



# **ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΞΕΥΓΕΝΙΣΜΟΥ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΣΤΕΡΕΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΜΕΛΕΤΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΑΣΑ  
ΜΕΣΩ ΣΥΝ-ΚΑΥΣΗΣ ΣΕ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΚΛΙΝΗ-  
ΑΠΟΔΟΣΗ, ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΑΕΡΙΩΝ ΡΥΠΩΝ, ΣΤΕΡΕΑ  
ΑΠΟΒΛΗΤΑ»**

**ΠΑΠΑΓΙΑΝΝΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ**

## ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

κα. ΒΑΜΒΟΥΚΑ – ΚΑΛΟΥΜΕΝΟΥ ΔΕΣΠΟΙΝΑ, Καθηγήτρια (Επιβλέπουσα)

κ. ΓΑΛΕΤΑΚΗΣ ΜΙΧΑΗΛ, Καθηγητής

κ. ΑΛΕΒΙΖΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ, Αναπληρωτής Καθηγητής

ΧΑΝΙΑ

ΜΑΙΟΣ 2018

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΗΡΙΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ**

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά, πρώτη από όλους την καθηγήτρια και επιβλέπουσα κυρία Βάμβουκα-Καλούμενου Δέσποινα, με την οποία είχαμε μια άψογη συνεργασία, καθώς η πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση της ήταν καίρια στη διεκπεραίωση της διπλωματικής μου εργασίας.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Στέλιο Σφακιωτάκη, εργαστηριακό συνεργάτη του Εργαστηρίου 'Εξευγενισμού και Τεχνολογίας Στερεών Κανισμών' του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, για τη σημαντική βοήθεια που μου προσέφερε στη διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας.

Ευχαριστίες αποδίδω ακόμα στα μέλη ΔΕΠ της σχολής Μηχ.Ο.Π., τον κ. Αλεβίζο Γ. και την κα. Πεντάρη Δ. για τη διάθεση συσκευών και μηχανημάτων των εργαστηρίων τους, καθώς και το προσωπικό των παραπάνω εργαστηρίων για τη βοήθεια που μου προσέφεραν.

Επίσης, να ευχαριστήσω τον κ. Γαλετάκη Μ. και τον κ. Αλεβίζο Γ. για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την υπομονή και την αμέριστη ψυχολογική κυρίως συμπαράσταση που έδειξαν προς το πρόσωπό μου.

## Περιεχόμενα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ .....	8
2.1 Η Βιομάζα ως Ανανεώσιμη Πηγή Ενέργειας.....	8
2.1.1 Συνεισφορά στην παραγωγή ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση και παγκοσμίως .....	12
2.1.2 Τύποι και δυναμικό βιομάζας στην Ελλάδα.....	23
2.1.3 Δημοτικά-αστικά απόβλητα .....	27
2.2 Η Τεχνολογία Καύσης σε Ρευστοποιημένη Κλίνη .....	37
2.2.1 Βασικές αρχές-πλεονεκτήματα .....	38
2.2.2 Επισκόπηση καύσης αστικών αποβλήτων βιομάζας.....	40
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ .....	45
3.1 Συλλογή και Προετοιμασία Δειγμάτων .....	45
3.1.1 Καύσιμα .....	45
3.1.2 Αδρανές υλικό .....	46
3.2 Χημικός Χαρακτηρισμός Δειγμάτων.....	47
3.2.1 Προσεγγιστική ανάλυση.....	47
3.2.2 Στοιχειακή ανάλυση.....	49
3.2.3 Προσδιορισμός θερμογόνου δύναμης.....	51
3.2.4 Ορυκτολογική και χημική ανάλυση τέφρας. ....	52
3.3 Πειραματική Διάταξη .....	57
3.3.1 Αντιδραστήρας ρευστοποιημένης κλίνης.....	58
3.3.2 Σύστημα τροφοδοσίας καυσίμου .....	59
3.3.3 Σύστημα συλλογής ιπτάμενης τέφρας.....	60
3.3.4 Σύστημα ψύξης και ανάλυσης καυσαερίων .....	60
3.4. Καθορισμός Συνθηκών Λειτουργίας Καύσης .....	62
3.4.1. Κοκκομετρία υλικών/μιγμάτων .....	62
3.4.2 Ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης .....	62
3.4.3 Ρυθμοί τροφοδοσίας καυσίμου .....	64
3.4.4 Ρυθμός τροφοδοσίας αέρα.....	64
3.4.5 Θερμοκρασία .....	64
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....	67
4.1 Χημικές Αναλύσεις Αρχικών Δειγμάτων.....	67
4.1.1 Προσεγγιστική ανάλυση .....	67
4.1.2 Στοιχειακή ανάλυση και θερμογόνος δύναμη .....	68

4.1.3 Ορυκτολογική και χημική ανάλυση τέφρας.....	69
4.2 Αποτελέσματα Καύσης Για Σταθερή Τροφοδοσία Καυσίμου Και Περρίσεια Αέρα. .....	72
4.2.1 Προφίλ θερμοκρασίας, εκπομπές ρύπων και απόδοση. ....	72
4.2.2 Χαρακτηρισμός ιπτάμενης τέφρας και τέφρας πυθμένα. ....	75
4.3 Επίδραση της Περίσσειας του Αέρα στις Χαρακτηριστικές Παραμέτρους Καύσης. .....	81
4.3.1 Προφίλ θερμοκρασίας, εκπομπές ρύπων και απόδοση. ....	81
4.4 Επίδραση του Ρυθμού Τροφοδοσίας του Καυσίμου στις Χαρακτηριστικές Παραμέτρους Καύσης. ....	87
4.4.1 Προφίλ θερμοκρασίας, εκπομπές ρύπων και απόδοση. ....	87
4.4.2 Χαρακτηρισμός ιπτάμενης τέφρας και τέφρας πυθμένα. ....	91
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	98
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	101
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	108

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική μελέτη διεξήχθησαν μια σειρά από πειράματα συν-καύσης μειγμάτων πυρηνόξυλου με Αστικά Στερεά Απόβλητα (ΑΣΑ), με τη χρήση εργαστηριακής μονάδας ρευστοποιημένης κλίνης φυσαλίδων (Fluidized Bed Combustion). Σκοπός της εργασίας ήταν η μελέτη της απόδοσης της καύσης, ο έλεγχος των εκπομπών αέριων ρύπων ( $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$  και  $\text{SO}_2$ ) και ο χημικός-ορυκτολογικός χαρακτηρισμός των παραγόμενων τεφρών για τις διάφορες συνθήκες καύσης.

Αρχικά έγινε ο χημικός χαρακτηρισμός των υπό μελέτη καυσίμων και ο καθορισμός των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών της ρευστοποίησης. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν για διαφορετικές αναλογίες τροφοδοσίας καυσίμου 12, 14 και 16g/min, καθώς και περίσσειας αέρα από 30% έως 60%.

Η καύση των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε εντός της κλίνης, με τη θερμοκρασία καύσης να διατηρείται σε όλες τις περιπτώσεις σε υψηλές τιμές, μεταξύ 820 και 870°C. Η αύξηση του ποσοστού των ΑΣΑ εντός των μειγμάτων επέφερε αύξηση των αέριων ρύπων. Το ίδιο συνέβη και κατά την αύξηση του λόγου περίσσειας του αέρα, καθώς η ψύξη που προκάλεσε ο αέρας μείωσε τη θερμοκρασία καύσης εντός της κλίνης. Οι εκπομπές των αέριων ρύπων που προέκυψαν κατά τις διάφορες συνθήκες καύσης ήταν εντός των ορίων για τα  $\text{CO}$ , εκτός των ορίων για τα  $\text{NO}_x$ , ενώ οι εκπομπές  $\text{SO}_2$  ήταν αμελητέες. Η απόδοση της καύσης παρέμεινε σε υψηλά επίπεδα (>99%) για όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν.

Οι χημικές και ορυκτολογικές αναλύσεις των ιπτάμενων τεφρών έδειξαν ότι τα μείγματα είχαν υψηλή περιεκτικότητα σε Ca, Si, P, Mg και αυξημένες συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων Ni, Ca, Sr και Zn, των οποίων όμως η συγκέντρωση δεν ξεπέρασε τα επιτρεπτά όρια για απόθεση σε εδάφη.

Οι βέλτιστες συνθήκες καύσης, επετεύχθησαν στα μείγματα Πυρηνόξυλο /ΑΣΑ σε αναλογίες 90/10 και 80/20 για τροφοδοσία καυσίμου 12 g/min και για λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.5$ .

# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο 21<sup>ος</sup> αιώνας έχει χαρακτηριστεί από τους επιστήμονες ως ο αιώνας στον οποίο η χρήση των ορυκτών καυσίμων (πετρέλαιο, άνθρακας κ.α.) θα έρθει στο τέλος της, είτε λόγω εξάντλησης των αποθεμάτων, είτε λόγω της μη συμφέρουσας οικονομικά πλέον εξόρυξής τους. Ωστόσο, έως και σήμερα τα ορυκτά καύσιμα παραμένουν η βασικότερη πηγή καυσίμων για την αντιμετώπιση των ενεργειακών απαιτήσεων της ανθρωπότητας. Αναπόφευκτα, η ανθρωπότητα εξαιτίας της συνεχόμενης αύξησης της ζήτησης, θα αναγκαστεί να στραφεί μελλοντικά σε νέες μεθόδους παραγωγής ενέργειας, αλλά κυρίως στην εύρεση και αξιοποίηση νέων μορφών καυσίμων ικανών να αντικαταστήσουν αποτελεσματικά τα ορυκτά καύσιμα. Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) θεωρούνται ως ο επικρατέστερος υποψήφιος, διότι είδη χρησιμοποιούνται και έχουν αποδείξει ότι είναι ικανές να αντικαταστήσουν τα ορυκτά καύσιμα σχεδόν σε όλους τους τομείς. Το πλεονέκτημα έναντι των συμβατικών καυσίμων ότι είναι ανεξάντλητες και πολύ φιλικές προς το περιβάλλον, σε αντίθεση με τα συμβατικά καύσιμα τα οποία επιβάρυνουν αρνητικά το περιβάλλον και την κλιματική ισορροπία του πλανήτη τον τελευταίο ενάμιση αιώνα.

