % vol	10,93	10,94	10,97	11,08	11,26	12,57
H ₂ % vol	34,13	34,09	34,00	33,65	33,12	29,45
CH ₄ % vol	0,00	0,03	0,10	0,40	0,85	4,05
H ₂ O % vol	16,30	16,31	16,32	16,38	16,47	17,00
LHV db (MJ/nm ³)	10,11	10,11	10,13	10,20	10,31	11,07
LHV _{CH₄} / LHV _{comb} (%)	0,00	0,11	0,44	1,68	3,55	15,79

Πίνακας 3.4.3. Χαρακτηριστικά αερίου σύνθεσης-1000°C

850 °C

Πίεση	1 bar	5 bar	10 bar	20 bar	30 bar	80 bar
CO % vol	36,96	36,70	36,07	32,58	28,00	18,56
CO % vol	11,79	12,04	12,65	14,48	16,10	19,20
H ₂ % vol	37,42	36,68	34,89	31,57	29,60	23,34
CH ₄ % vol	0,03	0,68	2,27	5,32	7,03	11,71
H ₂ O % vol	13,01	13,11	13,34	15,32	18,61	26,63
LHV db (MJ/nm ³)	10,02	10,18	10,55	11,14	11,36	12,35
LHV _{CH₄} / LHV _{comb} (%)	0,12	2,76	8,91	20,22	27,21	46,31

Πίνακας 3.4.4. Χαρακτηριστικά αερίου σύνθεσης-850 °C

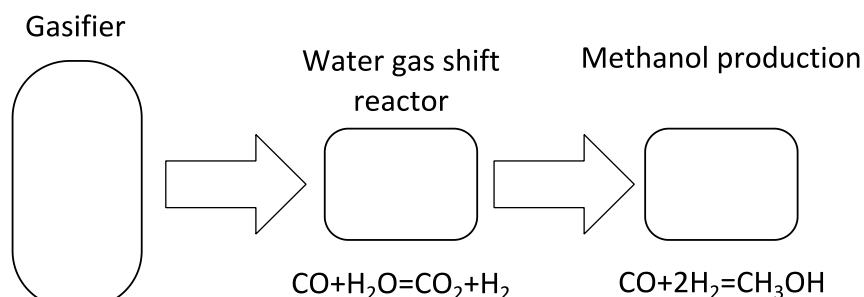
Για τις θερμοκρασίες των 1200 και 1000 °C, η σύσταση του αερίου σύνθεσης δεν παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις με αύξηση της πίεσης. Στους 850 °C και για 80 bar παρουσιάζεται υψηλή αύξηση του ποσοστού CH₄ (10%) , αύξηση του ποσοστού CO₂ (20%) καθώς και σημαντική μείωση του ποσοστού CO (18.5%). Αντίστοιχα υψηλό στη θερμοκρασία των 850 °C είναι το ποσοστό τη θερμογόνου ικανότητας του CH₄ επί της συνολικής θερμογόνου ικανότητας του μίγματος αερίου σύνθεσης, η οποία φτάνει το 46%. Η αύξηση του παραγόμενου CH₄ οφείλεται στο γεγονός ότι η αντίδραση αναμόρφωσης μεθανίου που οδηγεί στην κατανάλωσή του είναι ενδόθερμη κι έτσι δεν ευνοείται στις χαμηλότερες θερμοκρασίες. Παράλληλα, η αντίδραση κινείται προς την κατεύθυνση των αντιδρώντων με αύξηση της πίεσης (αρχή Le Chatelier), γι'αυτό το λόγο η παρουσία του μεθανίου στο αέριο σύνθεσης είναι εντονότερη στις υψηλές πιέσεις.

Δεδομένου ότι η βασική αντίδραση παραγωγής μεθανόλης από αέριο σύνθεσης είναι η :

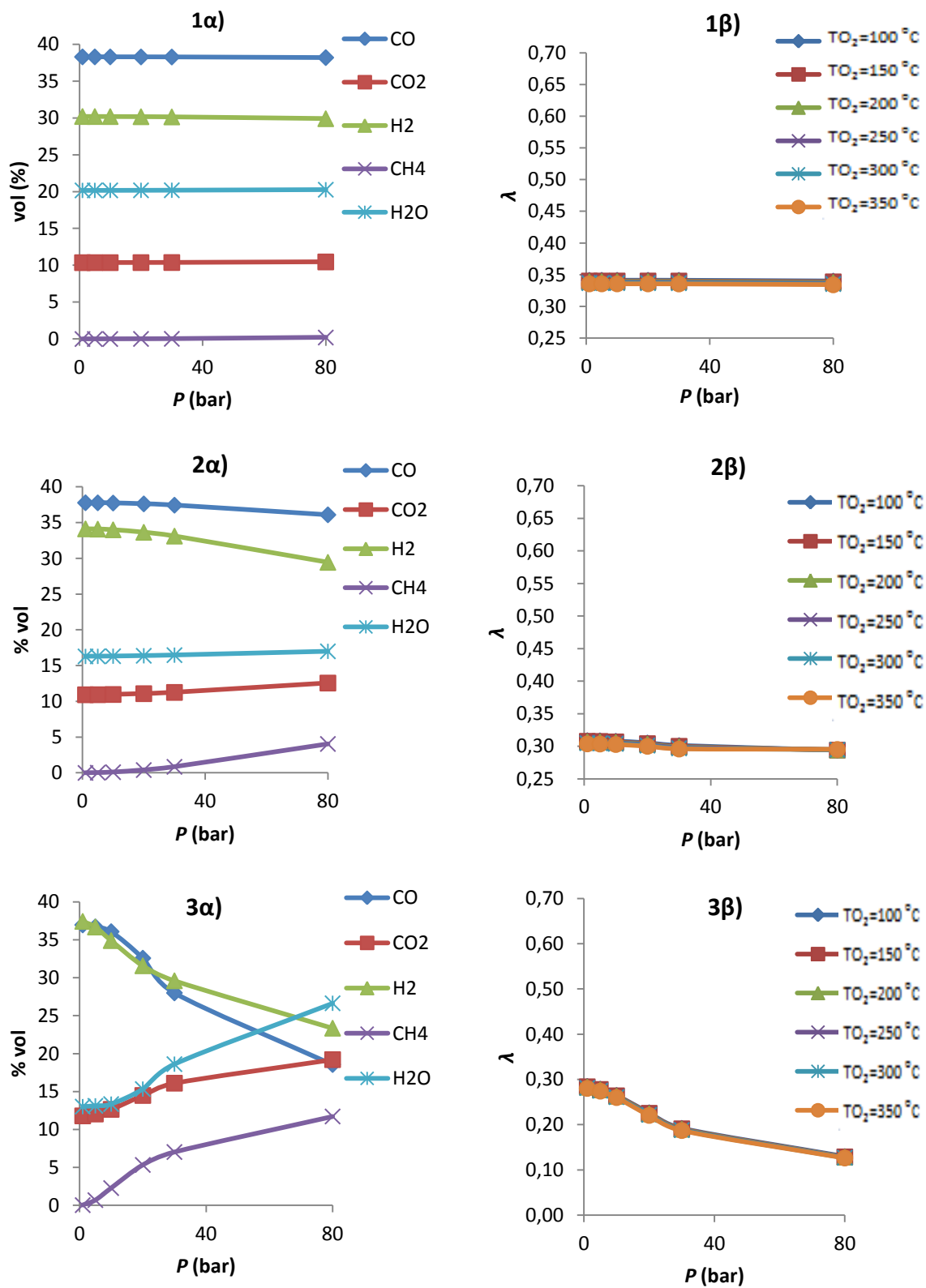


λαμβάνοντας υπόψιν τη συμπεριφορά του CH₄ προκύπτει πως σε εφαρμογές παραγωγής CH₃OH είναι προτιμότερο η αεριοποίηση να γίνεται σε υψηλές θερμοκρασίες, καθότι το μεθάνιο δε χρησιμοποιείται άμεσα στην αντίδραση σχηματισμού της και άρα είναι επιθυμητή η μικρή περιεκτικότητα του αερίου σύνθεσης σε αυτό. Ένας ακόμη λόγος είναι η υψηλότερη περιεκτικότητα του παραγόμενου μίγματος αερίων σε CO και H₂ (που είναι τα αντιδρώντα της αντίδρασης) και αντίστοιχα η χαμηλότερη περιεκτικότητά του σε CO₂ (το οποίο δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα) στις υψηλές θερμοκρασίες.

Επιπλέον, λόγω της υψηλής περιεκτικότητας του βιοελαίου σε υγρασία, αντίστοιχα αυξημένα είναι τα ποσοστά υδρατμού στο αέριο σύνθεσης. Η υψηλή αυτή περιεκτικότητα H₂O αποτελεί ένα ακόμη πλεονέκτημα για εγκαταστάσεις παραγωγής μεθανόλης, καθώς δεν είναι αναγκαία η ύπαρξη αντιδραστήρα water gas shift κατάντι του αντιδραστήρα αεριοποίησης για την ρύθμιση της επιθυμητής αναλογίας H₂/CO (=2.2) , με προσθήκη πρόσθετου ρεύματος ατμού. Για τον ίδιο λόγο είναι δυνατή η λειτουργία του αντιδραστήρα χωρίς να τροφοδοτείται με ατμό (steam gasification), με αποφυγή πρόσθετων καταναλώσεων θερμότητας.



Σχήμα 3.4.1. Water gas shift reactor και παραγωγή μεθανόλης από τα CO και H₂ του αερίου σύνθεσης



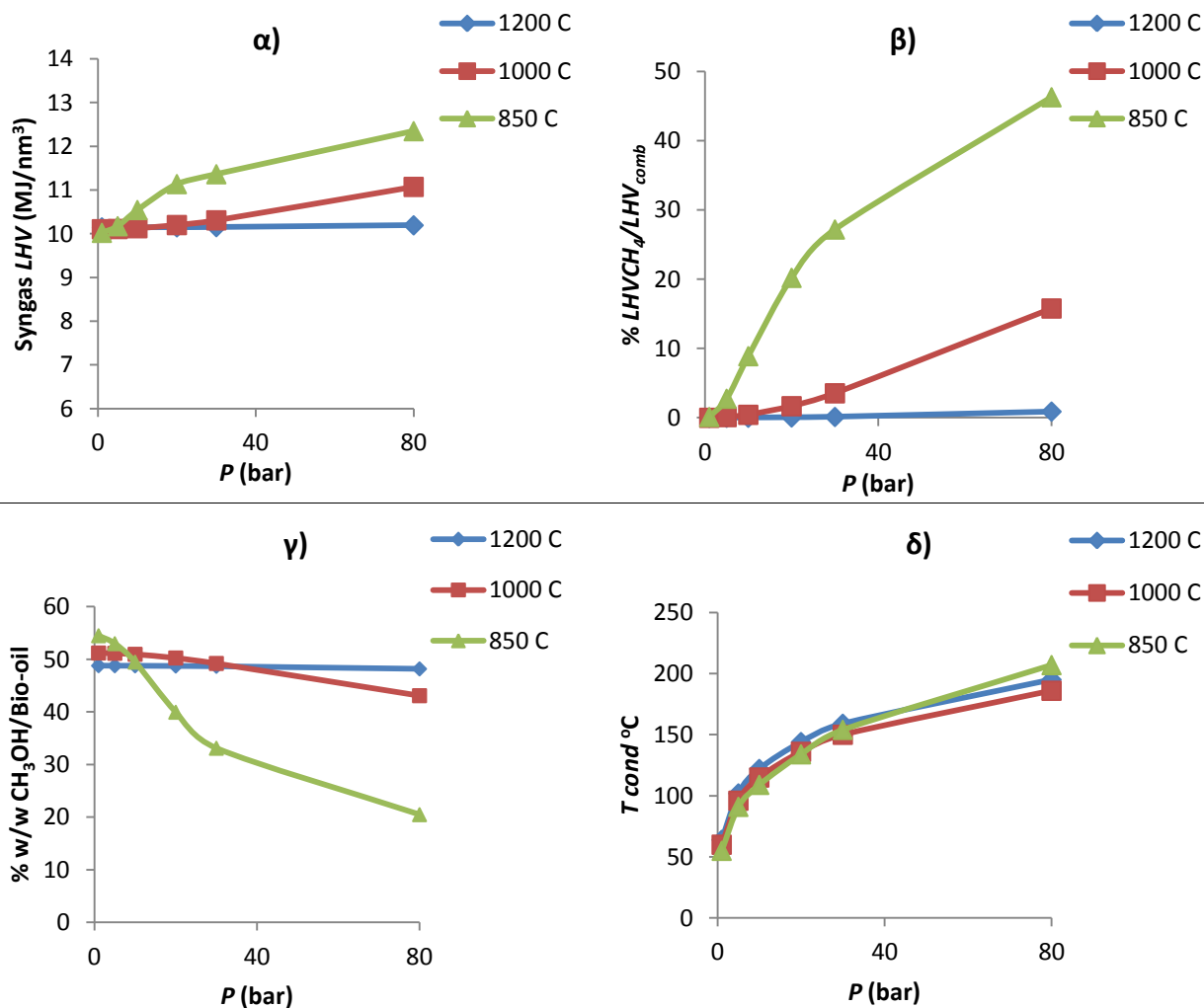
Σχήμα 3.4.2. α) σύσταση αερίου % vol w.b. και β) λόγος ισοδυναμίας λ συναρτήσει της θερμοκρασίας προθέρμανσης του ρεύματος O₂ για θερμοκρασία αεριοποίησης 1) 1200 °C, 2) 1000 °C και 3) 850 °C

Όπως αναφέρθηκε και πριν, η παραγωγή μεθανόλης γίνεται μέσω της αντίδρασης CO και H₂, τα οποία είναι επιθυμητό να βρίσκονται στην κατάλληλη στοιχειομετρική αναλογία. Ο υπολογισμός της ποσότητας παραγόμενης μεθανόλης ανά kg βιοελαίου έγινε θεωρώντας βαθμό μετατροπής του CO σε CH₃OH ίσο με 99%. Για τις διάφορες θερμοκρασίες και πιέσεις, προκύπτουν τα αντίστοιχα ποσοστά ιδανικής μετατροπής CH₃OH (kg προϊόντος ανά kg βιοελαίου).

Πίεση	1 bar	5 bar	10 bar	20 bar	30 bar	80 bar
Θερμοκρασία						
1200 °C	48,7932	48,78481	48,77089	48,73164	48,67714	48,18559
1000 °C	51,21323	51,14874	50,96129	50,26206	49,21883	43,08961
850 °C	54,48724	52,97686	49,46542	39,94866	33,10108	20,47687

Πίνακας 3.4.5. Ιδανική αναλογία μετατροπής παραγόμενου βιοελαίου σε μεθανόλη (% w/w of feed input)

Ενώ στις υψηλότερες θερμοκρασίες 1200 και 1000°C η αναλογία παραγόμενης μεθανόλης ανά kg βιοελαίου είναι γύρω κοντά το 50% σταθερή για όλες τις πιέσεις λειτουργίας, στη θερμοκρασία των 850°C παρατηρείται έντονη μείωσή της. Η μείωση αυτή οφείλεται στην πολύ χαμηλότερη περιεκτικότητα του αερίου σύνθεσης σε CO σε αυτή τη θερμοκρασία και στην αντίστοιχη αύξηση αυτής του CO₂.

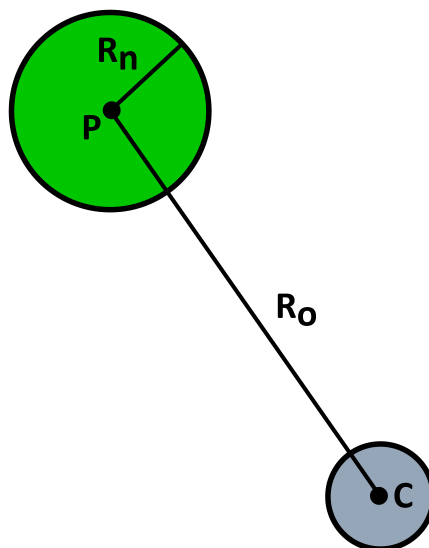


Σχήμα 3.4.3. α) LHV υγρού αερίου, β) LHV CH₄ ως ποσοστό LHV του αερίου, γ) ποσοστό % w/w ιδανικής μετατροπής σε CH₃OH και δ) θερμοκρασία δρόσου αερίου σύνθεσης από βιοέλαιο

4. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΒΙΟΕΛΑΙΟΥ

Όπως περιγράφηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, ένα από τα ενδεχόμενα οφέλη της μετατροπής της της βιομάζας σε βιοέλαιο είναι η δυνατότητα μείωσης του κόστους μεταφοράς του καυσίμου σε μεγαλύτερες αποστάσεις, λόγω της μεγαλύτερης πυκνότητας μάζας και ενέργειας του υγρού έναντι του στερεού προϊόντος. Σε αυτό το κεφάλαιο, γίνεται η αξιολόγηση της δυνατότητας αυτής, μέσα από την οικονομική ανάλυση όλων των σχετικών μεγεθών. Πιο συγκεκριμένα, το πρόβλημα που εξετάζεται είναι η δυνατότητα μείωσης του κόστους μεταφοράς βιομάζας η οποία συλλέγεται από μια ευρεία περιοχή (πχ καλλιέργειες) και καταλήγει σε κάποια κεντρική μονάδα (πχ βιοδιυλιστήριο, μονάδα αεριοποίησης, IGCC κλπ) εντός της περιοχής αυτής.

Έστω κεντρική μονάδα C σε επιφάνεια πυκνότητας βιομάζας δ , σε απόσταση R_0 από το κέντρο περιφερειακής κυκλικής επιφάνειας ακτίνας R_n . Στην ανάλυση που διεξάγεται στην παρούσα διπλωματική συγκρίνονται δύο σενάρια. Το πρώτο σενάριο περιλαμβάνει την απευθείας μεταφορά της βιομάζας που βρίσκεται στην επιφάνεια στην κεντρική μονάδα C . Σύμφωνα με το δεύτερο σενάριο, η βιομάζα της επιφάνειας συλλέγεται στο κέντρο αυτής P , μετατρέπεται σε βιοέλαιο και κατόπιν μεταφέρεται στο C . Σκοπός είναι ο υπολογισμός της ελάχιστης απόστασης R_0 , για την οποία το δεύτερο σενάριο είναι από οικονομικής απόψεως προτιμότερο από το πρώτο. Κριτήριο σύγκρισης είναι το τελικό κόστος απόκτησης ενέργειας, το οποίο εκφράζεται σε €/GJ καυσίμου.



Σχήμα 4.1. Αποκεντρωμένη συλλογή βιομάζας, μετατροπή σε βιοέλαιο στη μονάδα ταχείας πυρόλυσης P και μεταφορά σε κεντρική μονάδα C (πχ βιοδιυλιστήριο)

Στην περίπτωση του 1^{ου} σεναρίου, το τελικό κόστος απόκτησης ενέργειας ισούται με το άθροισμα του κόστους αγοράς της βιομάζας, συν το άθροισμα μεταφοράς της στο C από κάθε σημείο συλλογής της εντός της κυκλικής επιφάνειας. Στην περίπτωση του 2^{ου}

σεναρίου, το συνολικό κόστος δίνεται από το άθροισμα του κόστους παραγωγής βιοελαίου και κατόπιν μεταφοράς του στην κεντρική μονάδα C από το σημείο P.

Λόγω του μικρότερου κόστους μεταφοράς του βιοελαίου έναντι της βιομάζας, υπάρχει μία οριακή απόσταση R_{crit} των σημείων P και C, για την οποία το τελικό κόστος απόκτησης ενέργειας μέσω του δεύτερου σεναρίου (μετατροπή βιομάζας και μεταφορά βιοελαίου) εξισώνεται με αυτό του πρώτου (απευθείας μεταφορά βιομάζας), καθώς η εξοικονόμηση κατά τη μεταφορά αντισταθμίζει το κόστος επένδυσης και λειτουργίας της μονάδας πυρόλυσης. Αυτό σημαίνει πως το ολικό κόστος μεταφοράς καυσίμου από την ευρύτερη έκταση τροφοδοσίας της κεντρικής μονάδας ελαχιστοποιείται στην περίπτωση που η βιομάζα εντός της οριακής ακτίνας R_{crit} μεταφέρεται απευθείας στην κεντρική μονάδα και η υπόλοιπη, εξωτερικά της R_{crit} , μετατρέπεται σε βιοέλαιο και το ενεργειακό της περιεχόμενο μεταφέρεται σε υγρή μορφή.

Από τα παραπάνω προκύπτει πως, για την ανάλυση αυτή απαιτείται ο προσδιορισμός των εξής παραμέτρων :

- Κόστος συλλογής και μεταφοράς βιομάζας από κυκλική επιφάνεια στο κέντρο της και σε σημείο εκτός αυτής.
- Κόστος παραγωγής βιοελαίου
- Κόστος μεταφοράς βιοελαίου σε ενιαία απόσταση.

Ο υπολογισμός του κόστους παραγωγής του βιοελαίου γίνεται μέσω πλήρους οικονομικής ανάλυσης μονάδας ταχείας πυρόλυσης. Στην οικονομική ανάλυση της μονάδας εξετάζονται παράμετροι όπως το κόστος αγοράς και η επιφανειακή πυκνότητα της βιομάζας καθώς και το μέγεθος της μονάδας, το οποίο καθορίζει το ύψος του κόστους επένδυσης αλλά και σημαντικού μέρους των λειτουργικών ετήσιων εξόδων.

Για τον υπολογισμό του κόστους που σχετίζεται με τη μεταφορά βιομάζας και βιοελαίου, αναπτύσσεται ένα μοντέλο εσωτερικής αξιολόγησης της οικονομικής οντότητας που είναι υπεύθυνη για τη μεταφορά. Οι βασικές παράμετροι που λαμβάνονται υπόψιν πέρα από την απόσταση μεταφοράς, είναι η ποσότητα του εκάστοτε μεταφερόμενου προϊόντος και οι ιδιότητές του (υγρασία, θερμογόνος ικανότητα) καθώς και οι τεχνικές λεπτομέρειες της μεταφοράς (πχ χρόνοι φόρτωσης/εκφόρτωσης, μέγιστη χωρητικότητα των φορτηγών, ταχύτητα οχημάτων) ανάλογα με το είδος του.

4.1. Βασικές έννοιες και ορισμοί οικονομικής ανάλυσης

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται κάποιες βασικές έννοιες και ορισμοί που χρησιμοποιούνται για την οικονομική αξιολόγηση μιας οποιασδήποτε μονάδας [42]. Οι έννοιες αυτές εφαρμόζονται στη συνέχεια για την μονάδα ταχείας πυρόλυσης.

Πριν από τη λειτουργία μιας μονάδας, ένα μεγάλο χρηματικό ποσό πρέπει να καταβληθεί προκειμένου να γίνει η αγορά και η εγκατάσταση του απαραίτητου εξοπλισμού. Απαιτείται επίσης η εξασφάλιση της αναγκαίας έκτασης γης και των εγκαταστάσεων, συμπεριλαμβανομένων των δευτερευόντων στοιχείων όπως οι σωληνώσεις. Επιπροσθέτως, πρέπει να υπάρχει το ποσό χρημάτων που είναι απαραίτητο για την κάλυψη των εξόδων που σχετίζονται με τη εκκίνηση της λειτουργίας της μονάδας. Τα ποσά αυτά αναλύονται στη συνέχεια.

Συνολικό Κεφάλαιο Επένδυσης (Total Capital Investment-TCI): Πρόκειται για το συνολικό ποσό χρημάτων που πρέπει να καταβληθεί προκειμένου το έργο να ολοκληρωθεί και να είναι έτοιμο για λειτουργία. Το κόστος αυτό κατανέμεται σε δύο επιμέρους κόστη, το **Συνολικό Κόστος Μονάδας-Σταθερό Κεφάλαιο Επένδυσης (Fixed Capital investment-Total Plant Cost-TPC)** και το **Κεφάλαιο Εργασίας (Working Capital)**.

Συνολικό Κόστος Μονάδας (TPC)

Το TPC διακρίνεται σε δύο επιμέρους τμήματα, το **Συνολικό Κεφάλαιο Εγκατάστασης- Άμεσο Κόστος Μονάδας (Total Installed Capital-Direct Plant Cost-DPC)** και το **Έμμεσο Κόστος Μονάδας (Indirect Plant Cost-IPC)**.

Άμεσο Κόστος Μονάδας(Direct Plant Cost-DPC) : περιλαμβάνει τις δαπάνες που σχετίζονται με υλικά και υποδομές που έχουν άμεση σχέση με τη λειτουργία της μονάδας. Τέτοιες είναι :

- Κόστος αγοράς μηχανημάτων και εξοπλισμού (Equipment cost)

Περιλαμβάνει το κόστος αγοράς του βασικού εξοπλισμού της μονάδας (πχ αντιδραστήρες), μαζί με επιπλέον έξοδα που σχετίζονται άμεσα με την απόκτησή τους (πχ φόροι, ανταλλακτικά, μεταφορά).

- Κόστος εγκατάστασης εξοπλισμού

Κόστος για την εγκατάσταση του εξοπλισμού (εσωτερική διασύνδεση μηχανημάτων, μονώσεις, βάψιμο)

- Κόστος οργάνων

Περιλαμβάνει το κόστος αγοράς, εγκατάστασης και ρύθμισης των μετρητικών οργάνων και διατάξεων της μονάδας

- Κόστος σωληνώσεων

Πρόκειται για το κόστος αγοράς και εγκατάστασης των σωληνώσεων και του σχετικού εξοπλισμού της μονάδας (πχ αντλίες)

- Κόστος ηλεκτρολογικού εξοπλισμού

Περιλαμβάνει διακόπτες, κινητήρες, καλωδιώσεις, πίνακες και το κόστος εγκατάστασης αυτών

- Κόστος κτηρίων

Περικλείει το κόστος ανέγερσης των βασικών και βοηθητικών κτηρίων της μονάδας και επιπλέον υποδομές όπως σκάλες, ανελκυστήρες

- Κόστος ανάπτυξης τοποθεσίας

Κόστος ανάπτυξης (εκκαθάριση, διαβάθμιση, οδική πρόσβαση, χωροθέτηση, περίφραξη) της τοποθεσίας της μονάδας

- Κόστος Εγκαταστάσεων υπηρεσιών

Τέτοιες εγκαταστάσεις είναι για παράδειγμα ψυγεία, κλίβανοι, υποσταθμοί ηλεκτρικής ενέργειας, χώροι αναψυχής, χώροι στάθμευσης, καταστήματα κλπ

- Κόστος γης

Κόστος αγοράς ή ενοικίασης γης και σχετικά φορολογικά βάρη

Έμμεσο Κόστος Μονάδας (Indirect Plant Cost-IPC) : Το έμμεσο κόστος της μονάδας περιλαμβάνει δαπάνες που σχετίζονται με κάλυψη κυρίως άυλων αναγκών που δε σχετίζονται άμεσα με την ίδια τη μονάδα.

Τέτοια κόστη είναι :

- Κόστος μηχανολογικού σχεδιασμού και επίβλεψης

Περιλαμβάνει το κόστος μηχανολογικού σχεδιασμού και επιθεώρησης της μονάδας, τα κόστη διοίκησης καθώς και τα κόστη επικοινωνίας, διεπαφών, μετακινήσεων συμβούλων κλπ.

- Κόστος κατασκευής

Πρόκειται για το κόστος κατασκευής, λειτουργίας και συντήρησης των προσωρινών εγκαταστάσεων που διαμορφώνονται κατά την προετοιμασία της μονάδας, το κόστος απόκτησης/ενοικίασης εργαλείων και κατασκευαστικού εξοπλισμού, το κόστος ασφάλισης και ιατρικής περίθαλψης του προσωπικού, το κόστος φύλαξης της μονάδας κλπ

- Αμοιβή του ανάδοχου
- Έκτακτα έξοδα

και όλου του περιφερειακού εξοπλισμού (όργανα ελέγχου και ρύθμισης, ηλεκτρολογικές εγκαταστάσεις κλπ) που είναι απαραίτητα για τη μονάδα.

