



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΚΑΥΣΗ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΑΓΡΟΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΑ ΣΕ ΠΡΟΤΥΠΗ
ΜΟΝΑΔΑ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΚΛΙΝΗΣ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΒΛΑΣΙΑΔΗΣ ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΗΣ

Εξεταστική επιτροπή:

Δρ. Βάμβουκα – Καλούμενου Δέσποινα , Επιβλέπουσα Καθηγήτρια

Δρ. Γαλετάκης Μιχαήλ, Καθηγητής

Δρ. Σφακιωτάκης Στυλιανός, ΕΔΙΠ

Χανιά, Δεκέμβριος 2018

Ευχαριστήριες Αναφορές

Η παρούσα διπλωματική δεν θα μπορούσε να έχει πραγματοποιηθεί χωρίς την καθοδήγηση και την βοήθεια διαφόρων ατόμων, που με τον ένα ή τον άλλο τρόπο, προσέφεραν την πολύτιμη στήριξη στην προετοιμασία και την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής.

Πρώτα από όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω ειλικρινά και θερμά την Καθηγήτρια και επιβλέπουσα της παρούσας εργασίας κα. Δέσποινα Βάμβουκα η οποία αρχικά μου έδωσε τη δυνατότητα να πραγματοποιήσω την εργασία αυτή και στην συνέχεια με καθοδήγησε με τις πολύτιμες συμβουλές αλλά και με τις καίριες παρατηρήσεις της σε όλη την διάρκεια διεκπεραίωσης της.

Επιπλέον, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον υπεύθυνο του εργαστηρίου Εξευγενισμού και Τεχνολογίας Στερεών Καυσίμων, Δρ. Στυλιανό Σφακιωτάκη για τη σημαντική προσφορά και την υποστήριξή του κατά τη διεκπεραίωση των πειραμάτων καθώς και για την συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή.

Επίσης, ευχαριστώ τον Καθηγητή κ. Μιχαήλ Γαλετάκη που μου κάνει την τιμή να είναι μέλος στην εξεταστική επιτροπή.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και πλέον μηχανικούς, Δημήτρη Λουκέρη και Ευάγγελο Στάμου, για την καθοδήγηση τους και που ήταν πάντα πρόθυμοι να με βοηθήσουν σε οποιαδήποτε δυσκολία.

Θέλω να ευχαριστήσω, ιδιαίτερα, τους φίλους μου που με την καθημερινή τους συμπαράσταση, την υπομονή τους και την θετική τους σκέψη, ήταν δίπλα μου στην εκπλήρωση αυτού του στόχου.

Τέλος, οφείλω το μεγαλύτερο ευχαριστώ στους γονείς μου, Γιάννη και Δέσποινα που με στήριξη, κουράγιο και ηθική συμπαράσταση με βοήθησαν να επιτελέσω αυτόν τον στόχο και την εργασία αυτή, την αφιερώνω σε αυτούς.

Περίληψη

Με την πάροδο των χρόνων και τις εξελίξεις που διαδραματίζονται σε οικονομικό, πολιτικό αλλά και περιβαλλοντικό επίπεδο, ολοένα και αυξάνει η ζήτηση για θερμότητα μέσω της αξιοποίησης εναλλακτικών πηγών ενέργειας. Η Βιομάζα αποτελεί μία από τις σημαντικότερες μορφές των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και η αξιοποίησή της για την παραγωγή ενέργειας αυξάνει συνεχώς.

Στην παρούσα μελέτη, διερευνήθηκαν η απόδοση καύσης και οι εκπομπές αερίων ρύπων από την καύση αγροτικών υπολειμμάτων βιομάζας σε πρότυπη μονάδα καύσης. Τα καύσιμα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ο πυρήνας ελιάς, ο φλοιός καρυδιού και μίγματα αυτών σε αναλογίες 50-50 % και 70-30 %, αντίστοιχα.

Κατά τη διαδικασία της καύσης των υλικών και των μιγμάτων τους, η τροφοδοσία του καυσίμου αποτελεί την μεταβλητή παράμετρο. Έτσι, προσδιορίστηκαν ο βαθμός απόδοσης καύσης, ο θερμικός βαθμός απόδοσης του λέβητα και οι εκπομπές αερίων ρύπων, προκειμένου να ελεγχθούν αν βρίσκονται εντός των επιτρεπόμενων ορίων σύμφωνα με την Ελληνική νομοθεσία για μικρά οικιακά συστήματα παραγωγής θερμότητας.

Σε όλα τα καύσιμα και τα μίγματά τους, οι εκπεμπόμενοι ρύποι δεν ξεπέρασαν τα όρια σύμφωνα με την Ελληνική νομοθεσία. Επιπροσθέτως, τα υλικά εμφάνισαν υψηλές τιμές θερμικού βαθμού απόδοσης καύσης. Με την αύξηση του ρυθμού τροφοδοσίας, αυξήθηκαν οι εκπομπές αερίων ρύπων, αλλά παρέμειναν εντός των επιτρεπόμενων ορίων. Τέλος, ο φλοιός καρυδιού αποδείχτηκε ως το καλύτερο καύσιμο βιομάζας, καθώς εμφάνισε χαμηλότερες εκπομπές αέριων ρύπων και υψηλότερο θερμικό βαθμό απόδοσης καύσης.

Πίνακας περιεχομένων

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	8
2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	9
2.1. Η Βιομάζα ως Ανανεώσιμη Πηγή Ενέργειας (Α.Π.Ε.)	9
2.1.1 Πηγές και δυναμικό παραγωγής ενέργειας στην Ευρώπη	10
2.1.2 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις	19
2.2 Αγροτική Βιομάζα	23
2.2.1 Είδη και Ποιοτικά Χαρακτηριστικά	23
2.2.2 Δυναμικό Παραγωγής Ενέργειας στην Ευρώπη	27
2.3 Παραγωγή Ενέργειας από Καύση Αγροτικής Βιομάζας.....	32
2.3.1 Επίδραση της Τροφοδοσίας στην αντίδραση	32
2.3.2 Μικρά Εμπορικά Συστήματα	34
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	43
3.1. Καύσιμα και Προετοιμασία	43
3.2 Χαρακτηρισμός Δειγμάτων	47
3.2.1 Προσεγγιστική Ανάλυση.....	47
3.2.2 Στοιχειακή Ανάλυση	49
3.2.3 Χημική Ανάλυση Τέφρας.....	50
3.3 Περιγραφή Καυστήρα.....	51
3.4 Πειραματική Διαδικασία.....	53
3.5 Μετρήσεις Παραμέτρων Καύσης	55
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑ	60
4.1 Τυπικές Αναλύσεις Καυσίμου των Δειγμάτων	60
4.1.1 Προσεγγιστική Ανάλυση.....	60
4.1.2 Στοιχειακή ανάλυση και θερμογόνο δύναμη	60
4.1.3 Χημική ανάλυση τέφρας	61
4.2 Χαρακτηριστικές Παράμετροι Καύσης των Δειγμάτων και των Μιγμάτων για Σταθερή Τροφοδοσία	63
4.2.1 Θερμοκρασία νερού εξόδου του λέβητα και θερμοκρασία καυσαερίων	64
4.2.2 Θερμικός βαθμός απόδοσης και βαθμός απόδοσης καύσης	67
4.3 Εκπομπές Αερίων Ρύπων των Δειγμάτων και των Μιγμάτων τους για Σταθερή Τροφοδοσία ...	69
4.4 Επίδραση του Ρυθμού της Τροφοδοσίας του Καυσίμου στις Χαρακτηριστικές Παραμέτρους Καύσης	76
4.4.1 Θερμοκρασία νερού εξόδου του λέβητα και θερμοκρασία καυσαερίων	76
4.4.2 Θερμικός βαθμός απόδοσης και βαθμός απόδοσης καύσης	79

4.4.3 Εκπομπές αερίων ρύπων.....	80
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	82
6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	84

Ευρετήριο Σχημάτων και Πινάκων

Σχήμα 2.1: Προφίλ Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στην Ε.Ε. τα τελευταία 20 χρόνια.....	10
Πίνακας 2.1: Ενεργειακές καλλιέργειες κατάλληλες για τις Μεσογειακές χώρες.....	11
Σχήμα 2.2: Παγκόσμια ζήτηση πρωτογενούς ενέργειας για τα έτη 1980, 2000, 2006, προβλέψεις για τα έτη 2030 και 2050 και εκτιμήσεις για το σύνολο των παγκόσμιων δυνατοτήτων παραγωγής βιοενέργειας το 2050.....	13
Σχήμα 2.3: Κατανομή τύπων χρήσεων γης στην συνολική έκταση της γης.....	14
Σχήμα 2.4: Συμβολή κάθε κατηγορίας πόρων βιομάζας στο παγκόσμιο δυναμικό βιομάζας για τη χρήση ενέργειας το 2050.....	15
Σχήμα 2.5: Ενεργειακό δυναμικό από την καλλιέργεια βιομάζας σε Ευρωπαϊκές Χώρες.....	16
Σχήμα 2.6: Ενεργειακό δυναμικό δασικών υπολειμμάτων και παραπροϊόντων δασικής βιομηχανίας στην Ευρώπη.....	17
Σχήμα 2.7: Τεχνικά διαθέσιμο δυναμικό των γεωργικών υπολειμμάτων στην Ελλάδα.....	19
Σχήμα 2.8: Αποτελέσματα εκπομπών ρύπων από την Pioneer Valley Energy Centre.....	20
Πίνακας 2.2: Ιδιότητες αγροτικών υπολειμμάτων στην Ελλάδα.....	25
Πίνακας 2.3: Χαρακτηριστικά κλαδεμάτων από τα αγροτικά υπολείμματα.....	26
Πίνακας 2.4: Στοιχειακή ανάλυση και θερμογόνο δύναμη υπολειμμάτων βιομάζας επί ξηρού.....	27
Σχήμα 2.9: Ποσότητα αγροτικών υπολειμμάτων στην Ε.Ε.....	28
Σχήμα 2.10: Μερίδιο των διαθέσιμων υπολειμμάτων καλλιέργειας στην τελική κατανάλωση ενέργειας στην Ε.Ε.....	29
Σχήμα 2.11: Ετήσια παραγωγή βιομάζας ανά κατηγορία αγροτικού υπολείμματος στην Ελλάδα.....	31
Σχήμα 2.12 Ποσοστό συμμετοχής των γεωργικών υπολειμμάτων στην παραγωγή της διαθέσιμης βιομάζας στην Κρήτη.....	31
Σχήμα 2.13: Κατανάλωση συσσωματωμάτων ξύλου το 2015 στην Ε.Ε.....	37
Πίνακας 2.5: Αποτελέσματα δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν σε κλιβάνους συσσωματωμάτων ξύλου.....	39
Πίνακας 2.6: Αποτελέσματα δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν σε καυστήρες θρυμμάτων ξύλου.....	41
Σχήμα 2.14: Αποτελέσματα των δοκιμών βελτίωσης για τους λέβητες βιομάζας.....	42
Σχήμα 2.15: Εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα των δοκιμών για τους λέβητες βιομάζας.....	42
Σχήμα 3.1: Μαχαιρόμυλος.....	44
Σχήμα 3.2: Κόσκινο 1mm.....	44
Σχήμα 3.3: Κλίβανος Ξήρανσης.....	45
Πίνακας 3.1: Βαθμονόμηση.....	46
Πίνακας 3.2: Βαθμονόμηση Ανεμιστήρα Απαερίων.....	46
Σχήμα 3.4 : Αυτόματος Στοιχειακός Αναλυτής Flash 2000 Series, της εταιρείας ThermoFisherScientific.....	49
Σχήμα 3.5: Πρότυπη Μονάδα Καύσης.....	51
Σχήμα 3.6: ΠολυαναλυτήςGA-40plus.....	55
Πίνακας 3.3: Στοιχειομετρικός Αέρας Καύσης.....	57

Πίνακας 4.1 : Προσεγγιστική ανάλυση των δειγμάτων επί ξηρού (%).....	60
Πίνακας 4.2 : Αποτελέσματα στοιχειακής ανάλυσης δείγματος επί ξηρού και θερμογόνος δύναμη δειγμάτων.....	61
Πίνακας 4.3 : Χημική ανάλυση τέφρας (οξείδια %).....	61
Σχήμα 4.1: Κύρια οξείδια στις τέφρες των αρχικών δειγμάτων.....	62
Πίνακας 4.4: Δείκτες επικαθίσεων.....	63
Πίνακας 4.5 : Θερμοκρασίες καυσαερίων, εκπομπές ρύπων (11% O ₂ αναφοράς), απώλειες θερμότητας και απόδοση για τις τροφοδοσίες 13.6 και 13.8 kg/h για πυρήνα ελιάς και φλοιό καρυδιού, αντίστοιχα.....	64
Πίνακας 4.6: Θερμοκρασίες, εκπομπές ρύπων(11% O ₂ αναφοράς), απώλειες θερμότητας και απόδοση των μειγμάτων των καυσίμων για βέλτιστη τροφοδοσία.....	64
Σχήμα 4.2 : Θερμοκρασία νερού εξόδου καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του λέβητα για τα δύο καύσιμα.....	65
Σχήμα 4.3 : Θερμοκρασία καυσαερίων σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα για τα δύο καύσιμα.....	65
Σχήμα 4.4 : Θερμοκρασία νερού εξόδου καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του λέβητα για τα μίγματα των καυσίμων.....	66
Σχήμα 4.5: Θερμοκρασία καυσαερίων σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα για τα μίγματα των καυσίμων.....	67
Σχήμα 4.6 : Απώλειες θερμότητας σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα για τα δύο καύσιμα.....	68
Σχήμα 4.7 : Μέση απόδοση καύσης σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα για τα δύο καύσιμα.....	68
Σχήμα 4.8 : Μέση απόδοση καύσης σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα για τα μίγματα των καυσίμων.....	69
Σχήμα 4.9 : Συγκέντρωση CO (11% O ₂ αναφοράς) συναρτήσει του χρόνου, σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα για τα δύο καύσιμα.....	70
Σχήμα 4.10 : Συγκέντρωση SO ₂ (11% O ₂ αναφοράς) συναρτήσει του χρόνου, σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα για τα δύο καύσιμα.....	71
Σχήμα 4.11 : Συγκέντρωση NO _x (11% O ₂ αναφοράς) συναρτήσει του χρόνου, σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα για τα δύο καύσιμα.....	71
Σχήμα 4.12 : Μέσες τιμές συγκέντρωσης αέριων ρύπων (11% O ₂ αναφοράς) κατά τη διάρκεια πλήρους λειτουργίας του λέβητα για τα δύο καύσιμα.....	72
Σχήμα 4.13 : Μέσες τιμές συγκέντρωσης αέριων ρύπων (11% O ₂ αναφοράς) καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του λέβητα για τα δύο καύσιμα.....	73
Σχήμα 4.14 : Λόγος περίσσειας αέρα λ σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα για τα δύο καύσιμα.....	74
Σχήμα 4.15 : Μέσες τιμές συγκέντρωσης αέριων ρύπων (11% O ₂ αναφοράς) σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα για τα μίγματα των καυσίμων.....	75
Σχήμα 4.16 : Λόγος περίσσειας αέρα λ σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα για τα μίγματα των καυσίμων.....	75
Πίνακας 4.7: Θερμοκρασίες καυσαερίων, εκπομπές ρύπων, απώλειες θερμότητας και απόδοση για πυρήνα ελιάς και φλοιό καρυδιού, αντίστοιχα.....	76
Σχήμα 4.17 : Θερμοκρασία νερού εξόδου συναρτήσει της τροφοδοσίας των καυσίμων, καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του λέβητα για (α) πυρήνα ελιάς, (β) φλοιό καρυδιού.....	77
Σχήμα 4.18 : Θερμοκρασία καυσαερίων συναρτήσει της τροφοδοσίας των καυσίμων σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα για (α) πυρήνα ελιάς, (β) φλοιός καρυδιού.....	78

Σχήμα 4.19 : Μέση απόδοση καύσης συναρτήσει της τροφοδοσίας των καυσίμων σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα.....	79
Σχήμα 4.20 : Λόγος περίσσειας αέρα λ συναρτήσει της τροφοδοσίας των καυσίμων σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα.....	80
Σχήμα 4.21 : Μέσες τιμές συγκέντρωσης αέριων ρύπων (11% O ₂ αναφοράς) σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα για (α) πυρήνα ελιάς, (β) φλοιό καρυδιού.....	81

1. Εισαγωγή

Στις μέρες μας, παγκοσμίως, η ζήτηση για παραγωγή θερμότητας ολοένα και αυξάνεται και τα ορυκτά καύσιμα συντελούν καθοριστικά στην κατανάλωση ενέργειας των σύγχρονων κοινωνιών. Όμως, η ανάγκη για την αντικατάσταση των συμβατικών καυσίμων και την καλύτερη διαχείριση του περιβάλλοντος οδηγούν στην μελέτη και την επιλογή εναλλακτικών πηγών ενέργειας. Ένας από αυτούς είναι η βιομάζα, η οποία καθίσταται από τις καλύτερες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, με το υψηλότερο παγκόσμιο δυναμικό.

Η βιομάζα συναντάται σε πολλές διαφορετικές μορφές που αναλύονται εκτενώς στην παρούσα διπλωματική εργασία. Το είδος βιομάζας που επικεντρώνεται η εργασία είναι τα αγροτικά υπολείμματα. Πιο συγκεκριμένα, μελετήθηκαν φλοιοί καρδιού και πυρήνες ελιάς, που αποτελούν άφθονες υπολειμματικές μορφές βιομάζας τόσο στην Ελλάδα όσο και στην Κρήτη. Χρησιμοποιούνται, κυρίως, σε μικρά οικιακά συστήματα, για παραγωγή θερμότητας λόγω της αφθονίας, του χαμηλού κόστους και της υψηλής θερμαντικής τους ικανότητας. Καθώς, ένα μειονέκτημα των αγροτικών υπολειμμάτων είναι ότι δεν παράγονται καθ' όλη τη διάρκεια του έτους πολλές φορές χρησιμοποιούνται μίγματα βιοκαυσίμων. Κατ' ακολουθίαν, στην εργασία, ερευνήθηκαν και τα μίγματα των προαναφερθέντων καυσίμων σε δύο αναλογίες, στη βέλτιστη τροφοδοσία καυσίμου .

Τα τελευταία χρόνια, η ζήτηση για τους λέβητες στερεών καυσίμων ολοένα και αυξάνεται, και ειδικότερα για τους λέβητες βιομάζας. Συνεπώς, καθίσταται απαραίτητο να μελετηθούν τα μικρά οικιακά συστήματα που παράγουν θερμότητα. Σκοπός της εργασίας αυτής είναι να διερευνηθεί πειραματικά η απόδοση καύσης των βιοκαυσίμων, που προαναφέρθηκαν. Στην πρότυπη μονάδα καύσης, που βρίσκεται στο Εργαστήριο Εξευγενισμού και Τεχνολογίας Στερεών Καυσίμων, υπολογίστηκαν και διερευνήθηκαν οι εκπομπές ρύπων, ο θερμικός βαθμός απόδοσης και η απόδοση καύσης του λέβητα. Τα οξείδια του αζώτου, το μονοξείδιο του άνθρακα και το διοξείδιο του θείου είναι οι πιο σημαντικές εκπομπές ρύπων. Οι τιμές τους υπολογίστηκαν, προκειμένου να εκτιμηθεί αν ακολουθούν τα επιτρεπόμενα όρια, που καθορίζονται σύμφωνα με τα Ελληνικά Πρότυπα.

2. Θεωρητικό Μέρος

2.1. Η Βιομάζα ως Ανανεώσιμη Πηγή Ενέργειας (Α.Π.Ε.)

Η βιομάζα είναι απόβλητο από φυτά ή ζώα που δεν χρησιμοποιείται για τρόφιμα ή ζωοτροφές. Μπορεί να είναι απόβλητα από τη γεωργία (όπως στελέχη σίτου) ή φυτοκομία (απόβλητα αυλών), επεξεργασία τροφίμων (όπως καλαμπόκι καλαμποκιού), ζωική εκτροφή (κοπριά) ή ανθρώπινα απόβλητα από εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων. Χρησιμοποιείται σε διάφορες βιομηχανικές διεργασίες, όπως παραγωγή ενέργειας ή για την παραγωγή χημικών ουσιών.

Τα τελευταία χρόνια, το ενδιαφέρον και η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αυξάνονται γρήγορα, κυρίως λόγω των σοβαρών προβλημάτων που συνδέονται με τη χρήση ορυκτών καυσίμων, όπως η ταχεία εξάντληση τους, οι επιπτώσεις στην υπερθέρμανση του πλανήτη και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκαλεί η καύση τους.

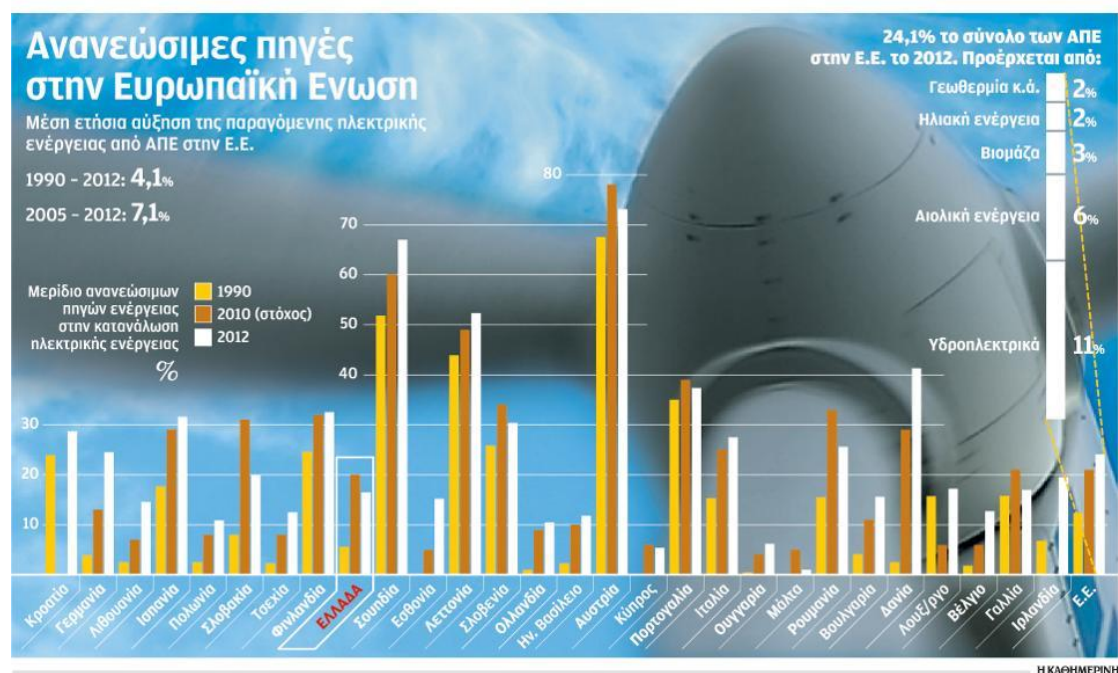
Όλοι γνωρίζουμε ότι τα ορυκτά καύσιμα όπως ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο υπήρξαν και εξακολουθούν να είναι οι κυριότερες πρωτεύουσες πηγές ενέργειας μας, καθώς παρέχουν πάνω από το 80% των παγκόσμιων ενεργειακών αναγκών. Όμως, καθώς αυξάνεται ο παγκόσμιος πληθυσμός, αναμένεται ότι η συνολική κατανάλωση ενέργειας θα αυξηθεί σημαντικά στο μέλλον, ώστε να αναπτυχθούν νέες και εναλλακτικές πηγές ενέργειας.

Η βιομάζα χαρακτηρίζεται από πολλά θετικά οφέλη. Ορισμένα από αυτά είναι τα εξής:

1. Είναι πάντοτε διαθέσιμη και γι' αυτό ορίζεται ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας.
2. Μειώνει την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα.
3. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πολλαπλές χρήσεις.
4. Μπορεί να παραχθεί εγχώρια.
5. Είναι φθηνότερη σε σύγκριση με τα ορυκτά καύσιμα.
6. Είναι πιο φιλική στο περιβάλλον.
7. Χαρακτηρίζεται από μειωμένες εκπομπές επιβλαβών ρύπων SO_2 , NO_x .
8. Μειώνει την ποσότητα των αποβλήτων στους χώρους υγειονομικής ταφής.
9. Δεν συμβάλλει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου

Η βιομάζα αποτελεί το 4,8% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης των ΗΠΑ και περίπου το 12% της παγκόσμιας ανανεώσιμης ενέργειας. Στην Ευρώπη, η βιομάζα που κυριαρχεί στην

τρέχουσα χρήση ανανεώσιμης ενέργειας, είναι ο τέταρτος μεγαλύτερος ενεργειακός πόρος στον κόσμο μετά από το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο και τον άνθρακα. Ενώ καλλιέργειες βιομάζας έχουν κυρίως συσχετιστεί με τις παραδοσιακές μορφές χρήσης, όπως το μαγείρεμα ή ως καύσιμο θέρμανσης, χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο. Τα τελευταία χρόνια, η βιομάζα έχει αναπτυχθεί, ειδικά στις Ευρωπαϊκές Χώρες, για να χρησιμοποιείται σε σύγχρονες μορφές ενέργειας, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: Προφίλ Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στην Ε.Ε. τα τελευταία 20 χρόνια [1]

2.1.1 Πηγές και δυναμικό παραγωγής ενέργειας στην Ευρώπη

Πηγές βιομάζας

Στην πράξη, η βιομάζα μπορεί να ταξινομηθεί σε δύο μεγάλες κατηγορίες: στη βιομάζα που παράγεται από ενεργειακές καλλιέργειες και στις υπολειμματικές μορφές της που παράγονται από ανθρώπινες δραστηριότητες επεξεργασίας της πρωτογενούς φυτικής και ζωικής βιομάζας. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει διάφορα είδη υπολειμμάτων, όπως, αγροτικά υπολείμματα, ζωικά απόβλητα, δασικά υπολείμματα, αγροτοβιομηχανικά απόβλητα και δημοτικά-αστικά απόβλητα.

Ενεργειακές καλλιέργειες

Οι ενεργειακές καλλιέργειες είναι αυτοφυή ή καλλιεργούμενα είδη, νέα ή παραδοσιακά, που παράγουν ως κύριο προϊόν τη βιομάζα για ποικίλους σκοπούς, όπως παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ή θερμότητας, βιοκαυσίμων κ.α.

Οι παραδοσιακές καλλιέργειες παράγουν, σε υψηλά ποσοστά, βιομάζα. Διαχωρίζονται στις γεωργικές και δασικές ενεργειακές καλλιέργειες. Οι ενεργειακές καλλιέργειες διακρίνονται σε πολυετείς και ετήσιες. Χαρακτηριστικές καλλιέργειες κατάλληλες για τις μεσογειακές χώρες λόγω των κλιματικών συνθηκών απεικονίζονται στον Πίνακα παρακάτω:

Πίνακας 2.1: Ενεργειακές καλλιέργειες κατάλληλες για τις Μεσογειακές χώρες [3]

Δασικές Ενεργειακές Καλλιέργειες	<ul style="list-style-type: none">• Ευκάλυπτος• Ψευδακακία
Γεωργικές Ενεργειακές Καλλιέργειες	Πολυετείς: <ul style="list-style-type: none">• Καλάμι• Μίσχανθος• Αγριαγκινάρα
	Ετήσιες: <ul style="list-style-type: none">• Σόργο• Κέναφ• Ελαιοκράμβη• Ηλίανθος

Υπολειμματικές μορφές βιομάζας

Οι υπολειμματικές μορφές βιομάζας είναι υλικά που προέρχονται κυρίως από παρθένα βιομάζα και περιέχουν ενέργεια, τα οποία απορρίπτονται. Η υπολειμματική μορφή βιομάζας πηγάει από ανθρώπινες δραστηριότητες και φυσικά γεγονότα.

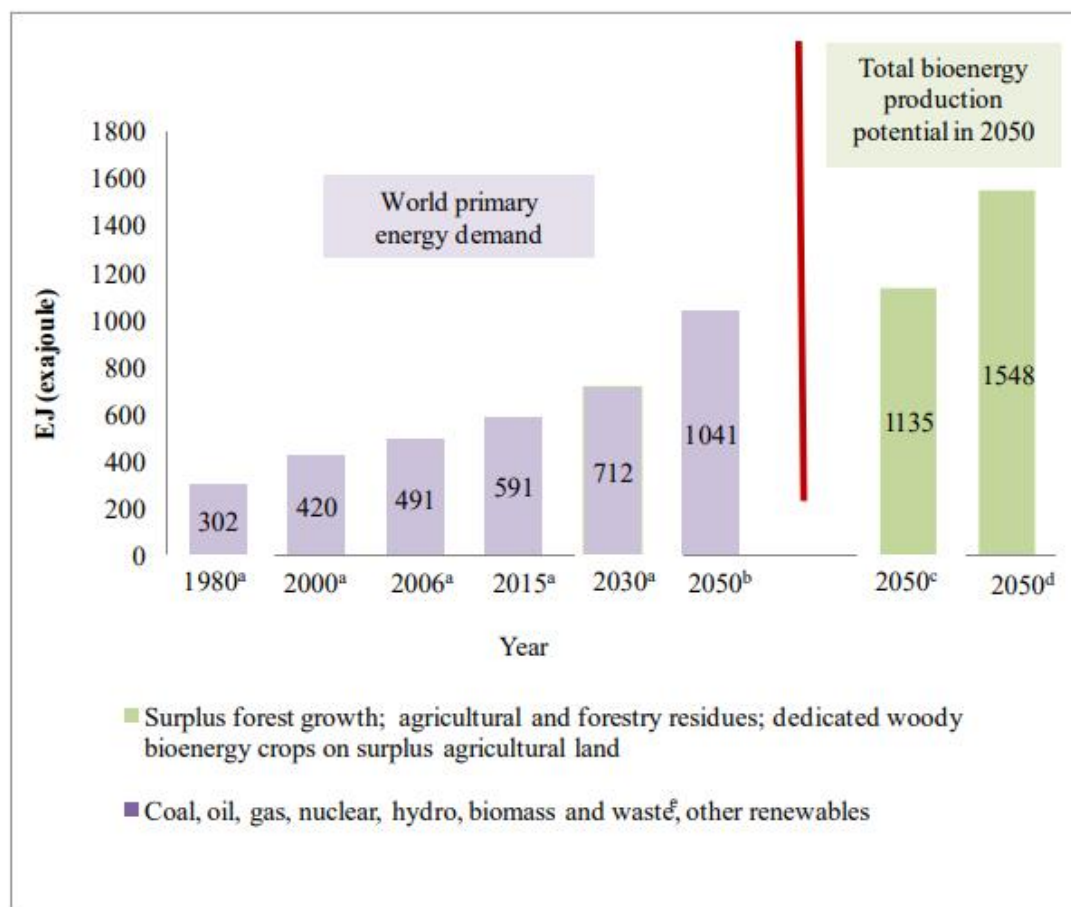
Περιλαμβάνει:

- Γεωργική Βιομάζα: Η γεωργική βιομάζα που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας ορίζεται ως υπολείμματα βιομάζας από αγροτικές καλλιέργειες (μίσχοι, κλαδιά, φύλλα, άχυρο, απόβλητα κλαδέματος κ.λπ.) και βιομάζα από υποπροϊόντα μεταποίησης γεωργικών προϊόντων (υπολείμματα εκκοκκισμού βαμβακιού, ελαιοτριβείων, φρούτων κ.λπ.)
- Ζωικά απόβλητα: Η βιομάζα από ζωικά απόβλητα περιλαμβάνει κυρίως απόβλητα από εντατικές εκτροφές ζώων, από εκμεταλλεύσεις πουλερικών, χοιροτροφικές εκμεταλλεύσεις, αγροκτήματα βοοειδών και σφαγεία. Στην Ελλάδα, η εκτροφή προβάτων, αμνών και αιγών πραγματοποιείται εκτεταμένα, σε μεγάλη έκταση βοσκοτόπων, έτσι τα απόβλητα είναι διάσπαρτα και δεν μπορούν να συλλεχθούν για να χρησιμοποιηθούν για ενέργεια.
- Δασική Βιομάζα: Η δασική βιομάζα που χρησιμοποιείται ή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ενεργειακούς σκοπούς αποτελείται από καυσόξυλα, υπολείμματα δασοκομίας (από την αραιώση και την υλοτόμηση), υλικό που καθαρίζεται από δάση για την προστασία τους από δασικές πυρκαγιές, καθώς και υποπροϊόντα από τη βιομηχανία ξύλου.
- Δημοτικά απόβλητα: Το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα των αστικών αποβλήτων. Περιλαμβάνονται τα βιο-στερεά (λάσπη, λύματα) και τα στερεά δημοτικά απόβλητα (σκουπίδια, απορρίμματα). [14]

Ενεργειακό δυναμικό

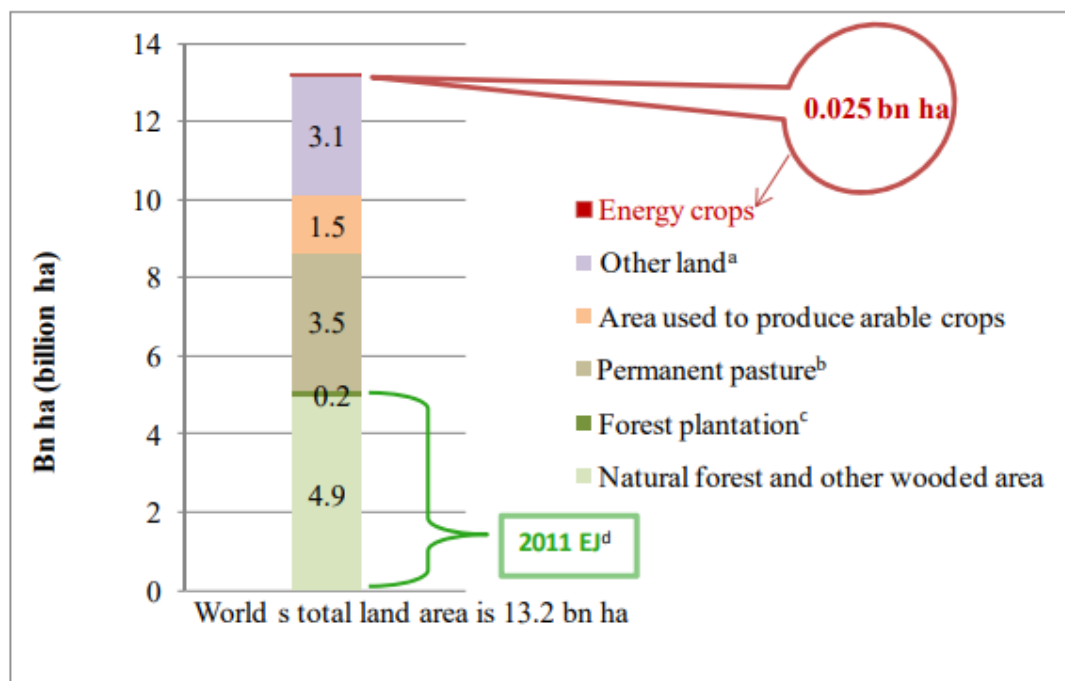
Η ετήσια παγκόσμια πρωτογενής παραγωγή βιομάζας είναι ισοδύναμη με τα 4.500 EJ της ηλιακής ενέργειας που συλλέγονται κάθε χρόνο. Περίπου το 5% αυτής της ενέργειας ή 225 EJ θα κάλυπτε το 50% περίπου της συνολικής παγκόσμιας ζήτησης πρωτογενούς ενέργειας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2. Αυτές οι τιμές δυναμικού ευθυγραμμίζονται με άλλες

εκτιμήσεις, που βασίζονται σε μοντέλα που αντιστοιχούν σε μια ετήσια βιώσιμη αγορά βιοενέργειας 270 EJ.