Από το σύνολο των ΑΠΕ, η βιομάζα θεωρείται ως η σημαντικότερη πηγή, λόγω του τεράστιου και ανεξάντλητου δυναμικού της σε παγκόσμιο επίπεδο. Μέρος της βιομάζας αποτελούν και τα Αστικά Στερεά Απόβλητα, των οποίων η παραγωγή σε Ελληνικό αλλά και σε παγκόσμιο επίπεδο αυξάνεται δραματικά με την πάροδο των ετών. Η αύξηση αυτή είναι απόρροια της αύξησης του παγκόσμιου πληθυσμού, της ταχύτατης αστικοποίησης, καθώς και της καταναλωτικής και τεχνολογικής εξέλιξης. Το βασικό πρόβλημα σε σχέση με τα ΑΣΑ είναι το γεγονός ότι τα περισσότερα κράτη, συμπεριλαμβανομένης και της Ελλάδας, τα απορρίπτουν είτε σε χώρους υγειονομικής ταφής (ΧΥΤΑ), είτε σε χώρους ανεξέλεκτης ταφής (ΧΑΔΑ). Ωστόσο, οι πρακτικές αυτές μόνο αρνητικές επιπτώσεις επιφέρουν, καθώς η εκτεταμένη ρύπανση που προκαλούν στο έδαφος και τα υδατικά συστήματα υπονομεύει την υγεία των πληθυσμών και επιβαρύνει τα κράτη οικονομικά από μεγάλα χρηματικά πρόστιμα που επιβάλλονται. Για τους παραπάνω λόγους, η επεξεργασία των ΑΣΑ για παραγωγή ενέργειας αποτελεί πλέον το κλειδί στη λύση του προβλήματος, όπως έχουν επιτυχημένα χώρες όπως η Σουηδία και η Ολλανδία, καθώς επιτυγχάνεται η εξάλειψη μεγάλων ποσοτήτων αποβλήτων και τόνωση της οικονομίας.

Ο σκοπός της παρούσα διπλωματικής εργασίας είναι η θερμική αξιοποίηση και αξιολόγηση δύο υπολειμματικής μορφής καυσίμων βιομάζας, αγροτοβιομηχανικής και αστικής προέλευσης, για παραγωγή φιλικής προς το περιβάλλον ενέργειας, με τη χρήση ρευστοποιημένης κλίνης φυσαλίδων. Τα καύσιμα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν πυρηνόξυλο το οποίο συλλέχτηκε από την εταιρεία ABEA Χανιά, και Αστικά Στερεά Απόβλητα (ΑΣΑ) από τη Διαδημοτική Επιχείρηση Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων (ΔΕΔΙΣΑ) της πόλης των Χανίων. Ο απώτερος στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι να ελεγχθεί κατά πόσο αποτελεσματική, ενεργειακά και περιβαλλοντικά, θα μπορούσε να είναι η συν-καύση ΑΣΑ και πυρηνόξυλου, μιας και τα πρώτα αποτελούν σημαντικό πρόβλημα, καθώς η ετήσια παραγωγή τους στον Ελλαδικό χώρο φτάνει τους 5.5 εκ τόνους.

Η πειραματική διαδικασία συνίσταται αρχικά από το χημικό χαρακτηρισμό των υπό μελέτη καυσίμων και τον καθορισμό των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών της ρευστοποίησης. Έπειτα, πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα συν-καύσης, των δύο καυσίμων, σε διαφορετικές αναλογίες μίξης μεταξύ τους, μεταβάλλοντας τις συνθήκες καύσης (ρυθμό τροφοδοσίας, λόγο περίσσειας αέρα), υπολογίστηκαν οι αέριες εκπομπές ρύπων ( $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$  και  $\text{NO}_x$ ) και η απόδοση της καύσης. Στο τελευταίο στάδιο πραγματοποιήθηκαν οι χημικές και ορυκτολογικές αναλύσεις στις ιπτάμενες τέφρες και τις τέφρες πυθμένα, καθώς επίσης μελετήθηκαν τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από τα πειράματα καύσης, έτσι ώστε να γίνει μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση της πειραματικής διαδικασίας και να εξαχθούν τα τελικά συμπεράσματα.

## 2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### 2.1 Η Βιομάζα ως Ανανεώσιμη Πηγή Ενέργειας

Ο όρος βιομάζα χρησιμοποιείται για το χαρακτηρισμό υλικών, τα οποία προήλθαν άμεσα ή έμμεσα από το φυτικό ή το ζωικό κόσμο π.χ. δασικά και ζωικά απόβλητα και τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμο για την παραγωγή ενέργειας. Οι τρόποι μετατροπής της βιομάζας σε βιοενέργεια και η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς βιομάζας απεικονίζονται στα Σχήματα 2.1-2.2. Ουσιαστικά, η βιομάζα αποτελεί μία δεσμευμένη και αποθηκευμένη μορφή ηλιακής ενέργειας και είναι αποτέλεσμα της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας των φυτικών οργανισμών. Οι φυτικοί οργανισμοί προσλαμβάνοντας την ηλιακή ενέργεια και τα θρεπτικά συστατικά που βρίσκονται στο έδαφος, μετατρέπουν το νερό και το διοξείδιο του άνθρακα σε οξυγόνο και οργανικές ενώσεις (βιομάζα) [1].

Γενικότερα η βιομάζα διαχωρίζεται σε 2 βασικές κατηγορίες σύμφωνα με την προέλευση της.

1. Η πρώτη κατηγορία αφορά τη βιομάζα, η οποία παράγεται από τις ενεργειακές καλλιέργειες.
2. Δεύτερη κατηγορία είναι η υπολειμματική βιομάζα, που την αποτελούν κάθε είδος φυτικών ή ζωικών υπολειμμάτων και τα αστικά απόβλητα.

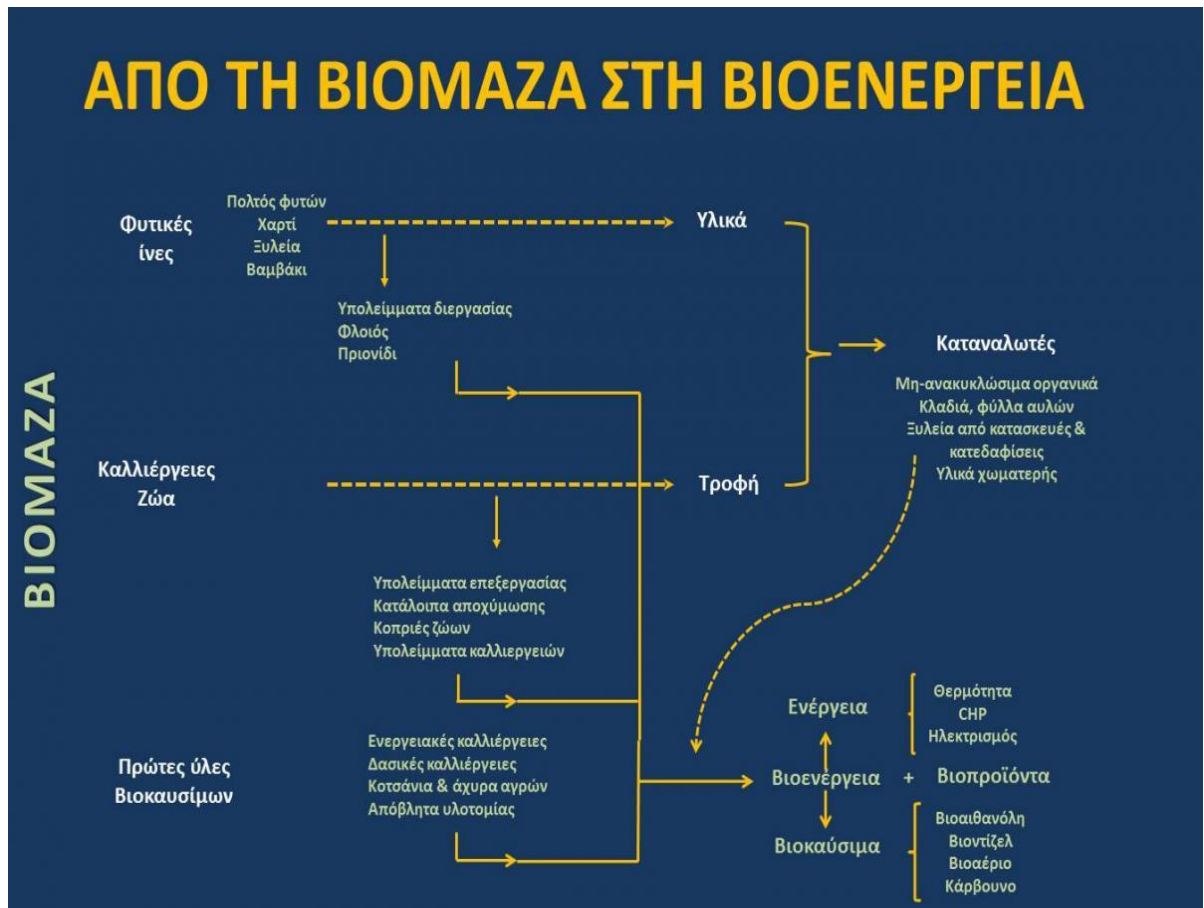
Κατάλληλα για ενεργειακή χρήση θεωρούνται και ορισμένα είδη υδάτινης βιομάζας, όπως είναι το φυτοπλαγκτόν, φύκια, φυτά του γλυκού νερού κ.α.[2].

Αναλυτικότερα, οι παραπάνω δύο κατηγορίες απαντώνται από τα εξής:

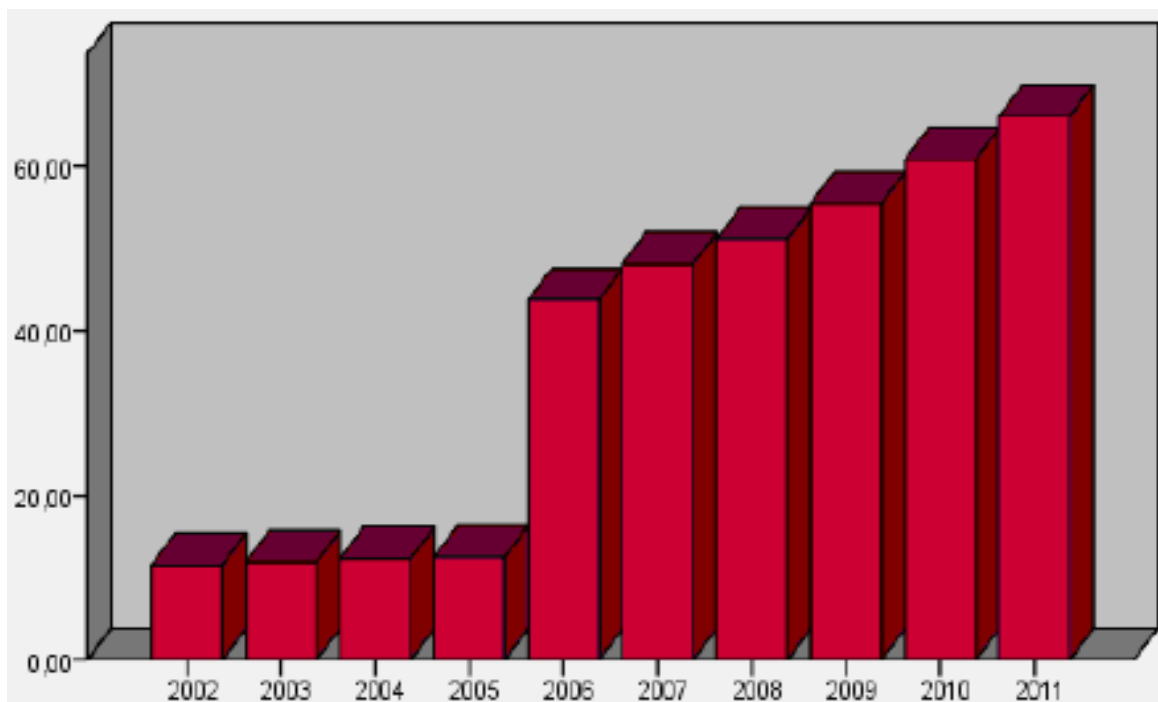
- Δασικές και γεωργικές ύλες προερχόμενες από φυσικά οικοσυστήματα, όπως π.χ. πριονίδια, ροκανίδια, άχυρα, φύλλα, κομμάτια δένδρων, θάμνοι, υπολείμματα υλοτομίας.
- Υπολείμματα επεξεργασίας φυτικών προϊόντων π.χ. ελαιοπυρήνες, φλοιοί, παραπροϊόντα βιομηχανικής επεξεργασίας.
- Βιομάζα, η οποία προέρχεται από ζωικά κατάλοιπα (κοπριά, απόβλητα σφαγείων).
- Παραπροϊόντα επεξεργασίας ζωικών προϊόντων.