Κεφάλαιο εργασίας

Το κεφάλαιο εργασίας είναι το κόστος έναρξης της λειτουργίας της μονάδας αφού αυτή έχει κατασκευαστεί. Περιλαμβάνει το κόστος αγοράς και απόκτησης των πρώτων υλών και των υπόλοιπων προμηθειών και υλικών που είναι απαραίτητα, το κόστος που απαιτείται για την διατήρηση της ρευστότητας της (αρχική μισθοδοσία, πληρωτέα δάνεια, φόροι) κλπ.

Όλα τα παραπάνω κόστη συνοψίζονται διαγραμματικά ακολούθως :



Σχήμα 4.1.1 Το Συνολικό Κεφάλαιο Επένδυσης και οι συνιστώσες του

Κόστος συντήρησης και λειτουργίας (Operation & Maintenance Costs)

Το κόστος συντήρησης και λειτουργίας μιας μονάδας αναφέρεται στις δαπάνες που περιοδικά πρέπει να καταβάλλονται για την εξασφάλιση της ομαλής λειτουργίας της. Τέτοιες δαπάνες είναι οι εξής :

- Κόστος καυσίμου (fuel cost)
- Κόστος αναλώσιμων (utilities)
- Κόστος εργασίας (labor)
- Κόστος φορολογίας και ασφάλισης (tax and insurance)
- Κόστος συντήρησης και επισκευών (maintenance and repairs)
- Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας
- Λοιπές περιοδικές οικονομικές υποχρεώσεις (πχ ενοίκια, δάνεια κλπ)

Χρόνος ζωής του έργου (Project Life)-N

Ο χρόνος ζωής του έργου είναι το πλήθος των ετών για τα οποία γίνεται η μελέτη της οικονομικότητας της επένδυσης. Τυπική τιμή για μονάδες παραγωγής ενέργειας και χημικών διεργασιών είναι τα 20 με 25 χρόνια.

Επιτόκιο (Interest rate) i

Το επιτόκιο είναι ένας βασικός δείκτης της οικονομίας και αντιπροσωπεύει τον ετήσιο ρυθμό υποβάθμισης της ονομαστικής αξίας του χρήματος. Επειδή η γνώση της πραγματικής του τιμής με ακρίβεια δεν είναι ευχερής, συνηθίζεται να αξιολογείται η οικονομικότητα της επένδυσης για διάφορες τιμές αυτού, προκειμένου έτσι να υπολογίζονται τα επιτρεπόμενα όρια τις διακύμανσής του. Μια τυπική τιμή που λαμβάνει για εφαρμογές παραγωγής χημικών και ενέργειας είναι 7% [43].

Με βάση το επιτόκιο είναι δυνατός ο υπολογισμός του **παράγοντα προσόδου α (annuity factor)** με τη χρήση του οποίου το Συνολικό Κεφάλαιο Επένδυσης ανάγεται σε ισόποσες ετήσιες χρηματικές ροές, ανάλογα με το χρόνο ζωής του έργου. Με βάση τα παραπάνω ο παράγοντας προσόδου δίνεται από την εξίσωση :

$$\alpha = \frac{i}{1 - (1+i)^{-N}} \quad (4.1.1.)$$

Κόστος παραγωγής (Production Cost)

Πρόκειται για το κόστος που αντιστοιχεί στην παραγωγή μιας μονάδας τελικού προϊόντος από τη μονάδα. Το τελικό προϊόν μπορεί να είναι είτε ενέργεια, οπότε η τιμή του κόστους παραγωγής δίνεται σε €/MWh, είτε κάποιο άλλο στερεό, αέριο ή υγρό προϊόν, οπότε η τιμή του έχει μονάδες €/tn, €/lt κοκ. Για τον υπολογισμό του το TCI ανάγεται σε N ισόποσες χρηματοροές (όπου N τα έτη χρόνου ζωής του έργου) σε κάθε μία από τις οποίες προστίθεται το ετήσιο Κόστος Λειτουργίας και Συντήρησης. Το συνολικό αυτό ετήσιο κόστος διαιρείται στη συνέχεια με την ποσότητα τελικού προϊόντος που παράγεται από τη μονάδα.

Το κόστος παραγωγής επομένως δίνεται από την εξίσωση :

$$PC = \frac{TCI \cdot \alpha - QM}{prod} \quad (4.1.2.)$$

όπου :

PC το Κόστος Παραγωγής (€/tn ή €/lt ή€/ MWh κλπ ανάλογα με το παραγόμενο προϊόν)

TCI το Συνολικό Κεφάλαιο Επένδυσης (€)

α ο παράγοντας προσόδου

QM το Κόστος Λειτουργίας και Συντήρησης (€/έτος)

prod: η ετήσια ποσότητα παραγόμενου προϊόντος

Στον επόμενο πίνακα συνοψίζονται όλοι οι συμβολισμοί των βασικών μεγεθών της οικονομικής ανάλυσης.

Μέγεθος	Συμβολισμός
Συνολικό Κεφάλαιο Επένδυσης	TCI
Συνολικό Κόστος Μονάδας	TPC
Άμεσο Κόστος Μονάδας	DPC
Έμμεσο Κόστος Μονάδας	IPC

Πίνακας 4.1.1. Συμβολισμοί μεγεθών κόστους

4.2. Οικονομική ανάλυση μονάδας ταχείας πυρόλυσης

4.2.1. Συνολικό Κεφάλαιο Επένδυσης

Ο εξοπλισμός της μονάδας ταχείας πυρόλυσης καλύπτει περιλαμβάνει τα εξής στοιχεία [19], [36], [40] [44] :

- Σύστημα αποθήκευσης, χειρισμού και προετοιμασίας της τροφοδοσίας βιομάζας : Περιλαμβάνει το σύστημα υποδοχής της βιομάζας από τα φορτηγά (εκφορωτές), το σύστημα μεταγωγής της από το χώρο υποδοχής στις εγκαταστάσεις ξήρανσης και άλεσης, καθώς και τις ίδιες τις εγκαταστάσεις αυτές. Ανάλογα με το είδος της βιομάζας, ο σχετικός εξοπλισμός περιλαμβάνει χοάνες τροφοδοσίας, ιμάντες και κοχλίες μεταφοράς, συμβατικούς τυμπανοειδείς ξηραντήρες , και σφυρόμυλους. Για μεγάλες μονάδες όπως αυτές που μελετώνται στην παρούσα εργασία, το όλο σύστημα χειρισμού και προετοιμασίας της βιομάζας πρέπει να είναι αυτοματοποιημένο [36].
- Αντιδραστήρας Πυρόλυσης : υπάρχουν διάφορες κατηγορίες αντιδραστήρων πυρόλυσης με εμπορική εφαρμογή, οι οποίοι περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Τυπική επιλογή είναι ο αντιδραστήρας αναβράζουσας ρευστοποιημένης κλίνης. Ο αντιδραστήρας αποτελεί περίπου το 10-15% του TCI [18].
- Κυκλώνες και ηλεκτροστατικά φίλτρα : οι κυκλώνες τοποθετούνται κατάντι του αντιδραστήρα και είναι απαραίτητοι για τον καθαρισμό των πτητικών από

σωματίδια τέφρας και εξανθρακώματος, ενώ τα ηλεκτροστατικά φίλτρα χρησιμεύουν στην δέσμευση των αερολυμάτων.

- Σύστημα ψύξης, συμπύκνωσης και συλλογής πτητικών : πρόκειται για το ψυγείο της εγκατάστασης το οποίο περιλαμβάνει ένα σύστημα ρίψης ψυκτικού μέσου (όπως υδρογονάνθρακες (πχ isopar) ή ψυχρό βιοέλαιο). Παράλληλα περιλαμβάνει απαραίτητες σωληνώσεις για τη συλλογή του συμπυκνωμένου βιοελαίου
- Δεξαμενές αποθήκευσης βιοελαίου : στις δεξαμενές αυτές αποθηκεύεται το παραγόμενο βιοέλαιο. Λόγω των ιδιοτήτων του βιοελαίου, πρέπει να είναι από κατάλληλο υλικό. Επίσης μέριμνα πρέπει να ληφθεί ώστε να είναι δυνατή εφεδρική αποθήκευσή του, σε περίπτωση που παρουσιάζει διακύμανση η τροφοδοσία βιομάζας στη μονάδα.
- Σύστημα ανάκτησης θερμότητας : στην περίπτωση της μονάδας αναβράζουσας ρευστοποιημένης κλίνης, το σύστημα ανάκτησης θερμότητας αποτελείται από ένα καυστήρα για το εξανθράκωμα και ένα καυστήρα για τα μόνιμα αέρια. Περιλαμβάνει επίσης ανεμιστήρες και ρυθμιστικές βαλβίδες για τον καθορισμό της τροφοδοσίας αέρα στο επιθυμητό επίπεδο. Ο καυστήρας εξανθρακώματος παράλληλα διαθέτει κυκλώνες για τη δέσμευση της τέφρας.

Στα παραπάνω προστίθενται επιπλέον κόστη εξοπλισμού, όπως συστήματα ελέγχου του μηχανισμού μεταγωγής βιομάζας και των διαφόρων μηχανημάτων, κόστη ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων και καλωδιώσεις. Σημαντικό κόστος οφείλεται στο κόστος ανάπτυξης της τοποθεσίας της μονάδας (πχ οδική πρόσβαση), στην περίπτωση που αυτή βρίσκεται σε απομακρυσμένη δασώδη έκταση. Ένα επιπλέον κόστος περιλαμβάνει τη διαμόρφωση του αποθηκευτικού χώρου της βιομάζας.

Στην παρούσα εργασία, ο υπολογισμός του TCI της μονάδας γίνεται με αφετηρία τον υπολογισμό του DPC των δύο βασικών στοιχείων της, τα οποία και έπειτα προστίθενται για να δώσουν το συνολικό DPC της μονάδας.

$$DPC_{total} = DPC_{pret} + DPC_{pyr} \quad (4.2.1.)$$

όπου

DPC_{total} το DPC ολόκληρης της μονάδας ταχείας πυρόλυσης

DPC_{pret} το DPC του συστήματος προετοιμασίας και χειρισμού της βιομάζας

DPC_{pyr} το DPC του συστήματος πυρόλυσης, συμπύκνωσης, συλλογής και αποθήκευσης βιοελαίου.

Ο τελικός υπολογισμός του TCI γίνεται στη συνέχεια με τον υπολογισμό των υπόλοιπων συνιστωσών του κόστους συναρτήσει της τιμής του DPC. Οι παραδοχές που ακολουθούνται δίνονται στον ακόλουθο πίνακα [19], [42].

Μέγεθος	Τιμή
Άμεσο Κόστος Μονάδας (DPC)	Άθροισμα των κάτωθι
Εξοπλισμός, σωληνώσεις, κτήρια κ.α.	66,5% του TPC
Κόστος αποθήκης	3% του TPC
Κόστος γης	4% του TPC
Ανάπτυξη και χωροθέτηση	3% του TPC
Έμμεσο Κόστος Μονάδας (IPC)	31% του DPC
Κόστος μηχανολογικού σχεδιασμού και επίβλεψης	8% του DPC
Κόστος Κατασκευής	5% του DPC
Αμοιβή του ανάδοχου	8% του DPC
Έκτακτα έξοδα	
TPC=DPC+IPC	90% του TCI
Κεφάλαιο Εργασίας	10% του TCI
Συνολικό Κεφάλαιο Επένδυσης TCI	TPC+ Κεφάλαιο εργασίας

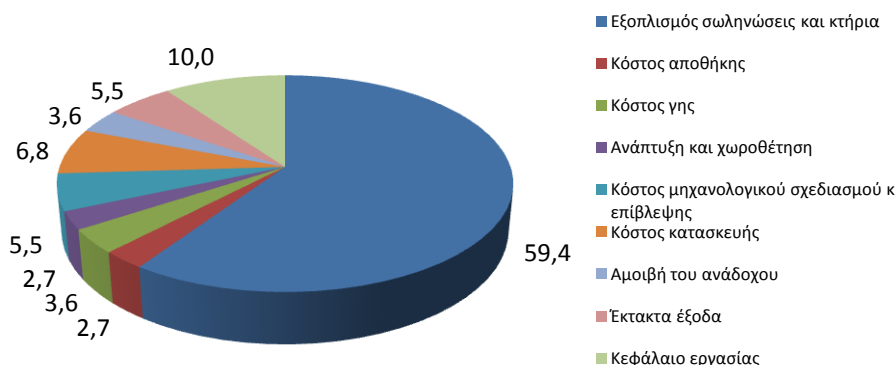
Πίνακας 4.2.1. Κατανομή του TCI στις συνιστώσες του [1], [4]

Για τον υπολογισμό του DPC καθενός από τα 2 τμήματα της μονάδας χρησιμοποιούνται εξισώσεις από τη βιβλιογραφία. Στην περίπτωση που είναι αναγκαία η εύρεση του DPC όταν δίνεται το TPC, χρησιμοποιείται η εξίσωση :

$$DPC = \frac{TPC}{1 + \frac{IPC\%}{100}} \quad (4.2.2.)$$

όπου IPC % το ποσοστό του Έμμεσου Κόστους Μονάδας ως ποσοστό του DPC.

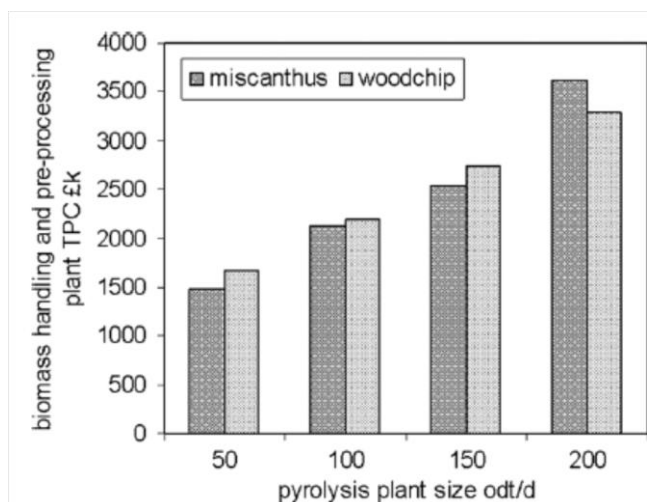
Με βάση τις παραπάνω παραδοχές για το TCI της μονάδας, υπολογίζεται το ποσοστό κάθε συνιστώσας του στην τελική τιμή. Η κατανομή που προκύπτει απεικονίζεται στο ακόλουθο διάγραμμα :



Σχήμα 4.2.1. Ποσοστιαία κατανομή συνιστωσών TCI για τη μονάδα ταχείας πυρόλυσης

Σύστημα προετοιμασίας και χειρισμού της βιομάζας

Οι Rogers and Brammer [36] συνοψίζουν τιμές του TPC χειρισμού και προετοιμασίας της βιομάζας, οι οποίες δίνονται στον παρακάτω πίνακα, για μίσχανθο και chips ξύλου και για διάφορες παροχές τροφοδοσίας :



Σχήμα 4.2.2. TPC συστήματος χειρισμού και προετοιμασίας της βιομάζας [36]

Το κόστος αυτό σύμφωνα με τους συγγραφείς δεν περιλαμβάνει το κόστος γης, το κόστος ανάδοχου καθώς και το κόστος ανάπτυξης της τοποθεσίας της μονάδας. Για τον υπολογισμό του ολικού TPC χρησιμοποιείται η σχέση

$$TPC^{pretr} = \frac{TPC^{pretr}}{\left(1 - \frac{land\% + contr\% + yard\%}{100}\right)} \quad (4.2.3.)$$

Όπου land, contr και yard τα ποσοστά του κόστη γης, ανάδοχου και ανάπτυξης τοποθεσίας επί του TPC, τα οποία λαμβάνονται από τον πίνακα 4.2.1. . Με την εφαρμογή της εξίσωσης (4.2.3.) είναι δυνατός ο υπολογισμός του συνολικού TPC. Από το TPC γίνεται ο υπολογισμός του DPC μέσω της σχέσης (4.2.2.) και του πίνακα (4.2.1.).

Το παραπάνω διάγραμμα ισχύει για παροχές μέχρι και 200 dry tn/day. Για μονάδες υψηλότερης τροφοδοσίας, είναι αναγκαία η παράλληλη λειτουργία επιπρόσθετου εξοπλισμού. Επειδή η διαφορά του κόστους για chips ξύλου και μίσχανθο είναι αμελητέα, μπορεί να ληφθεί μια μέση τιμή που να περιγράφει με ακρίβεια το κόστος και για τις δύο περιπτώσεις. Κατ'επέκταση, από υπολογισμό της γραμμικής εξίσωσης αναδρομής του TPC και με χρήση κατάλληλων συντελεστών για τα κόστη που περιγράφηκαν προηγουμένως, είναι δυνατή μια ενιαία έκφραση του DPC της μονάδας προετοιμασίας και χειρισμού της βιομάζας ως συνάρτηση της παροχής βιομάζας της μονάδας σε dry tn/h για παροχές βιομάζας από 1 έως 20 dry tn/h. Η σχέση αυτή είναι :

$$DPC^{pretr} = 264.61537Q(dry\,tn\,h^{-1}) + 705.12830 \quad R^2 = 0.98264 \quad (4.2.4.)$$

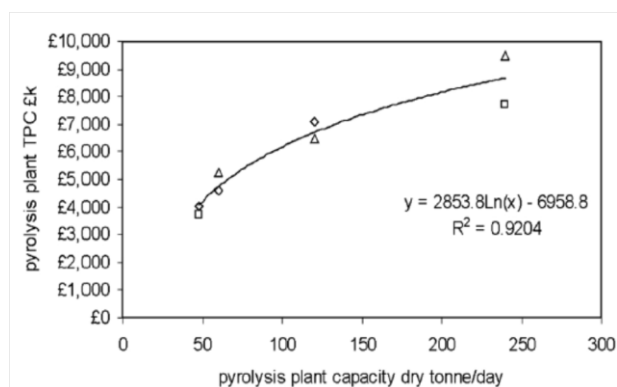
Σύστημα πυρόλυσης, συμπύκνωσης, συλλογής και αποθήκευσης του βιοελαίου

Στη βιβλιογραφία βρέθηκαν 2 εξισώσεις για τον υπολογισμό του κόστους αυτού του τμήματος της μονάδας, οι οποίες και περιγράφονται ακολούθως.

- Ο Bridgewater [18] δίνει μία συσχέτιση του TIC (Total Installed Capital) της μονάδας πυρόλυσης, εξαιρουμένου του συστήματος τροφοδοσίας, χειρισμού και προετοιμασίας της βιομάζας. Το κόστος αυτό είναι ισοδύναμο με το DPC, και συνδέεται με την τροφοδοσία της μονάδας σε ξηρή βιομάζα μέσω της σχέσης :

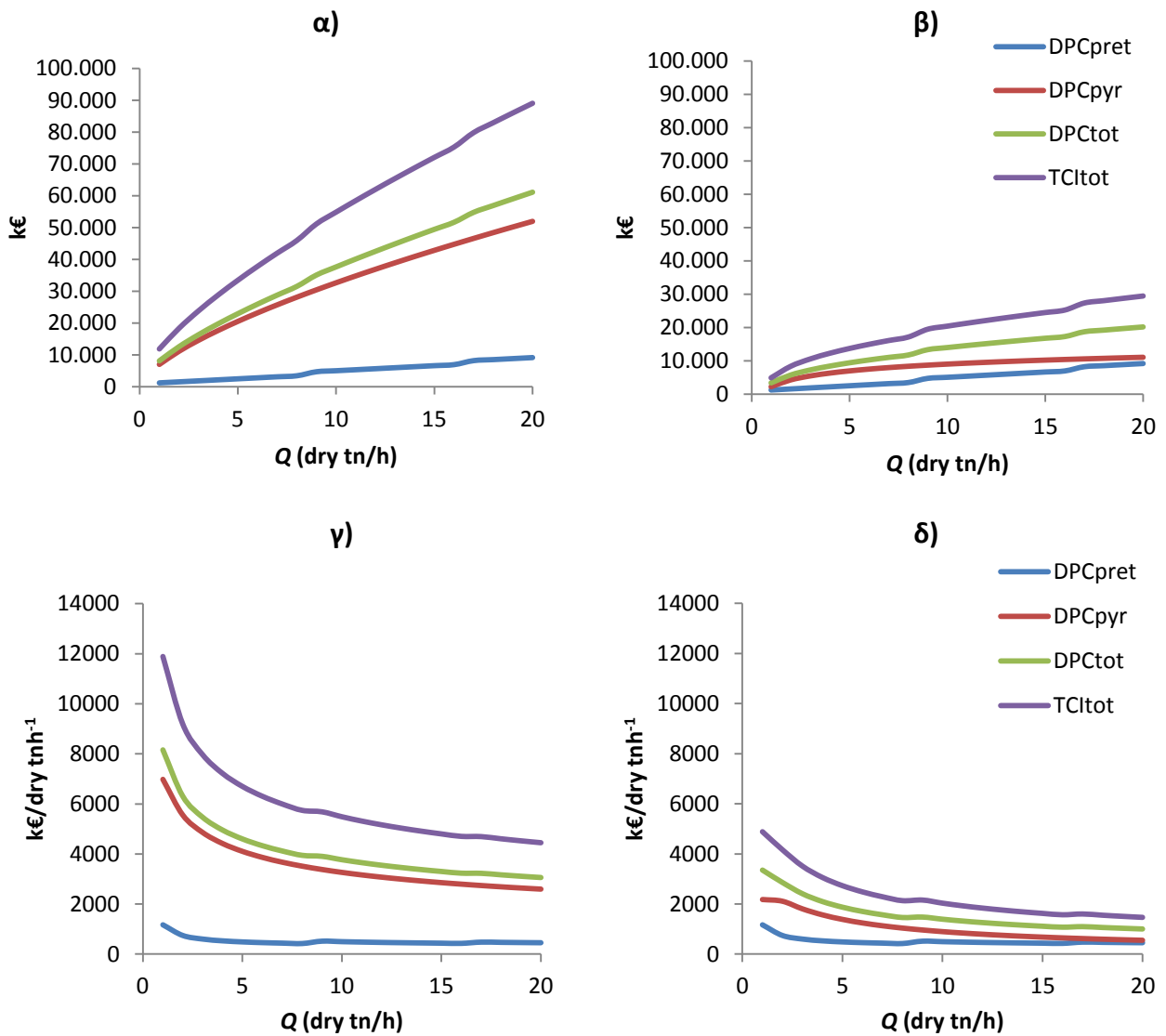
$$DPC^{pyr} = 6.98 \cdot (\text{biomass feed rate dry tn h}^{-1})^{0.67} \quad (4.2.5.)$$

- Η δεύτερη εξίσωση δίνεται από τους Rogers and Brammer [36], και συσχετίζει το TPC της μονάδας πυρόλυσης (εξαιρουμένου του κόστους αγοράς και ανάπτυξης γης και αμοιβής ανάδοχου) με την τροφοδοσία της μονάδας.



Σχήμα 4.2.3. Συνολικό κεφάλαιο μονάδας ταχείας πυρόλυσης (k€) συναρτήσεως της τροφοδοσίας της μονάδας (dry tn/day) [36]

Η αναγωγή του TPC σε DPC γίνεται με τον ίδιο τρόπο όπως προηγουμένως, με χρήση της εξίσωσης (4.2.2.) και της εξίσωσης (4.2.3.).



Σχήμα 4.2.4 DPC_{pret}, DPC_{pyr}, DPC_{total} και TCI μονάδας ταχείας πυρόλυσης α) εξίσωση Bridgwater β) εξίσωση Rogers&Brammer. Ειδικό κόστος DPC_{pret}, DPC_{pyr}, DPC_{total} και TCI ανά μονάδα τροφοδοσίας της μονάδας Q (€/dry tn/h) γ) εξίσωση Bridgwater δ) εξίσωση Rogers&Brammer

Οι δύο μέθοδοι αποκλίνουν σημαντικά στην εκτίμηση του κόστους της μονάδας ταχείας πυρόλυσης. Ωστόσο, είναι φανερό και στις 2 περιπτώσεις πως αυτό μειώνεται σημαντικά με αύξηση της τροφοδοσίας της μονάδας. Αυτό δείχνει πως μονάδες μεγαλύτερης τροφοδοσίας επωφελούνται περισσότερο από την οικονομία κλίμακας και κατ'επέκταση έχουν μικρότερο κόστος παραγωγής βιοελαίου.

4.2.2. Κόστος Συντήρησης και Λειτουργίας

Τα Κόστη Συντήρησης και Λειτουργίας περιλαμβάνουν τα εξής :

- Κόστη Συντήρησης και Επισκευών, Ασφάλισης και Φορολογίας

Το κόστος Συντήρησης και Επισκευών (Maintenance and Repairs Cost) της εγκατάστασης υπολογίζεται κατά τη μεθοδολογία του NREL ίσο με το 2% του Κόστους Εξοπλισμού. Το κόστος Ασφάλισης και Φορολογίας (Insurance and Taxes) λαμβάνεται ίσο με το 1.5% του Συνολικού Κόστους Κεφαλαίου [4].

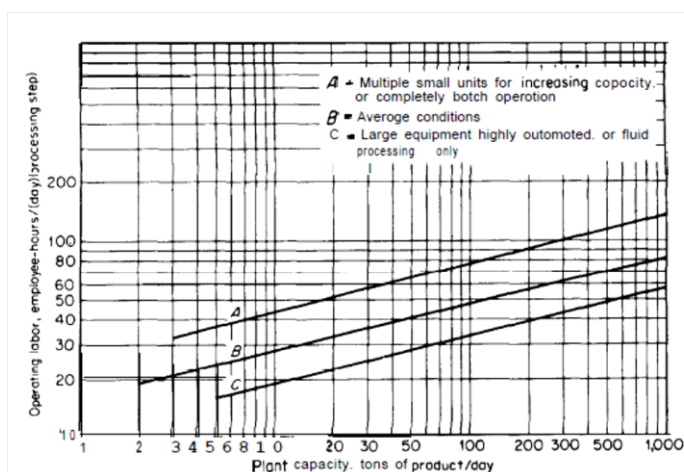
Κόστος συντήρησης και επισκευών	2% του κόστους εξοπλισμού
Κόστος ασφάλισης και φορολογίας	1.5% του TCI

Πίνακας 4.2.2. Κόστος συντήρησης και επισκευών, ασφάλισης και φορολογίας [19]

Το κόστος εξοπλισμού λαμβάνεται ίσο με το 30% του TCI [42].

- Κόστος Εργασίας (Labour Cost)

Το παρακάτω διάγραμμα [42] δίνει μία συσχέτιση μεταξύ των απαιτούμενων εργατωρών ανά ημέρα και ανά βήμα διεργασίας μίας εγκατάστασης και της ημερήσιας παραγωγής τελικού προϊόντος. Παράμετρος για τη συσχέτιση αυτή είναι οι συνθήκες λειτουργίας της μονάδας. Οι πιο ευνοϊκές συνθήκες χαρακτηρίζονται από μεγάλο εξοπλισμό υψηλής αυτοματοποίησης ή για διεργασίες ρευστών μέσων μόνο, ενώ οι χειρότερες από μικρές μονάδες σε σειρά με διακοπτόμενη λειτουργία. Αντίστοιχα δίνεται και μια καμπύλη ενδιάμεσων συνθηκών.