Σχήμα 2.2: Παγκόσμια ζήτηση πρωτογενούς ενέργειας για τα έτη 1980, 2000, 2006, προβλέψεις για τα έτη 2030 και 2050 και εκτιμήσεις για το σύνολο των παγκόσμιων δυνατοτήτων παραγωγής βιοενέργειας το 2050. [18]

Το μελλοντικό δυναμικό για ενέργεια από βιομάζα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διαθεσιμότητα της γης. Επί του παρόντος, η έκταση γης που προορίζεται για την καλλιέργεια βιοκαυσίμων είναι μόλις 0,025 δισ. εκτάρια ή το 0,19% της συνολικής έκτασης του κόσμου 13,2 δισ. εκταρίων και 0,5-1,7% της παγκόσμιας έκτασης γεωργικής γης (Σχήμα 2.3).

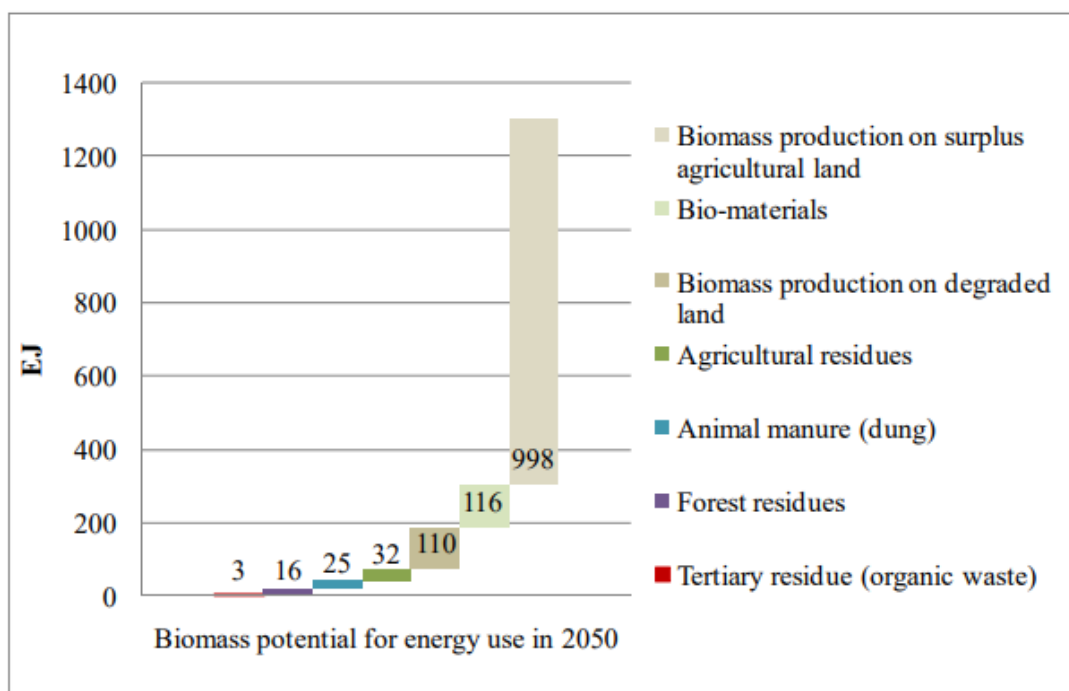


Σχήμα 2.3: Κατανομή τύπων χρήσεων γης στην συνολική έκταση της γης.[22]

Υπάρχουν επίσης πολλές μελέτες που διεξήχθησαν κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών που επιχειρούν να εκτιμήσουν τη μελλοντική ζήτηση και προσφορά βιοενέργειας. Ωστόσο, οι δημοσιευμένες εκτιμήσεις του συνολικού παγκόσμιου δυναμικού παραγωγής βιοενέργειας το 2050 κυμαίνονται από 33 έως 1.135 EJ ετησίως, από τα οποία, 358 EJ προέρχονταν ετησίως από ξυλώδη βιομάζα. Οι ενεργειακές καλλιέργειες από πλεονασματικές γεωργικές εκτάσεις έχουν τη μεγαλύτερη δυνατή συνεισφορά έως 988 EJ / έτος. Οι διαφορές μεταξύ των διαφόρων σεναρίων οφείλονται σε μεγάλες διαφορές της ζήτησης και του ενεργειακού μίγματος, ως αποτέλεσμα των διακυμάνσεων της πληθυσμιακής δυναμικής και των οικονομικών και κοινωνικών αναγκών. [25]

Λαμβάνοντας δεδομένα από διάφορες διεθνείς πηγές (π.χ. FAO4, WB5, IFPRI6, IIASA7, RIVM8, UNPD9, EFI10, WEC11), οι εκτιμήσεις του δυναμικού παραγωγής ενέργειας από τη δασική βιομάζα ξύλου δείχνουν ότι τα δάση μπορούν θεωρητικά να αποτελέσουν σημαντική πηγή βιοενέργειας και ότι η χρήση αυτής της βιοενέργειας μπορεί, θεωρητικά, να πραγματοποιηθεί χωρίς να τίθεται σε κίνδυνο η προσφορά βιομηχανικής ξυλείας. [78] Για παράδειγμα, σύμφωνα με ένα παγκόσμιο ενεργειακό σενάριο, το συνολικό παγκόσμιο

δυναμικό παραγωγής βιοενέργειας το 2050 είναι 1.548 EJ, όπου οι εφαρμοζόμενες πρακτικές γεωργικής διαχείρισης είναι παρόμοιες με τις βέλτιστες διαθέσιμες τεχνολογίες στις βιομηχανικές περιοχές του πλανήτη. Τα αποτελέσματα αυτά ευθυγραμμίζονται με άλλες εκτιμήσεις του δυναμικού παραγωγής βιοενέργειας. Σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες, το φάσμα των συνολικών δυνατοτήτων βιομάζας το 2050 είναι 1.135-1.300 EJ (Σχήμα 2.4). Οι ενεργειακές καλλιέργειες από τις πλεονασματικές γεωργικές εκτάσεις αντιπροσωπεύουν τις μεγαλύτερες πιθανές εισφορές.

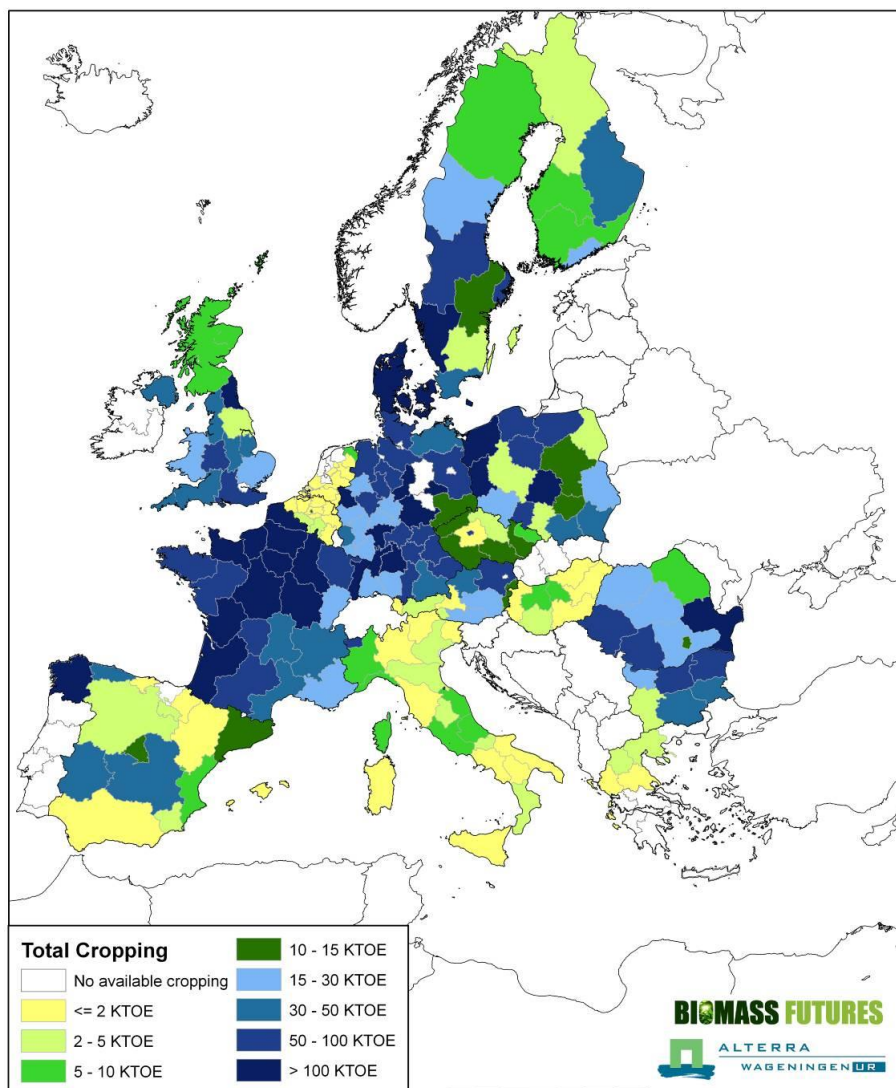


Σχήμα 2.4: Συμβολή κάθε κατηγορίας πόρων βιομάζας στο παγκόσμιο δυναμικό βιομάζας για τη χρήση ενέργειας το 2050. [17]

Προς το παρόν εκτιμάται ότι υπάρχουν περίπου 5,5 εκατομμύρια εκτάρια γεωργικής γης στην οποία πραγματοποιείται αφιερωμένη καλλιέργεια βιοενέργειας. Αυτό αντιπροσωπεύει το 3,2% της συνολικής έκτασης καλλιέργειας (μη χρησιμοποιούμενη γεωργική έκταση) στην ΕΕ των 27. Πρακτικά όλες αυτές οι εκτάσεις χρησιμοποιούνται για καλλιέργειες αποκλειστικά βιοκαυσίμων, κυρίως για καλλιέργειες ελαιολάδου (82% της γης που χρησιμοποιείται για την

παραγωγή βιομάζας). Αυτά μεταποιούνται σε βιοντίζελ. Το υπόλοιπο χρησιμοποιείται για την παραγωγή αιθανόλης (11%), το βιοαέριο (7%) και τα πολυετή φυτά προέρχονται κυρίως από την παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας (1%).

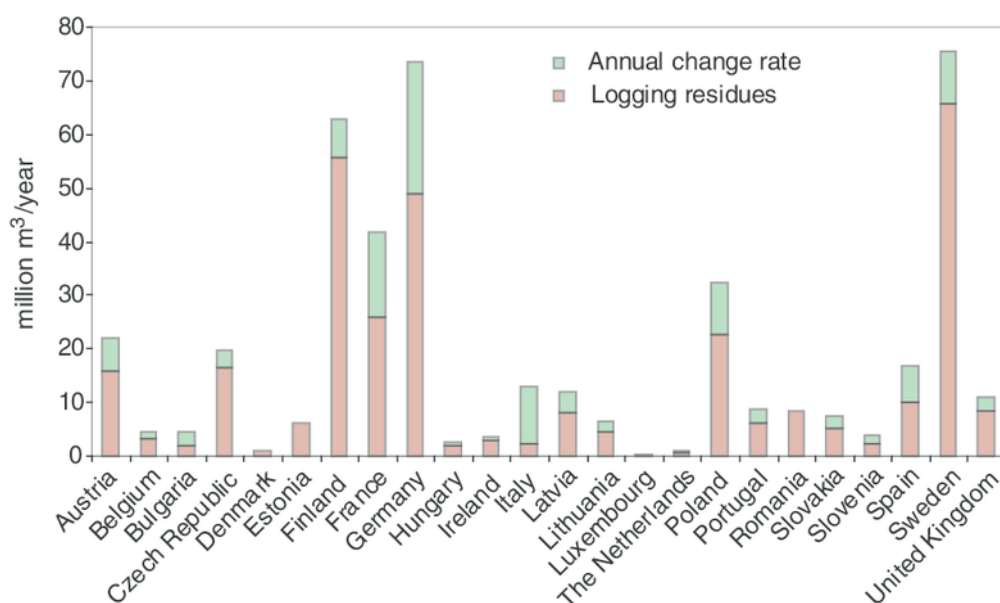
Στο σχήμα 2.5 αποκαλύπτεται η παρούσα κατάσταση καλλιέργειας βιοκαυσίμων στην ΕΕ.[19]



Σχήμα 2.5: Ενεργειακό δυναμικό από την καλλιέργεια βιομάζας σε Ευρωπαϊκές Χώρες. [21]

Μελέτες έχουν δείξει ότι, το συνολικό απόθεμα δασικής βιομάζας στην ΕΕ εκτιμάται σε περίπου 21.000 Mm³ (4.400 Mtoe), με μια θεωρητική ετήσια αύξηση της συνολικής βιομάζας σε 1.277 Mm³ (268 Mtoe). Σύμφωνα με τις προβλέψεις του EFISCEN, το δυναμικό αναμένεται

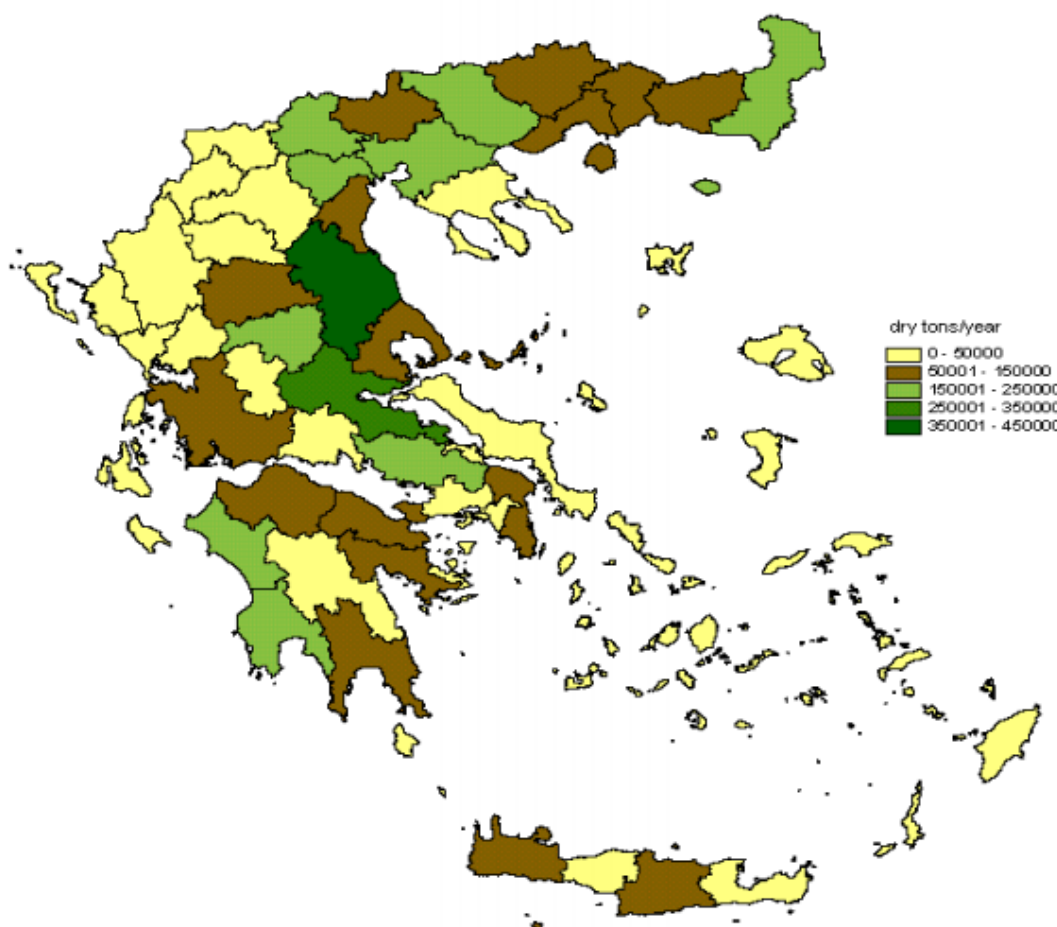
να μειωθεί κατά 1,8% σε 1,254 εκατ. Mm^3 το 2030, αλλά γενικά παραμένει μάλλον σταθερό. Η θεωρητική βιομάζα των δασικών υπολειμμάτων περιλαμβάνει ρίζες, περόνες, κλαδιά, φύλλα και βελόνες. Το μεγαλύτερο μέρος της βιομάζας από υπολείμματα δασών δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί λόγω τεχνικών, περιβαλλοντικών και οικονομικών περιορισμών, ενώ η βιομάζα των ξύλων είναι χρήσιμη. Το ξύλο αντιπροσωπεύει περίπου το 80% της βιομάζας που χρησιμοποιείται για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Υπάρχει σαφής δυνατότητα εντατικοποίησης της χρήσης των δασών για την ενέργεια στην ΕΕ : Συγκομίζεται μόνο το 60-70% των δασών της ΕΕ. Επί του παρόντος, περίπου το 42% της συγκομιδής χρησιμοποιείται τελικά για την ενέργεια. Οι πρόσφατες προβλέψεις για το 2030 προσδιορίζουν το προσδόκιμο δυναμικό του ξύλου για ενέργεια από τα δάση της ΕΕ ύψους 675 εκατομμυρίων κυβικών μέτρων (146 εκατομμυρίων toe) ετησίως, υπό την προϋπόθεση ότι θα εφαρμοστούν εντατικές προσπάθειες επεξεργασίας ξύλου. Η Φινλανδία, η Γερμανία και η Γαλλία είναι οι τέσσερις χώρες που έχουν το μεγαλύτερο δυναμικό δασικών υπολειμμάτων, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6: Ενεργειακό δυναμικό δασικών υπολειμμάτων και παραπροϊόντων δασικής βιομηχανίας στην Ευρώπη.[22]

Ελλάδα

Στην Ελλάδα, τα ετήσια διαθέσιμα γεωργικά και δασικά υπολείμματα ισοδυναμούν ενεργειακά με 3-4 εκατ. τόνους πετρελαίου (Σχήμα 2.7). Το ποσό αυτό αντιστοιχεί ενεργειακά στο 30-40 % περίπου της ποσότητας του πετρελαίου που καταναλώνεται ετησίως στη χώρα μας. Σημειώνεται ότι 1 τόνος βιομάζας ισοδυναμεί ενεργειακά με περίπου 0,4 τόνους πετρελαίου. Εντούτοις, με τα σημερινά δεδομένα καλύπτεται μόλις το 3% περίπου των ενεργειακών αναγκών της με τη χρήση της διαθέσιμης βιομάζας. Η βιομάζα στη χώρα μας χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή, κατά το παραδοσιακό τρόπο, θερμότητας στον οικιακό τομέα (μαγειρική, θέρμανση), για τη θέρμανση θερμοκηπίων, σε ελαιοουργεία, καθώς και, με τη χρήση πιο εξελιγμένων τεχνολογιών, στη βιομηχανία (εκκοκκιστήρια βαμβακιού, παραγωγή προϊόντων ξυλείας, ασβεστοκάμινοι), σε περιορισμένη, όμως κλίμακα. Ως πρώτη ύλη σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιούνται υποπροϊόντα της βιομηχανίας ξύλου, ελαιοπυρηνόξυλα, κουκούτσια ροδάκινων και άλλων φρούτων, τσόφλια αμυγδάλων, βιομάζα δασικής προέλευσης, άχυρο σιτηρών, υπολείμματα εκκοκκισμού. [39]



Σχήμα 2.7: Τεχνικά διαθέσιμο δυναμικό των γεωργικών υπολειμμάτων στην Ελλάδα.[14]

2.1.2 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Παρόλο που η βιομάζα είναι φιλική στο περιβάλλον, ρυπαίνει λόγω απόθεσης. Η βιομάζα περιέχει αποθηκευμένη ενέργεια. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα φυτά απορροφούν ενέργεια από τον ήλιο μέσω της διαδικασίας φωτοσύνθεσης. Όταν καίγεται η βιομάζα, αυτή η αποθηκευμένη ενέργεια απελευθερώνεται ως θερμότητα. Η καύση βιομάζας απελευθερώνει διοξείδιο του άνθρακα. Ωστόσο, τα φυτά λαμβάνουν επίσης το διοξείδιο του άνθρακα από την ατμόσφαιρα και το για τη φωτοσύνθεση. Το ίδιο διοξείδιο του άνθρακα επιστρέφεται στον αέρα όταν καίγονται τα φυτά με αποτέλεσμα τη μηδενική τελικώς συμβολή της βιομάζας στο φαινόμενο του θερμοκηπίου από απόψεως εκπομπών CO₂.

Η καύση βιομάζας εκπέμπει όμως και ρύπους όπως, σωματίδια (PM), οξείδια του αζώτου (NO_x), μονοξείδιο του άνθρακα (CO), διοξείδιο του θείου (SO₂), μόλυβδο, υδράργυρο και άλλους επικίνδυνους ατμοσφαιρικούς ρύπους. Για παράδειγμα, η Pioneer Valley Energy Centre (PVEC), στο Westfield της Μασαχουσέτης πραγματοποίησε δοκιμές εκπομπών βιομάζας και εξέθεσε τα ακόλουθα αποτελέσματα όπου φαίνονται στο Σχήμα 2.8. [15]

Boiler Criteria Pollutant Emission Factors

Pollutant	Biomass (controlled) ^a	100% S15 Biodiesel (uncontrolled) ^d
	lb/MMBTU	lb/MMBTU
NO _x	0.15	0.109
CO	0.176	0.055
SO ₂	0.028 ^b	0.002
FPM ₁₀ (filterable)	0.012	0.002
TPM ₁₀ (filterable and condensable)	0.024	0.002
PM _{2.5} ^c	0.024	0.002
VOC	0.028	0.007

^a Biomass emission factors for NO_x, CO, and FPM₁₀ are proposed as Best Available Control Technology (BACT). TPM₁₀ are assumed to be equal to twice the FPM₁₀ emission rate.

^b Average uncontrolled SO₂ emissions expected to be 0.045 lb/MMBtu based on an average sulfur content of 0.01% in the wood but would vary depending on the wood. As needed, 0.028 lb/MMBtu would be achieved through trona or lime injection.

^c Assuming PM_{2.5} is equivalent to TPM₁₀.

^d S15 Biodiesel Emission Factor Basis: PM, NO_x, and CO emission factors for the boiler are from the Minnesota Air Pollution Biofuels Report. VOC based on EPA AP-42, Chapter 1.3. SO₂ based on a sulfur content of 15 ppm in the fuel for S15 biodiesel and 100% conversion of sulfur to SO₂.

Σχήμα 2.8: Αποτελέσματα εκπομπών ρύπων από την Pioneer Valley Energy Centre (PVEC) [14]

Ορισμένοι επιβλαβείς ατμοσφαιρικοί ρύποι αναλύονται παρακάτω:

- Μονοξείδιο του άνθρακα (CO): το μονοξείδιο του άνθρακα είναι προϊόν ατελούς καύσης που όταν εισπνέεται, παρεμποδίζει την απορρόφηση οξυγόνου στο αίμα. Το μονοξείδιο του άνθρακα αντιμετωπίζεται ως υποκατάστατο για ορισμένα οργανικά τοξικά που αναμένεται να αυξηθούν καθώς αυξάνονται οι εκπομπές CO.
- Το διοξείδιο του θείου (SO₂): Η έκθεση σε διοξείδιο του θείου προκαλεί δυσκολία στην αναπνοή για άτομα με άσθμα και εμπλέκεται επίσης στην περιφερειακή ομίχλη και σχηματισμό όξινων βροχών. [17] Οι κύριες πηγές SO₂ είναι η καύση ορυκτών καυσίμων σε σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής και βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Μαζί με τα άμεσα αποτελέσματά του SO₂ συμβάλλει επίσης στον σχηματισμό λεπτών σωματιδίων. [2]

- Διοξείδιο του αζώτου: Το διοξείδιο του αζώτου είναι το είδος δείκτη για την ομάδα αερίων NO_x, η οποία περιλαμβάνει νιτρώδες οξύ και νιτρικό οξύ. Κατά κύριο λόγο, σχηματίζεται όταν τα καύσιμα καίγονται σε υψηλές θερμοκρασίες. Αυτά τα όξινα αέρια επηρεάζουν άμεσα την αναπνευστική υγεία και συμβάλλουν επίσης στον σχηματισμό όζοντος και συμπυκνώσιμων σωματιδίων. Από τον Ιανουάριο του 2010, η Ε.Ε. καθόρισε ένα νέο πρότυπο για το NO₂ σε επίπεδο των 100 ppb στον ατμοσφαιρικό αέρα.[18]
- Όζον: Ένα βασικό συστατικό του νέφους, το όζον του εδάφους, σχηματίζεται όταν τα οξείδια του αζώτου (NO_x), οι πτητικές οργανικές ενώσεις (VOC), το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και το μεθάνιο αντιδρούν και ενεργοποιούνται από το υπεριώδες φως.[18]
- Διοξίνες/φουράνια: Είναι ενώσεις "ανθεκτικές, βιοσυσσωρεύσιμες και τοξικές" που δημιουργούνται ως υποπροϊόντα χημικής παρασκευής και επίσης από την καύση. Επηρεάζουν τα επίπεδα και τις λειτουργίες των ορμονών, καθώς και την εμβρυϊκή ανάπτυξη, το ανοσοποιητικό σύστημα και την αναπαραγωγή. Μπορεί να οδηγήσουν σε αυξημένο κίνδυνο καρκίνου και μπορούν να προκαλέσουν ανεπιθύμητες αρνητικές επιπτώσεις όπως καρκίνο σε ζώα και ανθρώπους. "
- Μικροσωματίδια: Οι εκπομπές προκύπτουν τόσο από τις άμεσες εκπομπές τέφρας από την καύση σε μονάδες παραγωγής ενέργειας, αλλά και από εκπομπές διοξειδίου του θείου, οξειδίων του αζώτου, αμμωνίας και πτητικών οργανικών ενώσεων. Η ατμοσφαιρική ρύπανση των σωματιδίων σχετίζεται με αυξημένα καρδιοπνευμονικά συμπτώματα, επιθέσεις άσθματος, ημέρες που χάθηκαν από την εργασία λόγω αναπνευστικής νόσου, επισκέψεις σε χώρους έκτακτης ανάγκης, ποσοστά νοσηλείας και θνησιμότητα.

Τα κύρια στοιχεία τα οποία ευρίσκονται στην τέφρα από την καύση της βιομάζας είναι Ca, Si, Mg, K και P, ενώ άλλα δευτερεύουσας σημασίας στοιχεία είναι τα Al, Fe, Mn και Na. Επίσης, περιέχονται βαρέα μέταλλα, όπως Cu, Zn, Co, Mo, As, Ni, Cr, Pb, Cd, V και Hg, τα οποία επηρεάζουν το περιβάλλον.

Επίδραση του καλίου

Οι βιομάζες περιέχουν κάλιο, το οποίο εξαερώνεται και ανασυντίθεται κατά την καύση σχηματίζοντας οξείδια, υδροξείδια, χλωρίδια και θειικά άλατα. Μπορεί να συμπυκνωθεί στις επιφάνειες των σωληνώσεων, δημιουργώντας ένα τετηγμένο φλοιό ή προκαλώντας τον σχηματισμό κολλώδους επιφάνειας στην ιπτάμενη τέφρα και στη συνέχεια πρόσκρουση στην επιφάνεια των σωληνώσεων. Το κάλιο είναι ένα πολύ ευκίνητο στοιχείο των φυτών και βρίσκεται στους ιστούς σε μεγαλύτερο ποσοστό, από ότι στον κορμό ή στα κοτσάνια. Το γεγονός αυτό καθορίζει την τάση σε διάφορα είδη βιομάζας να προκαλούν επικαθίσεις.

Επίδραση του νατρίου

Το νάτριο έχει παρόμοια δράση με το κάλιο. Δημιουργεί επικαθίσεις και είναι ιδιαίτερα σημαντικό στη δημιουργία παρόμοιων φαινομένων με καύσιμη ύλη γαιάνθρακες.

Επίδραση ασβεστίου και μαγνησίου

Τα στοιχεία αυτά αντιδρούν με το θείο, το χλώριο, το φώσφορο και με διάφορα μέταλλα, όπως υδράργυρο και ψευδάργυρο. Από αυτές τις ενώσεις, δημιουργούνται συμπυκνώματα κατά την ψύξη των αερίων της καύσης υπό μορφή λεπτομερών σωματιδίων, τα οποία δημιουργούν ανεπιθύμητες επικαθίσεις.