- Βιολογικής προέλευσης οργανική ύλη από αστικά λύματα και στερεά απόβλητα [3, 4].



**Σχήμα 2.1:** Μετατροπή βιομάζας σε Βιοενέργεια [5].



**Σχήμα 2.2:** Παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς βιομάζας (GW) [5].

Για να μετατραπεί η βιομάζα σε βιοενέργεια, πρέπει να υποστεί επεξεργασία είτε θερμοχημική (καύση, πυρόλυση, αεριοποίηση), είτε βιοχημική (αλκοολική ζύμωση, αερόβια ή αναερόβια χώνευση), είτε μηχανική εκχύλιση με εστεροποίηση, ώστε να παραχθούν υγρά καύσιμα. Το κριτήριο επιλογής της κατάλληλης μεθόδου μετατροπής του τύπου της βιομάζας σε ενέργεια, προσδιορίζεται κυρίως από την περιεκτικότητα της σε υγρασία και τη στοιχειακή της σύνθεση. Τα παραγόμενα καύσιμα είναι είτε αέριας μορφής (βιοαέριο) για θέρμανση ή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, υγρά καύσιμα (βιοντήζελ, βιοαιθανόλη), τα οποία χρησιμοποιούνται ως καύσιμα κινητήρων, ή στερεά καύσιμα (ξύλα, σιτηρά, απόβλητα κ.α.) για την παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας [6, 7].

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης βιομάζας σε σύγκριση με άλλες πηγές ενέργειας είναι :

- Η καύση βιομάζας δε συνεισφέρει αρνητικά στο ισοζύγιο διοξειδίου του άνθρακα, με αποτέλεσμα να μην επηρεάζει το φαινόμενο του θερμοκηπίου, διότι οι ποσότητες του διοξειδίου του άνθρακα που απελευθερώνονται κατά τη θερμική μετατροπή, δεσμεύονται ξανά από τα φυτά για τη δημιουργία νέου κύκλου παραγωγής βιομάζας.

- Ως καύσιμο η βιομάζα δεν περιέχει θείο (με ελάχιστες εξαιρέσεις), με αποτέλεσμα η καύση της να μην εκλύει διοξείδιο του θείου, το οποίο ευθύνεται για το φαινόμενο της όξινης βροχής.
- Τα περισσότερα κράτη είναι εξαρτημένα στον ενεργειακό τομέα από εισαγόμενα καύσιμα, με κυριότερο το πετρέλαιο. Εφόσον η βιομάζα είναι εγχώρια πηγή ενέργειας, τα κράτη που θα επιλέξουν να την εκμεταλλευτούν ενεργειακά μειώνουν αυτόματα την ενεργειακή εξάρτηση από τρίτους, εξασφαλίζουν το ενεργειακό μέλλον τους και έχουν γενικότερα μεγάλα οικονομικά οφέλη.
- Με την αξιοποίηση της βιομάζας, οι τοπικές κοινωνίες έχουν εξασφαλισμένη εργασία, με αποτέλεσμα να υπάρχει μια γενική συγκράτηση των αγροτικών πληθυσμών στις γεωργικές ή παραμεθόριες περιοχές, τονώνοντας έτσι την τοπική οικονομία.
- Και το βασικότερο είναι ότι η βιομάζα είναι ανανεώσιμη πηγή ενέργειας [8-10].

Τα μειονεκτήματα της χρήσης βιομάζας σε σχέση με άλλες πηγές καυσίμου:

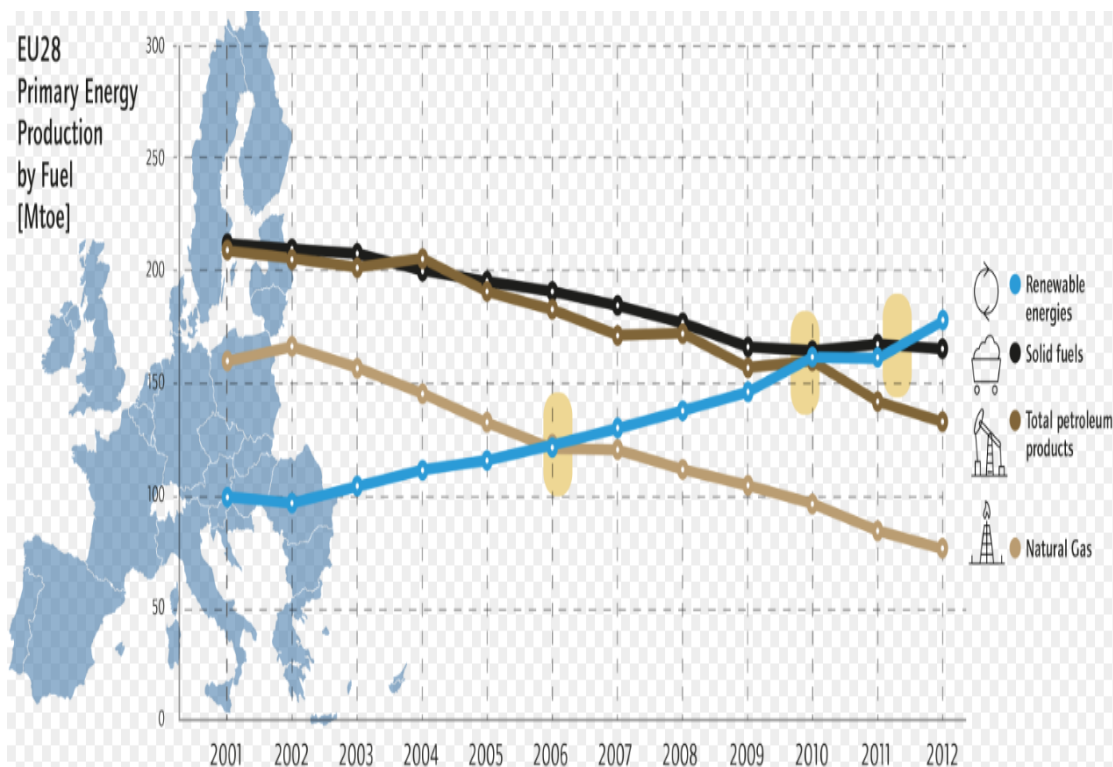
- Λόγω του αυξημένου όγκου και της μεγάλης περιεκτικότητας σε υγρασία σε σχέση με άλλα καύσιμα (ορυκτά καύσιμα), δυσχεραίνεται η ενεργειακή αξιοποίηση της βιομάζας
- Λόγω της μεγάλης διασποράς των πρώτων υλών και της εποχιακής παραγωγής της βιομάζας, δεν είναι εφικτή η συνεχής και η σταθερή τροφοδοσία με πρώτη ύλη στις μονάδες αξιοποίησης και παραγωγής ενέργειας.
- Δύσκολη η συλλογή, η μεταφορά και η αποθήκευση της βιομάζας, με αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους [8-10].

### **2.1.1 Συνεισφορά στην παραγωγή ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση και παγκοσμίως**

#### **Ευρωπαϊκή Ένωση**

Η παραγωγή ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), για πρώτη φορά το 2012 ξεπέρασε τη παραγωγή ενέργειας των τριών βασικών ορυκτών καυσίμων (Σχήμα 2.3). Ωστόσο, πάρα την συμβολή των ΑΠΕ, η ενεργειακή εξάρτηση από συμβατικά καύσιμα βρίσκεται ακόμα σε πολύ υψηλά επίπεδα (85% πετρέλαιο, 62% άνθρακα, 66% φυσικό αέριο) και προβλέπεται να υπάρξει περεταίρω αύξηση την ερχόμενη δεκαετία [11].

Η εξάρτηση αυτή επιφέρει πολυάριθμα προβλήματα. Για παράδειγμα, σε περιόδους εκτίναξης των τιμών του πετρελαίου και του φυσικού αερίου επηρεάζονται οι οικονομίες των κρατών, αλλά και εκατομμυρίων επιχειρήσεων, και τις περιόδους όπου οι αγορές βρίσκονται σε κρίση υπάρχει πάντα ο φόβος κοινωνικών αναταραχών. Επίσης, η μη μείωση της χρήσης συμβατικών καυσίμων και αύξηση των εναλλακτικών μορφών καυσίμων, έχει ως αποτέλεσμα τη συνεχή ρύπανση του περιβάλλοντος. Επιπροσθέτως, οι ενδογενείς πόροι μειώνονται δραστικά και το κόστος εξόρυξης συνεχώς αυξάνεται [12]. Για τους παραπάνω λόγους, η ΕΕ το 2008 ξεκίνησε την προώθηση της χρήσης ΑΠΕ, τίθοντας ως βασικό στόχο στα κράτη μέλη της το 20% της ενέργειας που καταναλώνουν έως το 2020 να προέρχεται από ΑΠΕ, ενώ το 2030 να αυξηθεί στο 27% [13].