Σχήμα 4.2.5. Εργατῶρες ανά βήμα επεξεργασίας (h/day/pr^ocessing step) συναρτήσεϊ του μεγέθους της μονάδας (tns of product/day) [42]

Το παραπάνω διάγραμμα αποτελεί γραφική απεικόνιση της σχέσης του Wesel για τον υπολογισμό του πλήθους των εργαζομένων που απαιτούνται για μια μονάδα χημικών διεργασιών [5].

$$\log_{10} Y = -0.783 \log_{10} \chi + 1.252 + B \quad (4.2.6.)$$

Στην παραπάνω σχέση το Y είναι το πλήθος των ημερησίως απαιτούμενων εργατωρών ανά επεξεργαζόμενο τόνο και ανά βήμα επεξεργασίας, το χ ισούται με την τιμή της παροχής της μονάδας σε ξηρούς τόνους ανά ημέρα και το B αντιπροσωπεύει τις συνθήκες λειτουργίας της εγκατάστασης, λαμβάνοντας τιμές από 0,132 (δυσμενείς συνθήκες, διακοπτόμενη λειτουργία) έως και -0,167 (αυτοματοποιημένη λειτουργία, μικρές απαιτήσεις). Για μία μονάδα όπου επικρατούν ενδιάμεσες συνθήκες λαμβάνει την τιμή 0. Στην περίπτωση της μονάδας ταχείας πυρόλυσης που μελετάται επιλέγονται ενδιάμεσες συνθήκες, καθώς αφενός εν μέρει η διεργασία είναι συνεχής και αυτοματοποιημένη, όμως τμήματά της όπως ο χειρισμός της στερεής βιομάζας και η αποθήκευσή της χαρακτηρίζονται από διακοπτόμενη ροή. Η ολική διεργασία συντίθεται από 5 ξεχωριστά βήματα, τα οποία είναι :

- Ξήρανση Βιομάζας
- Άλεση Βιομάζας
- Ταχεία Πυρόλυση
- Συλλογή βιοελαίου
- Αποθήκευση βιοελαίου

Για 24 ωρη λειτουργία της μονάδας και θεωρώντας βάρδιες των 8 ωρών γίνεται ο υπολογισμός του χ, και αντίστοιχα του πλήθους των εργαζομένων με βάση τον πίνακα :

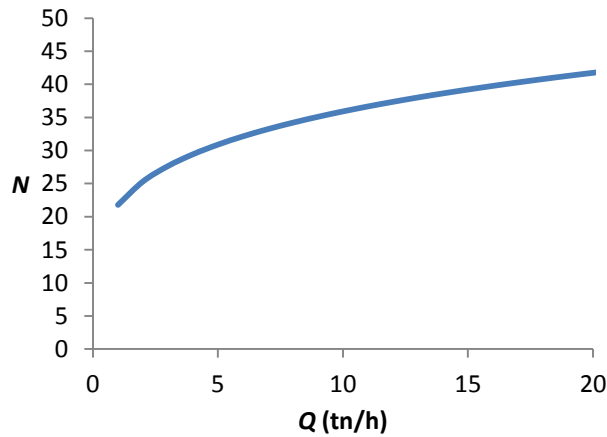
Μέγεθος	Αριθμός βημάτων επεξεργασίας	χ	B	Διάρκεια βάρδιας
Τιμή	5	24xQ (dry tn/h)	0 (ενδιάμεσες συνθήκες)	8h

Πίνακας 4.2.3. Τιμές μεταβλητών της εξίσωσης (4.2.5.) και υπολογισμού πλήθους εργαζομένων

και έτσι η σχέση γίνεται :

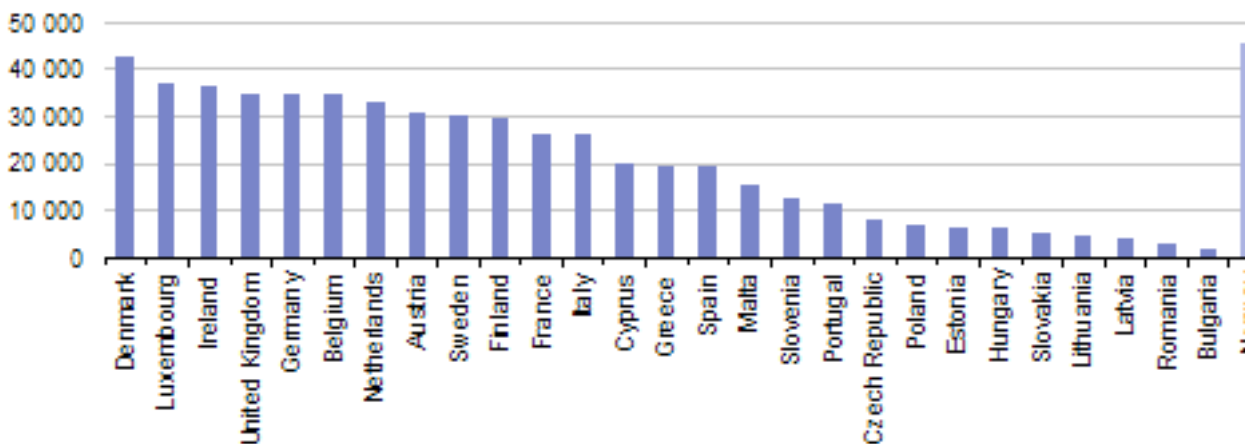
$$N = 5 \cdot \frac{-0.783 \log_{10}(Q \cdot 24) + 1.252}{8} \quad (4.2.7.)$$

Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται σχηματικά το πλήθος των απαιτούμενων εργαζομένων για διάφορες τιμές παροχής της μονάδας Q.



Σχήμα 4.2.6. Πλήθος απαιτούμενων εργαζομένων μονάδας ταχείας πυρόλυσης N συναρτήσει της τροφοδοσίας της Q (dry tn/h)

Για μια μονάδα 20 tn/h απαιτούνται επομένως 49 εργαζόμενοι. Για τον υπολογισμό του ύψους των αμοιβών των εργαζομένων χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία της Eurostat για το μέσο μικτό μισθό ανά κράτος της ΕΕ [46]. Έτσι γίνεται η υπόθεση πως η μέση τιμή των μισθών των εργαζομένων της μονάδας προσεγγίζει τον εθνικά μέσο ετήσιο μισθό. Το συνολικό κόστος εργασίας προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό του N με την τιμή αυτή.



Σχήμα 4.2.7. Μέσος μικτός ετήσιος μισθός για τα κράτη της ΕΕ σύμφωνα με στοιχεία της Eurostat [46]

Στην παρούσα εργασία ελήφθη η τιμή των 35000 η οποία αναφέρεται σε χώρες της Δυτικής Ευρώπης.

- Πρόσθετα Έξοδα Παραγωγής

Τα πρόσθετα έξοδα παραγωγής (overhead expenses) περιλαμβάνουν έξοδα μη άμεσα συσχετιζόμενα με την παραγωγή όπως κόστη μη μηχανολογικού εξοπλισμού, κόστη γενικότερης συντήρησης της εγκατάστασης της μονάδας, ιατρικής περίθαλψης και ασφάλειας, προστασίας και φύλαξης της μονάδας, διανομής των υλικών κλπ. Τα

Πρόσθετα Έξοδα Παραγωγής σύμφωνα με το NREL [19] είναι ίσα με το 60% του Κόστους Εργασίας.

- Κόστος ηλεκτρισμού

Το κόστος ηλεκτρισμού περιλαμβάνει τις ενεργειακές καταναλώσεις της μονάδας. Τέτοιες καταναλώσεις απαιτούνται για την ομαλή λειτουργία του αντιδραστήρα ταχείας πυρόλυσης, του συστήματος ψύξης και συλλογής ψυκτικών, ανάκτησης θερμότητας, αλλά και για το σύστημα χειρισμού της βιομάζας, την ξήρανση και την άλεσή της. Παράλληλα περιλαμβάνει τις καταναλώσεις για περιφερειακές χρήσεις, όπως ο φωτισμός.

Κατανάλωση ρεύματος	Τιμή
Άλεση (σφυρόμυλος)-μέγεθος σωματιδίου 2mm	14.97kWh/drytn $Energy(kWh \cdot ton^{-1}) = 5.31size^2 - 30.86size + 55.45$ [47] (μίσχανθος) 61 kWh/dry tn (chips ξύλου) [19] 45.5 kWh/dry tn (μέση τιμή)
Ξηραντήρας (περιστρεφόμενος τυμπανοειδής)	32 kWh/dry tn [48]
Μονάδα ταχείας πυρόλυσης	68 kWh/dry tn [19], [40]
Πρόσθετες ανάγκες	+20%
Σύνολο κατανάλωσης	175 kWh/dry tn
Τιμή ηλεκτρικής ενέργειας	0.08 €/kWh

Πίνακας 4.2.4. Ηλεκτρικές καταναλώσεις μονάδας ταχείας πυρόλυσης και τιμή ηλεκτρικής ενέργειας

Η κατανάλωση ρεύματος της μονάδας ταχείας πυρόλυσης σύμφωνα με το [40] είναι 40 kWh/dry tn βιομάζας, ενώ σύμφωνα με τον Ringer [19] απαιτούνται 95 kWh/dry tn για την συμπίεση του των ανακυκλοφορούμενων αερίων. Μεταξύ των δύο αυτών τιμών επιλέχθηκε μία μέση, και τελικά η κατανάλωση ενέργειας της κυρίως μονάδας λαμβάνεται ίση με 68 kWh/odt. Η ηλεκτρική κατανάλωση της λειτουργίας του σφυρόμυλου για αχυρώδη είδη βιομάζας δίνεται από τη σχέση του Mani [47] και για chips ξύλου από τον Ringer [19] για τελικό μέγεθος σωματιδίου 2 mm, που είναι απαιτούμενη τιμή για ρευστοποιημένη κλίνη. Μεταξύ των δύο αυτών τιμών επιλέγεται μία μέση, ίση με 45.5 kWh/dry tn:

Με βάση αυτή τη σχέση προκύπτει πως απαιτούνται 14.97 kWh/dry tn. Η ενεργειακή κατανάλωση του ξηραντήρα υπολογίζεται από τον Bridgwater στο [48] για περιστρεφόμενο τυμπανοειδή ξηραντήρα και είναι ίση με 32 kWh/dry tn βιομάζας. Αθροιστικά η ενεργειακή κατανάλωση ανέρχεται σε 115 kWh/dry tn. Για κάλυψη πρόσθετων αναγκών ενέργειας το ποσό αυτό προσαυξάνεται κατά 20%, οπότε τελικά λαμβάνεται κατανάλωση 175 kWh/dry tn.

Η τιμή της kWh ηλεκτρικής ενέργειας είναι η τιμή που η επιχείρηση ηλεκτρισμού πουλάει ρεύμα στους καταναλωτές-παραγωγούς ενέργειας. Μία ενδεικτική τέτοια τιμή είναι 0.08 €/kWh [49]. Η τιμή αυτή χρησιμοποιήθηκε και στους υπολογισμούς.

- **Κόστος Καυσίμου**

Η μεγαλύτερη σε μέγεθος και σημαντικότερη συνιστώσα του Κόστους Λειτουργίας και Συντήρησης είναι το Κόστος Καυσίμου. Στην περίπτωση της μονάδας ταχείας πυρόλυσης, το κόστος αυτό είναι το ποσό χρημάτων που απαιτείται για την απόκτηση της βιομάζας από τη μονάδα. Οι κύριες συνιστώσες που απαρτίζουν το κόστος αυτό περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στην παρούσα εργασία ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το κόστος μεταφοράς και συλλογής της βιομάζας, καθώς και το κόστος μεταφοράς του παραγόμενου βιοελαίου. Τα κόστη αυτά αναλύονται διεξοδικά στην επόμενη παράγραφο.

4.3. Μεταφορικά κόστη βιομάζας και βιοελαίου

Τα σχετικά με τη μεταφορά της βιομάζας και του βιοελαίου κόστη υπολογίζονται με εσωτερική οικονομική αξιολόγηση της οντότητας που εκτελεί τη μεταφορά (πχ εταιρεία μεταφορών). Αντίστοιχα με τη διαδικασία που ακολουθήθηκε για την μονάδα ταχείας πυρόλυσης, έτσι κι εδώ υπολογίζεται το Συνολικό Κεφάλαιο Επένδυσης και αντίστοιχα Κόστη Λειτουργίας και Συντήρησης. Αρχικά παρουσιάζεται η μεθοδολογία εκτίμησης του κόστους μεταφοράς για ενιαία απόσταση, και στη συνέχεια γίνεται επέκτασή της για την εκτίμηση του κόστους συλλογής βιομάζας από μία επιφάνεια.

4.3.1. Βασικές έννοιες οικονομικής ανάλυσης κόστους μεταφοράς

Συνολικό Κεφάλαιο Επένδυσης

Το Συνολικό Κεφάλαιο Επένδυσης ισούται με το κόστος αγοράς του εξοπλισμού μεταφοράς, ο οποίος στην περίπτωση της βιομάζας περιλαμβάνει τα φορτηγά που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν.

Τα οχήματα που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά βιομάζας και βιοελαίου είναι διαρθρωτά φορτηγά (articulated trucks) [50]. Νομικοί περιορισμοί που ισχύουν για την Ευρωπαϊκή Ένωση ορίζουν το μέγιστο επιτρεπόμενο μικτό βάρος τους στους 40 τόνους, ενώ σε κάποιες χώρες αυτό φτάνει τους 44 τόνους [51]. Επιπλέον περιορισμοί ισχύουν για

τις μέγιστες επιτρεπόμενες διαστάσεις των φορτηγών, οι οποίες περιορίζουν το μέγιστο όγκο φορτίου που μπορούν να φέρουν γύρω στα 150 m³ [52]. Ο περιορισμός όγκου φορτίου παίζει ιδιαίτερα μεγάλο ρόλο σε είδη βιομάζας χαμηλής πυκνότητας όπως ο μίσχανθος και το άχυρο, καθώς περιορίζει σημαντικά την ποσότητα βιομάζας που μπορεί να μεταφερθεί ανά δρομολόγιο (round trip). Πέρα από τους νομικούς περιορισμούς του μικτού βάρους, αξίζει να σημειωθεί πως ανάλογα με το είδος της υπάρχουσας οδικής υποδομής όπου κινούνται τα οχήματα (πχ επαρχιακοί δρόμοι, δρόμοι κωμοπόλεων κλπ), μπορούν να ανακύψουν επιπλέον περιορισμοί. Για την αναγωγή του Συνολικού Κεφαλαίου Επένδυσης σε ετήσιες χρηματοροές, επιλέγεται επιτόκιο $i\%$, σε συμφωνία με την ανάλυση που γίνεται για τη μονάδα πυρόλυσης και διάρκεια ζωής των οχημάτων N χρόνια.

Για κάθε ένα φορτηγό επομένως το ανηγμένο ετήσιο Συνολικό Κεφάλαιο Επένδυσης δίνεται από τον όρο $TCI^{truck} \frac{i}{1 - (1+i)^{-N}}$

Κόστος Συντήρησης και Λειτουργίας

Το Κόστος Συντήρησης και Λειτουργίας περιλαμβάνει τα εξής :

- Κόστος μισθοδοσίας οδηγού (Driver Earnings) : ο ετήσιος μισθός κάθε οδηγού (στο εξής συμβολίζεται με τη μεταβλητή DE). Εξαρτάται κυρίως από τη χώρα μελέτης.
- Κόστος συντήρησης και επισκευών: περιλαμβάνει το κόστος σέρβις, επισκευών, ανταλλακτικών κλπ.
- Κόστος ασφάλισης : το κόστος οδικής ασφάλισης που πρέπει να καταβάλλεται ετησίως.
- Κόστος φορολογίας : κόστος που προκύπτει από τέλη κυκλοφορίας κ.α.

Τα παραπάνω κόστη συντήρησης, ασφάλισης και φορολογίας εκφράζονται σαν ποσοστά του ΣΚΕ και ομαδικά συμβολίζονται με τη μεταβλητή MIT (Maintenance Insurance Taxation).

Κόστος καυσίμου F_c : η κατανάλωση καυσίμου (fuel consumption) εκφράζεται σε L/km. Η τιμή της εξαρτάται από το είδος του φορτηγού και τη χωρητικότητά του.

Τιμή καυσίμου F_p : η τιμή προμήθειας καυσίμου σε €/L εξαρτάται από τον τόπο και το χρόνο μελέτης.

περιλαμβάνει τυχόν πρόσθετες καθυστερήσεις. Ο υπολογισμός των χρονικών αυτών ποσών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη χωρητικότητα του φορτηγού και το είδος του διακινούμενου προϊόντος και συμβολίζεται με τη μεταβλητή t_{rest} .

Από τα προηγούμενα προκύπτει πως ο συνολικός χρόνος ταξιδιού μετ'επιστροφής είναι ίσος με

$$t_{rt} = \frac{2Rw_f}{u} + t_{rest} \quad (4.3.3)$$

Ο συνολικός ετήσιος χρόνος εργασίας για τη μεταφορά είναι ίσος με $N_{rt}t_{rt}$ και πρόκειται για τον ετήσιο αριθμό εργατοωρών που απαιτούνται. Θεωρώντας ένα ετήσιο πλήθος ημερών μεταφοράς $days$, και για ημερήσια βάρδια εργασίας των οδηγών S ωρών, το πλήθος των εργαζομένων που απαιτούνται υπολογίζεται από τη σχέση :

$$N_d = \frac{N_{rt}t_{rt}}{S \cdot days} = \frac{Bio \left(\frac{2Rw_f}{u} + t_{rest} \right)}{S \cdot days} \quad (4.3.4.)$$

Θεωρώντας πως ο ημερήσιος χρόνος λειτουργίας του κάθε φορτηγού είναι D ώρες, προκύπτει πως το συνολικό πλήθος των φορτηγών που απαιτούνται είναι

$$N_{truck} = \frac{N_{rt}t_{rt}}{T \cdot days} = \frac{Bio \left(\frac{2Rw_f}{u} + t_{rest} \right)}{T \cdot days} \quad (4.3.5.)$$

Το ανηγμένο ετήσιο κόστος για τη μεταφορά βιομάζας για κάθε ένα φορτηγό δίνεται από την εξίσωση

$$Cost^{truck} = TCI^{truck} \left[\frac{i}{1 - (1+i)^{-N}} + MIT\% \right] + F_p F_c R_{rt} N_{rt}^{truck} \quad (4.3.6.)$$

όπου

$$N_{rt}^{truck} = \frac{N_{rt}}{N_{truck}} = \frac{N_{rt}}{\frac{N_{rt}t_{rt}}{T \cdot days}} = \frac{T \cdot days}{t_{rt}} = \frac{T \cdot days}{\frac{2Rw_f}{u} + t_{rest}} \quad (4.3.7.)$$

το πλήθος δρομολογίων που εκτελεί κάθε φορτηγό.

Ο όρος $TCI^{truck} \left[\frac{i}{1 - (1+i)^{-N}} + MIT\% \right]$ είναι σταθερός και ανεξάρτητος της απόστασης που

διανύεται αλλά και της διακινούμενης ποσότητας βιομάζας, και εκφράζει το σταθερό κόστος κεφαλαίου που πρέπει να καταβληθεί για κάθε ένα φορτηγό ετησίως, ενώ το γινόμενο $F_p F_c R_{rt} N_{rt}^{truck}$ εκφράζει το εξαρτημένο από την απόσταση κόστος μεταφοράς.

Το σταθερό κόστος κεφαλαίου ανά φορτηγό γράφεται

$$Capital^{truck} = TCI^{truck} \cdot \left(\frac{i}{1 - (1+i)^{-N}} + MIT\% \right) \quad (4.3.8.)$$

Επομένως η εξίσωση (4.3.6.) γράφεται

$$Cost^{truck} = Capital^{truck} + F_p F_c R_{rt} N_{rt}^{truck} \quad (4.3.9.)$$

Και με αντικατάσταση των R_{rt} και N_{rt}^{truck} γίνεται

$$Cost^{truck} = Capital^{truck} + 2F_p F_c R w_f \frac{T \cdot days}{\frac{2R w_f}{u} + t_{rest}} \quad (4.3.10.)$$

Για το σύνολο των φορτηγών και των οδηγών το κόστος που καταβάλλεται ετησίως είναι ίσο με

$$Cost^{total} = N_{truck} Cost^{truck} + N_d DE \quad (4.3.11.)$$

Και με αντικατάσταση των όρων

$$Cost^{total} = \frac{\frac{Bio}{P_{truck}} \left(\frac{2R w_f}{u} + t_{rest} \right)}{T \cdot days} \left(Capital^{truck} + 2F_p F_c R w_f \frac{T \cdot days}{\frac{2R w_f}{u} + t_{rest}} \right) + \frac{\frac{Bio}{P_{truck}} \left(\frac{2R w_f}{u} + t_{rest} \right)}{S \cdot days} DE \quad (4.3.12.)$$

Τελικά με εκτέλεση πράξεων η σχέση γίνεται :

$$Cost^{total} = \frac{2R w_f Bio}{P_{truck} u \cdot days} \left(\frac{Capital^{truck}}{T} + \frac{DE}{S} + F_p F_c u \cdot days \right) + \left(\frac{Capital^{truck}}{T} + \frac{DE}{S} \right) \frac{Bio}{P_{truck} \cdot days} t_{rest} \quad (4.3.13.)$$

Η τελευταία σχέση δίνει το συνολικό κόστος που απαιτείται για τη μεταφορά Βιο τόνων προϊόντος (βιομάζα/βιοέλαιο) σε ευθεία απόσταση R.

4.3.2. Κόστος μεταφοράς βιομάζας/βιοελαίου σε ενιαία απόσταση

Για την περίπτωση σταθερής ποσότητας βιομάζας ή βιοελαίου Bio που πρόκειται να μεταφερθεί σε ορισμένη απόσταση R εύκολα φαίνεται από την παραπάνω εξίσωση πως το συνολικό κόστος είναι γραμμική συνάρτηση της απόστασης R. Αντίστοιχα, για δεδομένη απόσταση μεταφοράς το κόστος αυξάνεται γραμμικά με αύξηση της διακινούμενης βιομάζας. Κάτι άλλο που αξίζει να παρατηρηθεί είναι πως το κόστος μειώνεται για υψηλό ποσό εργατοωρών ανά φορτηγό. Αυτό είναι λογικό καθώς όσο περισσότερες ημέρες του έτους εργάζεται ένα φορτηγό, τόσα λιγότεροι οδηγοί θα εργαστούν για τη συλλογή της βιομάζας. Μία ακόμα σημαντική παράμετρος είναι το πλήθος των ημερήσιων ωρών χρήσης του κάθε φορτηγού T. Στην περίπτωση που αυτό ισοδυναμεί με τις ώρες βάρδιας κάθε οδηγού (δηλαδή ο κάθε οδηγός έχει το δικό του όχημα), αυξάνεται το απαιτούμενο πλήθος φορτηγών και κατ'επέκταση το συνολικό κεφάλαιο επένδυσης. Το κόστος μεταφοράς επίσης μειώνεται για υψηλή ταχύτητα του οχήματος και για υψηλή χωρητικότητά του, αφού κατ'αυτό τον τρόπο μειώνεται το απαιτούμενο πλήθος απαιτούμενων συνολικά εργατοωρών και κατ'επέκταση οχημάτων, ενώ παράλληλα είναι δυνατή η μεταφορά της βιομάζας με λιγότερα δρομολόγια.

Το ειδικό κόστος ανά τόνο μπορεί να υπολογιστεί με διαίρεση της εξίσωσης με την ποσότητα Bio, και είναι ίσο με :

$$SpCost^{total} = \frac{2Rw_f}{P_{truck} \cdot u \cdot days} \left(\frac{Capital^{truck}}{T} + \frac{DE}{S} + F_p F_c u \cdot days \right) + \left(\frac{Capital^{truck}}{T} + \frac{DE}{S} \right) \frac{t_{rest}}{P_{truck} \cdot days} \quad (4.3.14.)$$

Αξίζει να παρατηρηθεί πως είναι σταθερό ανεξαρτήτως της ποσότητας βιομάζας/βιοελαίου και γραμμικά εξαρτημένο από την απόσταση μεταφοράς.

4.3.3. Κόστος συλλογής βιομάζας από κυκλική επιφάνεια

Συλλογή της βιομάζας στο κέντρο κυκλικής επιφάνειας ακτίνας R

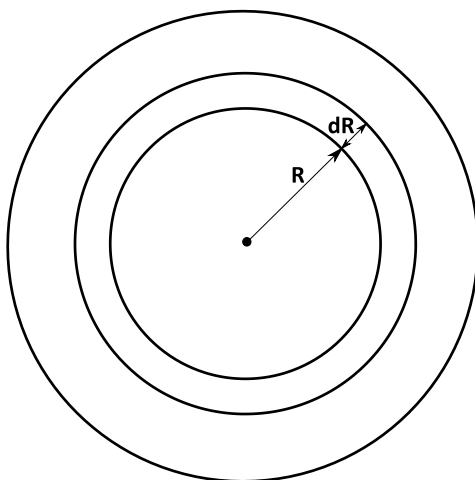
Για λόγους απλούστευσης των υπολογισμών, γίνεται η παραδοχή της ομοιογενούς καλλιέργειας της βιομάζας σε κυκλική επιφάνεια ακτίνας R και επιφανειακής πυκνότητας βιομάζας δ. Σκοπός είναι ο υπολογισμός του κόστους μεταφοράς της βιομάζας από το σύνολο της επιφάνειας αυτής στο κέντρο της, όπου και θεωρείται η τοποθεσία της μονάδας ταχείας πυρόλυσης. Από την ανάλυση που έγινε στην προηγούμενη παράγραφο,

προκύπτει πως το κόστος μεταφοράς της βιομάζας ποσότητας Bio σε ενιαία απόσταση R δίνεται από την εξίσωση (4.3.13.)

$$Cost^{total} = \frac{2Rw_f Bio}{P_{truck} u \cdot days} \left(\frac{Capital^{truck}}{T} + \frac{DE}{S} + F_p F_c u \cdot days \right) + \left(\frac{Capital^{truck}}{T} + \frac{DE}{S} \right) \frac{Bio}{P_{truck} \cdot days} t_{rest}$$

Εάν η αρχική επιφάνεια συλλογής βιομάζας χωρισθεί σε στοιχειώδεις δακτυλίους πάχους dR, τότε η βιομάζα που περιλαμβάνει κάθε ένας δακτύλιος, ο οποίος βρίσκεται σε απόσταση R από το κέντρο του κύκλου δίνεται από τη σχέση :

$$Bio = 2\pi\delta R dR \quad (4.3.15)$$



Σχήμα 4.3.2. Επιφανειακή ολοκλήρωση κυκλικής περιοχής καλλιέργειας βιομάζας

και έτσι το αντίστοιχο κόστος μεταφοράς της βιομάζας από τον κάθε ένα στοιχειώδη δακτύλιο είναι

$$dCost = \frac{4\delta\pi R^2 w_f dR}{P_{truck} u \cdot days} \left(\frac{Capital^{truck}}{T} + \frac{DE}{S} + F_p F_c u \cdot days \right) + \left(\frac{Capital^{truck}}{T} + \frac{DE}{S} \right) \frac{2\delta\pi R dR}{P_{truck} \cdot days} t_{rest} \quad (4.3.16.)$$

Με ολοκλήρωση της παραπάνω σχέσης από 0 έως R, όπου R είναι η συνολική ακτίνα της επιφάνειας, προκύπτει το συνολικό κόστος συλλογής βιομάζας για την κυκλική επιφάνεια.

$$Cost^{total} = \frac{4\delta\pi R^3 w_f}{3P_{truck} u \cdot days} \left(\frac{Capital^{truck}}{T} + \frac{DE}{S} + F_p F_c u \cdot days \right) + \left(\frac{Capital^{truck}}{T} + \frac{DE}{S} \right) \frac{\delta\pi R^2}{P_{truck} \cdot days} t_{rest} \quad (4.3.17.)$$

Στην περίπτωση συλλογής βιομάζας, το συνολικό κόστος είναι συνάρτηση του κύβου και του τετραγώνου της ακτίνας R, καθώς η ποσότητα βιομάζας που μεταφέρεται σε αυτή

την περίπτωση δεν είναι σταθερή αλλά αυξάνεται με αύξηση της ακτίνας συλλογής. Το ειδικό κόστος, από τη μεριά του, είναι γραμμικά εξαρτημένο από το R, και μάλιστα ανεξάρτητο της επιφανειακής πυκνότητας της βιομάζας.

$$SpCost^{total} = \frac{4Rw_f}{3P_{truck} \cdot u \cdot days} \left(\frac{Capital^{truck}}{T} + \frac{DE}{S} + F_p F_c u \cdot days \right) + \left(\frac{Capital^{truck}}{T} + \frac{DE}{S} \right) \frac{t_{rest}}{P_{truck} \cdot days} \quad (4.3.18.)$$

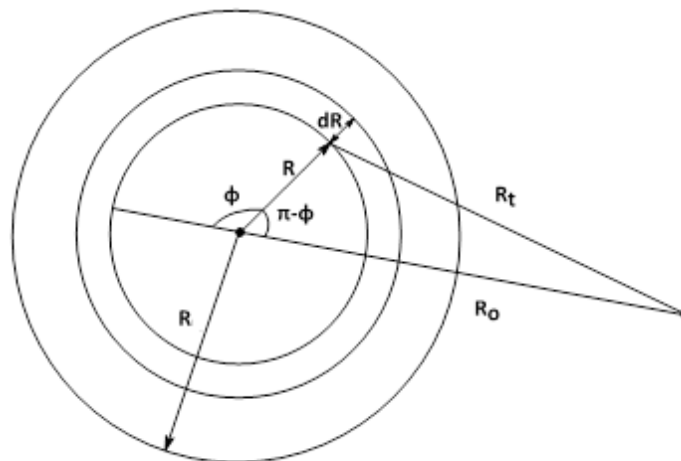
Η εφαρμογή της παραπάνω μεθόδου του επιφανειακού ολοκληρώματος βασίζεται στην υπόθεση πως η συλλογή της βιομάζας γίνεται σαρώνοντας ολόκληρη την κυκλική επιφάνεια, σημείο προς σημείο με δρομολόγια μεταφοράς της βιομάζας.

