



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ
ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
Δ/ΝΤΗΣ: ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΜΟΥΣΙΟΠΟΥΛΟΣ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΠΡΟΟΠΤΙΚΩΝ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

ΜΑΡΙΝΟΣ ΛΟΥΚΑΪΔΗΣ

A.E.M.: 4787

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ν. ΜΟΥΣΙΟΠΟΥΛΟΣ

ΑΡΜΟΔΙΟΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ: ΔΡ. Γ. ΠΕΡΚΟΥΛΙΔΗΣ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

ΙΟΥΝΙΟΣ 2017

1. ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ	2.ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ	3. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΣ ΤΟΜΕΑΣ	4. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
5. Υπεύθυνος: Καθ. Νικόλαος Μουσιόπουλος		6. Αρμόδιος Παρακολούθησης: Δρ. Γεώργιος Περκουλίδης	
7. Τίτλος εργασίας: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΠΡΟΟΠΤΙΚΩΝ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ			
8. Ονοματεπώνυμο φοιτητή: ΜΑΡΙΝΟΣ ΛΟΥΚΑΪΔΗΣ		9. Αριθμός μητρώου: 4787	
10. Θεματική περιοχή: ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΝΤΙΠΡΥΠΙΑΣΗΣ – ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ	11. Ημερομηνία έναρξης: ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2015	12. Ημερομηνία παράδοσης: ΙΟΥΝΙΟΣ 2017	13. Αριθμός εργασίας:
14. Περίληψη: Σε αυτή τη διπλωματική εργασία γίνεται μια προσπάθεια εκτίμησης των προοπτικών ανάκτησης ενέργειας με αεριοποίηση της βιομάζας. Αρχικά, εξετάζονται οι εθνικοί στόχοι της Ελλάδας για την αξιοποίηση της βιομάζας και οι στόχοι της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Διερευνάται το διαθέσιμο και τεχνικά αξιοποιήσιμο δυναμικό βιομάζας στην Ελλάδα και οι δυνατότητες συνεισφοράς του στην επίτευξη των εθνικών στόχων. Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά στην νομοθεσία που αφορά τα έργα ενεργειακής αξιοποίησης της βιομάζας και την διαδικασία αδειοδότησης που απαιτείται για την υλοποίησή τους. Επίσης παρουσιάζονται ενδεικτικά οικονομικά στοιχεία που αφορούν το επενδυτικό κόστος και την οικονομική σκοπιμότητα εγκαταστάσεων αεριοποίησης. Έπειτα, γίνεται εκτενής αναφορά στην αεριοποίηση και τις διαθέσιμες τεχνολογίες και περιγράφεται η ανάπτυξη ενός μοντέλου χημικής ισορροπίας για την πρόβλεψη της χημικής σύστασης του παραγόμενου αερίου σύνθεσης. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που προέκυψαν.		15. Στοιχεία εργασίας: Αρ. Σελίδων: 64 Εικόνων: 18 Πινάκων: 15 Παραρτημάτων: 1	
		16. Λέξεις κλειδιά: Αεριοποίηση, Βιομάζα	
		17. Σχόλια:	
18. Συμπληρωματικές παρατηρήσεις:		19. Βαθμός:	

1. ARISTOTLE UNIVERSITY OF THESSALONIKI	2. DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING	3. ENERGY SECTOR	4. LABORATORY OF HEAT TRANSFER AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING
5. Supervisor: Professor N. Moussiopoulos		6. Second supervisor: Dr. G. Perkoulidis	
7. Undergraduate dissertation title: SYSTEM DEVELOPMENT FOR THE PROSPECTIVE ASSESSMENT OF ENERGY RECOVERY IN GREECE USING BIOMASS GASIFICATION			
8. Student name: Marinos Loukaides		9. Student Registration No: 4787	
10. Topic area: ENVIRONMENT AND UPGRADING TECHNOLOGIES- ELABORATION AND MANAGEMENT OF SOLID WASTE	11. Start date: APRIL 2015	12. Presentation date: JUNE 2017	13. Dissertation No.
14. Summary: The present dissertation is an attempt to evaluate the prospects of energy recovering using biomass gasification. First, the targets of Greece and the EU for the biomass exploitation are examined. The biomass potential which is utilizable in Greece as well as its possible contribution to the achievement of national goals are also analyzed. Second, there is a reference to the legislation that regulates the energy exploitation projects and the process of authorization required for their implementation. Third, indicative financial figures about the cost of investment and the economic feasibility of the gasification facilities are also presented. Furthermore, the method of gasification and the available technologies are examined, and a chemical equilibrium model for the prediction of the produced synthesis gas's composition is presented. Finally, the results and the conclusions are presented at the end of the dissertation.		15. The dissertation comprises of: No. of pages: 64 No. of figures: 18 No. of tables: 15 No. of annexes: 1	
		16. Keywords: Gasification, Biomass	
		17. Comments:	
18. Additional notes:		19. Grade:	

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Πριν την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας, αισθάνομαι την υποχρέωση να ευχαριστήσω ορισμένους από τους ανθρώπους που γνώρισα, συνεργάστηκα μαζί τους και έπαιξαν πολύ σημαντικό ρόλο στην πραγματοποίησή της. Θα ήθελα πρώτα να ευχαριστήσω τον καθηγητή Νικόλαο Μουσιόπουλο, Διευθυντή του Εργαστηρίου Μετάδοσης Θερμότητας και Περιβαλλοντικής Μηχανικής της Πολυτεχνικής Σχολής του ΑΠΘ, για την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας και τον υπεύθυνο παρακολούθησης Δρ. Γεώργιο Περκουλίδη για την συμβολή του στην υλοποίηση της. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω του Γονείς μου και την Φωτεινή Μαρκατοπούλου για την βοήθεια και την συμπαράσταση τους.

Θεσσαλονίκη, Ιούλιος 2017

Λουκαΐδης Μαρίνος

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ	3
2.1	ΣΤΟΧΟΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ	4
2.2	ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ	6
2.3	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ-ΑΔΕΙΟΔΟΤΗΣΗ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	13
3.1	ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ	13
3.2	ΑΔΕΙΟΔΟΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	14
3.3	ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ	23
4.1	ΑΝΤΙΑΡΑΣΤΗΡΕΣ.....	24
4.2	ΘΕΡΜΟΧΗΜΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ	28
4.3	ΡΥΠΑΝΤΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟΥ ΑΕΡΙΟΥ	30
4.4	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΑΕΡΙΟΥ.....	30
4.5	ΑΠΛΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ.....	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	46
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι:	ΠΙΝΑΚΕΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	52

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

ΕΙΚΟΝΑ 1 ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΑΠΕ ΣΤΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ (ΡΥΘΜΙΣΤΙΚΗ ΑΡΧΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, 2009).....	5
ΕΙΚΟΝΑ 2 ΤΕΧΝΙΚΑ ΔΙΑΘΕΣΙΜΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΤΩΝ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΩΝ (ΤΟΝΟΙ ΞΗΡΗΣ ΟΥΣΙΑΣ) (ΚΑΠΕ, 2009).....	7
ΕΙΚΟΝΑ 3 ΤΕΧΝΙΚΑ ΔΙΑΘΕΣΙΜΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΤΩΝ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΩΝ (ΕΛΣΤΑΤ, 2009).....	8
ΕΙΚΟΝΑ 4 ΤΕΧΝΙΚΑ ΔΙΑΘΕΣΙΜΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΔΑΣΙΚΗΣ ΕΥΛΕΙΑΣ (ΧΡΗΣΤΟΥ, 2013).....	9
ΕΙΚΟΝΑ 5 ΘΕΡΜΟΧΗΜΙΚΕΣ ΚΑΙ ΒΙΟΛΟΓΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ.....	10
ΕΙΚΟΝΑ 6 ΘΕΡΜΟΧΗΜΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ (ΦΑΛΙ, 2006).....	11
ΕΙΚΟΝΑ 7 ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΤΗΣ ΑΝΕΡΧΟΜΕΝΗΣ ΡΟΗΣ (STASSEN, 1995).....	25
ΕΙΚΟΝΑ 8 ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΤΗΣ ΚΑΤΕΡΧΟΜΕΝΗΣ ΡΟΗΣ (STASSEN, 1995).....	25
ΕΙΚΟΝΑ 9 ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΤΗΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΡΟΗΣ (STASSEN, 1995).....	26
ΕΙΚΟΝΑ 10 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΠΛΗΣ ΚΑΙ ΜΕ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΚΛΙΝΗΣ (BRIDGWATER, 1995).....	27
ΕΙΚΟΝΑ 11 ΕΦΑΡΜΟΖΟΜΕΝΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΚΛΙΜΑΚΕΣ ΙΣΧΥΟΣ (WALDHEIM ET AL, 1998).	28
ΕΙΚΟΝΑ 12 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΣΥΣΤΑΣΗΣ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΓΙΑ ΕΛΑΙΟΠΥΡΗΝΑ ΜΕ 10% ΥΓΡΑΣΙΑ ΚΑΙ ΛΟΓΟ ΑΕΡΑ $\lambda=0.35$	41
ΕΙΚΟΝΑ 13 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΣΥΣΤΑΣΗΣ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΓΙΑ ΞΥΛΟ ΜΕ 10% ΥΓΡΑΣΙΑ ΚΑΙ ΛΟΓΟ ΑΕΡΑ $\lambda=0.35$	41
ΕΙΚΟΝΑ 14 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΣΥΣΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΓΙΑ ΕΛΑΙΟΠΥΡΗΝΑ ΣΤΟΥΣ 700°C.	42
ΕΙΚΟΝΑ 15 ΑΝΩΤΕΡΗ ΘΕΡΜΟΓΟΝΟΣ ΔΥΝΑΜΗ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΓΙΑ ΕΛΑΙΟΠΥΡΗΝΑ ΜΕ 10% ΥΓΡΑΣΙΑ ΚΑΙ ΛΟΓΟ ΑΕΡΑ $\lambda=0.35$	42
ΕΙΚΟΝΑ 16 ΑΝΩΤΕΡΗ ΚΑΙ ΚΑΤΩΤΕΡΗ ΘΕΡΜΟΓΟΝΟΣ ΔΥΝΑΜΗ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΓΙΑ ΞΥΛΟ ΜΕ 10% ΥΓΡΑΣΙΑ ΚΑΙ ΛΟΓΟ ΑΕΡΑ $\lambda=0.35$	43
ΕΙΚΟΝΑ 17 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΣΥΣΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΜΕ ΤΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.	44
ΕΙΚΟΝΑ 18 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΑΝΩΤΕΡΗΣ ΘΕΡΜΟΓΟΝΟΥ ΔΥΝΑΜΗΣ ΤΟΥ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΜΕ ΤΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	44

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ 1 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ (ΚΟΥΦΟΔΗΜΟΣ, 2009).....	4
ΠΙΝΑΚΑΣ 2 ΕΘΝΙΚΟΙ ΣΤΟΧΟΙ ΓΙΑ ΤΗ ΒΙΟΜΑΖΑ ΩΣ ΤΟ 2014 ΚΑΙ 2020 (ΓΕΡΑΣΙΜΟΥ, 2011).	6
ΠΙΝΑΚΑΣ 3 ΤΙΜΕΣ LCOE (USD/κWh) ΓΙΑ ΑΠΕ ΤΟ 2010 (IRENA 2012)	16
ΠΙΝΑΚΑΣ 4 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΥΡΟΥΣ LCOE Η/Ε (USD/κWh) ΚΑΤΑ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΡΩΤΟΓΕΝΟΥΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	17
ΠΙΝΑΚΑΣ 5 ΕΠΕΝΔΥΤΙΚΕΣ ΔΑΠΑΝΕΣ ΣΧΕΤΙΖΟΜΕΝΕΣ ΜΕ ΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗ ΣΕ ΜΟΝΑΔΕΣ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ (€) (ΟΒΕΡΝΒΕΡΓΕΡ Ι., ΤΗΚ Γ., 2008)	18
ΠΙΝΑΚΑΣ 6 ΕΤΗΣΙΑ ΚΑΙ ΕΙΔΙΚΑ ΚΟΣΤΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ.....	19
ΠΙΝΑΚΑΣ 7 ΤΙΜΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (€/MWh) ΑΠΟ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ. (ΑΡΘΡΟ 13 ΤΟΥ Ν. 3468/2006)	21
ΠΙΝΑΚΑΣ 8 ΣΤΟΙΧΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΛΑΙΟΠΥΡΗΝΑ ΚΑΙ ΞΥΛΟΥ.....	40
ΠΙΝΑΚΑΣ 9 ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟ ΑΕΡΙΟ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟ ΓΙΑ ΕΛΑΙΟΠΥΡΗΝΑ ΚΑΙ ΚΛΑΔΕΜΑΤΑ ΣΤΟΝ ΔΗΜΟ ΠΕΛΛΑΣ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΤΡΕΙΣ ΧΕΙΜΕΡΙΝΟΥΣ ΜΗΝΕΣ.....	45
ΠΙΝΑΚΑΣ 10 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ Α,Β,С, D (ROBERT ET AL, 1984)	52
ΠΙΝΑΚΑΣ 11 ΕΝΘΑΛΠΙΑ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ, ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ GIBBS ΚΑΙ ΕΝΤΡΟΠΙΑ ΣΕ ΚΑΝΟΝΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ.(CENGEL, 2015)	53
ΠΙΝΑΚΑΣ 12 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΕΡΙΟΥ ΣΥΝΘΕΣΗΣ (BRIDGWATER, 1995).....	54
ΠΙΝΑΚΑΣ 13 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ (CENGEL 2015)	54
ΠΙΝΑΚΑΣ 14 ΦΥΣΙΚΟΣ ΛΟΓΑΡΙΘΜΟΣ ΤΗΣ ΣΤΑΘΕΡΑΣ ΧΗΜΙΚΗΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ. (CENGEL, 2015)	55
ΠΙΝΑΚΑΣ 15 ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΕΣ ΆΔΕΙΕΣ ΚΑΙ ΕΓΚΡΙΣΕΙΣ ΈΡΓΩΝ ΑΠΕ	56

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ενέργεια αποτελεί έναν από τους καθοριστικούς παράγοντες για την επίτευξη των στόχων της ανάπτυξης, απασχόλησης και αειφορίας εντός των συνόρων της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ). Η κοινότητα επιβεβαιώνει την ουσιαστική συμβολή της στην προώθηση στοχευμένων πολιτικών παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας στα πλαίσια μιας ευρύτερης προσπάθειας αντιμετώπισης των προκλήσεων της παγκοσμιοποίησης. Μία από τις προκλήσεις αυτές αποτελεί η διασφάλιση της κάλυψης των ενεργειακών αναγκών της ΕΕ μέσω της αξιοποίησης, κατά το μέγιστο δυνατό, όλων των μορφών Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), παράλληλα με την προώθηση και διασφάλιση των περιβαλλοντικών και κοινωνικοοικονομικών πλεονεκτημάτων που προσφέρει η εντατικοποίηση αξιοποίησης των ΑΠΕ.

Λαμβάνοντας υπόψη τα πιο πάνω η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με ένα μεγάλο κομμάτι των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τη βιομάζα και πιο συγκεκριμένα με τις δυνατότητες ανάκτησης ενέργειας με αεριοποίηση της βιομάζας.

Στατιστικά στοιχεία δείχνουν ότι στην Ελλάδα υπάρχει πολύ ενθαρρυντικό δυναμικό βιομάζας. Η προσπάθεια για αξιοποίηση του δυναμικού βιομάζας πρέπει να έχει στόχο την ανάκτηση ενέργειας, την μείωση του αποτυπώματος της Ελλάδας όσον αφορά αέρια θερμοκηπίου, την ενεργειακή ανεξαρτησία της χώρας καθώς και την επίτευξη οικονομικού οφέλους το οποίο με τη σειρά του θα οδηγήσει σε θέσεις εργασίας και βελτίωση της ποιότητας ζωής.

Οι διαθέσιμες τεχνικές για την ενεργειακή αξιοποίηση της βιομάζας χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, α) τις τεχνικές βιολογικής επεξεργασίας και β) τις θερμοχημικές διεργασίες αξιοποίησης βιομάζας. Μια σύγχρονη και πολλά υποσχόμενη μέθοδος αξιοποίησης της βιομάζας είναι η αεριοποίηση. Συνοπτικά αναφέρεται ότι η αεριοποίηση είναι διεργασία θερμοχημικής μετατροπής υγρών ή στερεών καυσίμων σε καύσιμο αέριο (Basu, 2006). Στις περιπτώσεις χρήσης βιομάζας, η διεργασία πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες 800-950°C (Higman, 2006), υπό την παρουσία οξειδωτικού μέσου (συνήθως αέρας, ατμός, ή καθαρό οξυγόνο) σε ποσότητα μικρότερης της στοιχειομετρικά απαιτούμενης για την πλήρη καύση του καυσίμου (McKendry, 2003). Αποτέλεσμα είναι η μερική οξείδωση του καυσίμου και η θερμική διάσπαση της υπόλοιπης ποσότητας οδηγώντας στην παραγωγή εξανθρακώματος, πίσσας, σωματιδίων και αερίων συστατικών προϊόντων τέλει και ατελούς καύσης, όπως CO₂, CO, H₂, CH₄, H₂O και N₂ στην περίπτωση χρήσης αέρα ως μέσου οξείδωσης.

Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι αντιδραστήρων αεριοποίησης βιομάζας, α) αεριοποιητές σταθερής κλίνης και β) αεριοποιητές ρευστοποιημένης κλίνης. Η κάθε κατηγορία έχει θετικά και αρνητικά στοιχεία, ανάλογα με τις απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής, τα οποία πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για την επιλογή μιας συγκεκριμένης τεχνολογίας.

Επιπλέον, απαραίτητη προϋπόθεση για την δημιουργία μιας εγκατάστασης είναι η μελέτη της σχετικής ισχύουσας νομοθεσίας, και η γνώση της διαδικασίας που

απαιτείται για την έγκριση των απαραίτητων αδειών. Επίσης απαραίτητη είναι και η μελέτη της οικονομικής σκοπιμότητας της προς δημιουργία εγκατάστασης μέσω της οποίας θα φανεί αν το εγχείρημα θα είναι βιώσιμο.

Θα ήταν χρήσιμο πριν προχωρήσει κανείς στον σχεδιασμό και στην κατασκευή μιας εγκατάστασης αεριοποίησης να μπορεί να προβλέψει με μια σχετική ακρίβεια την παραγωγή αερίου σύνθεσης καθώς και να προσομοιώσει κάποιες από τις συνθήκες λειτουργίας της εγκατάστασης. Για τον σκοπό αυτό μπορούν να αναπτυχθούν διάφορα μοντέλα, από απλά μοντέλα ισορροπίας μέχρι σύνθετα δυναμικά μοντέλα, που να μπορούν να δώσουν πληροφορίες σχετικά γρήγορα και με μικρό κόστος.

Στην παρούσα εργασία εξετάζονται οι εθνικοί στόχοι για την αξιοποίηση της βιομάζας, το διαθέσιμο και τεχνικά αξιοποιήσιμο δυναμικό στην Ελλάδα καθώς και κατά πόσο αυτό είναι δυνατό να συνεισφέρει στην επίτευξη αυτών των στόχων. Στη συνέχεια γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση για την νομοθεσία που αφορά τα έργα ενεργειακής αξιοποίησης της βιομάζας και την διαδικασία αδειοδότησης που απαιτείται για την υλοποίηση τους. Επίσης γίνεται αναφορά σε ενδεικτικά οικονομικά στοιχεία που αφορούν το επενδυτικό κόστος και την οικονομική σκοπιμότητα εγκαταστάσεων αεριοποίησης. Έπειτα γίνεται εκτενής αναφορά στην αεριοποίηση και τις διαθέσιμες τεχνολογίες αεριοποίησης και περιγράφεται η ανάπτυξη ενός μοντέλου χημικής ισορροπίας για την πρόβλεψη της χημικής σύστασης του παραγόμενου αερίου σύνθεσης. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που προέκυψαν.

Η εργασία δομείται σε κεφάλαια ως εξής:

- Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται οι εθνικοί στόχοι για την αξιοποίηση της βιομάζας, το διαθέσιμο δυναμικό βιομάζας στην Ελλάδα και οι διαθέσιμες τεχνολογίες αξιοποίησης της.
- Στο Κεφάλαιο 3 αναφέρεται η νομοθεσία που διέπει τις τεχνολογίες αξιοποίησης των ΑΠΕ και ιδιαίτερα την αξιοποίηση βιομάζας με θερμοχημικές μεθόδους. Επίσης παρουσιάζονται κάποια οικονομικά στοιχεία.
- Στο Κεφάλαιο 4 αναλύονται οι τεχνολογίες αεριοποίησης της βιομάζας και τα στάδια από τα οποία περνά κατά την αεριοποίηση. Επίσης περιγράφεται η ανάπτυξη ενός μοντέλου χημικής ισορροπίας αξιολογείται ποσοτικά η χρήση του.
- Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας και στη συνέχεια η βιβλιογραφία.
- Στο Παράρτημα I παρουσιάζονται χρήσιμοι πίνακες δεδομένων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ

Ο όρος **βιομάζα**, δεν είναι ακριβής χημικός όρος. Χρησιμοποιείται συνήθως για να υποδηλώσει τις εξής κατηγορίες υλικών:

- Υποπροϊόντα και κατάλοιπα φυτικής, ζωικής, δασικής και αλιευτικής παραγωγής (άχυρα, φύλλα, στελέχη, κοπριά, θάμνοι, καρποί).
- Παραπροϊόντα της βιομηχανικής επεξεργασίας των προϊόντων αυτών (φλούδες, πυρήνες, πίττες, απόβλητα σφαγείων, τυρόγαλα, απόβλητα χαρτοποιίας, απόβλητα βιομηχανίας επεξεργασίας ξύλου).
- Αστικά απόβλητα, στερεά (σκουπίδια) και υγρά (λύματα).
- Προϊόντα φυσικών δασών και ειδικών φυτειών δασικού ή γεωργικού τύπου με στόχο την παραγωγή ενέργειας (ενεργειακές καλλιέργειες).

Πρόκειται δηλαδή για υλικά φυτικής ή ζωικής προέλευσης που αντιμετωπίζονται σαν ενεργειακοί πόροι.

Η βιομάζα σχηματίζεται από τη φωτοσυνθετική μετατροπή της ηλιακής ενέργειας και αφθονεί στον πλανήτη. Η βιομάζα που παράγεται κάθε χρόνο υπολογίζεται σε $1,72 \times 10^{11}$ t ξηρής ύλης με ενεργειακό περιεχόμενο $1,4 \times 10^{11}$ TΠ. Η ενέργεια αυτή είναι δεκαπλάσια από την ενέργεια που καταναλώνεται σε ολόκληρο τον κόσμο και είναι ίση με τα γνωστά αποθέματα ορυκτών καύσιμων. Το τεράστιο αυτό ενεργειακό δυναμικό παραμένει κατά το μεγαλύτερο μέρος ανεκμετάλλευτο (Τσιλιγκιρίδης, 2010).

Η βιομάζα αποτέλεσε την πρώτη πηγή ενέργειας που αξιοποιήθηκε από τον άνθρωπο για την κάλυψη των βασικών αναγκών της επιβίωσής του, τη διατροφή, τη θέρμανση και την προστασία του. Με τη μορφή ξυλείας ήταν άμεσα διαθέσιμη και ο τρόπος αξιοποίησης δεν ήταν άλλος από την καύση της, αρχικά σε σωρούς και στη συνέχεια σε υποτυπώδεις εστίες. Στο πέρασμα των αιώνων οι τεχνικές εκμετάλλευσης συνεχώς βελτιώνονταν καλύπτοντας με ασφάλεια την ολοένα αυξανόμενη ενεργειακή ζήτηση. Ο τρόπος ζωής και οι συνήθειες των ανθρώπων συνδέθηκαν άρρηκτα με την ενεργειακή αξιοποίηση της βιομάζας έως ότου ανακαλύφθηκαν τα ορυκτά καύσιμα τα οποία λόγω των ενεργειακά (και όχι περιβαλλοντικά) υπέρτερων χαρακτηριστικών κυριάρχησαν.

Παρά τη σχεδόν ολοκληρωτική κυριαρχία των ορυκτών καυσίμων στα ανεπτυγμένα κράτη, η βιομάζα εξακολουθεί να αποτελεί βασική πηγή ενέργειας σε πολλά αναπτυσσόμενα και υποανάπτυκτα κράτη. Σε χώρες της Αφρικής όπως η Νιγηρία και η Κένυα η συμμετοχή της βιομάζας στο συνολικό ισοζύγιο κατανάλωσης ενέργειας ανέρχεται στο 80% και στο 76% αντίστοιχα, ενώ στην Ινδία και στην Κίνα, οι οποίες έρχονται πρώτες σε κατανάλωση βιομάζας παγκοσμίως, τα ποσοστά είναι 40% και 19% αντίστοιχα. Στα ανεπτυγμένα κράτη η συμμετοχή της βιομάζας ήταν ιδιαίτερα χαμηλή με εξαίρεση τη Φινλανδία και τη Σουηδία όπου η βιομάζα κάλυπτε το 20,4% και 17,5% της συνολικής κατανάλωσης (Klass, 2004).