**Σχήμα 2.3:** Παραγωγή ενέργειας στην ΕΕ από τα 4 βασικά καύσιμα σε εκατομμύρια Τ.Ι.Π. [11].

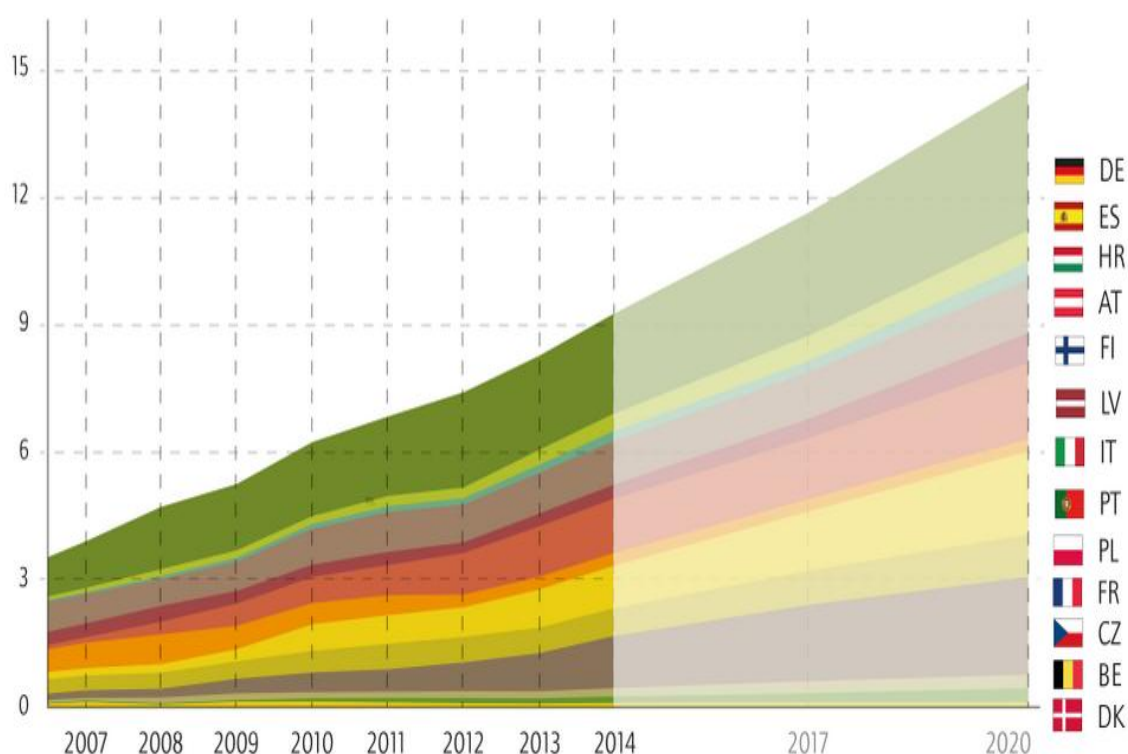
Το 2015, η παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ έφτασε σε ποσοστό 16.4% της συνολικής ακαθάριστης κατανάλωσης ενέργειας, συγκριτικά με το 2004 όπου το ποσοστό ήταν 8,5%. Από το 2009 και έπειτα, η ΕΕ ξεκίνησε μια “ επιθετική ” πολιτική προώθησης της βιοενέργειας, με αποτέλεσμα αυτήν την περίοδο η βιομάζα να κατατάσσεται ως η ισχυρότερη ΑΠΕ στην ΕΕ, καταλαμβάνοντας μερίδιο 64% της συνολικής παραγόμενης ενέργειας, με βασική παρουσία στον τομέα της θέρμανσης ή ψύξης, στον οποίο καταλαμβάνει μερίδιο 82% των ΑΠΕ. Οι βασικότερες μορφές βιομάζας για παραγωγή βιοενέργειας εντός της ΕΕ καταγράφονται παρακάτω [14, 15].

Κυριότερη πηγή βιοενέργειας είναι τα δασικά υπολείμματα (ξύλα, κορμοί, κλαδιά, φύλλα κ.α.). Ιδιαίτερης σημασίας χαρακτηριστικό του ξύλου είναι ότι δημιουργείται και ανανεώνεται φυσικά, χωρίς να απαιτεί προσπάθεια από τον άνθρωπο. Έτσι η αειφόρος διαχείριση και χρήση του, μπορεί να εξασφαλίσει σταθερή κάλυψη των ανθρώπινων αναγκών σε ξύλο για παραγωγή ενέργειας μέσω της καύσης. Αυτό έχει επιτύχει η ΕΕ αυξάνοντας σταθερά την παραγωγή δασικής βιομάζας, ενώ παράλληλα φρόντισε να αυξηθούν οι δασικές της εκτάσεις. Συγκεκριμένα, η νομοθεσία εντός της ΕΕ επιτρέπει από τη συνολική ετήσια δασική αύξηση να συγκομιστεί το 62% για

ενεργειακή επεξεργασία. Επομένως, το δασικό απόθεμα της ΕΕ, αυξάνεται ετησίως κατά 289 εκ. m<sup>3</sup> σε όγκο και 3.2 εκ. m<sup>2</sup> σε έκταση. Το 2015 το συνολικό διαθέσιμο δασικό απόθεμα έφτανε τα 26 δις. m<sup>3</sup>, και η συνολική παραγωγή τα 700 εκ. m<sup>3</sup>. Οι χώρες με τα μεγαλύτερα αποθέματα εντός της ΕΕ είναι η Γερμανία με ποσοστό 14,3%, η Σουηδία με 13,8% και η Γαλλία με 10,6%. [16, 17]

Άλλη μια βασική πρώτη ύλη στην παραγωγή βιοενέργειας, η οποία αποτελεί προϊόν των δασικών ή αγροτικών υπολειμμάτων, είναι τα *συσσωματώματα 'Pellets'*. Κατασκευάζονται κυρίως από πριονίδι ή άλλα απόβλητα από πριστήρια και μονάδες επεξεργασίας ξύλου. Η παραγωγή τους εντός της ΕΕ ακολουθεί ανοδική πορεία, με τη συνολική παραγωγή το 2013 να φτάνει τους 13.5 εκ. τόνους και συνολική κατανάλωση 20.3 εκ. τόνους το 2015, κάνοντας την ΕΕ το μεγαλύτερο καταναλωτή παγκοσμίως [18]. Ωστόσο, υπάρχει μια εμφανής ανομοιομορφία στις ποσότητες που παράγει η κάθε χώρα μέλος. Από όλες τις χώρες που ανήκουν στην ΕΕ, οι 13 παράγουν τα 2/3 της συνολικής ποσότητας 'Pellets' (Σχήμα 2.4).

Evolution of Wood Pellet Production 2007-2014 with 2020 projections [in millions of tonnes]



**Σχήμα 2.4:** Παραγωγή Pellet σε εκατομμύρια τόνους την περίοδο 2007-2014 από τις 13 μεγαλύτερες παραγωγούς χώρες της ΕΕ και οι προβλέψεις για το 2020 [11].

### European wood pellet production in 2013

Actual production [in tonnes]

- > 1.000.000
- 600.000 – 999.999
- 300.000 – 599.999
- 100.000 – 299.999
- 1 - 99.999
- no data available

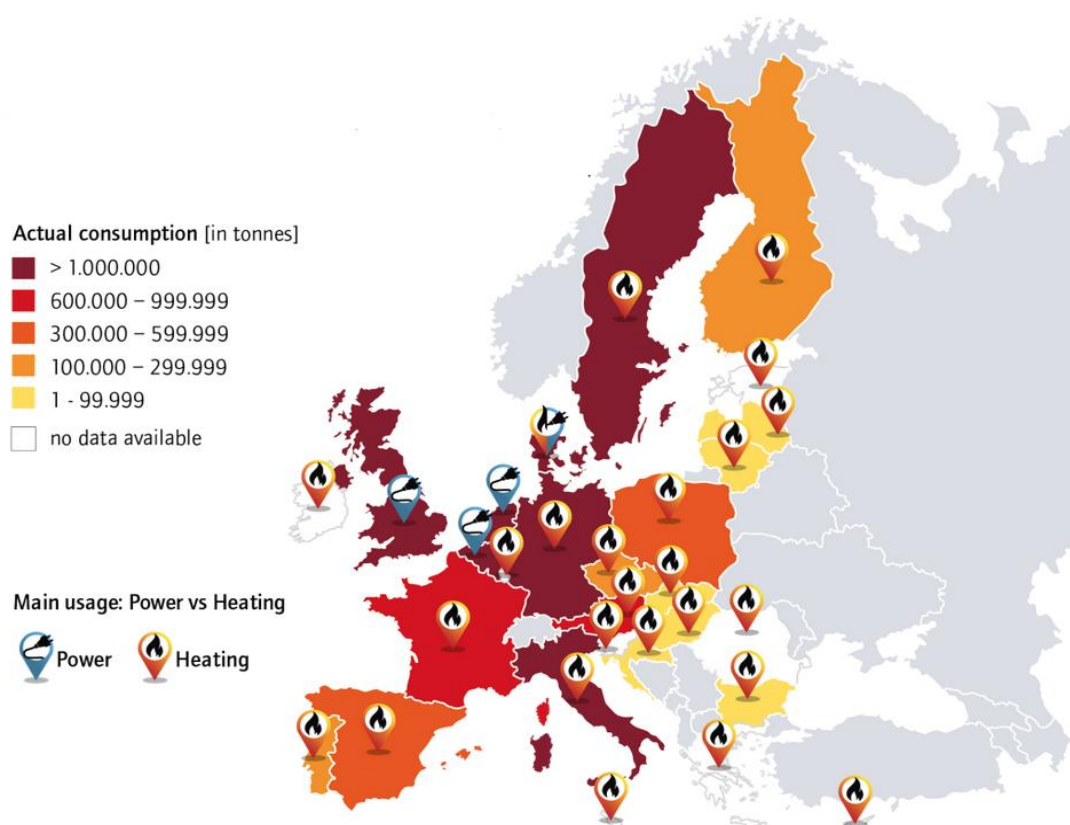
X Number of operational production plants

Country	Actual production [in tonnes]	Number of operational production plants
Sweden	> 1.000.000	70
Finland	300.000 – 599.999	26
Denmark	300.000 – 599.999	7
Poland	300.000 – 599.999	22
Czechia	100.000 – 299.999	10
Germany	600.000 – 999.999	40
Austria	600.000 – 999.999	13
France	600.000 – 999.999	46
Spain	300.000 – 599.999	42
Italy	300.000 – 599.999	24
Greece	100.000 – 299.999	37
Bulgaria	100.000 – 299.999	22
Romania	100.000 – 299.999	17
Ukraine	no data available	0
Belarus	no data available	0
Russia	no data available	0
Other countries	100.000 – 299.999	2, 12, 9, 5, 11, 1, 23, 34, 4, 9, 0, 5, 2, 6, 2

---

Πολυτεχνείο Κρήτης-Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων





**Σχήμα 2.6:** Κατανάλωση pellet στην ΕΕ το 2013 και η βασική χρήση τους ανά κράτος [11].

Οι προαναφερθείσες 2 κατηγορίες, χρησιμοποιούνται κυρίως στην παραγωγή θέρμανσης και ηλεκτρικής ενέργειας. Το μερίδιο τους στην παραγωγή ενέργειας είχε υπολογιστεί σε 1.158 δις ΤΙΠ για το 2007. Το 48% της συνολικής ενεργειακής ζήτησης αφορά τη θέρμανση. Βασικός καταναλωτής στον κλάδο της θέρμανσης είναι τα νοικοκυριά, ακολουθούμενα από τη βιομηχανία και τις υπηρεσίες. Η δασική βιομάζα (καυσόξυλα) χρησιμοποιείται κυρίως για τα νοικοκυριά και τις υπηρεσίες, ενώ τα συσσωματώματα "Pellets" έχουν μεγάλο μερίδιο χρήσης στο βιομηχανικό κλάδο [20].