Παρατηρώντας την σχέση του ειδικού κόστους μεταφοράς προκύπτει πως αυτό μπορεί να περιγραφεί από δύο συντελεστές, έναν συντελεστή για το κόστος που είναι ανεξάρτητος της απόστασης (distance fixed cost) και έναν άλλο για το κόστος που εξαρτάται από αυτήν (distance variable cost) [53].

Ο πρώτος συντελεστής διαμορφώνεται κυρίως από το είδος του καυσίμου που μεταφέρεται, τις συνακόλουθες απαιτήσεις εξοπλισμού (κόστος στόλου οχημάτων) καθώς και επιπλέον κόστη που δεν συσχετίζονται άμεσα με την απόσταση μεταφοράς [53]. Ο δεύτερος συντελεστής, αφορά περισσότερο άμεσα τα κόστη που εξαρτώνται από την απόσταση που διανύεται όπως για παράδειγμα το κόστος καυσίμου.

Συλλογή της βιομάζας σε σημείο εκτός του κέντρου της κυκλικής επιφάνειας

Η περίπτωση αυτή μοιάζει με την προηγούμενη, αλλά αποτελεί γενίκευση, καθώς η βιομάζα δεν συλλέγεται στο κέντρο της κυκλικής επιφάνειας, αλλά σε σημείο εκτός αυτής, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



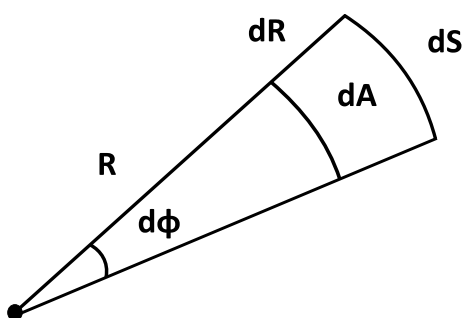
Σχήμα 4.3.3. Συλλογή βιομάζας σε σημείο εκτός της κυκλικής επιφάνειας

Η βιομάζα συγκεντρώνεται από κάθε σημείο της επιφάνειας σε σημείο που βρίσκεται εκτός αυτής, σε απόσταση R_o από το κέντρο της. Η ευθεία μεταξύ αυτού του εξωτερικού σημείου και του κέντρου σχηματίζει γωνία ϕ με την ακτίνα που ενώνει το δεύτερο με το σημείο συλλογής βιομάζας.

Η απόσταση R_t μπορεί να υπολογιστεί από τον νόμο των συνημιτόνων και δίνεται από την εξίσωση

$$R_t = \sqrt{R^2 + R_o^2 - 2RR_o \cos(\pi - \phi)} \quad (4.3.19.)$$

Κάθε στοιχειώδης επιφάνεια του κύκλου έχει εμβαδόν $dA = dSdR = RdRd\phi$



Σχήμα 4.3.4. Στοιχειώδης επιφάνεια ολοκλήρωσης

Επομένως η βιομάζα που συλλέγεται είναι ίση με

$$dBio = \delta dA = \delta RdRd\phi \quad (4.3.20.)$$

Από την εξίσωση (4.3.12.) με αντικατάσταση των $dBio$ και του R_t προκύπτει πως για κάθε στοιχειώδη επιφάνεια το κόστος μεταφοράς της βιομάζας στην απόσταση R_t δίνεται από την εξίσωση

$$dCost = \frac{2\sqrt{R^2 + R_o^2 - 2RR_o \cos(\pi - \phi)} w_f \delta RdRd\phi}{P_{truck} u \cdot days} \left(\frac{Capital^{truck}}{T} + \frac{DE}{S} + F_p F_c u \cdot days \right) + \left(\frac{Capital^{truck}}{T} + \frac{DE}{S} \right) \frac{\delta RdRd\phi}{P_{truck} \cdot days} t_{rest} \quad (4.3.21.)$$

Με την ολοκλήρωση της τελευταίας σχέσης από 0 έως 2π και από 0 έως R υπολογίζεται το κόστος συλλογής βιομάζας στο ζητούμενο σημείο, το οποίο τελικά δίνεται από τη σχέση :

$$Cost^{total} = \frac{2w_f \delta}{P_{truck} u \cdot days} \left(\frac{Capital^{truck}}{T} + \frac{DE}{S} + F_p F_c u \cdot days \right) \int_0^{2\pi} \int_0^R \sqrt{R^4 + R^2 R_o^2 + 2R^3 R_o \cos(\phi)} dRd\phi + \left(\frac{Capital^{truck}}{T} + \frac{DE}{S} \right) \frac{t_{rest} \delta \pi R^2}{P_{truck} \cdot days} \quad (4.3.22)$$

4.3.4. Αποτελέσματα οικονομικής ανάλυσης κόστους μεταφοράς

Κόστος μεταφοράς σε ενιαία απόσταση

Στη συνέχεια γίνεται αριθμητική εφαρμογή του μοντέλου μεταφοράς για chips ξύλου, μίσχανθο και βιοέλαιο και παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Ο λόγος που επιλέχθηκαν τα chips ξύλου και μίσχανθος είναι η μεγάλη διαφορά της πυκνότητάς τους, η οποία τα καθιστά αντιπροσωπευτικά είδη βιομάζας υψηλής (πχ ξυλώδους) και χαμηλής πυκνότητας (πχ αχυρώδης), και δίνουν έτσι τη δυνατότητα να εξετασθεί η επίδραση αυτής της παραμέτρου στην οικονομικότητα.

Μέγεθος (ανά φορτηγό)	Τιμή
Κόστος Κεφαλαίου [52]	110000€ (chips ξύλου-βιοέλαιο),
Κόστος Φορτηγού Capital ^{truck} [52]	100000€ (μίσχανθος)
Επιτόκιο i	7%
Χρόνος ζωής οχήματος [52]	6 έτη (chips ξύλου- βιοέλαιο), 7 έτη (μίσχανθος)
Κόστη Λειτουργίας και Συντήρησης	
Σταθερά [52]	
Συντήρηση/Επισκευές	15% TCI (chips ξύλου-βιοέλαιο) 19.5% TCI (μίσχανθος)
Ασφάλιση Φόροι	6% TCI (chips ξύλου-βιοέλαιο) 5.7% TCI (μίσχανθος)
Σύνολο MIT	21% TCI (chips ξύλου-βιοέλαιο) 25.2% TCI (μίσχανθος)
Μισθός οδηγού DE	30000 €
Μεταβλητά	
Τιμή καυσίμου F_p [49]	1.5 €/L
Κατανάλωση καυσίμου F_c [52]	0.41 L/km (chips ξύλου-βιοέλαιο), 0.40 L/km (μίσχανθος)

Πίνακας 4.3.1. Μεγέθη οικονομικής ανάλυσης κόστους μεταφοράς [49], [52]

Μεγέθη και παράμετροι μεταφοράς

Επιλογή φορτηγών και t_{rest}

Οι χρόνοι που δίνονται στον παρακάτω πίνακα υπολογίστηκαν από το [50]. Οι παραδοχές που έγιναν έχουν ως εξής

- Λόγω της υψηλής πυκνότητας των κομματιών ξύλου (220 kg/m^3), περιοριστικός παράγοντας για τη μεταφορά τους είναι το μέγιστο επιτρεπόμενο μικτό βάρος

του φορτηγού. Επιλέγονται φορτηγά μικτού βάρους 44 τόνων και καθαρού 29 τόνων [50]. Ο χρόνος φόρτωσης για αυτό το καθαρό βάρος είναι γύρω στα 30 λεπτά με τη χρήση εμπρόσθιου φορτωτή, ενώ χρειάζονται 10 επιπλέον λεπτά για την κάλυψη του φορτίου ώστε να αποφευχθεί διαρροή σκόνης. Η εκφόρτωση είναι συντομότερη και διαρκεί 10 λεπτά, ενώ άλλα τόσα λεπτά απαιτούνται για τη ζήγηση του φορτηγού.

- Ο μίσχανθος, ο οποίος είναι αντιπροσωπευτικός για είδη βιομάζας χαμηλότερης πυκνότητας ($140-170 \text{ kg/m}^3$) υπόκειται σε περιορισμούς λόγω όγκου κατά τη μεταφορά του. Για μέγιστο όγκο μεταφοράς 150 m^3 υπολογίζεται πως απαιτούνται φορτηγά μικτού βάρους 33 τόνων και καθαρού βάρους 20 τόνων [50]. Ο χρόνος φόρτωσης είναι 36 λεπτά, ενώ θεωρούνται επιπλέον 10 λεπτά για την κάλυψη του φορτίου. Η εκφόρτωση γίνεται αυτοματοποιημένα και διαρκεί 18 λεπτά, ενώ 12 λεπτά απαιτούνται ακόμα για τη ζύγιση του φορτηγού.
- Το βιοέλαιο έχει πολύ υψηλή πυκνότητα (1200 kg/m^3) και λόγω της υγρής του μορφής η μεταφορά του γίνεται με φορτηγά αντίστοιχα αυτών με τα οποία γίνεται η μεταφορά κομματιών ξύλου. Ο χρόνος φόρτωσης/άντλησης του βιοελαίου υπολογίζεται από την εξίσωση Hagen Poiseuille για τα νευτώνια ρευστά σύμφωνα με την οποία η παροχή τους μέσα από σωληνώσεις είναι ίση με :

$$Flow = \frac{\pi Pr^4}{8\eta l} \quad (4.3.23.)$$

όπου P είναι η πίεση, r η ακτίνα του σωλήνα, η η συνεκτικότητα και l το μήκος του σωλήνα. Με

βάση τη σχέση αυτή και για τυπικές τιμές διαστάσεων σωληνώσεως υπολογίζεται πως απαιτούνται 0,536 λεπτά ανά τόνο φόρτωσης του βιοελαίου και άλλα τόσα για την εκφόρτωσή του, που ισοδυναμούν με συνολικό χρόνο φόρτωσης και εκφόρτωσης 21,43 λεπτά για φορτίο 40 τόνων. Επιπλέον 15 λεπτά απαιτούνται για τη σύνδεση σωληνών και 10 λεπτά για τη ζύγιση [50].

Ταχύτητα u

Η ταχύτητα κάθε φορτηγού κατ'αρχήν εξαρτάται από περιορισμούς του κώδικα οδικής κυκλοφορίας. Σε εθνικές οδούς της Ευρώπης, η μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα για τα φορτηγά λαμβάνεται ίση με 80 km/h [54]. Στην περίπτωση που η βιομάζα διακινείται σε αγροτικούς ή επαρχιατικούς δρόμους, οι οδικές υποδομές δεν επιτρέπουν στην πράξη την υπέρβαση κάποιου ορίου ταχύτητας. Για αυτό το λόγο τα φορτηγά θεωρείται πως κινούνται με μέση ταχύτητα των 30 km/h. Στην παρούσα εφαρμογή χρησιμοποιείται μια μέση τιμή ταχύτητας, 50 km/h.

Ανώτερη θερμογόνος ικανότητα HHV

Η ανώτερη θερμογόνος ικανότητα ξηρής βάσης για chips ξύλου, μίσχανθο και βιοέλαιο βρίσκεται από τη βιβλιογραφία. Για τα chips ξύλου επιλέγεται η τιμή των 18400 MJ/tn και για το μίσχανθο 17600 MJ/tn [32]. Για το βιοέλαιο υποτίθεται μια τυπική τιμή της θερμογόνου του ικανότητας, 17000 MJ/tn [18].

Υγρασία

Το ποσοστό υγρασίας για τα chips ξύλου και το μίσχανθο βρίσκεται από τη βιβλιογραφία (30% και 15% αντίστοιχα [32]). Για το βιοέλαιο υποτίθεται μια τυπική τιμή υγρασίας 25% [18]

Ποσότητα μεταφερόμενης βιομάζας

Η ποσότητα της μεταφερόμενης βιομάζας επιλέγεται ίση με 100000 τόνους ετησίως.

Συντελεστής οδικής τύλιξης wf

Η τιμή που επιλέγεται για το συντελεστή οδικής τύλιξης είναι $\sqrt{2}$. Αυτή η τιμή βασίζεται στην παραδοχή πως η πραγματική απόσταση που διανύεται μεταξύ του σημείου προέλευσης της βιομάζας και του τελικού προορισμού σε ένα πλέγμα οδικού δικτύου βρίσκεται κατά μήκος δύο πλευρών ενός ισοσκελούς τριγώνου [40].

Εργατοώρες ανά έτος

Θεωρούνται ημερήσιες βάρδιες των 8 ωρών, και οι μέρες παράδοσης βιομάζας λαμβάνονται ίσες με 230 ανά έτος [50]. Ο αριθμός αυτός προκύπτει από την αφαίρεση των σαββατοκύριακων (96 μέρες ανά έτος), των αργιών (1 ημέρα ανά μήνα-12 ημέρες ανά έτος), 15 ημερών άδειας των οδηγών, και 12 ακόμα ημερών όπου δε γίνεται παράδοση για άλλους λόγους (κακές καιρικές συνθήκες, απεργίες κλπ).

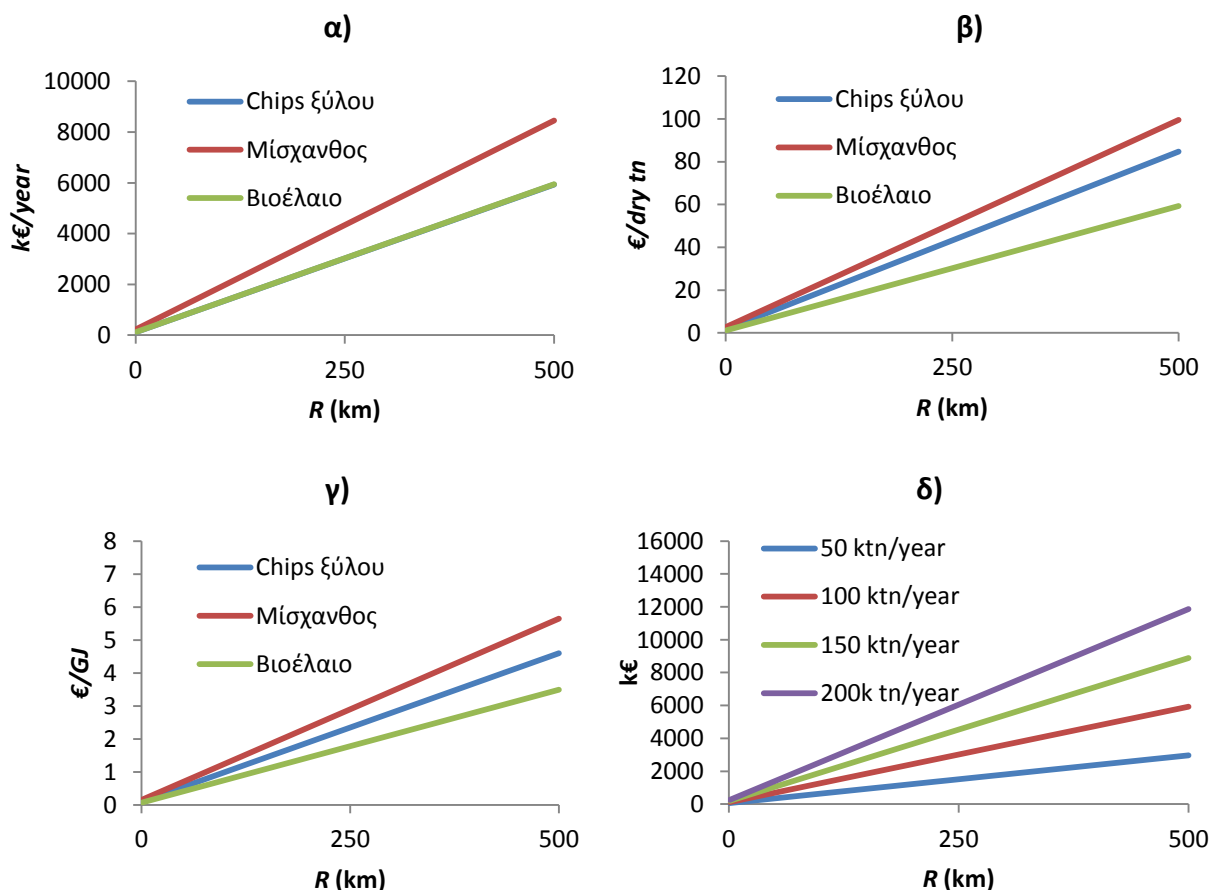
Χρόνος ημερήσιας χρήσης φορτηγού

Ο χρόνος αυτός θεωρείται ίσος με 16 ώρες ημερησίως, και ισοδυναμεί με την διάρκεια της ημέρας όπου επιτελούνται παραδόσεις.

Στον επόμενο πίνακα συνοψίζονται οι τιμές όλων των παραμέτρων μεταφοράς για chips ξύλου, μίσχανθο και βιοέλαιο.

Μέγεθος	Chips ξύλου	Μίσχανθος	Βιοέλαιο
Χρόνος Μεταφοράς [50]	<u>Λεπτά</u>	<u>Λεπτά</u>	<u>Λεπτά</u>
Φόρτωση	10	46	15,53
Κάλυψη φορτίου/προετοιμασία	10	10	15
Εκφόρτωση	10	18	15,53
Ζύγιση	10	12	10
Νεκρός χρόνος	10	10	10
Σύνολο t_{rest}	70 λεπτά	96 λεπτά	66 λεπτά
Χωρητικότητα φορτηγού P_{truck} [52]	29 τόνοι	20 τόνοι	29 τόνοι
Ταχύτητα u	50 km/h	50 km/h	50 km/h
Θερμογόνος ικανότητα HHV [18], [32]	18400 MJ/tn (db)	17600 MJ/tn (db)	17000MJ/tn (ar)
Υγρασία [18], [32]	30%	15%	25%
Ποσότητα βιομάζας και βιοελαίου	100000 tn	100000 tn	100000 tn
Συντελεστής οδικής τύλιξης w_f [40]	1.414	1.414	1.414
Ημέρες εργασίας ανά έτος $days$ [50]	230 μέρες	230 μέρες	230 μέρες
Ημερήσια βάρδια οδηγού S	8 ώρες	8 ώρες	8 ώρες
Ημερήσιος χρόνος χρήσης φορτηγού T	16 ώρες	16 ώρες	16 ώρες

Πίνακας 4.3.2. Μεγέθη και παράμετροι μεταφοράς για chips ξύλου, μίσχανθο και βιοέλαιο [50]



Σχήμα 4.3.5. Υπολογισμός του κόστους μεταφοράς για chips ξύλου, μίσχανθο και βιοέλαιο συναρτήσει της απόστασης μεταφοράς R α) Συνολικό κόστος κ€ β) Ειδικό κόστος ανά μονάδα μάζας €/tn γ) Ειδικό κόστος ανά μονάδα ενέργειας €/GJ δ) διακύμανση συνολικού κόστους για chips ξύλου και για διάφορες ποσότητες ετήσιας μεταφερόμενης βιομάζας Bio=100,000 wet tn/year

Το κόστος μεταφοράς για το μίσχανθο είναι υψηλότερο απ'ότι για το βιοέλαιο και για τα chips ξύλου. Αυτό οφείλεται στην χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα του μίσχανθου, που θέτει περιορισμό στο μέγιστο φορτίο που διακινείται ανά δρομολόγιο. Τα μικρότερα μεταφορικά κόστη του βιοελαίου οφείλονται επίσης στο μικρότερο χρόνο φόρτωσης και εκφόρτωσής του καθώς και στη μεγαλύτερη ενεργειακή του πυκνότητα. Για μεγάλες αποστάσεις μεταφοράς, είναι δυνατή η εξοικονόμηση περίπου 1-2 €/GJ με τη μεταφορά του βιοελαίου έναντι της βιομάζας. Σε μικρότερες αποστάσεις τα οφέλη είναι πολύ μικρότερα. Από το διάγραμμα δ) είναι φανερό η αύξηση του συνολικού κόστους μεταφοράς με αύξηση της μεταφερόμενης ποσότητας βιομάζας. Το ειδικό κόστος μεταφοράς, ωστόσο, μένει σταθερό.

Μεταφορά βιοελαίου μέσω αγωγού

Ο Rootakham [55] υπολογίζει το κόστος μεταφοράς βιοελαίου με την χρήση αγωγού. Η ανάλυση βασίζεται στον υπολογισμό του κόστους κατασκευής του σταθμού εισαγωγής και εξαγωγής του αντλούμενου βιοελαίου και το σχετικό εξοπλισμό τους (αντλίες, βαλβίδες, δεξαμενές) καθώς και του κόστους για την κατασκευή κτηριακών υποδομών

και οδικής πρόσβασης. Επιπλέον, στην ανάλυση περιέχεται το κόστος κατασκευής του αγωγού, η εγκατάστασή του, το κόστος συντήρησης και λειτουργίας του και το κόστος μόνωσης. Για τη μεταφορά του βιοελαίου σε μεγαλύτερες αποστάσεις, είναι απαραίτητη η εγκατάσταση σταθμών ενίσχυσης (booster stations) της ροής, προκειμένου να υπερνικηθούν οι απώλειες τριβής που οφείλονται στην υψηλή συνεκτικότητά του. Ο κάθε σταθμός ενίσχυσης περιλαμβάνει κόστη κατασκευής κτηρίων, οδικής πρόσβασης, ηλεκτρολογικής διασύνδεσης, καθώς και κόστη εξοπλισμού όπως αντλίες. Τελικά, για κάθε τιμή τροφοδοσίας βιοελαίου, προκύπτει μία εξίσωση που συνδέει το ειδικό κόστος μεταφοράς του με την απόσταση. Το ειδικό κόστος της μεταφοράς του βιοελαίου με αγωγό εξαρτάται από τη διακινούμενη παροχή, σε αντίθεση με το αντίστοιχο κόστος μεταφοράς με φορτηγό, το οποίο είναι ανεξάρτητο της διακινούμενης ποσότητας. Το συνολικό ειδικό κόστος δίνεται από τη σχέση :

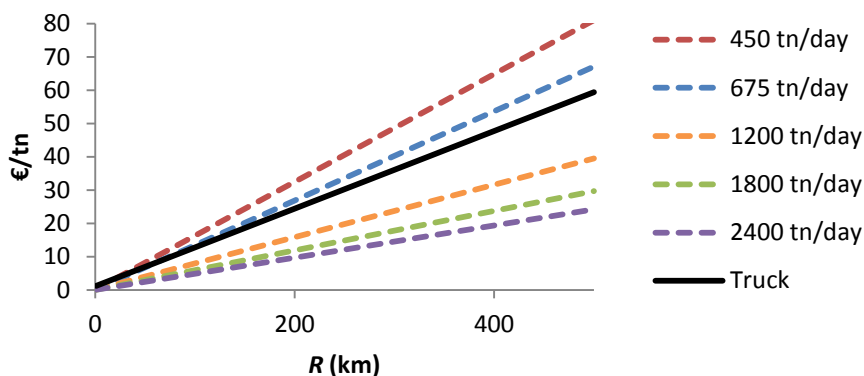
$$SpCost^{pipeline} = FC + VC \cdot R \quad \text{€/tn} \quad (4.3.24.)$$

όπου FC ο συντελεστής σταθερού κόστους και VC ο συντελεστής μεταβλητού κόστους μεταφοράς. Οι δύο συντελεστές για διάφορες τιμές παροχής βιοελαίου δίνονται στον ακόλουθο πίνακα

Παροχή βιοελαίου (tn/day)	Συντελεστής σταθερού κόστους μεταφοράς (€/tn)	Συντελεστής μεταβλητού κόστους μεταφοράς (€/tnm ³)
450	0.05829	0.16192
675	0.04724	0.13411
1200	0.03250	0.07884
1800	0.02781	0.05930
2400	0.02290	0.04835

Πίνακας 4.3.3 Συντελεστές κόστους μεταφοράς με αγωγό [55]

Στο επόμενο διάγραμμα συγκρίνονται τα κόστη με το ειδικό κόστος μεταφοράς βιοελαίου με φορτηγό



Σχήμα 4.3.6. Σύγκριση ειδικού κόστους μεταφοράς βιοελαίου €/tn με φορτηγό και αγωγό για διάφορες ημερήσιες παροχές, συναρτήσει της απόστασης μεταφοράς R(km)

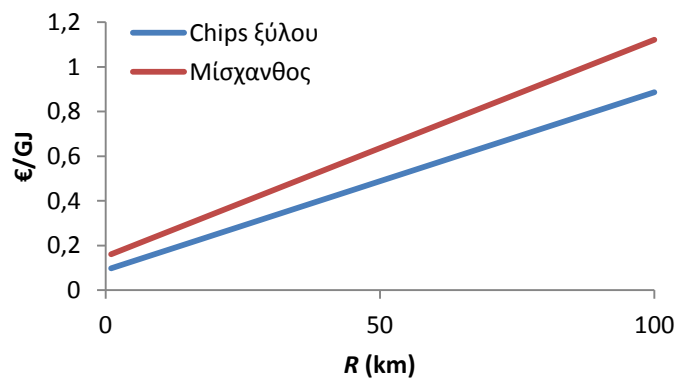
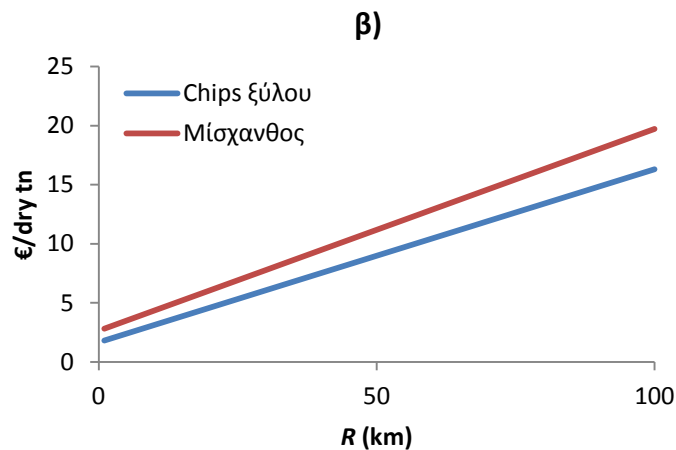
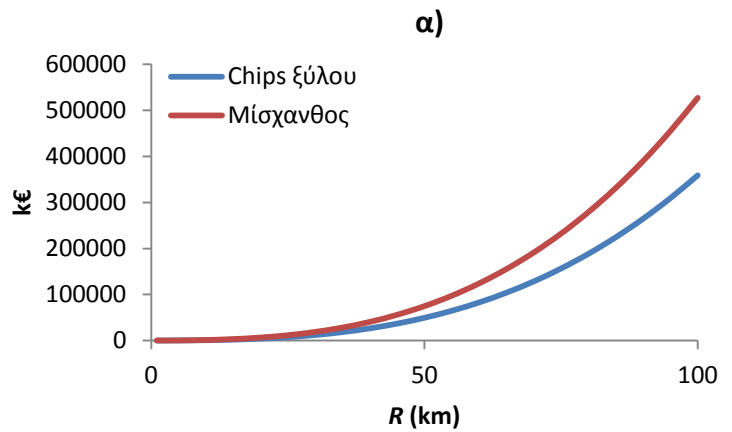
Το ειδικό κόστος μεταφοράς μέσω αγωγού μειώνεται με αύξηση της παροχής. Για παροχές μικρότερες 700-800 tn/day είναι υψηλότερο από το αντίστοιχο κόστος μεταφοράς με φορτηγό.