Πίνακας 1 Κατηγορίες και ιδιότητες βιομάζας (Κουφοδήμος, 2009)

Τομέας	Κατηγορία	Είδος	Υγρασία* [% κ.β.]	Τέφρα** [% κ.β.]	Θερμογόνος δύναμη** [kJ/kg]
Αγροτικός	Παραπροϊόντα καλλιεργειών	Στελέχη και κλαδέματα καλλιεργειών, άχυρα	30-50	2 - 17	16 000
	Ενεργειακά φυτά	Στελέχη και κλαδέματα καλλιεργειών	12-50	0.1-9	18 000
Δασικός	Ξυλεία	Κορμοί	45	0.4-5	15 000
	Υπολείμματα	Κλαδέματα, στελέχη, τύρφη	50	3-20	12 000
Βιομηχανικός	Αγροτικά	Φλοιός, πυρήνας, στελέχη	10-30	0.7-20	18 000
	Δασικά	Κορμποπλατεία, υπολείμματα παραγωγικής διαδικασίας	10-45	15-30	12 000
	Ζωικά	Υποπροϊόντα σφαγείου, επεξεργασμένα υπολείμματα	15	10-30	20 000
Αστικός	Οικιακά απορρίμματα	Οργανικά και ζυμώσιμα υπολείμματα	30	35	18 000
	Ξυλεία	Συσκευασίες, ξυλοκατασκευές	30-40	0,6	18 000
	Κηπευτικά	Κλαδέματα, υπολείμματα κηπουρικής	35	40	17 000
Τυποποιημένα καύσιμα	Ξυλεία	Πελλέτες, μπριγκέτες	10	0.5	18 000
	Απορρίμματα	RDF***, Stablat®***	6	5	20 000

* υγρή βάση, ** ξηρή βάση

*** δεν αποτελεί καθαρή βιομάζα λόγω της ύπαρξης εξωγενών χημικών συστατικών

Πηγή: Αποτελέσματα εργαστηριακών μετρήσεων ΕΕΘ/ΑΠΘ, Νικολαου et al, 2003, <http://www.ecn.nl/phyllis>

2.1 ΣΤΟΧΟΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ

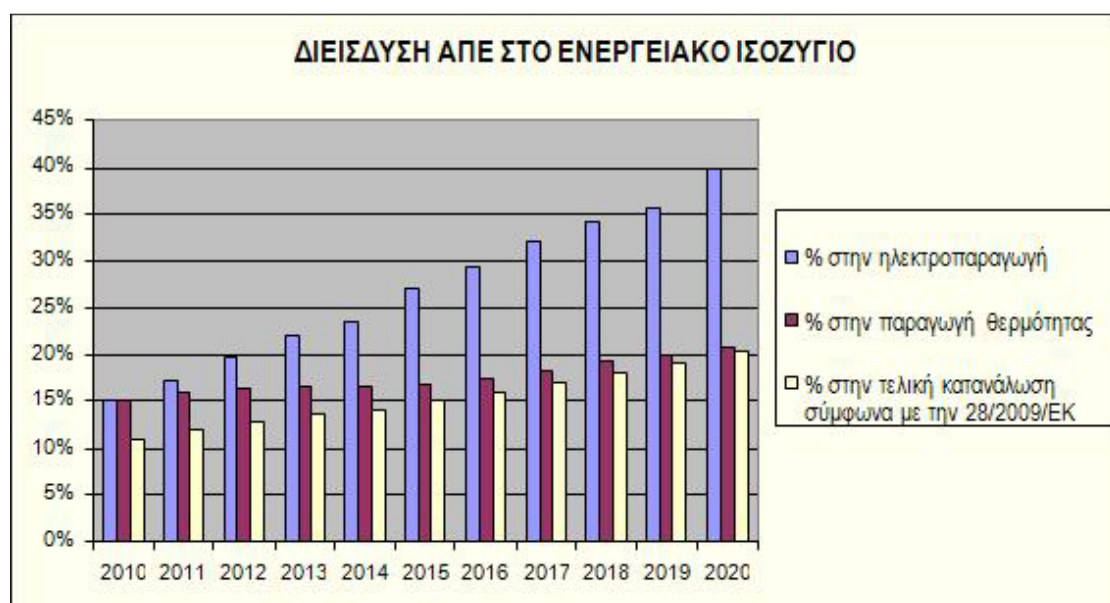
Η ενέργεια αποτελεί έναν από τους καθοριστικούς παράγοντες για την επίτευξη των στόχων της ανάπτυξης, απασχόλησης και αειφορίας εντός των συνόρων της ΕΕ. Η κοινότητα επιβεβαιώνει την ουσιαστική συμβολή της στην προώθηση στοχευμένων πολιτικών παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας στα πλαίσια μιας ευρύτερης προσπάθειας αντιμετώπισης των προκλήσεων της παγκοσμιοποίησης. Μία από τις προκλήσεις αυτές αποτελεί η διασφάλιση της κάλυψης των ενεργειακών αναγκών της ΕΕ μέσω της αξιοποίησης, κατά το μέγιστο δυνατό, όλων των μορφών ΑΠΕ, παράλληλα με την προώθηση και διασφάλιση των περιβαλλοντικών και κοινωνικοοικονομικών πλεονεκτημάτων που προσφέρει η εντατικοποίηση αξιοποίησης των ΑΠΕ. Η ΕΕ στο πλαίσιο ενίσχυσης της οικονομικής ανάπτυξης της, της ασφάλειας και επάρκειας ενεργειακών πόρων, θεώρησε επιτακτική την ανάγκη απεξάρτησης της σε συγκεκριμένο ποσοστό από τα ορυκτά καύσιμα. Υπέδειξε την ανάγκη αποτροπής της κλιματικής αλλαγής (Ρίο Ντε Τζανέιρο, 1992) και υπέγραψε τον Δεκέμβριο του 1997 το Πρωτόκολλο του Κιότο. Σύμφωνα με το Πρωτόκολλο αυτό τα κράτη-μέλη δεσμεύτηκαν να μειώσουν τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου τουλάχιστον κατά 5% μεταξύ των ετών 2008-2012, σε σχέση με τα επίπεδα του 1990 (Κιότο, 1998). Με βάση τον στόχο παραγωγής ενέργειας και διασφάλισης της περιβαλλοντικής προστασίας η ΕΕ έθεσε τον Μάρτιο του 2007, τον πιο πρόσφατο στόχο που αφορά στην υποκατάσταση 20% της τελικής κατανάλωσης ενέργειας με «πράσινη» ενέργεια, έως το έτος 2020 (Νόμος 3423/2005). Επιπρόσθετα, όλο και μεγαλύτερο είναι το ενδιαφέρον που επικεντρώνεται τα τελευταία χρόνια στην οργανωμένη προώθηση της ενεργειακής αξιοποίησης της βιομάζας. Η ΕΕ εξέδωσε το 2004 ανακοίνωση σχετικά με το μερίδιο και τη σημασία της παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ. Ανέλαβε ανοιχτά τη δέσμευση κατάρτισης σχεδίου δράσης που αφορά ειδικά στην εναλλακτική ενεργειακή

αξιοποίηση της βιομάζας, σε μια έμπρακτη προσπάθεια ενίσχυσης της πολιτικής προώθησης της για ενεργειακούς σκοπούς. Μεγάλο, επίσης, είναι το ενδιαφέρον που επικεντρώνεται στην επί τόπου (in situ) αξιοποίηση των υπολειμμάτων βιομάζας, μέσω των θερμοχημικών μεθόδων πυρόλυσης και αεριοποίησης. Βασικό επιχείρημα προς την κατεύθυνση αυτή αποτελεί η αξιοποίηση της μέσω καινοτόμων μεθόδων και η επίτευξη υψηλών ενεργειακών αποδόσεων με περιβαλλοντική ασφάλεια (Skoulou, 2008). Οι λόγοι της ανεπαρκούς και μη αποδοτικής αξιοποίησης της βιομάζας μέχρι σήμερα είχαν να κάνουν τόσο με τις τεχνικές δυσκολίες όσο και ποικίλα κοινωνικοοικονομικά προβλήματα, όπως ανασφάλεια και έλλειψη ευελιξίας στην υιοθέτηση καλών πρακτικών καινοτόμων μεθόδων αξιοποίησης της βιομάζας που συνεισφέρουν παράλληλα στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

Το Εθνικό Σχέδιο Δράσης για τις ΑΠΕ, εκπονήθηκε στο πλαίσιο εφαρμογής της Ευρωπαϊκής Ενεργειακής Πολιτικής σε σχέση με τη διείσδυση των ΑΠΕ, την Εξοικονόμηση Ενέργειας και τον περιορισμό των εκπομπών αερίων ρύπων του θερμοκηπίου. Ειδικότερα για το σύνολο των Κρατών-Μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης, μέχρι το 2020, προβλέπεται:

- 20% μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου σε σχέση με τα επίπεδα του 1990 σύμφωνα με την Οδηγία 2009/29/ΕΚ,
- 20% διείσδυση των ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας σύμφωνα με την Οδηγία 2009/28/ΕΚ,
- 20% εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας.

Ειδικά για την Ελλάδα, ο στόχος για τις εκπομπές αερίων ρύπων του θερμοκηπίου είναι μείωση κατά 4% στους τομείς εκτός εμπορίας σε σχέση με τα επίπεδα του 2005, και 18% διείσδυση των ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση. Η Ελληνική κυβέρνηση στο πλαίσιο υιοθέτησης συγκεκριμένων αναπτυξιακών και περιβαλλοντικών πολιτικών, με το Νόμο 3851/2010 προχώρησε στην αύξηση του εθνικού στόχου συμμετοχής των ΑΠΕ στην τελική κατανάλωση ενέργειας στο 20%, ο οποίος και εξειδικεύεται σε 40 % συμμετοχή των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή, 20% σε ανάγκες θέρμανσης-ψύξης και 10% στις μεταφορές.



Εικόνα 1 Διείσδυση ΑΠΕ στο Ενεργειακό Ισοζύγιο (Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας, 2009).

Όσον αφορά τη βιομάζα, ο εθνικός στόχος ανέρχεται σε 350 MW εγκατεστημένης ισχύος έως το 2020 σύμφωνα με το Εθνικό Σχέδιο Δράσης για τις ΑΠΕ σύμφωνα με την Κοινοτική Οδηγία 2009/28/ΕC όπως ενημερώθηκε βάσει της ΥΑ Α.Υ./Φ1/οικ.19598 της 01.10.2010 όπως φαίνεται στον Πίνακα 2 (ΥΠΕΚΑ 2009).

Πίνακας 2 Εθνικοί στόχοι για τη Βιομάζα ως το 2014 και 2020 (Γερασίμου, 2011).

Έτος	2014		2020	
	Ισχύς	Ενέργεια	Ισχύς	Ενέργεια
Τομέας				
Ηλεκτροπαραγωγή	200MW	997GWh	350MW	1.745GWh
Θερμανση-Ψύξη		1.105.000ΤΙΠ		1.222.000ΤΙΠ
Μεταφορές		339.000ΤΙΠ		617.000ΤΙΠ

Για τον μήνα Μάρτιο του 2017, ημερομηνία τελευταίας ενημέρωσης από τον Λειτουργό Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας Α.Ε. (ΛΑΓΗΕ), ειδικά για ηλεκτροπαραγωγή από βιομάζα καταγράφηκε, εγκατεστημένη ισχύς 58,18 MW και παραγόμενη ενέργεια 23.285 MWh. Όπως προκύπτει από τα στοιχεία του Πίνακα 2 απέχει πολύ ο στόχος των 350 MW εγκατεστημένης ισχύος. Ο ΛΑΓΗΕ το 2015 είχε προβλέψει ότι η εγκαταστημένη ισχύς θα είχε ανέλθει στα 98 MW τον Μάρτιο του 2017 από τα 49 MW εγκατεστημένης ισχύος που είχε τον Μάρτιο του 2015 ότι δηλαδή θα είχε διπλασιαστεί. Τελικά η αύξηση ήταν μόνο της τάξης των 9 MW ποσοστό δηλαδή περίπου 18%. Συμπεραίνεται λοιπόν πως ο ρυθμός αύξησης της εγκατεστημένης ισχύος δεν είναι αρκετός για την επίτευξη του εθνικού στόχου όσο αφορά στην ηλεκτροπαραγωγή από βιομάζα.

2.2 ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

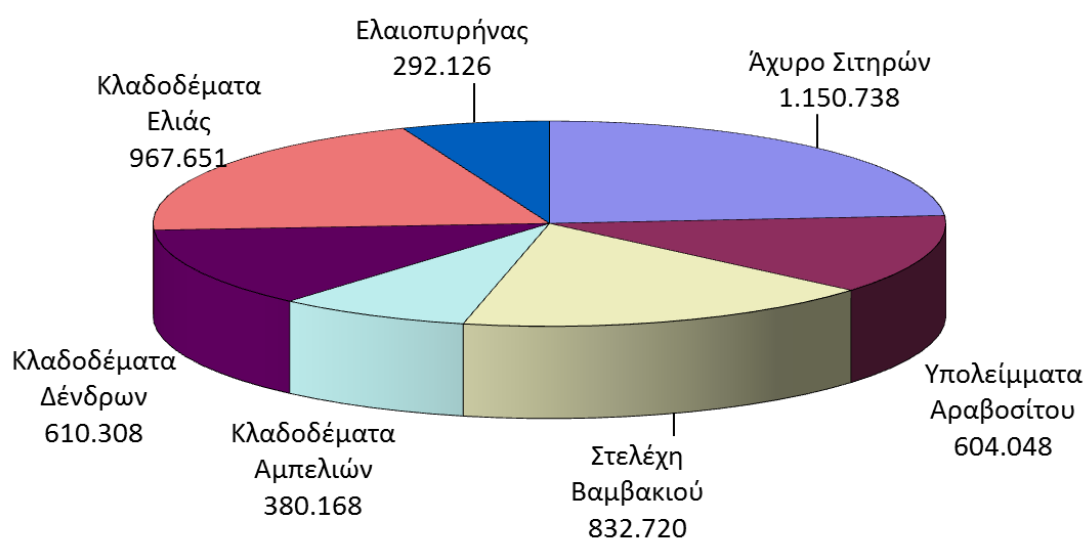
Η εκτίμηση του δυναμικού βιομάζας είναι μια δυσχερής διαδικασία λόγω της εξάρτησης της από βιολογικούς, τεχνο-οικονομικούς και κοινωνικούς παράγοντες, και απρόβλεπτες φυσικές μεταβολές. Επίσης παρουσιάζει δυσκολία ακριβούς εκτίμησης και καταγραφής των στοιχείων της πρώτης ύλης (ποσότητα, διαθεσιμότητα), λόγω:

- ποικιλομορφίας των γεωργικών καλλιεργειών και πολυκερματισμού του κλήρου
- αδυναμίας παροχής επαρκούς και διαρκούς πληροφόρησης από τους αρμόδιους φορείς
- έλλειψης ικανών εργαλείων επεξεργασίας
- πολυδιάσπασης των υπηρεσιών
- πολλαπλών χρήσεων της και την εξάρτηση από τις διάφορες βιομηχανίες/βιοτεχνίες του δευτερογενούς τομέα
- έλλειψης συγκεκριμένης μεθοδολογίας και προτύπων για τον υπολογισμό των ποσοτήτων πρώτης ύλης.

Ο Γεωργικός τομέας στην Ελλάδα αποτελεί το 6% του ΑΕΠ και το 20% της απασχόλησης και καλύπτει συνολικά 9.2 εκ εκτάρια γής συμπεριλαμβανομένων των βοσκοτόπων έκταση η οποία αποτελεί το 69% της συνολικής έκτασης της χώρας. Επίσης ευθύνεται για το 85% της

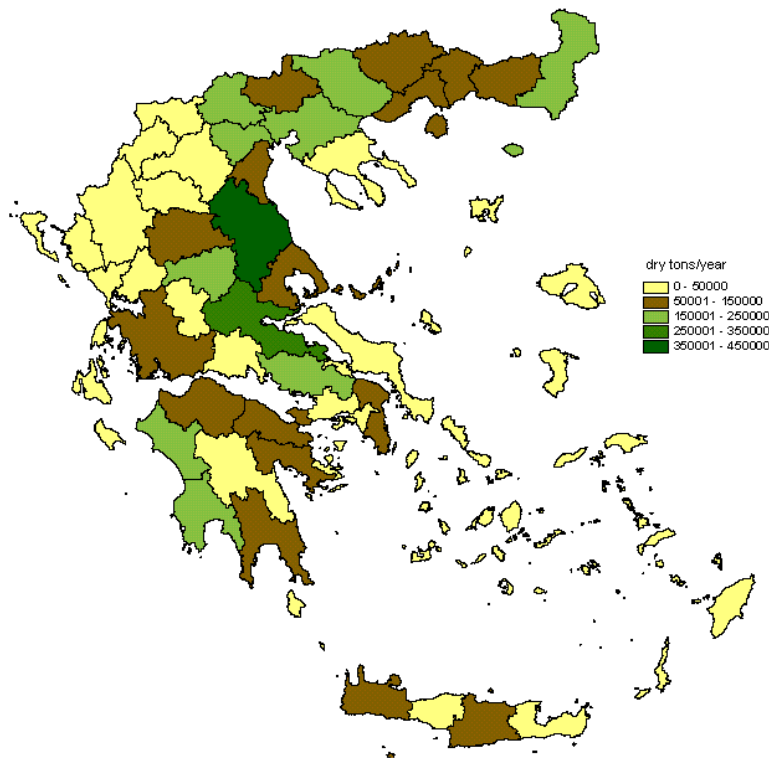
κατανάλωσης νερού στη χώρα. Το τεχνικά διαθέσιμο δυναμικό των γεωργικών υπολειμμάτων (τόνοι ξηρής ουσίας) όπως υπολογίζεται από την ελληνική στατιστική υπηρεσία ανέρχεται σε 4.9 MT ξηρής ουσίας/έτος. Τα κύρια γεωργικά υπολείμματα, σύμφωνα με την Εικόνα 2, προέρχονται κυρίως από (ΚΑΠΕ, 2013):

- Κλαδοδέματα ελιάς
- Ελαιοπυρήνας
- Άχυρο σιτηρών
- Κλαδοδέματα δέντρων
- Κλαδοδέματα αμπελιών
- Στελέχη βαμβακιού
- Υπολείμματα αραβοσίτου



Εικόνα 2 Τεχνικά διαθέσιμο δυναμικό των γεωργικών υπολειμμάτων (τόνοι ξηρής ουσίας) (ΚΑΠΕ, 2009)

Η ποσότητα αυτή αντιστοιχεί σε ενεργειακό δυναμικό περίπου 99 PJ/έτος ή 27.7 TWh. Η διασπορά του δυναμικού σε όλη την ελληνική επικράτεια εμφανίζεται στην Εικόνα 3.



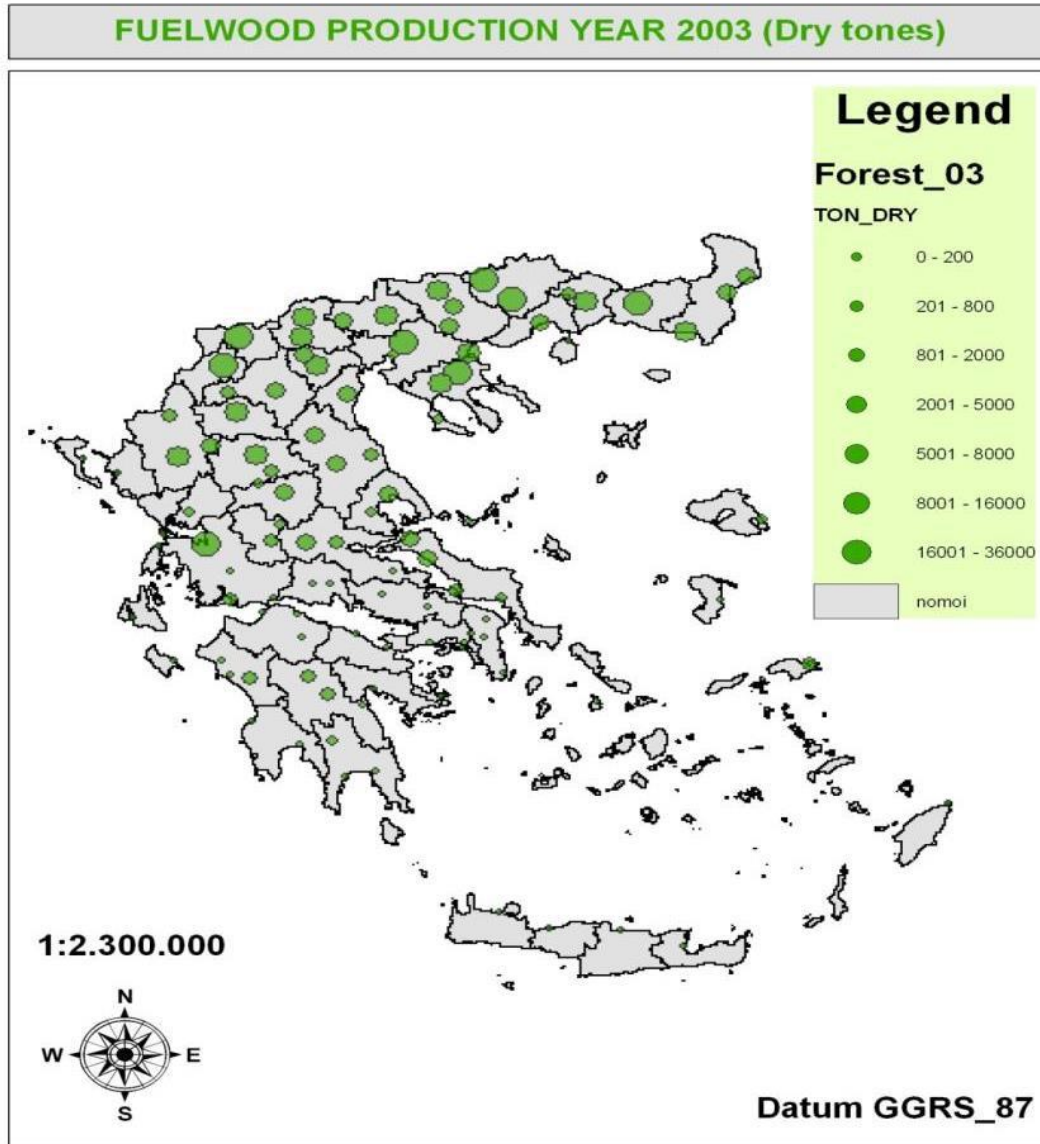
Εικόνα 3 Τεχνικά διαθέσιμο δυναμικό των γεωργικών υπολειμμάτων (ΕΛΣΤΑΤ, 2009)

Εκτός των γεωργικών υπολειμμάτων υπάρχει ένα σημαντικό δυναμικό ξυλείας και παραπροϊόντων ξυλείας δασικής προέλευσης το οποίο αντιστοιχεί σε τεχνικά διαθέσιμο δυναμικό ίσο με περίπου 410,000 τόνοι ξηρής ουσίας/έτος και ενεργειακό δυναμικό περίπου 7.7 PJ/έτος δηλαδή 2.1 TWh. (Χρήστου, 2013).

Η κατανομή του δυναμικού στον ελλαδικό χώρο φαίνεται στην Εικόνα 4. Στο συνολικό δυναμικό βιομάζας στην Ελλάδα αναλογούν και περίπου 17 εκ. τόνοι/έτος κτηνοτροφικών αποβλήτων.

Δυστυχώς στην Ελλάδα δεν πραγματοποιούνται συστηματικές καταμετρήσεις του ενεργειακού δυναμικού της διαθέσιμης βιομάζας. Μέχρι στιγμής γίνονται μόνο διάφορες γενικές και εξειδικευμένες μελέτες (Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, ΕΜΠ, ΚΑΠΕ, επενδυτές, κ.α). Χαρακτηριστικό των διαφόρων εκτιμήσεων αυτών όμως είναι οι τεράστιες αποκλίσεις μεταξύ τους που οφείλονται στις διαφορετικές παραδοχές της κάθε μελέτης, σχετικά με:

- Δείκτες καρπού/υπόλειμμα
- Ποιότητα και καταλληλότητα της γεωργικής γης
- Αποδόσεις
- Καλλιεργητικές πρακτικές (~20% απώλειες στη συγκομιδή, ~10% κατά τη μεταφορά και αποθήκευση, κλπ.)
- Διαθεσιμότητα βιομάζας

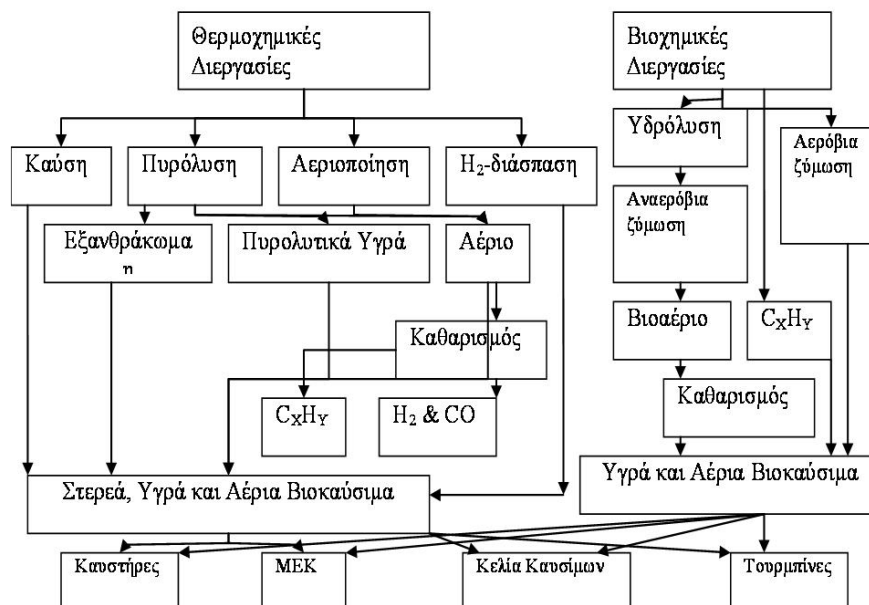


Εικόνα 4 Τεχνικά διαθέσιμο δυναμικό δασικής ξυλείας (Χρήστου,2013)

Επίσης οι ξηροθερμικές και άγονες συνθήκες καθώς και το ευαίσθητο περιβάλλον του γεωργικού τομέα στην Ελλάδα καθιστά δύσκολη την αξιοποίηση της βιομάζας σε μεγάλη κλίμακα. Ωστόσο το δυναμικό της παραγωγής ενέργειας από βιομάζα είναι αρκετά ενθαρρυντικό (ΚΑΠΕ, 2009).