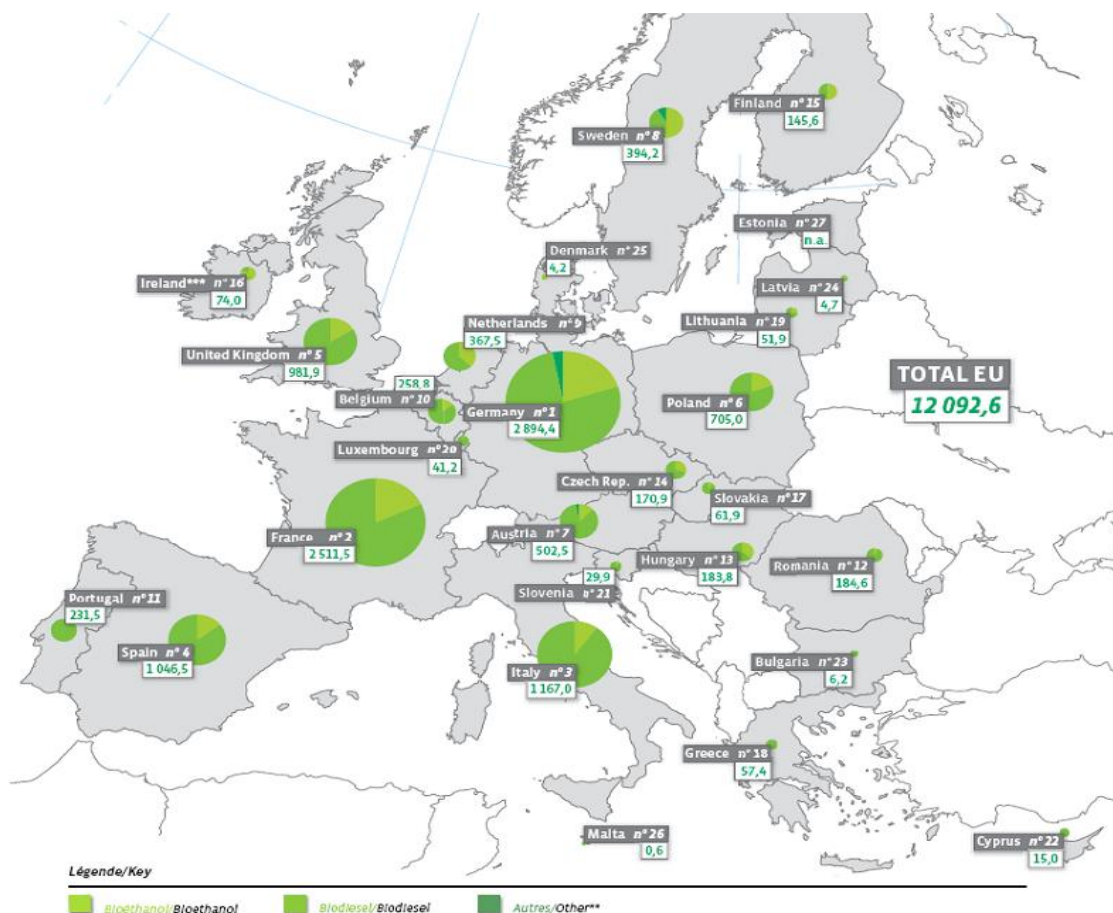
Στον τομέα των υγρών βιοκαυσίμων (βιοντίζελ, βιοαιθανόλη), η αύξηση της χρήσης τους κατέγραφε ελαφρά ανοδικούς ρυθμούς πριν την αλλαγή της χλιετίας. Από το 2000, όπου το ποσοστό των βιοκαυσίμων στα υγρά καύσιμα μετακίνησης ήταν στο εξαιρετικά χαμηλό ποσοστό του 0.2%, έφτασε να βρίσκεται το 2010 στο 4.27% ή 13 εκ. ΤΙΠ. Για το τέλος της δεκαετίας, το 2020 έχει τεθεί ως στόχος το ποσοστό



ανάμειξης με συμβατικά καύσιμα να φτάσει το 10%, αλλά το 2016 η ανάμειξη της βιοαιθανόλης και του βιοντίζελ στα καύσιμα μεταφορών ήταν 3.3 % και 5.8% αντίστοιχα, ποσοστό πολύ κάτω από το στόχο [20-22].

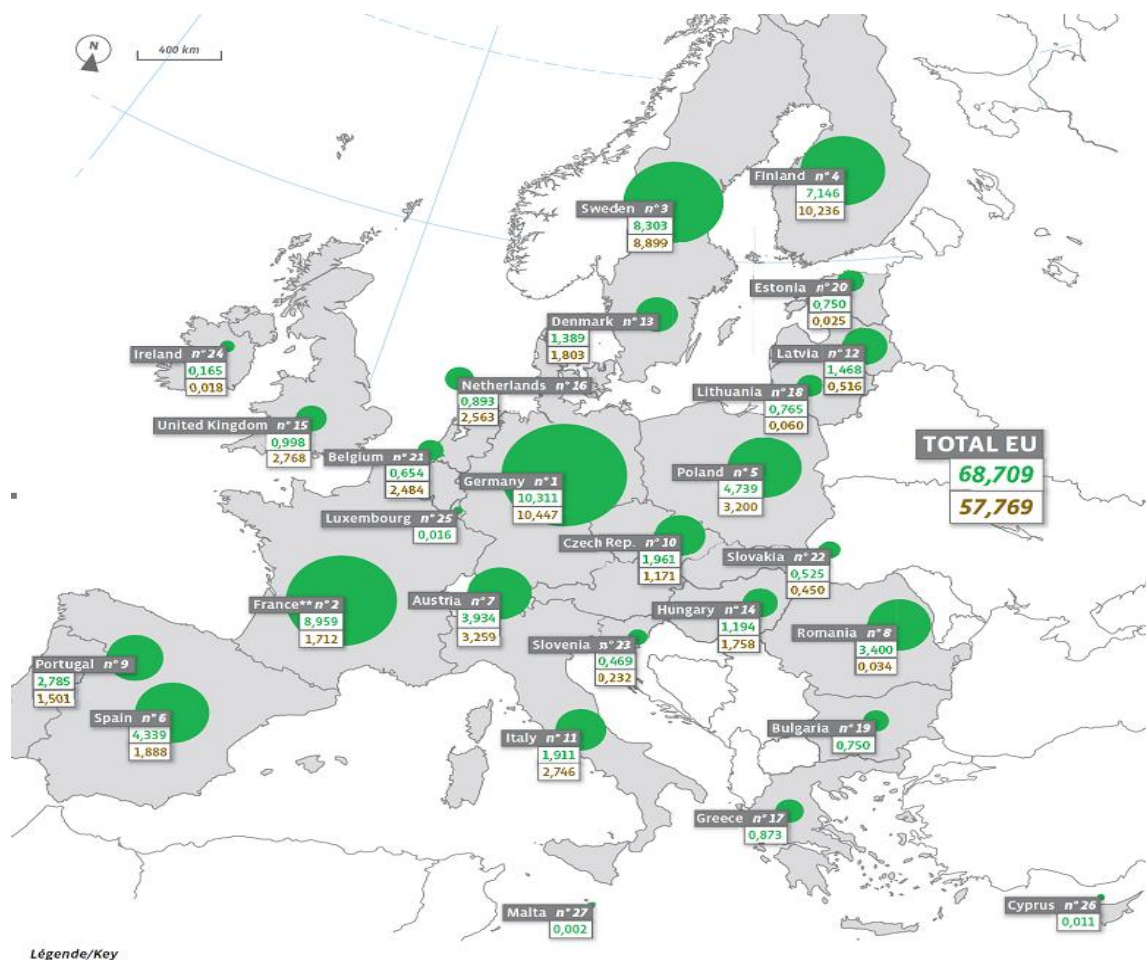
Η παραγωγή της βιοαιθανόλης το 2014 στην ΕΕ ανήλθε σε 5.4 δις λίτρα και με τις προβλέψεις να δείχνουν ότι θα παραμείνει στα ίδια επίπεδα έως το 2020. Όσον αφορά τη συνολική κατανάλωση της εντός της ΕΕ, μετά το 2011 πήρε την κατιούσα, λόγω της χαμηλότερης ζήτησης της βενζίνης και από την πιθανή αναπροσαρμογή των εντολών ανάμειξης κάθε κράτους. Για το έτος 2018 υπολογίζεται η κατανάλωση να φτάσει τα 5.4 δις λίτρα από τα 5.7 δις λίτρα το 2011. Το βιοντίζελ είναι το σημαντικότερο βιοκαύσιμο στην ΕΕ, και σε ενεργειακή βάση αντιπροσωπεύει περίπου το 80% της συνολικής αγοράς βιοκαυσίμων στις μεταφορές. Η ΕΕ είναι ο μεγαλύτερος παραγωγός παγκοσμίως, όπου το 2016 πατήγαγε πρώτης γενιάς βιοντίζελ ίση με 12.3 δις λίτρα και δεύτερης γενιάς ίση με 2.45 δις [22, 23].

Ειδικότερα, σε εθνικά επίπεδα προκύπτει ότι τα κράτη με τη μεγαλύτερη παραγωγή και κατανάλωση σε βιοκαύσιμα είναι πρωτίστως η Γερμανία, ακολουθούμενη από τη Γαλλία. Μπορεί να επισημανθεί επίσης ότι από τις χώρες της ΕΕ, τη σημαντικότερη αύξηση σε χρήση βιοκαυσίμων έκανε η Πολωνία με ποσοστό 70% και η Ρουμανία με ποσοστό 85%. Ο παρακάτω χάρτης (Σχήμα 2.7) παρουσιάζει αναλυτικά την κάθε χώρα και την κατανάλωση της σε βιοκαύσιμα το 2009 [20-23].



**Σχήμα 2.7:** Κατανάλωση βιοκαυσίμων σε χιλιάδες TWh εντός ΕΕ για το έτος 2009 [20].

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από βιομάζα επιτυγχάνεται με την καύση ή συν-καύση τριών ειδών βιοκαυσίμων, τη στερεή βιομάζα, το βιοαέριο και το βιοαποδομήσιμο ποσοστό των Αστικών Στερεών Αποβλήτων (ΑΣΑ). Η συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και από τα 3 είδη βιοκαυσίμων ανήλθε το 2007 σε 101.81 TWh. Το κυριότερο από τα 3 καύσιμα είναι τα στερεά βιοκαύσιμα, των οποίων η ηλεκτροπαραγωγή αυξήθηκε από 20.3 TWh το 2001 σε 57.7 TWh το 2008. Το 2013 η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από βιομάζα αντιστοιχούσε στο 19% της συνολικής παραγωγής και αναμένεται έως το 2020 ότι η παραγόμενη ενέργεια από βιομάζα θα ξεπεράσει τα 839PJ. Στον παρακάτω χάρτη (Σχήμα 2.8) απεικονίζονται αναλυτικά το ποσό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε κράτος, καθώς και η κατάταξη του εντός της ΕΕ. Παρατηρείται ότι και εδώ η Γερμανία βρίσκεται στην πρώτη θέση, στη δεύτερη η Γαλλία και ακολουθούν η Σουηδία, Φινλανδία κ.α. [20, 24].