Κόστος συλλογής βιομάζας

Ακολουθώς γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων για τον υπολογισμό του κόστους συλλογής βιομάζας στο κέντρο κύκλου από την κυκλική επιφάνεια ακτίνας R . Οι τιμές που δίνονται στις διάφορες μεταβλητές είναι ίδιες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση κόστους μεταφοράς σε ενιαία απόσταση. Η τιμή της πυκνότητας δ επιλέχθηκε ίση με 10 dry tn/ha, και η τιμή της ταχύτητας είναι 30 km/h, καθώς θεωρείται μεταφορά σε επαρχιακούς, αγροτικούς δρόμους που δεν επιτρέπουν ανάπτυξη υψηλών ταχυτήτων.

Από τα παρακάτω διαγράμματα μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα :

- Το συνολικό κόστος συλλογής βιομάζας συσχετίζεται κυβικά με την ακτίνα της επιφάνειας συλλογής.
- Τα ειδικά κόστη συλλογής βιομάζας αυξάνονται γραμμικά με την ακτίνα της επιφάνειας συλλογής.
- Το κόστος συλλογής μίσχανθου είναι υψηλότερα, χωρίς όμως μεγάλη διαφορά από τα αντίστοιχα κόστη για τα chips ξύλου.
- Λαμβάνοντας υπόψιν συνήθεις τιμές αγοράς βιομάζας που κυμαίνονται μεταξύ 30 και 100 €/tn, βλέπουμε πως για αποστάσεις συλλογής άνω των 100 km το μέρος της τελικής τιμής αγοράς της βιομάζας που οφείλεται στη μεταφορά της γίνεται πολύ υψηλό.



Σχήμα 4.3.7. Υπολογισμός του κόστους συλλογής για chips ξύλου και μίσχανθο συναρτήσει της ακτίνας της κυκλικής επιφάνειας συλλογής R α) Συνολικό κόστος k€ β) Ειδικό κόστος ανά μονάδα μάζας €/ dry tn γ) Ειδικό κόστος ανά μονάδα ενέργειας €/GJ $\delta=10$ dry tn/ha

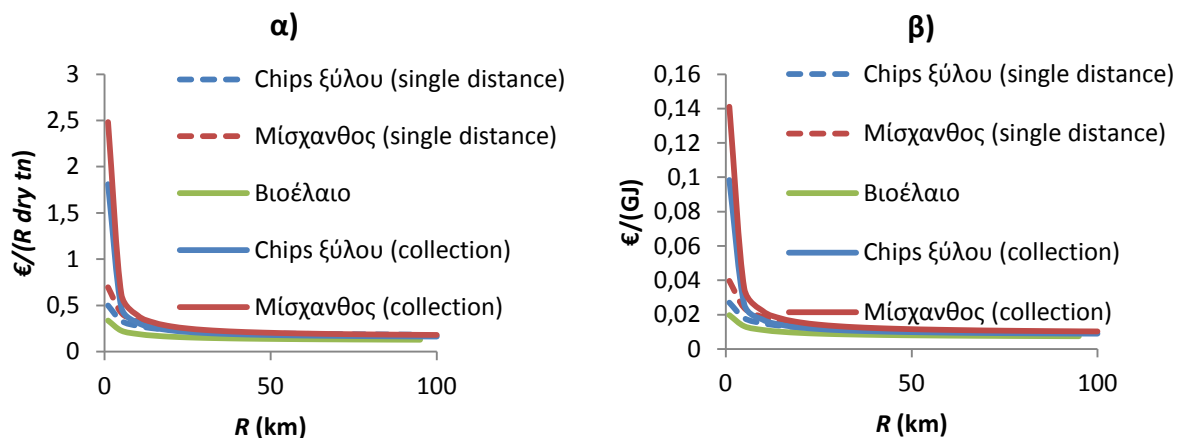
Στα επόμενα διαγράμματα δίνεται η σύγκριση του κόστους μεταφοράς και συλλογής σε $\text{€}/(\text{dry tn } R)$ και $\text{€}/(\text{GJ } R)$ για chips ξύλου και μίσχανθου, σε σχέση με το αντίστοιχο κόστος για τη μεταφορά βιοελαίου. Οι τιμές αυτές δείχνουν την κλίση της ευθείας του ειδικού κόστους ανά dry tn και GJ αντίστοιχα με αύξηση της ακτίνας R. Ο ρυθμός αύξησης του κόστους αυτού είναι πολύ υψηλός για μικρές ακτίνες, ενώ σε μεγαλύτερες η τιμή του τείνει να σταθεροποιηθεί στην τιμή

$$\frac{2w_f}{P_{truck}u \cdot days} \left(\frac{Capital^{truck}}{T} + \frac{DE}{S} + F_p F_c u \cdot days \right) \text{ για την περίπτωση της μεταφοράς}$$

και στην τιμή

$$\frac{4w_f}{3P_{truck}u \cdot days} \left(\frac{Capital^{truck}}{T} + \frac{DE}{S} + F_p F_c u \cdot days \right) \text{ για την περίπτωση της συλλογής βιομάζας.}$$

Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι για πολύ μικρές ακτίνες συλλογής και μεταφοράς (κάτω των 10 km) το ειδικό κόστος μειώνεται με ταχύτατο ρυθμό με αύξηση της ακτίνας, ενώ από τα 40 km κι έπειτα η αύξησή του είναι σχεδόν γραμμική με περαιτέρω αύξηση της ακτίνας R. Όπως αναμενόταν, το κόστος είναι υψηλότερο για τη συλλογή βιομάζας απ'ότι για τη μεταφορά της, ενώ είναι αυξημένο όταν το μεταφερόμενο είδος είναι μίσχανθος. Το βιοέλαιο παρουσιάζει το μικρότερο ειδικό κόστος, καθώς έχει την υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα, ενώ η μετακίνησή του γίνεται με φορτηγά μέγιστης χωρητικότητας (29 tn), επιτρέποντας έτσι περιορισμό των απαιτούμενων δρομολογιών. Η τελική τιμή στην οποία συγκλίνει ο ρυθμός αύξησης του ειδικού κόστους με την ακτίνα κυμαίνεται μεταξύ 0.2 και 0.4 € (R dry tn)⁻¹.



Σχήμα 4.3.8. Ειδικό κόστος ανά μονάδα προϊόντος και ακτίνα μεταφοράς/συλλογής α) €/R dry tn GJ και β) €/R GJ drytn για για chips ξύλου και μίσχανθος, σε σχέση με το αντίστοιχο κόστος για τη μεταφορά βιοελαίου

4.3.5. Υπολογισμός κόστους συλλογής βιομάζας για τη μονάδα ταχείας πυρόλυσης

Η ετησίως αναγκαία ποσότητα βιομάζας για την λειτουργία της μονάδας καθορίζεται από δύο παράγοντες. Ο ένας είναι ο συντελεστής διαθεσιμότητας της μονάδας capacity factor C_f που καθορίζει τις ετήσιες ώρες λειτουργίας της. Ο άλλος παράγοντας είναι η παροχή του αντιδραστήρα ταχείας πυρόλυσης Q σε τόνους βιομάζας ανά ώρα. Η παροχή Q αναφέρεται σε ξηραμένη βιομάζα με χαμηλά ποσοστά υγρασίας M% που κυμαίνονται

γύρω στο 8%. Δεδομένου ότι η αρχική συλλεγόμενη βιομάζα έχει ποσοστό υγρασίας $m\%$, προκύπτει ότι η ετησίως απαιτούμενη παροχή υγρής βιομάζας είναι ίση με :

$$Bio_{wet} = 8760QC_f \frac{100 - M\%}{100 - m\%}$$

(4.3.25)

όπου

$$Bio_{dry} = 8760QC_f$$

(4.3.26)

Η ποσότητα ξηρής βιομάζας που συλλέγεται από την καλλιεργούμενη επιφάνεια δίνεται από τη σχέση

$$Bio_{dry} = \pi R^2 \delta$$

(4.3.27)

όπου δ η επιφανειακή πυκνότητα ξηρής βιομάζας (dry tn/ha)

Επομένως για δεδομένα δ , Q και C_f , η απαραίτητη ακτίνα συλλογής R δίνεται από την εξίσωση :

$$R = \sqrt{\frac{8760QC_f}{\pi\delta}}$$

(4.3.28)

και το ποσό απαιτούμενης υγρής βιομάζας που θα συλλεχθεί και θα μεταφερθεί είναι ίσο με :

$$Bio_{wet} = 8760QC_f \frac{100 - M\%}{100 - m\%}$$

(4.3.29)

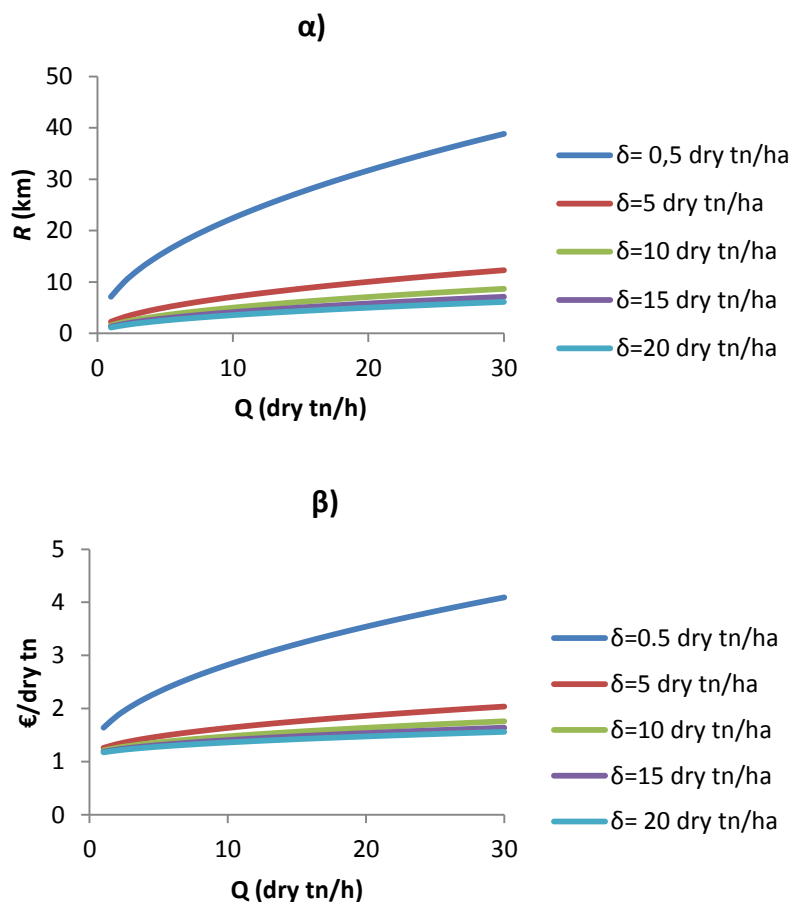
Με γνωστή την τιμή της προς συλλογή βιομάζας και την ακτίνα της κυκλικής επιφάνειας συλλογής είναι δυνατή η εφαρμογή της μεθόδου που αναπτύχθηκε στην προηγούμενη παράγραφο για τον υπολογισμό του κόστους συλλογής της στη μονάδα πυρόλυσης. Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνεται η μεταβολή του συνολικού και ειδικού ανά τόνο κόστους μεταφοράς της βιομάζας για διάφορες τροφοδοσίες της μονάδας ταχείας πυρόλυσης, και για διάφορες τιμές της επιφανειακής πυκνότητας δ .

Από διαγράμματα φαίνεται πως το κόστος συλλογής βιομάζας αυξάνεται σχεδόν γραμμικά με την τροφοδοσία της μονάδας ταχείας πυρόλυσης. Το ειδικό κόστος επίσης αυξάνεται, αλλά με μικρότερο ρυθμό, όπως και η απαιτούμενη ακτίνα συλλογής. Και τα τρία μεγέθη μειώνονται με αύξηση της επιφανειακής πυκνότητας, όπως και αναμένεται.

Για πολύ μικρές τιμές του δ , τόσο τα κόστη που προκύπτουν είναι κατά πολύ υψηλότερα και σχεδόν διπλασιάζονται για μεγαλύτερες μονάδες. Κατ'επέκταση, σημαντική μείωση του κόστους μεταφοράς της βιομάζας μπορεί να επιτευχθεί μόνο με κατάλληλη χωροθέτηση της μονάδας, σε περιοχές ενεργειακών καλλιεργειών αφού η

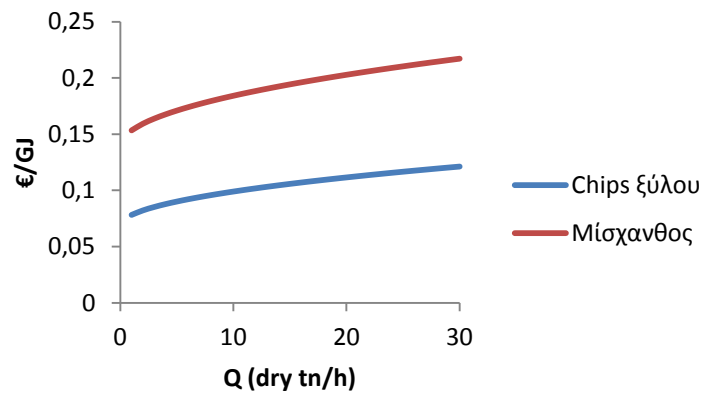
τροφοδοσία από πηγές χαμηλής επιφανειακής πυκνότητας όπως τα αγροτικά κατάλοιπα, είναι ασύμφορη οικονομικά.

Τέλος, είναι φανερό πως η σημαντική αύξηση της ακτίνας συλλογής για πολύ μικρές τιμές του δ έχει σαν αποτέλεσμα πρόσθετες τεχνικές δυσκολίες κατά τη μεταφορά. Αυτές οφείλονται στην εκ των πραγμάτων δυσκολία διατήρησης της τροφοδοσίας βιομάζας σε μεγάλες εκτάσεις, όπου μπορεί να υπάρχουν οικισμοί, φυσικά εμπόδια όπως βουνά, και ανταγωνιστικές χρήσεις της γης έναντι των καλλιεργειών. Σε αυτές τις δυσκολίες προστίθεται και η προσβασιμότητα και καταλληλότητα του ειδικού δικτύου, το οποίο μπορεί ανά περιοχές να διακόπτεται ή να μην ενδείκνυται για διέλευση μεγάλων φορτηγών.



Σχήμα 4.3.9. α) Ακτίνα κυκλικής επιφάνειας συλλογής R(km) και β) ειδικό κόστος συλλογής βιομάζας €/tn συναρτήσει της τροφοδοσίας της μονάδας ταχείας πυρόλυσης Q (dry tn/h) για chips ξύλου

Το ειδικό κόστος συλλογής βιομάζας για $\delta=10$ dtn/ha για chips ξύλου και μίσχανθος φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα. Το ειδικό κόστος συλλογής του μίσχανθου είναι περίπου 50% υψηλότερο από το αντίστοιχο των chips ξύλου, λόγω της χαμηλότερης πυκνότητάς του που εισάγει περιορισμούς στην μεταφορά του.



Σχήμα 4.3.10. Σύγκριση ειδικού κόστους συλλογής βιομάζας (€/GJ) συναρτήσει της τροφοδοσίας της μονάδας Q (dry tn/h) για chips ξύλου και μίσχανθο $\delta=10$ dry tn/ha

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

5.1. Παράμετροι οικονομικής ανάλυσης

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται το κόστος παραγωγής βιοελαίου για μονάδα ταχείας πυρόλυσης. Θεωρείται μονάδα στο κέντρο κυκλικής επιφάνειας ακτίνας R και ομοιογενούς επιφανειακής πυκνότητας βιομάζας δ .

Μέγεθος/τροφοδοσία μονάδας

Η ανάλυση γίνεται για διάφορα μεγέθη μονάδας Q , από 1 έως και 80 dry tn/h. Πρέπει να σημειωθεί πως η ακρίβεια των προσεγγίσεων που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του TCI είναι αμφίβολη για μεγέθη μονάδας άνω των 20 dry tn/h, γι' αυτό και οι υπολογισμοί για μεγαλύτερες τιμές τροφοδοσίας είναι ενδεικτικού χαρακτήρα και στόχο έχουν να αντικατοπτρίσουν την τάση μείωσης του ειδικού κόστους επένδυσης. Η τιμή για το βασικό σενάριο είναι ίση με 20 dry tn/h, η οποία είναι προς το παρόν η μέγιστη τιμή υφιστάμενων εμπορικών μονάδων.

Επιφανειακή πυκνότητα βιομάζας δ και ακτίνα συλλογής

Η επιφανειακή πυκνότητα της βιομάζας λαμβάνει τιμές από 0.5 έως και 20 dry tn/ha. Οι τιμές αυτές καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα πηγών βιομάζας από αγροτικά υπολείμματα έως ενεργειακές καλλιέργειες ξυλώδους και ποώδους βιομάζας. Κατ' αυτό τον τρόπο μελετάται επαρκώς η επίδραση του δ στο κόστος παραγωγής και μεταφοράς. Για κάθε τιμή τροφοδοσίας και για κάθε τιμή του δ υπολογίζεται η απαιτούμενη ακτίνα της κυκλικής επιφάνειας συλλογής. Για το βασικό σενάριο επιλέγεται η ενδιάμεση τιμή των 10 dry tn/ha.

Θερμογόνος ικανότητα και υγρασία βιομάζας και βιοελαίου

Η θερμογόνος ικανότητα της βιομάζας επηρεάζει την τιμή της ενέργειας της διεργασίας. Στην παρούσα ανάλυση λαμβάνεται ίση με τη θερμογόνο ικανότητα των chips ξύλου λεύκας 18400 MJ/tn db, τιμή η οποία είναι τυπική για ξυλώδη είδη. Η υγρασία της αρχικής βιομάζας αυξάνει το κόστος μεταφοράς του καυσίμου αλλά και την τελική ποσότητα υγρασίας του παραγόμενου βιοελαίου. Για chips ξύλου είναι ίση με 30%, ενώ για ποώδη είδη (πχ μίσχανθος) ίση με 15%. Στην ανάλυση που ακολουθεί θεωρείται υγρασία ίση με αυτή των chips ξύλου. Η τελική υγρασία της βιομάζας αναφέρεται στο περιεχόμενο της υγρασίας της αφού ξηρανθεί στη μονάδα ταχείας πυρόλυσης. Μαζί με την αρχική υγρασία επηρεάζει την ποσότητα της ως έχει βιομάζα που θα πρέπει να

μεταφερθεί στη μονάδα για δεδομένη τροφοδοσία αποξηραμένης βιομάζας. Στις εφαρμογές ταχείας πυρόλυσης τυπική τιμή που λαμβάνει είναι 8%. Καθοριστικής σημασίας παράμετρος για την οικονομικότητα της επένδυσης αποτελεί η θερμογόνος δύναμη του βιοελαίου. Αυτή εξαρτάται από τη σύσταση του βιοελαίου και συνεπώς από τη σύσταση της αρχικής βιομάζας. Στην παρούσα ανάλυση γίνεται εκτίμηση της επίδρασής της για τιμές 17000 και 19000 MJ/tn, οι οποίες είναι τυπικές σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [18], [22].

Απόδοση παραγωγής βιοελαίου

Η απόδοση του παραγόμενου βιοελαίου για συνθήκες ταχείας πυρόλυσης εξαρτάται από το είδος του αντιδραστήρα καθώς και από τις ιδιότητες της αρχικής βιομάζας (σύσταση, υγρασία, τέφρα). Σε αντιδραστήρες ρευστοποιημένης κλίνης και για είδη ξυλώδους βιομάζας συνήθως ξεπερνά το 70% w/w ενώ για τα ποώδη είδη είναι ελαφρώς χαμηλότερη, γύρω στο 65% w/w. Στην παρούσα ανάλυση εξετάζεται η επίδρασή της στην οικονομικότητα μέσω ανάλυσης ευαισθησίας για τιμές 65, 70 και 75%, ανεξαρτήτως από τους υπόλοιπους παράγοντες που την επηρεάζουν. Η τιμή του βασικού σεναρίου είναι 75%.

Τιμή αγοράς βιομάζας

Η τιμή αγοράς βιομάζας αναφέρεται στο κόστος απόκτησής της εξαιρουμένου του κόστους μεταφοράς της στη μονάδα, το οποίο υπολογίζεται ξεχωριστά. Η τιμή αυτή εξαρτάται από πλήθος παραγόντων οι οποίοι παρουσιάστηκαν στο 3^ο Κεφάλαιο και ποικίλλει σημαντικά ανάλογα με το είδος και τις πηγές της βιομάζας που χρησιμοποιείται. Στην παρούσα ανάλυση η επίδρασή της εξετάζεται για ένα μεγάλο εύρος τιμών, για 30, 60 και 90 €/dry tn. Για το βασικό σενάριο χρησιμοποιείται η ενδιάμεση τιμή των 60 €/dry tn.

Παράμετροι λειτουργίας και οικονομικής αξιολόγησης της μονάδας

Η διαθεσιμότητα της μονάδας C_f θεωρείται ίση με 90%, η οποία είναι συνήθης για μονάδες ταχείας πυρόλυσης [56]. Θεωρείται 24ωρη λειτουργία της μονάδας και βάρδιες εργαζομένων των 8 ωρών. Ο χρόνος ζωής της μονάδας επιλέγεται ίσος με 25 έτη και το επιτόκιο 7%. Το TCI και τα ετήσια κόστη συντήρησης και λειτουργίας υπολογίζονται με τις μεθοδολογίες που παρουσιάστηκαν στο 4^ο Κεφάλαιο. Η τιμή αγοράς ενέργειας λαμβάνεται ίση με 0.08 €/kWh.

Στον επόμενο πίνακα συνοψίζονται όλες οι παραδοχές για τις τιμές των παραμέτρων λειτουργίας, των χαρακτηριστικών της βιομάζας και του βιοελαίου. Οι τιμές του βασικού σεναρίου είναι σε έντονη γραφή (bold).

<u>Μέγεθος</u>	<u>Τιμή</u>
<u>Λειτουργία μονάδας</u>	
Μέγεθος	1 έως 80 dry tn/h (βασικό σενάριο 20 dry tn/h)
C _f	90%
Ώρες λειτουργίας ανά ημέρα	24 h
Ώρες βάρδιας εργαζομένων	8 h
% w/w απόδοση παραγωγής βιοελαίου από ξηρή βιομάζα	65, 70, 75%
<u>Χαρακτηριστικά βιομάζας</u>	
Είδος βιομάζας	Chips ξύλου
Ανώτερη Θερμογόνος ικανότητα	18400 MJ/tn (db)
Τιμή αγοράς βιομάζας	30, 60 (βασικό σενάριο), 90 €/ dry tn
Αρχική υγρασία βιομάζας	30%
Τελική υγρασία βιομάζας	8%
Επιφανειακή πυκνότητα δ	0.5, 10 (βασικό σενάριο), 20 dry tn/ha
<u>Χαρακτηριστικά βιοελαίου</u>	
Ανώτερη Θερμογόνος ικανότητα	17000 MJ/tn , 19000 MJ/tn (ar)
<u>Οικονομικά μεγέθη μονάδας</u>	
TCI	(Δύο προσεγγίσεις βλ. Προηγούμενο κεφάλαιο)
Κόστος εξοπλισμού	30% του TCI
<u>Κόστη λειτουργίας και συντήρησης</u>	
Κόστος εργασίας	Βλ. Κεφάλαιο 4
Πρόσθετα έξοδα παραγωγής	60 % του κόστους εργασίας
Ασφάλιση και φορολογία	1.5% του TCI
Κόστος συντήρησης	2% του εξοπλισμού
Κατανάλωση ενέργειας	175 kWh/dry tn βιομάζας
Τιμή αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας	0.08 €/kWh
Κόστος μεταφοράς	Ακολουθείται η μεθοδολογία της παραγράφου 4.3.4.
Χρόνος ζωής έργου	25 έτη
Επιτόκιο	7%

Πίνακας 5.1.1. Παράμετροι οικονομικής ανάλυσης

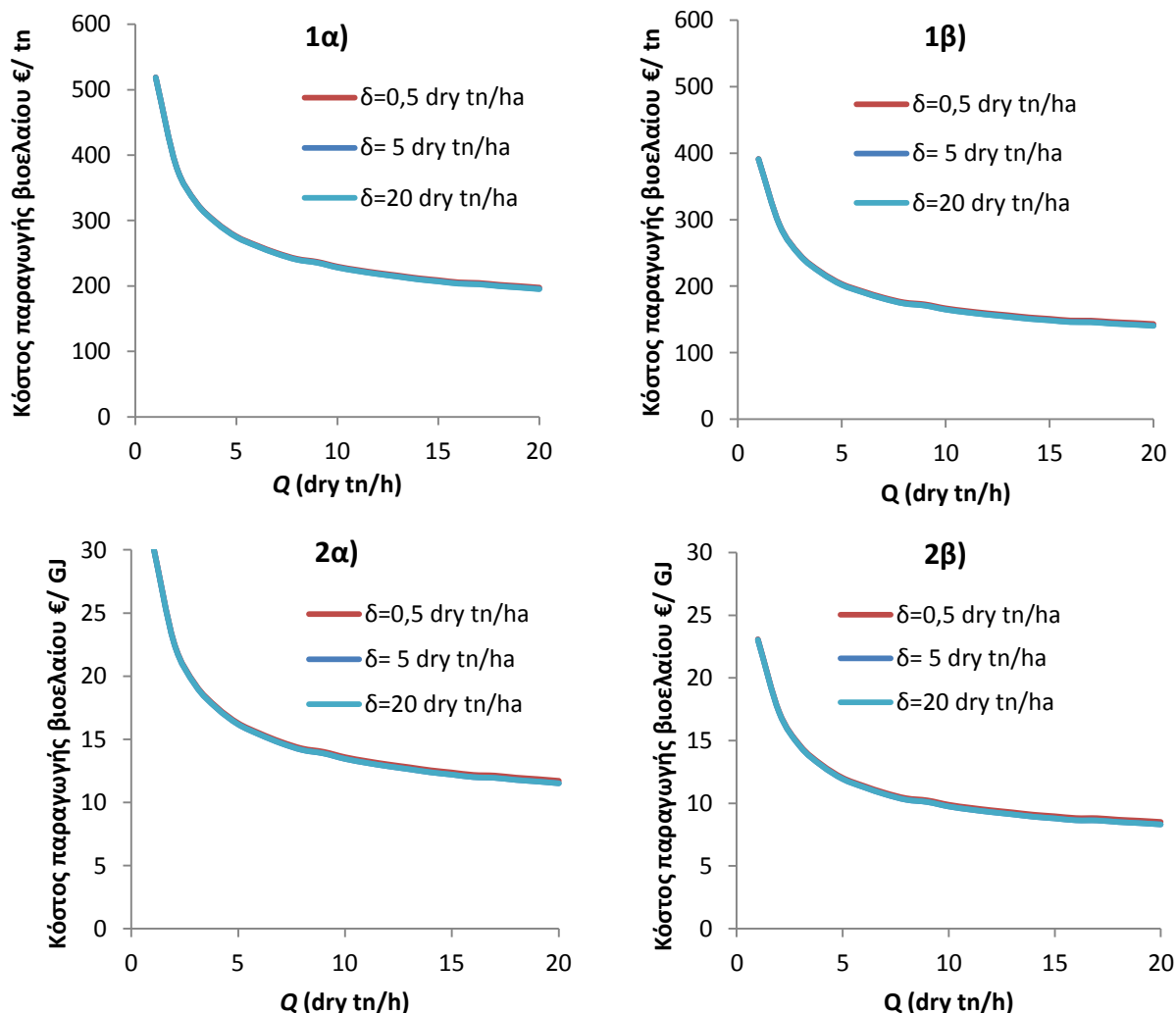
5.2. Παρουσίαση οικονομικών αποτελεσμάτων μονάδας ταχείας πυρόλυσης

Συνολικό κόστος παραγωγής βιοελαίου

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το κόστος παραγωγής βιοελαίου και η επίδραση που ασκούν σε αυτό οι διάφορες παράμετροι της ανάλυσης ευαισθησίας. Σε κάθε περίπτωση

όλες οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων είναι αυτές του βασικού σεναρίου. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για τις 2 εξισώσεις υπολογισμού του TCI, καθώς αυτές διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους.