2.3 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ

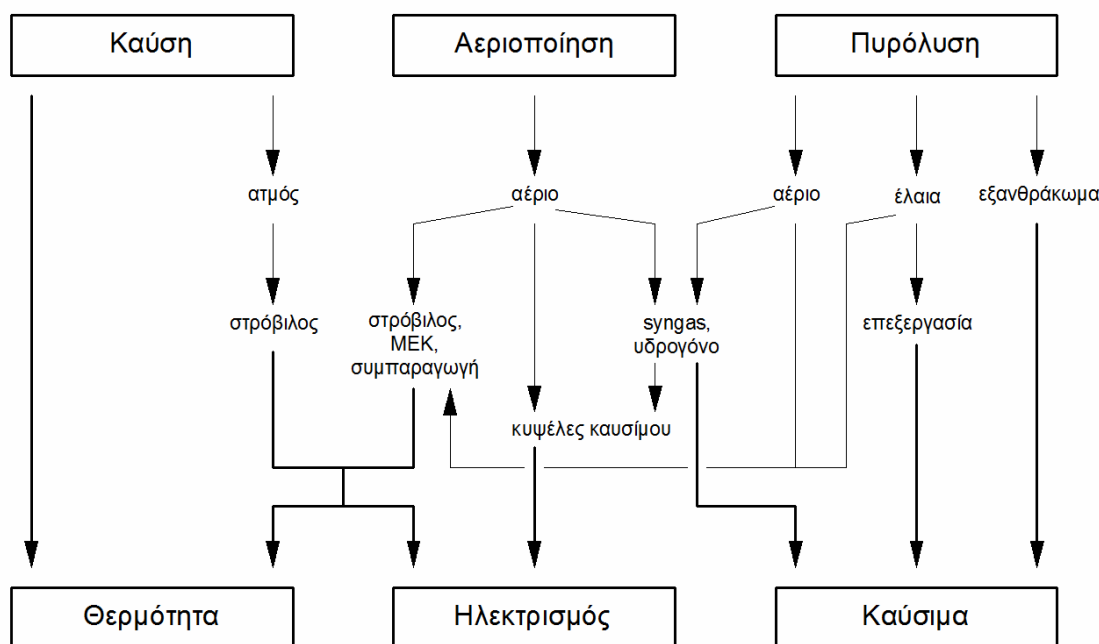
Οι διαθέσιμες τεχνικές για την ενεργειακή αξιοποίηση της βιομάζας χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: α) τις τεχνικές βιολογικής επεξεργασίας και β) τις θερμοχημικές διεργασίες αξιοποίησης βιομάζας. Ένας καθοριστικός παράγοντας για την επιλογή μίας από τις δύο κατηγορίες είναι το ποσοστό της περιεχόμενης υγρασίας στη βιομάζα. Μεγάλο ποσοστό υγρασίας συνεπάγεται ότι κατά τη θερμοχημική μετατροπή της βιομάζας θα πρέπει να εξατμιστεί η περιεχόμενη υγρασία επιβαρύνοντας το ισοζύγιο ενέργειας και ίσως, μετά από μελέτη, να οδηγήσει στην επιλογή τεχνικών βιολογικής επεξεργασίας. Επίσης, το ποσοστό του πτητικού προς μη πτητικό άνθρακα (C/C_f) βιομάζας, μεγάλος λόγος C/N και η υψηλή θερμογόνος δύναμη (LHV) είναι λόγοι που μπορεί να οδηγήσουν στην επιλογή για την αξιοποίηση της βιομάζας μέσω των θερμοχημικών διεργασιών της πυρόλυσης ή αεριοποίησης (Vamvouka et al, 2004).



Εικόνα 5 Θερμοχημικές και βιολογικές διεργασίες αξιοποίησης βιομάζας.

2.3.1 Θερμοχημικές Διεργασίες Αξιοποίησης

Οι θερμοχημικές διεργασίες αξιοποίησης βιομάζας σύμφωνα με την Εικόνα 6 διακρίνονται στην καύση, πυρόλυση και αεριοποίηση.



Εικόνα 6 Θερμοχημικές διεργασίες αξιοποίησης βιομάζας (Faaij, 2006)

Καύση

Η διεργασία της καύσης, είναι η πλέον διαδεδομένη και τεχνολογικά ώριμη θερμοχημική διεργασία ενεργειακής αξιοποίησης βιομάζας. Η τεχνολογία της καύσης εφαρμόζεται τόσο σε μικρή κλίμακα όπως οι οικιακές εστίες θέρμανσης όσο και σε βιομηχανική κλίμακα όπως εφαρμογές αξιοποίησης υπολειμμάτων ξυλείας και αγροτικών υποπροϊόντων για παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού. Ο θερμικός βαθμός απόδοσης των σύγχρονων βιομηχανικών εγκαταστάσεων καύσης φθάνει έως και το 80% και επιτυγχάνεται σε λέβητες ενώ ο ηλεκτρικός ανέρχεται στο 20% και επιτυγχάνεται είτε με τη χρήση αμοστροβίλου είτε σε μικρότερες εφαρμογές με τη χρήση μηχανής Stirling. Σύγχρονη εφαρμογή υψηλού βαθμού απόδοσης είναι η χρήση του Οργανικού Κύκλου Rankine (ORC) για συμπαραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού κατά την οποία ο συνολικός βαθμός απόδοσης φθάνει στο 90% με θερμικό βαθμό 85% και ηλεκτρικό 30% (Obernberger, 2004).

Πυρόλυση

Η πυρόλυση της βιομάζας (Encina et al,1998) λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασίες $300^{\circ}\text{C} < T < 600^{\circ}\text{C}$ σε αδρανή ατμόσφαιρα και αποτελεί μια ενδόθερμη διεργασία. Αρχικά λαμβάνει χώρα η απομάκρυνση της υγρασίας ($T < 300^{\circ}\text{C}$), ενώ πάνω από τη θερμοκρασία των 300°C , πραγματοποιείται η θερμική αποικοδόμηση της λιγνινοκυτταρινικής δομής της βιομάζας. Από την πυρόλυση των μοριακών δεσμών βιομάζας παράγεται το αέριο πυρόλυσης που αποτελείται κυρίως από CO , H_2 , CO_2 , CH_4 και ελαφρείς πτητικούς υδρογονάνθρακες. Παραπροϊόν αποτελεί το εξανθράκωμα πυρόλυσης που αποτελείται από τον μόνιμο άνθρακα και την τέφρα της βιομάζας, ενώ βαρείς υδρογονάνθρακες και υδατική φάση αποτελούν την πίσσα.

Αεριοποίηση

Συνοπτικά αναφέρεται ότι η αεριοποίηση είναι διεργασία θερμοχημικής μετατροπής υγρών ή στερεών καυσίμων σε καύσιμο αέριο (Basu, 2006). Στις περιπτώσεις χρήσης βιομάζας, η διεργασία πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες 800-950°C (Higman, 2006), υπό την παρουσία οξειδωτικού μέσου (συνήθως αέρας, ατμός, ή καθαρό οξυγόνο) σε ποσότητα μικρότερη της στοιχειομετρικά απαιτούμενης για την πλήρη καύση του καυσίμου (McKendry, 2003). Αποτέλεσμα είναι η μερική οξείδωση του καυσίμου και η θερμική διάσπαση της υπόλοιπης ποσότητας οδηγώντας στην παραγωγή εξανθρακώματος, πίσσας, σωματιδίων και αερίων συστατικών προϊόντων τέλει και ατελούς καύσης, όπως CO₂, CO, H₂, CH₄, H₂O και N₂ στην περίπτωση χρήσης αέρα ως μέσου οξείδωσης. Η σύσταση του παραγόμενου αερίου εξαρτάται τόσο από τις χρησιμοποιούμενες πρώτες ύλες (καύσιμο, πληρωτικό μέσο, οξειδωτικό μέσο) όσο και από λειτουργικές παραμέτρους της διεργασίας (τεχνολογία αεριοποίησης, γεωμετρία αντιδραστήρα, συνθήκες λειτουργίας κλπ.) και καθορίζει το ενεργειακό περιεχόμενό του. (Κουφοδήμος, 2009)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ - ΑΔΕΙΟΔΟΤΗΣΗ - ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

3.1 ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

Στην προσπάθεια της Ελλάδας για εναρμόνιση με τις ευρωπαϊκές οδηγίες σε σχέση με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και την γενική τάση που επικρατεί για χρήση πιο ήπιων μορφών ενέργειας αλλά και για απλοποίηση και επιτάχυνση της αδειοδοτικής διαδικασίας έγιναν διάφορες τροποποιήσεις στη νομοθεσία.

Στο νομοθετικό πλαίσιο περί ΑΠΕ εντάσσεται ιδίως ο νόμος 3468/2006 όπως έχει τροποποιηθεί με νεότερους νόμους μεταξύ των οποίων οι νόμοι 4062/2012, 4152/2013, 4203/2013, 4254/2014, 4296/2014, 4315/2014, 4342/2015, 4409/2016 και 4414/2016. Σημαντικές αλλαγές στο ν. 3468/2006 επέφερε ο ν. 3851/2010 με στόχο τη μείωση του χρόνου αδειοδότησης των έργων ΑΠΕ και την παράλληλη κατά το δυνατόν ροή των επί μέρους σταδίων της αδειοδοτικής διαδικασίας που εκτελούνταν σειριακά. Πιο αναλυτικά οι νόμοι που αφορούν κυρίως την ενεργειακή εκμετάλλευση της βιομάζας με θερμοχημικές μεθόδους είναι οι ακόλουθοι (με όποιες τυχόν επιμέρους τροποποιήσεις έγιναν με του νόμους που αναφέρονται πιο πάνω):

- **2010 Νόμος 3851/2010 (ΦΕΚ 85Α/04-06-2010):** Επιτάχυνση της ανάπτυξης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και άλλες διατάξεις σε θέματα αρμοδιότητας του Υπουργείου Παραγωγικής Ανασυγκρότησης, Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΑΠΕΝ πρώην ΥΠΕΚΑ).
- **2009 Α28 Ν 3747/2009:** Σύμβαση για το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Δασών.
- **2008 Β-32 ΥΑ 846:** Τιμές ανάθεσης υλοτομικών και λοιπών συγκομιστικών εργασιών έτους 2008.
- **2007 Υ.Α. Αριθμ. Δ6/Φ1/οικ. 13310 (ΦΕΚ 1153Β/10-07-2007):** Διαδικασία έκδοσης αδειών εγκατάστασης και λειτουργίας σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.
- **2007 Β90 Υ.Α.:** Πίνακας Διατίμησης Δασικών Προϊόντων, διαχειριστικού έτους 2007.
- **2006 Υ.Α. 104248/ΕΥΠΕ/ΥΠΕΧΩΔΕ/2006:** Περιεχόμενο, δικαιολογητικά και λοιπά στοιχεία των προμελετών περιβαλλοντικών επιπτώσεων (ΠΠΕ) και μελετών περιβαλλοντικών επιπτώσεων (ΜΠΕ) καθώς και συναφών μελετών περιβάλλοντος, έργων ΑΠΕ.
- **2005 Υ.Α. Α.Π. Δ5-ΗΛ/Β/οικ. 8311 (ΦΕΚ 655Β/17-05-2005):** Έγκριση του Κώδικα Διαχείρισης του Συστήματος και Συναλλαγών Ηλεκτρικής Ενέργειας
 - **2008 Υ.Α. Δ5/ΗΛ/Β/Φ.1.10/1086/10413 (ΦΕΚ 937Β/21-05-2008):** Τροποποίηση των διατάξεων του Κώδικα Διαχείρισης του Συστήματος και Συναλλαγών Ηλεκτρικής Ενέργειας σχετικά με την Τρίτη Μέρα Αναφοράς (ΦΕΚ Β'655/17.5.2005).

- **2003 Β – 552 ΥΑ 1726:** Διαδικασία προκαταρκτικής περιβαλλοντικής εκτίμησης και αξιολόγησης, έγκρισης περιβαλλοντικών όρων, καθώς και έγκρισης επέμβασης ή παραχώρησης δάσους ή δασικής έκτασης στα πλαίσια της έκδοσης άδειας εγκατάστασης σταθμών ηλεκτροπαραγωγής, από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ).

3.2 ΑΔΕΙΟΔΟΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Για την κατασκευή και την λειτουργία ενός σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ, απαιτείται η έκδοση ή υπογραφή σχετικών αδειών και συμβάσεων. Αυτές χορηγούνται από τους αρμόδιους κατά περίπτωση φορείς κατόπιν αιτήσεως που συνοδεύεται από τα απαραίτητα δικαιολογητικά και μελέτες. Γενικά, τα βήματα που χρειάζεται να γίνουν είναι τα εξής:

- Έκδοση Άδειας Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΡΑΕ).

Ταυτόχρονα (παραλληλισμός διαδικασιών) αιτήσεις για:

- Διατύπωση Προσφοράς Σύνδεσης του σταθμού παραγωγής στο Σύστημα ή σε Δίκτυο (αρμόδιος Διαχειριστής – ΔΕΗ ή ΔΕΣΜΗΕ).
- Έγκριση Περιβαλλοντικών Όρων (Ε.Π.Ο.) ή Απαλλαγή από Ε.Π.Ο. (Περιφέρεια).
- Άδεια Επέμβασης σε δάσος ή δασική έκταση, εφόσον απαιτείται, ή γενικά των αναγκαίων αδειών για την απόκτηση του δικαιώματος χρήσης της θέσης εγκατάστασης του έργου (Περιφέρεια).

Ταυτόχρονα (παραλληλισμός διαδικασιών) ενέργειες για:

- Έκδοση Άδειας Εγκατάστασης (με ενσωματωμένη Ενιαία Άδεια Χρήσης Νερού και Εκτέλεσης Έργων όταν πρόκειται για Μικρό Υδροηλεκτρικό Σταθμό) (Περιφέρεια).
- Έκδοση Οικοδομικών Αδειών (όπου απαιτείται εκτέλεση δομικών έργων) ή άλλων αδειών και εγκρίσεων που τυχόν απαιτούνται και μπορούν να εκδοθούν χωρίς να υπάρχει ακόμα η Άδεια Εγκατάστασης (Πολεοδομία ή αρμόδια κατά περίπτωση αρχή).
- Υπογραφή Σύμβασης Σύνδεσης στο Σύστημα ή σε Δίκτυο (αρμόδιος Διαχειριστής – ΔΕΗ ή ΔΕΣΜΗΕ).
- Υπογραφή Σύμβασης Αγοραπωλησίας Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΕΣΜΗΕ)
- Δοκιμαστική Περίοδος και έκδοση Άδειας Λειτουργίας (Περιφέρεια).

Η διαδικασία αυτή διαφοροποιείται ανάλογα με την εγκατεστημένη ισχύ του σταθμού παραγωγής, την χρησιμοποιούμενη τεχνολογία και τον τόπο εγκατάστασης, όπως φαίνεται από τον σχετικό «Πίνακα Αδειών και Εγκρίσεων Έργων ΑΠΕ» (Πίνακας 15, ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι:).

3.3 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η εξέταση της οικονομικής σκοπιμότητας για μια επένδυση είναι απαραίτητη διαδικασία και τα αποτελέσματα της είναι πολύ σημαντικός παράγοντας στην διαδικασία λήψης της τελικής απόφασης για την δημιουργία της επένδυσης.

Σύμφωνα με τον IRENA (International Renewable Energy Agency) και την μελέτη που εκπόνησε το 2012, τα στοιχεία που πρέπει να ληφθούν υπόψη για τον υπολογισμό του κόστους ενεργειακής αξιοποίησης της βιομάζας για ηλεκτροπαραγωγή ή συμπαραγωγή είναι:

- Είδος της βιομάζας: Η βιομάζα βρίσκεται σε πολλές διαφορετικές μορφές με διαφορετικές ιδιότητες οι οποίες επηρεάζουν τον τρόπο χρήσης της για ανάκτηση ενέργειας.
- Μετατροπή της βιομάζας: Αυτή είναι η διαδικασία κατά την οποία η βιομάζα θα μετασχηματιστεί στην μορφή η οποία θα δώσει την ενέργεια για παραγωγή θερμότητας ή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Τεχνολογία ηλεκτροπαραγωγής: Υπάρχουν διάφορες ώριμες τεχνολογίες οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ηλεκτροπαραγωγή ή συμπαραγωγή.

Λαμβάνοντας υπόψη τα πιο πάνω καθώς και άλλους παράγοντες όπως το κόστος κεφαλαίου για κάθε περίπτωση, το συνολικό κόστος εγκατάστασης, την τιμή της βιομάζας ο IRENA υπολογίζει το ανηγμένο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας LCOE H/E (USD/kWh) που ορίζεται ως εξής:

$$\text{LCOE} = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

Όπου, I_t είναι το κόστος επένδυσης για το έτος t , M_t οι λειτουργικές δαπάνες και τα έξοδα συντήρησης, F_t τα κόστη καυσίμου για το έτος t , E_t μονάδες παραγόμενης Η/Ε για το έτος t , r το προεξοφλητικό επιτόκιο και n η διάρκεια ζωής της μονάδας κατά κατηγορία πρωτογενούς ενέργειας.

Ουσιαστικά το LCOE είναι η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται ώστε ένα έργο να έχει έσοδα ίσα με το κόστος, λαμβάνοντας υπόψη ένα προεξοφλητικό επιτόκιο.

Πρέπει να τονιστεί ότι η ανάλυση δεν περιλαμβάνει τον αντίκτυπο των κυβερνητικών κινήτρων ή τις επιδοτήσεις, ούτε τυχόν τιμολόγηση του CO₂, ούτε τα οφέλη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στη μείωση του εξωτερικού κόστους. Επίσης το προεξοφλητικό επιτόκιο, για όλες τις περιπτώσεις θεωρείται πάντα 10%. Τα συμπεράσματα της ανάλυσης φαίνονται στον Πίνακα 3. Η μελέτη περιλαμβάνει δύο περιπτώσεις αεριοποίησης, μια για ηλεκτροπαραγωγή και μία για συμπαραγωγή, και κρίνει ότι μπορούν να είναι οικονομικά βιώσιμες και ανταγωνιστικές υπό προϋποθέσεις σε σχέση με τις υπόλοιπες ΑΠΕ ιδιαίτερα όταν ο LCOE είναι στο ελάχιστο όριο (0.07-0.24 USD/kWh για ηλεκτροπαραγωγή και 0.11-0.28 USD/kWh για συμπαραγωγή).

Πίνακας 3 Τιμές LCOE (USD/kWh) για ΑΠΕ το 2010 (IRENA 2012)

Υδροηλεκτρική Ενέργεια				
	Κόστος Εγκατάστασης (USD/kW)	Λειτουργικές δαπάνες και έξοδα συντήρησης (% της αρχικής επένδυσης)	Συντελεστής δυναμικότητας (%)	LCOE (2010 USD/kWh)
Μεγάλης κλίμακας	1050-7650	2-2,5	25-90	0,02-0,19
Μικρής κλίμακας	1300-8000	1-4	20-95	0,02-0,27
Ανακαίνιση/Αναβάθμιση	500-1000	1-6		0,01-0,05
Φωτοβολταϊκά				
	Κόστος Εγκατάστασης (USD/kW)		Απόδοση (%)	LCOE (2010 USD/kWh)
<u>Οικιακά</u>				
Απλό σύστημα	3,8-5,8		14	0,25-0,65
Σύστημα με μπαταρία	5-6		14	0,36-0,71
<u>Μεγάλης κλίμακας</u>				
Σύστημα λεπτής πλάκας πυριτίου	3,6-5		8-9	0,26-0,59
Βιομάζα				
	Επενδυτικό κόστος (USD/kW)		Βαθμός μετατροπής σε ηλεκτρική ενέργεια (%)	LCOE (2010 USD/kWh)
Λέβητας	1880-4260		35	0,06-0,21
Καυλάζουσα κλίνη ανακυκλοφορίας/ Ρευστοποιημένη κλίνη ανακυκλοφορίας	2170-4500		35	0,07-0,21
Αεριοποιητής	2140-5700		35	0,07-0,24
Λέβητας για CHP	3550-6820		35	0,07-0,29
Αεριοποιητής για CHP	5570-6545		35	0,11-0,28
Εξοπλισμός παραγωγής Βιοαερίου	1917-2436		35	0,09-0,12
Χωνευτήρας	2574-6104		35	0,06-0,15
Εξοπλισμός Συγκοίσης	140-850		35	0,04-0,13
Αιολική ενέργεια				
	Κόστος Εγκατάστασης (USD/kW)	Λειτουργικές δαπάνες και έξοδα συντήρησης (% της αρχικής επένδυσης)	Συντελεστής δυναμικότητας (%)	LCOE (2010 USD/kWh)
<u>Χερσαίες</u>				
Κίνα/Ινδία	1300-1450	Μη διαθέσιμα	20-30	0,06-0,11
Ευρώπη	1850-2100	0,013-0,025	25-35	0,08-0,14
Νότια Αμερική	2000-2200	0,005-0,015	30-45	0,07-0,11
<u>Υπεράκτιες</u>				
Ευρώπη	4000-4500	0,027-0,048	40-50	0,14-0,19
Η/Ε από ηλιακά θερμικά συστήματα				
	Κόστος Εγκατάστασης (USD/kW)	Λειτουργικές δαπάνες και έξοδα συντήρησης (% της αρχικής επένδυσης)	Συντελεστής δυναμικότητας (%)	LCOE (2010 USD/kWh)
Parabolic trough				
Χωρίς αποθήκευση	4600	0,02-0,35	20-25	0,14-0,36
Με 6 ώρες αποθήκευση	7100-9800	0,02-0,35	40-53	0,14-0,36
Ηλιακός Πύργος				
Αποθήκευση 6-7,5 ώρες	6300-7500	0,02-0,35	40-45	0,17-0,29
Αποθήκευση 12-15 ώρες	9000-10500	0,02-0,35	65-80	0,17-0,29

Συγκρίνοντας το LCOE της Βιομάζας, με αυτά των συμβατικών καυσίμων και της πυρηνικής ενέργειας βλέπουμε ότι η προσφορά Η/Ε από βιομάζα μπορεί να είναι ανταγωνιστική. Όμως όχι σε όλες τις περιπτώσεις. Το άνω άκρο του εύρους (0,28) υποδηλώνει, ότι οι πολλοί παράγοντες που εμπλέκονται στον καθορισμό του LCOE, καθιστούν μερικές φορές το κόστος

παραγωγής Η/Ε από βιομάζα, απαγορευτικό. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης φαίνονται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4 Συγκεντρωτικός πίνακας εύρους LCOE Η/Ε (USD/kWh) κατά κατηγορία πρωτογενούς ενέργειας

Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας		
<i>Υδροηλεκτρική Ενέργεια</i>	0,01 – 0,27	
<i>Αιολική Ενέργεια</i>	0,06 – 0,19	
<i>Ηλιακή Ενέργεια</i>	0,14 – 0,36	
<i>Φωτοβολταϊκά Συστήματα</i>	0,25 – 0,71	
<i>Βιομάζα</i>	0,06 – 0,29	
Συμβατικά καύσιμα		
	<u>Χώρες OECD</u>	<u>Χώρες εκτός OECD</u>
<i>Άνθρακας</i>	0,07 - 0,14	0,03 - 0,08
<i>Πετρέλαιο</i>	0,12	0,40
<i>Φυσικό Αέριο</i>	0,08 – 0,12	0,04 – 0,10
Πυρηνική Ενέργεια		
	<u>Χώρες OECD</u>	<u>Χώρες εκτός OECD</u>
<i>Πυρηνικό Καύσιμο</i>	0,08 – 0,12	0,04 – 0,10

Η ανάλυση των δυνατοτήτων μείωσης του κόστους εξοπλισμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από βιομάζα περιπλέκεται από το φάσμα των διαθέσιμων τεχνολογιών, από το στάδιο της τεχνολογίας, καθώς και από τις συχνά σημαντικές διαφοροποιήσεις στις τοπικές τεχνολογικές λύσεις. Η έρευνα για δυνατότητες εξοικονόμησης κόστους είναι επί του παρόντος σε εξέλιξη. Οι προσπάθειες για την ενσωμάτωση της βιομάζας με την παραδοσιακή γεωργία, για παράδειγμα, μέσω της εντατικοποίησης της γεωργίας, μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της απόδοσης και μείωση των τιμών. Βιώσιμες τεχνικές συγκομιδής, όπως συγκομιδή με ένα πέρασμα, μπορεί να μειώσει την κατανάλωση καυσίμου κατά την συγκομιδή σημαντικά. Επιπλέον, η ανάπτυξη συνεργιών μεταξύ συγκομιδής και μεταφοράς μπορεί επίσης να εμπεριέχει εξοικονόμηση κόστους.

Σε μελέτη των Obernberger I., Thek G., (2008) υπολογίστηκαν για αεριοποίηση βιομάζας σε διαφορετικούς τύπους συσκευών οι δαπάνες που φαίνονται στον Πίνακα 5.

Πίνακας 5 Επενδυτικές δαπάνες σχετιζόμενες με την ηλεκτροπαραγωγή σε μονάδες αεριοποίησης (€) (Oberberger I., Thek G., 2008)

	DD-GasE 540	DD-GasE 600	UD-GasE+ ORC 2,076	FB-GasE+ ORC 4,500
Εγκαταστάσεις, Υποδομη	218000	224000	340000	468000
Φούρνοι Βραστήρες Αεριοποιητές	1533000	2004000	4975000	12470000
Καπναέριο Καθαρισμός με αέριο	Περιλαμβάνονται	Περιλαμβάνονται	Περιλαμβάνονται	Περιλαμβάνονται
Αποθήκευση και μεταφορά τέφρας	Περιλαμβάνονται	Περιλαμβάνονται	Περιλαμβάνονται	Περιλαμβάνονται
Ανάκτηση θερμότητας	Περιλαμβάνονται	Περιλαμβάνονται	Περιλαμβάνονται	Περιλαμβάνονται
Μεταφορά Καυσίμου	Περιλαμβάνονται	Περιλαμβάνονται	Περιλαμβάνονται	Περιλαμβάνονται
Γερανός	Περιλαμβάνονται	Περιλαμβάνονται	Περιλαμβάνονται	Περιλαμβάνονται
Ηλεκτρικές εγκαταστάσεις	Περιλαμβάνονται	Περιλαμβάνονται	Περιλαμβάνονται	Περιλαμβάνονται
Υδραυλικές εγκαταστάσεις	Περιλαμβάνονται	Περιλαμβάνονται	Περιλαμβάνονται	Περιλαμβάνονται
Χαλυβουργικά	Περιλαμβάνονται	Περιλαμβάνονται	Περιλαμβάνονται	Περιλαμβάνονται
Μονάδα ΣΗΘ	660000	720000	2315000	4575000
Σχεδιασμό	215000	276000	630000	1455000
Χώρος αποθήκευσης καυσίμων	10000	163000	242000	677000
Οχήματα	25000	25000	50000	140000
Επενδυτικές Δαπάνες	2661000	3412000	8552000	19785000
Ειδικό επενδυτικό κόστος [€/kW_{el}]	4928	5687	4120	4397

Όπου,

- DD-GasE 540, αεριοποιητής κατερχόμενης ροής με μηχανή εσωτερικής κάυσης ισχύος 540 kW_{el}.
- DD-GasE 600, αεριοποιητής αεριοποιητής κατερχόμενης ροής με μηχανή εσωτερικής κάυσης, ισχύος 600 kW_{el}.
- UDGasE + ORC 2076 αεριοποιητής ανερχόμενης ροής με μηχανή εσωτερικής κάυσης και ταυτόχρονη διεργασία ORC, συνολικής ισχύος 2076 kW_{el}.
- FB-GasE+ORC 4500 αεριοποιητής ρευστοποιημένης κλίνης και ταυτόχρονη διεργασία ORC FB-GasE+ORC 4500, συνολικής ισχύος 4500 kW_{el}.