Επίδραση του θείου

Τα βιοκαύσιμα που είναι πλούσια σε θείο προκαλούν επικαθίσεις πλούσιες σε K_2SO_4 και $CaSO_4$. Το θείο, όπως και τα αλκάλια εξαερώνεται κατά την καύση και υγροποιείται, αφού αντιδράσει με τα αλκάλια και το χλώριο στα σωματίδια ιπτάμενης τέφρας ή απευθείας πάνω στις επιφάνειες που είναι παράλληλες στο ρέον αέριο, σχηματίζοντας μία λευκή επιστρωση.

Επίδραση των βαρέων μετάλλων

Η συγκέντρωση βαρέων μετάλλων στην τέφρα αυξάνεται από την τέφρα στον πυθμένα της κλίνης προς την ιπτάμενη τέφρα στα φίλτρα, όπου μειώνεται η θερμοκρασία και το μέγεθος των σωματιδίων, για τα οικολογικού ενδιαφέροντος βαρέα μέταλλα όπως ο ψευδάργυρος (Zn), ο μόλυβδος (Pb) και το κάδμιο (Cd). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα στοιχεία αυτά αντιδρούν σχηματίζοντας αέριες φάσεις κατά τη διαδικασία της καύσης. Η συγκέντρωση χρωμίου (Cr), χαλκού (Cu), νικελίου (Ni), αρσενικού (As), κοβαλτίου (Co), μολυβδαινίου (Mo) και βολφραμίου (W) στην τέφρα βιομάζας έχουν σημαντική περιβαλλοντική σπουδαιότητα.

Μελέτες έχουν αποδείξει ότι εναέριες συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων είναι καρκινογόνα για τον άνθρωπο, με αποτέλεσμα τον αυξημένο κίνδυνο καρκίνου του πνεύμονα. Μελέτες σε ζώα έδειξαν ότι μέσω της εισπνοής προκαλούν όγκους των πνευμόνων.[14]

2.2 Αγροτική Βιομάζα

2.2.1 Είδη και Ποιοτικά Χαρακτηριστικά

Η αγροτική βιομάζα μπορεί να οριστεί ως υπολείμματα της καλλιέργειας και της μεταποίησης ακατέργαστων γεωργικών προϊόντων όπως τα φρούτα, τα λαχανικά και οι καλλιέργειες. Τα γεωργικά απόβλητα μπορούν να έχουν τη μορφή στερεών, υγρών ή πολτών ανάλογα με τη φύση των γεωργικών δραστηριοτήτων. Επιπλέον, τα υπολείμματα και τα απόβλητα της γεωργικής βιομηχανίας αποτελούν σημαντικό ποσοστό της παγκόσμιας γεωργικής παραγωγικότητας. Ρύζι, σιτάρι, ζαχαροκάλαμο, καλαμπόκι και σόγια είναι μόνο μερικά παραδείγματα καλλιεργειών που δημιουργούν σημαντικές ποσότητες υπολειμμάτων. Τα υπολείμματα αυτά αποτελούν σημαντικό μέρος στην συνολική ετήσια παραγωγή υπολειμμάτων βιομάζας και αποτελούν σημαντική πηγή ενέργειας τόσο για οικιακούς όσο και βιομηχανικούς σκοπούς. [22]

Ορισμένες πηγές αγροτικών υπολειμμάτων είναι τα:

- Άχυρο από ρύζι: Σε πολλές χώρες το άχυρο από ρύζι καίγεται, ενώ η τέφρα χρησιμοποιείται ως βιολογικό λίπασμα. Σχετικά μικρές ποσότητες χρησιμοποιούνται ως ζωτροφές, πρώτες ύλες για την κατασκευή χαρτιού και χαρτονιού ή οικοδομικού υλικού. Σε ορισμένες χώρες όπως το Μπαγκλαντές, τη Κίνα, το Βιετνάμ και πιθανώς το άχυρο της Ινδίας και του Νεπάλ χρησιμοποιείται επίσης ευρέως ως καύσιμο οικιακής χρήσης.
- Υπολείμματα αραβοσίτου, άλλων σιτηρών και σόγιας: Τα υπολείμματα αυτά χρησιμοποιούνται ευρέως ως καύσιμα οικιακής χρήσεως, ιδίως σε περιοχές όπου το καυσόξυλο είναι σπάνιο. Σε πολλές περιπτώσεις, οι μίσχοι και το άχυρο παραμένουν στο πεδίο ή χρησιμοποιούνται για άλλους σκοπούς, όπως χορτονομές, ενώ οι φλοιοί διατίθενται στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας.
- Βαμβάκι: Οι μίσχοι βαμβακιού συχνά καίγονται στο πεδίο, καθώς αφήνοντάς τους στον αγρό μπορεί να οδηγήσουν σε βλάβες σε μελλοντικές καλλιέργειες λόγω

ασθενειών, μόλυνσης κλπ. Επίσης, μπορεί ενδεχομένως να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμο οικιακής χρήσης.

- Βαγάσση και Ζαχαροκάλαμο: Η βαγάσση, το ζαχαροκάλαμο και τα φύλλα τους είναι τα κύρια κατάλοιπα, εκ των οποίων το πρώτο χρησιμοποιείται κανονικά ως πηγή ενέργειας για την παραγωγή ατμού, ενώ το τελευταίο χρησιμοποιείται συνήθως ως ζωοτροφή ή καίγεται στον αγρό. Τα περισσότερα εργοστάσια ζάχαρης καίουν όλα τα κατάλοιπα της βαγάσσης που παράγουν, ακόμη και σε πολύ χαμηλές αποδόσεις. Αυτό γίνεται για να εξασφαλιστεί ότι όλοι οι σάκοι καίγονται, καθώς είναι γνωστό ότι είναι ξηρό. Σε ορισμένες χώρες, η βαγάσση χρησιμοποιείται επίσης ως πρώτη ύλη για τη βιομηχανία χαρτιού και χαρτονιού.[43]

Επιπλέον, στην αγροτική βιομάζα περιλαμβάνονται και τα αγροτο-βιομηχανικά απόβλητα. Τα βασικά αγροτοβιομηχανικά υπολείμματα υπό την μορφή κελυφών, πυρήνων και φλοιών προέρχονται από μονάδες επεξεργασίας ελαιόλαδου και ελαιπουρήνα, σπορελαιουργεία, βιομηχανίες επεξεργασίας φρούτων, οινοποιεία, εκκοκκιστήρια βάμβακος και αλευροβιομηχανίες.

Τα αγροτικά υπολείμματα ποικίλλουν και κατ' επέκταση έχουν μεγάλο εύρος ποιοτικών χαρακτηριστικών. Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά μεταβάλλονται λόγω των φυσικών χαρακτηριστικών και της χημικής τους σύνθεσης. Τα χαρακτηριστικά της βιομάζας καθορίζονται ανάλογα με το είδος της βιομάζας, με την διαδικασία επεξεργασίας που έχει προηγηθεί και τις κλιματικές συνθήκες που επικρατούν. Συγκεκριμένα, η αξιοποίηση των αγροτικών υπολειμμάτων επηρεάζεται από τις παρακάτω ιδιότητες:

- Τη θερμογόνο δύναμη του υπολείμματος. Συνήθως, οι τιμές της θερμογόνου δύναμης των αγροτικών υπολειμμάτων σε ξερή βάση και χωρίς τέφρα είναι της τάξης των $20 \text{ MJ/kg} \pm 15 \%$.
- Την υγρασία του υπολείμματος. Για να μπορεί να αποθηκευτεί το υλικό, πρέπει να ξηραθεί και να μετατραπεί κατάλληλα. Για να γίνει αυτό, η ξερή βιομάζα πρέπει να χαρακτηρίζεται από υγρασία λιγότερο από 35%. [34]
- Η εμφάνιση και τα μορφολογικά χαρακτηριστικά του υπολείμματος που βρίσκεται στον αγρό.
- Η διαθεσιμότητα του υλικού σε διάρκεια του έτους. Υπάρχουν υλικά βιομάζας τα οποία δεν παράγονται όλο το χρόνο. Επίσης, για να αποθηκευτεί το υλικό χρειάζονται

αποθηκευτικοί χώροι για να μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα υλικά καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, λόγω των ενεργειακών αναγκών που είναι συνεχείς.

- Η πυκνότητα. Η ενεργειακή πυκνότητα, ως αποτέλεσμα της καθαρής θερμαντικής αξίας και της πυκνότητας του χύδην υλικού, ελέγχει τη διεργασία του συστήματος τροφοδοσίας του κλιβάνου και καθορίζει την αποθήκευση και τη μεταφορά του υλικού.
- Η περιεκτικότητα σε τέφρα. Η σύσταση της τέφρας επηρεάζει τη χημική σύσταση της βιομάζας στις υψηλές θερμοκρασίες της καύσης και της αεριοποίησης. Οι συγκεντρώσεις σε βαρέα μέταλλα έχουν ιδιαίτερη σημασία για τη βιώσιμη χρησιμοποίηση της τέφρας. Οι συγκεντρώσεις της τέφρας είναι πολύ σημαντικά στοιχεία για την ανάπτυξη ορισμένων διεργασιών μετατροπής, επειδή αυτά μπορούν να επηρεάσουν την απόδοση της διεργασίας.

Στους Πίνακες 2.2 και 2.3 παρουσιάζονται δεδομένα για τα ποιοτικά χαρακτηριστικά αγροτικών υπολειμμάτων στην Ελλάδα.

Πίνακας 2.2: Ιδιότητες αγροτικών υπολειμμάτων στην Ελλάδα [26]

Είδος	Μέρος φυτού	Υγρασία μετά τη συγκομιδή %	Παραγωγή μαζί με υγρασία (kg/στρ.)	Παραγωγή ξηράς ουσίας (kg/στρ.)	Θερμογόνος Δύναμις MJ/kg ΞΟ
Καλαμπόκι	Σύνολο	14,7	1184	1010	18,0
	Ρόκα	16,5	132	110	18,5
Βαμβάκι	Υπέργειο	39,9	355	254	18,0
	Ρίζα	55,7	130	58	18,5
Ηλίανθος	Σύνολο	20,3	417	332	17,3
Αχυρο σίτου	5-10	5	230	217	18,5
Αχυρο κριθής	5-10	5	130	120	18,2
Υπολείμματα τομάτας		14,5	53,7	46,9	17,3

Πίνακας 2.3: Χαρακτηριστικά κλαδεμάτων από τα αγροτικά υπολείμματα [26]

Φυτό	Υγρασία %	Παραγωγή σε υγρό kg/στρ	Παραγωγή σε ξηρό (kg/στρ)	Θ.Δ. MJ/kg	Χονδρά κλαδιά %	Λεπτά κλαδιά %
Ελιά	723	454,2	37,2	19,0	66	34
Αχλαδιά	960	492,5	48,7	18,7	51	49
Βερικοκιά	1226	550,2	55,1	17,8	71	29
Ροδακινιά	972	462	52,1	18,8	70	30
Αμπέλι	755	513	32,1	18,7		100
Λεμονιά	1058	460,2	56,8	18,1	61	39
Πορτοκαλιά	1120	577,2	48,4	18,5	57	43

Οι στοιχειομετρικές ποσότητες άνθρακα, υδρογόνου και οξυγόνου χρησιμοποιούνται για να ταξινομηθεί η βιομάζα και διάφορες διεργασίες αξιοποίησής της, όπως η αεριοποίηση. Είναι άξιο να σημειωθεί ότι, για να μετατραπεί η βιομάζα στην επιθυμητή μορφή πρέπει να υπάρχουν λίγες ποσότητες οξυγόνου εντός των μορίων. Η υψηλή περιεκτικότητα σε οξυγόνο, οφειλόμενη στη λιγνοκυτταρινική δομή των φυτικών ιστών, είναι η αιτία, για τη χαμηλότερη θερμογόνο δύναμη της βιομάζας, σε σύγκριση με τα ορυκτά καύσιμα. Επίσης, στοιχεία όπως το θείο και το άζωτο αντιδρούν με το οξυγόνο ή το υδρογόνο και προκαλούν επιβλαβείς ενώσεις για το περιβάλλον. Βέβαια, σημαντικό περιβαλλοντικό πλεονέκτημα των καυσίμων βιομάζας, σε σύγκριση με τους γαιάνθρακες, είναι ότι η βιομάζα περιέχει ελάχιστες ποσότητες θείου. Κατ' αυτόν τον τρόπο η χρήση βιομάζας οδηγεί σε μείωση των εκπομπών SO₂, οι οποίες ευθύνονται για την όξινη βροχή. Επίσης, ένα ποσοστό σε χλώριο, που προέρχεται από την καύσιμη βιομάζα, δεσμεύεται στην τέφρα, ενώ το υπόλοιπο εκπέμπεται ως Cl₂, HCl και αλκαλικά χλωρίδια στο απαέριο. [88] Στον Πίνακα 2.4 που βρίσκεται παρακάτω, παρουσιάζει τα αποτελέσματα της στοιχειακής ανάλυσης και προσδιορίζει τη θερμογόνο δύναμη και τα ποσοστά τέφρας υπολειμμάτων βιομάζας.[87]

Πίνακας 2.4: Στοιχειακή ανάλυση και θερμογόνος δύναμη υπολειμμάτων βιομάζας επί ξηρού. [87]

Κατηγορία	Στοιχειακή ανάλυση (%)						Γέφρα (%)	ΑΘΔ (MJ/kg)
	C	H	O	N	S	Cl		
Απόβλητα								
Υπολείμματα ελιάς	44-55	5-7	34-50	0.5-1.5	0.1-0.2	<0.1	2-7	19-21
Δασικά υπολείμματα	48-53	6-6.5	40-44	0.3-0.5	<0.05	<0.05	0.2-3	18-22
Πριονίδι	47-51	5-6.5	35-44	0.1-1.5	<0.1	0.01	0.4-3	18-21
Κοπριά βοειδών	35-40	5-5.5	30-35	2-3	0.3-0.5		20-25	10-15
Πρωτεύοντα βιοστερεά	40-45	6-6.5	19-20	2-3	0.9-1		25-30	19-20
Λυματολόαση	23-53	3-8	15-30	1.5-7	0.5-2.5	0.05-1	20-45	10-23
Δημοτικά στερεά απορρίμματα	23-53	2.5-8.5	15-35	0.2-2	<0.1		15-25	14-19
Ξηρά ανακυκλώσιμα υλικά	40-42	5-6	30-39	0.5-1	0.1-0.2	0.4-0.5	14-22	13-14
Αγροστόδια								
Γλυκό σόργο	34-47	4.5-6.5	40-41	0.1-1.5	0.02-0.2	0.4-0.5	1.5-4	16-18
Σπόροι & φλούδα ηλιανθου	44-48	4-6	41-50	0.7-1.5	<0.1	<0.1	3-5	12-18
Γρασίδια ταχείας ανάπτυξης	46-48	5-6	35-40	0.5-1.5	0.01-0.2	0.5-1.5	4-11	17-18
Μίσχανθος	46-51	4-6	40-44	0.3-6	0.04-1.4	0.07-2	1.5-4	17-19
Ελαιοκράμβη	60-62	8-9	23-25	3-4			5-6	25-26
Ευλώδη								
Ξύλο βάμβακος	45-47	5-6	38-40	1-1.8	0.1-0.2	<0.1	1-7	16-18
Ευκάλυπτος	44-53	5-6	40-50	0.2-0.4	<0.1	0.05-0.2	0.9-1	19-30
Λεύκη	46-48	5-6	40-48	0.2-0.4	<0.1	<0.1	1-2	19-20
Πεύκο	49-52	6-6.5	41-44	0.1-0.2	<0.1	<0.05	0.3-0.5	18-30
Παραγόμενα								
Άχυρο	43-48	5-6	36-50	0.3-5	0.1-1	0.6-4	8-9	15-18
Βαγάση	45-56	5-8	28-40	0.2-1	<0.05	<0.05	1-2	17-19
Υπολ. εκκοκκισμού βάμβακος	39-43	5-6	35-37	1.4-2	0.4-0.5		14-15	15-17
Χαρτί	39-45	6-6.5	44-48	<0.1	<0.05	<0.05	3-9	17-20

2.2.2 Δυναμικό Παραγωγής Ενέργειας στην Ευρώπη

Η γεωργία στις χώρες της ΕΕ των 27 χαρακτηρίζεται από μεγάλο ποσοστό παραγωγής σιτηρών. Το 2007, 56% των εκτάσεων καλλιεργήθηκαν με δημητριακά. Έτσι τα αγροτικά υπολείμματα περιλαμβάνουν κυρίως άχυρο, φύλλα και μίσχους και άλλα είδη όπως π.χ. σιτάρι, καλαμπόκι, κριθάρι και σίκαλη. [53]

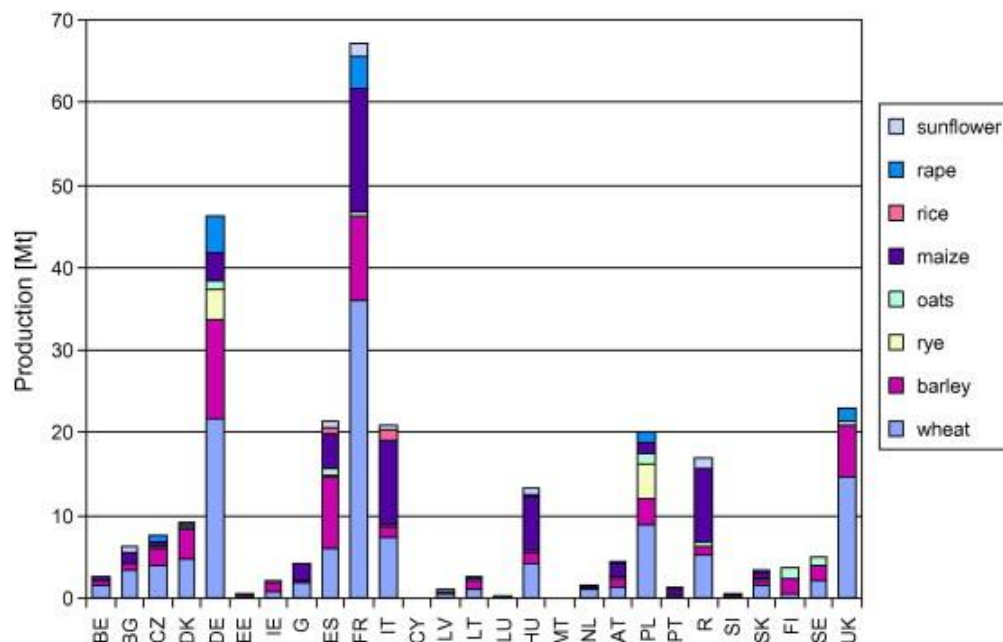
Το συνολικό ενεργειακό δυναμικό της διαθέσιμης κοπριάς από βοοειδή, χοίρους και πουλικά στην Ευρώπη το 2030 εκτιμήθηκε ότι είναι 20,83 Mtoe, με κοπριά χοίρων 9,66 Mtoe, κοπριά βοοειδών 9,22 Mtoe και κοπριά πουλικών 1,92. [54]

Με σχεδόν 11 εκατομμύρια εκτάρια λιβαδιών που καλλιεργούνται το 2013, το ενεργειακό δυναμικό που διατίθεται κυμαίνεται μεταξύ 1,05 και 5,90 Mtoe. Το δυναμικό των μόνιμων λειμώνων και λιβαδιών εκτιμήθηκε μεταξύ 2,60 και 12,11 Mtoe. Η αξιοποίηση του γρασιδιού από μόνιμους λειμώνες και λιβάδια θα ήταν ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα, καθώς θα ήταν μια μέθοδος προστασίας της βιοποικιλότητας, παράλληλα με την παραγωγή ανανεώσιμων

πηγών ενέργειας και την ανακύκλωση θρεπτικών ουσιών από μόνιμους βοσκότοπους σε καλλιεργούμενες εκτάσεις μέσω της εφαρμογής του χωνεμένου στις περιοχές αυτές. [55]

Η γεωργική έκταση που χρησιμοποιείται στην παραγωγή δημητριακών στην Ευρώπη εκτιμάται σε 48,7 εκατομμύρια εκτάρια μέχρι το 2030. Το άχυρο μπορεί να αποτελέσει κατάλληλο υπόστρωμα, ωστόσο απαιτείται μηχανική, θερμοχημική ή βιολογική προεπεξεργασία για να μειωθούν οι χρόνοι κατακράτησης του αχύρου σε σύγκριση με άλλα υποστρώματα, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η απόδοση του μεθανίου.

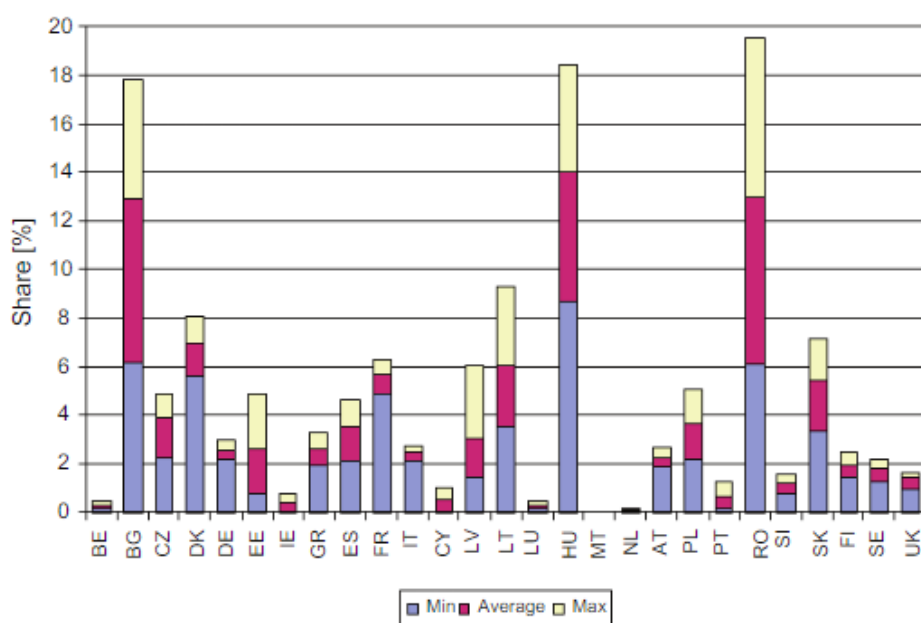
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.9, η μέση ποσότητα υπολειμμάτων καλλιεργειών διαθέσιμων για βιοενέργεια στην ΕΕ των 27 εκτιμήθηκε στο 1530 PJ/έτος, με διακύμανση μεταξύ 1090 και 1900 PJ/έτος. Η μέση τιμή αντιπροσωπεύει περίπου 3,2% στην τελική κατανάλωση ενέργειας στην ΕΕ των 27, ενώ η διακύμανση είναι 2,3-4%. Αυτή η διαφοροποίηση, η οποία είναι ακόμη μεγαλύτερη σε επίπεδο κρατών μελών, μπορεί να οδηγήσει σε ελλείψεις στην προσφορά βιομάζας σε ορισμένα έτη, όταν τα υπολείμματα των καλλιεργειών είναι διαθέσιμα σε χαμηλότερο ποσό από το μέσο όρο.



Σχήμα 2.9: Ποσότητα αγροτικών υπολειμμάτων στην Ε.Ε. [47]

Η χρήση μόνο υπολειμμάτων γεωργικών καλλιεργειών για παραγωγή ενέργειας θα μπορούσε να συμβάλει κατά 3,2% στην μέση τελική κατανάλωση. Ωστόσο, αυτό το εύρος

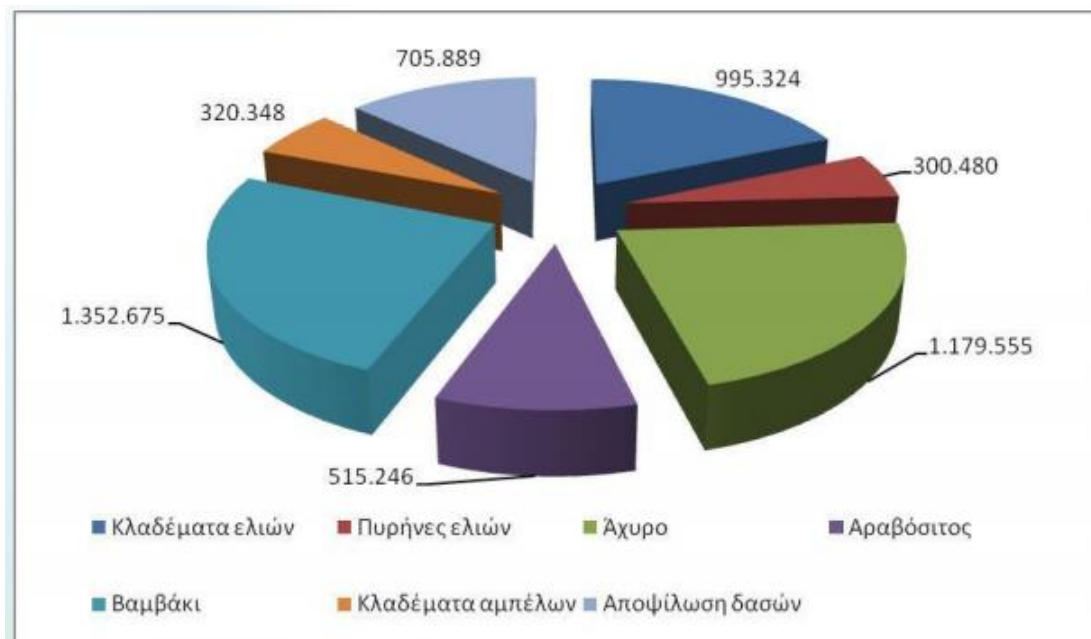
κυμαίνεται από το ελάχιστο 2,3% έως το μέγιστο 4,0%, ανάλογα με τη διαθεσιμότητα των καταλοίπων σε διαφορετικά έτη. Το μερίδιο της τελικής κατανάλωσης ενέργειας ποικίλλει σημαντικά από χώρα σε χώρα, ανάλογα με τον διαθέσιμο πόρο και την εσωτερική κατανάλωση ενέργειας, με τιμές πολύ υψηλότερες από τον μέσο όρο της ΕΕ. Έτσι, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.10, τα υπολείμματα των καλλιεργειών έχουν μια πολύ υψηλότερη συνεισφορά από αυτόν τον μέσο όρο της τελικής ενεργειακής κατανάλωσης σε ορισμένες χώρες όπως η Ουγγαρία (14%), η Ρουμανία (13%), η Βουλγαρία (13%) ή η Δανία (7%), αν ληφθεί υπόψη η μέση τελική κατανάλωση ενέργειας σε κάθε ένα από αυτά για την περίοδο των τελευταίων 10 ετών. Η Δανία είναι πρωτοπόρος στη χρήση αχύρου για την παραγωγή ενέργειας με περίπου 11 μονάδες συνδυασμένης παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού (CHP) 17.9 PJ άχυρου από τα 44 PJ υπολειμμάτων που είναι διαθέσιμα κατά μέσο όρο. Ένα εργοστάσιο αχύρου στο Ηνωμένο Βασίλειο (Ely) χρησιμοποιεί 2,9 PJ αχύρου κάθε χρόνο, σε σύγκριση με 88 PJ υπολειμμάτων που βρέθηκαν διαθέσιμα κατά μέσο όρο. Ένας άλλος μεγάλος σταθμός ηλεκτροπαραγωγής στην Ισπανία, Sanguesa, χρησιμοποιεί σήμερα 2,3 PJ άχυρου, ενώ το διαθέσιμο υπόλοιπο είναι 124 PJ κατά μέσο όρο. Αυτό δείχνει ότι, ακόμη και στις πλέον προχωρημένες χώρες της ΕΕ από την άποψη της παραγωγής βιοενέργειας, τα υπολείμματα καλλιεργειών χρησιμοποιούνται μόνο σε πολύ μικρό βαθμό σε σχέση με τις δυνατότητές τους.



Σχήμα 2.10: Μερίδιο των διαθέσιμων υπολειμμάτων καλλιέργειας στην τελική κατανάλωση ενέργειας στην Ε.Ε. [47]

Ελλάδα

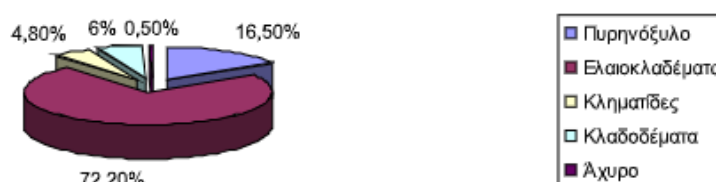
Η Ελλάδα είναι μια γεωργική χώρα που παράγει σημαντική ποσότητα υπολειμμάτων καλλιέργειας, καθώς και κοπριά ζωικού κεφαλαίου. Η χρήση των γεωργικών αποβλήτων ως ανανεώσιμη ενέργεια είναι κατάλληλη για τη βελτίωση της ενεργειακής ασφάλειας. Έτσι, η μελέτη του δυναμικού παραγωγής ενέργειας αυτών των αποβλήτων είναι σημαντική. Το εκτιμώμενο ετήσιο δυναμικό των υπολειμμάτων αγροτοβιομηχανίας (όπως προϊόντα σιταριού, βιομηχανικά φυτά, πατάτες, λαχανικά, ελιές, φρούτα, ξηροί καρποί, γαλακτοκομικά προϊόντα κ.λπ.) υπολογίστηκε σε 19.005.490 τόνους ετησίως, λαμβάνοντας υπόψη την ετήσια παραγωγή τους και αντίστοιχη παραγωγή καταλοίπων στην Ελλάδα. Στο Σχήμα 2.11, αναφέρεται ότι η θεωρητική ετήσια δυναμική της κοπριάς, συμπεριλαμβανομένων των υπολειμμάτων από την κτηνοτροφία στην Ελλάδα (βοοειδή, κοτόπουλα, κασίκες, χοίροι, πρόβατα κλπ.), ανερχόταν σε 26.952.500 τόνους/έτος. Λαμβάνοντας υπόψη τη βιοαποδομησιμότητα των υπολειμμάτων, υπολογίστηκε ότι τα συνολικά υπολείμματα 45.957.990 t/y μπορεί να παράγουν λίπασμα 330.000 t/y και μεθανόλη 1.97×10^9 m³/y. Στην Ελλάδα, περίπου το 39% αυτής της ενεργειακής ανάγκης θα μπορούσε να αντικατασταθεί από την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από γεωργικά υπολείμματα και ζωική κοπριά. Συμπερασματικά, τα υπολείμματα των καλλιεργειών και η ζωική κοπριά μπορεί να αποτελέσουν πηγή ενέργειας με σημαντική συμβολή στην Ελληνικό ενεργειακό ισοζύγιο.[37]



Σχήμα 2.11: Ετήσια παραγωγή βιομάζας ανά κατηγορία αγροτικού υπολείμματος στην Ελλάδα. [37]

Κρήτη

Η Κρήτη συμμετέχει δυναμικά στο συνολικό ενεργειακό δυναμικό, καθώς διαθέτει σημαντικά ποσά γεωργικής βιομάζας. Η μέση ετήσια παραγωγή βιομάζας στην Κρήτη που είναι ενεργειακά διαθέσιμη κυμαίνεται από 240.000 ton μέχρι 410.000 ton. Τα υποπροϊόντα, τα οποία μπορούν να παραχθούν σε συνεχή βάση από τις γεωργικές εκμεταλλεύσεις της Κρήτης και είναι ενεργειακά αξιοποιήσιμα, προέρχονται κατά κύριο λόγο από τις καλλιέργειες αμπελιών, τις ελαιοκαλλιέργειες, τις επεξεργασίες της ελιάς για την παραγωγή του ελαιολάδου και τις καλλιέργειες εσπεριδοειδών (πορτοκάλια, μανταρίνια και λεμόνια). Στο Σχήμα 2.12 παρουσιάζονται τα ποσοστά συμμετοχής των γεωργικών υπολειμμάτων στην παραγωγή της διαθέσιμης βιομάζας. [4]



Σχήμα 2.12 Ποσοστό συμμετοχής των γεωργικών υπολειμμάτων στην παραγωγή της διαθέσιμης βιομάζας στην Κρήτη. [4]

2.3 Παραγωγή Ενέργειας από Καύση Αγροτικής Βιομάζας

Η καύση της βιομάζας αποτελεί την σημαντικότερη και πιο ανεπτυγμένη τεχνολογικά διαδικασία αξιοποίησης της βιομάζας. Πρόκειται για την αρχαιότερη διεργασία, καθώς ο άνθρωπος την χρησιμοποιούσε και χρησιμοποιεί μέχρι και σήμερα σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών, όπως για θέρμανση, μαγείρεμα και παραγωγή ενέργειας.[6] Η βιομάζα διαφέρει από το γαιάνθρακα ως προς τη σύσταση και τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά της και αυτό την κάνει να χρειάζεται ειδικές τεχνικές καύσης.