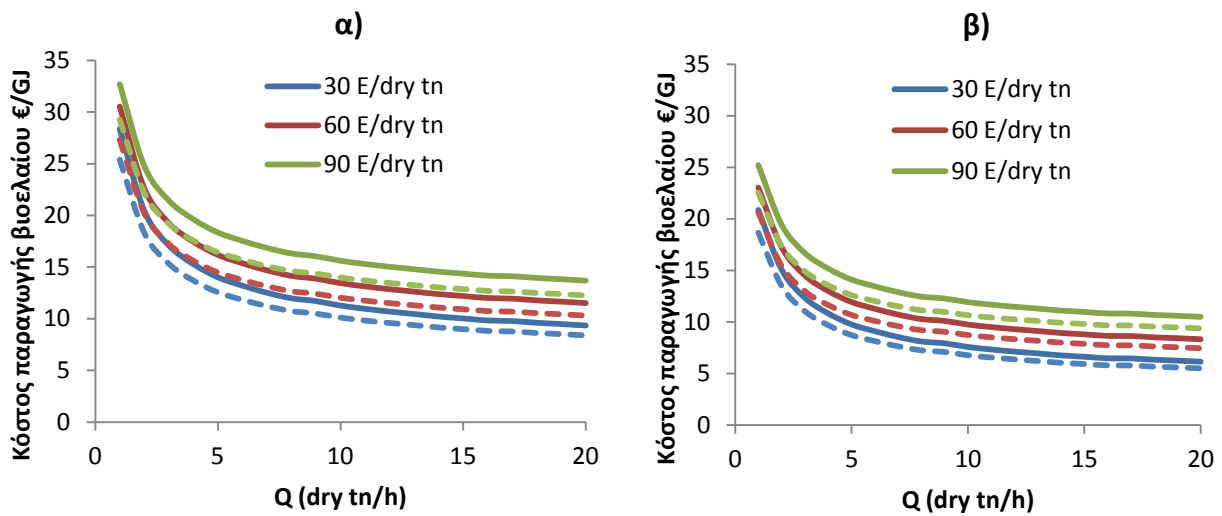
- Επίδραση της επιφανειακής πυκνότητας βιομάζας δ για διάφορες τιμές τροφοδοσίας μονάδας Q



Σχήμα 5.2.1. Κόστος παραγωγής βιοελαίου για διάφορες τιμές του δ **1)** ανά μονάδα μάζας (€/dry tn) και **2)** ανά μονάδα ενέργειας (€/GJ) συναρτήσει της τροφοδοσίας της μονάδας (dry tn/h) και για διάφορες τιμές επιφανειακής πυκνότητας της βιομάζας δ για chips ξύλου **α)** εξίσωση Bridgwater **β)** εξίσωση Rogers&Brammer, τιμή αγοράς βιομάζας 60€/dry tn, απόδοση παραγωγής βιοελαίου 75%, HHV βιοελαίου 17000 MJ/tn

Όπως είναι φανερό από τα παραπάνω διαγράμματα, η επίδραση της επιφανειακής πυκνότητας της βιομάζας στο κόστος παραγωγής του βιοελαίου είναι αμελητέα, καθώς για ένα εύρος τιμών της που κυμαίνεται από 0.5 έως και 20 dry tn/ha το συνολικό κόστος μεταβάλλεται ανεπαίσθητα. Επιπλέον, το ειδικό κόστος παραγωγής βιοελαίου είναι πολύ υψηλό για μικρές μονάδες μέχρι 5 dry tn/h ενώ μειώνεται σταδιακά για μεγαλύτερες, τείνοντας να σταθεροποιηθεί για μονάδες άνω των 20 dry tn/h.

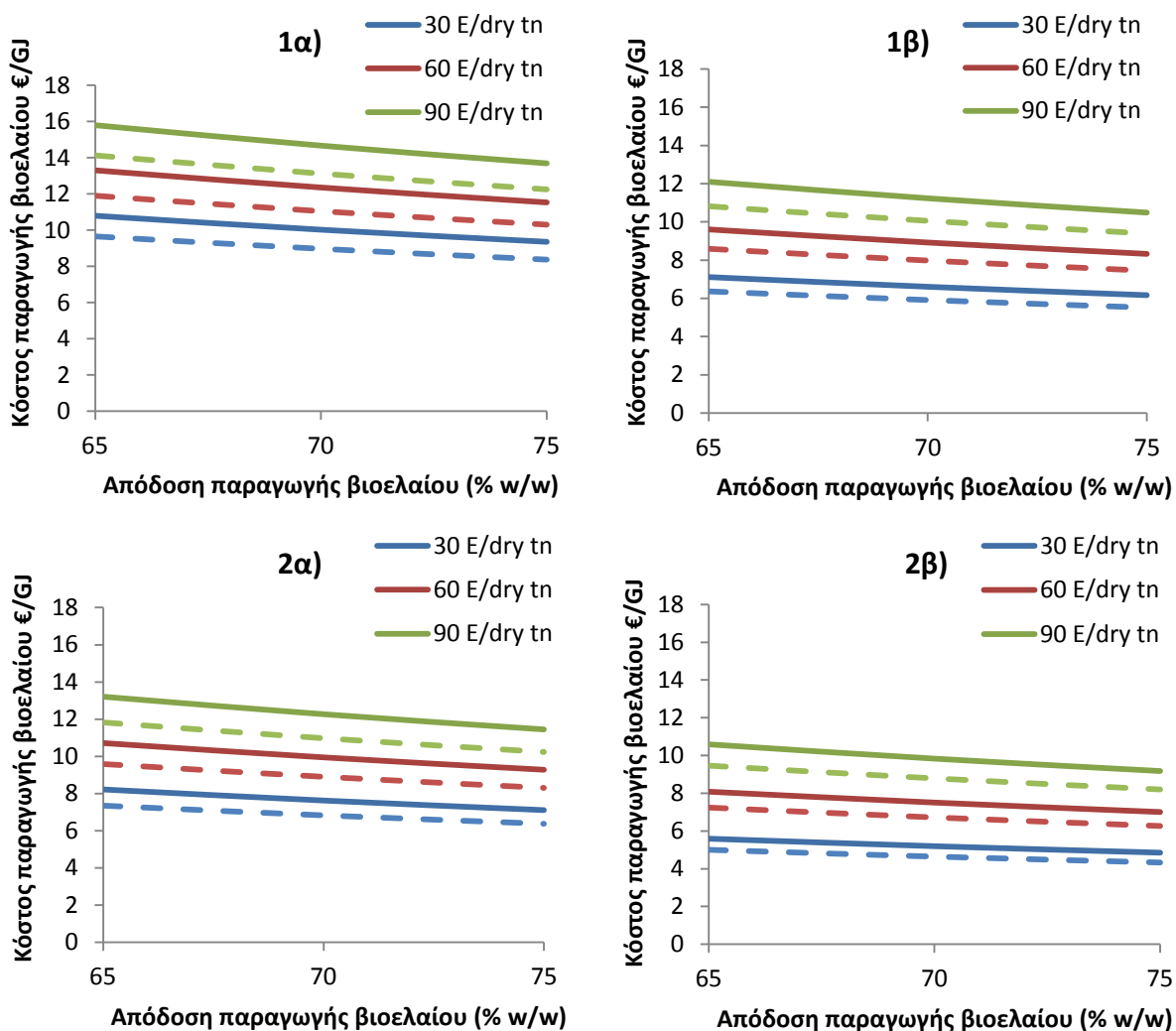
- Επίδραση της τιμής αγοράς βιομάζας και της θερμογόνου ικανότητας του παραγόμενου βιοελαίου για διάφορες τιμές τροφοδοσίας Q της μονάδας



Σχήμα 5.2.2. Κόστος παραγωγής βιοελαίου (€/GJ) για διάφορες τιμές αγοράς βιομάζας και θερμογόνου ικανότητας παραγόμενου βιοελαίου **α)** εξίσωση Bridgwater **β)** εξίσωση Rogers&Brammer, απόδοση παραγωγής βιοελαίου 75% **συνεχής γραμμή** : HHV βιοελαίου **17000 MJ/tn**, **διακεκομμένη γραμμή** : HHV βιοελαίου **19000 MJ/tn**, $\delta=10$ dry tn/ha

Η επίδραση της τιμής αγοράς βιομάζας στο κόστος παραγωγής βιοελαίου είναι καθοριστικής σημασίας ειδικότερα για μεγαλύτερες μονάδες. Αύξομείωσή της κατά 50% οδηγεί σε μεταβολή του κόστους παραγωγής κατά περίπου 20%. Ιδιαίτερα σημαντική είναι και η επίδραση της θερμογόνου ικανότητας του παραγόμενου βιοελαίου, η οποία μεταβάλλει το κόστος παραγωγής κατά περίπου 1 €/GJ.

- Συνδυασμένη επίδραση της τιμής αγοράς βιομάζας, της θερμογόνου ικανότητας του βιοελαίου και της απόδοσης παραγωγής του για το βασικό σενάριο λειτουργίας



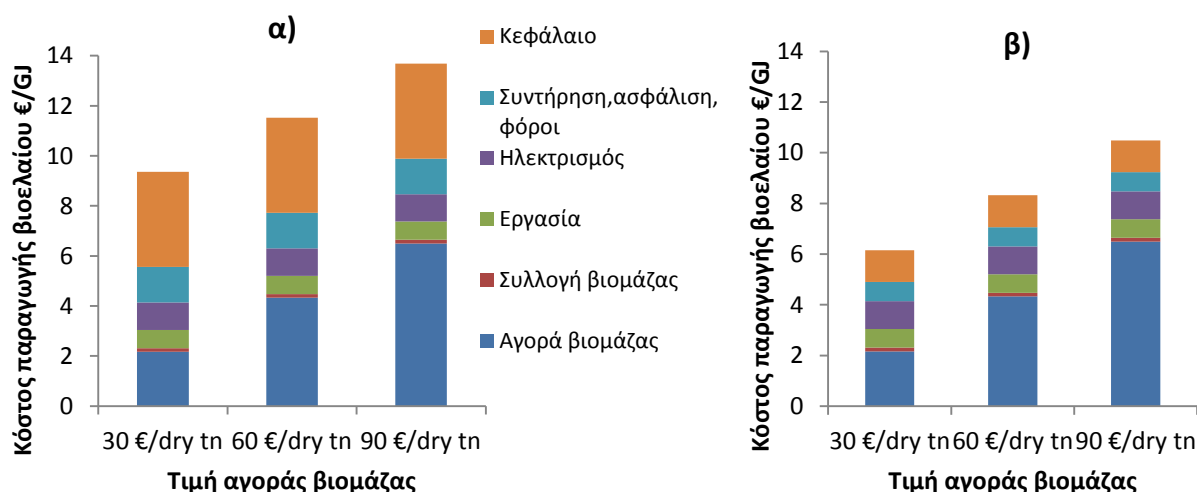
Σχήμα 5.2.3. Κόστος παραγωγής βιοελαίου για διάφορες τιμές αγοράς βιομάζας (€/dry tn) και αναλογίες μετατροπής βιοελαίου (% w/w). α) εξίσωση Bridgwater β) εξίσωση Rogers&Brammer **συνεχής γραμμή** : HHV βιοελαίου 17000 MJ/tn, **διακεκομμένη γραμμή** : HHV βιοελαίου 19000 MJ/tn, δ= 10 dry tn/ha, 1) Q=20 dry tn/h 2) Q=40 dry tn/h

Όπως φαίνεται και στα παραπάνω διαγράμματα, το τελικό εύρος του κόστους παραγωγής του βιοελαίου κυμαίνεται, ανάλογα με τις τιμές των βασικών παραμέτρων, μεταξύ 13±3 €/GJ (εξίσωση Bridgwater) και 9±3 €/GJ (εξίσωση Rogers&Brammer), για μονάδες 20 dry tn/h. Η παράμετρος με την κυρίαρχη επίδραση στο κόστος παραγωγής είναι η τιμή αγοράς της βιομάζας. Επίσης σημαντική είναι και η επίδραση της θερμογόνου ικανότητας του βιοελαίου και της απόδοσης παραγωγής του, σε μικρότερο όμως βαθμό, για τα όρια που εξετάζονται.

Ανάλυση των συνιστωσών κόστους της μονάδας

Στα επόμενα διαγράμματα απεικονίζεται η κατανομή των διαφόρων συνιστωσών του κόστους παραγωγής και η μεταβολή τους κατά την μεταβολή της τιμής των παραμέτρων της ανάλυσης.

- Τιμή αγοράς βιομάζας



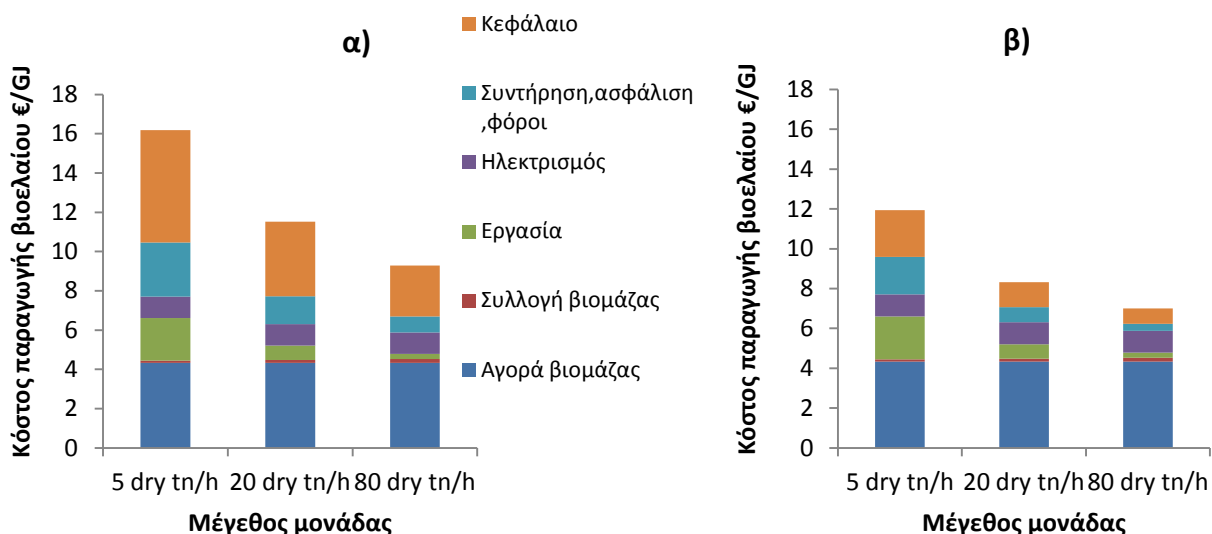
Σχήμα 5.2.4. Διακύμανση της κατανομής του ετήσιου ειδικού κόστους (€/GJ) στις διάφορες συνιστώσες του για 3 τιμές αγοράς βιομάζας α) εξίσωση Bridgwater β) εξίσωση Rogers&Brammer $\delta=10$ dry tn/ha, $Q=20$ dry tn/h, απόδοση παραγωγής βιοελαίου 75%, HHV βιοελαίου 17000 MJ/tn

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται πως μαζί με το κόστος κεφαλαίου, το κόστος αγοράς βιομάζας αποτελεί την κυριότερη συνιστώσα του ετήσιου κόστους και συνεισφέρει στην τελική τιμή του σημαντικά. Αυτό φαίνεται άλλωστε και από τα διαγράμματα των προηγούμενων σχημάτων. Αξίζει να σημειωθεί η μεγάλη απόκλιση που παρουσιάζουν οι χρησιμοποιηθείσες μεθοδολογίες για το κόστος κεφαλαίου. Το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας είναι επίσης αρκετά υψηλό, ενώ το κόστος συλλογής βιομάζας είναι με διαφορά η πιο μικρή συνιστώσα του κόστους παραγωγής.

- Τιμή τροφοδοσίας της μονάδας Q

Το ειδικό κόστος που αντιστοιχεί στο κόστος κεφαλαίου της επένδυσης αλλά και τα ειδικά λειτουργικά κόστη μειώνονται με αύξηση του μεγέθους της μονάδας, με συνακόλουθη μείωση και του συνολικού κόστους παραγωγής. Για μεγάλες μονάδες (80 dry tn/h) γίνεται μεγαλύτερη η επίδραση στο κόστος παραγωγής της τιμής αγοράς βιομάζας. Η συνολική μεταβολή του κόστους παραγωγής μεταξύ μονάδων 5 και 80 dry tn/h κυμαίνεται μεταξύ 40 και 70%, ανάλογα με την εξίσωση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του TCI.

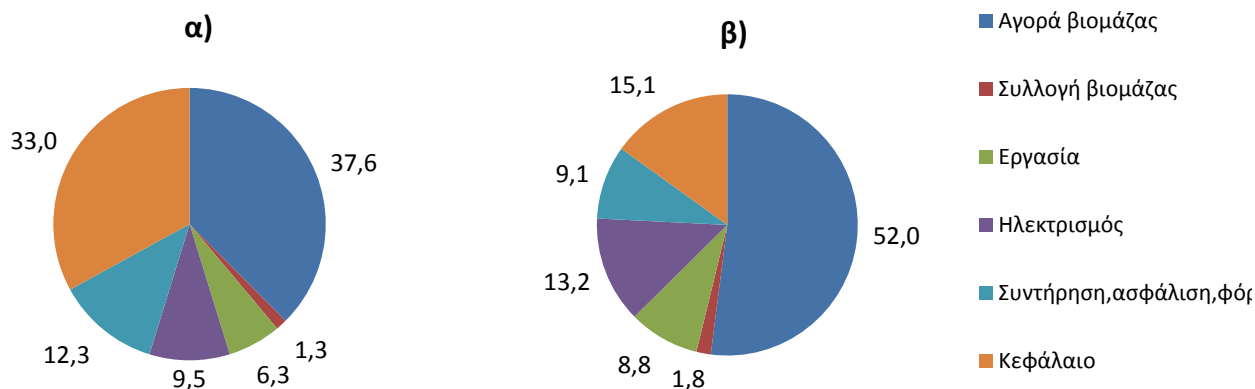
Πρέπει να σημειωθεί και πάλι πως είναι επισφαλής η χρήση των προσεγγίσεων εκτίμησης του TCI που χρησιμοποιούνται για μονάδες μεγαλύτερου μεγέθους των 20 dry tn/h, καθώς η ισχύς των εξισώσεών τους είναι αβέβαιη.



Σχήμα 5.2.5. Διακύμανση της κατανομής του ετήσιου ειδικού κόστους (€/GJ) στις διάφορες συνιστώσες του για 3 τιμές τροφοδοσίας της μονάδας α) εξίσωση Bridgwater β) εξίσωση Rogers&Brammer, τιμή αγοράς βιομάζας 60 €/dry tn, δ=10 dry tn/ha, απόδοση παραγωγής βιοελαίου 75%, HHV βιοελαίου 17000 MJ/tn

Από τα παραπάνω διαγράμματα είναι σαφές πως στην περίπτωση μεγαλύτερων μονάδων όπου το ειδικό κόστος κεφαλαίου, εργασίας και συντήρησης ελαχιστοποιούνται, είναι αναγκαία η μείωση της τιμής αγοράς βιομάζας για τη βελτίωση της οικονομικότητας της επένδυσης. Μεταξύ των μονάδων 20 και 80 dry tn/h, η μεταβολή του κόστους παραγωγής είναι αρκετά μικρή.

Η ποσοστιαία συνεισφορά κάθε συνιστώσας στο ετήσιο κόστος καθώς και η κατανομή του κόστους κεφαλαίου για το βασικό σενάριο λειτουργίας φαίνονται στα ακόλουθα διαγράμματα.



Σχήμα 5.2.6. Ποσοστιαία συνεισφορά κάθε συνιστώσας (%) στο ετήσιο κόστος α) εξίσωση Bridgwater β) εξίσωση Rogers&Brammer, τιμή αγοράς βιομάζας 60 €/dry tn, Q=20 dry tn/h, δ= 10 dry tn/ha, απόδοση παραγωγής βιοελαίου 75%, HHV βιοελαίου 17000 MJ/tn

Το κόστος μεταφοράς της συλλεγόμενης βιομάζας προς τη μονάδα είναι σε κάθε περίπτωση πολύ μικρό (γύρω στο 1-2%). Εκεί αποδίδεται και η μικρή επίδραση της μεταβολής του δ στο κόστος παραγωγής του βιοελαίου. Αρκετά υψηλό είναι το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας λόγω των καταναλώσεων της μονάδας (συμπίεση αερίων ανακυκλοφορίας, ξήρανση και άλεση βιομάζας). Η δυνατότητα μείωσης του κόστους αυτού με εγκατάσταση συστήματος παραγωγής ατμού και ηλεκτρικής ενέργειας από την καύση του εξανθρακώματος διερευνάται στη συνέχεια.

Στους επόμενους πίνακες δίνονται αναλυτικά οι τιμές των διαφόρων συνιστωσών του ετήσιου κόστους και του κόστους επένδυσης σύμφωνα με τις δύο διαφορετικές προσεγγίσεις εκτίμησης του TCI για το βασικό σενάριο λειτουργίας.

Οι δύο προσεγγίσεις υπολογίζουν το TCI με πολύ μεγάλη διαφορά. Σύμφωνα με την εξίσωση του Bridgwater, για τη βασική μονάδα των 20 dry tn/h το **Συνολικό Κόστος Επένδυσης** ανέρχεται στα **89.063.873€**, ενώ με τη μέθοδο των Rogers&Brammer μόλις στα **29.393.974€**. Το αντίστοιχο **κόστος παραγωγής βιοελαίου** υπολογίζεται ίσο με **11.52 και 8.32 €/GJ** αντίστοιχα.

Από την ανάλυση που προηγήθηκε γίνεται φανερό πως οι δύο παράμετροι με τη μεγαλύτερη επίδραση στο τελικό κόστος είναι το κόστος αγοράς βιομάζας και το κόστος κεφαλαίου. Για πολύ μικρές μονάδες κάτω των 5 dry tn/h το κόστος παραγωγής γίνεται πάρα πολύ υψηλό καθιστώντας απαγορευτικές δεδομένης της πολύ καλύτερης οικονομικότητας των μεγαλύτερων. Τα οφέλη οικονομίας κλίμακας σταθεροποιούνται σταδιακά για μονάδες μεγαλύτερες των 20 dry tn/h.

	TCI Bridgwater	TCI Rogers&Brammer
Ετήσιο κόστος	Τιμή (€)	Τιμή (€)
Αγορά βιομάζας	8.703.936	8.703.936
Συλλογή βιομάζας	297.552	297.552
Κόστος εργασίας	1.470.000	1.470.000
Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας	2.207.520	2.207.520
Συντήρηση, ασφάλιση και φορολογία	2.841.405	1.528.667
Κόστος κεφαλαίου	7.642.617	2.522.312
Σύνολο	23.163.031	16.729.988

Πίνακας 5.2.1. Ετήσιο κόστος λειτουργίας μονάδας, βασικό σενάριο

	TCI Bridgwater	TCI Rogers&Brammer
Κόστος επένδυσης	Τιμή (€)	Τιμή (€)
Άμεσο κεφάλαιο μονάδας	60.919.689	20.105.478
Εξοπλισμός σωληνώσεις και κτήρια	52.903.941	17.460.020
Κόστος αποθήκης	2.404.725	793.637
Κόστος γης	3.206.299	1.058.183
Ανάπτυξη και χωροθέτηση	2.404.725	793.637
Έμμεσο κεφάλαιο μονάδας	19.045.419	6.285.607
Κόστος μηχανολογικού σχεδιασμού κ επίβλεψης	4.873.575	1.608.438
Κόστος κατασκευής	6.091.969	2.010.548
Αμοιβή του ανάδοχου	3.206.299	1.058.183
Έκτακτα έξοδα	4.873.575	1.608.438
Συνολικό κόστος μονάδας	80.157.486	26.454.576
Κεφάλαιο εργασίας	8.906.387	2.939.397
Σύνολο	89.063.873	29.393.974

Πίνακας 5.2.2. Συνολικό Κεφάλαιο Επένδυσης, βασικό σενάριο

Για να καταστούν οι μονάδες ταχείας πυρόλυσης περισσότερο οικονομικές, θα πρέπει να μειωθεί σημαντικά το κόστος αγοράς βιομάζας και το κόστος κεφαλαίου της επένδυσης. Το κόστος βιομάζας, όπως περιγράφηκε και στο 3^ο Κεφάλαιο, εξαρτάται από τις εφοδιαστικές αλυσίδες μέσω των οποίων τροφοδοτείται στη μονάδα. Γι'αυτό το λόγο θα πρέπει στα πρώτα στάδια καλλιέργειας και συγκομιδής να μειωθούν τα σχετικά κόστη, με βελτιστοποίηση της παραγωγής. Άλλες μέθοδοι που μπορούν να οδηγήσουν στη μείωση του κόστους παραγωγής είναι η πώληση του παραγόμενου εξανθρακώματος και η καύση του (ή και μέρους του βιοελαίου) για την κάλυψη των ενεργειακών καταναλώσεων της μονάδας.

Στη συνέχεια εξετάζεται η δυνατότητα μείωσης του κόστους παραγωγής βιοελαίου με καύση του εξανθρακώματος και παραγωγή ατμού και ισχύος, προκειμένου να καλυφθούν οι ενεργειακές καταναλώσεις της μονάδας.