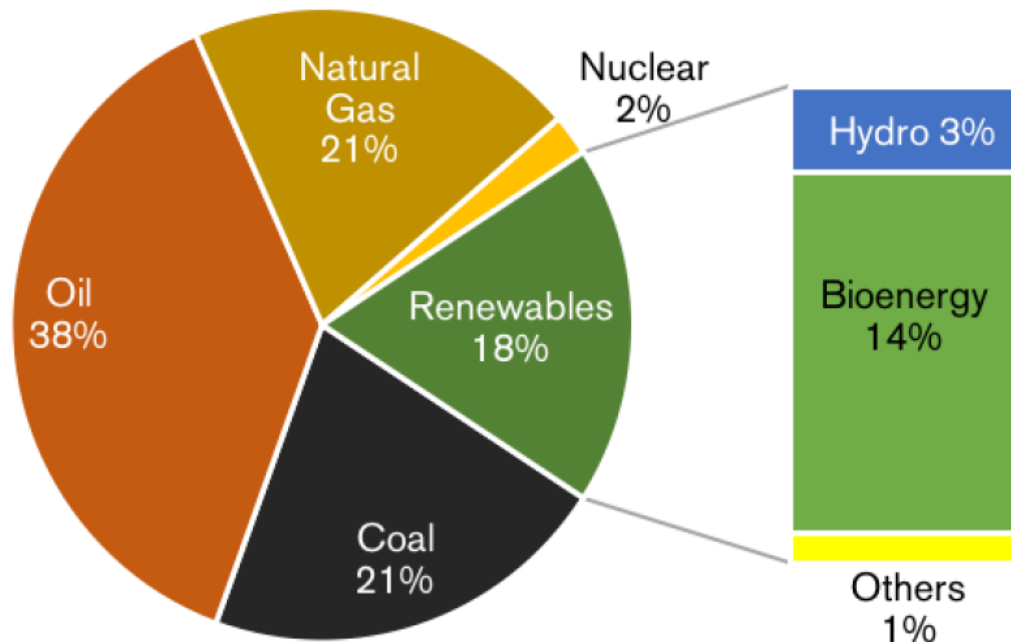
Légende/Key

**Σχήμα 2.8:** Με πράσινα γράμματα παρουσιάζεται η παραγωγή πρωτογενούς ενέργειας σε εκατομμύρια TWh / Με καφέ γράμματα παρουσιάζεται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε TWh [20].

## Παγκόσμια

Γενικότερα, σε παγκόσμιο επίπεδο, έχει υπολογιστεί ότι παράγονται περίπου 170 δις τόνοι ξηρού υλικού βιομάζας, με ενεργειακό περιεχόμενο δεκαπλάσιο από αυτό που καταναλώνει κάθε έτος ο πλανήτης [25]. Ωστόσο, η πλειονότητα αυτού του τεράστιου ενεργειακού δυναμικού παραμένει ανεκμετάλλευτο, καθώς τροφοδοτεί μόνο το 15% της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης. Προσφέρει ενεργειακές παροχές σε 2.6 δις. ανθρώπους και αποτελεί τη μεγαλύτερη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας με ποσοστό 14% από το 18% που καταλαμβάνει όλο το μείγμα των ΑΠΕ (Σχήμα 2.9). Η καταναλωτική προτίμηση βιομάζας ποικίλλει γεωγραφικά, με τη βόρεια και νότια Αμερική να καταναλώνει κυρίως βιοκαύσιμα, την Ασία και την Αφρική καυσόξυλα και

ξύλάνθρακα και την Ευρώπη να τη χρησιμοποιεί κυρίως για παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας [26].



**Σχήμα 2.9:** Ποσοστό χρήσης της βιοενέργειας στην παγκόσμια ενεργειακή πίτα [27].

Εδώ και χιλιάδες χρόνια, ο άνθρωπος χρησιμοποιεί τη βιομάζα ως κύρια πηγή ενέργειας για θέρμανση. Επί του παρόντος, βασική χρήση της βιομάζας παραμένει η παραγωγή θερμότητας, καταλαμβάνοντας το 90% της συνολικής βιοενέργειας. Βασικό καύσιμο παραμένουν τα καυσόξυλα, ο ξυλάνθρακας, τα αγροτικά υπολείμματα κ.α., τα οποία βρίσκουν μεγάλη αποδοχή σε αγροτικές και αναπτυσσόμενες χώρες. Ωστόσο, η αύξηση της ενεργειακής ζήτησης παγκοσμίως, η ταχεία αστικοποίηση και η αναποτελεσματική χρήση της βιομάζας σε αυτές τις χώρες επιφέρει τη συνεχή αποψίλωση των δασικών εκτάσεων. Οι κανόνες που έχουν οριστεί από τις παγκόσμιες οργανώσεις στα κράτη, τα τελευταία χρόνια για την προστασία του περιβάλλοντος, οδηγούν σε αύξηση της χρήσης σύγχρονων εναλλακτικών καυσίμων, όπως π.χ. τα βιοαέρια, τα "pellets", τα υγρά βιοκαύσιμα και πολλά άλλα.

Τα "Pellet" αποτελούν την πιο εμπορεύσιμη μορφή ξυλώδους βιομάζας παγκοσμίως, λόγω της εύκολης αποθήκευσής τους και της υψηλής θερμαντικής τους αξίας, κάνοντας τα ανθεκτικά στη μακροχρόνια αποθήκευση ή μεταφορά τους. Το έτος 2006 η πλειονότητα της παραγωγής προήλθε από την Ευρώπη με 6.4 εκ. τόνους. Ωστόσο, ο Καναδάς παρήγαγε σε σύγκριση με την Ευρώπη 1.2 εκ τόνους και η Αμερική 800 χιλ. τόνους, μετατρέποντας τις 2 χώρες ως τους μεγαλύτερους παραγωγούς. Πιο συγκεκριμένα, ο Καναδάς κατάφερε να αυξήσει σημαντικά την παραγωγή του τα τελευταία χρόνια, λόγω κυρίως των επιτυχημένων εξαγωγών στην Ευρώπη [28]. Για το 2015, η παγκόσμια παραγωγή ανήλθε στους 28 εκ τόνους, με την Ευρώπη να παραμένει ως ο μεγαλύτερος καταναλωτής [29].

Η συνολική παραγωγή βιοκαυσίμων το 2012 έφτασε τα 106 δις λίτρα παγκοσμίως. Από αυτά τα 83.5 δις λίτρα ήταν βιοαιθανόλη και τα 22.5 δις λίτρα βιοντίζελ. Η Αμερικάνικη ήπειρος παρήγαγε πάνω από το 60% των βιοκαυσίμων, ενώ η Ευρώπη παρήγαγε το 44% του παραγόμενου βιοντίζελ [27]. Οι ΗΠΑ και η Βραζιλία είναι πρωτοπόροι στην παραγωγή και κατανάλωση υγρών βιοκαυσίμων, με την πρώτη να παράγει βιοαιθανόλη κυρίως από καλαμπόκι, ενώ η Βραζιλία, η οποία κατέχει και την παγκόσμια πρωτιά στην παραγωγή βιοαιθανόλης, χρησιμοποιεί ως πρώτη ύλη ζαχαροκάλαμο. Ο κύριος αποδέκτης των παραγόμενων βιοκαυσίμων, είναι ο κλάδος των μεταφορών, ο οποίος καταναλώνει το 80% της παραγωγής. Έμφαση δίνεται τα τελευταία χρόνια και στον τομέα των αερομεταφορών και των θαλάσσιων μεταφορών, με τις εταιρείες να επενδύουν πολλά χρήματα στην έρευνα και ανάπτυξη κατάλληλων βιοκαυσίμων για αυτήν τη χρήση.[26, 30]

Όπως προαναφέρθηκε, η σημαντικότερη χρήση της βιομάζας συνδέεται άμεσα με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας, με βασικούς παραγωγούς την Ευρώπη και την Βόρεια Αμερική. Κατέχει περίπου το 2% της συνολικής παγκόσμιας ηλεκτρικής παραγωγής και υπολογίστηκε ότι την περίοδο 2000-2008 σημείωσε αύξηση της τάξης 13 TWh ανά έτος [31]. Το 2011 έφτασε τα 308 TWh, ενώ το 2017 532 TWh (Πίνακας 2.1). Οι 3 μεγαλύτερες παραγωγοί χώρες είναι η ΗΠΑ, η Κίνα και η Γερμανία, με την Κίνα να εμφανίζει τη μεγαλύτερη εκτίναξη και να παίρνει την πρωτιά, καταφέροντας σε 6 χρόνια να τριπλασιάσει την παραγωγή της [32].

**Πίνακας 2.1:** Παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την χρήση βιομάζας ως καύσιμο [32].

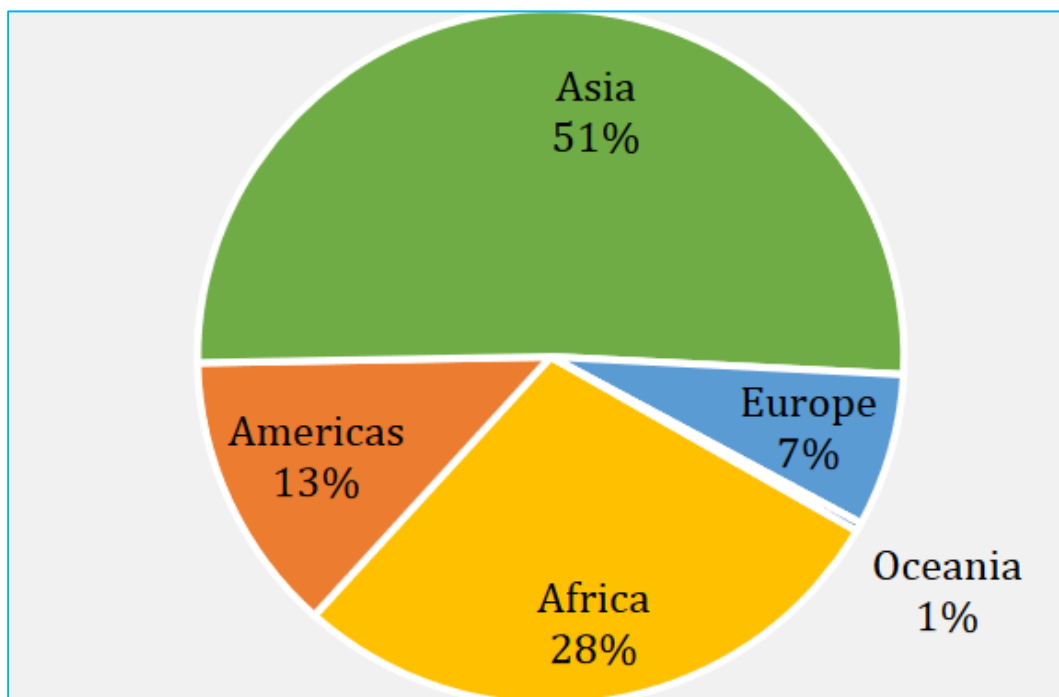
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
World	308	352	387	421	457	494	532
China	34	36	59	73	87	101	114
United States	61	67	69	72	75	78	80
Germany	37	35	37	38	39	41	42
Brazil	22	28	24	26	28	30	32
Japan	18	22	24	26	28	30	32