Η πλήρης καύση της βιομάζας στηρίζεται στην χημική αντίδραση μεταξύ οξυγόνου και βιομάζας, όταν απελευθερώνεται ενέργεια και σχηματίζονται τα τελικά προϊόντα, τα οποία αποτελούνται κυρίως από διοξείδιο του άνθρακα από και υδρατμούς. Εάν το οξυγόνο το οποίο συμμετέχει στην διαδικασία της καύσης είναι λιγότερο από το απαιτούμενο, τότε η καύση θεωρείται ατελής. Η αντίδραση της ατελούς καύσης είναι ανεπιθύμητη, επειδή απελευθερώνεται λιγότερη ενέργεια και εξάγεται τοξικό μονοξείδιο του άνθρακα.

Οι προϋποθέσεις που απαιτούνται για να επιτευχθεί μία πλήρης καύση είναι:

- Οι ποσότητες που θα χρησιμοποιηθούν από το οξειδωτικό μέσο, αλλά και από το καύσιμο υλικό, να είναι επαρκείς.
- Απομάκρυνση των απαερίων που παράγονται κατά την καύση.
- Συνεχής απομάκρυνση των υπολειμμάτων της καύσης.
- Η αναλογία μεταξύ του υλικού προς καύση και του οξειδωτικού μέσου να είναι σωστή.
- Η θερμοκρασία ανάφλεξης να είναι η επιθυμητή. [23]

2.3.1 Επίδραση της Τροφοδοσίας στην αντίδραση

Οι διεργασίες μετατροπής της βιομάζας σε ενέργεια επηρεάζονται από τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά της. Οι ιδιότητες που θεωρούνται περισσότερο καθοριστικές είναι:

- Η περιεκτικότητα σε υγρασία
- Η περιεκτικότητα σε τέφρα
- Το μέγεθος των σωματιδίων

Περιεκτικότητα σε υγρασία

Η περιεκτικότητα σε υγρασία έχει πολύ βασική επίδραση στην ενεργειακή μετατροπή της βιομάζας, είτε μετατρέπεται βιοχημικά είτε θερμοχημικά. Η ποιότητα της βιομάζας επηρεάζεται λόγω του ότι η αύξησή της υγρασίας μέχρι 40% μειώνει τη θερμογόνο δύναμή της κατά 65%. [24] Η υγρασία μπορεί να κυμαίνεται λιγότερο από 10%, για κάποια αγροτικά υπολείμματα όπως το άχυρο και τα τσόφλια, μέχρι πάνω από 60% π.χ. για ζαχαροκάλαμο. Η βιομάζα που προέρχεται από κτηνοτροφικά απόβλητα, όπως η κοπριά, ή από οργανικά απόβλητα όπως το τυρόγαλο έχει γενικά πολύ υψηλή υγρασία, γεγονός που τη καθιστά ευκολότερη στη μεταφορά της μέσω αντλιών. [26]

Η μεγάλη περιεκτικότητα σε υγρασία μπορεί να οδηγήσει σε ατελή καύση, , σε υπερβολικά υψηλές εκπομπές σωματιδίων, σε χαμηλή θερμοκή αποδοτικότητα και στο σχηματισμό προϊόντων, όπως οι πίσσες, οι οποίες επηρεάζουν αρνητικά τη λειτουργία του συστήματος.

Η διεργασία της ξήρανσης έχει υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις και γι' αυτό το λόγο, θα πρέπει να χρησιμοποιείται η απορριπτόμενη θερμότητα που προέρχεται είτε από τα καυσαέρια των στροβίλων είτε από το αέριο προϊόν είτε από τις απορροές των εναλλακτών θερμότητας. [30]

Περιεκτικότητα σε τέφρα

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τη διεργασία της καύσης είναι η περιεκτικότητα σε τέφρα. Η ανόργανη ύλη μειώνει τη θερμότητα εντός του κλιβάνου, δυσκολεύει την ροή των αερίων και τις εκπομπές καπνοδόχων, καθώς, επίσης, δημιουργεί επικαθίσεις στις επιφάνειες του συστήματος καύσης, οι οποίες επηρεάζουν στον τρόπο λειτουργίας του κλιβάνου και την αποδοτικότητά του. Η ανόργανη ύλη δυσχεραίνει, επίσης, την συντήρηση και τη λειτουργία των λεβητών λόγω έμφραξης, αποσάθρωσης και διάβρωσης των σωληνώσεων. Ο κύριος λόγος που καθιστά το πόσο βλαβερή είναι η τέφρα, είναι η σύνθεση και η περιεκτικότητα της αρχικής βιομάζας σε συστατικά όπως το κάλιο, το πυρίτιο, το χλώριο κ.α.

Οι εναποθέσεις τέφρας στους λέβητες κατά την καύση, επηρεάζουν τόσο τη στρατηγική της λειτουργίας, όσο, και την καθαρή αποδοτικότητα των λεβήτων. Οι εναποθέσεις αυτές μειώνουν την εναλλαγή θερμότητας είτε μέσω ακτινοβολίας με τις επιφάνειες εναλλαγής θερμότητας του λέβητα, είτε μέσω συναγωγής και οδηγούν σε προβλήματα στη λειτουργία

και συντήρηση των λεβήτων, καθώς και βλάβες τον εξοπλισμό. Η έκταση των προβλημάτων, τα οποία σχετίζονται με την τέφρα, εξαρτάται από την ποσότητα και τον τρόπο σύνδεσης των ανόργανων συστατικών στη βιομάζα, τις συνθήκες καύσης και τη γεωμετρία του συστήματος. Η σύνθεση της τέφρας επηρεάζει τη θερμοκρασία αποσκήρυνσής της, το ιξώδες και τις επικαθίσεις.[88]

Όταν η σύνθεση της τέφρας περιέχει Al_2O_3 και SiO_2 , η τέφρα καθίσταται πυρίμαχη. Επίσης, όταν περιέχει CaO , MgO , Fe_2O_3 , Na_2O , η θερμοκρασία τήξης της τέφρας μειώνεται. Μειώνεται η αρχική θερμοκρασία παραμόρφωσης και αυξάνεται το εύρος θερμοκρασιών τήξης, εφόσον η τέφρα έχει υψηλές περιεκτικότητες σε θείο. Επιπλέον, οι επικαθίσεις είναι η κάθε μορφή εναπόθεσης τέφρας, η οποία μειώνει τον ρυθμό μεταφοράς θερμότητας και εμποδίζει την ροή των αερίων διαμέσου της μονάδας. Ταξινομούνται σε επικαθίσεις τηγμένης σκωρίας, υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας. [88]

Η προσθήκη μικρών ποσοτήτων μιας ουσίας, των αποκαλούμενων «χημικών προσθέτων», για αλλαγή της χημικής σύνθεσης των στοιχείων, τα οποία σχηματίζουν τέφρα, μπορεί να μετατοπίσει τις κρίσιμες θερμοκρασίες τήξης, ώστε να αποφευχθεί ο σχηματισμός προβληματικών εναποθέσεων. [93]

Μέγεθος των σωματιδίων

Ένας άλλος παράγοντας, ο οποίος επηρεάζει την καύση της βιομάζας, είναι το μέγεθος και η κατανομή των μεγεθών των σωματιδίων. Έχει αποδειχθεί ότι, όσο μικρότερα είναι τα σωματίδια του καυσίμου, τόσο γρηγορότερα πραγματοποιείται η διεργασία της καύσης. Τα μεγαλύτερα σωματίδια απαιτούν μεγαλύτερους χρόνους παραμονής στο θάλαμο καύσης, για μια δεδομένη θερμοκρασία. [28]

2.3.2 Μικρά Εμπορικά Συστήματα

Σήμερα, η καύση βιομάζας μικρής κλίμακας είναι μία από τις πιο σημαντικές εφαρμογές βιοενέργειας. Προωθείται από ευρωπαϊκά και εθνικά μέτρα για την προώθηση της αξιοποίησης της βιομάζας για παραγωγή ενέργειας. Η ευρωπαϊκή αγορά οικιακών συστημάτων θέρμανσης με βάση τη βιομάζα αναμένεται να αυξηθεί ουσιαστικά κατά περίπου 130% έως το 2020 (με βάση το 2009). Επιπλέον, η οικιακή καύση βιομάζας για τη

θέρμανση χώρων και την παραγωγή ζεστού νερού κατέχει ένα σημαντικό μερίδιο, στη συνολική παραγωγή ενέργειας από βιομάζα (περίπου το 50% το 2014 εντός της ΕΕ-28.

Εστίες καύσης ξύλου

Οι εστίες καύσης ξύλου ταξινομούνται ανάλογα με την διαδρομή του αέρα μέσω του θαλάμου καύσης. Στην αγορά υπάρχουν τέσσερις τύποι, που χρησιμοποιούνται και δέχονται τροποποιήσεις. Οι τύποι αυτοί διακρίνονται από την ροή του πρωτεύοντα αέρα σε καθοδικής ροής, ανοδικής ροής, ροής τύπου S, ή διασταυρούμενης ροής.

Οι κύριοι τρόποι μέσω των οποίων οι εστίες απελευθερώνουν θερμότητα είναι η ακτινοβολία και η συναγωγή. Η επένδυση των εστιών γίνεται με πυρίμαχα υλικά του πατώματος και των τοιχωμάτων του θαλάμου καύσης. Στο κέντρο του πυθμένα θαλάμου καύσης, μπορεί να κατασκευαστεί μια αποσπώμενη εσχάρα από χυτοσίδηρο για να αφαιρεθεί η τέφρα, ή περισυλλέγοντάς την, τοποθετώντας την εντός δοχείου, ή μαζεύοντάς την από το πάτωμα. Υπάρχουν, επίσης, χειροκίνητες βαλβίδες που ελέγχουν τον αέρα καύσης. Αν εξοπλιστεί ο θάλαμος καύσης, με στοιχεία ελέγχου της ροής σε κεκλιμένη και οριζόντια διάταξη, κατασκευασμένα από ατσάλι ή βερμικουλίτη, βελτιώνεται η απόδοση και η ποιότητα της καύσης. Επιπρόσθετα, για να βελτιωθεί η αποδοτικότητα της καύσης, χρησιμοποιείται η μηχανική τροφοδοσία αέρα ή καταλυτική καύση. Έτσι, μέσω της μηχανικής τροφοδοσίας, η καύση έχει αποδοτικότητα άνω του 90% και μειώνονται οι εκπομπές σε μεγάλο βαθμό. [83]

Οι καταλυτικοί καυστήρες τοποθετούνται στο κανάλι απαερίων και δεν πρέπει να βρίσκονται κοντά στο θάλαμο καύσης. Κατασκευάζονται από πυρίμαχα υλικά, τα οποία εξωθούνται σε διάταξη μορφής κυψελίδας. Ως καταλύτες χρησιμοποιούνται ευγενή μέταλλα (ρόδιο, παλλάδιο, πλατίνα και συνδυασμός τους) ή οξειδία μετάλλων. Έτσι, όταν ο φτάσει ο καπνός στην επιφάνειά του, ο καπνός θα αναφλεχτεί σε θερμοκρασίες πολύ χαμηλότερες από 250 °C. Εν αντιθέσει, χωρίς να χρησιμοποιηθεί καταλύτης, ο καπνός θα αναφλεχτεί σε θερμοκρασίες 530 °C. Οι ειδικοί που παράγουν τους καταλύτες εκτιμούν ότι ο προσδόκιμος χρόνος ζωής τους είναι 10.000 ώρες κι έχοντας αποδοτικότητα καύσης γύρω στο 75%, με τον όρο ότι θα συντηρούνται σωστά. [72,88]

Για παράδειγμα, στην πόλη Άμστερνταμ της Ολλανδίας, πραγματοποιήθηκε μια δοκιμή καύσης, χρησιμοποιώντας απορρίμματα ξύλου. Μέσω μιας τυπικής εστίας καύσης ξύλου, με δυναμικότητα 70 kW, προέκυψε το πόρισμα ότι μπορεί να δημιουργηθεί εστία καύσης ξύλου

για κεντρική θέρμανση με δυναμικότητα 1.5 MW. Όμως, η μονάδα αυτή πρέπει να εξοπλισθεί με έναν μαγνητικό διαχωριστή, έναν αυτόματο σύστημα απομάκρυνσης της τέφρας και μια συσκευή τεμαχισμού και να καθαρίζει τα απαέρια μέσω ηλεκτροστατικού φίλτρου και ενός πολυκυκλώνα. [29]

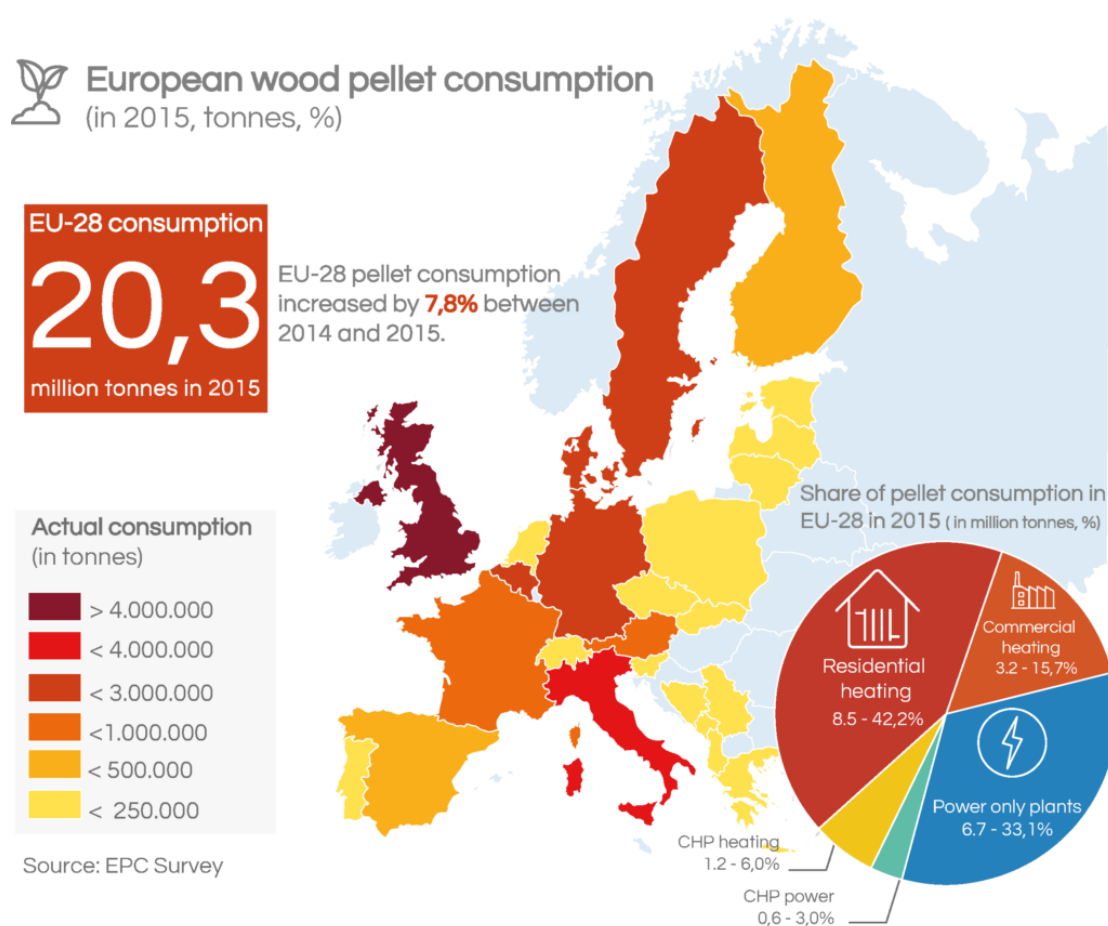
Εστίες αποθήκευσης θερμότητας

Χαρακτηριστικό παράδειγμα κλιβάνων που αποθηκεύουν θερμότητα είναι οι κλίβανοι φυσαλίδων. Αποτελούνται από μεγάλες εστίες, οι οποίες είναι κατασκευασμένες από πλάκες προερχόμενες από βαριές πέτρες. Κατά την καύση, ένα σημαντικό μερίδιο της θερμότητας παραμένει στην εστία, το οποίο και αποθηκεύεται. Έτσι, για να θερμανθούν οι οικιακοί χώροι, εκλύεται, από την εστία, η αποθηκευμένη θερμότητα. Το βασικό υλικό καύσης είναι το ξύλο, το οποίο καίγεται με γρήγορους ρυθμούς. Ένα μεγάλο μερίδιο θερμότητας παραμένει συσσωρευμένο στη μάζα του κλιβάνου, το οποίο και με την επακόλουθη κατάσβεση της φωτιάς εξακολουθεί να εκλύει θερμότητα για μεγάλο χρονικό διάστημα. Μέσω μιας εμπρόσθιας γυάλινης εισόδου, εκπέμπεται θερμότητα με την αρωγή της ακτινοβολίας. Ένα άλλο τέτοιου είδους εστία είναι η επιστρωμένη με πλάκες εστία. Κατασκευάζεται με την βοήθεια κεραμικών υλικών και μπορεί να προκατασκευαστεί μερικώς ή να κατασκευαστεί άμεσα. [58]

Σε κλίβανους φυσαλίδων και σε εστίες κατασκευασμένες από κεραμικά υλικά χρησιμοποιείται το σύστημα αντίθετης ροής, προκειμένου να μεταφερθεί η θερμότητα στη μάζα της πέτρας από τα θερμά απαέρια. Μέσω της μεταφοράς των καιγόμενων απαερίων στο πάνω μέρος του θαλάμου καύσης, επιτυγχάνονται υψηλές θερμοκρασίες. Κάτω και έξω από τα πλευρικά κανάλια κατευθύνονται τα θερμά απαέρια και η θερμική ενέργεια απελευθερώνεται στις πέτρες που βρίσκονται εξωτερικά. Παράλληλα, απελευθερώνεται ένα μεγάλο μερίδιο θερμότητας με την μορφή ακτινοβολίας στον εξωτερικό χώρο, με οδηγό αντίθετο από αυτόν της εσωτερικής καθοδικής ροής. Τέτοιες εστίες χρησιμοποιούνται κυρίως στην Σκανδιναβία λόγω της σταθερότητας της θερμοκρασίας του αέρα και της ταχείας θέρμανσης του αέρα. [60]

Καυστήρες και εστίες για συσσωματώματα ξύλου (μπρικόκες, πέλλετ)

Σήμερα, οι καυστήρες που χρησιμοποιούν συσσωματώματα ξύλου αντιπροσωπεύουν μία από τις πιο διαδεδομένες τεχνολογίες για την αποδοτική και χαμηλή χρήση ρύπων από βιομάζα για οικιακή θέρμανση. Σε πολλές Ευρωπαϊκές χώρες όπως η Γερμανία, Αυστρία, Σουηδία, Φινλανδία, Ιταλία, Ελλάδα, Ελβετία και Γαλλία, η τεχνολογία θέρμανσης με τα λεγόμενα “pellets” είναι αρκετά ώριμη, ώστε να ανταγωνίζεται με επιτυχία παραδοσιακές συσκευές θέρμανσης πετρελαίου και φυσικού αερίου, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.13.



Σχήμα 2.13: Κατανάλωση συσσωματωμάτων ξύλου το 2015 στην Ε.Ε. [32]

Οι λέβητες πελετών χρησιμοποιούνται ως συστήματα κεντρικής θέρμανσης για απαιτήσεις θερμότητας (φορτίο θέρμανσης) άνω των 3,9 kW. Αλλά τα συστήματα κεντρικής θέρμανσης συσσωματωμάτων δεν χρησιμοποιούνται μόνο σε μονοκατοικίες (έως 30 kW), αλλά και σε

μεγαλύτερες οικιστικές ή επιχειρηματικές μονάδες με απαιτήσεις θερμότητας μερικών εκατοντάδων kW. Τα συστήματα καύσης συσσωματωμάτων λειτουργούν πιο αποτελεσματικά με πλήρες φορτίο και συνήθως μπορούν να ρυθμίζονται έως και 30% της πλήρους χωρητικότητάς τους. Δεδομένου ότι η φάση προθέρμανσης των κλιβάνων συσσωματωμάτων συνήθως διαρκεί περισσότερο από ό, τι για τα συστήματα ψεκασμού πετρελαίου ή αερίου, οι βραχείες φάσεις καύσης έχουν αρνητικές επιπτώσεις στην απόδοση του καυσίμου.[30]

Ο κλίβανος τροφοδοτείται αυτόματα με εύφλεκτο υλικό. Η τεχνολογία ελέγχου του συστήματος ρυθμίζει βαθμιαία την εισαγωγή καυσίμου για να ταιριάζει με την απαιτούμενη απόδοση θερμότητας. Ανάλογα με το συγκεκριμένο σύστημα, τα παρεχόμενα ξύλινα συσσωματώματα αναφλέγονται αυτόματα είτε με ανεμιστήρες ζεστού αέρα, είτε χρησιμοποιούν ένα μόνιμο στρώμα κεραμιδιών στο θάλαμο καύσης.

Η μέθοδος φόρτισης και καύσης του καυσίμου χωρίζεται στις παρακάτω τεχνολογίες:

- Αξονικός κλίβανος - Οι πελέτες γλιστρούν προς τα κάτω σε ένα δοχείο καύσης. Με αυτόν τον τρόπο η περιοχή καύσης ορίζεται ακριβώς. Με αυτή την τεχνολογία, ελάχιστη τέφρα παραμένει σε σύγκριση με άλλα συστήματα και μπορεί να απομακρυνθεί με μηχανισμούς καθαρισμού. Αυτός ο τύπος φόρτισης χρησιμοποιείται συνήθως για σόμπες Pellet .
- Κλίβανος με κυλινδρική εσχάρα – Τα συσσωματώματα πέφτουν από πάνω σε αρκετές χαλύβδινες πλάκες βραδείας περιστροφής με μικρές αποστάσεις. Μια σχάρα καθαρίζει τους χώρους εκκαθάρισης με κάθε περιστροφή, έτσι ώστε η τέφρα να πέσει χωρίς εμπόδια και ο αέρας καύσης μπορεί να τροφοδοτηθεί προς τα πάνω.
- Κλίβανος πλευρικής τροφοδοσίας- Αυτή η τεχνολογία λειτουργεί όμοια με την καύση τροφοδοσίας από το κάτω μέρος του κλιβάνου, εκτός από το ότι το καύσιμο πιέζεται μέσω ενός τρυπανιού πάνω στο έλασμα καύσης από την πλευρά του. Ταυτόχρονα, η πλάκα καύσης, καθώς και η τροφοδοσία αέρα μπορούν να ρυθμιστούν, ώστε να ταιριάζουν μερικές επιδόσεις.
- Τεχνολογία αναρρόφησης Η ασφάλεια του συστήματος καυσασερίων συνδυάζεται με μια σταθερή μεταλλική περιστροφική βαλβίδα και εμποδίζει την επικάλυψη του κυκλώνα ή του στροβίλου αναρρόφησης με σκόνη. Ο στενός και υψηλός κυκλώνας

καθαρίζει τον αέρα επιστροφής της σκόνης και έτσι εγγυάται τη μέγιστη διάρκεια ζωής του στροβίλου. Η μεταβλητή εστία πυρόσβεσης με την αρχή της πτώσης, μαζί με τις υψηλές θερμοκρασίες του θαλάμου καύσης, καθιστά δυνατά τα χαρακτηριστικά διαμόρφωσης.[63]

Για μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα και λιγότερη ρύπανση στον αέρα, τα σύγχρονα συστήματα θέρμανσης συσσωματωμάτων ξύλου ελέγχουν την καύση είτε μέσω ενός αισθητήρα θερμοκρασίας, ή φλόγας, σε συνδυασμό με μια μεταβαλλόμενη εισροή αέρα καύσης, μέσω ανεμιστήρα αναρρόφησης, ή αισθητήρα λάμδα. Τα καυσαέρια οδηγούνται στην καπνοδόχο μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας, με χειροκίνητο, ή αυτόματο καθαρισμό των επιφανειών επαναθέρμανσης. [31]

Στον Πίνακα 2.5, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν σε χώρες της Ευρώπης, οι εκπομπές αέριων ρύπων, η απόδοση καύσης του λέβητα και τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε καύση. [24,43,63]

Πίνακας 2.5: Αποτελέσματα δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν σε κλιβάνους συσσωματωμάτων ξύλου. [24,43,63]

Χώρα Διεξαγωγής Πειράματος	Υλικά Καύσης	CO (mg*N/m ³)	NO _x (mg*N/m ³)	Απόδοση λέβητα (%)
Wieselburg (Αυστρία)	Νορβηγικό έλατο, Κούτσουρα και κλαδιά μηλιάς	20-225	330-560	86
Pitea (Σουηδία)	Βαγάσσι, Ηλιοτρόπιο, Κέλυφος Βραζιλιάνικου φιστικιού	30-380	40-520	90
Willeurbanne (Γαλλία)	Υπολείμματα σταφυλιού, Μισχανθός	89-1600	251-264	85

Συσκευές για καύση θρυμμάτων ξύλου

Τα θρύμματα ξύλου είναι ένα τυπικό καύσιμο βιομάζας για μεγαλύτερες εγκαταστάσεις δυναμικότητας άνω των 100 kW. Υπάρχουν κάποιες εξαιρέσεις στη χρήση για θέρμανση σε αγροκτήματα ή δασικές εκτάσεις. Σε αντιστοιχία 1.000 λίτρων πετρελαίου θέρμανσης (1 m³) όγκο αποθήκευσης απαιτούνται από 12 έως 15 m³ θρυμμάτων ξύλου. Αυτός ο υψηλός όγκος αποθήκευσης λαμβάνεται υπόψη ως το μεγαλύτερο πρόβλημα, που εξετάζει τη χρήση θρυμμάτων ξύλου σε θέρμανση μικρής κλίμακας.

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν λέβητες με ξύλα, τα οποία παρέχουν θερμότητα σε σπίτια, αγροκτήματα ή βιομηχανικούς κλιβάνους. Η αυτόματη λειτουργία και οι χαμηλότερες εκπομπές ρύπων, λόγω της συνεχούς καύσης, είναι τα πλεονεκτήματα των συστημάτων θέρμανσης ξύλου, σε σύγκριση με τους λέβητες καυσόξυλων. Η τροφοδοσία θρυμμάτων ξύλου κυμαίνεται από 15 kW έως 100 MW.

Υπάρχουν τρεις κύριοι τύποι καυστήρων, οι οποίοι ποικίλλουν ανάλογα με τον προσανατολισμό των τροφοδοσιών καυσίμου:

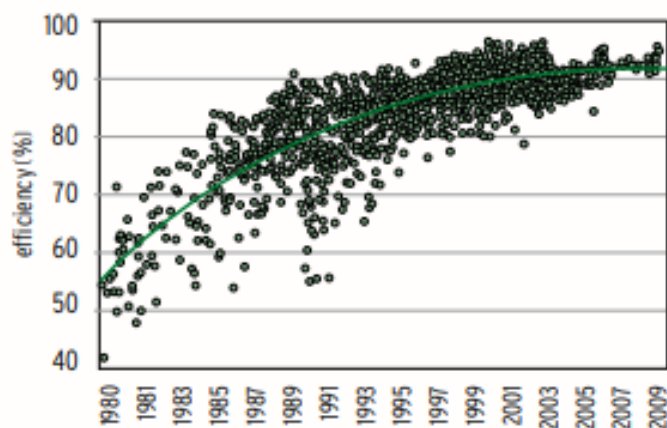
- Καυστήρες χαμηλής κατανάλωσης: το καύσιμο τροφοδοτείται στον πυθμένα του θαλάμου καύσης ή του καυστήρα καύσης. Οι καυστήρες αυτοί είναι οι πλέον κατάλληλοι για καύσιμα με χαμηλή περιεκτικότητα σε τέφρα (ξύλωση συσσωματώματα, θρύμματα).
- Καυστήρες οριζόντιας τροφοδοσίας: ο θάλαμος καύσης είναι εξοπλισμένος, είτε με σχάρα, είτε με πλάκα καυστήρα. Το καύσιμο εισάγεται οριζόντια μέσα στο θάλαμο καύσης. Κατά τη διάρκεια της καύσης, το καύσιμο μετακινείται ή ωθείται οριζόντια από τη ζώνη τροφοδοσίας στην πλάκα του καυστήρα, ή στη σχάρα. Οι οριζόντιοι καυστήρες τροφοδοσίας μπορούν να καούν ξύλα και συσσωματώματα ξύλων.
- Καυστήρες μετακινούμενης σχάρας: αναπτύχθηκαν για καύση θρυμμάτων ξύλου σε μονάδες μικρής κλίμακας. Τα θρύμματα πέφτουν μέσω ενός άξονα πάνω σε ένα στρώμα αποτελούμενο, είτε από μια σχάρα, είτε από έναν αποστακτήρα. Ο διαχωρισμός του συστήματος τροφοδοσίας και της εστίας πυρόσβεσης εξασφαλίζει την αποτελεσματική προστασία από την καύση στο καύσιμο. Η τέφρα απομακρύνεται χειροκίνητα ή μηχανικά με

μια σχάρα απομάκρυνσης. Αυτό το σύστημα τροφοδοσίας επιτρέπει την πολύ ακριβή τροφοδοσία των θρυμμάτων σύμφωνα με τις τρέχουσες απαιτήσεις θερμότητας.[66] Στον Πίνακα 2.6, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν σε χώρες της Ευρώπης και ενδείκνυνται οι εκπομπές αέριων ρύπων, η απόδοση καύσης του λέβητα και τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε καύση.[48,49]

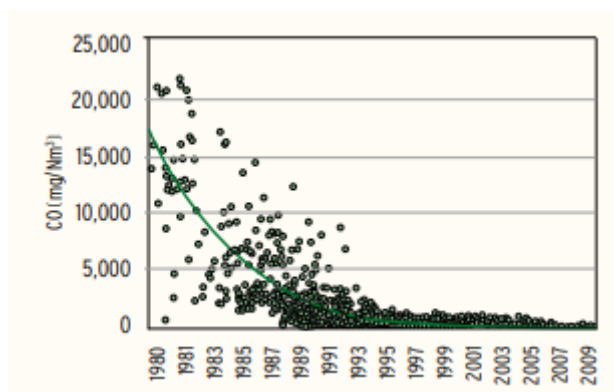
Πίνακας 2.6: Αποτελέσματα δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν σε καυστήρες θρυμμάτων ξύλου. [48,49]

Χώρα Διεξαγωγής Πειράματος	Υλικά Καύσης	CO (mg*N/m ³)	NO _x (mg*N/m ³)	Απόδοση λέβητα (%)
Barberaz (Γαλλία)	Υπολείμματα ντομάτας και σταφυλιού, πριονίδι πεύκου	495-631	428-456	90
Τυνησία	Υπολείμματα ελαίου, πριονίδι πεύκου	338-1800	58-214	90

Στην Αυστρία, για παράδειγμα, οι εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα έχουν σταδιακά αυστηρότερες προδιαγραφές, γεγονός που προκάλεσε το ανάπτυξη λεβήτων με εξαιρετικά χαμηλές εκπομπές. Στα ακόλουθα Σχήματα 2.14 και 2.15, παρουσιάζονται οι τεχνολογίες βελτίωσης λεβητών βιομάζας που χρησιμοποιούν καυσόξυλα, ξύλα και θρύμματα ξύλων. Κατά τη διάρκεια των τελευταίων 30 ετών, η μέση απόδοση από λέβητες βιομάζας έχει αυξηθεί από περίπου 55% σε περισσότερο από 90% (με βάση την καθαρή θερμική περιεκτικότητα αξία) και οι μέσες εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα έχουν μειωθεί από 15.000 mg*N/m³ σε λιγότερο από 50 mg*N/m³ (σε 13% O₂). [33]



Σχήμα 2.14: Αποτελέσματα των δοκιμών βελτίωσης για τους λέβητες βιομάζας.[34]



Σχήμα 2.15: Εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα των δοκιμών για τους λέβητες βιομάζας.[34]

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

3.1. Καύσιμα και Προετοιμασία

Οι πυρήνες ελιάς ή αλλιώς πυρηνόξυλο και οι φλοιοί από καρύδια αποτέλεσαν τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την μελέτη αυτή. Τα υλικά αυτά παρουσιάζουν ομοιομορφίες στο είδος, τη σύσταση και τα ενεργειακά τους χαρακτηριστικά, όπως παραπλήσιες μέσες τιμές θερμογόνου δύναμης και μικρές διαφορές στα ποσοστά τέφρας και υγρασίας. Έτσι, λόγω αυτών των χαρακτηριστικών καθίστανται κατάλληλα για τροφοδοσία σε μικρούς καυστήρες βιομάζας. Για να διεξαχθούν οι παραμετρικές μελέτες του συστήματος καύσης επιλέχθηκε το πυρηνόξυλο, εφόσον αποτελεί το κύριο γεωργικό απόβλητο της Κρήτης. Τα δείγματα πυρηνόξυλου χορηγήθηκαν από την εταιρεία ΑΒΕΑ-Ανώνυμος Βιομηχανική Εταιρεία 'Ανατολή', η οποία είναι η αρχαιότερη ελαιουργική βιομηχανία πανελλαδικά και στεγάζεται στα Χανιά της Κρήτης. Επιπλέον, οι φλοιοί του καρυδιού χορηγήθηκαν από τον κο Χάρη Χοχλιό από την Ξάνθη.