Ενσωμάτωση μονάδας παραγωγής ατμού και ηλεκτρικής ενέργειας

Για την εκμετάλλευση του θερμικού περιεχομένου του εξανθρακώματος θεωρείται η εγκατάσταση μονάδας παραγωγής ατμού και ηλεκτρικής ενέργειας (steam and power generation unit-SPGU). Η μονάδα αυτή περιλαμβάνει σύμφωνα με το [57] οικονομητήρα, λέβητα και ατμοστρόβιλο ισχύος 4.9 MW_e, ενώ υπολογίζεται πως μπορεί να παράγει 235 kWh_e/dry tn βιομάζας [19]. Επομένως είναι δυνατή η κάλυψη των ηλεκτρικών καταναλώσεων της μονάδας και η παραγωγή πλεονάσματος 60 kWh/dry tn βιομάζας, που μπορούν να πωληθούν στο δίκτυο με τιμή 0.07 €/ kWh. Το DPC_{base} βασικής μονάδας για τροφοδοσία βιομάζας Q_{base}= 500 dry tn/day υπολογίζεται από το [57] ίσο με 2612 κ€, ενώ ο παράγοντας κλίμακας (scale factor) είναι ίσος με 0.7. Για διάφορα άλλα μεγέθη μονάδας ταχείας πυρόλυσης Q ο υπολογισμός του αντίστοιχου DPC γίνεται από την εξίσωση :

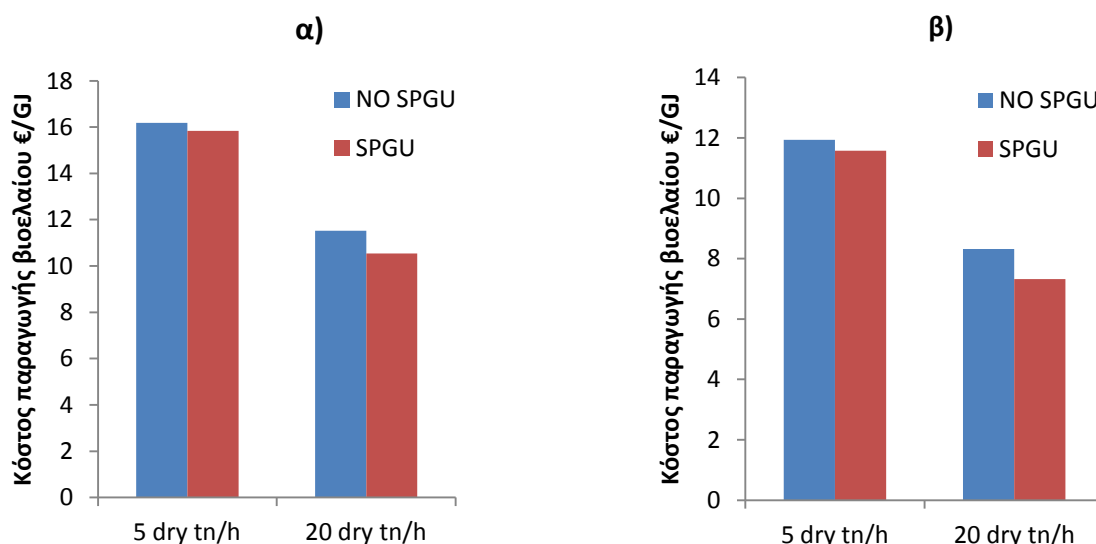
$$DPC(Q) = DPC_{base} \left(\frac{Q}{Q_{base}} \right)^{0.7} \quad (5.2.1.)$$

DPC_{base} [57]	2612 κ€
Q_{base}	500 dry tn/day
Scale factor [57]	0.7
Gross power [19]	235 kWh _{el} /dry tn
Net power to grid	60 kWh _{el} /dry
kWh_{el}	0.07 €/ kWh

Πίνακας 5.2.3. Χαρακτηριστικά συστήματος παραγωγής ατμού και ηλεκτρικής ενέργειας [19], [57]

Το σύστημα ανάκτησης θερμότητας και παραγωγής ατμού αποτελεί ένα επιπλέον βήμα επεξεργασίας για την εγκατάσταση και έτσι συνυπολογίζεται αύξηση του πλήθους των εργαζομένων για τους υπολογισμούς (+1 βήμα επεξεργασίας στην εξίσωση Wessel (4.2.7.)).

Στα επόμενα διαγράμματα φαίνεται η σύγκριση του κόστους παραγωγής βιοελαίου για το βασικό σενάριο χωρίς και με την εγκατάσταση συστήματος SPGU για μεγέθη μονάδας 5 και 20 dry tn/h.

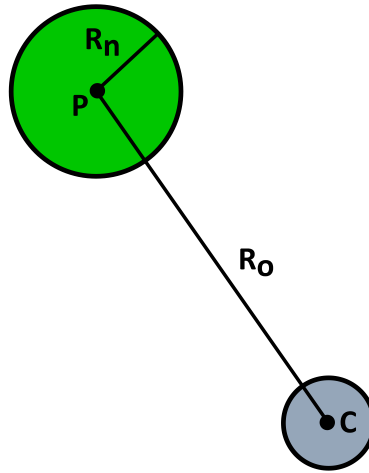


Σχήμα 5.2.7. Σύγκριση κόστους παραγωγής βιοελαίου βασικού σεναρίου χωρίς και με εγκατάσταση SPGU α) εξίσωση Bridgwater β) εξίσωση Rogers&Brammer, τιμή αγοράς βιομάζας 60 €/dry tn, $\delta=10$ dry tn/ha, HHV βιοελαίου 17000 MJ/tn

Η μείωση του κόστους του παραγόμενου βιοελαίου είναι υψηλότερη για μεγαλύτερες μονάδες και κυμαίνεται περίπου στο 1 €/GJ. Το ποσό αυτό είναι αρκετά σημαντικό, καθώς στο βασικό σενάριο αποτελεί περίπου το 8%-15% του κόστους παραγωγής, ανάλογα με την εξίσωση που χρησιμοποιείται για το TCI.

5.3. Δυνατότητες παραγωγής βιοελαίου για εξοικονόμηση κόστους μεταφοράς του καυσίμου

Στην παράγραφο αυτή εξετάζεται η δυνατότητα μείωσης του κόστους μεταφοράς του καυσίμου μιας κεντρικής μονάδας (πχ βιοδιυληστήριο) μέσω της μεταφοράς βιοελαίου από αποκεντρωμένες μονάδες ταχείας πυρόλυσης. Υπενθυμίζεται, όπως αναφέρθηκε και στο 3^ο Κεφάλαιο, πως στόχος της διερεύνησης της παρούσας εργασίας είναι ο υπολογισμός της τιμής της κρίσιμης ακτίνας R_o για την οποία η μετατροπή της βιομάζας της κυκλικής επιφάνειας ακτίνας R_n σε βιοέλαιο στη μονάδα ταχείας πυρόλυσης P και κατόπιν η μεταφορά βιοελαίου στην κεντρική μονάδα C έχει μικρότερο κόστος από την απευθείας μεταφορά της βιομάζας στην κεντρική μονάδα.



Σχήμα 5.3.1. Σχήμα σύγκρισης σεναρίων

Στην περίπτωση της απευθείας μεταφοράς βιομάζας, το τελικό κόστος απόκτησης ενέργειας ισούται με το άθροισμα του κόστους αγοράς της βιομάζας, συν το άθροισμα μεταφοράς της στο C από κάθε σημείο συλλογής της εντός της κυκλικής επιφάνειας A. Το κόστος μεταφοράς υπολογίστηκε στο 4^ο Κεφάλαιο και δίνεται από την εξίσωση :

$$Cost^{total} = \frac{2w_f \delta}{P_{truck} u \cdot days} \left(\frac{Capital^{truck}}{T} + \frac{DE}{S} + F_p F_c u \cdot days \right) \int_0^{2\pi} \int_0^R \sqrt{R^4 + R^2 R_o^2 + 2R^3 R_o \cos(\varphi)} dR d\varphi + \left(\frac{Capital^{truck}}{T} + \frac{DE}{S} \right) \frac{t_{rest} \delta \pi R^2}{P_{truck} days}$$

(4.3.16)

Στην περίπτωση της μετατροπής σε βιοέλαιο, το συνολικό κόστος δίνεται από το άθροισμα του κόστους παραγωγής βιοελαίου, και κατόπιν μεταφοράς του στην κεντρική μονάδα C από το σημείο P.

Λόγω του μικρότερου κόστους μεταφοράς του βιοελαίου έναντι της βιομάζας, υπάρχει μία οριακή τιμή της απόστασης R_o των σημείων P και C, για την οποία το τελικό κόστος απόκτησης ενέργειας μέσω του δεύτερου σεναρίου (μετατροπή βιομάζας και μεταφορά βιοελαίου) εξισώνεται με αυτό του πρώτου (απευθείας μεταφορά βιομάζας), καθώς η εξοικονόμηση κατά τη μεταφορά αντισταθμίζει το κόστος επένδυσης της μονάδας πυρόλυσης. Αυτό σημαίνει πως το ολικό κόστος μεταφοράς καυσίμου από την ευρύτερη έκταση τροφοδοσίας της κεντρικής μονάδας ελαχιστοποιείται στην περίπτωση που η βιομάζα εντός της οριακής ακτίνας R_{crit} μεταφέρεται απευθείας στην κεντρική μονάδα και η υπόλοιπη, εξωτερικά της R_{crit} , μετατρέπεται σε βιοέλαιο και το ενεργειακό της περιεχόμενο μεταφέρεται σε υγρή μορφή.

Οι βασικές παράμετροι που λαμβάνονται υπόψιν στην ανάλυση που ακολουθεί είναι η επιφανειακή πυκνότητα της βιομάζας δ καθώς και η ετήσια ποσότητά της και άρα η ακτίνα R_n της κυκλικής επιφάνειας συλλογής της. Για διάφορες τιμές αυτών των μεγεθών συγκρίνεται το συνολικό κόστος απόκτησης ενέργειας (€/GJ) για κάθε σενάριο, για τιμές της απόστασης R_o από 1 έως και 500 km. Ένας λόγος που η διερεύνηση περιορίζεται σε αυτό το εύρος αποστάσεων είναι ότι αποστάσεις μεγαλύτερες των 500 km δεν είναι ρεαλιστικές για εφαρμογές μεταφοράς βιομάζας (η διακίνησή της δεν είναι βιώσιμη και

από πρακτική άποψη). Επίσης, το μοντέλο εκτίμησης του κόστους μεταφοράς περιέχει παραδοχές (πχ δωρες βάρδιες οδηγών) οι οποίες για μεγαλύτερες αποστάσεις παύουν να ισχύουν. Η σύγκριση γίνεται για chips ξύλου και μίσχανθο. Τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται για το κάθε κάυσιμο είναι ίδια με αυτά που παρουσιάστηκαν στο 4^ο Κεφάλαιο. Το TCI της μονάδας ταχείας πυρόλυσης υπολογίζεται με την εξίσωση των Rogers&Brammer.

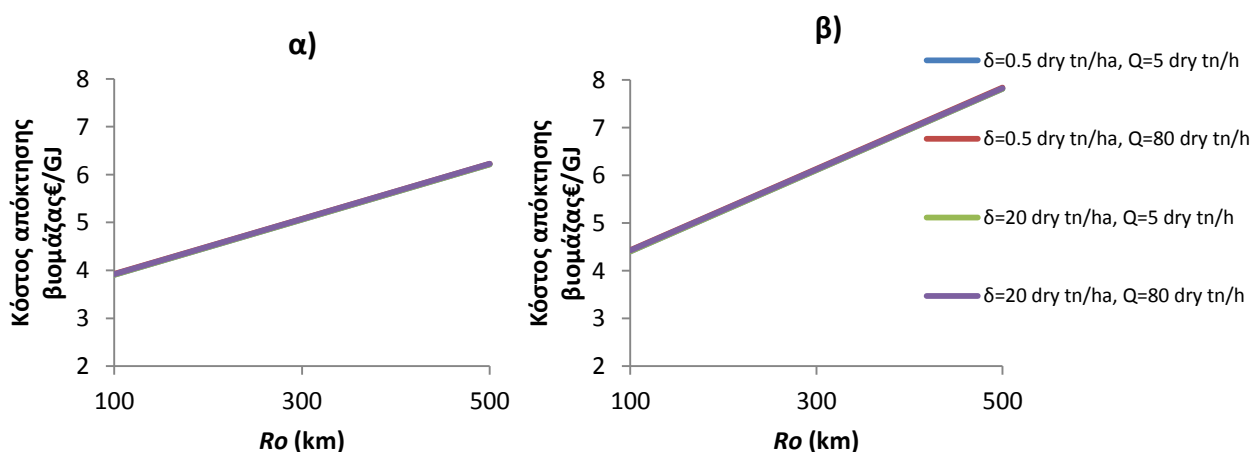
Η μέση ταχύτητα μεταφοράς βιοελαίου από το σημείο P στο σημείο C και βιομάζας από κάθε σημείο εντός της κυκλικής επιφάνειας στο C θεωρείται ίση με :

$$u = \frac{R_n}{R_o} u_1 + \frac{R_o - R_n}{R_o} u_2 \quad (5.2.1)$$

Όπου u_1 η ταχύτητα μεταφοράς στην κυκλική επιφάνεια ακτίνας R_n και u_2 η ταχύτητα μεταφοράς εκτός αυτής. Το κόστος αγοράς βιομάζας θεωρείται ίδιο και στις δύο υπό σύγκριση περιπτώσεις και λαμβάνεται ίσο με 60 €/GJ. Φυσικά, δεν επηρεάζει το αποτέλεσμα της σύγκρισης καθώς συμμετέχει και στα δύο σενάρια στον ίδιο βαθμό. Όλες οι άλλες παράμετροι μεταφοράς λαμβάνονται όπως παρουσιάστηκαν στο 4^ο Κεφάλαιο.

Μέγεθος	Τιμή
Τιμή αγοράς βιομάζας	με 60 €/dry tn
Ταχύτητα φορτηγών (μέση)	$u = \frac{R_n}{R_o} u_1 + \frac{R_o - R_n}{R_o} u_2$
u_1 :=επαρχιακοί δρόμοι, καλλιεργούμενες εκτάσεις	$u_1=30\text{km/h}$
u_2 :=κεντρικές οδικές αρτηρίες	$u_2=75\text{km/h}$
Κόστος παραγωγής βιοελαίου	Εξίσωση Rogers&Brammer

Πίνακας 5.3.1. Κύριες παράμετροι σύγκρισης σεναρίων

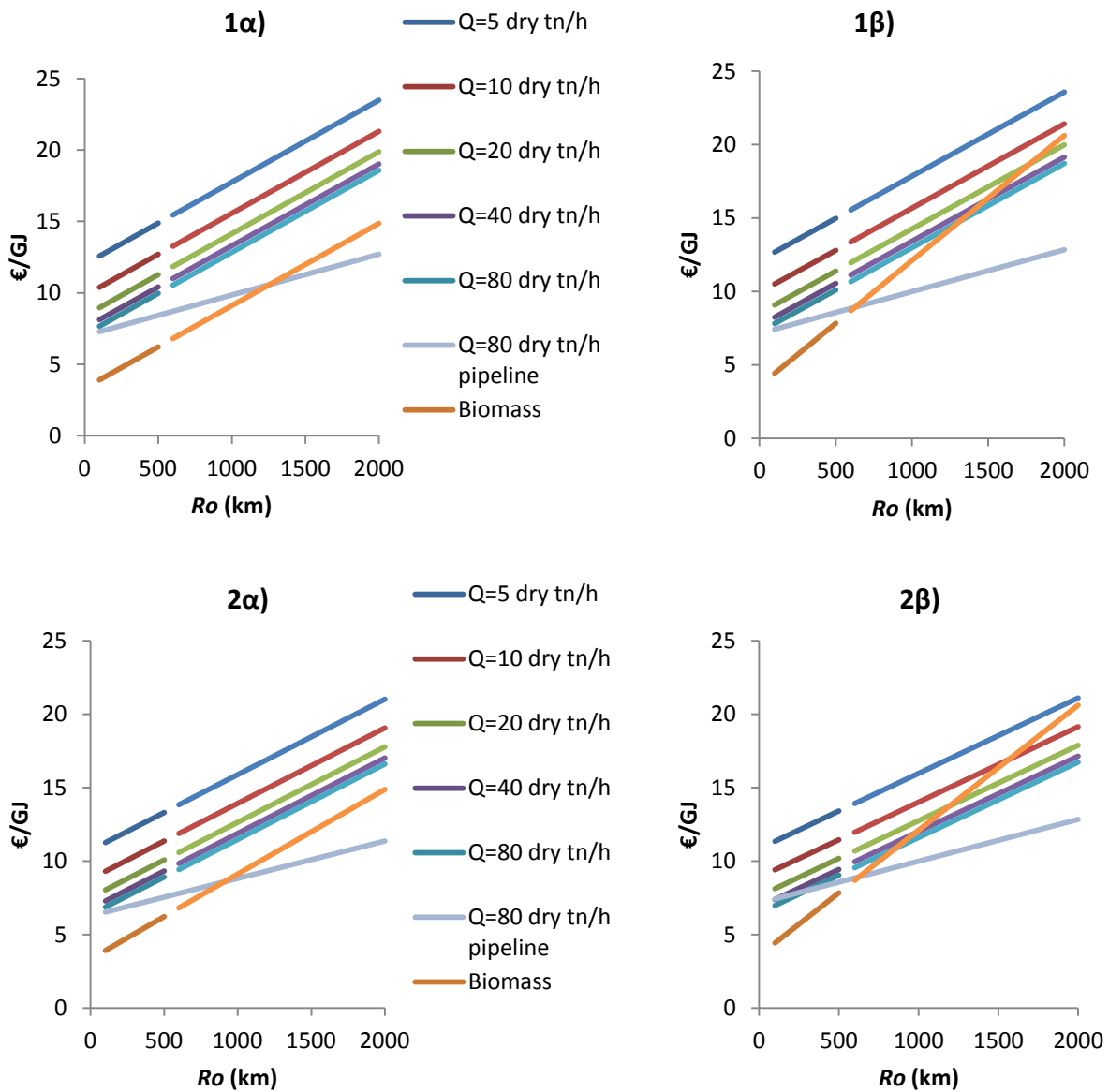


Σχήμα 5.3.2. Ειδικό κόστος απευθείας απόκτησης βιομάζας με απευθείας μεταφορά της στη μονάδα (€/GJ) α) για chips ξύλου και β) για μίσχανθο

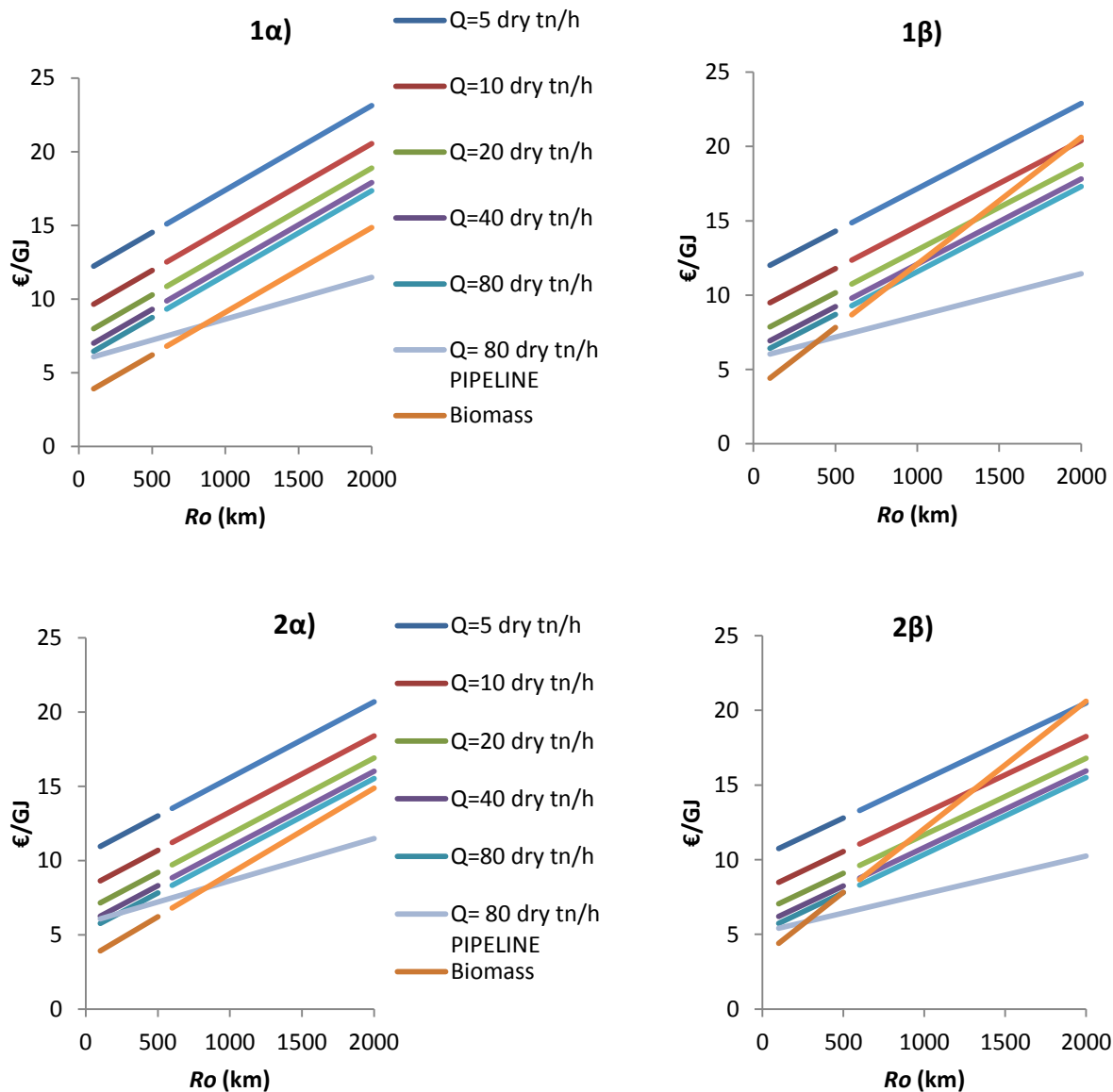
Στα παραπάνω διαγράμματα απεικονίζεται το ειδικό κόστος αγοράς και απευθείας μεταφοράς της βιομάζας από την κυκλική επιφάνεια ακτίνας R_n στην κεντρική μονάδα C. Είναι φανερό πως είναι υψηλότερο για μίσχανθο απ'ότι για chips ξύλου. Η επίδραση της ποσότητας της βιομάζας καθώς και της επιφανειακής πυκνότητας (και άρα της ακτίνας R_n) είναι αμελητέα. Επειδή η επίδραση του δ είναι αμελητέα και επάνω στο κόστος παραγωγής βιοελαίου, η τιμή που λαμβάνει στους ακόλουθους υπολογισμούς είναι σταθερή και ίση με 10 dry tn/ha. Για τους υπολογισμούς κόστους της απευθείας μεταφοράς βιομάζας, η τροφοδοσία της επιλέγεται ίση με 20 dry tn/h.

Στα επόμενα διαγράμματα δίνεται η σύγκριση του κόστους απόκτησης ενέργειας μεταξύ του σεναρίου απευθείας μεταφοράς βιομάζας και του σεναρίου μετατροπής της σε βιοέλαιο για chips ξύλου και μίσχανθο, χωρίς και με εγκατάσταση μονάδας SPGU. Οι τιμές που λαμβάνει η θερμογόνος δύναμη του βιοελαίου είναι 17000 και 19000 MJ/tn. Από τα διαγράμματα μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα:

- Σε κάθε περίπτωση, για αποστάσεις R_0 έως και 500 km το κόστος απόκτησης βιομάζας είναι μικρότερο από το αντίστοιχο κόστος του σεναρίου μετατροπής σε βιοέλαιο και μεταφοράς του με φορτηγά. Αυτό οφείλεται στο υψηλό πρόσθετο κόστος παραγωγής βιοελαίου, ακόμα και για μεγαλύτερες μονάδες ταχείας πυρόλυσης. Εξαιρεση αποτελεί η περίπτωση μονάδας ταχείας πυρόλυσης με εγκατάσταση SPGU, όπου για θερμογόνο ικανότητα βιοελαίου ίση με 19000 MJ/tn τα δύο κόστη εξισώνονται για την απόσταση των 500 km.
- Η τάση μείωσης της διαφοράς του κόστους των δύο σεναρίων είναι μεγαλύτερη για το μίσχανθο, που είναι αντιπροσωπευτικό είδος πώδους βιομάζας χαμηλότερης ενεργειακής πυκνότητας. Για ξυλώδη είδη βιομάζας, τα οφέλη είναι σημαντικά ασθενέστερα. Επομένως η προοπτική μείωσης του κόστους μεταφοράς με χρήση της ταχείας πυρόλυσης συνίσταται μόνο για ανάλογα είδη βιομάζας.
- Η μεταφορά βιοελαίου γίνεται περισσότερο ανταγωνιστική όσο αυξάνεται η θερμογόνος ικανότητά του, κάτι είναι και αναμενόμενο. Το σενάριο που περιλαμβάνει εγκατάσταση της μονάδας SPGU παρουσιάζει επίσης σημαντικά οφέλη.
- Η χρήση αγωγού για τη μεταφορά βιοελαίου έχει σαν αποτέλεσμα το σενάριο της ταχείας πυρόλυσης να γίνεται συμφέρον για σχετικά μικρότερες τιμές της R_0 , γύρω στα 200-250 km, αλλά μόνο για μεγάλες μονάδες 80 dry tn/h και για θερμογόνο ικανότητα βιοελαίου τουλάχιστον ίση με 19000 MJ/tn.
- Εάν γίνει η χρήση του μοντέλου υπολογισμού κόστους μεταφοράς για μεγαλύτερες αποστάσεις, τότε προκύπτει πως για τα chips ξύλου δε μπορούν να προκύψουν οφέλη ακόμα και για αποστάσεις ίσες με 2000 km. Για το μίσχανθο η απόσταση αυτή στην καλύτερη περίπτωση μπορεί να φτάσει τα 500 km.