Στον τομέα της Θερμο-παραγωγής, η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς ανήλθε σε 786 PJ ή 218 TWh το 2011, από 421 PJ ή 116 TWh το 2000. Η Ευρώπη είναι η κυρίαρχος ήπειρος στη χρήση βιομάζας στον τομέα της θέρμανσης (Πίνακας 2.2) και οι ΗΠΑ η μεγαλύτερη παραγωγός χώρα. Το μεγαλύτερο μέρος της παραγόμενης θερμικής ενέργειας προέρχεται είτε από εγκαταστάσεις παραγωγής θερμότητας ή από εγκαταστάσεις συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας. Η Ασία και η Αφρική, λόγω των πολλών αναπτυσσόμενων χωρών που τις αποτελούν, είχαν το υψηλότερο ποσοστό απευθείας χρήσης της βιομάζας για παραγωγή θερμότητας ( τζάκια, σόμπες, καυστήρες κ.α.) 22 EJ και 12 EJ αντίστοιχα . Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 2.10) παρουσιάζεται το ποσοστό παραγωγής θερμότητας από απευθείας χρήση βιομάζας ανά ήπειρο [27].

**Πίνακας 2.2:** Παραγωγή θερμότητας από βιομάζα στον τομέα της μετατροπής ενέργειας ανά Ήπειρο (PJ) [27].

	World	Africa	Americas	Asia	Europe	Oceania
2000	421	-	29.1	21.0	371	-
2005	539	-	18.7	25.9	494	-
2009	665	-	49.6	32.4	583	-
2010	776	-	46.2	59.3	671	-
2011	786	-	44.6	65.3	676	-





**Σχήμα 2.10:** Ποσοστό άμεσης κατανάλωση θερμότητας από βιομάζα ανά ήπειρο για το έτος 2011 [27].

### 2.1.2 Τύποι και δυναμικό βιομάζας στην Ελλάδα

Συμφώνα με το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ), ως δυναμικό βιομάζας μπορεί κανείς να θεωρήσει την απολήψιμη ποσότητα φυτικών, δασικών υλών, ζωικών και αστικών λυμάτων, υποπροϊόντων βιομηχανικής επεξεργασίας ή δημοτικών στερεών απορριμμάτων [32]. Η Ελλάδα, λόγω κυρίως της αγροτικής της ανάπτυξης και των μεγάλων δασικών εκτάσεων που διαθέτει, χρησιμοποιεί ως κύριο βιοκαύσιμο τα αγροτικά και τα δασικά υπολείμματα, με την πλειοψηφία αυτών να καταλήγουν για την παραγωγή θερμότητας στον οικιακό τομέα. Σύμφωνα με τους κανόνες διαχείρισης των δασών που έχουν θεσπιστεί στη χώρα, οι δασικές εκτάσεις που είναι διαθέσιμες για συγκομιδή αντιστοιχούν στο 55% της ετήσιας αύξησης των δασικών εκτάσεων, με το υπόλοιπο 45% να παραμένει για τη βελτίωση και την αύξηση των δασικών αποθεμάτων. Όμως, εξαιτίας της μειωμένης ζήτησης στην αγορά και της ανομοιόμορφης εκμετάλλευσης, το 46% από το 55%, που διατίθεται προς συγκομιδή, παραμένει ανεκμετάλλευτο στα δάση σε μορφή φύλλων, φλοιών, κορμών, ριζών κ.α. Αυτές οι ποσότητες που μένουν ανεκμετάλλευτες, καθώς και η νέα υπό ανάπτυξη αγορά στερεών βιοκαυσίμων, δημιουργούν κατάλληλες συνθήκες για περαιτέρω εκμετάλλευση στον τομέα της ενέργειας και της χρήσης τους στα αστικά

κέντρα [33]. Κατηγοριοποιώντας τις πηγες βιομάζας και το δυναμικό τους, οι βασικότερες είναι:

- **Δασικά ξύλα**

Τα δάση αποτελούν την κυριότερη πηγή ξυλώδους βιομάζας στην Ελλάδα. Ο μέσος ετήσιος παραγόμενος όγκος καυσόξυλων φτάνει τα 470,000 m<sup>3</sup>, από τα οποία τα 132,000 m<sup>3</sup> συλλέγονται υπό την επίβλεψη της δασολογικής υπηρεσίας, τα 285,000 m<sup>3</sup> από δασικούς συνεταιρισμούς και 53,000 m<sup>3</sup> από ιδιωτικούς φορείς. Στους 470,000 m<sup>3</sup> προστίθενται και 350,000 m<sup>3</sup>, που συλλέγονται από πληθυσμούς που ζουν κυρίως σε ορεινές περιοχές, για να καλύψουν τις ενεργειακές τους ανάγκες. Οπότε, το συνολικό ετήσιο δυναμικό σε καυσόξυλα αυτήν τη στιγμή είναι 820,000 m<sup>3</sup> και εισάγονται 200,000 τόνοι για να καλυφθούν πλήρως οι ενεργειακές ανάγκες σε αυτόν τον τομέα [33].

- **Παραπροϊόντα από βιομηχανίες επεξεργασίας ξύλου.**

Οι βιομηχανίες επεξεργασίας ξύλου αποτελούν βασική πηγή υπολειμμάτων ξύλου, τα οποία προσφέρονται είτε για τη χρήση τους εντός της βιομηχανίας για κάλυψη εσωτερικών αναγκών, είτε για θέρμανση χώρων. Από τα 36 εργοστάσια επεξεργασίας ξύλου που καταγράφηκαν από το ΚΑΠΕ, υπολογίστηκε ότι η εγκατεστημένη θερμική ισχύς φτάνει τα 115 MWth και η ετήσια θερμική κατανάλωση υπολογίζεται σε 136,320 MWh [33].

- **Συσσωματώματα**

Τα συσσωματώματα "Pellet" είναι προϊόν σχετικά νέο στην ελληνική αγορά. Η χρήση τους ξεκίνησε τα τελευταία 10 χρόνια και χρησιμοποιούνται κυρίως για να καλύψουν ανάγκες στον τομέα της θέρμανσης. Η μορφή που παίρνει το καύσιμο μετά την επεξεργασία του, το έχει καταστήσει ιδανικό για τις αστικές περιοχές, λόγω της εύκολης διαχείρισης του και της καλής αποδοτικότητας του. Το 2008 η παραγωγή ανήλθε σε μόνο 28,000 τόνους, επειδή σαν καύσιμο ήταν ακόμα σχετικά άγνωστο και επειδή έως το 2011 η καύση βιομάζας σε οικιακό επίπεδο ήταν απαγορευμένη σε Αθήνα, Θεσσαλονίκη και Σαλαμίνα. Μετά το 2011 η κατανάλωση συσσωματωμάτων



αυξήθηκε ραγδαία, κυρίως λόγω αναζήτησης νέων μορφών θέρμανσης, εξαιτίας της αύξησης των τιμών του πετρελαίου [33, 34].

- **Γεωργικές καλλιέργειες**

Οι συνολικά διαθέσιμες γεωργικές εκτάσεις στον Ελλαδικό χώρο υπολογίστηκαν από τη Στατιστική Υπηρεσία σε 3.8 εκ. εκτάρια, όπου το 56% αυτής της έκτασης έχει καλυφτεί με σιτηρά και 30% με άλλου είδους καλλιέργειες. Ειδικότερα, το άχυρο που παράγεται μόνο από τα σιτηρά και το οποίο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στον τομέα της βιοενέργειας υπολογίστηκε από το ΚΑΠΕ σε 2.2 εκ τόνους ετησίως, ποσότητα που αντιστοιχεί σε συνολικό ενεργειακό περιεχόμενο 9,860 GWh. Η χρήση του σίτου, είναι ακόμα περιορισμένη στον τομέα της κτηνοτροφίας για την παραγωγή τροφής ή λιπασμάτων. Έχει υπολογιστεί ότι τα ετήσια γεωργικά και δασικά υπολείμματα μαζί με τις ενεργειακές καλλιέργειες είναι ικανές να καλύψουν το 40% της ετήσιας κατανάλωσης της χώρας σε πετρέλαιο. Ο συνολικός όγκος της βιομάζας που προέρχεται από το γεωργικό κλάδο (σιτηρά, καπνό, βαμβάκι, καλαμπόκι κ.α.) αγγίζει τους 7.5 εκ. ξηρούς τόνους ετησίως (Σχήμα 2.11 αριστερά), με το θεωρητικό τους για παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας να ανέρχεται σε 27.7 TWh [33, 35].

- **Άλλα γεωργικά υπολείμματα**

Οι βασικές αγρο-βιομηχανίες δραστηριοποιούνται στους τομείς εκμετάλλευσης του ρυζιού, του βαμβακιού, του καλαμποκιού, φρούτων, βιομηχανίες παραγωγής ελαιολάδου, παραγωγής ελαιοπυρήνα και πάρα πολλές άλλες. Η βιομηχανία επεξεργασίας της ελιάς αποτελεί σημαντική πηγή υπολειμμάτων του γεωργικού κλάδου. Έχει υπολογιστεί για το 2013 (ΚΑΠΕ) ότι το δυναμικό των 2,200 εγκαταστάσεων επεξεργασίας της ελιάς, παρήγαγαν 360,000 τόνους ελαιοπυρήνα ως υπόλειμμα. Από αυτούς, οι 200,000 τόνοι χρησιμοποιήθηκαν από τις ίδιες τις βιομηχανίες, για να καλύψουν τις ενεργειακές τους ανάγκες και οι υπόλοιποι 160,000 τόνοι παρέμειναν διαθέσιμοι για περαιτέρω εκμετάλλευση [33].