Σχετικά με την προετοιμασία των υλικών, πραγματοποιήθηκαν τα ακόλουθα στάδια. Κατ' αρχάς, για να ληφθεί η επιλεχθείσα κοκκομετρία (1-6 mm) των δειγμάτων, τα δείγματα αλέστηκαν από το μαχαιρόμυλο Pulverisette 15, της εταιρείας FRITSCH, (Σχήμα 3.1) περνώντας από κατάλληλη σίτα. Έπειτα, πραγματοποιήθηκε η κοσκίνηση των δειγμάτων σε δονούμενα κόσκινα Analysette 3 PRO της εταιρείας FRITSCH. Τέλος, πραγματοποιήθηκε η ξήρανση των υλικών με τη βοήθεια κλιβάνου σε θερμοκρασία 110 °C για περίπου 8 ώρες.



Σχήμα 3.1: Μαχαιρόμυλος.



Σχήμα 3.2: Κόσκινο 1mm.



Σχήμα 3.3: Κλίβανος Ξήρανσης.

Μια πρώτη σειρά δοκιμών διεξήχθη για την βαθμονόμηση του καυστήρα, για κάθε βιοκαύσιμο που επρόκειτο να χρησιμοποιηθεί στα πειράματα. Η βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε για να προσδιοριστεί η ποσότητα του εκάστοτε βιοκαυσίμου που εισήχθη στον καυστήρα από το σιλό σε σχέση με το χρόνο. Συγκεκριμένα, για να υπολογιστεί η παροχή του κάθε υλικού εισήχθη μια συγκεκριμένη ποσότητα καυσίμου στο σιλό και τέθηκε σε λειτουργία ο ατέρμονας κοχλίας του καυστήρα για διάρκεια 5 λεπτών σε διάφορους ρυθμούς τροφοδοσίας με σταθερή αναρρόφηση αέρα με μέση παροχή αέρα $501.87 \text{ (m}^3/\text{h)}$. Ο ρυθμός τροφοδοσίας προσδιορίστηκε από τις ακολουθίες διαστήματος καθυστέρησης on-off του πρώτου και του δεύτερου διακόπτη, αντίστοιχα. Έτσι, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.1, αναγράφονται οι παροχές των υλικών:

Πίνακας 3.1: Βαθμονόμηση.

	Ροοστάτης ON (sec)	Ροοστάτης OFF (sec)	Μέσος Ρυθμός Τροφοδοσίας (kg/h)
Πυρήνας Ελιάς	10	30	13.5
	20	30	17.7
	30	30	23.7
	40	30	27.9
	50	30	32.7
Φλοιός Καρυδιού	10	30	13.8
	20	30	20.96
	30	30	31.24
	40	30	36.7
	50	30	43.0

Όσον αφορά στη βαθμονόμηση του ανεμιστήρα απαερίων (fan), διεξήχθησαν μετρήσεις της ταχύτητας του αέρα στις διάφορες θέσεις της διαμέτρου του απαγωγού των καυσαερίων, προκειμένου να υπολογιστεί η μέση παροχή αέρα για την εκάστοτε θέση ροοστάτη. Εν συνεχεία, προσδιορίστηκαν οι μέσες παροχές αέρα, οι οποίες προκύπτουν μέσω των μετρήσεων των ταχυτήτων του αέρα και του εμβαδού του σωλήνα. Οι μέσες παροχές του αέρα αναγράφονται στον Πίνακα 3.2

Πίνακας 3.2:Βαθμονόμηση Ανεμιστήρα Απαερίων

Θέση Ροοστάτη	Μέση Ταχύτητα (m/s)	Μέση Παροχή (m ³ /h)
1.5	2.84	501.87
2	7.96	1406.65

3.2 Χαρακτηρισμός Δειγμάτων

3.2.1 Προσεγγιστική Ανάλυση

Προσδιορισμός περιεκτικότητας σε υγρασία

Αρχικά, λήφθηκε αντιπροσωπευτικό δείγμα βιομάζας 2 γραμμαρίων (<250μm), το οποίο ζυγίστηκε σε αναλυτικό ζυγό ακριβείας $\pm 0,1\text{mg}$ και, εν συνεχεία, ξηράνθηκε σε θερμοκρασία 100-110 °C υπό ατμοσφαιρική πίεση. Αυτό πραγματοποιήθηκε για να προσδιοριστεί η φυσική περιεκτικότητα του δείγματος σε υγρασία. Ακολούθως, χρησιμοποιώντας τον κλίβανο ξήρανσης, το δείγμα ξηράνθηκε για 90 λεπτά σε θερμοκρασία 100-110 °C. Έπειτα, το υλικό εισήχθη σε δοχείο σε συνθήκες έλλειψης υγρασίας για 30 λεπτά και ξαναζυγίστηκε. Έτσι, υπολογίστηκε η περιεκτικότητα του υλικού σε υγρασία, χρησιμοποιώντας τον παρακάτω τύπο:

$$\text{Υγρασία}(\%) = \frac{W_{\alpha\rho\chi} - W_{\tau\epsilon\lambda}}{W_{\alpha\rho\chi}} \cdot 100 \quad (3.1)$$

όπου,

$W_{\alpha\rho\chi}$: το αρχικό βάρος του δείγματος σε g.

$W_{\tau\epsilon\lambda}$: το τελικό βάρος του δείγματος μετά τη ξήρανση σε g.

Προσδιορισμός περιεκτικότητας σε τέφρα

Καίγοντας το ξηρό δείγμα του εκάστοτε υλικού σε κλίβανο σε θερμοκρασία 550 °C και ζυγίζοντας το ανόργανο υπόλειμμα σε αναλυτικό ζυγό, προσδιορίστηκε το ποσοστό της τέφρας του κάθε υλικού βιομάζας, χρησιμοποιώντας τον παρακάτω τύπο:

$$\text{Τέφρα επί ξηρού}(\%) = \frac{W_{\tau\epsilon\lambda}}{W_{\alpha\rho\chi}} \cdot 100 \quad (3.2)$$

Προσδιορισμός πτητικών συστατικών

Θερμαίνοντας το δείγμα βιομάζας απουσία οξυγόνου στους 900 °C, απελευθερώνεται η πτητική ύλη. Αναλυτικότερα, χρησιμοποιώντας θερμοζυγό τύπου PERKIN ELMER TGA-6 διεξήχθησαν δοκιμές θερμοβαρυτομετρικής ανάλυσης. Τοποθετώντας το υλικό στην υποδοχή του θερμοζυγού, θερμάνθηκε σε θερμοκρασία 110 °C, μέχρι να απομακρυνθεί η υγρασία από το υλικό. Για να πραγματοποιηθεί η πυρόλυση του υλικού, το υλικό θερμάνθηκε στους 900 °C σε ατμόσφαιρα αζώτου με ρυθμό θέρμανσης 10 °C/min. Έτσι, υπολογίστηκαν τα πτητικά συστατικά του υλικού, χρησιμοποιώντας τον παρακάτω τύπο:

$$\text{Πτητικά}(\%) = \frac{W_{110} - W_{900}}{W_{110}} \cdot 100 \quad (3.3)$$

όπου,

W_{110} : το βάρος του ξηρού δείγματος στους 110°C σε g.

W_{900} : το τελικό βάρος του δείγματος στους 900 °C σε g.

Προσδιορισμός μόνιμου άνθρακα

Υπολογίστηκε η περιεκτικότητα του μόνιμου άνθρακα του υλικού, χρησιμοποιώντας τον παρακάτω τύπο:

$$\begin{aligned} \text{Μόνιμος Άνθρακας επί ξηρού}(\%) &= \\ &= 100 - \text{Τέφρα επί ξηρού}(\%) - \text{Πτητικά επί ξηρού}(\%) \end{aligned} \quad (3.4)$$

3.2.2 Στοιχειακή Ανάλυση

Για να προσδιοριστούν ποσοτικά τα στοιχεία C,H,N,S,O χρησιμοποιήθηκε ο αυτόματος στοιχειακός αναλυτής του εργαστηρίου Ανάλυσης Ρευστών και Πυρήνων Υπόγειων Ταμιευτήρων του Τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4 : Αυτόματος Στοιχειακός Αναλυτής Flash 2000 Series, της εταιρείας ThermoFisherScientific.

Ο αναλυτής περιέχει έναν αυτόματο δειγματολήπτη τύπου MAS 200R, που συνδέεται με μια στήλη χαλαζία, τον αέριο χρωματογράφο και έναν αναλυτικό ζυγό τύπου XP6. Η στήλη χαλαζία βρίσκεται σε κλίβανο σε θερμοκρασία 900 °C, έχοντας σταθερή παροχή ηλίου (He). Ο αέριος χρωματογράφος είναι συνδεδεμένος με ανιχνευτή θερμικής αγωγιμότητας.

Πρακτικά, ζυγίστηκαν 5mg για κάθε ξηρό υλικό και τοποθετήθηκαν σε κάψα κασσίτερου και χρησιμοποιώντας ως καταλύτη πεντοξείδιο του βαναδίου (V_2O_5). Η λειτουργία του συστήματος βασίζεται στην αρχή της δυναμικής ανάφλεξης-καύσης του υλικού με εισαγωγή οξυγόνου. Η διαδικασία ξεκινάει με τη ροή οξυγόνου στη στήλη χαλαζία καθώς η κάψα κασσίτερου πέφτει στη στήλη, καταλήγοντας σε ένα έντονα οξειδωτικό περιβάλλον. Έτσι, τα

στοιχεία του υλικού καίγονται και μετατρέπονται σε αέρια λόγω της υψηλής θερμοκρασίας που εκτείνεται μέχρι και τους 1800 °C. Ενώσεις που δημιουργούνται όπως NO_x και SO₃ ανάγονται καταλυτικά σε N₂ και SO₂. Τα προϊόντα της διαδικασίας διαχωρίζονται στο χρωματογράφο και εντοπίζονται από τον ανιχνευτή θερμικής αγωγιμότητας. Τέλος, μέσω λογισμικού, εντοπίστηκαν τα ηλεκτρικά σήματα που έχει ο ανιχνευτής και υπολογίζονται τα ποσοστά επί τοις εκατό θείου, υδρογόνου, αζώτου και άνθρακα στα προς εξέταση ξηρά δείγματα.

Αφαιρώντας από το 100 τα ποσοστά άνθρακα (C), υδρογόνου (H), αζώτου (N), θείου (S) και τέφρας επί ξηρού υπολογίστηκε το ποσοστό του οξυγόνου.

Θερμογόνος Δύναμη

Όσον αφορά τη θερμογόνο δύναμη, αποτελεί την ποσότητα θερμότητας που απελευθερώνεται κατά τη πλήρη καύση συγκεκριμένης ποσότητας καυσίμου βιομάζας. Όταν δεν είναι δυνατόν να προσδιοριστεί η θερμογόνος δύναμη, χρησιμοποιούνται εμπειρικές σχέσεις και διαγράμματα για τον προσδιορισμό της. Η θερμογόνος δύναμη υπολογίζεται με τον παρακάτω τύπο: [92]

$$Q \left(\frac{MJ}{kg} \right) = \frac{33.5 \cdot C + 142.3 \cdot H - 15.4 \cdot O - 14.5 \cdot N}{100} \quad (3.5)$$

Όπου, Q: θερμογόνος σε ξηρή βάση άνευ τέφρας

C: το ποσοστό του άνθρακα που προέκυψε από τη στοιχειακή ανάλυση σε ξηρή βάση άνευ τέφρας.

H, O, N: ποσοστά των στοιχείων (Υδρογόνο H, Οξυγόνο O, Άζωτο N) που προέκυψαν από τη στοιχειακή ανάλυση σε ξηρή βάση άνευ τέφρας.

3.2.3 Χημική Ανάλυση Τέφρας

Μέθοδος Φασματομετρίας Ακτίνων-Χ Φθορισμού (XRF)

Η χημική ανάλυση των τεφρών των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Ανόργανης Γεωχημείας Οργανικής Γεωχημείας και Οργανικής Πετρογραφίας, μέσω της

μονάδας φασματοσκοπίας ακτίνων-Χ φθορισμού EDXRF. Είναι τύπου Bruker AXS S2 Ranger με λυχνία ακτίνων Χ- ανόδου Pd (max 50 Watt, 50 KV, 2mA). Σκοπός της μεθόδου της φασματομετρίας ακτίνων-Χ είναι ο προσδιορισμός της χημικής σύστασης των υλικών, υπολογίζοντας την εκλυόμενη ακτινοβολία ακτίνων-Χ που προκαλείται λόγω της σύγκρουσης μεταξύ του δείγματος και των ακτίνων-Χ. Μίγμα δείγματος τέφρας 5g αναμείχθηκε με 0.5g κερί (Wax). Τέλος, το μίγμα τοποθετήθηκε σε ειδικό μεταλλικό καλούπι μαζί με ποσότητα βορικού οξέος και συμπιέστηκε στην υδραυλική πρέσα, μέχρις ότου ολοκληρωθεί η κατασκευή της ταμπλέτας προς ανάλυση.

3.3 Περιγραφή Καυστήρα

Στο Εργαστήριο Εξευγενισμού και Τεχνολογίας Στερεών Καυσίμων έχει κατασκευαστεί μια καινοτόμος μονάδα καύσης, με σκοπό την παραγωγή θερμικής ενέργειας, χρησιμοποιώντας ποικίλους τύπους καυσίμων βιομάζας. Η μονάδα έχει ονομαστική ισχύ 65 kW και περιλαμβάνει ένα καυστήρα με σύστημα τροφοδοσίας καυσίμου ατέρμονος κοχλία, έναν λέβητα, διάφορα στοιχεία ασφαλείας (όπως δοχείο διαστολής, βαλβίδα πλήρωσης κτλ.), ένα κυκλοφορητή νερού και ένα σιλό τροφοδοσίας



Σχήμα 3.5: Πρότυπη Μονάδα Καύσης.

Ο λέβητας μεταβιβάζει θερμότητα στο θερμαντικό μέσο που είναι νερό, το οποίο κυκλοφορεί σε ένα κλειστό κύκλωμα. Ο πιο διαδεδομένος τύπος λέβητα και αυτός ο οποίος χρησιμοποιείται πειραματικά είναι ο κυψελωτός λέβητας, όπου τα καυσαέρια διέρχονται μέσω συστοιχίας σωλήνων προσαρμοσμένων στο κύριο σώμα του λέβητα. Ο λέβητας αποτελείται από δύο πλευρικές επιφάνειες και είναι κατασκευασμένος από χυτοσίδηρο, επειδή διαβρώνεται με αργό ρυθμό, καθώς απαιτεί μικρότερες ποσότητες νερού κατά τη λειτουργία του, σε σχέση με τους χαλύβδινους λέβητες.

Για να αναμειχθεί το καύσιμο με τον αέρα, προκειμένου να προκληθεί και να συντηρηθεί η καύση, έχει εγκατασταθεί μια συσκευή πάνω στον λέβητα, ο καυστήρας.

Προκειμένου να μεταφερθεί το θερμαντικό μέσο από το λέβητα στα θερμαντικά σώματα, υπάρχει ο κυκλοφορητής, ο οποίος είναι αντλία φυγοκεντρικού τύπου. Για να εξασφαλισθεί η ομαλή λειτουργία του συστήματος, και κατ' επέκταση για να διατηρηθεί η σταθερή πίεση του νερού στο σύστημα, υπάρχει ένα κλειστό δοχείο διαστολής και το ασφαλιστικό πίεσης.

Το σύστημα που συντελεί στην μεταφορά του νερού από το λέβητα στα θερμαντικά σώματα είναι το δίκτυο σωληνώσεων, που αποτελείται από πλαστικούς σωλήνες. Το δίκτυο αυτό χρησιμοποιείται λόγω του χαμηλού κόστους και μεγάλης αντοχής στις ακραίες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας. Επιπλέον, αερόθερμα (fan coils) εσωτερικού χώρου, υψηλής απόδοσης χρησιμοποιήθηκαν για να μεταδοθεί η θερμότητα στους εσωτερικούς χώρους.

Για να απομακρυνθούν τα καυσαέρια της καύσης, χρησιμοποιήθηκε ένας απαγωγός απαερίων, ο οποίος είναι συνδεδεμένος με το λέβητα. Για να ελεγχθεί η αναρρόφηση του αέρα, χρησιμοποιήθηκε ανεμιστήρας τοποθετημένος μέσα στον απαγωγό, ο οποίος ρυθμίζεται από το πίνακα ελέγχου μέσω ενός ροοστάτη.

Τροποποιήσεις και Αναβαθμίσεις της Μονάδας Καύσης

Για να βελτιωθεί η λειτουργία του συστήματος και για να είναι πιο αξιόπιστα τα αποτελέσματα, πριν διεξαχθούν τα πειράματα, πραγματοποιήθηκαν κάποιες τροποποιήσεις στην μονάδα καύσης. Κατ' αρχάς, τοποθετήθηκε θερμιδομετρητής, ο οποίος εμφανίζει τιμές θερμοκρασίας νερού στην είσοδο, θερμοκρασίας νερού στην έξοδο, παροχής νερού και θερμίδων. Μία άλλη αναβάθμιση που πραγματοποιήθηκε ήταν η μετακίνηση του

κυκλοφορητή από τη θέση εξόδου του νερού στη θέση εισόδου, προκειμένου να μην αυξάνεται σε μεγάλες τιμές η θερμοκρασία του και να μην δημιουργούνται προβλήματα κατά τη διαδικασία του συστήματος. Τέλος, τοποθετήθηκε επιπλέον μόνωση στον καυστήρα. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε το υλικό υαλοβάμβακας, διότι το συγκεκριμένο θερμομονωτικό υλικό αντέχει στην υγρασία, στον χρόνο και παρουσιάζει μικρή αύξηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, σχετικά με τη αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος.

Μεθοδολογία Εκτέλεσης των Πειραμάτων

Κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων, κάηκαν τα δύο καύσιμα στην πρότυπη μονάδα καύσης για να προσδιοριστεί η βέλτιστη απόδοση του λέβητα με ταυτόχρονη χαμηλή εκπομπή αερίων. Στην συγκεκριμένη μελέτη, το πυρηνόζυλο και ο φλοιός καρυδιού κάηκαν τόσο ως μεμονωμένα υλικά, όσο και ως μίγματα σε αναλογίες 50-50 % και 70-30 %, αντίστοιχα. Όλα τα πειράματα επαναλήφθηκαν σε δύο ρυθμίσεις των ροοστατών τροφοδοσίας καυσίμου (ON/OFF) 10-30 και 20-30.

3.4 Πειραματική Διαδικασία

Για την διεκπεραίωση των πειραμάτων, πραγματοποιήθηκαν κάποια στάδια. Κατ' αρχάς, προετοιμάστηκαν καταλλήλως τα καύσιμα βιομάζας, που στην συγκεκριμένη μελέτη ήταν ο πυρήνας ελιάς και ο φλοιός καρυδιού. Δηλαδή, τα υλικά αλέστηκαν, κοσκινίστηκαν και ξηράνθηκαν. Έπειτα, ακολούθησε η βαθμονόμηση του καυστήρα, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3.1. Πριν την έναρξη λειτουργίας, φορτώθηκε ποσότητα υλικού, της τάξεως των 15 kg, στο σιλό και, αμέσως μετά, τέθηκε σε λειτουργία ο ατέρμονας κοχλίας προκειμένου να περάσει ικανοποιητική ποσότητα στο θάλαμο του καυστήρα. Αυτό πραγματοποιήθηκε για να πληρωθεί ο νεκρός όγκος μεταξύ σιλό και καυστήρα. Ύστερα, χρησιμοποιήθηκαν προσανάμματα για να βοηθηθεί η έναρξη τη καύσης. Ορίστηκε, στον θερμοστάτη του νερού, το όριο θερμοκρασίας στους 70 °C, προκειμένου να διακοπεί η τροφοδοσία αερίου και υλικού όταν φτάσει το νερό σε εκείνη τη θερμοκρασία. Ταυτόχρονα, όταν η θερμοκρασία του

νερού στο εσωτερικό του λέβητα έφθανε τους 50 °C περίπου τέθηκε σε λειτουργία ο κυκλοφορητής, προκειμένου να κυκλοφορεί νερό στο σύστημα και να εκτονωθεί η θερμότητα του συστήματος μέσω των αερόθερμων του εργαστηρίου (FanCoils). Ο κοχλίας σταματούσε να λειτουργεί στους 70 °C. Η θερμοκρασία του νερού μπορεί να έφτανε και τους 80 °C, αλλά η τροφοδοσία επαναλειτούργούσε όταν η θερμοκρασία του νερού έφθανε στους 67 °C.

Στάδια Μέτρησης Θερμοκρασίας

Για να καταγραφούν οι τιμές της θερμοκρασίας του νερού, χρησιμοποιήθηκαν δυο θερμομέτρα, τα οποία τοποθετήθηκαν στην είσοδο και έξοδο του νερού από τον λέβητα. Στα πειράματα, όταν έφτανε η θερμοκρασία του νερού στους 30 °C, καταγράφονταν οι μετρήσεις των θερμομέτρων του νερού που ήταν τοποθετημένα στην έξοδο (T_{out}) και είσοδο (T_{in}) του λέβητα. Σε κάθε πείραμα πραγματοποιήθηκαν τρεις πλήρεις πειραματικοί κύκλοι και οι μετρήσεις των θερμοκρασιών καταγράφονταν ανά λεπτό.

Στάδιο Μέτρησης Καυσαερίων

Στην πειραματική διαδικασία, αξιολογήθηκε η ποιότητα της καύσης με βάσει την ανάλυση των καυσαερίων, χρησιμοποιώντας έναν φασματικό πολυαναλυτή GA-40plus (Σχήμα 3.6). Ο πολυαναλυτής αυτός έχει κατασκευαστεί από τον αυστριακό οίκο Madur Electronics και περιλαμβάνει διπλό εσωτερικό φίλτρο, ξηραντήρα και μία σειρά από ηλεκτροχημικούς αισθητήρες. Κάποιες από τις μετρήσεις του πολυαναλυτή είναι οι εξής: η μέτρηση συγκέντρωσης διοξειδίου του θείου (SO_2), διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), οξυγόνου (O_2), οξειδίων του αζώτου (NO_x), λόγου περίσσειας αέρα (συντελεστής 'lambda' λ), της θερμοκρασίας των καυσαερίων στην έξοδο της καπνοδόχου, θερμοκρασίας του περιβάλλοντος και μια αλληλουχία από ειδικές μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο. Οι μετρήσεις μπορούν να ληφθούν από τον αναλυτή, είτε προβάλλοντας τις ενδείξεις στην οθόνη του πολυαναλυτή, είτε σε έντυπη μορφή, εκτυπώνοντάς τις από τον ενσωματωμένο θερμικό εκτυπωτή, είτε σε μορφή .csv, που εκδίδεται συνδέοντας τον πολυαναλυτή μέσω σειριακής θύρας σε ηλεκτρονικό υπολογιστή.



Σχήμα 3.6: Πολυαναλυτής GA-40plus.

Κατά την πειραματική διαδικασία, ο αναλυτής συνδέθηκε με ένα ακροφύσιο δειγματοληψίας με τη καπνοδόχο. Το ακροφύσιο τοποθετήθηκε σε ειδική οπή που ανοίχτηκε στη κάμινο, επειδή σε αυτό το σημείο τα καυσαέρια αναμειγνύονται καλύτερα και βρίσκεται στο μέσο της ροής του καυσαερίου, προκειμένου οι αναλύσεις των καυσαερίων να είναι αξιόπιστες. Πριν αρχίσει το πειραματικό μέρος, ελέγχθη το φίλτρο αν μπορούσε να χρησιμοποιηθεί κι αν όχι, γινόταν η αντικατάστασή του. Πρακτικά, ο αναλυτής άρχισε να καταγράφει τιμές όταν η θερμοκρασία του νερού έφτανε σε θερμοκρασία 30 °C κάθε 30 δευτερόλεπτα, δηλαδή όταν η καύση του καυσίμου είχε φτάσει σε καλά επίπεδα. Στο τέλος του πειράματος, για το εκάστοτε υλικό, χορηγήθηκαν στον Ηλεκτρονικό Υπολογιστή τα δεδομένα που έδειχναν τις εκπομπές των καυσαερίων, όπου η επεξεργασία τους πραγματοποιήθηκε μέσω του προγράμματος Microsoft Excel.

3.5 Μετρήσεις Παραμέτρων Καύσης

Συντελεστής Λ (περίσσεια αέρα)

Ο συντελεστής περίσσειας αέρα (λ) είναι ο αέρας που παρέχεται στον καυστήρα προς τον στοιχειομετρικό που χρειάζεται για να επιτευχθεί η τέλεια καύση, απαραίτητη προϋπόθεση

της οποίας είναι η πλήρης ανάμιξη του βιοκαυσίμου με τον αέρα. Για να αποφευχθεί πιθανή ατελής καύση χορηγείται περισσότερη ποσότητα οξυγόνου από αυτή του θεωρητικά προαπαιτούμενου στοιχειομετρικού. Έτσι, μειώνεται η πιθανότητα παραγωγής αέριων εκπομπών. Στην περίπτωση που ο συντελεστής λ πάρει τιμή 1.2, γίνεται αντιληπτό ότι ο καυστήρας λαμβάνει 20% περισσότερο αέρα απ' ότι χρειάζεται στοιχειομετρικά. Παρόλο, που το οξυγόνο περίσσειας αέρα δεν αποτελεί μέρος της καύσης, αποβάλλεται μαζί με τις εκπομπές αέριων από το λέβητα. Η απόδοση του λέβητα συνδέεται άρρηκτα με την παράμετρο της περίσσειας αέρα. Παρατηρήθηκε καλή απόδοση του λέβητα και χαμηλές εκπομπές ρύπων, όταν ο συντελεστής λ εμφάνιζε τιμές μεταξύ 1.2-2.8 κατά την διάρκεια της καύσης του υλικού. Αντιθέτως, σε μεγάλη τροφοδοσία (30-30) παρατηρήθηκαν πολύ χαμηλές τιμές του λ και κατ' επέκταση, ο λέβητας δεν ήταν αποδοτικός, λόγω της ύπαρξης αρκετής ποσότητας άκαυστου υλικού.

Θερμοκρασία καυσαερίων T_{gas} και Θερμικές απώλειες καύσης

Σημαντική παράμετρος που ελέγχει τις απώλειες θερμότητας είναι η θερμοκρασία απαγωγής των καυσαερίων. Οι θερμικές απώλειες καύσης ορίζονται ως το ποσοστό της θερμικής ενέργειας του καυσίμου που δεν χρησιμοποιείται. Στην πράξη, οι απώλειες θερμότητας είναι ανέφικτο να λάβουν μηδενικές τιμές, λόγω της θερμικής ακτινοβολίας του λέβητα, του χαμηλού επιπέδου της μόνωσης και των απωλειών θερμικών φορτίων στα καυσάερια. Για να ελαχιστοποιηθούν οι βασικές απώλειες, πρέπει η θερμοκρασία απαγωγής των καυσαερίων να παίρνει χαμηλές τιμές και, παράλληλα, να μην σχηματίζονται συμπυκνώσεις καυσαερίων. Στην περίπτωση δημιουργίας συμπυκνώσεων καυσαερίων, ο πειραματικός εξοπλισμός διαβρώνεται. Οι πολύ υψηλές θερμοκρασίες καυσαερίων μπορούν να προκληθούν από την έλλειψη περίσσειας αέρα ($\lambda < 1$), τις επικαθίσεις στα τοιχώματα του λέβητα και την κακή ρύθμιση του καυστήρα.

Εκπομπές ρύπων

Το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), τα οξείδια του αζώτου (NO_x) και το διοξείδιο του θείου (SO_2) αποτελούν τις εκπομπές των καυσαερίων και εκφράζονται σε ppm_v. Το μονοξείδιο του άνθρακα προέρχεται από ατελή καύση. Η μικρή παροχή αέρα στο θάλαμο καύσης ή η κακή ανάμιξη αέρα-καυσίμου προκαλούν αυξημένες συγκεντρώσεις μονοξειδίου του άνθρακα.

Σύμφωνα με την Ελληνική νομοθεσία, οι εκπομπές του μονοξειδίου του άνθρακα έχουν όριο 2400-4000 ppm_v (ανηγμένη για 10% O₂). Το 'lambda' και η θερμοκρασία των καυσαερίων επηρεάζουν τα οξείδια του αζώτου. Σύμφωνα με την Ελληνική νομοθεσία, οι εκπομπές των οξειδίων του αζώτου έχουν όριο 200-350 mg/Nm³ (ανηγμένη για 10% O₂). Η περιεκτικότητα του θείου στο καύσιμο επηρεάζει την ποσότητα του διοξειδίου του θείου. Βέβαια, στοιχειακό θείο δεν εμπεριέχεται σε μεγάλο ποσοστό στα βιοκαύσιμα. Σύμφωνα με την Ελληνική νομοθεσία, οι εκπομπές του διοξειδίου του θείου έχουν όριο < 20 ppm_v ή 300 mg/Nm³ (ανηγμένη για 10% O₂).

Πίνακας 3.3: Στοιχειομετρικός Αέρας Καύσης.

Βιοκαύσιμο	Παροχή καυσίμου (kg/h)	Στοιχειομετρικός αέρας καύσης ανά kg καυσίμου (m ³ /h)	Στοιχειομετρικός αέρας καύσης συναρτήσει της παροχής καυσίμου (m ³ /h)	Λόγος περίσσειας αέρα κατά τη καύση λ	Αέρας καύσης σε περίσσεια (m ³ /h)
Πυρήνας ελιάς	13.5	5.58	68.9	1.6-2.8	110.2-192.9
	17.7		90.2	1.39-2.26	125.4-203.9
	23.7		120.7	1.59-2.36	191.9-284.9
Φλοιός Καρυδιού	13.8	5.13	70.8	1.23-2.8	87.1-198.2
	21		107.8	1.2-2.8	129.4-301.8

Θερμικός Βαθμός Απόδοσης και Βαθμός Απόδοσης Καύσης

Η μέθοδος προσδιορισμού βάσει της ωφέλιμης ενέργειας (θερμότητα) προς τη προσφερόμενη ορίζει τον συντελεστή απόδοσης του συστήματος και υπολογίζεται με τον παρακάτω τύπο:

$$n_{\sigma} = \frac{Q_{out}}{Q_{in}} \cdot 100 \quad (3.6)$$

Όπου,

Q_{out} : αποδιδόμενη θερμότητα λέβητα στο νερό (MJ/kg).