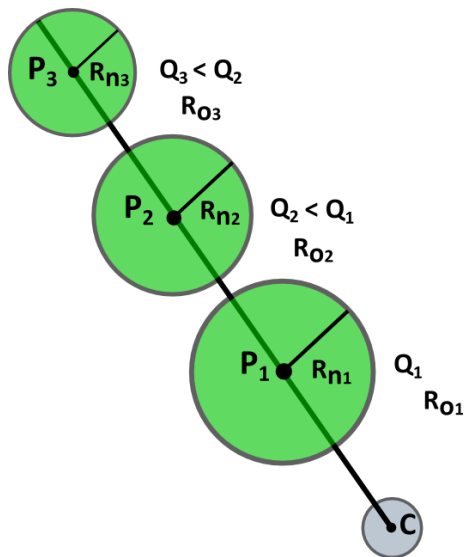


Σχήμα 5.3.3. Σύγκριση κόστους απόκτησης ενέργειας των 2 σεναρίων για διάφορα μεγέθη της μονάδας ταχείας πυρόλυσης α) chips ξύλου β) μίσχανθος, NO SPGU 1) HHV βιοελαίου 17000 MJ/tn 2) HHV βιοελαίου 19000 MJ/tn



Σχήμα 5.3.4 Σύγκριση κόστους απόκτησης ενέργειας των 2 σεναρίων για διάφορα μεγέθη της μονάδας ταχείας πυρόλυσης **α)** chips ξύλου **β)** μίσχανθος, SPGU, **1)** HHV βιοελαίου 17000 MJ/tn **2)** HHV βιοελαίου 19000 MJ/tn

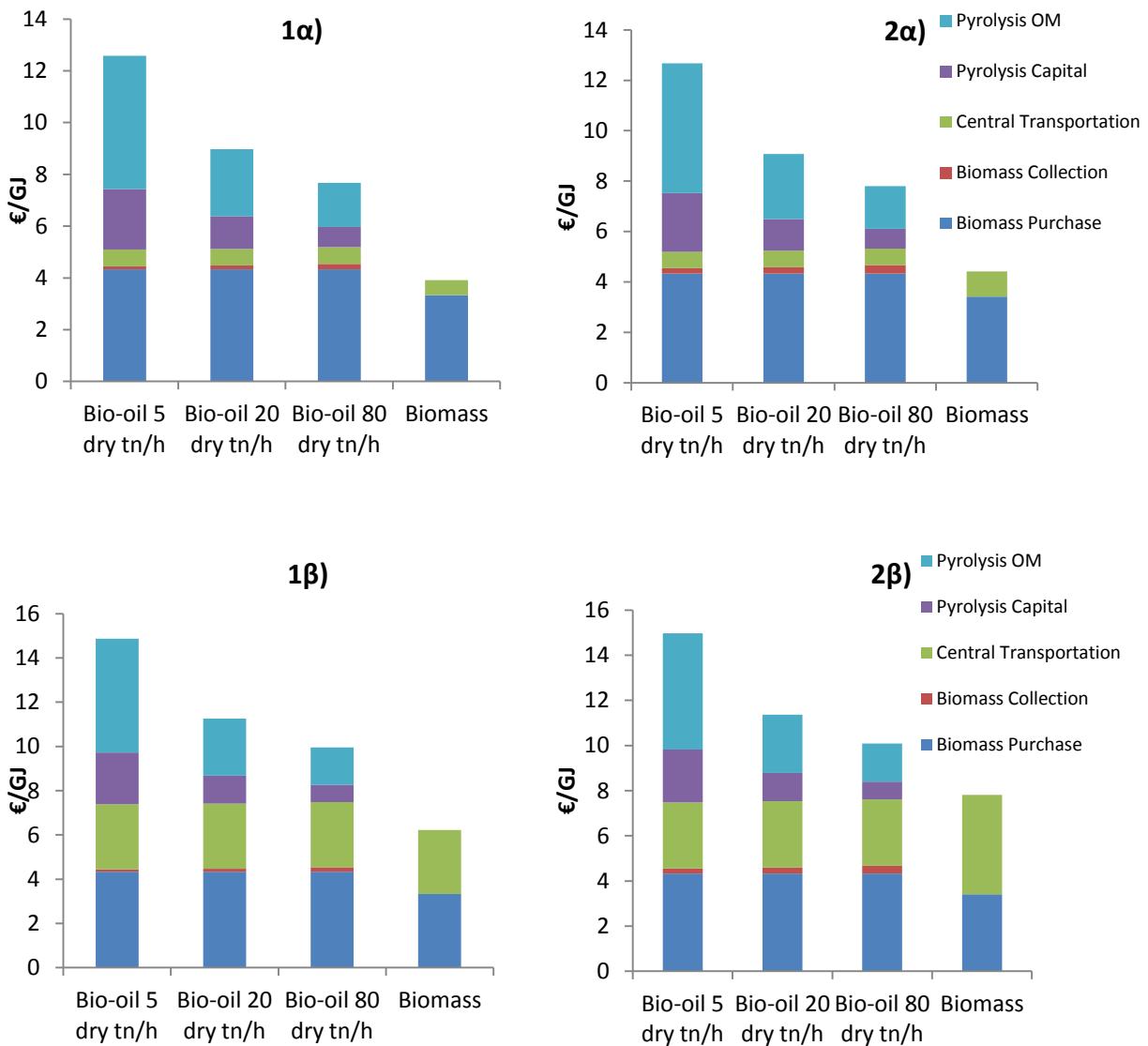
Ένα γενικότερο συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί σε σχέση με το μέγεθος της μονάδας ταχείας πυρόλυσης είναι πως με την αύξησή του, τόσο πιο μικρή είναι η απόσταση στην οποία τα κόστη μεταφοράς εξισώνονται και αντιστρόφως. Αυτό το συμπέρασμα απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 5.3.5. Σχέση τροφοδοσίας μονάδας και απόστασης R_o για την οποία το σενάριο παραγωγής βιοελαίου έχει ίσο κόστος με το σενάριο απευθείας μεταφοράς βιομάζας

Για πολύ μικρές μονάδες η αύξηση του κόστους παραγωγής είναι τόσο μεγάλη, που για να γίνει επικερδής η μεταφορά του βιοελαίου θα πρέπει οι αποστάσεις ολοένα να αυξάνονται και αντιστρόφως.

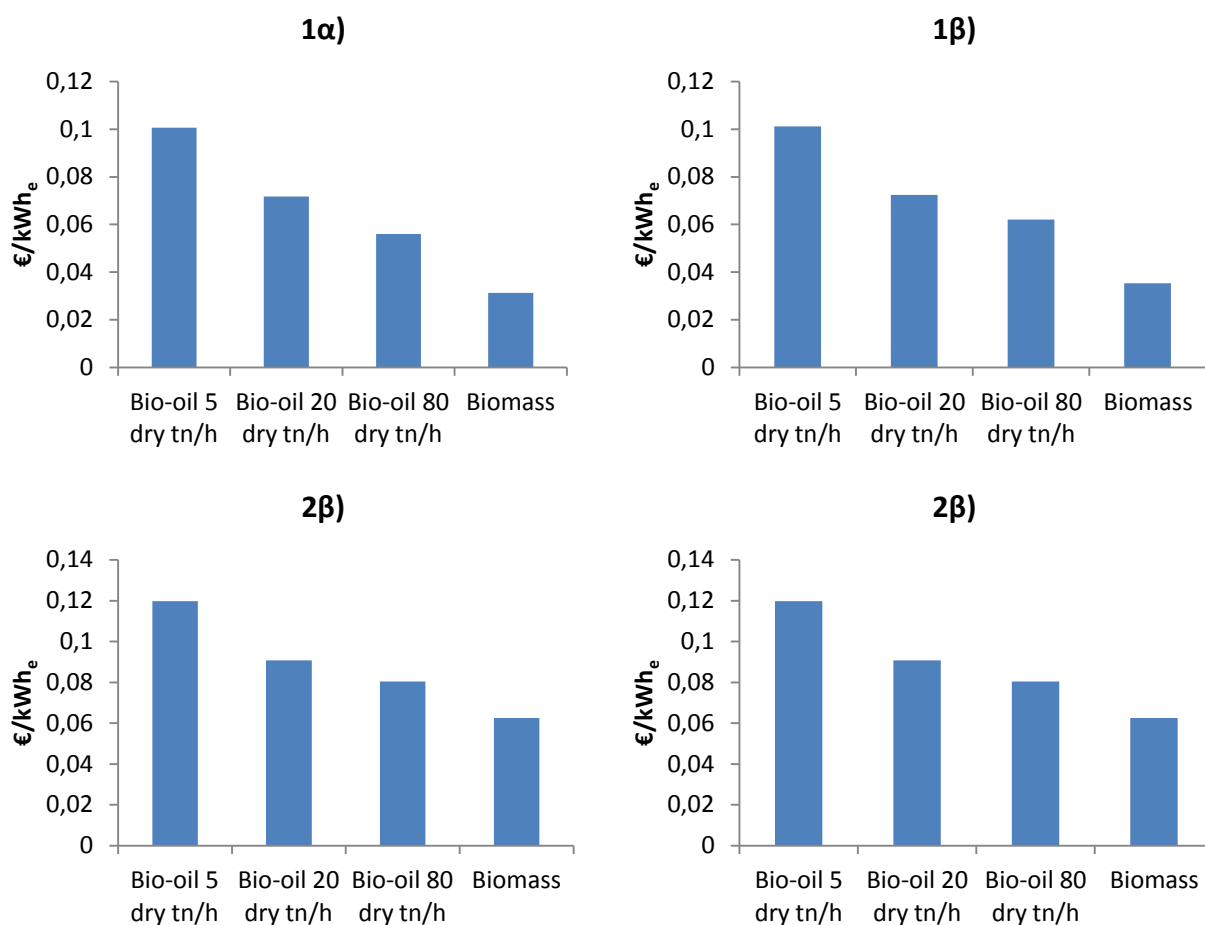
Στα επόμενα διαγράμματα απεικονίζονται οι συνιστώσες του τελικού κόστους απόκτησης ενέργειας για τις δύο περιπτώσεις που συγκρίνονται, για την περίπτωση του βασικού σεναρίου μεταφοράς. Η απόσταση R_0 λαμβάνει τις οριακές τιμές των 100 και 500 km.



Σχήμα 5.3.6. Κατανομή κόστους συνιστωσών τελικής τιμής απόκτησης ενέργειας για τα 2 σεναρία για 3 μεγέθη μονάδας ταχείας πυρόλυσης και για αποστάσεις 1) 100 km 2) 500 km 3) για α) chips ξύλου β) μίσχανθο

Στα διαγράμματα αποτυπώνεται η μεγαλύτερη μείωση του κόστους μεταφοράς στην περίπτωση του μίσχανθου, η οποία όμως δεν επαρκεί για να αντισταθμίσει τα πρόσθετα κόστη που σχετίζονται με τη μονάδα της ταχείας πυρόλυσης.

Εάν γίνει η υπόθεση πως στο C υπάρχει μονάδα IGCC με βαθμό απόδοσης $\eta=45\%$, τότε μπορεί να υπολογιστεί η ελάχιστη συνεισφορά του κόστους αγοράς καυσίμου στην τελική τιμή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 5.3.7. Κόστος αγοράς καυσίμου μονάδας IGCC $\eta=45\%$ σε €/kWh για τα δύο σενάρια, σε αποστάσεις 1) 100 km 2) 500 km 3) για α) chips ξύλου β) μίσχανθο

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

6.1. Συμπεράσματα

Η πυρόλυση βιομάζας συνιστά ένα σύνθετο θερμοχημικό φαινόμενο, ο ακριβής μηχανισμός του οποίου παραμένει ακόμα ανεξιχνίαστος. Με το μοντέλο που παρουσιάστηκε στην παρούσα εργασία, καθίσταται δυνατή η πρόβλεψη με ικανοποιητική ακρίβεια της στοιχειακής σύστασης και της ποσότητας των προϊόντων της ταχείας πυρόλυσης κατά την οποία επιτυγχάνεται η μεγιστοποίηση του βιοελαίου. Η γνώση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον ακριβέστερο υπολογισμό της θερμογόνου ικανότητας των προϊόντων και της ενέργειας που είναι απαραίτητη για την αντίδραση ενώ μπορεί να αποτελέσει βάση για περαιτέρω μοντελοποίηση της διεργασίας από τεχνική σκοπιά. Με βάση την ανάλυση που έγινε, προκύπτει πως το απαιτούμενο για την ταχεία πυρόλυση ποσό θερμότητας μπορεί να παραχθεί από την ενεργειακή αξιοποίηση των παράπλευρων προϊόντων της (μόνιμα αέρια, εξανθράκωμα). Η παραπάνω μοντελοποίηση εφαρμόστηκε στο υπολογιστικό πρόγραμμα AspenPlusTM και μπορεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο προκαταρκτικών υπολογισμών για τα μεγέθη της διεργασίας.

Από την μοντελοποίηση της αεριοποίησης του βιοελαίου για παραγωγή μεθανόλης φαίνεται πως αυτή είναι προτιμότερο να λαμβάνει χώρα σε υψηλότερες θερμοκρασίες (1000 με 1200 °C), καθώς σε αυτή την περίπτωση ελαχιστοποιείται η ποσότητα CH₄ στο αέριο σύνθεσης και κατ'επέκταση το ενεργειακό του περιεχόμενο.

Για τη σύγκριση του κόστους μεταφοράς βιομάζας και βιοελαίου αναπτύχθηκε ένα απλοποιημένο μοντέλο οικονομικότητας το οποίο λαμβάνει υπόψιν όλες τις ιδιαίτερες παραμέτρους του μεταφερόμενου προϊόντος χωρίς να στερείται τη δυνατότητα γενικότερης εφαρμογής. Από τη συνολική οικονομική ανάλυση που έγινε διαπιστώνεται πως παρά το μειωμένο κόστος μεταφοράς που παρουσιάζει το βιοέλαιο έναντι της βιομάζας, το υψηλό κόστος επένδυσης και λειτουργίας των μονάδων ταχείας πυρόλυσης δυσχεραίνει τη δυνατότητα μείωσης του τελικού κόστους καυσίμου κατά τη μεταφορά του σε κεντρικές μονάδες για αποστάσεις μέχρι 500 km. Αυτό οφείλεται εν μέρει και στους περιορισμούς χωρητικότητας και καθαρού βάρους μεταφοράς των φορτηγών οχημάτων, οι οποίοι περιορίζουν τη δυνατότητα πλήρους εκμετάλλευσης της υψηλότερης ενεργειακής πυκνότητας του υγρού έναντι του στερεού καυσίμου.

6.2. Προτάσεις για μελλοντική εργασία

Για την καλύτερο προσδιορισμό των θερμοδυναμικών χαρακτηριστικών της διεργασίας, είναι αναγκαία η ακριβής γνώση των ιδιοτήτων του βιοελαίου, όπως η ειδική θερμοχωρητικότητα και η λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης. Προς το παρόν, μεγάλο μέρος των οργανικών συστατικών που περιέχει το βιοέλαιο παραμένουν άγνωστα. Για αυτό το λόγο, είναι σκόπιμη η μοντελοποίηση του βιοελαίου ως μίγμα ενδεικτικών οργανικών ενώσεων που προσομοιάζουν την θερμοχημική του συμπεριφορά. Στην παρούσα εργασία ακολουθήθηκαν αντίστοιχες μεθοδολογίες, αλλά χρειάζεται περαιτέρω πειραματική επαλήθευση των αποτελεσμάτων. Αντίστοιχη πειραματική διερεύνηση χρειάζεται να γίνει για την αξιολόγηση της ακρίβειας με την οποία τα διάφορα μοντέλα υπολογίζουν την ενέργεια της διεργασίας της πυρόλυσης για διάφορα είδη βιομάζας.

Η αεριοποίηση του βιοελαίου και η σύγκρισή των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της με αυτά της αεριοποίησης βιομάζας αποτελεί επίσης ένα αντικείμενο που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Η παραγωγή αερίου σύνθεσης από το βιοέλαιο παρουσιάζει πλεονεκτήματα όσον αφορά τεχνικές πτυχές της διεργασίας (υψηλότερη ομοιογένεια και περιεχόμενο τέφρας καυσίμου, ευκολία χειρισμού και αποθήκευσης) με αντίκτυπο στα οικονομικά μεγέθη μονάδας βιοδιυλιστηρίου. Η επίδραση αυτή πρέπει να διερευνηθεί περαιτέρω, καθώς τα συνολικά οικονομικά οφέλη ενδέχεται να αντισταθμίζουν το υψηλότερο κόστος απόκτησης βιοελαίου έναντι βιομάζας, ανάλογα με το τελικό προϊόν της διεργασίας (χημικά, καύσιμα κλπ). Για αυτό το λόγο είναι αναγκαία η πλήρης οικονομοτεχνική μελέτη βιοδιυλιστηρίου που χρησιμοποιεί ως καύσιμο βιοέλαιο, λαμβάνοντας υπόψιν όλες τις ιδιαιτερότητές του, και η σύγκριση της οικονομικότητάς του σε σχέση με βιοδιυλιστήρια στερεών καυσίμων.

Όπως φάνηκε και από τα αποτελέσματα της οικονομικής ανάλυσης για την περαιτέρω μείωση του κόστους παραγωγής βιοελαίου θα πρέπει να μειωθεί η τιμή αγοράς της βιομάζας. Για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος πρέπει να μειωθεί το κόστος που αφορά τα στάδια φύτευσης, καλλιέργειας και συγκομιδής της. Επομένως θα ήταν χρήσιμη επιπλέον έρευνα πάνω στους παράγοντες που διαμορφώνουν το κόστος της κάθε μίας από τις παραπάνω διαδικασίες, με σκοπό τη μείωσή του.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. Α. Ζερβός. *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας*. Αθήνα, 2008
- [2]. Manon Van De Velden, Jan Baeyens, Anke Brems, Bart Janssens, Raf Dewil. Fundamentals, kinetics and endothermicity of the biomass pyrolysis reaction. *Renewable Energy*, 2009, 35, pp. 232-242
- [3]. N.P. Marimon. Integrated sustainability analysis of innovative uses of forest biomass. Bio-oil as an energy vector. Ph.D thesis, Universitat Autònoma de Barcelona, 2010
- [4]. S Sinha, A. Jhalani, M.R. Ravi, A. Ray. Modelling of Pyrolysis in Wood : A Review. *SESI Journal*, 2000, 35(1), pp. 41-62
- [5]. A. Demirbas. *Green Energy And Technology Biorefineries for Biomass Upgrading Facilities*. London: Springer, 2010, p.39
- [6]. N.Prakash, T. Karunanithi. Kinetic Modeling in Biomass Pyrolysis-A Review. *Journal of Applied Sciences Research*, 2008, 4(12), pp.1627-1636
- [7]. A.V. Bridgwater, D. Meier, D. Radlein . An overview of fast pyrolysis of biomass. *Organic Geochemistry*, 1999, 30, pp.1479-1493
- [8]. F. He, W. Yi, X. Bai. Investigation on caloric requirement of biomass pyrolysis using TG-DSC analyzer. *Energy Conversion and Management*, 2006, 47, pp. 2461-2469
- [9]. T. B.Reed, C. D. Cowdery. Heat flux requirements for fast pyrolysis and a new method for generating biomass vapor. In: *Production of Primary Pyrolysis Oils – Fundamentals*, Denver, Spring 1987, pp. 68-81
- [10]. D. Neves, H.Thunman, A. Matos, L. Tarelho, A.G. Barea. Characterization and prediction of biomass pyrolysis products. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2011, 37, pp. 611-630
- [11]. Yufu Xu, Xianguo Hu, Wendong Li and Yinyan Shi (2011). Preparation and Characterization of Bio-oil from Biomass, *Progress in Biomass and Bioenergy Production*, Dr. Shahid Shaukat (Ed.), ISBN: 978-953-307-491-7, InTech, DOI: 10.5772/16466. Available from: <http://www.intechopen.com/books/progress-in-biomass-and-bioenergy-production/preparation-and-characterization-of-bio-oil-from-biomass>
- [12]. S. Sadaka. Pyrolysis. Department of Agricultural and Biosystems Engineering Iowa State University Nevada [Online], Available from bioweb.sungrant.org/NR/rdonlyres/57BCB4D0-1F59-4BC3-A4DD-4B72E9A3DA30/0/Pyrolysis.pdf [Accessed on 16 Feb 2013]
- [13]. P.A. Brownsort. Biomass Pyrolysis Processes: Review of Scope, Control and Variability. 2009, UK Biochar Research Centre, [Online] Available from www.biochar.org.uk/download.php?id=14 [Accessed 16 Feb 2013]
- [14]. J.E. White, W.J. Catallo, B.L Legendre. Biomass pyrolysis kinetics: A comparative critical review with relevant agricultural residue case studies. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2011, 91, pp. 1-33
- [15]. F. Preto. Pyrolysis, Char and Energy. Lecture delivered in CanmetEnergy, Natural Resources Canada. The Canadian Biochar Initiative, Inaugural Meeting, St Anne de Bellevue, December 12 2008

- [16]. E. Hoekstra. Fast pyrolysis of biomass An experimental study on mechanisms influencing yield and composition of the products. Ph.D Thesis, University of Twente, Netherlands, 2011
- [17]. S. Wang, X. Guo, K. Wang, Z. Luo. Influence of the interaction of components on the pyrolysis behavior of biomass. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2011, 91, pp.183-189
- [18]. A.V. Bridgwater. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 2012, 38, pp. 68-94
- [19]. M. Ringer, V. Putsche, J. Scahill. Large scale pyrolysis: a technology assessment and economic analysis. Technical report NREL/TP-0510-37779. NREL. National Renewable Energy Laboratory, 2006
- [20]. Doug Elliott. IEA Bioenergy Task 34-Pyrolysis, [no date]. [Online] Available from : http://www.pyne.co.uk/?_id=69 [accessed 14 Feb 2013].
- [21]. L. Quiang, L.Wen-Zhi, Z. Xi-Feng. Overview of fuel properties of biomass fast pyrolysis oils. *Energy Conversion and Management*, 2009, 50, pp. 1376-1383
- [22]. C.R. Shaddix, D.R. Hardesty. Combustion Properties of Biomass Flash Pyrolysis Oils: Final Project Report. SANDIA REPORT SAND99-8238. Sandia National Laboratories, 1999
- [23]. A.V. Bridgwater. Upgrading pyrolysis liquids to transport fuels. Lecture delivered in Aston University, Bio-Energy Research Group , Birmingham UK
- [24]. I.P. Boukis. Fast Pyrolysis of Biomass in a Circulating Fluidised Bed Reactor. Ph.D Thesis, The University of Aston In Birmingham, 1997
- [25]. S.A. Channiwala, P.P. Parikh. A unified Correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels. *FUEL*, 2002, 81, pp. 1051-1063
- [26]. A. Friedl, E. Padouvas, H. Rotter, K. Varmuza. Prediction of heating values of biomass fuel from elemental composition. *ANALYTICA CHIMICA ACTA*, 2005, 554, pp. 191-198
- [27]. C.E. Brewer, K. Schmidt-Rohr, J. A. Satrio, R.C. Brown. Characterization of Biochar from Fast Pyrolysis and Gasification Systems. *Environmental Progerss & Sustainable Energy*, 2009, 28, pp. 386-396
- [28]. M. R. Islam, MD. N. Nabi, M. N. Islam. The fuel properties of pyrolytic oils derived from carbonaceous solid waste in Bangladesh. *Jurnal Teknologi*, 2003, 38, p. 75-89
- [29]. I.Ph. Boukis, P. Grammelis, S. Bezergianni, A.V. Bridgwater. CFB air-blown flasy pyrolysis. Part I: Engineering design and cold model performance. *FUEL*, 2007, 86, pp. 1372-1386
- [30]. D.E Daugaard, R.C Brown. Enthalpy for Pyrolysis for Several Types of Biomass. *Energy Fuels*, 2003, 17, pp. 934-939
- [31]. K.S. Ng, J.Sadhukhan. Process integration and economic analysis of bio-oil platform for the production and combined heat and power. *Biomass and Bioenergy*, 2011, 35, pp. 1153-1169
- [32] V. Francescato, E. Antonini and others. Wood Fuels Handook, Production, Quality Requirements, Trading. Agripolis: AIEL-Italian Energy Association, 2008, pp.20-22

- [33]. C.A. Mullen, A.A. Boateng, N.M. Goldber, I.M. Lima, D.A. Laird, K.B. Hicks. Bio-oil and bio-char production from corn cobs and stover by fast pyrolysis. *Biomass and Bioenergy*, 2010, 34, pp. 67-74
- [34]. K.H. Kim, T. Kim, S. Lee, D. Choi, H. Yeo, I. Cho, J.W. Choi. Comparison of physicochemical features of biooils and biochars produced from various woody biomasses by fast pyrolysis. *Renewable Energy*, 2013, 50, pp. 188-195
- [35]. K.H. Kim, I.Y. Eom, S. M. Lee, D. Choi, H. Yeo, In-Gyu Choi, J.W. Choi. Investigation of physicochemical properties of biooils produced from yellow poplar wood (*Liriodendron tulipifera*) at various temperatures and residence times. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2011, 92, pp. 2-9
- [36]. J.G. Rogers, J.G. Brammer. Estimation of the production cost of fast pyrolysis bio-oil. *Biomass and Bioenergy*, 2012, 36, pp.208-217
- [37]. Sweden Linnaeus University, Tallinn University of Technology, CERTH, IVALS, Tipperary Energy Agency. The Bioenergy System Planners Handbook-BISYPLAN web-based handbook, 2012. [Online] Available from : <http://bisyplan.bioenarea.eu/html-files-en/Handbook-intro.html> [Accessed 16 Feb 2013].
- [38]. Biomass Energy Centre. Biomass Energy Centre website, 2008. [Online] Available from http://www.biomassenergycentre.org.uk/portal/page?_pageid=73,1&_dad=portal&_schema=PORTAL [Accessed 16 Feb 2013].
- [39]. P. McKendry. Energy production from biomass (part 1) :overview of biomass. *Bioresource Technology*, 2002, 83, pp. 37-46
- [40]. A.V. Bridgwater, A.J. Toft, J.G. Brammer. A techno-economic comparison of power production by biomass fast pyrolysis with gasification and combustion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2002, 6, pp. 181-248
- [41]. F. Trippe, M. Frohling, F. Schultmann, R. Stahl, E. Henrich. Techno-economic assessment of gasification as a process step within biomass-to-liquid (BtL) fuel and chemicals production. *Fuel Processing Technology*, 2011, 92, pp. 2169-2184
- [42]. M.S. Peters, K.D. Timmerhaus. *Plant Design and Economics for Chemical Engineers.*, 4th edition. New York: McGraw-Hill, 1991, pp.150-216
- [43]. S. Karellas, G. Panousis, E.I. Koysoumpa. Substitute natural gas from coal with internal sequestration of CO₂. Technical report RFCR-CT-2009-00003. NTUA, 2012
- [44]. G.V.C. Peacocke, A.V Bridgwater, J.G. Brammer. Techno-economic assessment of power production production from the Wellman and BTG fast pyrolysis processes. In: A.V. Bridgwater, D.G Boocock, editors. *Science in thermal and chemical biomass conversion*. CPL Press, 2006. pp. 1785
- [45]. P.H. Perry, D.W. Green. *Perry's Chemical Engineer's Handbook.*, 7th edition. New York: McGraw-Hill, 1999, p. 9-57
- [46]. European Commission eurostat. *Statistics Explained*. [Online] Available from http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Wages_and_labour_costs#Gross_earnings [Accessed 16 Feb 2013].

- [47]. S. Mani, L.G. Tabil, S. Sokhansanj. Grinding performance and physical properties of wheat and barley straws, corn stover and switchgrass. *Biomass and Bioenergy*, 2004, 27, pp. 339-352
- [48]. J.G. Brammer, A.V. Bridgwater. Drying technologies for an integrated gasification bio-energy plant. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1999, 3, pp. 243-289
- [49]. Europe's Energy Portal. Europe's Energy Portal Website. [Online] Available from <http://www.energy.eu> [Accessed 16 Feb 2013].
- [50]. J.G. Rogers, J.G. Brammer. Analysis of transport costs for energy crops for use in biomass plant networks. *Biomass and Bioenergy*, 2009, 33, pp. 1367-1375
- [51]. International Transport Forum. International Transport Forum Website. [Online] Available from <http://www.internationaltransportforum.org/IntOrg/road/pdf/weights.pdf> [Accessed 16 Feb 2013].
- [52]. UK Department for Transport. Truck specification for best operational efficiency. UK Department for Transport, HMSO; 2005
- [53]. E. Searcy, P. Flynn, E. Ghafoori, A. Kumar. The relative cost of biomass energy transport. *Applied Bi^oC^hemistry and Biotechnology*, 2007, Volume 137-140, Issue 1-12, pp. 639-652
- [54]. European Commission. European Commission Website. [Online] Available from http://ec.europa.eu/index_en.htm [Accessed 16 Feb 2013]
- [55]. Thanyakarn Pootakham. Bio-oil Transportation by Pipeline. M.Sc thesis, University of Alberta, Edmonton, Alberta, 2009
- [56]. Colin Brink Sorenson. A Comparative Financial Analysis of Fast Pyrolysis Plants in Southwest Oregon. M.Sc thesis, Kansas State University, 2001
- [57]. S. Sarkar, A. Kumar. Large-scale biohydrogen production from bio-oil. *Bioresource Technology*, 2010, 101, pp. 7350-7361