Ενδεικτικά για μονάδες κάυσης βιομάζας το ειδικό επενδυτικό κόστος κυμαίνεται, μεταξύ **2390 - 5257 €/kW_{el}** ενώ για μονάδες αεριοποίησης μεταξύ **4120-5687 €/kW_{el}**

Στον Πίνακα 6 φαίνονται ετήσια και ειδικά κόστη παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από αεριοποίηση βιομάζας.

Πίνακας 6 Ετήσια και ειδικά κόστη παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από αεριοποίηση βιομάζας

	Μονάδες	DD-GasE 540	DD-GasE 600	UD-GasE+ ORC 2,076	FB-GasE+ ORC 4,500
Επιτόκιο	%/έτος	7	7	7	7
Κόστος Κεφαλαίου	€/έτος	377443	462585	1183157	2720549
Κόστος συντήρησης	€/έτος	111301	135793	354779	750023
Σύνολικά κόστη κεφαλαίου	€/έτος	488744	598378	1537936	3470572
Ειδικό κόστος κεφαλαίου	€/kWh_{el}	0,1508	0,1662	0,1235	0,1285
Τιμή καυσίμου	€/kWh _{NCV}	0,025	0,025	0,025	0,025
Κόστος διάθεσης τέφρας	€/έτος	2085	1934	4209	11672
Κόστος καυσίμου	€/έτος	206795	191774	417513	1,157668
Ατομικές ανάγκες σε ηλεκτρισμό	€/kWh _{el}	0,156	0,156	0,149	0,149
Κόστος ηλεκτρισμού	€/έτος	38518	33929	66402	381134
Παραγωγή και καθαρισμός αερίου	€/έτος	0	1339	0	294630
Μηχανή αερίου	€/έτος	5515	5077	19938	26152
Όφελος απο υπολείμματα	€/έτος	-25732	-10186	0	0
Κόστος κατανάλωσης	€/έτος	227181	235906	521563	1871256
Ειδικό κόστος κατανάλωσης	€/kWh_{el}	0,0701	0,0655	0,0419	0,0693
Κόστη προσωπικού	€/ώρα	33,9	33,9	33,9	33,9
Ετήσιες ώρες λειτουργίας CHP	Ώρες/έτος	1830	1390	4130	7560
Συνολικά κόστη προσωπικού CHP	€/έτος	62114	47180	140181	256603
Ειδικό επιπλέον κόστος παραγωγής θερμότητας CHP	€/MWh _{th}	Περιλαμβάνονται	Περιλαμβάνονται	Περιλαμβάνονται	Περιλαμβάνονται
Επιπλέον κόστος παραγωγής θερμότητας CHP	€/έτος	Περιλαμβάνονται	Περιλαμβάνονται	Περιλαμβάνονται	Περιλαμβάνονται
Μερίδιο γενικών λειτουργικών έξοδων CHP	% του I _{CHP} /έτος	Περιλαμβάνονται	Περιλαμβάνονται	Περιλαμβάνονται	Περιλαμβάνονται
Γενικά λειτουργικά έξοδα CHP	€/έτος	Περιλαμβάνονται	Περιλαμβάνονται	Περιλαμβάνονται	Περιλαμβάνονται
Ενοίκιο γης	€/έτος	3807	2965	5047	26221
Κόστος λειτουργίας	€/έτος	65921	50145	145228	282824
Ειδικό κόστος λειτουργίας	€/kWh_{el}	0,0203	0,0139	0,0117	0,0105
Μερίδιο λοιπων δαπανών	% του I _{CHP} /έτος	1,2	1,2	1,2	1,2
Λοιπές δαπάνες	€/έτος	31932	40944	102624	237420
Ειδικές λοιπές δαπάνες	€/kWh _{el}	0,0099	0,0114	0,0082	0,0088
Συνολικό κόστος παραγωγής	€/έτος	813778	925372	2307351	5862072
Ειδικό κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας	€/kWh_{el}	0,2512	0,257	0,1853	0,2171
	USD/kWh_{el}	0,3351	0,343	0,2472	0,2896

Ενδεικτικά για μονάδες καύσης βιομάζας το ειδικό κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κυμαίνεται από **0.15 -0.26 Euro/kWh_{el}** ενώ για μονάδες αεριοποίησης κυμαίνεται από **0.12-0.3 Euro/kWh_{el}** και σε αντίθεση με τις τεχνολογίες καύσης δεν εμφανίζει το φαινόμενο της οικονομίας κλίμακας όσον αφορά την εγκατεστημένη ισχύ.

Το ειδικό επενδυτικό κόστος όπως και το ειδικό κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας όλων των συστημάτων αεριοποίησης βιομάζας παραμένει σαφώς υψηλότερό από τα συστήματα καύσης βιομάζας. Ο λόγος είναι ότι τα συστήματα αεριοποίησης βρίσκονται ακόμα σε στάδιο ανάπτυξης, και διαθέτουν υψηλότερο επίπεδο πολυπλοκότητας. Αυτό υποδεικνύει ότι υπάρχει

δυνατότητα δραστικής μείωσης του κόστους των συστημάτων αεριοποίησης με περαιτέρω τεχνολογική ανάπτυξη (Oberberger I., Thek G., 2008).

Συγκρίνοντας τις πιο πάνω έρευνες φαίνεται μεγάλη διαφορά στο εύρος τιμών. Οι δύο μελέτες έχουν μεγάλη απόκλιση όσον αφορά το κόστος ηλεκτροπαραγωγής από αεριοποίηση βιομάζας. Στην μελέτη των Oberberger I., Thek G. (2008) κυμαίνεται μεταξύ **0.21 - 0.30 Euro /kWh** ενώ στην μελέτη των IRENA (2012) κυμαίνεται μεταξύ **0.06 - 0.21 Euro/kWh**. Η μέγιστη τιμή της μίας έρευνας είναι η ελάχιστη της άλλης. Γίνεται έτσι αντιληπτή η δυσκολία τυποποίησης του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας από αεριοποίηση της βιομάζας.

Σε μελέτη τους οι You et al (2016) σύγκριναν μεθόδους αεριοποίησης και καύσης με πρώτη ύλη τα αστικά οργανικά υπολείμματα. Πιο αναλυτικά συγκρίνουν ένα σενάριο δημιουργίας πολλών μικρών αποκεντρωμένων σταθμών ηλεκτροπαραγωγής με αεριοποίηση της βιομάζας με την υφιστάμενη κατάσταση στην Σιγκαπούρη στην οποία γίνεται ηλεκτροπαραγωγή μέσω καύσης της διαθέσιμης βιομάζας.

Θεωρείται ότι το κόστος εγκατεστημένης ισχύος για τις μονάδες αεριοποίησης κυμαίνεται μεταξύ **1300-1400 Euro/KW** και για τις μονάδες καύσης κυμαίνεται μεταξύ **3000 -7300 Euro/KW**. Το κόστος των εκπομπών CO₂ υπολογίζεται μεταξύ **5.6x10⁻⁴-1.15x10⁻² Euro/Kg** και το εξωτερικό κόστος εκπομπής διοξινών μεταξύ **1.0x10⁷-2.5x10⁸ Euro/Kg**, Επίσης θεωρείται μηδενική εκπομπή διοξινών για την περίπτωση της αεριοποίησης (Rabl et al., 2008) λόγω των αναγωγικών συνθηκών που επικρατούν στο αεριοποιητή οι οποίες δεν ευνοούν τον σχηματισμό διοξινών. Πιθανώς ο λόγος που υπολογίζεται χαμηλότερο κόστος εγκατάστασης για τις μονάδες αεριοποίησης να είναι η απουσία πολύπλοκων συστημάτων καθαρισμού του καυσαερίου. Η μηδενική παραγωγή διοξινών κατά την αεριοποίηση είναι υπό αμφισβήτηση όπως φαίνεται στην διεθνή βιβλιογραφία.

Η μελέτη οικονομικής σκοπιμότητας, αφού λήφθηκαν υπόψη οι πιο πάνω παραδοχές, έδειξε θετική Καθαρή Παρούσα Αξία, με 80% πιθανότητα, για το σενάριο των μικρών αποκεντρωμένων σταθμών αεριοποίησης, ενώ για την υφιστάμενη κατάσταση η ΚΠΑ ήταν αρνητική, με 100% πιθανότητα. Επίσης τα σενάρια με τους πιο πολλούς και μικρότερους σταθμούς έχουν μεγαλύτερη ΚΠΑ προφανώς λόγω μειωμένου κόστους μεταφοράς και γιατί υπολογίζεται ίσος βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης ανεξάρτητα από την εγκατεστημένη ισχύ. Τα αποτελέσματα όπως είναι αναμενόμενο είναι παρόμοια και για το Εσωτερικό Επιτόκιο Απόδοσης με μοναδική διαφορά ότι για το σενάριο αεριοποίησης το ΕΕΑ κρίνει σκόπιμη την επένδυση με πιθανότητα 95%.

Σε οικονομοτεχνική μελέτη του Παπαφώτη το 2015 για δημιουργία σταθμού ηλεκτροπαραγωγής μέσω αεριοποίησης βιομάζας ονομαστικής ισχύος 1MW αναφέρονται θετικά στοιχεία για την βιωσιμότητα του έργου. Υπολογίζεται συνολικό κόστος επένδυσης **€3.400.000** και ετήσια έξοδα **€612.400/έτος** για τα πρώτα 10 χρόνια λειτουργίας. Υπολογίζεται παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση μηχανής εσωτερικής καύσης **8000MWh/έτος** με κατανάλωση, για παραγωγή του αερίου σύνθεσης, **11000t/έτος** ελαιοπυρήνα. Λαμβάνοντας υπόψη τα πιο πάνω υπολογίζει θετική Κ.Π.Α και χρόνο αποπληρωμής **8,84 έτη**.

Για την Ελλάδα η τιμολόγηση της ηλεκτρικής ενέργειας που απορροφάται από το Σύστημα ή το Δίκτυο, εκτός από την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από φωτοβολταϊκούς σταθμούς

για τους οποίους έχουν οριστεί τιμές σύμφωνα με το ν. 3734/2009 όπως ισχύει, γίνεται σύμφωνα με το άρθρο **13 του ν. 3468/2006** όπως ισχύει τροποποιημένο και με βάση σχετικό πίνακα στον οποίο περιλαμβάνονται μεγαλύτερες τιμές ως προς έργα τεχνολογικά σύνθετα. Οι τιμές του Πίνακα 7 για τους αυτοπαραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ ισχύουν για το πλεόνασμα της ηλεκτρικής ενέργειας που διατίθεται στο Σύστημα ή το Δίκτυο, το οποίο μπορεί να ανέλθει μέχρι ποσοστό 20% της συνολικά παραγόμενης, από τους σταθμούς αυτούς, ηλεκτρικής ενέργειας, σε ετήσια βάση.

Πίνακας 7 Τιμή Ενέργειας (€/MWh) από αξιοποίηση βιομάζας. (άρθρο 13 του ν. 3468/2006)

Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από:	Τιμή Ενέργειας (€/MWh) χωρίς ενίσχυση	Τιμή Ενέργειας (€/MWh) με ενίσχυση
Βιομάζα (ή βιορευστά) που αξιοποιείται μέσω θερμικών διεργασιών (καύση, αεριοποίηση, πυρόλυση), από σταθμούς με εγκατεστημένη ισχύ ≤1MW (εξαιρουμένου του βιοαποδομήσιμου κλάσματος αστικών αποβλήτων)	198	180
Βιομάζα (ή βιορευστά) που αξιοποιείται μέσω θερμικών διεργασιών (καύση, αεριοποίηση, πυρόλυση), από σταθμούς με εγκατεστημένη ισχύ από 1MW έως και 5MW (εξαιρουμένου του βιοαποδομήσιμου κλάσματος αστικών αποβλήτων)	170	155
Βιομάζα (ή βιορευστά) που αξιοποιείται μέσω θερμικών διεργασιών (καύση, αεριοποίηση, πυρόλυση), από σταθμούς με εγκατεστημένη ισχύ >5MW (εξαιρουμένου του βιοαποδομήσιμου	148	135

κλάσματος αστικών αποβλήτων)		
------------------------------	--	--

Οι κατηγορίες «με ενίσχυση» και «χωρίς ενίσχυση» του Πίνακα 7 έχουν ως ακολούθως:

«Με ενίσχυση»: Η υλοποίηση της επένδυσης πραγματοποιήθηκε με χρήση δημόσιας ενίσχυσης, και συγκεκριμένα με χρήση άμεσης ενίσχυσης (επιχορήγηση) ή ισοδύναμης ενίσχυσης με άλλα μέσα (αφορολόγητα αποθεματικά, απαλλαγή από φόρο εισοδήματος, επιδότηση επιτοκίου) σε ποσοστό μεγαλύτερο από 20% επί του κόστους της επένδυσης όπως έχει διαμορφωθεί έως την ημερομηνία έναρξης δοκιμαστικής λειτουργίας του σταθμού ή πραγματοποίησης της σύνδεσής του, κατά περίπτωση, και αποτυπώνεται στο λογιστικό σύστημα και τις λογιστικές καταστάσεις του παραγωγού.

«Χωρίς ενίσχυση»: Η υλοποίηση της επένδυσης πραγματοποιήθηκε χωρίς τη χρήση δημόσιας ενίσχυσης όπως αυτή περιγράφεται παραπάνω (Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας).

Η Σύμβαση Πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από σταθμούς ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ ισχύει για είκοσι έτη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ

Η αεριοποίηση βιομάζας (Orrecchini et al, 2005) λαμβάνει χώρα σε υψηλότερες θερμοκρασίες ($750 < T < 1200$ °C) από ότι η πυρόλυση και αποτελεί στο σύνολό της μια πολύπλοκη, ενδόθερμη διεργασία. Πραγματοποιείται σε περιβάλλον ελεγχόμενων οξειδωτικών συνθηκών (υποστοιχειομετρικές ποσότητες οξειδωτικού μέσου όπως π.χ. αέρα), παράγοντας παράλληλα ποσότητες πίσσας και εξανθρακώματος. Η αεριοποίηση με αέρα αποτελείται στην πραγματικότητα από ένα σύνολο πολύπλοκων αντιδράσεων. Τα επιμέρους στάδια της αεριοποίησης της βιομάζας αφορούν αρχικά στην ξήρανση και πυρόλυση με την απελευθέρωση των πτητικών και την παραγωγή του εξανθρακώματος πυρόλυσης (πυρολυτικό στάδιο της αεριοποίησης και πρωτογενείς αντιδράσεις αεριοποίησης). Σε δεύτερο στάδιο πραγματοποιείται η θερμική διάσπαση και η αναμόρφωση των συμπυκνώσιμων υδρογονανθράκων προς ένα μίγμα ελαφρύτερων αέριων, ενώ ταυτόχρονα πραγματοποιείται η αεριοποίηση του εξανθρακώματος πυρολυτικής προέλευσης (Knoef, 2005). Η απαιτούμενη θερμότητα για την ολοκλήρωση της αεριοποίησης μπορεί να προέρχεται είτε από την ίδια τη διεργασία και τα στάδια εξώθερμων αντιδράσεων οξείδωσης (αυτόθερμη διεργασία) ή να παρέχεται εξωτερικά (αλλόθερμη διεργασία). Σκοπός της αεριοποίησης είναι η μεγιστοποίηση της παραγωγής ενός αερίου υψηλής θερμογόνου δύναμης με στόχο την αξιοποίησή του για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή την υψηλή συγκέντρωση H_2 , με σκοπό την αξιοποίηση του αερίου αεριοποίησης από τη χημική βιομηχανία.

Η αεριοποίηση μπορεί να θεωρηθεί πλήρης όταν όλος ο περιεχόμενος άνθρακας της βιομάζας μεταφερθεί στην αέρια φάση και για την επίτευξη του στόχου αυτού χρησιμοποιούνται διαφορετικά μέσα αεριοποίησης (αέρας, οξυγόνο, ατμός ή ειδικά μίγματα) (Mc Kendry, 2002). Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο μέσο αεριοποίησης είναι ο ατμοσφαιρικός αέρας, λόγω κόστους και διαθεσιμότητας. Το παραγόμενο αέριο τότε έχει χαμηλή θερμογόνου δύναμη ($4-6$ MJ/Nm³) (Mc Kendry, 2002). Η χρήση οξυγόνου ή ατμού αυξάνει τη θερμογόνου δύναμη του αερίου αεριοποίησης ($10-20$ MJ/Nm³), λόγω της αποφυγής αραίωσης του παραγόμενου αερίου από το αδρανές άζωτο του αέρα αλλά και της προώθησης των αντιδράσεων αναμόρφωσης του CH_4 , υδρογονανθράκων και πίσσας.

Τα βασικά συστατικά του αερίου αεριοποίησης είναι CO , H_2 , CH_4 , CO_2 και μικρές ποσότητες C_2H_x . Η συγκέντρωσή τους στο αέριο αεριοποίησης εξαρτάται τόσο από την κινητική των χημικών αντιδράσεων, όσο και από τον επαρκή χρόνο παραμονής του αερίου και εξανθρακώματος στις συνθήκες αεριοποίησης. Επιπροσθέτως, παράγοντες όπως τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά της βιομάζας (υγρασία, τέφρα, αναλογία C/N κ.α.), τύποι αντιδραστών αεριοποίησης (σταθερής κλίνης, ρευστοστερεάς κλίνης), λειτουργικοί παράγοντες όπως η θερμοκρασία (T), ποσότητα οξειδωτικού μέσου (λόγος αέρα λ για μέσο αεριοποίησης τον αέρα), ρυθμός θέρμανσης (dT/dt) κ.α. επηρεάζουν την απόδοση και τη σύσταση των προϊόντων της αεριοποίησης. Παρά το γεγονός ότι οι τεχνολογίες της αεριοποίησης βιομάζας βρίσκονται ήδη στο στάδιο

εφαρμογής τους σε βιομηχανική κλίμακα είναι ακριβές σε σχέση με τις μονάδες παραγωγής ενέργειας από τα ορυκτά καύσιμα, με αποτέλεσμα να αντιμετωπίζουν περισσότερο οικονομικά παρά τεχνικά εμπόδια για την είσοδο τους στην αγορά. Η εμπορική τους εξάπλωση φαίνεται να εξαρτάται από την ικανότητά τους να ενσωματωθούν σε ολοκληρωμένα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας (Orrecchini et al., 2005, Kim, 2003).

4.1 ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ

Υπάρχουν τρεις κύριοι τύποι αντιδραστήρων αεριοποίησης βιομάζας:

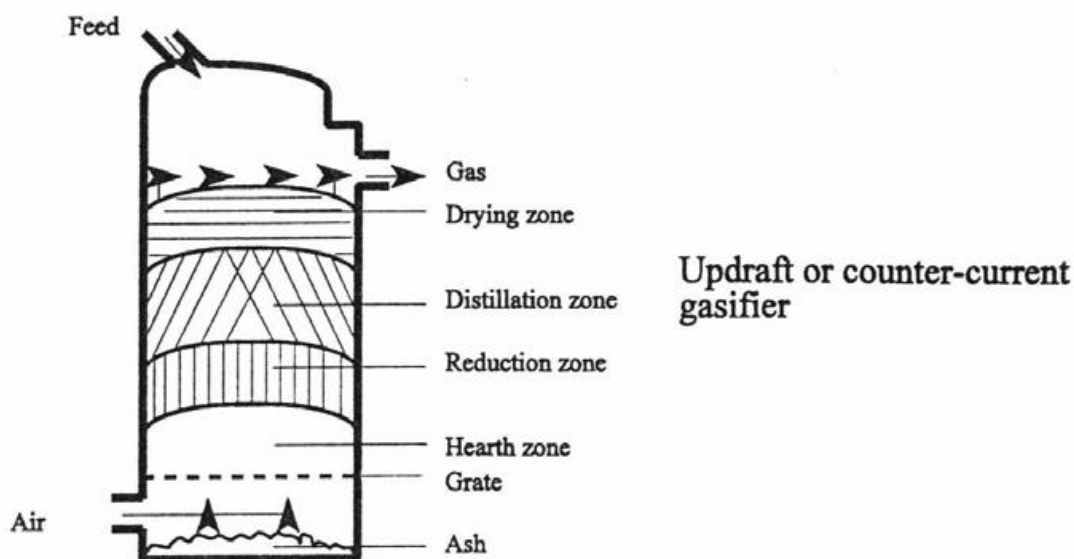
- αεριοποιητές σταθερής κλίνης (fix bed gasifiers),
- αεριοποιητές ρευστοποιημένης κλίνης (fluidized bed gasifiers) και
- αεριοποιητές πλάσματος (plasma gasifiers).

Σταθερής κλίνης

Σε ότι αφορά τους αεριοποιητές σταθερής κλίνης, η διεύθυνση ροής του αερίου διαχωρίζει τις συσκευές αεριοποίησης βιομάζας σταθερής κλίνης σε α) ανερχόμενης ροής (updraught gasifiers), β) κατερχόμενης ροής (downdraught gasifiers) και γ) οριζόντιας ροής (crossdraught gasifiers). Οι αεριοποιητές αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται σε συστήματα αεριοποίησης μικρής κλίμακας, συνήθως 500 kW_{th} και σπανιότερα έως 5 MW_{th}. (Hollingdale, 1991, McKendry, 2003).

α) Ανερχόμενης ροής:

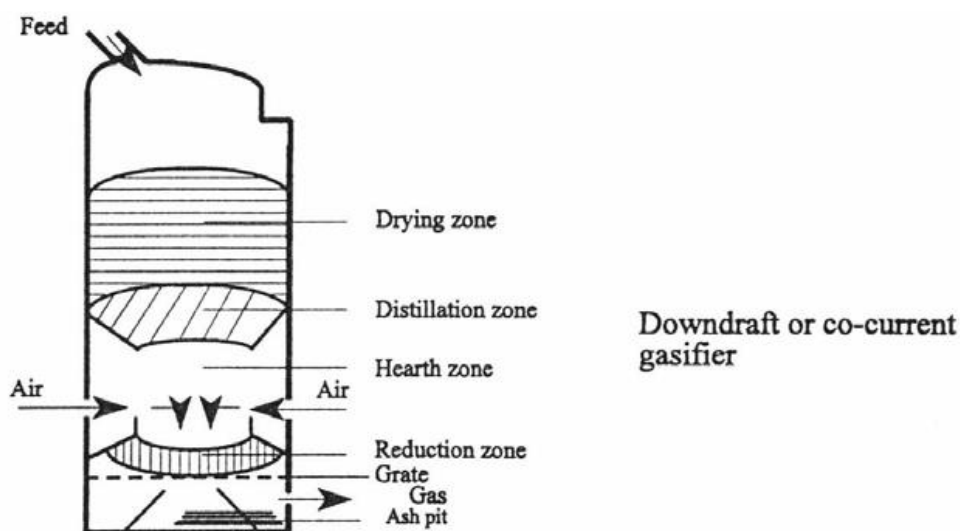
Στους αεριοποιητές ανερχόμενης ροής (Εικόνα 7) η τροφοδοσία της βιομάζας πραγματοποιείται από την κορυφή της συσκευής και η εισαγωγή του οξειδωτικού μέσου από το κάτω μέρος. Το στερεό υπόλειμμα της αεριοποίησης συγκεντρώνεται πάνω στην σχάρα όπου και καίγεται, η τέφρα συγκεντρώνεται στο κατώτατο σημείο, ενώ τα θερμά αέρια κινούνται προς το πάνω μέρος της συσκευής. Η βιομάζα κινείται αντίθετα από την ροή του αέρα και περνά διαδοχικά τις ζώνες ξήρανσης, πυρόλυσης (devolatilization or pyrolysis), οξείδωσης του άνθρακα και των πτητικών (volatile and char combustion) και κατανάλωσης του άνθρακα ή αεριοποίηση (char reduction or gasification). Κατά το στάδιο της πυρόλυσης, σχηματίζονται μεγάλες ποσότητες πίσσας, που συμπυκνώνονται μερικώς πριν το αέριο εξέλθει από τον αντιδραστήρα. Το γεγονός ότι το αέριο εξέρχεται σε χαμηλή θερμοκρασία το κάνει εξαιρετικά αποδοτικό. Στα πλεονεκτήματα αυτού του τύπου αντιδραστήρα είναι η απλότητα του καθώς και η δυνατότητα χρήσης βιομάζας με υψηλό ποσοστό υγρασίας (60%). Παρ' όλα αυτά, η μεγάλη περιεκτικότητα σε πίσσα είναι ένας ανασταλτικός παράγοντας. (Hollingdale, 1991, McKendry, 2003).