Q_{in} : προσφερόμενη θερμότητα βιοκαυσίμου (MJ/kg).

Πιο αναλυτικά, ο παραπάνω τύπος γίνεται:

$$\begin{aligned} n_{\sigma} &= \frac{Q_{out}}{Q_{in}} \cdot 100 = \left(\frac{\frac{m_w}{t} \cdot C_{pw} \cdot \Delta T \cdot \Delta t}{m_k \cdot Q} \right) \cdot 100 = \\ &= \left(\frac{q_w \left(\frac{kg}{h} \right) \cdot C_{pw} \left(\frac{MJ}{kg \cdot K} \right) \cdot \Delta T (K) \cdot \Delta t (h)}{m_k (kg) \cdot Q \left(\frac{MJ}{kg} \right)} \right) \cdot 100 = \\ &= \left(\frac{q_w \cdot C_{pw} \cdot \Delta T \cdot \Delta t}{m_k \cdot Q} \right) \cdot \frac{(MJ)}{(MJ)} \cdot 100 = \frac{q_w \cdot C_{pw} \cdot \Delta T \cdot \Delta t}{m_k \cdot Q} \% \end{aligned} \quad (3.7)$$

όπου,

q_w : παροχή νερού (kg/h).

C_{pw} : θερμοχωρητικότητα νερού (MJ/kg*K).

ΔT : μέσος όρος της διαφοράς των θερμοκρασιών εξόδου και επιστροφής στο λέβητα μετά τους 70 °C (K).

Δt : χρόνος λειτουργίας μετά τους 70 °C (h).

m_k : ποσότητα καυσίμου που φορτώθηκε (kg).

Q : θερμογόνος δύναμη βιοκαυσίμου (MJ/kg).

Βαθμός απόδοσης καύσης

Για να υπολογιστεί έμμεσα ο βαθμός απόδοσης καύσης του λέβητα σύμφωνα με το εγχειρίδιο του αναλυτή (Madur), χρησιμοποιήθηκαν οι δυο συντελεστές IL (συντελεστής ατελούς καύσης) και SL (συντελεστής απωλειών καμινάδας).

Υπολογίστηκε ο δείκτης SL σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$SL = (T_K - T_{amb}) \cdot \left(\frac{A1}{CO_2} + B \right) \quad (3.8)$$

όπου,

SL: ποσοστό της θερμικής ενέργειας που εκπέμπεται από τα καυσαέρια κατά τη καύση (%).

T_k: θερμοκρασία καυσαερίων στη καπνοδόχο (°C).

T_{amb}: θερμοκρασία περιβάλλοντος (°C).

CO₂: το ποσοστό διοξειδίου του άνθρακα που μετρήθηκε από τον αναλυτή.

A₁, B: παράμετροι που εξαρτώνται από το τύπο καυσίμου. Για ξυλώδη βιομάζα η παράμετρος

A₁ ισούται με 0,650 ενώ η παράμετρος B ισούται με 0.

Υπολογίστηκε ο δείκτης IL σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$IL = \frac{a \cdot CO(\%)}{CO(\%) + CO_2(\%)} \quad (3.9)$$

όπου,

IL: απώλειες θερμότητας από ατελή καύση (%).

CO, CO₂: συγκεντρώσεις όγκου μονοξειδίου και διοξειδίου του άνθρακα στα καυσαέρια (%).

a: παράμετρος που εξαρτάται από το τύπο καυσίμου. Για ξυλώδη βιομάζα η παράμετρος α ισούται με 69.

Ο βαθμός απόδοσης καύσης υπολογίστηκε σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$n = 100 - SL - IL (\%) \quad (3.10)$$

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑ

4.1 Τυπικές Αναλύσεις Καυσίμου των Δειγμάτων

4.1.1 Προσεγγιστική Ανάλυση

Στον Πίνακα 4.1, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσεγγιστικής ανάλυσης των δειγμάτων των καυσίμων που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία. Τα δείγματα πυρήνας ελιάς και φλοιός καρυδιού εμφανίζουν χαμηλά ποσοστά υγρασίας και τέφρας, τα οποία είναι επιθυμητά για υψηλή απόδοση κατά την καύση. Τα δείγματα χαρακτηρίζονται ως αντιδραστικά, όπως προκύπτει από τα ποσοστά των πτητικών συστατικών που έχουν υψηλές τιμές και, ιδιαιτέρως, στο δείγμα πυρηνόξυλου.

Πίνακας 4.1 : Προσεγγιστική ανάλυση των δειγμάτων επί ξηρού (%).

Δείγματα	Υγρασία (%)	Τέφρα (%)	Πτητικά Συστατικά (%)	Μόνιμος Άνθρακας (%)
Πυρήνας Ελιάς (ΠΕ)	4,4	7,3	78,2	14,5
Φλοιός Καρυδιού (ΚΑ)	5,6	1,4	72,1	26,5

4.1.2 Στοιχειακή ανάλυση και θερμογόνος δύναμη

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.2, τα ποσοστά σε στοιχειακό άνθρακα, υδρογόνο και οξυγόνο είναι αρκετά υψηλά. Η θερμογόνος δύναμη των δειγμάτων κυμαίνεται σε υψηλά επίπεδα, και μπορεί να συγκριθεί με την αντίστοιχη θερμογόνο δύναμη των γαιανθράκων χαμηλής τάξης. Η περιεκτικότητα των δειγμάτων σε άζωτο είναι αρκετά χαμηλή ενώ σε θείο, αμελητέα.

Πίνακας 4.2 : Αποτελέσματα στοιχειακής ανάλυσης δείγματος επί ξηρού και θερμογόνος δύναμη δειγμάτων.

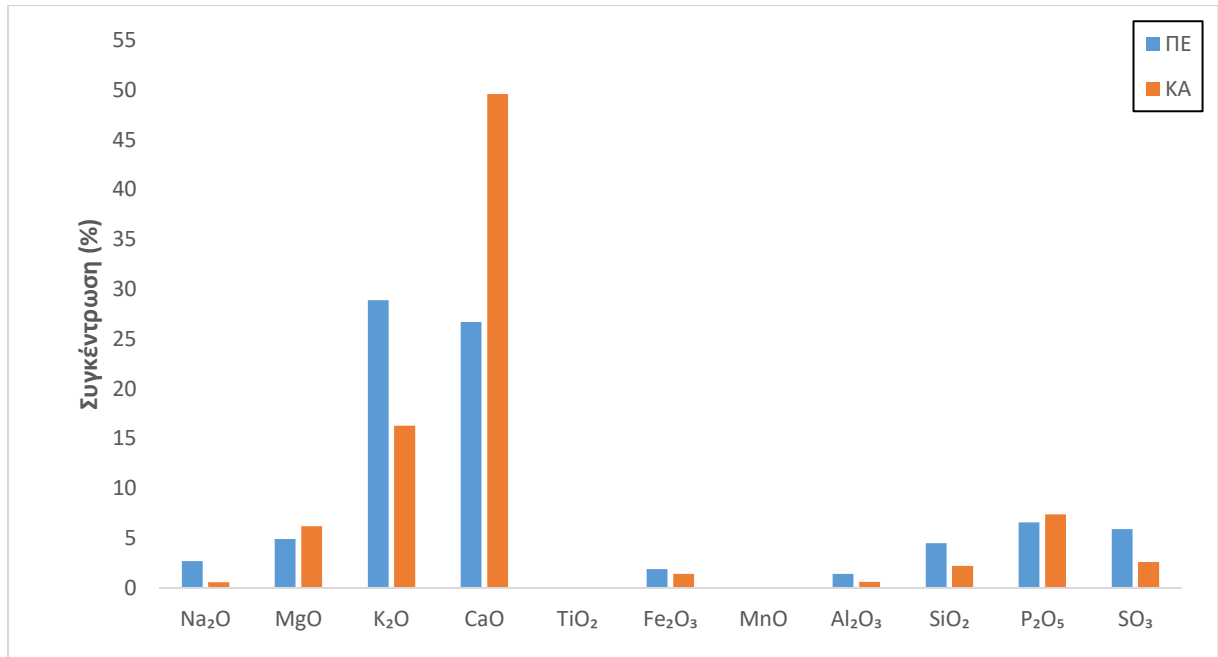
Δείγμα	C (%)	O (%)	N (%)	H (%)	S (%)	Θερμογόνος Q (MJ/kg)
Καρύδι	48,48	43,00	0,82	6,34	-	19,73
Πυρηνόξυλο	49,54	35,94	0,92	6,27	-	22,05

4.1.3 Χημική ανάλυση τέφρας

Μετά την καύση των αρχικών δειγμάτων του πυρηνόξυλου και το φλοιού καρυδιού σε θερμοκρασία 550 °C, αναλύθηκαν χημικά οι τέφρες τους σε κύρια οξείδια. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3.

Πίνακας 4.3 : Χημική ανάλυση τέφρας (οξείδια %).

	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MnO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃
ΠΕ	2,7	4,9	28,9	26,7	0,02	1,9	0,03	1,4	4,5	6,6	5,9
ΚΑ	0,56	6,2	16,3	49,6	0,01	1,4	0,06	0,6	2,2	7,4	2,6



Σχήμα 4.1: Κύρια οξείδια στις τέφρες των αρχικών δειγμάτων.

Στο Σχήμα 4.1 διακρίνεται ότι οι τέφρες των αρχικών δειγμάτων καρυδιού περιέχουν υψηλότερα ποσοστά ασβεστίου και μαγνησίου σε σχέση με αυτά του πυρήνα ελιάς. Αντιθέτως, οι τέφρες των αρχικών δειγμάτων πυρηνόξυλου περιέχουν υψηλότερα ποσοστά καλίου και νατρίου συγκριτικά με αυτά του φλοιού καρυδιού. Περιέχουν, επίσης, μικρή συγκέντρωση σε άργιλο και σίδηρο, επιβεβαιώνοντας έτσι ότι τα συστατικά αυτά εμπεριέχονταν στη χημική δομή της βιομάζας και δεν ήταν υλικό από άργιλους, άμμο ή έδαφος που προσχώρησε στα δείγματα.

Στον Πίνακα 4.4 εμφανίζονται οι δείκτες επικαθίσεων $R_{b/A}$, $R_{b/A+P}$ και AI , οι οποίοι χαρακτηρίζουν την τάση των καυσίμων να δημιουργούν επικαθίσεις. Οι δείκτες επικαθίσεων υπολογίζονται με τους παρακάτω τύπους:

$$AI = \frac{kg(K_2O+N_2O)}{GJ} \quad (4.1)$$

$$R_{b/a} = \frac{\%(Fe_2O_3+CaO+MgO+K_2O+Na_2O)}{\%(SiO_2+TiO_2+Al_2O_3)} \quad (4.2)$$

$$R_{b/a+P} = \frac{\%(Fe_2O_3+CaO+MgO+K_2O+Na_2O+P_2O_5)}{\%(SiO_2+TiO_2+Al_2O_3)} \quad (4.3)$$

Αρχικά, για τον δείκτη αλκαλίων (AI), η δημιουργία επικαθίσεων είναι χαμηλή όταν $AI \leq 0.17$ kg/GJ, πιθανή όταν $0.17 < AI < 0.34$ kg/GJ και βέβαιη όταν $AI > 0.34$ kg/GJ. Οι λόγοι βασικών/όξινων οξειδίων $R_{b/A}$ και $R_{b/A+P}$ (προσθήκη ευτηκτικού P_2O_5) χαρακτηρίζουν βέβαιη την τάση επικαθίσεων όταν $R_{b/A} > 2$ και $R_{b/A+P} > 1$. Λαμβάνοντας υπόψιν τα παραπάνω κριτήρια, ο πυρήνας ελιάς εμφανίζει μεγαλύτερη τάση επικαθίσης, λόγω αλκαλίων, σε σχέση με το φλοιό καρυδιού.

Πίνακας 4.4: Δείκτες επικαθίσεων.

Δείγμα	$R_{b/A}$	$R_{b/A+P}$	AI	Τάση Επικάθισης
ΠΕ	11,00	12,11	1,05	βέβαιη
ΚΑ	26,36	28,99	0,12	χαμηλή τάση

4.2 Χαρακτηριστικές Παράμετροι Καύσης των Δειγμάτων και των Μιγμάτων για Σταθερή Τροφοδοσία

Στις τροφοδοσίες 13.6 και 13.8 kg/h για πυρήνα ελιάς και φλοιό καρυδιού αντίστοιχα, πραγματοποιήθηκαν πειράματα στον καυστήρα και υπολογίστηκαν οι παρακάτω χαρακτηριστικές παράμετροι που αναγράφονται στον Πίνακα 4.5. Επιπλέον, στον Πίνακα 4.6 αναγράφονται οι χαρακτηριστικές παράμετροι για τα μείγματα πυρήνα ελιάς με φλοιό καρυδιού που χρησιμοποιήθηκαν σε δύο αναλογίες, 70-30% και 50-50%, αντίστοιχα, και με τον ίδιο ρυθμό τροφοδοσίας καυσίμου (10/30 ON/OFF) στον καυστήρα. Πιο συγκεκριμένα, στους πίνακες αναγράφονται οι βέλτιστες μέσες τιμές των χαρακτηριστικών παραμέτρων κατά τη διάρκεια λειτουργίας του κοχλία τροφοδοσίας υπό σταθερή αναρρόφηση(fan). Οι χαρακτηριστικοί παράμετροι καύσης είναι οι εξής:

- Θερμοκρασία των καυσαερίων T_f
- Περίσσεια αέρα λ
- Εκπομπές αέριων ρύπων
- Βαθμός απόδοσης καύσης η_c
- Θερμικός βαθμός απόδοσης η_t
- Απώλειες θερμότητας SL, IL
- Διαφορά θερμοκρασίας νερού εισόδου-εξόδου για σταθερή αναρρόφηση αέρα ΔΤ

Πίνακας 4.5 : Θερμοκρασίες καυσαερίων, μέσες εκπομπές ρύπων (10% O₂ αναφοράς), απώλειες θερμότητας και απόδοση για τις τροφοδοσίες 13.6 και 13.8 kg/h για πυρήνα ελιάς και φλοιό καρυδιού, αντίστοιχα.

Δείγμα	T _f (°C)	λ	CO (ppm _v)	SO ₂ (ppm _v)	NO _x (ppm _v)	SL (%)	IL (%)	n _c (%)	ΔT (°C)	n _t (%)
ΠΕ	241,1	1,88	1224,7	3	136,1	14,7	0,76	84,5	23,1	86,3
ΚΑ	240,8	1,7	1145	12,4	88	13,8	0,7	85,5	25,7	87,4

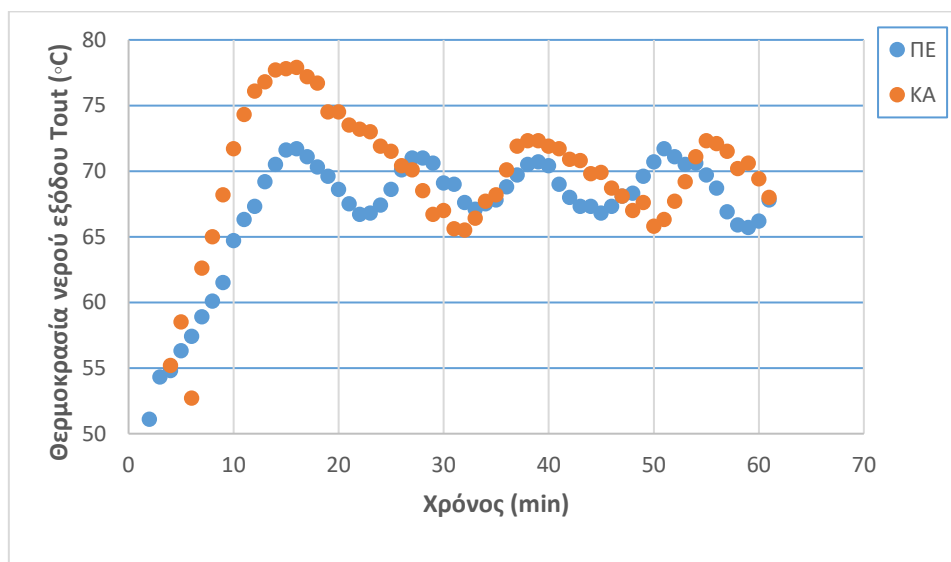
Πίνακας 4.6: Θερμοκρασίες, μέσες εκπομπές ρύπων (10% O₂ αναφοράς), απώλειες θερμότητας και απόδοση των μειγμάτων των καυσίμων για βέλτιστη τροφοδοσία.

Δείγμα	T _f (°C)	λ	CO (ppm _v)	SO ₂ (ppm _v)	NO _x (ppm _v)	SL (%)	IL (%)	n _c (%)	ΔT (°C)	n _t (%)
ΠΕ/ΚΑ 70:30	254,1	1,85	1211,6	18,2	109	14,2	1,1	84,7	19,0	81,2
ΠΕ/ΚΑ 50:50	242,6	1,80	1161,2	9,9	99,1	14,1	1,1	84,8	19,4	81,6

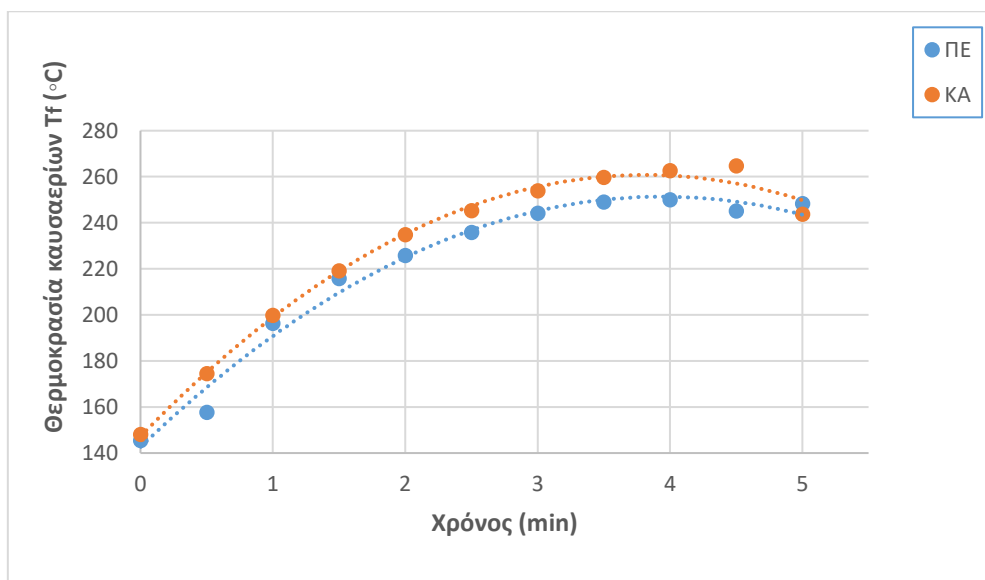
Η ανάλυση των παραπάνω αποτελεσμάτων παρουσιάζεται στα υποκεφάλαια που ακολουθούν.

4.2.1 Θερμοκρασία νερού εξόδου του λέβητα και θερμοκρασία καυσαερίων

Στα Σχήματα 4.2 και 4.3 παρουσιάζονται τα διαγράμματα θερμοκρασίας νερού εξόδου καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του λέβητα και θερμοκρασίας καυσαερίων σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα για τα δύο καύσιμα με τροφοδοσίες 13.6 και 13.8 kg/h, αντίστοιχα. Στο Σχήμα 4.2 φαίνεται ότι οι φλοιοί καρυδιού, από τα πρώτα λεπτά λειτουργίας εμφανίζουν μεγαλύτερες τιμές θερμοκρασιών νερού, σε σχέση με τους πυρήνες ελιάς, με αποτέλεσμα να προσφέρουν μεγαλύτερη θερμική ενέργεια στο νερό. Στο Σχήμα 4.3, οι φλοιοί καρυδιού χαρακτηρίζονται από υψηλότερες θερμοκρασίες καυσαερίων σε σχέση με τους πυρήνες ελιάς (η μέση τιμή όμως των καυσαερίων του καρυδιού ήταν ελαφρά χαμηλότερη από αυτήν του πυρηνόξυλου).

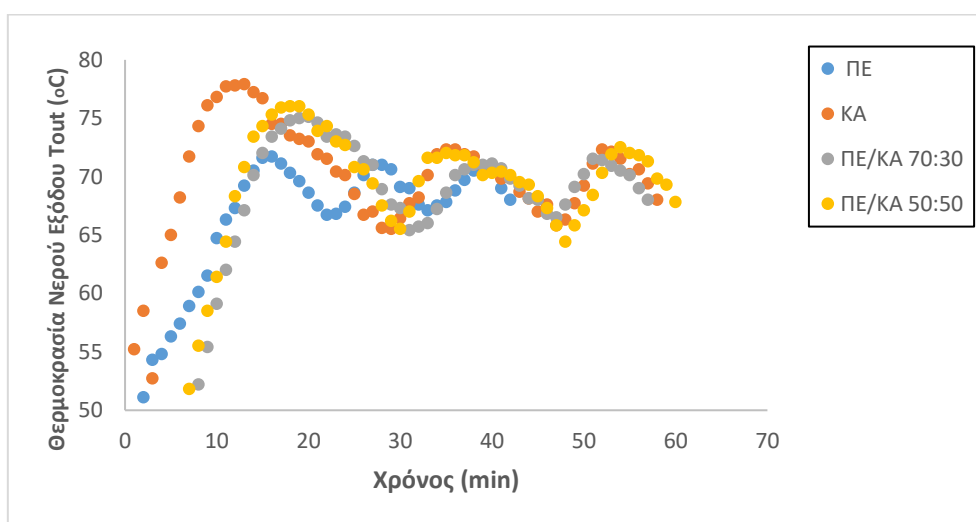


Σχήμα 4.2 : Θερμοκρασία νερού εξόδου καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του λέβητα για τα δύο καύσιμα.



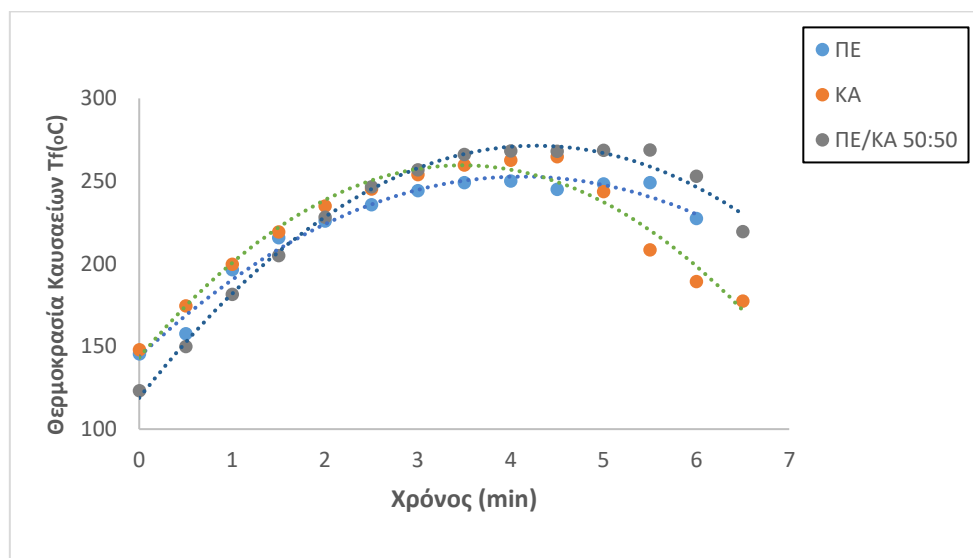
Σχήμα 4.3 : Θερμοκρασία καυσαερίων σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα για τα δύο καύσιμα.

Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζεται το διάγραμμα θερμοκρασίας νερού εξόδου καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του λέβητα για τα αρχικά δείγματα και τα μείγματα πυρήνα ελιάς με φλοιό καρυδιού που χρησιμοποιήθηκαν σε δύο αναλογίες, 70-30% και 50-50%, αντίστοιχα, και με τον ίδιο ρυθμό τροφοδοσίας καυσίμου (10/30 ON/OFF) στον καυστήρα. Στο γράφημα φαίνεται ότι τα μίγματα πυρήνα ελιάς με φλοιό καρυδιού και στις δύο αναλογίες αποδίδουν τη θερμική τους ενέργεια στο νερό πιο αργά, σε σύγκριση με τα αρχικά δείγματα καυσίμων, επειδή η θερμοκρασία εξόδου του νερού φτάνει τους 70°C μετά τα 10 πρώτα λεπτά λειτουργίας.



Σχήμα 4.4 : Θερμοκρασία νερού εξόδου καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του λέβητα για τα μίγματα των καυσίμων.

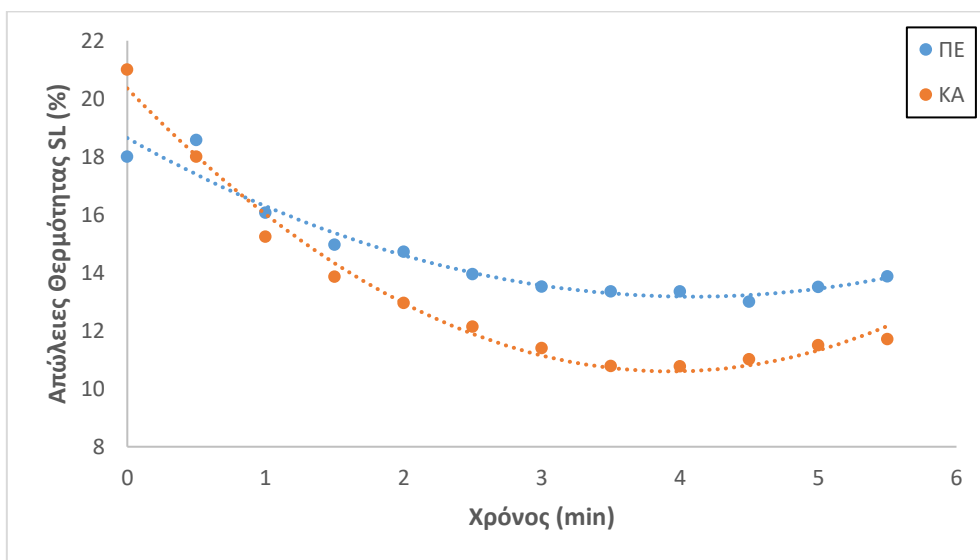
Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζεται το διάγραμμα θερμοκρασίας καυσαερίων σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα για τα αρχικά δείγματα και τα μείγματα πυρήνα ελιάς με φλοιό καρυδιού που χρησιμοποιήθηκαν σε αναλογία 50-50%, αντίστοιχα. Στο σχήμα παρατηρείται ότι το μείγμα και τα αρχικά δείγματα εμφανίζουν θερμοκρασίες με μικρές αποκλίσεις, αν και το μίγμα φτάνει συνολικά σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες απ' ό,τι τα δείγματα.



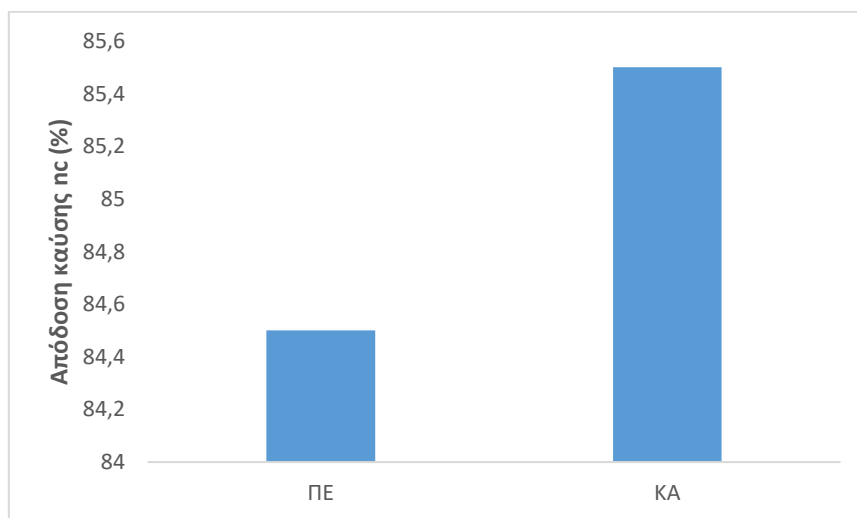
Σχήμα 4.5: Θερμοκρασία καυσαερίων σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα για τα μίγματα των καυσίμων.

4.2.2 Θερμικός βαθμός απόδοσης και βαθμός απόδοσης καύσης

Στα Σχήματα 4.6 και 4.7 παρουσιάζονται οι απώλειες θερμότητας SL και η απόδοση καύσης η_c κατά τον τρίτο κύκλο λειτουργίας του λέβητα για τα δύο καύσιμα. Στο Σχήμα 4.6 φαίνεται ότι ο φλοιός καρυδιού παρουσιάζει τις λιγότερες απώλειες θερμότητας σε σχέση με τον πυρήνα ελιάς. Παράλληλα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.7, καθίσταται ως το πιο αποδοτικό υλικό σε επίπεδο καύσης, αφού έχει απόδοση 85,5%. Επιπλέον, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι, ο φλοιός καρυδιού εμφανίζει το μεγαλύτερο θερμικό απόδοσης καύσης με την τιμή 87,4%. Εντούτοις, και ο πυρήνας ελιάς εμφανίζει ικανοποιητική απόδοση καύσης με τιμή 84,5% και θερμικό βαθμό απόδοσης καύσης με τιμή 86,3%.

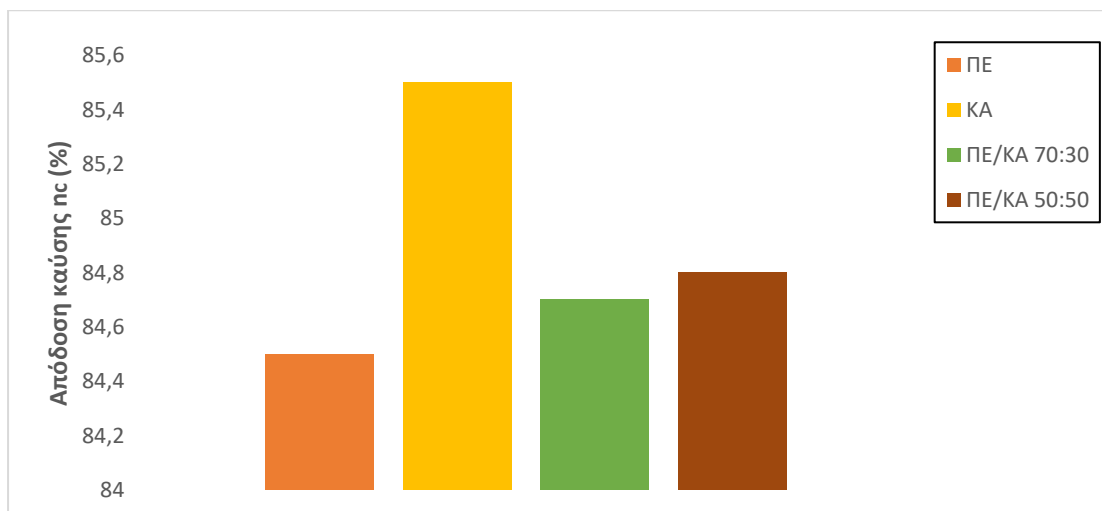


Σχήμα 4.6 : Απώλειες θερμότητας σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα για τα δύο καύσιμα.



Σχήμα 4.7 : Μέση απόδοση καύσης σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα για τα δύο καύσιμα.