Εικόνα 7 Αεριοποιητής ανερχόμενης ροής (Stassen, 1995)

β) Κατερχόμενης ροής

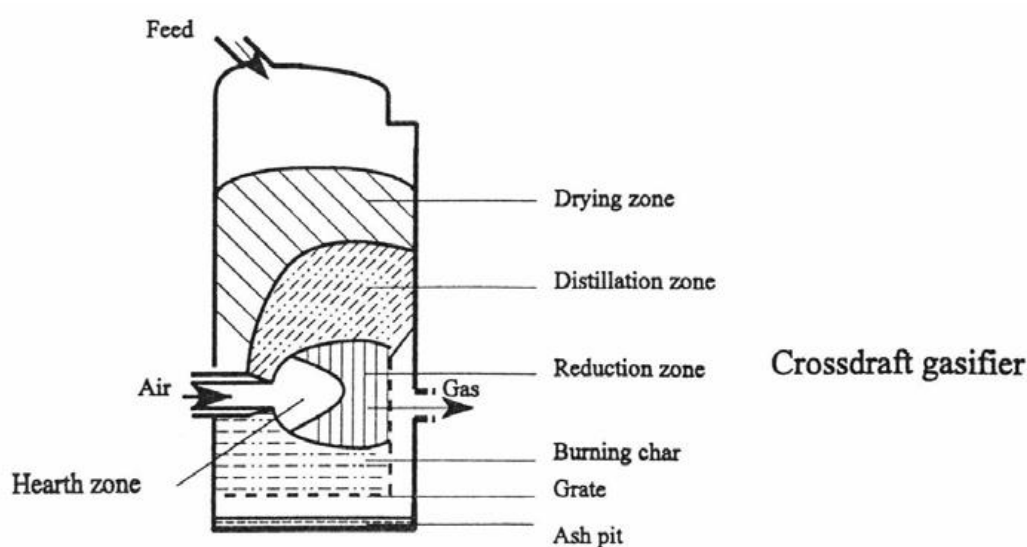
Στους αντιδραστήρες κατερχόμενης ροής (Εικόνα 8) η βιομάζα και το οξειδωτικό μέσο κινούνται προς την ίδια κατεύθυνση. Τα αέρια προϊόντα εξέρχονται από την μονάδα μέσω της θερμής ζώνης γεγονός που μειώνει αισθητά την πίσσα που δημιουργείται στην ζώνη πυρόλυσης. Λόγω της υψηλής θερμοκρασίας εξόδου η απόδοση της συγκεκριμένης διάταξης είναι μικρή. Η σχεδίαση και λειτουργία αυτού του τύπου αντιδραστήρα είναι σχετικά απλή. Το παραγόμενο αέριο έχει χαμηλή περιεκτικότητα σε πίσσα. Μειονεκτήματα της συγκεκριμένης διάταξης θεωρούνται η υψηλή συγκέντρωση τέφρας στο παραγόμενο αέριο, οι αυστηρές απαιτήσεις όσον αφορά το μέγεθος της βιομάζας και το σχετικά χαμηλό επιτρεπόμενο ποσοστό υγρασίας της βιομάζας, περίπου 25%.



Εικόνα 8 Αεριοποιητής κατερχόμενης ροής (Stassen, 1995)

γ) Οριζόντιας ή διασταυρούμενης ροής

Σε έναν αντιδραστήρα οριζόντιας ροής (Εικόνα 9) η τροφοδοσία της βιομάζας γίνεται από την κορυφή ενώ η εισαγωγή του αέρα γίνεται από το πλάι, με τα αέρια να εξέρχονται από την αντίθετη πλευρά της μονάδας στο ίδιο όμως επίπεδο. Μια θερμή ζώνη καύσης/αεριοποίησης δημιουργείται γύρω από την είσοδο του αέρα, με τις ζώνες πυρόλυσης και ξήρανσης να δημιουργούνται ψηλότερα στο πάνω μέρος του αντιδραστήρα. Γενικά αυτή η διάταξη παρουσιάζει χαμηλή απόδοση λόγω αυξημένης θερμοκρασίας εξόδου καθώς και αρκετά μεγάλη δημιουργία πίσσας (Brewer , 1991).



Εικόνα 9 Αεριοποιητής οριζόντιας ροής (Stassen, 1995)

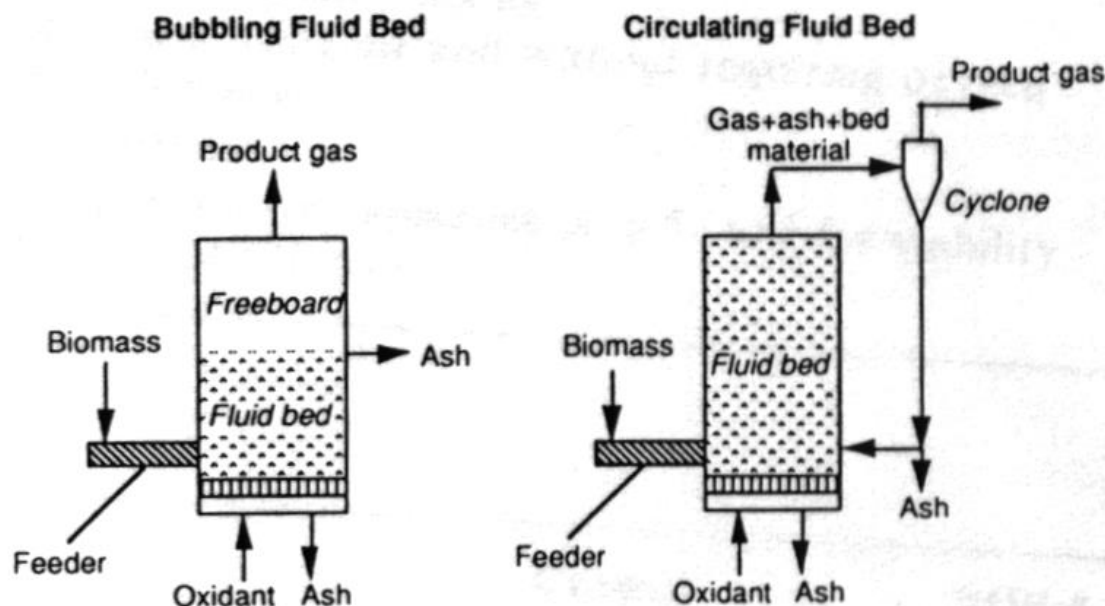
Ρευστοποιημένης κλίνης

Οι αντιδραστήρες ρευστοποιημένης κλίνης (Εικόνα 10) αποτελούνται από την κλίνη στην οποία βρίσκεται μία σχάρα πάνω στην οποία εναποτίθεται το πληρωτικό μέσο. Κάτω από τη σχάρα εισάγεται ο αέρας και πάνω από αυτή η βιομάζα. Ο αέρας ευνοεί τη ρευστοποίηση μέσω της οποίας γίνεται ανάμιξη της βιομάζας με το πληρωτικό μέσο και τον αέρα κάτι που οδηγεί στην ραγδαία αύξηση της θερμοκρασίας. Η επιβαλλόμενη θερμοκρασίες είναι της τάξης των 700-900°C και οι παραπάνω θερμοκρασίες διατηρούνται μέσω της επιβολής αντίστοιχων αναλογιών αέρα-καυσίμου (Κουφοδήμος, 2009). Οι διαδικασίες της ξήρανσης, πυρόλυσης και αεριοποίησης λαμβάνουν χώρα ταυτόχρονα. Τέλος η σχηματιζόμενη πίσσα λόγω της επαφής της με το θερμό υλικό στην κλίνη διασπάται σε επιμέρους αέρια κάτι που εξασφαλίζει χαμηλές περιεκτικότητες του αερίου σε πίσσα κατά την έξοδο του από τον αντιδραστήρα (McKendry, 2003).

Κλίνης ανακυκλοφορίας

Τέλος οι αντιδραστήρες με κλίνη ανακυκλοφορίας, Εικόνα 10, χρησιμοποιούνται σε βιομηχανίες χαρτιού. Το πληρωτικό μέσο ανακυκλοφορεί στον αντιδραστήρα και το

κυκλώνιο, όπου αφαιρείται η τέφρα. Ο αντιδραστήρας μπορεί να λειτουργήσει σε υψηλές πιέσεις κάτι που είναι ευνοϊκό όταν το παραγόμενο αέριο πρόκειται να υποστεί συμπίεση (π.χ. για την εισαγωγή του σε αεριοστρόβιλο) (McKendry, 2003).



Εικόνα 10 Αρχή λειτουργίας απλής και με ανακύκλωση ρευστοποιημένης κλίνης (Bridgwater, 1995).

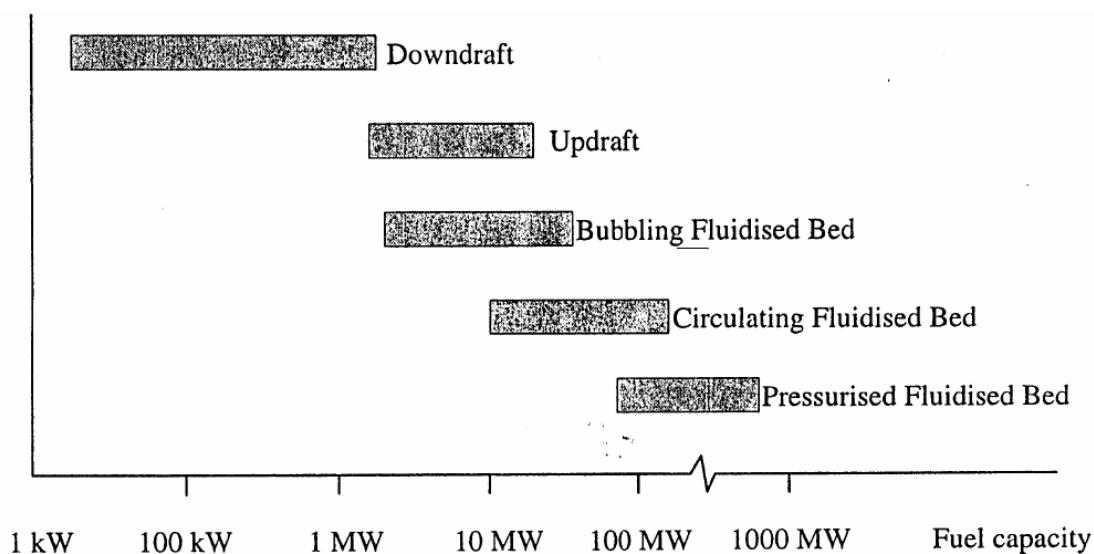
Οι αεριοποιητές ρευστοποιημένης κλίνης έχουν το πλεονέκτημα ότι εύκολα μπορεί να αυξηθεί σχεδιαστικά η δυναμικότητά τους σε σχέση με τους αεριοποιητές σταθερής κλίνης. Η διανομή του καυσίμου καθίσταται προβληματική σε μεγάλες ρευστοποιημένες κλίνες, αλλά το πρόβλημα αυτό μπορεί να λυθεί με τροφοδοσία πολλαπλών σημείων. Στους αεριοποιητές ρευστοποιημένης κλίνης σε σχέση με τους αεριοποιητές σταθερής κλίνης οι ταχύτητες των αντιδράσεων είναι μεγαλύτερες. Αυτό συμβαίνει επειδή στους αεριοποιητές ρευστοποιημένης κλίνης η μεταφορά μάζας και θερμότητας πραγματοποιείται με μεγαλύτερους ρυθμούς και η ανάμειξη των στερεών είναι καλύτερη (McKendry, 2003). Ένα πλεονέκτημα των αεριοποιητών ρευστοποιημένης κλίνης αποτελεί το γεγονός ότι η βιομάζα μπορεί να τροφοδοτείται σε ένα μεγάλο εύρος μεγέθους σωματιδίων. Επιπλέον λόγω της ταχύτητας μεταφοράς θερμότητας και της ισοθερμοκρασιακής λειτουργίας, μια ρευστοποιημένη κλίνη μπορεί να δεχτεί παρτίδες καυσίμου οι οποίες να διαφέρουν σημαντικά στο ποσοστό υγρασίας χωρίς αυτό να δημιουργεί ιδιαίτερο πρόβλημα.

Αεριοποίηση πλάσματος

Το κεντρικό στάδιο της διεργασίας αποτελείται από τον πρωτεύοντα και δευτερεύοντα αεριοποιητή πλάσματος. Ο πρωτεύων αεριοποιητής πλάσματος είναι στην ουσία μια κάμιнос πλάσματος στο εσωτερικό της οποίας διοχετεύεται ηλεκτρική ενέργεια μέσω δύο ηλεκτροδίων που έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία συνθηκών υψηλής θερμοκρασίας και την αεριοποίηση του οργανικού κλάσματος της βιομάζας ή των

αποβλήτων. Το ανόργανο κλάσμα, υπό την επίδραση των πολύ υψηλών θερμοκρασιών του πυθμένα της καμίνου τήκεται και εξέρχεται από την κάμινο υπό την μορφή υαλοποιημένου υλικού. Το οργανικό κλάσμα μετά την έξοδο του από την κάμινο υφίσταται δεύτερο στάδιο αεριοποίησης ώστε να εξασφαλιστεί ακόμα καλύτερη αεριοποίηση των συστατικών του. Η τεχνική αυτή βρίσκει εφαρμογή πιο συχνά στην επεξεργασία στερεών αποβλήτων ή επικινδύνων αποβλήτων. Στα πλεονεκτήματα της μεθόδου συγκαταλέγεται η εξαιρετικά μειωμένη παραγωγή διοξινών και φουρανίων λόγω των πολύ υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται κατά τη διεργασία. Το μεγάλο κόστος της αρχική επένδυσης καθώς και η μικρότερη απόδοση λόγω χρήσης αρκετά μεγάλου ποσοστού της παραγόμενης ενέργειας για την λειτουργία της καμίνου είναι μερικά από τα κυριότερα μειονεκτήματα της μεθόδου (Tang et al, 2005).

Σε βιομηχανικές εφαρμογές επικρατεί η τεχνολογία αντιδραστήρων ρευστοποιημένης κλίνης καθώς είναι δυνατή η παραγωγή ισχύος σε μεγάλη κλίμακα. Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται τόσο οι αεριοποιητές αναβράζουσας κλίνης οι οποίοι αποτελούν την πρώτη μορφή αντιδραστήρων ρευστοποιημένης κλίνης που αναπτύχθηκαν και εφαρμόζονται σε σχετικά μικρής κλίμακας εφαρμογές, όσο και οι αεριοποιητές ανακυκλοφορίας (Κουφοδήμος, 2009). Ενδεικτική είναι η ταξινόμηση των τεχνολογιών αεριοποίησης ανάλογα με το μέγεθος της εγκατάστασης που παρουσιάζεται στην Εικόνα 11.



Εικόνα 11 Εφαρμοζόμενες τεχνολογίες για διάφορες κλίμακες ισχύος (Waldheim et al, 1998).

4.2 ΘΕΡΜΟΧΗΜΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ

Πυρόλυση

Όπως και στις άλλες θερμοχημικές διεργασίες, η πυρόλυση συμβαίνει ταυτόχρονα με την αεριοποίηση. Κατά τη διάρκεια αυτού του σταδίου, συμβαίνει θερμική αποσύνθεση του ξηρού καυσίμου σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες (250 – 700°C) (Morf, 2001,

Basu, 2006). Λαμβάνει χώρα διάσπαση του λιγνοκυτταρικού υλικού της βιομάζας σε ελαφρύτερα αέρια (H_2 , CO , CO_2 , H_2O , CH_4), πίσσα και εξανθράκωμα. Το εξανθράκωμα είναι ένα στερεό υπόλειμμα το οποίο αποτελείται κυρίως από στερεό άνθρακα και τέφρα.

Κατά τη διαδικασία της πυρόλυσης, η ποσότητα των πτητικών αυξάνει ραγδαία και μόνο μετά τη λήξη της διαδικασίας της πυρόλυσης (πρέπει να έχουν απελευθερωθεί όλα τα πτητικά) ξεκινά η διαδικασία της αεριοποίησης.

Οξείδωση

Το οξειδωτικό μέσο περιβάλλει την πυρολυόμενη βιομάζα και αντιδρά με τα εκλύομενα πτητικά, τον άνθρακα που υπάρχει στο εξανθράκωμα και την πίσσα. Στην περίπτωση της αεριοποίησης, λόγω μικρής ποσότητας οξυγόνου (σε σχέση με την διαδικασία της καύσης), η οξείδωση των πτητικών και του άνθρακα δεν είναι πλήρης

Κατανάλωση άνθρακα ή αεριοποίηση

Οι αντιδράσεις με τη μικρότερη ταχύτητα είναι αυτές που λαμβάνουν χώρα σε αυτό το στάδιο. Πρόκειται για ετερογενείς αντιδράσεις του στερεού άνθρακα με υπόλοιπα αέρια. Αυτές οι αντιδράσεις ενεργοποιούνται σε υψηλές θερμοκρασίες ($> 700^\circ C$). Σε αυτό το στάδιο επίσης, λαμβάνουν χώρα και ομογενείς αντιδράσεις μεταξύ των πτητικών με τη διαφορά ότι είναι πολύ πιο αργές απ' ό,τι σε προηγούμενο στάδιο.

Οι κυριότερες αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στα στάδια της οξείδωσης και της αεριοποίησης είναι:

Οξείδωση	$C + O_2 \leftrightarrow CO_2 + 393KJ/mol$
Μερική οξείδωση	$C + \frac{1}{2}O_2 \leftrightarrow CO + 110KJ/mol$
Ετερογενής αντίδραση ατμού	$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2 - 118.9KJ/mol$ $C + 2H_2O \leftrightarrow CO_2 + 2H_2 - 90.2KJ/mol$
Αντιδράσεις αναμόρφωσης μεθανίου	
i) Πρωταρχική:	$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2 - 206.3KJ/mol$
ii) Δευτερεύουσα:	$CH_4 + 2H_2O \leftrightarrow CO_2 + 4H_2 - 165KJ/mol$
Αντίδραση υδραερίου	$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2 + 40KJ/mol$
Αντίδραση Boudouard	$C + CO_2 \leftrightarrow 2CO - 173.8KJ/mol$
Αντίδραση ξηρής αναμόρφωσης	$CH_4 + CO_2 \leftrightarrow 2CO + H_2O - 247.3KJ/mol$
Μεθανίωση	$C + H_2 \leftrightarrow CH_4 + 74.8KJ/mol$

4.3 ΡΥΠΑΝΤΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟΥ ΑΕΡΙΟΥ

Κατά τη θερμοχημική μετατροπή της βιομάζας υπό τις έντονα αναγωγικές συνθήκες που επικρατούν στους αντιδραστήρες αεριοποίησης, μαζί με το καύσιμο αέριο παράγονται και ανεπιθύμητα συστατικά. Οι κυριότεροι ρύποι είναι οι βαρείς υδρογονανθρακικές ενώσεις πίσσας, και τα αιωρούμενα σωματίδια Εκτός αυτών στο παραγόμενο αέριο υπάρχει και μία σειρά ανόργανων ανεπιθύμητων ενώσεων αζώτου και θείου σε μικρότερες συγκεντρώσεις (Zhang et al, 2003).

Η πίσσα αποτελεί το σημαντικότερο ανεπιθύμητο συστατικό του παραγόμενου αερίου από άποψη συγκέντρωσης μάζας, δυσκολίας κατακράτησης και δημιουργίας προβλημάτων κατά τη λειτουργία διατάξεων χρήσης και ενεργειακής αξιοποίησής του (Abatzoglou et al, 1998; McKendry, 2003). Στις υψηλές θερμοκρασιακές συνθήκες της διεργασίας, οι ενώσεις πίσσας βρίσκονται στην αέρια φάση ενώ καθώς εξέρχονται από τον αντιδραστήρα και οδεύουν προς της συσκευές διαχείρισης κυκλώνια, φίλτρα κλπ) και ενεργειακής αξιοποίησης (MEK, αεριοστρόβιλοι κλπ.) ψύχονται σχηματίζοντας συμπυκνώματα. Το σημείο συμπύκνωσης της πίσσας κυμαίνεται από 300 έως 500°C και στις συνθήκες αυτές σχηματίζεται σκουρόχρωμο κολλώδες υγρό, χαρακτηριστικής οσμής. Το εύρος διακύμανσης οφείλεται στην ύπαρξη πλήθους ενώσεων διαφορετικού μοριακού βάρους και φυσικοχημικής συμπεριφοράς (Fjellerup et al., 2005,Κουφοδήμος, 2009). Η επίδραση των συνθηκών διεργασίας και των τεχνολογιών καθαρισμού στην τελική συγκέντρωση των ανεπιθύμητων συστατικών αποτελεί ίσως το σημαντικότερο πεδίο έρευνας στην περιοχή της αεριοποίησης, καθώς έχει χαρακτηριστεί ως το πιο κρίσιμο εμπόδιο για τη διεύθυνση και εμπορική εφαρμογή της διεργασίας στην αγορά παραγωγής ενέργειας (Reed, 1998; Maniatis & Beenackers, 2000).

Το σωματιδιακό φορτίο είναι ο δεύτερος σημαντικότερος ρύπος, καθώς αν και εμφανίζεται σε υψηλές συγκεντρώσεις, οι τεχνολογίες μείωσης του είναι σε μεγαλύτερο βαθμό ανεπτυγμένες από ότι της πίσσας. Παρόλα αυτά η ανάπτυξη αποτελεσματικής και αξιόπιστης τεχνολογίας μείωσης του σωματιδιακού φορτίου, στα επιθυμητά για τις διατάξεις ενεργειακής αξιοποίησης επίπεδα, αποτελεί τεχνολογικό ζήτημα (Kuhn et al, 2008).

Η ελαχιστοποίηση της πίσσας και των σωματιδίων στο παραγόμενο αέριο επιτυγχάνεται είτε κατά τα στάδια της διεργασίας εντός του αντιδραστήρα, είτε κατά την έξοδο του αερίου προς τις διατάξεις αξιοποίησής του (Van Paasen & Kiel, 2004).

4.4 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΑΕΡΙΟΥ

Από τα μέσα της δεκαετίας του 1980 η έρευνα στον τομέα καθαρισμού και προετοιμασίας του αερίου, εντατικοποιήθηκε λόγω της σταδιακής αύξησης ισχύος των εγκαταστάσεων και του ενδιαφέροντος για παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος μέσω της χρήσης του αερίου είτε σε MEK είτε σε αεριοστρόβιλους. Μεγάλη σημασία δίνεται στον καθαρισμό του παραγόμενου αερίου από την πίσσα και το σωματιδιακό φορτίο.

Οι τεχνολογίες καθαρισμού αερίου διακρίνονται στις εξής κατηγορίες οι οποίες περιγράφονται αναλυτικά στη συνέχεια:

- Τεχνολογίες μείωσης πίσσας
- Τεχνολογίες μείωσης σωματιδιακού φορτίου

Τεχνολογίες μείωσης πίσσας

Οι τεχνολογίες μείωσης πίσσας μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε μεγάλες ομάδες που αποτελούνται από α) τις φυσικές και θερμικές μεθόδους και β) τις καταλυτικές μεθόδους.

α) Φυσικές και θερμικές διεργασίες

Η **υγρή πλύση** είναι τεχνολογία καταιονισμού, που χρησιμοποιεί συνήθως νερό ή οργανικό έλαιο, για την απομάκρυνση πίσσας και σωματιδίων, η οποία παρουσιάζει αυξημένο βαθμό απόδοσης και για το λόγο αυτό επιλέγεται σε αρκετές βιομηχανικές εφαρμογές. Το μειονέκτημά της είναι ότι ουσιαστικά δεν επιλύει το πρόβλημα της πίσσας αλλά το μεταθέτει από την αέρια στην υγρή μορφή, δημιουργώντας υγρά απόβλητα (Κουφοδήμος, 2009).

Σημαντική τεχνολογική καινοτομία στην περιοχή αποτελεί το σύστημα OLGA Tar removal το οποίο έχει αναπτυχθεί από το ερευνητικό κέντρο ECN¹ και στοχεύει στην υγροποίηση των ενώσεων πίσσας με τη χρήση προσροφητικών οργανικών ελαίων, αποφεύγοντας τη συμπύκνωση νερού. Τα οργανικά έλαια ανακτώνται ενώ η πίσσα επανατροφοδοτείται στον αντιδραστήρα^{1,2}. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνονται οι επιθυμητές συγκεντρώσεις πίσσας, ενώ δεν δημιουργούνται επιπρόσθετες ροές αποβλήτων όπως με την κλασσική υγρή πλύση.

Η **θερμική διάσπαση** επιτυγχάνεται με θέρμανση του παραγόμενου αερίου σε θερμοκρασία περίπου 1200°C έχοντας ως αποτέλεσμα τη διάσπαση των μορίων της πίσσας και την παραγωγή αερίων συστατικών μικρότερου μοριακού βάρους (Zhang et al, 2004). Με τη μέθοδο αυτή επιτυγχάνονται χαμηλές συγκεντρώσεις πίσσας (<100 mg/Nm³) έχει όμως επίπτωση στον ενεργειακό βαθμό απόδοσης, καθώς η επίτευξη των απαιτούμενων θερμοκρασιών (συνήθως η θερμοκρασία της διεργασίας δεν υπερβαίνει τους 900°C) πραγματοποιείται είτε με τη μερική καύση αερίου είτε με εξωτερική υποστήριξη¹.

Η **μερική οξείδωση** επιτυγχάνεται με την παροχή δευτερογενούς αέρα στον αντιδραστήρα αεριοποίησης σε σημείο πάνω από την κλίνη (Huben et al, 2005). Η επίδραση του δευτερογενούς αέρα έχει μελετηθεί σε εργαστηριακό αεριοποιητή ρευστοποιημένης κλίνης με καύσιμη ύλη δασικά απορρίμματα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι σημειώνεται μείωση στη συγκέντρωση της πίσσας έως και 89% κ.β. όταν

¹ www.ecn.nl

² www.renewableenergy.nl

η παροχή του δευτερογενούς αέρα είναι το 20% κ.ο. του πρωτογενούς και σε θερμοκρασία 840 – 880°C (Κουφοδήμος, 2009). Περαιτέρω αύξηση της παροχής του δευτερογενούς αέρα είχε αρνητικές συνέπειες για την έκβαση της διεργασίας καθώς οδηγεί σε μείωση του ενεργειακού περιεχομένου του αερίου (Fjellerup J., 2005).

β) Καταλυτικές διεργασίες

Η καταλυτική διάσπαση της πίσσας είναι η τεχνολογία στην οποία έχει επικεντρωθεί το ερευνητικό ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια. Σε αντίθεση με τις φυσικές διεργασίες οι οποίες ουσιαστικά δεν εξαλείφουν αλλά μετατοπίζουν το πρόβλημα της πίσσας, οι καταλυτικές διεργασίες διασπούν τις ενώσεις πίσσας με τη χρήση καταλυτικών υλικών μετατρέποντάς τες σε αέρια καύσιμα συστατικά (Zhang et al, 2004). Για τη διάσπαση απαιτούνται θερμοκρασίες 600-800°C, παραπλήσιες αυτών της αεριοποίησης, γεγονός το οποίο επηρεάζει το συνολικό βαθμό απόδοσης, αλλά σε μικρότερη έκταση από ότι στην περίπτωση της θερμική διάσπασης.

Η εφαρμογή των καταλυτών μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε μέσα στην κλίνη, όπου συμβαίνει γρήγορη απενεργοποίησή τους λόγω αυξημένων επικαθήσεων άνθρακα, είτε σε δευτερογενείς διατάξεις στην έξοδο του αντιδραστήρα. Στις περιπτώσεις αυτές το αέριο υπόκειται πρώτα σε καθαρισμό του σωματιδιακού φορτίου και στη συνέχεια γίνεται χρήση καταλυτών είτε σε κλίνες (σταθερές ή ρευστοποιημένες) είτε σε φίλτρα καταλυτικής επίστρωσης (Sutton et al, 2001). Τα κυριότερα μειονεκτήματα είναι η απενεργοποίηση των καταλυτικών υλικών κυρίως λόγω της ύπαρξης αιθάλης και δευτερευόντως λόγω αλκαλικών και θεικών ενώσεων (DAHLAM, 2008) και το υψηλό κόστος των καταλυτικών υλικών (Dayton, 2002). Για το λόγο αυτό εφαρμόζονται συνδυασμένες προσεγγίσεις χρήσης φθινών υλικών καταλυτικής δράσης στην κλίνη (ολιβίνης, δολομίτης) και έπειτα σε δεύτερο στάδιο, αφότου έχει μειωθεί το φορτίο αιθάλης σε υψηλή θερμοκρασία, εφαρμογή καταλυτών, κυρίως κραμάτων νικελίου (Sutton et al, 2001).

Τεχνολογίες μείωσης σωματιδιακού φορτίου

Οι τεχνολογίες μείωσης σωματιδιακού φορτίου είναι κατά βάση φυσικές και στοχεύουν στην κατακράτησή του, εκμεταλλευόμενες ιδιότητες όπως η μάζα, το μέγεθος, και το ηλεκτρικό φορτίο των σωματιδίων. Η εφαρμογή τους δεν συνεπάγεται μετασχηματισμό χημικής δομής παρά μόνο διαχωρισμό από την αέρια φάση και συσσώρευση είτε στη στερεή είτε στην υγρή φάση. Οι τεχνολογίες μείωσης σωματιδιακού φορτίου μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στις εξής ομάδες από α) κυκλώνια, β) σακκόφιλτρα, γ) πλυντηρίδες και δ) ηλεκτροστατικά φίλτρα.

α) Κυκλώνια

Σε ένα κυκλώνιο τα αέρια εισέρχονται περιφερειακά σε εφαπτομενική διεύθυνση με τη συσκευή και υποβάλλονται σε περιστροφική κίνηση (σπιράλ). Λόγω της φυγόκεντρου δύναμης τα σωματίδια με ικανή αδράνεια εξωθούνται και προσκρούουν στα εξωτερικά τοιχώματα του κυκλωνίου, και στη συνέχεια κατακρημνίζονται προς τη βάση της συσκευής. Το καθαρό αέριο εξέρχεται από το κέντρο του κυκλωνίου με ανοδική πορεία. Τα κυκλώνια είναι ιδιαίτερα συνήθεις συσκευές αντιρρύπανσης με χαμηλό

κόστος επένδυσης και λειτουργίας. Ωστόσο, δεν είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικά για μικρά σωματίδια λόγω της μικρής αδράνειας των σωματιδίων αυτών. Συνήθως, τα κυκλώνια χρησιμοποιούνται ως πρώτες διατάξεις για μείωση της μεγάλης συγκέντρωσης σε τέφρα ή σκόνη και επιμελέστερος καθαρισμός του αερίου επιτυγχάνεται στη συνέχεια με άλλες συσκευές. Επίσης, τα κυκλώνια δεν είναι κατάλληλα για κολλώδη σωματιδιακή ύλη (π.χ. πίσσα ή σκόνη σε απαέρια υψηλής υγρασίας), καθώς αυτό εμποδίζει την κατακρήμνισή τους μετά την επαφή με το τοίχωμα του κυκλωνίου.

β) Σακκόφιλτρα

Τα σακκόφιλτρα κατακρατούν σωματίδια βάσει του μεγέθους τους καθώς το αέριο διέρχεται ανάμεσα από το πορώδες υλικό των φίλτρων. Η συσσώρευση σωματιδιακής μάζας στην επιφάνεια των φίλτρων αυξάνει συνεχώς το βαθμό απόδοσης, αυξάνοντας ταυτόχρονα και την πτώση πίεσης. Για το λόγο αυτό ανά τακτά χρονικά διαστήματα η σωματιδιακή μάζα απομακρύνεται εφαρμόζοντας αντίθετη στιγμιαία εκτόνωση αέρα, και δόνηση.³ Η συλλογή των σωματιδίων πραγματοποιείται στο κάτω μέρος. Το υλικό κατασκευής των σακκόφιλτρων θέτει περιορισμό ως προς τη θερμοκρασία λειτουργίας (Κουφοδήμος, 2009).

γ) Πλυντηρίδες

Σε αυτές τις συσκευές, τα αέρια συνήθως σχηματίζουν ένα ανοδικό ρεύμα το οποίο συναντά σταγονίδια νερού που παράγονται με καταιονισμό. Κατά την επαφή των δύο ρευμάτων, τα σωματίδια δεσμεύονται από τα σωματίδια νερού με αποτέλεσμα να αυξάνει η αδράνειά τους. Στη συνέχεια τα σωματίδια απομακρύνονται αποτελεσματικά είτε λόγω βαρύτητας είτε τεχνητά με φυγοκέντριση. Οι διατάξεις αυτές μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντική μείωση του σωματιδιακού φορτίου (>95%) μέχρι και σε μέγεθος σωματιδίων 0,3 - 0,5 μm. Επίσης, λόγω της κάλυψης των σωματιδίων με νερό, οι πλυντηρίδες μπορούν να δεσμεύσουν αποτελεσματικά και κολλώδη σωματίδια. Μειονεκτήματα της διάταξης είναι η σχετικά μεγάλη πτώση πίεσης, η διαχείριση του ρυπασμένου υγρού που προκύπτει, η αδυναμία λειτουργίας με θερμό ρεύμα καυσαερίου και η διάβρωση στην περίπτωση που στα αέρια υπάρχουν σημαντικές συγκεντρώσεις θεικών ή νιτρικών ενώσεων.

δ) Ηλεκτροστατικά φίλτρα

Η τεχνολογία των ηλεκτροστατικών κατακρημνιστών είναι βασισμένη στη δυνατότητα ηλεκτρικής φόρτισης των σωματιδίων. Καθώς το αέριο εισέρχεται από τη διάταξη, τα αιωρούμενα σωματίδια φορτίζονται λόγω της εφαρμοζόμενης τάσης. Στη συνέχεια η ροή διέρχεται από συστοιχίες φορτισμένων πλακών, στις οποίες έλκονται και

³ www.junkerfilter.de

προσκολλούν τα σωματίδια. Η απομάκρυνση των σωματιδίων επιτυγχάνεται με περιοδική δόνηση των πλακών.

4.5 ΑΠΛΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

Η αεριοποίηση της βιομάζας είναι μια διαδικασία που λαμβάνει χώρα σε έναν αεριοποιητή και έχει σαν ιδανικό στόχο την μετατροπή όλης της στερεάς βιομάζας σε αέριο καύσιμο (αέριο σύνθεσης) το οποίο έχει συνήθως μέση θερμογόνο δύναμη 2-9 MJ/m³. Τα συστατικά τα οποία συνεισφέρουν κυρίως στο ενεργειακό περιεχόμενο του αερίου σύνθεσης είναι το H₂ και το CO.

Η πρόβλεψη της σύστασης του παραγόμενου αερίου καθώς και της θερμογόνου του δύναμης είναι αναγκαία πριν προχωρήσει κανείς στο σχεδιασμό και την ανάπτυξη ενός αεριοποιητή. Στην παρούσα εργασία γίνεται δοκιμή ενός απλού μοντέλου ισορροπίας για την προσομοίωση της διεργασίας της αεριοποίησης και την πρόβλεψη της σύστασης του αερίου σύνθεσης και της θερμογόνου του δύναμης για αεριοποιητή κατερχόμενης ροής.

Για την ανάπτυξη του μοντέλου γίνεται παραδοχή ότι όλες οι χημικές αντιδράσεις βρίσκονται σε ισορροπία. Επίσης δεν λαμβάνεται υπόψη στο υπολογισμό η πίσσα, η τέφρα και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του αεριοποιητή ούτε η χημική κινητική των αντιδράσεων. Επίσης δεν γίνονται υπολογισμοί για το στάδιο της πυρόλυσης. Θεωρείται ότι το καύσιμο αποτελείται μόνο από C, H₂ και O₂. Το παραγόμενο αέριο θεωρείται ότι αποτελείται μόνο από H₂, CO, CO₂, CH₄, N₂, και H₂O. Επίσης θεωρείται πως οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά την αεριοποίηση είναι οι ακόλουθες:



Από τις εξισώσεις (1) και (2) έχουμε την αντίδραση υδραερίου:



Η σταθερά ισορροπίας για την αντίδραση σχηματισμού μεθανίου (εξ.(3)) είναι:

$$K_1 = \frac{P_{CH_4}}{(P_{H_2})^2} \quad (5)$$

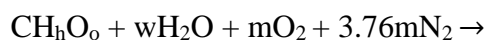
και η σταθερά ισορροπίας για την αντίδραση υδραερίου είναι :

$$K_2 = \frac{P_{CO_2} P_{H_2}}{P_{CO} P_{H_2O}} \quad (6)$$

Ο χημικός τύπος για την βιομάζα είναι της μορφής:



Η αντίδραση αεριοποίησης μπορεί να γραφεί ως ακολούθως:





Όπου:

- w : η ποσότητα του νερού στο καύσιμο σε kmol
- m : η ποσότητα του οξυγόνου σε kmol
- $x_{1,2,3,4,5}$: η ποσότητα των συστατικών αντίστοιχα

Η υγρασία στην βιομάζα συνήθως δίνεται σαν ποσοστό της υγρής βάσης της βιομάζας. Για ευκολία στην χρήση του μοντέλου και για πειραματισμό σε διαφορετικά ποσοστά υγρασίας γίνεται μετατροπή του ποσοστού υγρασίας σε kmol

Έστω ότι Π.Υ είναι το ποσοστό υγρασίας της βιομάζας

$$Π.Υ = \frac{\text{μαζα νερού}}{\text{μάζα υγρής βιομάζας}} \times 100\% \Rightarrow Π.Υ = \frac{18w}{12c+1h+16o+18w}$$

Συνεπώς,

$$w = \frac{(12c+1h+16o) \times Π.Υ}{18 \times (1-Π.Υ)}$$

Από τις πιο πάνω αντιδράσεις προκύπτουν έξι άγνωστοι, τα x_1 x_2 x_3 x_4 x_5 και m . Ως εκ τούτου χρειάζονται έξι εξισώσεις για την επίλυση του συστήματος και τον προσδιορισμό των αγνώστων. Οι εξισώσεις είναι:

Ισοζύγιο του άνθρακα:

$$1 = x_2 + x_3 + x_5 \quad (8)$$

Ισοζύγιο του υδρογόνου:

$$2w + h = 2x_1 + 2x_4 + 4x_5 \Rightarrow w + \frac{h}{2} = x_1 + x_4 + 2x_5 \quad (9)$$

Ισοζύγιο του οξυγόνου:

$$w + o + 2m = x_2 + 2x_3 + x_4 \quad (10)$$

Η σταθερά ισορροπίας για την αντίδραση μεθανίωσης (εξ.(5)) γίνεται:

$$K_1 = \frac{x_5}{x_1^2} \quad (11)$$

Η σταθερά ισορροπίας για την αντίδραση υδραερίου (εξ.(6)) γίνεται:

$$K_2 = \frac{x_1 x_3}{x_2 x_4} \quad (12)$$

Το ισοζύγιο ενέργειας της διεργασίας είναι

$$H_{f\beta\text{ιομάζας}}^0 + w(H_{f\text{H}_2\text{O}(l)}^0 + H_{(vap)}) + mH_{f\text{O}_2}^0 + 3.76mH_{f\text{N}_2}^0 = x_1H_{f\text{H}_2}^0 + x_2H_{f\text{CO}}^0 + x_3H_{f\text{CO}_2}^0 + x_4H_{f\text{H}_2\text{O}(vap)}^0 + x_5H_{f\text{CH}_4}^0 + \Delta T(x_1C_{p\text{H}_2} + x_2C_{p\text{CO}} + x_3C_{p\text{CO}_2} + x_4C_{p\text{H}_2\text{O}} + x_5C_{p\text{CH}_4} + 3.76mC_{p\text{N}_2}) \quad (13)$$

Οι ενθαλπίες σχηματισμού το υδρογόνου, του αζώτου και του οξυγόνου είναι μηδενικές σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Έτσι η εξ. (13) απλοποιείται στην:

$$H_{f\beta\text{ιομάζας}}^0 + w(H_{fH_2O(l)}^0 + H_{(vap)}) = x_2 H_{fCO}^0 + x_3 H_{fCO_2}^0 + x_4 H_{fH_2O(vap)}^0 + x_5 H_{fCH_4}^0 + \Delta T(x_1 C_{pH_2} + x_2 C_{pCO} + x_3 C_{pCO_2} + x_4 C_{pH_2O} + x_5 C_{pCH_4} + 3.76m C_{pN_2}) \quad (14)$$

Όπου,

- $H_{f\beta\text{ιομάζας}}^0$ η ενθαλπία σχηματισμού της βιομάζας
- $H_{fH_2O(l)}^0$ η ενθαλπία σχηματισμού του υγρού νερού
- $H_{(vap)}$ η ενθαλπία εξάτμισης του νερού
- $H_{fH_2O(vap)}^0$ η ενθαλπία σχηματισμού του ατμού
- $H_{fCO}^0, H_{fCO_2}^0, H_{fCH_4}^0$ η ενθαλπίες σχηματισμού των αντίστοιχων παραγόμενων αερίων
- $C_{pH_2}, C_{pCO}, C_{pCO_2}, C_{pH_2O}, C_{pCH_4}, C_{pN_2}$ οι ειδικές θερμοχωρητικότητες των αερίων προϊόντων
- $\Delta T = T_2 - T_1$
- T_2 η θερμοκρασία στην οποία γίνεται η αεριοποίηση(στην ζώνη κατανάλωσης του άνθρακα)
- T_1 η θερμοκρασία περιβάλλοντος

Η εξίσωση (13) μπορεί να απλοποιηθεί στην εξίσωση:

$$dH_{\beta\text{ιομάζας}} + wdH_{H_2O(l)} = x_1 dH_{H_2} + x_2 dH_{CO} + x_3 dH_{CO_2} + x_4 dH_{H_2O} + x_5 dH_{CH_4} + 3.76mdH_{N_2} \quad (15)$$

Όπου,

- $dH_{(\text{για κάθε αέριο})} = H_f^0 + \Delta H$ (16)
- $\Delta H = \Delta T(C_{p(g)})$
- $dH_{H_2O(l)} = H_{fH_2O(l)}^0 + H_{(vap)}$
- $dH_{(\beta\text{ομάζας})} = H_{f\beta\text{ιομάζας}}^0$

Οι εξισώσεις (8), (9), (10), (11), (12) και (15) αποτελούν το σύστημα των εξισώσεων που απαιτούνται για τον υπολογισμό των έξι αγνώστων. Οι εξισώσεις (11) και (12) είναι μη γραμμικές ενώ οι υπόλοιπες τέσσερις είναι γραμμικές. Για απλοποίηση του συστήματος:

Από την εξ.(8)

$$x_5 = 1 - x_2 - x_3 \quad (17)$$

Από την εξ.(9)

$$x_4 = w + \frac{h}{2} - x_1 - 2x_5 \quad (18)$$

Απο τις εξ. (17) και (18)

$$\begin{aligned} x_4 &= w + \frac{h}{2} - x_1 - 2(1 - x_2 + x_3) \\ \Rightarrow x_4 &= w + \frac{h}{2} - x_1 + 2x_2 + 2x_3 - 2 \end{aligned} \quad (19)$$

Από την εξ. (10)

$$m = \frac{1}{2}(x_2 + 2x_3 + x_4 - w - o) \quad (20)$$

Από τις εξ. (18) και εξ. (20)

$$m = \frac{1}{2}(-x_1 + 3x_3 + 4x_3 - 2 + \frac{h}{2} - o) \quad (21)$$

Από την εξ. (11)

$$x_5 = x_1^2 k_1 \quad (22)$$

Από τις εξ. (17) και (22)

$$\begin{aligned} 1 - x_2 - x_3 &= x_1^2 k_1 \\ \Rightarrow 1 - x_2 - x_3 - x_1^2 k_1 &= 0 \end{aligned} \quad (23)$$

Από την εξ. (12)

$$x_1 x_3 = x_2 x_4 k_2 \quad (24)$$

Από τις εξ. (18) και εξ. (24)

$$\begin{aligned} x_1 x_3 - x_2 \left(-x_1 + 2x_3 + w - 2 + \frac{h}{2} \right) k_2 &= 0 \\ \Rightarrow -k_2 x_1 x_2 + \left(w - 2 + \frac{h}{2} \right) k_2 x_2 + 2k_2 x_2^2 - x_1 x_3 + 2k_2 x_2 x_3 &= 0 \end{aligned} \quad (25)$$

Από τις εξ. (17), (19), (21) και (15) προκύπτει :

$$\begin{aligned} x_1 dH_{H_2} + x_2 dH_{CO} + x_3 dH_{CO_2} &+ \left(-x_1 + 2x_2 + 2x_3 + w - 2 + \frac{h}{2} \right) dH_{H_2O(g)} \\ &+ (1 - x_2 - x_3) dH_{CH_4} \\ &+ 3.76 \frac{1}{2} \left(-x_1 + 3x_2 + 4x_3 - 2 + \frac{h}{2} d - o \right) dH_{N_2} \\ &- dH_{\beta\text{ιομάζας}} - w dH_{H_2O(l)} = 0 \\ (dH_{H_2} - dH_{H_2O(g)} - 3.76 \frac{1}{2} dH_{N_2}) x_1 &+ (dH_{CO} + 2dH_{H_2O(g)} - \\ dH_{CH_4} + 3.76 \frac{1}{2} (3) dH_{N_2}) x_2 &+ (dH_{CO_2} + 2dH_{H_2O(g)} - dH_{CH_4} + \\ 3.76 \frac{1}{2} (4) dH_{N_2}) x_3 &+ (dH_{H_2O(g)} + dH_{H_2O(l)}) w + dH_{CH_4} + \left(-2 + \frac{h}{2} \right) dH_{H_2O(g)} + \\ \left(-2 + \frac{h}{2} d - o \right) (3.76 \frac{1}{2}) dH_{N_2} &- dH_{\beta\text{ιομάζας}} \end{aligned} \quad (26)$$

Η εξ. (26) μπορεί να γίνει:

$$Ax_1 + Bx_2 + \Gamma x_3 + \Delta w + E = 0 \quad (27)$$

Όπου,

$$A = dH_{H_2} - dH_{H_2O(g)} - 3.76 \frac{1}{2} dH_{N_2}$$

$$B = dH_{CO} + 2dH_{H_2O(g)} - dH_{CH_4} + 3.76 \frac{1}{2} (3) dH_{N_2}$$

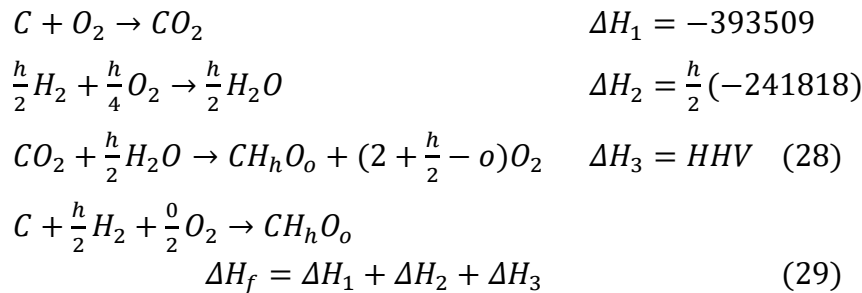
$$\Gamma = dH_{CO_2} + 2dH_{H_2O(g)} - dH_{CH_4} + 3.76 \frac{1}{2} (4) dH_{N_2}$$

$$\Delta = dH_{H_2O(g)} + dH_{H_2O(l)}$$

$$E = dH_{CH_4} + \left(-2 + \frac{h}{2}\right) dH_{H_2O(g)} + \left(-2 + \frac{h}{2}d - o\right) \left(3.76 \frac{1}{2}\right) dH_{N_2} - dH_{\text{βιομάζας}}$$

Οι εξισώσεις (23) και (25) οι οποίες είναι μη γραμμικές και η εξίσωση (27) σχηματίζουν ένα σύστημα τριών εξισώσεων με τρεις αγνώστους.

Η ενθαλπία σχηματισμού ενός kmol στερεάς βιομάζας υπολογίζεται βάσει των αντιδράσεων:



Όπου, HHV η ανώτερη θερμογόνος δύναμη της βιομάζας.

Για τον υπολογισμό της ενθαλπίας σχηματισμού βιομάζας πρέπει να είναι γνωστή η στοιχειακή ανάλυση και η ανώτερη θερμογόνος δύναμη. Η θερμογόνος δύναμη μπορεί να μετρηθεί με θερμιδόμετρο τύπου οβίδας και υπάρχουν πίνακες για διάφορα καύσιμα στη βιβλιογραφία.

Για τον υπολογισμό του χημικού τύπου της βιομάζας πρέπει να είναι γνωστή η στοιχειακή ανάλυση (% κ.β ξηρής βιομάζας) και να έχει αφαιρεθεί η τέφρα αφού δεν πρόκειται να ληφθεί υπόψη στους υπολογισμούς. Τα h και o προκύπτουν από τη διαίρεση των mol κάθε στοιχείου με τα mol του άνθρακα ώστε ο χημικός τύπος να προκύπτει ανηγμένος στα mol του άνθρακα. Π.χ

$$h = \frac{\text{ποσοστό } H / MBH}{\text{ποσοστό } C / MBC}$$

όπου MB, το μοριακό βάρος του στοιχείου

Η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση είναι:

$$C_p = \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_p \quad (30)$$

ή

$$dH = C_p dT \quad (31)$$

$$\Delta H = \int_{T_1}^{T_2} C_p dT \quad (32)$$

$$\Delta H = C_{p_m} (T_2 - T_1) \quad (33)$$

Όπου,

$$C_{p_m} = \frac{\int_{T_1}^{T_2} C_p dT}{(T_2 - T_1)} \quad (34)$$

Η μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας με την θερμοκρασία δίνεται από έναν απλό εμπειρικό τύπο (δίνονται πίνακες για τις τιμές των σταθερών a,b,c,d) (Robert et al, 1984):

$$C_{pm} = R(a + bT_m + \frac{c}{3}(4T_m^2 - T_1T_2) + \frac{d}{T_1T_2}) \quad (35)$$

Όπου, $T_m = \frac{T_1+T_2}{2}$, η μέση θερμοκρασία και a,b,c,d σταθερές για τα αέρια που λαμβάνονται υπόψη και οι τιμές τους εμφανίζονται στον Πίνακα 10 (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ I). R η παγκόσμια σταθερά των αερίων (8,314J/molK). Υπολογίζονται έτσι οι ειδικές θερμοχωρητικότητες για όλα τα αέρια (C_{pi}). Ορίζοντας αρχική και τελική θερμοκρασία T1 και T2 αντίστοιχα υπολογίζεται η ενθαλπική αλλαγή ΔH μέσω της εξίσωσης (33) για όλα τα παραγόμενα αέρια. Ακολούθως υπολογίζεται ο όρος $dH_{(για\ κάθε\ αέριο)}$ στην εξ.(16).

Η σταθερά ισορροπίας K είναι συνάρτηση της θερμοκρασία και ισχύει:

$$-RT\ln K = \Delta G^0 \quad (36)$$

Όπου, ΔG^0 η ελεύθερη ενέργεια σχηματισμού του Gibbs. Οι τιμές της για διάφορα αέρια εμφανίζονται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ I:

Η σχέση μεταξύ της ΔG^0 και θερμοκρασίας μπορεί να εμφανιστεί:

$$\frac{d\Delta G^0/RT}{dT} = \frac{-\Delta H^0}{RT^2} \quad (37)$$

και άρα

$$\frac{\Delta G^0}{RT} = -\ln K$$

Συνεπώς,

$$\frac{d\ln K}{dT} = \frac{\Delta H^0}{RT^2} \quad (38)$$

Η εξίσωση (38) δείχνει την επίδραση της θερμοκρασίας στην τιμή της σταθεράς ισορροπίας. Αν η ΔH^0 είναι αρνητική, δηλαδή η αντίδραση είναι εξώθερμη, η τιμή της σταθεράς ισορροπίας K θα μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Αφού η ενθαλπία σχηματισμού είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας η εξίσωση (38) μπορεί να ολοκληρωθεί ως εξής:

$$\ln K = \int \frac{\Delta H^0}{RT^2} + dT + I \quad (39)$$

Όπου I η σταθερά ολοκλήρωσης.