Στο Σχήμα 4.8 παρατίθενται οι μέσες τιμές των βαθμών απόδοσης καύσης, κατά τη διάρκεια πλήρους λειτουργίας του καυστήρα, για τον πυρήνα ελιάς, τον φλοιό καρυδιού, καθώς και για τα ανάλογα μείγματά τους σε αναλογίες 70-30% και 50-50%, αντίστοιχα. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι, κατά την πειραματική διαδικασία, τα μείγματα δεν καίγονται σαν να συμμετέχει κάθε συστατικό χωριστά στην καύση και γι' αυτό το λόγο, η απόδοση της καύσης είναι κάπως χαμηλότερη από την αναμενόμενη. Στο γράφημα φαίνεται ότι ο φλοιός καρυδιού χαρακτηρίζεται ως το υλικό με την μεγαλύτερη απόδοση καύσης. Τα μείγματα πυρήνα ελιάς και φλοιού καρυδιού και στις δυο αναλογίες εμφανίζουν παραπλήσιες τιμές και, τέλος, ο πυρήνας ελιάς χαρακτηρίζεται από την μικρότερη τιμή απόδοσης.

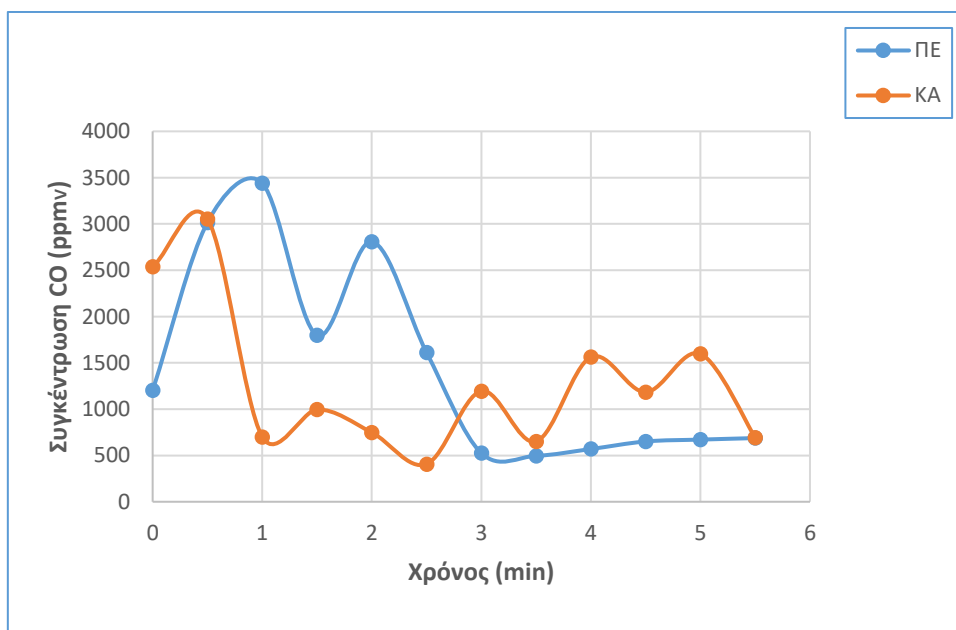


Σχήμα 4.8 : Μέση απόδοση καύσης σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα για τα μίγματα των καυσίμων.

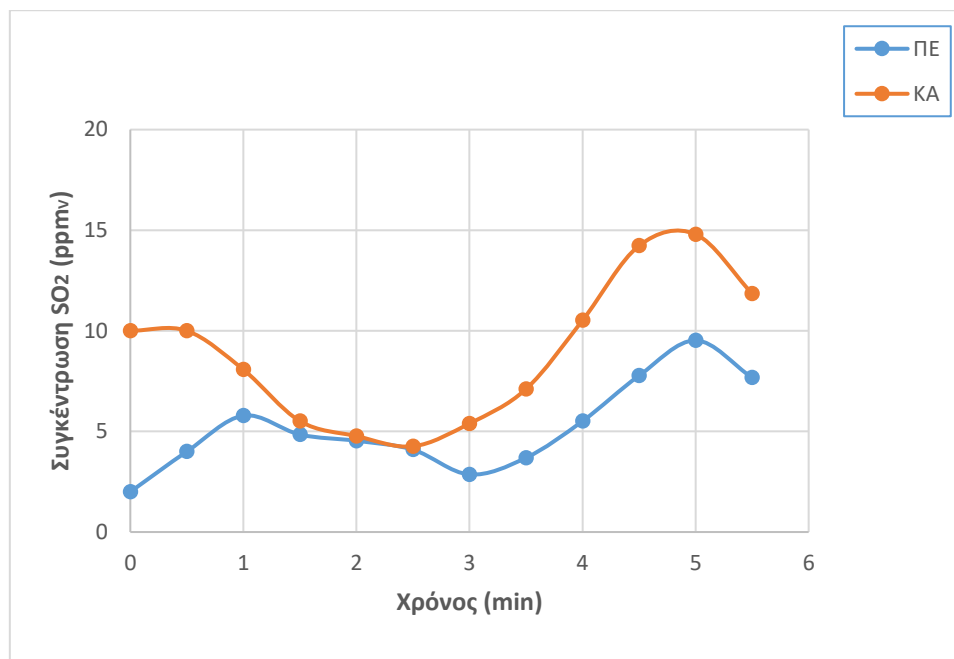
4.3 Εκπομπές Αερίων Ρύπων των Δειγμάτων και των Μιγμάτων τους για Σταθερή Τροφοδοσία

Στα Σχήματα 4.9, 4.10 και 4.11 παρουσιάζονται τα διαγράμματα συγκέντρωσης των αέριων εκπομπών (μονοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του θείου και οξειδίων του αζώτου) των δειγμάτων πυρήνα ελιάς και φλοιού καρυδιού σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του

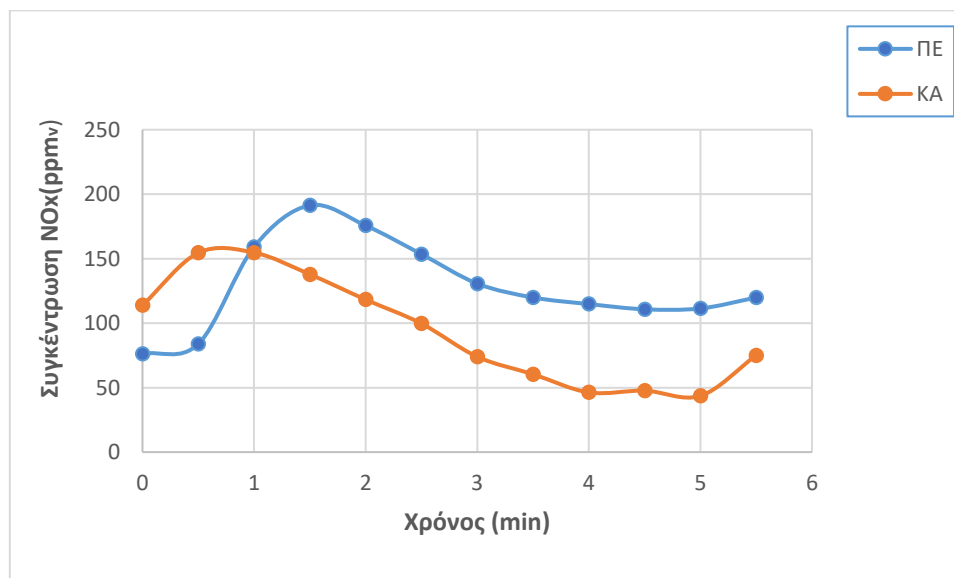
λέβητα, όταν δηλαδή υπάρχουν σταθερές συνθήκες λειτουργίας. Οι τιμές που υπολογίστηκαν για να μπορούν να συγκριθούν με τις τιμές που έχουν οριστεί από την νομοθεσία, αποδόθηκαν σε 10% οξυγόνο. Τα όρια τα οποία έχουν τεθεί σύμφωνα με τα Ελληνικά πρότυπα για μικρές μονάδες παραγωγής θερμότητας για τις εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα είναι 2400-4000 ppm_v και για οξείδια του αζώτου 200-350mg/Nm³, αντίστοιχα. Με βάσει τα διαγράμματα, οι συγκεντρώσεις των αέριων ρύπων και για τα δύο υλικά βρίσκονται εντός των ορίων που ορίζει η νομοθεσία. Πιο συγκεκριμένα, ο φλοιός καρυδιού εμφανίζει χαμηλές συγκεντρώσεις μονοξειδίου του άνθρακα και οξειδίων του αζώτου, ενώ και τα δύο καύσιμα εμφανίζουν χαμηλές συγκεντρώσεις διοξειδίου του θείου. Ο φλοιός καρυδιού εμφανίζει χαμηλότερες εκπομπές ρύπων σε σχέση με τον πυρήνα ελιάς.



Σχήμα 4.9 : Συγκέντρωση CO (11% O₂ αναφοράς) συναρτήσει του χρόνου, σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα για τα δύο καύσιμα.

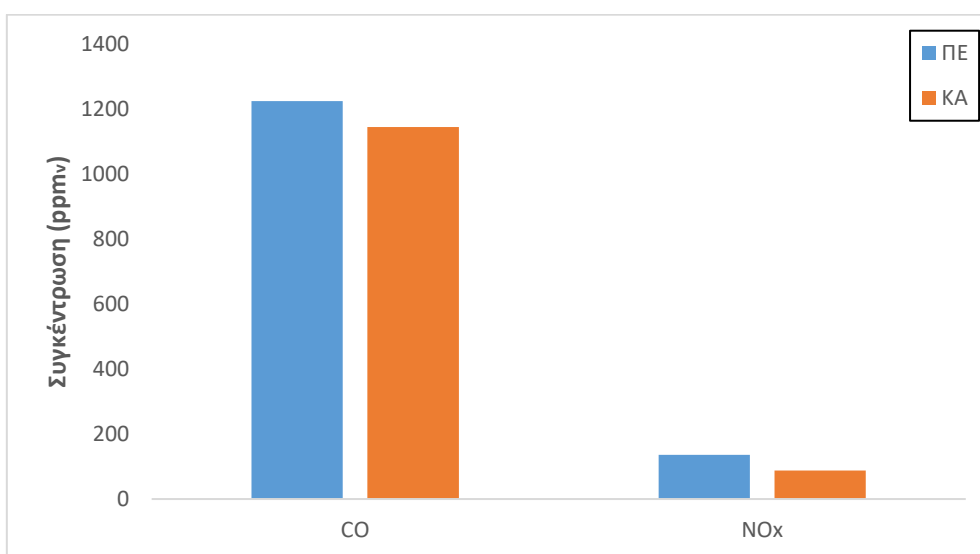


Σχήμα 4.10 : Συγκέντρωση SO₂ (11% O₂ αναφοράς) συναρτήσει του χρόνου, σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα για τα δύο καύσιμα.

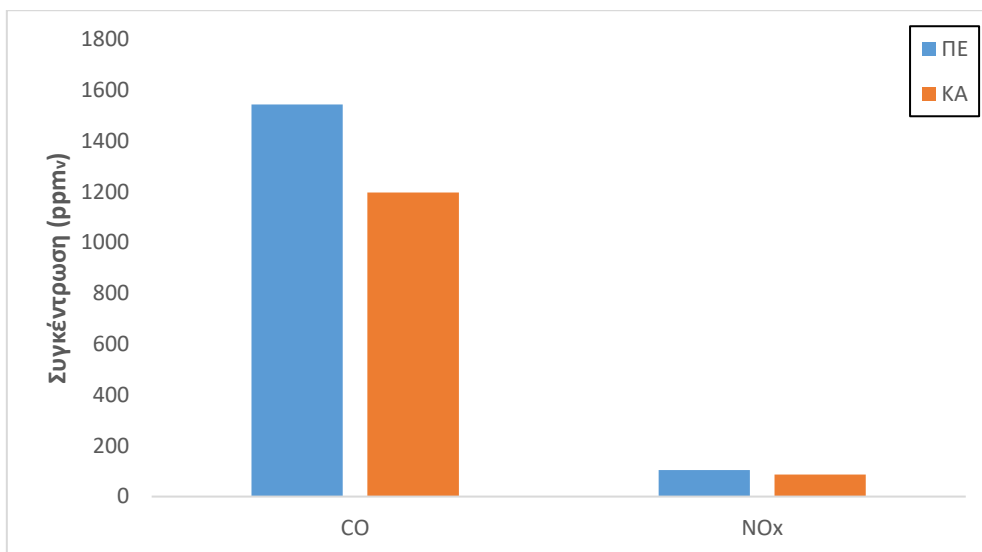


Σχήμα 4.11 : Συγκέντρωση NO_x (11% O₂ αναφοράς) συναρτήσει του χρόνου, σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα για τα δύο καύσιμα.

Στα Σχήματα 4.12 και 4.13 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές των συγκεντρώσεων αέριων ρύπων (μονοξειδίο του άνθρακα και οξειδίων του αζώτου) των δειγμάτων πυρήνα ελιάς και φλοιού καρυδιού κατά τη διάρκεια πλήρους λειτουργίας του λέβητα και οι μέσες τιμές των συγκεντρώσεων των αέριων ρύπων καθ' όλη τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας για θερμοκρασία νερού εξόδου μεγαλύτερη από 45 °C. Με βάση τα γραφήματα, γίνεται αντιληπτό ότι οι εκπομπές ρύπων και στις δύο περιπτώσεις βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων. Ο πυρήνας ελιάς και ο φλοιός καρυδιού στο δεύτερο γράφημα παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές συγκέντρωσης μονοξειδίου του άνθρακα. Ο φλοιός καρυδιού εμφανίζει χαμηλότερες εκπομπές ρύπων σε σχέση με τον πυρήνα ελιάς και στις δύο περιπτώσεις. Τέλος, οι εκπομπές διοξειδίου του θείου δεν λήφθηκαν υπόψιν λόγω των χαμηλών τιμών τους, με αποτέλεσμα να μην παρουσιάζονται στα γραφήματα.

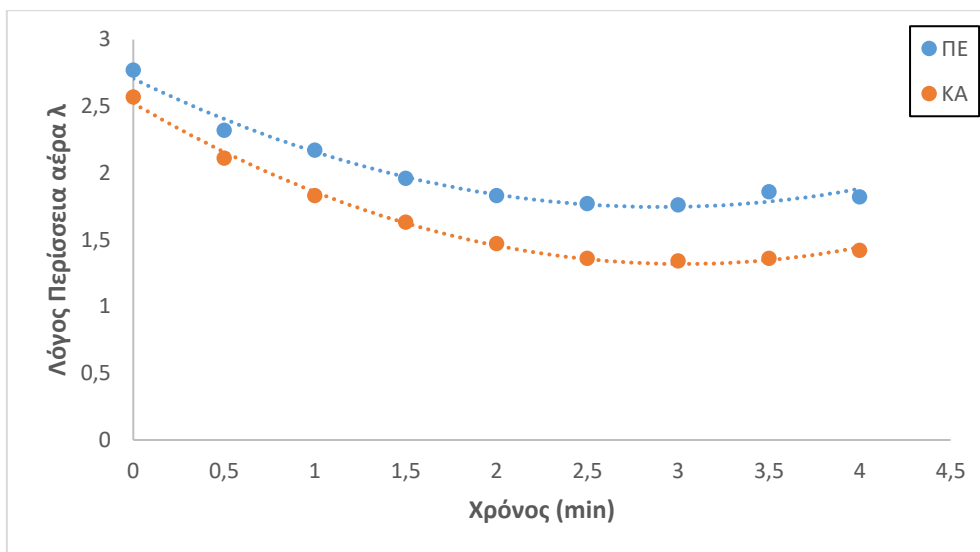


Σχήμα 4.12 : Μέσες τιμές συγκέντρωσης αέριων ρύπων (11% O₂ αναφοράς) κατά τη διάρκεια πλήρους λειτουργίας του λέβητα για τα δύο καύσιμα.



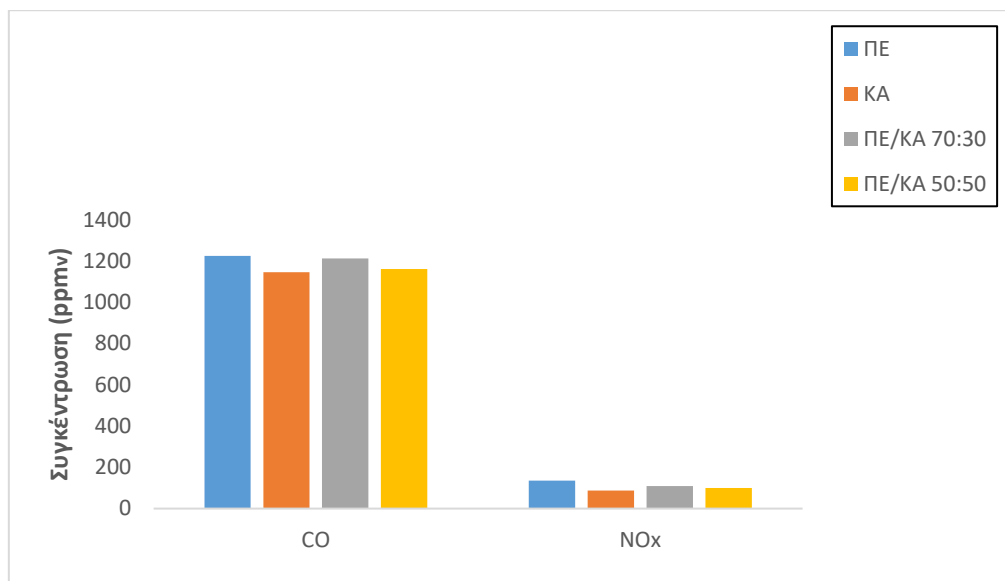
Σχήμα 4.13 : Μέσες τιμές συγκέντρωσης αέριων ρύπων (11% O₂ αναφοράς) καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του λέβητα για τα δύο καύσιμα.

Στο Σχήμα 4.14 που παρουσιάζεται παρακάτω φαίνεται ο λόγος περίσσειας αέρα λ των δειγμάτων κατά τη διάρκεια πλήρους λειτουργίας του καυστήρα. Οι ιδανικές τιμές που λαμβάνει η τιμή λ είναι από 1.2 έως 2. Στην προκειμένη περίπτωση, ο λόγος περίσσειας αέρα χαρακτηρίζεται από κάπως υψηλές τιμές αρχικά, αλλά μετά το πρώτο λεπτό, πειραματικά, λαμβάνει τιμές κάτω από 2.



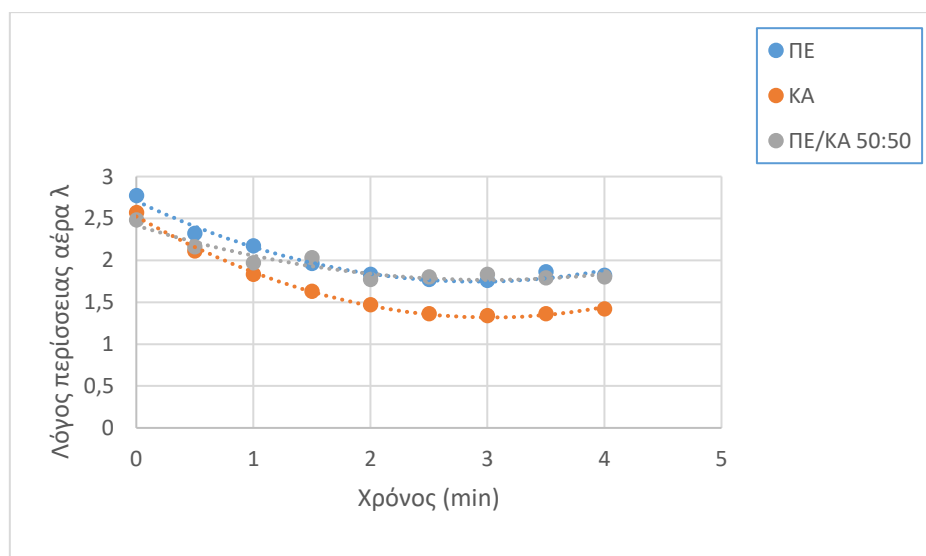
Σχήμα 4.14 : Λόγος περίσσειας αέρα λ σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα για τα δύο καύσιμα.

Στο Σχήμα 4.15 εμφανίζονται οι μέσες τιμές των συγκεντρώσεων των αέριων ρύπων (μονοξείδιο του άνθρακα και οξειδίων του αζώτου) των δειγμάτων πυρήνα ελιάς, φλοιού καρυδιού και των μιγμάτων τους σε δύο αναλογίες κατά τη διάρκεια του τρίτου κύκλου λειτουργίας του λέβητα. Στην αρχή του κεφαλαίου 4.3 αναγράφονται τα όρια των εκπομπών μονοξειδίου του άνθρακα και των οξειδίων του αζώτου βάσει της Ελληνικής Νομοθεσίας. Οι τιμές των δειγμάτων και των μιγμάτων τους βρίσκονται εντός των ορίων. Πιο συγκεκριμένα, για τις εκπομπές του μονοξειδίου του άνθρακα, οι τιμές των μιγμάτων πυρήνα ελιάς- φλοιού καρυδιού κυμαίνονται ανάμεσα στις τιμές των αρχικών δειγμάτων. Για τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου, τα μίγματα εμφανίζουν ενδιάμεσες τιμές των δύο συστατικών τους. Τα οξείδια του θείου δεν αξιολογήθηκαν, όπως έχει προαναφερθεί, λόγω των πολύ χαμηλών τιμών τους.



Σχήμα 4.15 : Μέσες τιμές συγκέντρωσης αέριων ρύπων (11% O₂ αναφοράς) σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα για τα μίγματα των καυσίμων.

Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζεται ο λόγος περίσσειας λ σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας για τα δείγματα και το μίγμα των δειγμάτων σε αναλογία 50%-50%. Οι τιμές του συντελεστή λ για το μίγμα πυρηνόξυλου-φλοιού καρδιού είναι ενδιάμεσες των αρχικών δειγμάτων. Γενικά, οι τιμές του λόγου περίσσειας αέρα είναι αποδεκτές για μικρά συστήματα καύσης.



Σχήμα 4.16 : Λόγος περίσσειας αέρα λ σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα για τα μίγματα των καυσίμων.

4.4 Επίδραση του Ρυθμού της Τροφοδοσίας του Καυσίμου στις Χαρακτηριστικές Παραμέτρους Καύσης

Κατά την πειραματική διαδικασία, για διαφορετικές τροφοδοσίες των δειγμάτων, η αναρρόφηση του αέρα ήταν σταθερή της τάξης $501.87 \text{ m}^3/\text{h}$. Η αύξηση του ρυθμού ροής μάζας πραγματοποιήθηκε για να ερευνηθεί κατά πόσον επηρεάζονται οι χαρακτηριστικές παράμετροι καύσης και ιδίως οι εκπομπές αέριων ρύπων και ο βαθμός απόδοσης καύσης. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στον Πίνακα 4.7 που παρουσιάζεται παρακάτω και αναλύονται στα υποκεφάλαια που ακολουθούν.

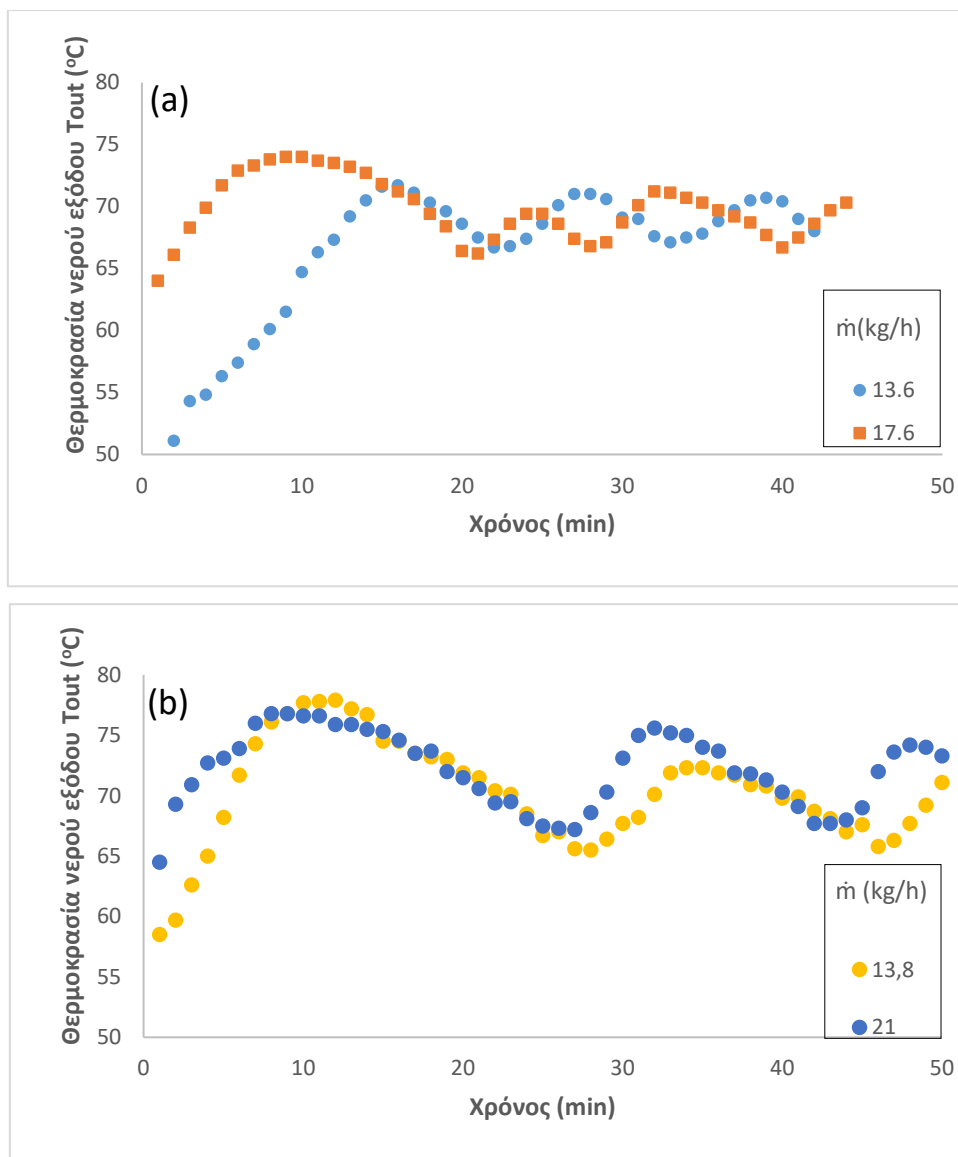
Πίνακας 4.7: Θερμοκρασίες καυσαερίων, εκπομπές ρύπων, απώλειες θερμότητας και απόδοση για πυρήνα ελιάς και φλοιό καρυδιού, αντίστοιχα.

Δείγμα	ON/OFF	\dot{m} (kg/h)	T_f (°C)	λ	CO (ppm _v)	SO ₂ (ppm _v)	NO _x (ppm _v)	SL (%)	IL (%)	n_c (%)	ΔT (°C)	n_t (%)
ΠΕ	10/30	13,6	241,1	1,88	1224,7	3,0	136,1	14,4	0,76	84,5	23,1	86,3
	20/30	17,6	189,0	1,75	1671,8	14,5	114,9	16,6	1,75	81,7	23,0	87,1
ΚΑ	10/30	13,8	240,8	1,70	1145,0	12,4	88,0	13,8	0,70	85,5	25,7	87,4
	20/30	21,0	256,9	1,60	1343,0	10,8	98,0	14,3	0,90	84,8	27,7	86,8

4.4.1 Θερμοκρασία νερού εξόδου του λέβητα και θερμοκρασία καυσαερίων

Στα γραφήματα 4.17 παρουσιάζονται οι θερμοκρασίες του νερού εξόδου καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του λέβητα για (α) πυρήνα ελιάς και (β) φλοιό καρυδιού σε διαφορετικές τροφοδοσίες. Στο γράφημα 4.17 (α) παρατηρείται ότι, με την αύξηση του ρυθμού τροφοδοσίας κατά 4 kg/h και την αύξηση της παροχής θερμότητας στο νερό του λέβητα, η θερμοκρασία φτάνει τους 70°C σε 5 λεπτά. Επιπροσθέτως, στο γράφημα 4.17 (β)

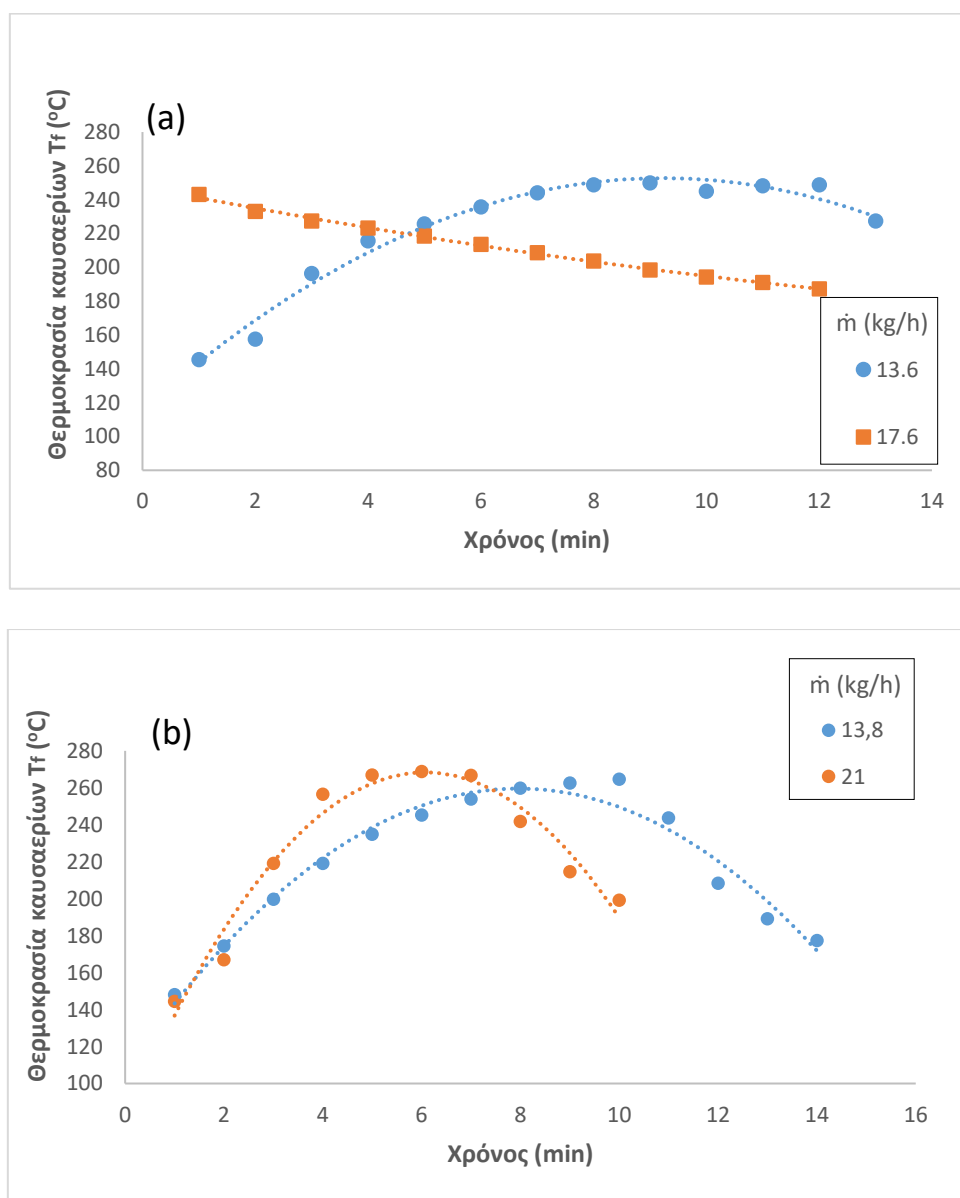
η τροφοδοσία αυξάνεται κατά 7 kg/h και η θερμοκρασία φθάνει τους 70 °C μετά το πέρας των 2 λεπτών.



Σχήμα 4.17 : Θερμοκρασία νερού εξόδου συναρτήσει της τροφοδοσίας των καυσίμων, καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του λέβητα για (α) πυρήνα ελιάς, (β) φλοιό καρυδιού.