Η ΔH^0 δίνεται από τον τύπο(Robert et al, 1984):

$$\frac{\Delta H^0}{R} = \frac{J}{R} + (\Delta a)T + \frac{\Delta b}{2}T^2 + \frac{\Delta c}{3}T^3 - \frac{\Delta d}{T} \quad (40)$$

όπου, J μια σταθερά, και $\Delta a, \Delta b, \Delta c, \Delta d$ οι σταθερές υπολογισμού της ειδικής θερμοχωρητικότητας.

Από τις εξισώσεις (39) και (40) :

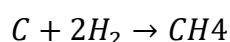
$$\ln K = \frac{-J}{RT} + (\Delta a) \ln T + \frac{\Delta b}{2} T + \frac{\Delta c}{3} T^2 - \frac{\Delta d}{2T^2} + I \quad (41)$$

Από τις εξισώσεις (36) και (41)

$$\Delta G^0 = J - RT(\Delta a \ln T + \frac{\Delta b}{2} T + \frac{\Delta c}{3} T^2 - \frac{\Delta d}{2T^2} + I) \quad (42)$$

Οι εξισώσεις (40)-(42) χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της σταθεράς ισορροπίας K για κάθε θερμοκρασία αντίδρασης T. Με γνωστή ΔH^0 , ΔG^0 στην θερμοκρασία περιβάλλοντος (298 K) (Πίνακας 11, ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι:), υπολογίζονται οι σταθερές J και I.

Για τον υπολογισμό των Δa , Δb , Δc , Δd για την αντίδραση σχηματισμού μεθανίου:



$$\Delta = CH_4 - C - 2H_2$$

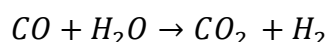
$$\Delta a = a_{CH_4} - a_C - 2a_{H_2}$$

$$\Delta b = b_{CH_4} - b_C - 2b_{H_2}$$

$$\Delta c = c_{CH_4} - c_C - 2c_{H_2}$$

$$\Delta d = d_{CH_4} - d_C - 2d_{H_2}$$

Η ίδια διαδικασία ισχύει και για την αντίδραση υδραερίου.



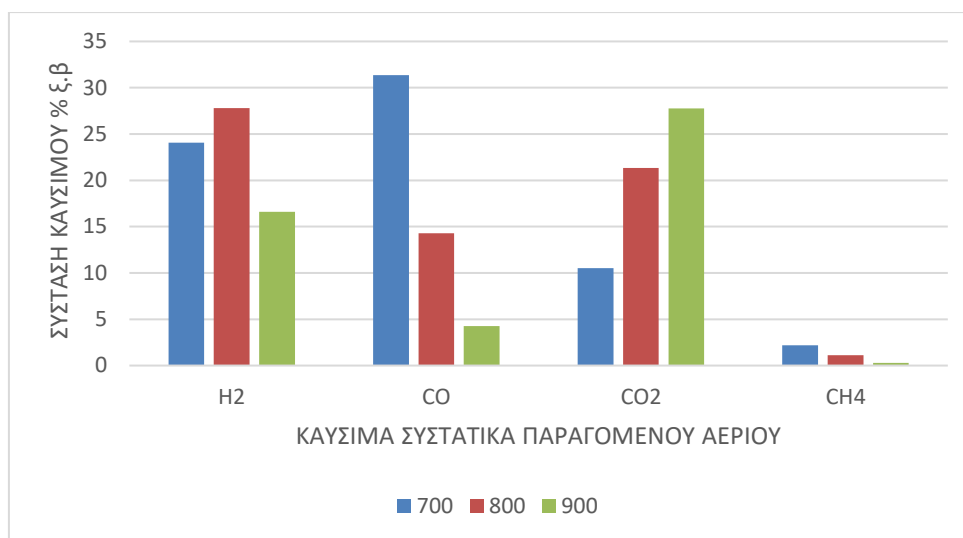
Αφού γίνουν όλοι οι υπολογισμοί το σύστημα των έξι εξισώσεων επιλύεται με τη βοήθεια του Microsoft EXCEL solver και δίνεται η τιμή για τα m , x_1 , x_2 , x_3 , x_4 , x_5 , για διαφορετικές θερμοκρασίες και ποσοστά υγρασίας της βιομάζας. Τα αποτελέσματα από την δοκιμή του μοντέλου φαίνονται στα πιο κάτω διαγράμματα για ελαιοπυρηνόξυλο με χημικό τύπο $CH_{1.41}O_{0.68}$ για την μέση σύσταση ξύλου με χημικό τύπο $CH_{1.44}O_{0.66}$. Ο χημικός τύπος προκύπτει από την στοιχειακή ανάλυση (Πίνακας 8).

Στοιχειακή Ανάλυση	Ελαιοπυρήνας % ξηρής βάσης	Ξύλο % ξηρής βάσης
C	48.59	50
H	5.73	6
N	1.57	0
O	40.48	44

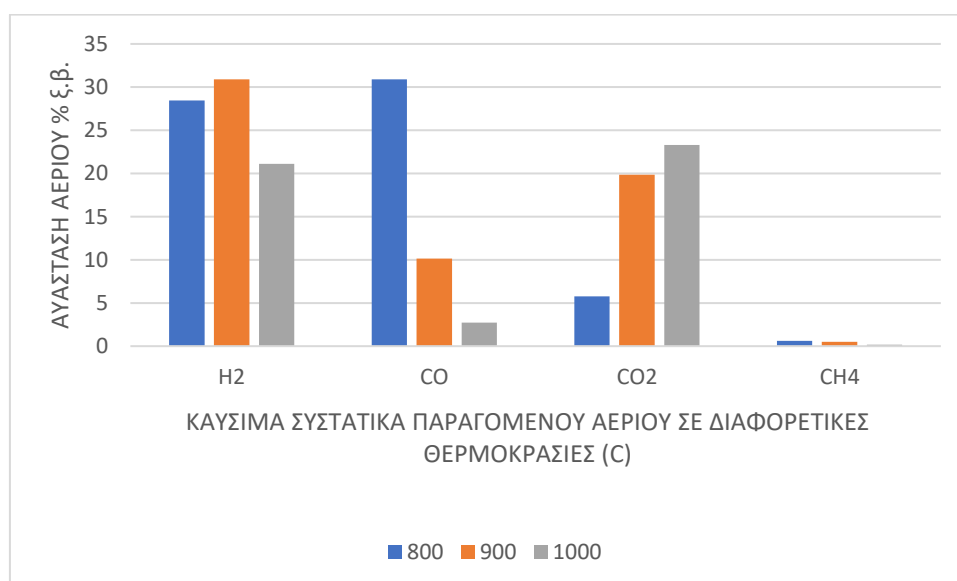
Πίνακας 8 Στοιχειακή ανάλυση ελαιοπυρήνα και ξύλου.

Στην Εικόνα 12 φαίνεται η σύσταση του αερίου σύνθεσης για διαφορετικές θερμοκρασίες. Παρατηρείται συνεχής μείωση του CO και αντίστοιχη αύξηση του CO₂ με την αύξηση της θερμοκρασίας, ενώ όσο αφορά την παραγωγή H₂

παρουσιάζει αύξηση από τους 700°C έως και του 800°C ενώ μετά μειώνεται σημαντικά μέχρι τους 900°C. Οι ίδιες τάσεις παρατηρούνται και στην Εικόνα 13.



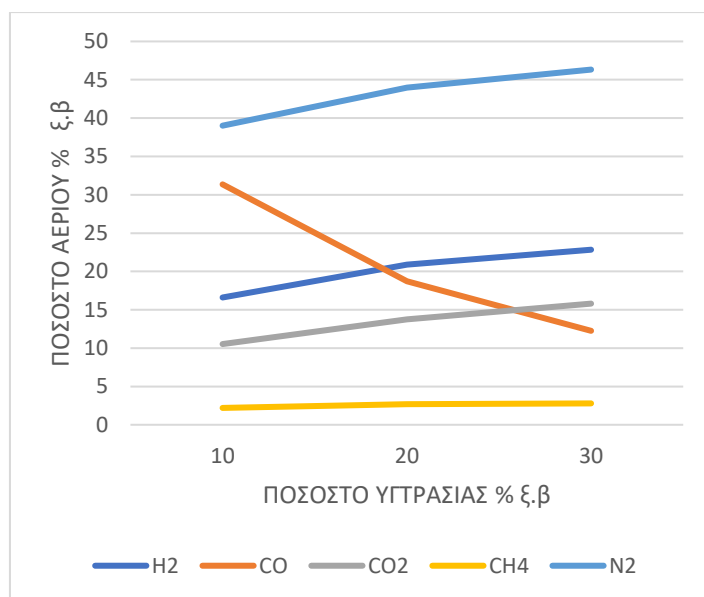
Εικόνα 12 Μεταβολή σύστασης παραγόμενου αερίου συναρτήσει της μεταβολής της θερμοκρασίας για ελαιοπυρήνα με 10% υγρασία και λόγο αέρα λ=0.35



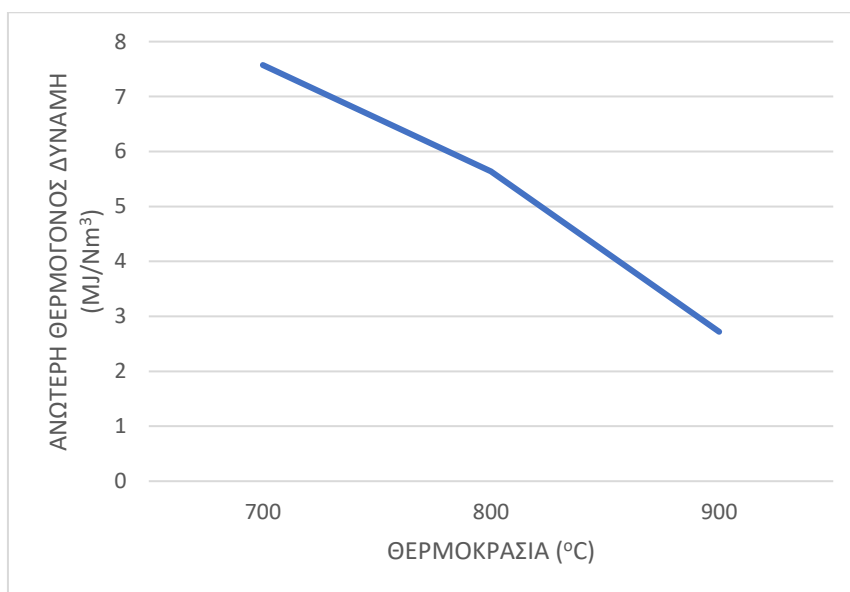
Εικόνα 13 Μεταβολή σύστασης παραγόμενου αερίου συναρτήσει της μεταβολής της θερμοκρασίας για ξύλο με 10% υγρασία και λόγο αέρα λ=0.35

Στην Εικόνα 14 φαίνεται η μεταβολή της σύστασης του παραγόμενου αερίου με την μεταβολή του ποσοστού υγρασίας. Στην εικόνα παρατηρείται αύξηση του ποσοστού του H₂ και του CO₂ με αύξηση του ποσοστού υγρασίας, ενώ ταυτόχρονα το

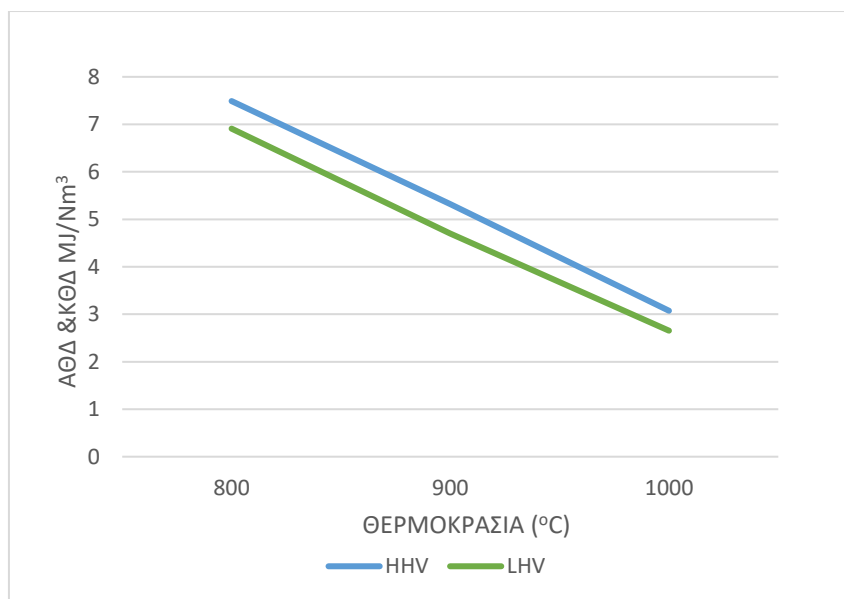
CO μειώνεται όσο το ποσοστό υγρασίας αυξάνεται για θερμοκρασία 700°C. Η συγκέντρωση του μεθανίου παραμένει σε πολύ χαμηλά επίπεδα.



Εικόνα 14 Μεταβολή της σύστασης του παραγόμενου αερίου συναρτήσει του ποσοστού υγρασίας για ελαιοπυρήνα στους 700°C.



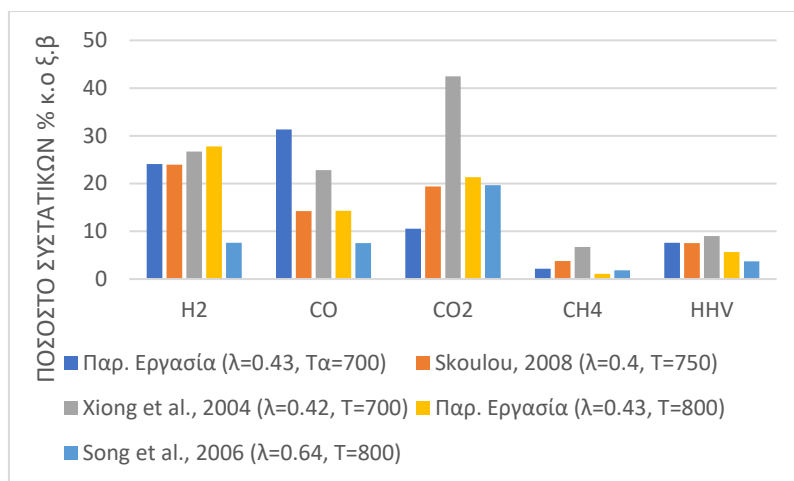
Εικόνα 15 Ανώτερη θερμογόνος δύναμη παραγόμενου αερίου συναρτήσει της θερμοκρασίας για ελαιοπυρήνα με 10% υγρασία και λόγο αέρα λ=0.35



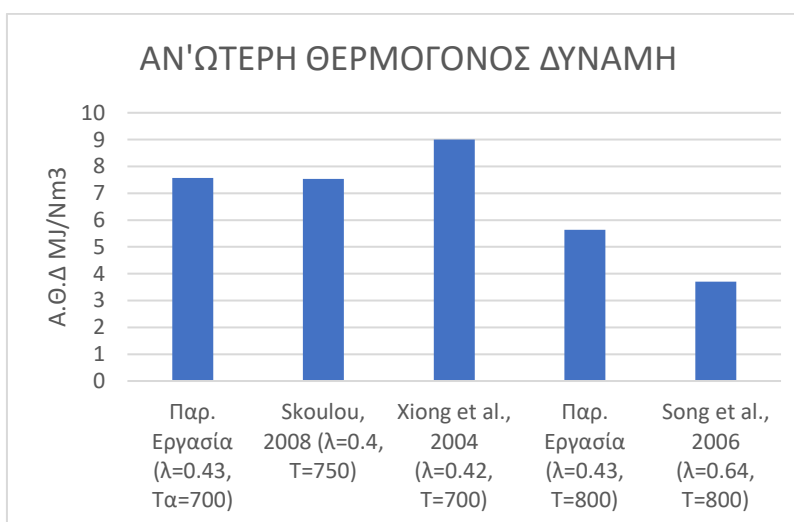
Εικόνα 16 Ανώτερη και κατώτερη θερμογόνος δύναμη παραγόμενου αερίου συναρτήσει της θερμοκρασίας για ξύλο με 10% υγρασία και λόγο αέρα $\lambda=0.35$

Όπως εμφανίζεται στην Εικόνα 15 και η ανώτερη θερμογόνος δύναμη του παραγόμενου αερίου μειώνεται όταν η θερμοκρασία αυξάνεται. Αυτή συμπεριφορά είναι αναμενόμενη καθώς, όπως φαίνεται στην Εικόνα 12, υπάρχει μείωση του ποσοστού όλων των καύσιμων συστατικών και αύξηση του ποσοστού του CO₂. Με την αύξηση της θερμοκρασίας δεν ευνοούνται οι αναγωγικές αντιδράσεις.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα το μοντέλου της παρούσας εργασίας με δεδομένα από τη βιβλιογραφία, φαίνεται η δυσκολία της προσομοίωσης της αεριοποίησης με ένα απλό μοντέλο ισορροπίας. Τα αποτελέσματα του μοντέλου θεωρούνται ικανοποιητικά, για την απλότητα που το χαρακτηρίζει και τις παραδοχές που έχουν γίνει, παρά τις εμφανείς αποκλείσεις από τα πειραματικά δεδομένα, τα οποία με τη σειρά τους δεν ακολουθούν πάντα τις ίδιες τάσεις. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι τα αρχικά αποτελέσματα του μοντέλου δεν πλησίαζαν επαρκώς τα βιβλιογραφικά δεδομένα. Για τον λόγο αυτό έγινε προσαρμογή των αποτελεσμάτων με χρήση διορθωτικών συντελεστών ούτως ώστε να συμβαδίζουν με μεγαλύτερη ακρίβεια με τα δεδομένα της βιβλιογραφίας. Επίσης τα αποτελέσματα είναι στα επιτρεπτά όρια ακρίβειας μόνο για συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασιών (700-1000° C) για τους συγκεκριμένους συντελεστές διόρθωσης.



Εικόνα 17 Σύγκριση της σύστασης του παραγόμενου αέριου με τη βιβλιογραφία.



Εικόνα 18 Σύγκριση της ανώτερης θερμογόνου δύναμης του παραγόμενου αερίου με τη βιβλιογραφία.

Η αεριοποίηση βιομάζας για παραγωγή ενός πιο εύχρηστου καυσίμου (αέριο σύνθεσης) φαίνεται μια υποσχόμενη μέθοδος καθώς παράγει καύσιμο με μέση θερμογόνο δύναμη (2-9 MJ/Nm³), το οποίο μπορεί εύκολα να χρησιμοποιηθεί σε μηχανές εσωτερικής καύσης και αέριοστροβίλους. Ενδεικτικά δοκιμάστηκαν δεδομένα για τον νομό Πέλλας για ελαιοπυρήνα και ξύλο από κλαδέματα. Οι ποσότητες ήταν συγκεκριμένα για τον ελαιοπυρήνα από τα δύο ελαιοτριβεία του νομού για τον μήνα Δεκέμβριο **585 t** ελαιοπυρήνα (Τζίμταλης, 2017) και για τους μήνες Ιανουάριο και Φεβρουάριο **7900 t** κλαδέματα δέντρων (Ιτούδης, 2017). Οι ποσότητες αυτές αντιστοιχούν σε 1328880 Nm³ και 17933000 Nm³ αντίστοιχα (Πίνακας 9).

Πίνακας 9 Παραγόμενο αέριο και ενεργειακό περιεχόμενο για ελαιοπυρήνα και κλαδέματα στον δήμο Πέλλας για τους τρεις χειμερινούς μήνες.

	Μαζα (t)	Αέριο Σύνθεσης (Nm³)	Ενεργειακό περιεχόμενο για ΑΘΔ (TJ)	Ενεργειακό περιεχόμενο για ΚΘΔ (TJ)
Ελαιοπυρήνας	585	1328880	10	9.3
Κλαδέματα	7900	17933000	134	123

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτήν την εργασία επιχειρήθηκε μια, κατά το δυνατό, σφαιρική προσέγγιση των προορτικών αξιοποίησης της βιομάζας με την μέθοδο της αεριοποίησης στην Ελλάδα. Στην Ελλάδα φαίνεται να υπάρχει επαρκές δυναμικό διαθέσιμης βιομάζας που να δικαιολογεί την αναζήτηση μεθόδων αξιοποίησης του. Συγκεκριμένα υπολογίζεται τεχνικά αξιοποιήσιμο δυναμικό **4.9 MT** ξηρής ουσίας/έτος ποσότητα που αντιστοιχεί σε **99 PJ/έτος**, από αγροτικά υπολείμματα και **0.41 MT** ξηρής ουσίας δασικής προέλευσης με ενεργειακό περιεχόμενο **7,7PJ/έτος**. Δυστυχώς στην Ελλάδα δεν γίνονται τακτικές καταμετρήσεις ή υπολογισμός του δυναμικού παρά μόνο σποραδικά και από διαφορετικού οργανισμούς με μεγάλες διαφορές στις εκτιμήσεις τους, μειώνοντας έτσι την αξιοπιστία των δεδομένων.

Ο εθνικός στόχος για την αξιοποίηση της βιομάζας είναι για το 2020 **350MW** εγκατεστημένης ισχύος για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας **1.745 GWh**, για θέρμανση-ψύξη **1.222.000 TΠΠ** και για τις μεταφορές **617.000 TΠΠ**. Μέχρι στιγμής, ειδικά για την ηλεκτροπαραγωγή που είναι ο κύριος τρόπος χρήσης του παραγόμενου αερίου σύνθεσης, στην Ελλάδα υπάρχει εγκατεστημένη ισχύς **58,18 MW** και παραγόμενη ενέργεια **23.285 MWh**. Η αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος από τον Μάρτιο του 2015 μέχρι σήμερα ήταν μόνο **18%**, ρυθμός ο οποίος δεν είναι επαρκής για την επίτευξη του εθνικού στόχου.

Στα πλαίσια της εργασίας έγινε μια ανασκόπηση στην νομοθεσία που αναφέρεται στην αξιοποίηση βιομάζας και των ΑΠΕ γενικότερα. Το συμπέρασμα που προέκυψε είναι πως η νομοθεσία είναι αρκετά περίπλοκη και γίνονται συνεχείς τροποποιήσεις τις οποίες οι ενδιαφερόμενοι επενδυτές πρέπει να παρακολουθούν. Επίσης πολλά σημεία της νομοθεσίας χρήζουν ερμηνείας. Όσον αφορά τη διαδικασία αδειοδότησης έγιναν κάποιες προσπάθειες για μείωση του χρόνου που απαιτείται με την δυνατότητα για κάποιες διαδικασίες να γίνονται ταυτόχρονα. Παρόλα αυτά οι διαδικασίες για αδειοδότηση ακόμα είναι χρονοβόρες και περίπλοκες.

Για την λήψη της τελικής απόφασης για επένδυση σε μια τεχνολογία χρειάζεται να γίνει μελέτη οικονομικής σκοπιμότητας. Συγκεκριμένα για την αεριοποίηση βιομάζας η γενική άποψη που προκύπτει από την βιβλιογραφία είναι πως η αξιοποίηση βιομάζας μέσω αεριοποίησης είναι οικονομικά σκόπιμη. Αν και συνήθως υπάρχει αρκετή απόκλιση μεταξύ διαφορετικών ερευνών όσο αφορά το επενδυτικό κόστος **€3400-5687 €/kWhel** και το ειδικό κόστος ηλεκτρικής ενέργειας **0.06-0,30 Euro/kWhel** τα διάφορα κίνητρα που δίνονται όπως επιχορηγημένες τιμές, σταθερή συμφωνημένη τιμή κ.α κάνουν και κάποια απαισιόδοξα σενάρια να φαντάζουν βιώσιμα.

Από τα πιο πάνω φαίνεται επιτακτική η ανάγκη για περαιτέρω αξιοποίηση του διαθέσιμου δυναμικού βιομάζας. Η μέθοδος της αεριοποίησης της βιομάζας είναι μια τεχνολογία που μπορεί να συνδυαστεί σχετικά εύκολα με ώριμες τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής αφού παράγει αέριο εύκολο στη χρήση και με σχετικά καλή θερμογόνο δύναμη. Επίσης σοβαρός παράγοντας για την επιλογή της αεριοποίησης είναι ότι το παραγόμενο αέριο μπορεί να απαλλαγεί από το ρυπαντικό του φορτίο πριν

χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο σε Μ.Ε.Κ και αεριοστροβίλους.. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ένα απλό μοντέλο ισορροπίας. Η αεριοποίηση είναι μια πολύπλοκη διεργασία κατά την οποία συμβαίνουν πολλές αντιδράσεις και η παράγοντες που επηρεάζουν την σύσταση του αερίου σύνθεσης είναι πολλοί. Γενικά τα μοντέλα ισορροπίας δεν έχουν καλή ακρίβεια στις προβλέψεις τους συγκρινόμενα με πιο σύνθετα μοντέλα πολλών διαστάσεων, είναι όμως μια καλή λύση σε περιπτώσεις που δεν γνωρίζουμε τα χαρακτηριστικά του αντιδραστήρα που δίνει με καλή ακρίβεια στο προκαταρκτικό στάδιο μιας μελέτης την σύσταση του αερίου και την θερμογόνο του δύναμη. Επίσης δίνει την δυνατότητα για δοκιμές σε σχέση με το είδος της βιομάζας, το ποσοστό υγρασίας ,την παροχή οξειδωτικού μέσου και την επίδραση της θερμοκρασίας. Συνήθως όπως και σε αυτή την εργασία προκύπτει ανάγκη για προσαρμογή των δεδομένων σε πειραματικά με χρήση διορθωτικών συντελεστών. Για τις δοκιμές που έγιναν προέκυψε αέριο σύνθεσης με ανώτερη θερμογόνο δύναμη **2-8 MJ/Nm³**. Επίσης η περιεκτικότητα του παραγόμενου αερίου σε καύσιμα αέρια κυμαίνεται για το **H₂** από **16% έως 25%**, για το **CO** από **4,5% έως 31%** ενώ το μεθάνιο είναι κατά πολύ λιγότερο με ποσοστά από **0,1%-2,7%** κ.ο για ξηρή βάση. Απο τα δεδομένα του νομού Πέλλας, μόνο για τους τρεις χειμερινούς μήνες, βγαίνει το συμπέρασμα ότι η ποσότητα του αερίου σύνθεσης που παράγεται από υλικά τα οποία γενικά μένουν αναξιοποίητα είναι αρκετή και έχει αρκετά καλό ενεργειακό περιεχόμενο. Μόνο για κλαδέματα και ελαιοπυρήνα η συνολική ποσότητα των οποίων είναι **8500 t** η μέγιστη δυνατή παραγόμενη ποσότητα αερίου σύνθεσης υπολογίζεται με βάση το μοντέλο **19261880 Nm³** και έχει ενεργειακό περιεχόμενο **134 TJ** με βάση την μέγιστη κατώτερη θερμογόνο δύναμη που υπολογίστηκε.

Τα ανοιχτά ζητήματα που θα μπορούσαν να διερευνηθούν από μια μελλοντική επέκταση της παρούσας εργασίας είναι η βελτίωση και εξέλιξη του μοντέλου και η χρήση του για περισσότερα δεδομένα ούτως ώστε να υπάρξει πιο σαφής εικόνα για τις προοπτικές αξιοποίησης της βιομάζας με αεριοποίηση. Επίσης η ανάλυση κύκλου ζωής για σταθμούς αεριοποίησης βιομάζας θα μπορούσε να δώσει χρήσιμα δεδομένα για την βιωσιμότητα τέτοιων εγκαταστάσεων). Όπως φάνηκε από την βιβλιογραφική έρευνα οι τεχνολογίες αεριοποίησης βρίσκονται κυρίως σε πιλοτική κλίμακα και δεν έχουν πλούσιο εμπορικό παρελθόν γεγονός το οποίο αφήνει ανοιχτό τον δρόμο για περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Abatzoglou N., Milne T.A., Evans R.J., (1998). Biomass Gasifier “Tars” Their Nature, Formation, and Conversion, NREL/TP-570-25357

Basu Pr. (2006): Combustion and Gasification in Fluidised Beds, CRC Press, Taylor and Francis Group, FL USA

Bioguide. (1999). Pan-European Good Practice Guidelines, Biomass for Energy. ALTENER programme, EU.

Bridgwater A. V., “The technical and economic feasibility of biomass gasification for power generation”, Fuel 74 (1995) 631-653

Brewer M. K., Brown R. C., Anderson I. C., Hall R. B., Woolsey E. L.; "Performance of a downdraught biomass gasifier coupled to an internal combustion engine", Editor: Klaus Donald, 16th IGT Conference on Energy from biomass and Waste, Washington D.C., Mar 2-6, 1991 Institute of Gas Technology IIT, p.957-972

Cengel Yunus A., Michael A. Boles, (2015). Thermodynamics, an engineers approach. Eighth Edition. McGraw-Hill Education, New York.

DAHLAM (2008). OLGA Tar Removal, Biomass gasification to electricity and more, Technical Information Paper, Dahlam filter technology

Dayton D., (2002). A review of the literature on catalytic biomass tar destruction, NREL/TP-510- 32815

EC –ASEAN COGEN programme. (1996). Industrial Heat and Power Generation From Biomass or Residues / European technologies / Selection Guide, Commission of the European Communities, Directorate General for external Relations

Encinar, J.M., Beltran, F.J., Ramiro, A., Gonzalez, J.F. Pyrolysis/Gasification of agricultural residues by carbon dioxide in the presence of differe 1998; 55: 219-233

Faaij A., (2006), Modern biomass conversion technologies, Mitigation and adaptation strategies for global change, 11: 343-385, DOI: 10.1007/s11027-005-9004-7

Fjellerup J., Ahrenfeldt J., Henriksen U., Gubel B., (2005). Formation, Decomposition and Cracking of Biomass Tars in Gasification, Biomass Gasification Group, Department of Mechanical Engineering, Technical University of Denmark

Higman C., van de Burgt M., (2003): Gasification, Elsevier Science

Hollingdale A.C., Krishnan R., Robinson A.P., 1991. "Charcoal Production: a handbook", National Resources Institute, Commonwealth Science Council

Huben M.P., de Lange H.C., van Steenhoven A.A., (2005). Tar reduction through partial combustion of fuel gas, *Fuel* 84, 817–824

IRENA, SUMMARY FOR POLICY MAKERS: Renewable Power Generation Costs November 2012

Kim, H.Y. A low cost production of hydrogen from carbonaceous wastes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2003, 28:1179-1186.

Klass D. (2004): Biomass for Renewable Energy and Fuels, *Encyclopedia of Energy*, Volume 1, Elsevier Inc

Knoef, H.A.M. Handbook of Biomass Gasification. BTG, 2005

Kuhn J. N., Zhao Z., Felix L. G., Slimane R. B., Choi C. W., Ozkan U. S., (2008). Olivine catalysts for methane-and tar-steam reforming, *Applied Catalysis B: Environmental* 81, 14-26

Kyoto protocol to the United Nations framework convention to climate change, United Nations, 1998;

Maniatis K., Beenackers A.A.C.M., (2000). Tar Protocols. IEA Bioenergy gasification task, *Biomass and Bioenergy* 12, 1-4

McKendry P., (2003) Energy production from biomass (part 1): overview of biomass, *Bioresource Technology* 83, 37-46

McKendry P., (2003) Energy production from biomass (part 2): conversion technologies, *Bioresource Technology* 83, 47-54

McKendry P., (2003) Energy production from biomass (part 3): gasification technologies, *Bioresource Technology* 83, 55-63

Morf P. (2001): Secondary reactions of tar during thermochemical biomass conversion, PhD thesis, Swiss Federal Institute of Technology Zürich, Diss. ETH No 14341, Zürich

Obernberger I., Thek G., 2008. Cost Assessment Of Selected Decentralised Chp Applications Based On Biomass Combustion And Biomass Gasification, Proceedings of the 16th European Biomass Conference & Exhibition, Valencia, ETA-Renewable Energies (Ed.), Italy, June 2008.

Obernberger I., Carlsen H., Biedermann F., (2003): State of the art and future developments regarding small scale biomass CHP systems with a special focus on ORC and Stirling engine technologies, International Nordic Bioenergy 2003 conference

Orrecchini, F., Bocci, E. Biomass to hydrogen for realization of closed cycles of energy resources. 3rd Dubrovnic Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems 5-10 June 2005 June 2005, Dubrovnic Croatia

Rabl, A., Spadaro, J.V., Zoughaib, A., 2008. Environmental impacts and costs of solid waste: a comparison of landfill and incineration. *Waste Manag. Res.* 26 (2), 147–162

- Reed T.B., Das A., (1988). Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems, Golden, CO: Solar Energy Research Institute, SERI/SP-271-3022
- Robert HP, Don WG. Perry's chemical engineers' handbook. Sixth Edition. New York: McGraw Hill, 1984.
- Skoulou V., E.Kanterelis, A. Zabaniotou, G.Zanakis, N. Mariolis, Th. Hatziagoustis. Crop residues for Bioenergy via gasification (**WastEng08**), 3-5 June 2008, Patra, Greece
- Song, X., Guo, Z. Technologies for direct production of flexible H₂/CO synthesis gas. Energy Conversion Management 47; 2006:560-569
- Stassen, H.E. (1995). Small scale Biomass Gasifiers for heat and power: A global Review, Energy Series, World Bank
- Sutton D., Kelleher B., Ross R.H. J., (2001). Review of literature on catalysts for biomass gasification, Fuel Processing Technology 73, 155-173
- Tang L. & Huang H, Biomass Gasification using capacitively coupled RF plasma technology, Fuel 84 (2005) 2055-2063
- You Siming, Wei Wang , Yanjun Dai , Yen Wah Tong , Chi-Hwa Wang: Comparison of the co-gasification of sewage sludge and food wastes and cost-benefit analysis of gasification- and incineration-based waste treatment schemes , Bioresource Technology 218 (2016) 595–605
- Vamvouka, D., Zografos, D. Predicting the behavior of ash from agricultural wastes using combustion. Fuel, 2004; 83(14-15): 295-304
- Van Paasen S.V.B., Kiel J.H.A., (2004). Tar formation in a fluidised-bed gasifier - Impact of fuel properties and operating conditions, Report ECN-C—04-013, ECN, Petten
- Waldheim L., Carpentieri E., (1998). Update of the progress of the Brazilian wood BIG-GT demonstration project, Special Biomass Session, ASME Turbo Expo 98
- Wilen, C. and Rautalin, A. (1998). Dust Explosion Risks and Spontaneous Ignition in Biomass-Fueled Integrated Combined Cycle Power Production. In: Energy from Biomass and Wastes XVII, IGT Conference, Orlando, Florida, March 2-6 1992
- Xiong, Z.H., Chang, J., Wu, C.Z., Chen, Y., Zhu, J.X. An experimental study on biomass air-steam gasification in a fluidized bed. Bioresource Technology, 2004; 95:95-101.
- Zhang R., Brown R., Suby A., Cummer K., (2004). Catalytic destruction of tar in biomass derived producer gas, Energy Conversion and Management 45, 995–1014

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Γερασίμου Α., 2011. Παρουσίαση της ΕΛΕΑΒΙΟΜ: Η αγορά Βιομάζας στην Ελλάδα - Βιομάζα – Βιοενέργεια: το σήμερα και το αύριο. Ανθούσα, 3 Δεκεμβρίου 2011.

Εθνική νομοθεσία της Ελλάδας, Νόμος 3423/2005

Κουφοδήμος Στ. Γεώργιος, Καθαρισμός Αερίου Αεριοποίησης για Χρήση σε Μηχανές Εσωτερικής Καύσης Ηλεκτροπαραγωγού Ζεύγους, Διδακτορική διατριβή, Θεσσαλονίκη 2009

Οδηγία 2001/77/ΕΚ για την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ (27/9/2007)

Παπαφώτης Ν. Χαρίσης. Διπλωματική εργασία: «Οικονομοτεχνική ανάλυση και αξιολόγηση μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από βιοαέριο παραγόμενο από την επεξεργασία αγροτικών υπολειμμάτων», Πειραιάς, 2015

Τσιλιγκιρίδης Γεώργιος (2010-1011): Πανεπιστημιακές σημειώσεις στο μάθημα Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Χρήστου Μυρσίνη, Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας, Ενεργειακό δυναμικό αγροτικών, κτηνοτροφικών και δασικών υπολειμμάτων στην Ελλάδα, Παιανία, 6 Οκτωβρίου 2013

Ιτούδης Γεώργιος (2017), «Ανάκτηση ενέργειας από αγροτικά υπολείμματα στο δήμο Πέλλας», Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Ενεργειακός, Επιβλέπων: Ν. Μουσιόπουλος, Θεσσαλονίκη, 2017.

Τζίμταλης Εμμανουήλ (2017), «Ανάπτυξη Συστήματος για την Αξιοποίηση Αγροτοβιομηχανικών Αποβλήτων στην Περιφερειακή Ενότητα Πέλλας», Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Ενεργειακός, Επιβλέπων: Ν. Μουσιόπουλος, Θεσσαλονίκη, 2017.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: ΠΙΝΑΚΕΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Πίνακας 10 Συντελεστές a,b,c,d (Robert et al, 1984)

Αέριο	Χημικός Τύπος	T _{max}	a	10 ³ b	10 ⁶ c	10 ⁻⁵ d
Μεθάνιο	CH ₄	1500	1.702	9.081	-2.164	-
Υδρογόνο	H ₂	3000	3.249	0.422	-	0.083
Μονοξείδιο του Άνθρακα	CO	2500	3.376	0.557	-	-0.031
Διοξείδιο του Άνθρακα	CO ₂	2000	5.457	1.047	-	-1.157
Άζωτο	N ₂	2000	3.280	0.593	-	0.040
Νερό	H ₂ O	2000	3.470	1.450	-	0.121

Πίνακας 11 Ενθαλπία σχηματισμού, ενέργεια σχηματισμού Gibbs και εντροπία σε κανονικές συνθήκες.(Cengel, 2015)

Enthalpy of formation, Gibbs function of formation, and absolute entropy at 25°C, 1 atm				
Substance	Formula	\bar{h}_f° kJ/kmol	\bar{g}_f° kJ/kmol	\bar{s}° kJ/kmol·K
Carbon	C(s)	0	0	5.74
Hydrogen	H ₂ (g)	0	0	130.68
Nitrogen	N ₂ (g)	0	0	191.61
Oxygen	O ₂ (g)	0	0	205.04
Carbon monoxide	CO(g)	-110,530	-137,150	197.65
Carbon dioxide	CO ₂ (g)	-393,520	-394,360	213.80
Water vapor	H ₂ O(g)	-241,820	-228,590	188.83
Water	H ₂ O(ℓ)	-285,830	-237,180	69.92
Hydrogen peroxide	H ₂ O ₂ (g)	-136,310	-105,600	232.63
Ammonia	NH ₃ (g)	-46,190	-16,590	192.33
Methane	CH ₄ (g)	-74,850	-50,790	186.16
Acetylene	C ₂ H ₂ (g)	+226,730	+209,170	200.85
Ethylene	C ₂ H ₄ (g)	+52,280	+68,120	219.83
Ethane	C ₂ H ₆ (g)	-84,680	-32,890	229.49
Propylene	C ₃ H ₆ (g)	+20,410	+62,720	266.94
Propane	C ₃ H ₈ (g)	-103,850	-23,490	269.91
n-Butane	C ₄ H ₁₀ (g)	-126,150	-15,710	310.12
n-Octane	C ₈ H ₁₈ (g)	-208,450	+16,530	466.73
n-Octane	C ₈ H ₁₈ (ℓ)	-249,950	+6,610	360.79
n-Dodecane	C ₁₂ H ₂₆ (g)	-291,010	+50,150	622.83
Benzene	C ₆ H ₆ (g)	+82,930	+129,660	269.20
Methyl alcohol	CH ₃ OH(g)	-200,670	-162,000	239.70
Methyl alcohol	CH ₃ OH(ℓ)	-238,660	-166,360	126.80
Ethyl alcohol	C ₂ H ₅ OH(g)	-235,310	-168,570	282.59
Ethyl alcohol	C ₂ H ₅ OH(ℓ)	-277,690	-174,890	160.70
Oxygen	O(g)	+249,190	+231,770	161.06
Hydrogen	H(g)	+218,000	+203,290	114.72
Nitrogen	N(g)	+472,650	+455,510	153.30
Hydroxyl	OH(g)	+39,460	+34,280	183.70

Source of Data: From JANAF, *Thermochemical Tables* (Midland, MI: Dow Chemical Co., 1971); *Selected Values of Chemical Thermodynamic Properties*, NBS Technical Note 270-3, 1968; and *API Research Project 44* (Carnegie Press, 1953).

Πίνακας 12 Χαρακτηριστικά αερίου σύνθεσης (Bridgwater, 1995)

Τύπος αντι-δραστήρα αεριοποίησης	Σύσταση αερίου αεριοποίησης (%κ.ο., ξ.β.)					Θερμογόνος Δύναμη (MJ/Nm ³) LHVgas	Παραπροϊόντα	
	CO	H ₂	CO ₂	CH ₄	N ₂		Συγκέντρωση Πίσσας	Συγκέντρωση Σωματιδίων
Ρευστοστερεά κλίνη	14	9	20	7	50	5,4	Μέτρια	Υψηλή
Ανοδικού Ρεύματος	24	11	9	3	53	5,5	Υψηλή	Αποδεκτή
Καθοδικού ρεύματος	21	17	13	1	48	5,7	Καλή	Μέτρια
Καθοδικού ρεύματος-O ₂	48	32	15	2	3	10,4	Αποδεκτή	Αποδεκτή
Διπλής κλίνης	48	31	0	21	0	17,4	Μέτρια	Υψηλή
Πυρόλυση	20	40	18	21	1	13,4	Υψηλή	Αποδεκτή

Πίνακας 13 Ιδιότητες καυσίμων και υδρογονανθράκων (Cengel 2015)

Properties of some common fuels and hydrocarbons							
Fuel (phase)	Formula	Molar mass, kg/kmol	Density, ¹ kg/L	Enthalpy of vaporization, ² kJ/kg	Specific heat, ¹ c _p , kJ/kg·K	Higher heating value, ³ kJ/kg	Lower heating value, ³ kJ/kg
Carbon (s)	C	12.011	2	—	0.708	32,800	32,800
Hydrogen (g)	H ₂	2.016	—	—	14.4	141,800	120,000
Carbon monoxide (g)	CO	28.013	—	—	1.05	10,100	10,100
Methane (g)	CH ₄	16.043	—	509	2.20	55,530	50,050
Methanol (ℓ)	CH ₄ O	32.042	0.790	1168	2.53	22,660	19,920
Acetylene (g)	C ₂ H ₂	26.038	—	—	1.69	49,970	48,280
Ethane (g)	C ₂ H ₆	30.070	—	172	1.75	51,900	47,520
Ethanol (ℓ)	C ₂ H ₆ O	46.069	0.790	919	2.44	29,670	26,810
Propane (ℓ)	C ₃ H ₈	44.097	0.500	335	2.77	50,330	46,340
Butane (ℓ)	C ₄ H ₁₀	58.123	0.579	362	2.42	49,150	45,370
1-Pentene (ℓ)	C ₅ H ₁₀	70.134	0.641	363	2.20	47,760	44,630
Isopentane (ℓ)	C ₅ H ₁₂	72.150	0.626	—	2.32	48,570	44,910
Benzene (ℓ)	C ₆ H ₆	78.114	0.877	433	1.72	41,800	40,100
Hexene (ℓ)	C ₆ H ₁₂	84.161	0.673	392	1.84	47,500	44,400
Hexane (ℓ)	C ₆ H ₁₄	86.177	0.660	366	2.27	48,310	44,740
Toluene (ℓ)	C ₇ H ₈	92.141	0.867	412	1.71	42,400	40,500
Heptane (ℓ)	C ₇ H ₁₆	100.204	0.684	365	2.24	48,100	44,600
Octane (ℓ)	C ₈ H ₁₈	114.231	0.703	363	2.23	47,890	44,430
Decane (ℓ)	C ₁₀ H ₂₂	142.285	0.730	361	2.21	47,640	44,240
Gasoline (ℓ)	C _n H _{1.87n}	100–110	0.72–0.78	350	2.4	47,300	44,000
Light diesel (ℓ)	C _n H _{1.8n}	170	0.78–0.84	270	2.2	46,100	43,200
Heavy diesel (ℓ)	C _n H _{1.7n}	200	0.82–0.88	230	1.9	45,500	42,800
Natural gas (g)	C _n H _{3.8n} N _{0.1n}	18	—	—	2	50,000	45,000

¹At 1 atm and 20°C.

²At 25°C for liquid fuels, and 1 atm and normal boiling temperature for gaseous fuels.

³At 25°C. Multiply by molar mass to obtain heating values in kJ/kmol.

Πίνακας 14 Φυσικός λογάριθμος της σταθεράς χημικής ισορροπίας. (Cengel, 2015)

Natural logarithms of the equilibrium constant K_p							
The equilibrium constant K_p for the reaction $\nu_A A + \nu_B B \rightleftharpoons \nu_C C + \nu_D D$ is defined as $K_p \equiv \frac{P_C^{\nu_C} P_D^{\nu_D}}{P_A^{\nu_A} P_B^{\nu_B}}$							
Temp., K	$H_2 \rightleftharpoons 2H$	$O_2 \rightleftharpoons 2O$	$N_2 \rightleftharpoons 2N$	$H_2O \rightleftharpoons H_2 + \frac{1}{2}O_2$	$H_2O \rightleftharpoons \frac{1}{2}H_2 + OH$	$CO_2 \rightleftharpoons CO + \frac{1}{2}O_2$	$\frac{1}{2}N_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightleftharpoons NO$
298	-164.005	-186.975	-367.480	-92.208	-106.208	-103.762	-35.052
500	-92.827	-105.630	-213.372	-52.691	-60.281	-57.616	-20.295
1000	-39.803	-45.150	-99.127	-23.163	-26.034	-23.529	-9.388
1200	-30.874	-35.005	-80.011	-18.182	-20.283	-17.871	-7.569
1400	-24.463	-27.742	-66.329	-14.609	-16.099	-13.842	-6.270
1600	-19.637	-22.285	-56.055	-11.921	-13.066	-10.830	-5.294
1800	-15.866	-18.030	-48.051	-9.826	-10.657	-8.497	-4.536
2000	-12.840	-14.622	-41.645	-8.145	-8.728	-6.635	-3.931
2200	-10.353	-11.827	-36.391	-6.768	-7.148	-5.120	-3.433
2400	-8.276	-9.497	-32.011	-5.619	-5.832	-3.860	-3.019
2600	-6.517	-7.521	-28.304	-4.648	-4.719	-2.801	-2.671
2800	-5.002	-5.826	-25.117	-3.812	-3.763	-1.894	-2.372
3000	-3.685	-4.357	-22.359	-3.086	-2.937	-1.111	-2.114
3200	-2.534	-3.072	-19.937	-2.451	-2.212	-0.429	-1.888
3400	-1.516	-1.935	-17.800	-1.891	-1.576	0.169	-1.690
3600	-0.609	-0.926	-15.898	-1.392	-1.088	0.701	-1.513
3800	0.202	-0.019	-14.199	-0.945	-0.501	1.176	-1.356
4000	0.934	0.796	-12.660	-0.542	-0.044	1.599	-1.216
4500	2.486	2.513	-9.414	0.312	0.920	2.490	-0.921
5000	3.725	3.895	-6.807	0.996	1.689	3.197	-0.686
5500	4.743	5.023	-4.666	1.560	2.318	3.771	-0.497
6000	5.590	5.963	-2.865	2.032	2.843	4.245	-0.341

Source of Data: Gordon J. Van Wylen and Richard E. Sonntag, *Fundamentals of Classical Thermodynamics*, English/SI Version, 3rd ed. (New York: John Wiley & Sons, 1986), p. 723, table A.14. Based on thermodynamic data given in JANAF, *Thermochemical Tables* (Midland, MI: Thermal Research Laboratory, The Dow Chemical Company, 1971).

Πίνακας 15 Απαιτούμενες Άδειες και Εγκρίσεις Έργων ΑΠΕ

$P_{installed} \leq 500 \text{ kW}$	$500 \text{ kW} < P_{installed} \leq 1 \text{ MW}$	$P_{installed} > 1 \text{ MW}$
Δεν απαιτείται Άδεια Παραγωγής, ούτε άλλη σχετική διαπιστωτική απόφαση.		Απαιτείται Άδεια Παραγωγής.
<p>Πρέπει να υποβληθεί αίτηση για την διατύπωση Προσφοράς Σύνδεσης προς τον αρμόδιο Διαχειριστή, ο οποίος και θεωρεί τα τοπογραφικά διαγράμματα αποτύπωσης του τρόπου σύνδεσης. Χορηγείται Προσφορά Σύνδεσης καταρχήν μη δεσμευτική. Αυτή οριστικοποιείται και καθίσταται δεσμευτική μετά το τέλος της περιβαλλοντικής αδειοδότησης, όπου απαιτείται.</p> <p>Εφόσον απαιτείται, πρέπει να ζητηθεί η έκδοση Άδειας Επέμβασης σε δάσος ή δασική έκταση ή γενικά των αναγκαίων αδειών για την απόκτηση του δικαιώματος χρήσης της θέσης εγκατάστασης.</p>		
<p>Απαιτείται η χορήγηση βεβαίωσης απαλλαγής από την υποχρέωση ΕΠΟ. Αυτή εκδίδεται από την ΔΙ.ΠΕ.ΧΩ. της οικείας Περιφέρειας εντός αποκλειστικής προθεσμίας 20 ημερών, μετά την άπρακτη παρέλευση της οποίας θεωρείται αυτή χορηγηθείσα (Ν.3851, αρθ.3). Για την απόδειξη της άπρακτης παρέλευσης, ο ενδιαφερόμενος πρέπει στα επόμενα στάδια να προσκομίζει σχετική βεβαίωση της Περιφέρειας, ή εναλλακτικά, αντίγραφο του αιτήματός του με τον αριθμό πρωτοκόλλου και την ημερομηνία κατάθεσής του, μαζί με</p>	<p>Απαιτείται Έγκριση Περιβαλλοντικών Όρων (ΕΠΟ). Χορηγείται κατόπιν αιτήσεως που συνοδεύεται από Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΜΠΕ) τύπου ανάλογου με την κατηγορία του έργου.</p>	<p>Απαιτείται Άδεια Εγκατάστασης.</p>

<p>υπεύθυνη δήλωση για την παρέλευση του 20ημέρου χωρίς έκδοση ούτε απαλλαγής, ούτε αρνητικής απόφασης. Κατ' εξαίρεση απαιτείται ΕΠΟ εάν:</p> <p>α) το έργο εγκαθίσταται εντός περιοχής Natura 2000 ή σε απόσταση < 100m από αιγιαλό, ή</p> <p>β) γειτνιάζει σε απόσταση <150m με άλλο σταθμό ίδιας τεχνολογίας, η δε αθροιστική ισχύς υπερβαίνει το όριο των 500 kW.</p>		
<p>Εφόσον πρόκειται να εκτελεσθούν δομικά έργα, πρέπει να ληφθούν οι απαραίτητες <i>Οικοδομικές Άδειες</i>.</p> <p>Απαιτείται <i>Σύμβαση Σύνδεσης</i>.</p> <p>Απαιτείται <i>Σύμβαση Αγοραπωλησίας</i>.</p>		
<p>Δεν απαιτείται Δοκιμαστική Λειτουργία.</p> <p>Δεν απαιτείται Άδεια Εγκατάστασης ούτε Άδεια Λειτουργίας (Ν.3468/2006, αρθ.8, όπως τροποποιήθηκε με το αρθ.3, §2 του Ν.3851 και ισχύει).</p>	<p>Απαιτείται <i>Προσωρινή Σύνδεση για Δοκιμαστική Λειτουργία</i> που γίνεται κατόπιν αιτήσεως προς τον αρμόδιο Διαχειριστή. Εφόσον επιτευχθεί απροβλημάτιστη λειτουργία 15 ημερών, ο Διαχειριστής εκδίδει <i>βεβαίωση επιτυχούς περάτωσης των δοκιμών</i> (ΥΑ.13310/2007, ΦΕΚ.Β' 1153, άρθ.14).</p> <p>Απαιτείται <i>Άδεια Λειτουργίας</i>.</p>	