Στα γραφήματα 4.18 απεικονίζονται οι θερμοκρασίες των καυσαερίων σε διαφορετικές τροφοδοσίες σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα για (α) πυρήνα ελιάς, (β) φλοιός καρυδιού, αντίστοιχα. Στο Διάγραμμα 4.18 (α) παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η τροφοδοσία καυσίμου τόσο μειώνεται η θερμοκρασία καυσαερίων, μετά από μικρό χρονικό διάστημα.

Αντίστοιχα, στο Διάγραμμα 4.18 (β) φαίνεται ότι με την αύξηση παροχής καυσίμου στο λέβητα, σε περισσότερο χρόνο σε σχέση με το πυρηνόξυλο, προκαλείται αύξηση της θερμοκρασίας των καυσαερίων λόγω περισσότερων απωλειών θερμότητας. Τα παραπάνω συμπεράσματα συμφωνούν με τον Πίνακα 4.7 και το Διάγραμμα 4.17.

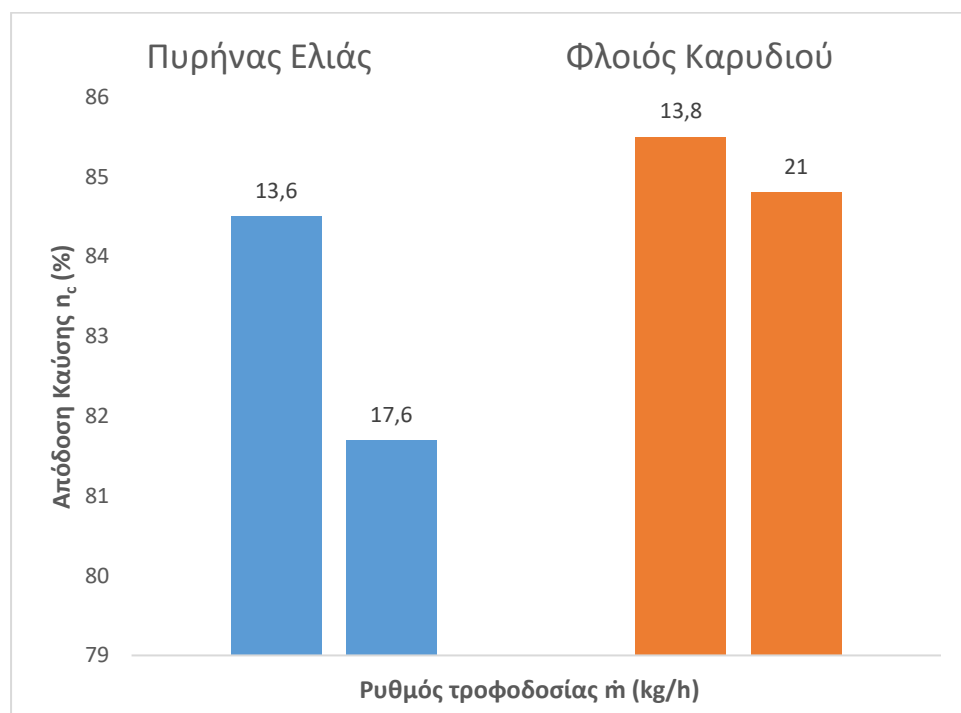


Σχήμα 4.18 : Θερμοκρασία καυσαερίων συναρτήσει της τροφοδοσίας των καυσίμων σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα για (α) πυρήνα ελιάς, (β) φλοιός καρυδιού

4.4.2 Θερμικός βαθμός απόδοσης και βαθμός απόδοσης καύσης

Στο Σχήμα 4.19 απεικονίζονται οι μέσες τιμές απόδοσης καύσης των καυσίμων σε διάφορους ρυθμούς τροφοδοσίας κατά την πλήρη λειτουργία του λέβητα. Τόσο στο πυρήνα ελιάς όσο και στο φλοιό καρυδιού, παρατηρείται ότι, με την αύξηση της τροφοδοσίας, μειώθηκε ο βαθμός απόδοσης. Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.7, η αύξηση του ρυθμού τροφοδοσίας του καυσίμου συνεπάγεται την αύξηση των θερμικών απωλειών SL και IL. Έτσι, προκύπτει η μείωση του βαθμού απόδοσης καύσης.

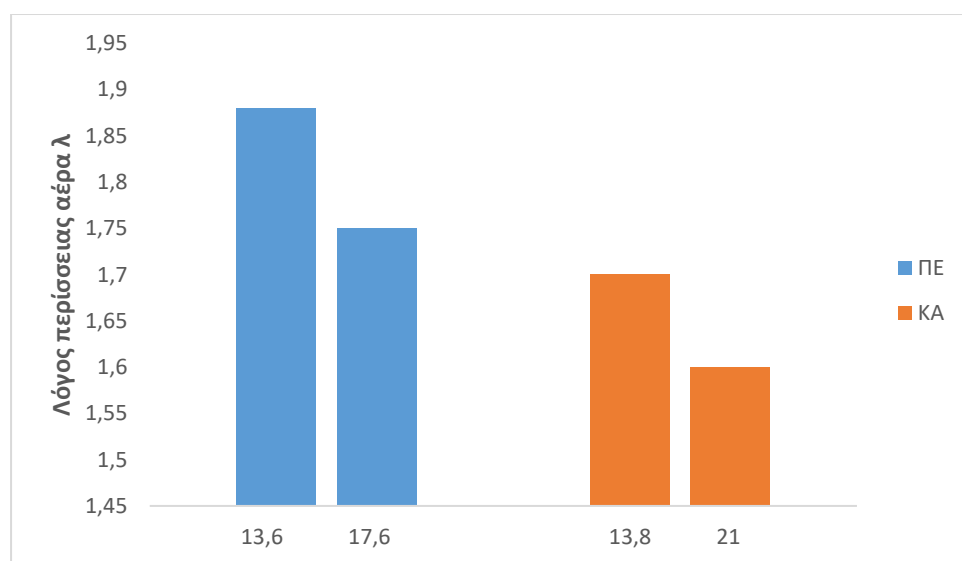
Σχετικά με τον θερμικό βαθμό απόδοσης, ο φλοιός καρυδιού για ρυθμό τροφοδοσίας 13.8 kg/h λαμβάνει τιμή 87.4% , μολονότι στην παροχή 21 kg/h μειώθηκε στο 86.8%. Η μείωση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι είχε μικρότερη απόδοση καύσης, όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 4.4.1.



Σχήμα 4.19 :Μέση απόδοση καύσης συναρτήσει της τροφοδοσίας των καυσίμων σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα.

4.4.3 Εκπομπές αερίων ρύπων

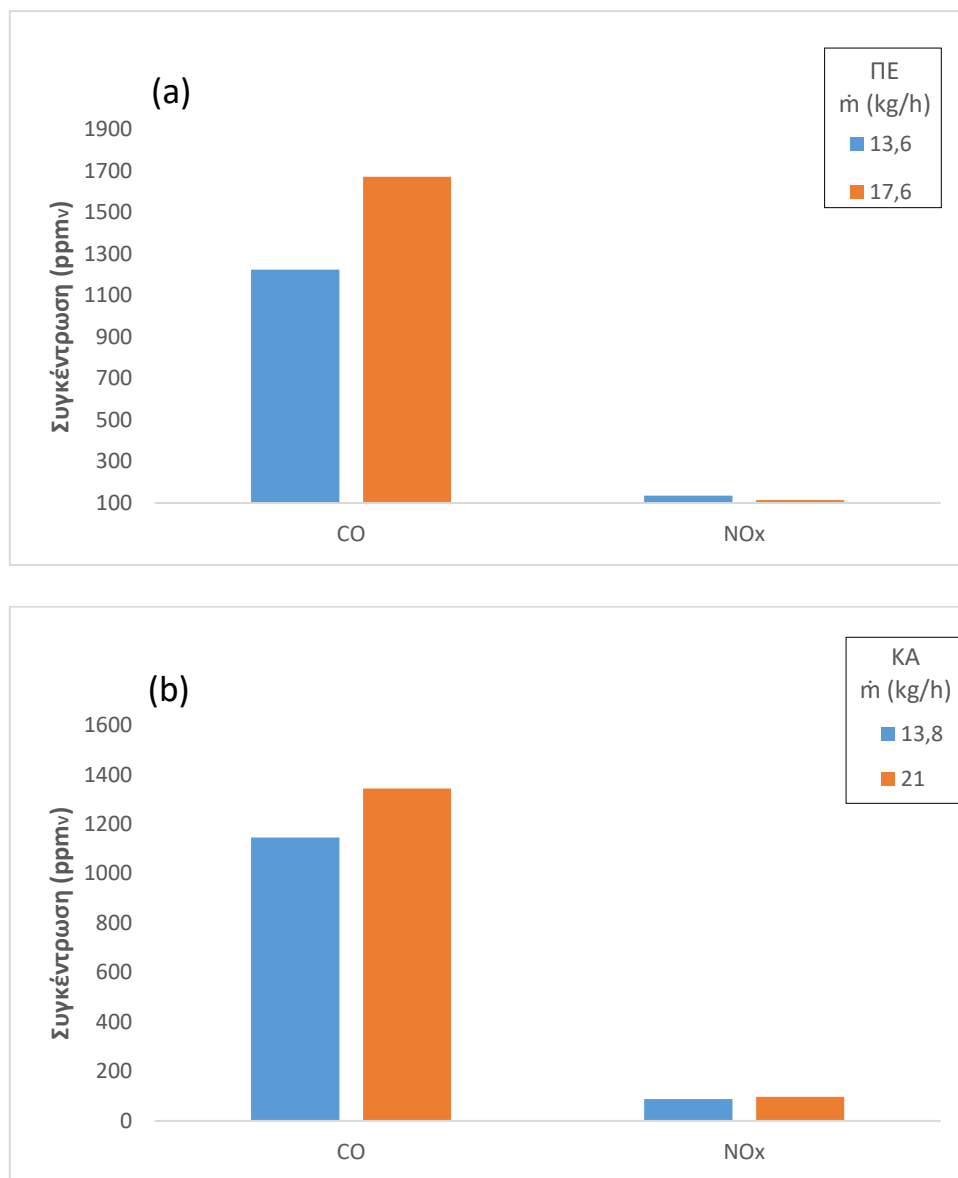
Στο Σχήμα 4.20 που βρίσκεται παρακάτω φαίνεται ο συντελεστής λ των καυσίμων κατά τη διάρκεια πλήρους λειτουργίας του καυστήρα σε διάφορες τροφοδοσίες. Στο γράφημα φαίνεται ότι με την αύξηση της παροχής καυσίμου, πραγματοποιήθηκε, όπως αναμενόταν, μείωση του λόγου περίσσειας αέρα λ..



Σχήμα 4.20 : Λόγος περίσσειας αέρα λ συναρτήσει της τροφοδοσίας των καυσίμων σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα.

Στο Σχήμα 4.21 παρουσιάζονται οι μέσες συγκεντρώσεις των αερίων ρύπων σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα για (α) πυρήνα ελιάς, (β) φλοιό καρυδιού. Με την αύξηση παροχής καυσίμου, και στις δύο περιπτώσεις, αυξάνεται η συγκέντρωση του μονοξειδίου του άνθρακα. Όπως ειπώθηκε προηγουμένως, με την αύξηση του ρυθμού τροφοδοσίας, η θερμοκρασία του κλιβάνου μειώνεται με αποτέλεσμα η καύση να μην είναι πλήρης και κατ' επέκταση να αυξάνονται τα ποσοστά μονοξειδίου του άνθρακα. Επιπλέον, οι τιμές των οξειδίων του αζώτου του πυρήνα ελιάς και του φλοιού καρυδιού μειώνονται με την αύξηση της παροχής καυσίμου, καθώς μειώθηκε η περίσσεια αέρα στο σύστημα. Γενικότερα, οι τιμές του μονοξειδίου του άνθρακα και των οξειδίων του αζώτου παρ' όλες τις μεταβολές

βρίσκονται εντός των ορίων που ορίζει η Ελληνική Νομοθεσία. Τέλος, τα οξείδια του θείου δεν εκτιμώνται, λόγω των πολύ χαμηλών τιμών τους.



Σχήμα 4.21 : Μέσες τιμές συγκέντρωσης αέριων ρύπων (11% O₂ αναφοράς) σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα για (α) πυρήνα ελιάς, (β) φλοιό καρυδιού.

5. Συμπεράσματα

Ακολουθώντας την σειρά των αποτελεσμάτων των πειραμάτων του προηγούμενου κεφαλαίου, προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα από την πειραματική μελέτη αυτή, ,

- Τα βιοκαύσιμα που χρησιμοποιήθηκαν είχαν υψηλή περιεκτικότητα σε πτητικά συστατικά και σχετικά χαμηλή περιεκτικότητα τέφρας. Σε σχέση με τους γαιάνθρακες χαμηλής τάξης, η θερμογόνος δύναμη ήταν υψηλότερη.
- Ο πυρήνας ελιάς παρουσίασε μεγάλη τάση επικαθίσεων, ενώ ο φλοιός καρυδιού, χαμηλή τάση. Αυτό οφείλεται στο ότι οι τέφρες των αρχικών δειγμάτων χαρακτηρίζονταν από μεγάλες συγκεντρώσεις αλκαλίων.
- Όσον αφορά τη θερμοκρασία νερού εξόδου του λέβητα παρατηρήθηκε ότι, ο φλοιός καρυδιού προσέφερε τη θερμική του ενέργεια στο νερό ταχύτερα σε σύγκριση με το πυρήνα ελιάς, σε σταθερή τροφοδοσία καυσίμου. Όσον αφορά τα μίγματα των βιοκαυσίμων, παρατηρήθηκε ότι, παρείχαν τη θερμική τους ενέργεια στο νερό βραδύτερα σε σχέση με τα αρχικά δείγματα.
- Οι τιμές του βαθμού απόδοσης καύσης και για τα δύο δείγματα βιομάζας ήταν υψηλές και μεγαλύτερες από 84%. Ο φλοιός καρυδιού παρουσίασε την καλύτερη απόδοση καύσης και θέρμανσης του λέβητα. Τα μίγματα των καυσίμων παρουσίασαν ενδιάμεσες τιμές απόδοσης με αυτές των αρχικών συστατικών τους.
- Ο φλοιός καρυδιού παρουσίασε τις χαμηλότερες εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα και οξειδίων του αζώτου, για σταθερή τροφοδοσία καυσίμου. Ωστόσο, οι ρύποι από όλα τα δείγματα βιομάζας δεν ξεπέρασαν τα επιτρεπόμενα όρια σύμφωνα με την Ελληνική νομοθεσία. Τα μίγματα των καυσίμων παρουσίασαν εκπομπές αερίων ρύπων ενδιάμεσες με τα δύο συστατικά τους.
- Με την αύξηση του ρυθμού τροφοδοσίας του καυσίμου έφτασε ταχύτερα η θερμοκρασία του νερού εξόδου του λέβητα στην επιθυμητή θερμοκρασία. Ωστόσο, η αύξηση του ρυθμού τροφοδοσίας προκάλεσε μη καλή καύση και μείωση της απόδοσης καύσης.

- Με την αύξηση του ρυθμού τροφοδοσίας του καυσίμου παρατηρήθηκε ότι οι εκπομπές αερίων ρύπων αυξήθηκαν, αλλά παρέμειναν εντός των επιτρεπόμενων ορίων σύμφωνα με την Ελληνική νομοθεσία.
- Ο φλοιός καρυδιού αποδείχτηκε ως το καλύτερο καύσιμο βιομάζας συγκριτικά με τον πυρήνα ελιάς, καθώς εμφάνισε τη χαμηλότερη τάση επικαθίσεων, τους χαμηλότερους ρύπους κατά μέσο όρο, τον υψηλότερο βαθμό απόδοσης καύσης και θερμικό βαθμό απόδοσης λέβητα.

6. Βιβλιογραφία

1. www.kathimerini.gr
2. <https://innergy-global.com>
3. <http://www.gaiapedia.gr>
4. Θ. Τσούτσος, Ι. Κανάκης, Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας Τεχνολογίας και Περιβάλλον, Παπασωτηρίου(2013)
5. Spencer, D.F., Ksander, G.G., 2006. Estimate Arundo donax ramet recruitment using degree-day based equation. Aquat. Bot. 85, 282–288.
6. Natural Resources Conservation Service PLANTS Database. USDA(2015)
7. "Plant Oils Used for Bio-diesel". BDPedia.com, the Biodiesel WWW Encyclopedia. Retrieved 2006-11-18.
8. "Sorghum and millets in human nutrition" FAO Report (1995)
9. Department of Agronomy and Plant Genetics, University of Minnesota, St. Paul, MN 55108. April, 1991.
10. "Oilseeds: World Markets and Trade | USDA FAS" (PDF). Fas.usda.gov. Retrieved 2015-08-25.
11. Webb, D.A., Parnell, J. and Doogue, D. An Irish Flora. Dundalgan Press.1996.
12. Heuzé V., Tran G., Hassoun P., Lessire M., Lebas F., Sunflower hulls and sunflower screenings. Feedipedia,2018.
13. Sunflower, Developmental stages (life cycle)". GeoChemBio website.2012.
14. <http://www.cres.gr/>
15. <https://www.pfpi.net>
16. <https://www.eia.gov>
17. <https://www.focusonenergy.com>
18. <http://www.wgbn.wisc.edu>
19. D.LKlass, Biomass for renewable energy, fuelsandchemicals, AcademicPress (1998), p.91.
20. <http://www.biomasscounts.eu>
21. <http://www.biomassfutures.eu/>
22. <http://www.fao.org>
23. Γιδαράκος Ε., 2015, Στερεά απόβλητα: Διαχείριση και σχεδιασμός συστημάτων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος, Χανιά.
24. Dario Prando*, Martina Boschiero, Assessment of different feedstocks in South Tyrol (Northern Italy):Energy potential and suitability for domestic pellet boilers (2016)
25. M. Zamorano a,*, V. Popov b, M.L. Rodríguez c, A. García-Maraver, A comparative study of quality properties of pelletized agricultural and forestry logging residues, (2011)
26. <http://www.teamenergy.gr>
27. <http://www.sunwindenergy.gr>
28. Santiago Septien, Sylvie Valin, Capucine Dupont, Marine Peyrot, Sylvain Salvador. Effect of particle size and temperature on woody biomass fast pyrolysis at high temperature (1000-1400 degrees C). Fuel, Elsevier, 2012, 97, pp.202-210.
29. Biofuels Barometer. Systemes Solaires-Les journal des Energies Renouvelables; 2007

30. <https://www.pelletshome.com>
31. <http://www.eubia.org/>
32. <http://www.aebiom.org>
33. <https://www.energiesparverband.at>
34. J.M. Makavana^{1 *}, V.V. Agravat², P.R. Balas², P.J. Makwana³ and V.G. Vyas⁴, Engineering Properties of Various Agricultural Residue, 2319-7706 Volume 7 Number 06 (2018)
35. Irene Mediavilla, Elena Borjabad, Miguel J. Fernández, Raquel Ramos, Paloma Pérez, Raquel Bados, Juan E. Carrasco, Luis S. Esteban, Biofuels from Broom Clearings: Production and Combustion in Commercial Boilers (2017)
36. Daniel Nilsson, Sven Bernesson, Per-Anders Hansson, Pellet production from agricultural raw materials – A systems study, Biomass and Bioenergy, Pages 679-689 (2011)
37. Gunnar Eriksson, Alejandro Grimm, Nils Skoglund, Dan Boström, Marcus Öhman, Combustion and fuel characterisation of wheat distillers dried grain with solubles (DDGS) and possible combustion applications, Pages 208-220(2012)
38. Senem Ozgen, Silvia Becagli, Vera Bernardoni, Stefano Caserini, Donatella Caruso, Lorenza Corbella, Manuela Dell'Acqua, Paola Fermo, Raquel Gonzalez, Giovanni Lonati, Stefano Signorini, Ruggero Tardivo, Elisa Tosi, Gianluigi Valli, Roberta Vecchi, Marina Marinovich, Analysis of the chemical composition of ultrafine particles from two domestic solid biomass fired room heaters under simulated real-world use, Pages 87-97(2017)
39. V.K. Verma, S. Bram, I. Vandendael, P. Laha, A. Hubin, J. De Ruyck, Residential pellet boilers in Belgium: Standard laboratory and real life performance with respect to European standard and quality labels, Volume 88, Issue 8, August 2011
40. Orla Williams, Gary Newbolt, Carol Eastwick, Sam Kingman, Donald Giddings, Stephen Lormor, Edward Lester, Influence of mill type on densified biomass comminution, , Pages 219-231(2016)
41. Bruno Coelho, Armando Oliveira, Peter Schwarzbözl, Adélio Mendes, Biomass and central receiver system (CRS) hybridization: Integration of syngas/biogas on the atmospheric air volumetric CRS heat recovery steam generator duct burner (2015)
42. J.P. Carroll, J.M. Finnan, The use of additives and fuel blending to reduce emissions from the combustion of agricultural fuels in small scale boilers, Pages 127-133(2015)
43. Evelyn Cardozo, Catharina Erlich, Lucio Alejo, Torsten H. Fransson, Combustion of agricultural residues: An experimental study for small-scale applications, Fuel, Volume 115, January 2014, Pages 778-787
44. Rafail Isemin, Alexander Mikhalev, Dmitry Klimov, Panagiotis Grammelis, Nikolaos Margaritis, Dimitrios-Sotirios Kourkoumpas, Viktor Zaichenko, Torrefaction and combustion of pellets made of a mixture of coal sludge and straw (2017)
45. Prodpran Siritheerasas, Phichayanai Waiyanate, Hidetoshi Sekiguchi, Satoshi Kodama, Torrefaction of Municipal Solid Waste (MSW) Pellets using Microwave Irradiation with the Assistance of the Char of Agricultural Residues, Energy Procedia, (2017)
46. Ersel Yilmaz, Małgorzata Wzorek, Selin Akçay, Co-pelletization of sewage sludge and agricultural wastes, Journal of Environmental Management (2017)

47. Ignacy Niedziółka, Mieczysław Szpryngiel, Magdalena Kachel-Jakubowska, Artur Kraszkiewicz, Kazimierz Zawiślak, Paweł Sobczak, Rafał Nadulski, Assessment of the energetic and mechanical properties of pellets produced from agricultural biomass, Pages 312-317(2015)
48. Nesrine Kraiem, Marzouk Lajili, Lionel Limousy, Rachid Said, Mejdi Jeguirim, Energy recovery from Tunisian agri-food wastes: Evaluation of combustion performance and emissions characteristics of green pellets prepared from tomato residues and grape marc, Pages 409-418 (2016)
49. M. Lajili [a,†](#), M. Jeguirim [b](#), N. Kraiem [a](#), L. Limousy, Performance of a household boiler fed with agropellets blended, p. 431–436(2015)
50. from olive mill solid waste and pine sawdust
51. T. Zeng, A. Pollex, N. Weller, V. Lenz, M. Nelles, Blended biomass pellets as fuel for small scale combustion appliances: Effect of blending on slag formation in the bottom ash and pre-evaluation options, Pages 108-116 (2018)
52. Agnieszka Kijo-Kleczkowska, Katarzyna Środa, Monika Kosowska-Golachowska, Tomasz Musiał, Krzysztof Wolski, Experimental research of sewage sludge with coal and biomass co-combustion, in pellet form, Waste Management, Volume 53, July 2016, Pages 165-181
53. Agnieszka Kijo-Kleczkowska, Katarzyna Środa, Monika Kosowska-Golachowska, Tomasz Musiał, Krzysztof Wolski, Combustion of pelleted sewage sludge with reference to coal and biomass, Pages 141-160 (2016)
54. Irene Mediavilla, Elena Borjabad, Miguel J. Fernández, Raquel Ramos, Paloma Pérez, Raquel Bados, Juan E. Carrasco, Luis S. Esteban, Biofuels from Broom Clearings: Production and Combustion in Commercial Boilers (2017)
55. I. Ibarra, G. Aragón, I. Gómez, I. Múgica, J. González, J. Rodríguez Maroto, E. Rojas, D. Sanz, R. Ramos, R. Escalada, E. Borjabad, C. Gutiérrez-Canas, Blend design tools for Medium Combustion Plants (MCP) firing biomass wastes (2017)
56. Mateusz Stasiak, Marek Molenda, Maciej Bańda, Joanna Wiącek, Piotr Parafiniuk, Ewa Gondek, Mechanical and combustion properties of sawdust—Straw pellets blended in different proportions, Pages 366-375 (2017)
57. Feng Duan, Jin-Peng Zhang, Chien-Song Chyang, Yuan-Jie Wang, Jim Tso, Combustion of crushed and pelletized peanut shells in a pilot-scale fluidized-bed combustor with flue gas recirculation, Pages 28-35 (2014)
58. Artur Kraszkiewicz, Artur Przywara, Magdalena Kachel-Jakubowska, Edmund Lorencowicz, Combustion of Plant Biomass Pellets on the Grate of a Low Power Boiler, Pages 131-138 (2015)
59. A.I. Calvo, L.A.C. Tarelho, C.A. Alves, M. Duarte, T. Nunes, Characterization of operating conditions of two residential wood combustion appliances, Pages 222-232 (2014)
60. Kailasnath B. Sutar, Sangeeta Kohli, M.R. Ravi, Anjan Ray, Biomass cookstoves: A review of technical aspects, Pages 1128-1166 (2015)
61. Monikankana Sharma, S. Dasappa, Emission reduction potentials of improved cookstoves and their issues in adoption: An Indian outlook, Pages 442-453 (2017)
62. Mikko Savolahti, Niko Karvosenoja, Jarkko Tissari, Kaarle Kupiainen, Olli Sippula, Jorma Jokiniemi, Black carbon and fine particle emissions in Finnish residential wood

- combustion: Emission projections, reduction measures and the impact of combustion practices, Pages 495-505 (2016)
63. Francesco Lombardi, Luigi Colombo, Emanuela Colombo, Design and validation of a Cooking Stoves Thermal Performance Simulator (Cook-STePS) to simulate water heating procedures in selected conditions, Pages 1384-1392 (2017)
64. Santino Orecchio, Diana Amorello, Salvatore Barreca, II) Wood pellets for home heating can be considered environmentally friendly fuels. Heavy metals determination by inductively coupled plasma-optical emission spectrometry (ICP-OES) in their ashes and the health risk assessment for the operators, Pages 178-183 (2016)
65. C. Schönnenbeck, G. Trouvé [↑](#), M. Valente, P. Garra, J.F. Brilhac, Combustion tests of grape marc in a multi-fuel domestic boiler, p.324–331(2016)
66. L. Cutz, P. Haro, D. Santana, F. Johnsson, Assessment of biomass energy sources and technologies: The case of Central America (2016)
67. Lars Kåre Grimsby, Hassan Mtoro Rajabu, Michael Ulrich Treiber, Multiple biomass fuels and improved cook stoves from Tanzania assessed with the Water Boiling Test, Pages 63-73 (2016)
68. C. Fountoukis, T. Butler, M.G. Lawrence, H.A.C. Denier van der Gon, A.J.H. Visschedijk, P. Charalampidis, C. Pilinis, S.N. Pandis, Impacts of controlling biomass burning emissions on wintertime carbonaceous aerosol in Europe, Pages 175-182 (2014)
69. A.I. Calvo, L.A.C. Tarelho, C.A. Alves, M. Duarte, T. Nunes, Characterization of operating conditions of two residential wood combustion appliances, Pages 222-232 (2014)
70. Ying-Ze Tian, Jia-Bao Chen, Lin-Lin Zhang, Xin Du, Jin-Jin Wei, Hui Fan, Jiao Xu, Hai-Ting Wang, Liao Guan, Guo-Liang Shi, Yin-Chang Feng, Source profiles and contributions of biofuel combustion for PM_{2.5}, PM₁₀ and their compositions, in a city influenced by biofuel stoves, Pages 255-264 (2017)
71. E.D. Vicente, M.A. Duarte, L.A.C. Tarelho, T.F. Nunes, F. Amato, X. Querol, C. Colombi, V. Gianelle, C.A. Alves, Particulate and gaseous emissions from the combustion of different biofuels in a pellet stove, Pages 15-27 (2015)
72. Kailasnath B. Sutar, Sangeeta Kohli, M.R. Ravi, Anjan Ray, Biomass cookstoves: A review of technical aspects, Pages 1128-1166 (2015)
73. Awf Al-kassir, F. Lopez Rodríguez, A.C. Marcos, P.J. Coelho, Experimental study of drying of agricultural solid biomass residues using hot combustion gases of a pellet stove, Page 529 (2016)
74. Apoorva Pandey, Pankaj Sadavarte, Anand B. Rao, Chandra Venkataraman, Trends in multi-pollutant emissions from a technology-linked inventory for India: II. Residential, agricultural and informal industry sectors, Pages 341-352 (2014)
75. Mikko Savolahti, Niko Karvosenoja, Jarkko Tissari, Kaarle Kupiainen, Olli Sippula, Jorma Jokiniemi, Black carbon and fine particle emissions in Finnish residential wood combustion: Emission projections, reduction measures and the impact of combustion practices, Pages 495-505 (2016)
76. Santino Orecchio, Diana Amorello, Salvatore Barreca, II) Wood pellets for home heating can be considered environmentally friendly fuels? Heavy metals determination by inductively coupled plasma-optical emission spectrometry (ICP-

- OES) in their ashes and the health risk assessment for the operators, Pages 178-183 (2016)
77. Andreas Botnen Smebye, Magnus Sparrevik, Hans Peter Schmidt, Gerard Cornelissen, Life-cycle assessment of biochar production systems in tropical rural areas: Comparing flame curtain kilns to other production methods, Pages 35-43 (2017)
78. Jing Wang, Helen H. Lou, Fengling Yang, Fangqin Cheng, Development and performance evaluation of a clean-burning stove, Pages 447-455 (2016)
79. Yousef S.H. Najjar, Musaab Kseibi, Evaluation of experimental JUST thermoelectric stove for electricity – Deprived regions, Pages 854-861 (2017)
80. Mahesh Tiwari, Sanjay Kumar Sahu, Rahul Chindhu Bhangare, Ajmal Yousaf, Gauri Girish Pandit, Particle size distributions of ultrafine combustion aerosols generated from household fuels, Pages 145-150 (2014)
81. Nathan Curry, Pragasen Pillay, Biogas prediction and design of a food waste to energy system for the urban environment, Pages 200-209 (2012)
82. Veiko Uri, Mai Kukumägi, Jürgen Aosaar, Mats Varik, Hardo Becker, Gunnar Morozov, Kalle Karoles, Ecosystems carbon budgets of differently aged downy birch stands growing on well-drained peatlands, Pages 82-93 (2017)
83. Rainer Martens, Katja Heiduk, Andreas Pacholski, Hans-Joachim Weigel, Repeated ¹⁴C pulse-labelling reveals an additional net gain of soil carbon during growth of spring wheat under free air carbon dioxide enrichment (FACE), Pages 2422-2429 (2009)
84. Florian Einsiedl, Sea-water/groundwater interactions along a small catchment of the European Atlantic coast, Pages 73-80 (2012)
85. M.D.A. Rounsevell, D.S. Reay, Land use and climate change in the UK, Pages 160-169 (2009)
86. D. Vamvuka, E. Kastanaki, P. Grammelis and E. Kakaras, Pyrolysis characteristics and kinetics of biomass residuals mixtures with poor coal Fuel 82, p. 1949(2003)
87. K. Maniatis, G. Giu and J. Resgo, The European Commission perspective in biomass and waste thermochemical conversion. In: A.V. Bridgwater, Editor, Pyrolysis and gasification of biomass and waste, Strasbourg p. 1. (2002)
88. CRES. An overview of the Greek energy market; 2002
89. Δ. Βάμβουκα, Αντιρυπογόνοις χρήσις γαιανθράκων, Εκδόσεις Ιων (2002)
90. Δ. Βάμβουκα, Βιομάζα : Βιοενέργεια και περιβάλλον, Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ (2009) σ. 158-164
91. ΥΑΟΙΚ 189533/2011, ΦΕΚ 2654Β/9/11/2011
92. Εργαστηριακός Οδηγός: Τεχνολογίες Αξιοποίησης Στερεών Καυσίμων, Σφακιωτάκης Στυλιανός, Βάμβουκα Δέσποινα