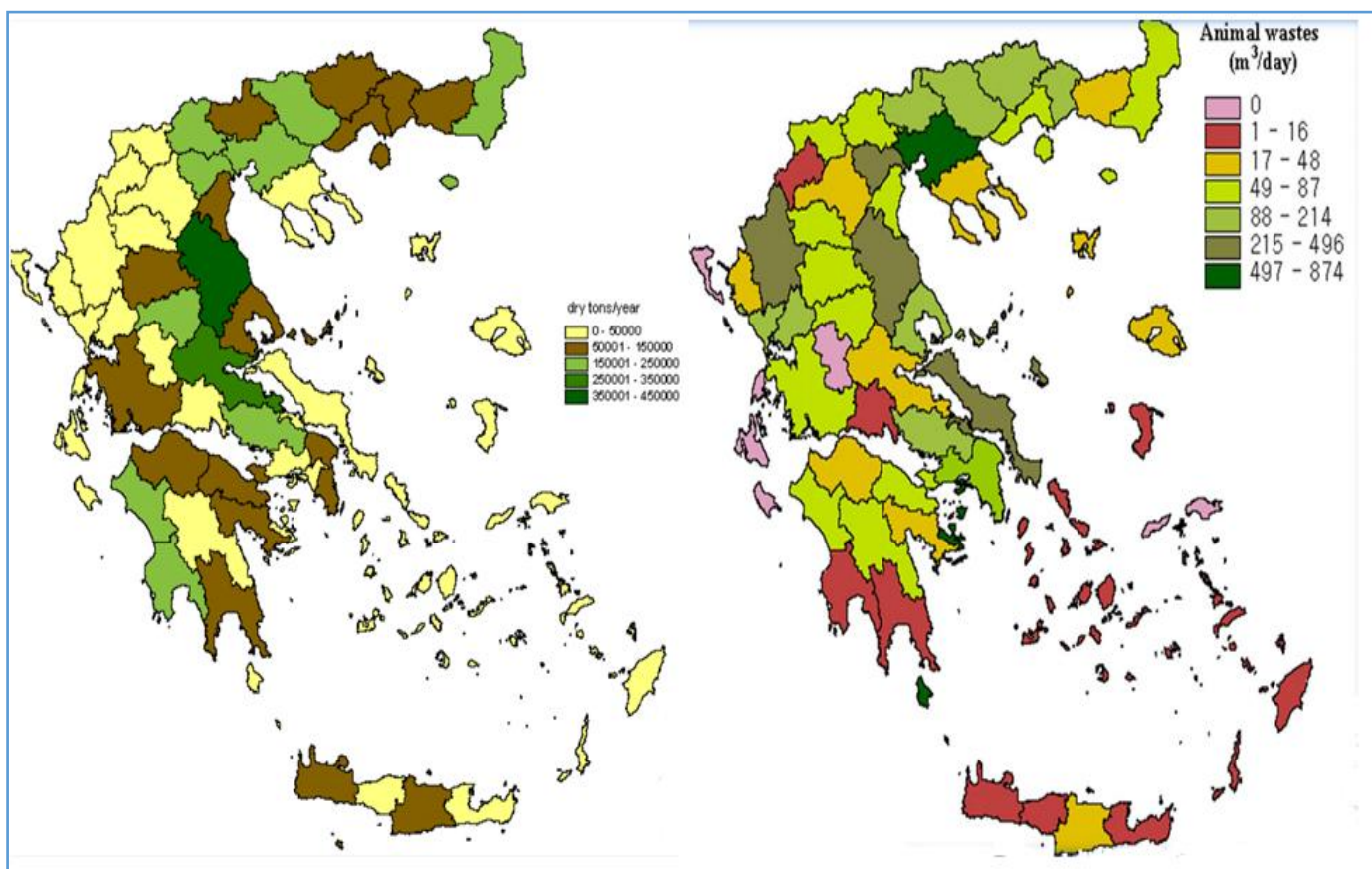
- **Βιοκαύσιμα**

Το 2004, η κατανάλωση καυσίμου στον τομέα της μεταφοράς ανήλθε σε 2 εκ. τόνους πετρελαίου και 3.8 εκ. τόνους βενζίνης, αλλά με μηδαμινή παραγωγή ή χρήση βιοκαυσίμων. Το 2005 ήταν η χρονιά έναρξης του πρώτου εργοστασίου παραγωγής βιοντίζελ και βιοαιθανόλης, με δυναμικό 46,976 τόνους/έτος και 120,400 τόνους/έτος, αντίστοιχα. Έως το 2010, το δυναμικό της χώρας σε παραγωγή υγρών βιοκαυσίμων ανήλθε σε 538,000 τόνους/έτος, ενώ η απαιτούμενη ποσότητα για εσωτερική κατανάλωση, σύμφωνα με τη νομοθεσία, ήταν 148,407 τόνοι. Οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή ήταν 70-80% εισαγόμενα έλαια και το 30% από εγχώριας παραγωγής έλαια [36].

Η παραγωγή βιοαερίου γίνεται αποκλειστικά από 18 εγκαταστάσεις σε ολόκληρη την Ελλάδα. Οι 12 από αυτές εκμεταλλεύονται τα ΑΣΑ που καταλήγουν σε χώρους υγειονομικής ταφής και αστικά λύματα που παράγουν οι μεγάλες πόλεις. Η συνολική εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς τους είναι στα 43 MWe και η συνολική παραγωγή βιοαερίου φτάνει τα 161 εκ. m<sup>3</sup>/έτος. Άλλες 4 εγκαταστάσεις εκμεταλλεύονται γεωργικές μονάδες για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με εγκατεστημένη ισχύ 1.73 MWe και άλλες 2 μονάδες, οι οποίες εκμεταλλεύονται τις βιομηχανίες τροφής για την παραγωγή θερμότητας με εγκατεστημένη ισχύ 1.18 MWth. Η συνολική παραγωγή βιοαερίου από τις 6 εγκαταστάσεις φτάνει τα 6.4 εκ. m<sup>3</sup>/έτος [37].

- **Ζωικά απόβλητα**

Τα ζωικά απόβλητα/παραπροϊόντα από τα διάσπαρτα βουστάσια, χοιροστάσια και πτηνοτροφεία θα μπορούσαν να αποτελέσουν μια από τις βασικότερες πηγές βιομάζας. Υπολογίζεται ότι σε ολόκληρη τη χώρα παράγονται γύρω στους 17.5 εκ. τόνους/έτος (Σχήμα 2.11 δεξιά) ζωικών αποβλήτων, των οποίων η θεωρητική αποθηκευμένη ισχύς φθάνει τα 370 MW [37]. Το παραγόμενο καύσιμο είναι το βιοαέριο, το οποίο απολαμβάνει μεγάλη εμπορική αξία, χάρη στο ευρύ φάσμα χρήσης του. Είναι ικανό να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά σε λέβητες, σε μονάδες παραγωγής θερμότητας/ηλεκτρικής ενέργειας, να διοχετευτεί στο δίκτυο φυσικού αερίου και να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο στον τομέα των μεταφορών. Αν και η Ελλάδα διαθέτει πολύ υψηλό δυναμικό, δεν έχει κατασκευάσει ακόμα καμία μονάδα η οποία να εκμεταλλεύεται τα ζωικά απόβλητα, ώστε να παράξει φυσικό αέριο [38].



**Σχήμα 2.11:** Αριστερός χάρτης η ετήσια παραγωγή βιομάζας από γεωργικά απόβλητα σε τόνους/έτος για κάθε Νομό/Δεξής χάρτης ετήσια παραγωγή ζωικών αποβλήτων σε κυβικά μέτρα/μέρα για κάθε Νομό [37].

### 2.1.3 Δημοτικά-αστικά απόβλητα

Τα Δημοτικά-Αστικά απόβλητα ήταν, είναι και θα είναι ένα αναπόφευκτο παραπροϊόν της κοινωνίας. Αποτελούν ίσως μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις με τις οποίες θα έρθει αντιμέτωπη η επόμενη γενιά, όσον αφορά την εύρεση λύσης στο μεγάλο πρόβλημα συλλογής και διαχείρισης των τεράστιων ποσοτήτων που παράγονται. Η τρέχουσα παγκόσμια παραγωγή σε Δημοτικά-αστικά απόβλητα είναι περίπου 1.3 δις τόνους ετησίως, και προβλέπεται να φτάσει τους 2.2 δις τόνους έως το 2025, ποσό που αντιστοιχεί κατά μέσο όρο σε 1.2 κιλά ανά άτομο τη μέρα. Βέβαια, ο ρυθμός παραγωγής τους δεν είναι ο ίδιος παντού. Επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως είναι η οικονομική ανάπτυξη, ο βαθμός εκβιομηχάνισης, οι καθημερινές συνήθειες της κοινωνίας και το τοπικό κλίμα της

κάθε ηπείρου ή χώρας. Έχει παρατηρηθεί, ότι όσο μεγαλύτερη είναι η οικονομική ανάπτυξη, η εξέλιξη της τεχνολογίας και το ποσοστό αστικοποίησης, τόσο μεγαλύτερη είναι η παραγωγή των Αστικών αποβλήτων [26].

Ως Δημοτικά-Αστικά στερεά απόβλητα περιγράφονται τα ανθρωπογενούς κυρίως προέλευσης υλικά στερεής- ημιστερεής μορφής, τα οποία στην παρούσα φάση είναι πλέον άχρηστα και ανεπιθύμητα για τον κάτοχο τους. Σύμφωνα με πρόσφατες αποφάσεις της ΕΕ, ως ΑΣΑ θεωρούνται τα οικιακά απόβλητα και άλλα απόβλητα παρόμοιας σύνθεσης. Σύμφωνα με αυτόν τον ορισμό, στα ΑΣΑ δε συμπεριλαμβάνονται 3 βασικές κατηγορίες, τα επικίνδυνα απόβλητα (βιομηχανικά, μολυσματικά), τα αδρανή (κυρίως προϊόντα οικοδομής), και οι ιλύες, για τις οποίες έχει προβλεφτεί χωριστή συλλογή και επεξεργασία. Σύμφωνα με τις παραπάνω πληροφορίες, έχει υπολογιστεί ότι τα ΑΣΑ αποτελούνται κατά 80% από οικιακής προέλευσης απόβλητα [39].

Πιο αναλυτικά τα Αστικά Στερεά Απόβλητα αποτελούνται από :

- **Ζυμώσιμα:** αυτή η ομάδα περιλαμβάνει τα υπολείμματα της κουζίνας (τροφές) και του κήπου (γρασίδι, φύλλα κ.α.).
- **Χαρτί:** περιλαμβάνονται όλα τα είδη χαρτικών, που προέρχονται κυρίως από συσκευασμένα προϊόντα και έντυπο υλικό.
- **Μέταλλα:** περιλαμβάνονται όλα τα μεταλλικά υλικά, που καταλήγουν στον κάδο των απορριμμάτων. Διαχωρίζονται στα σιδηρούχα, τα οποία έχουν μαγνητικές ικανότητες και στα μη σιδηρούχα μέταλλα, κυρίως αλουμίνιο.
- **Γυαλί:** οι γυάλινες συσκευασίες είναι χημικά ουδέτερες και συνήθως διαχωρίζονται σε λευκό, καφέ και πράσινου χρώματος.
- **Πλαστικό:** χαρακτηριστικό αυτής της ομάδας αποτελεί η έντονη ανομοιογένεια, εξαιτίας των πολλών χρησιμοποιούμενων πολυμερών (π.χ. PVC, PET, ABS).
- **Δέρμα – Ξύλο – Λάστιχο – Υφάσματα**
- **Αδρανή:** στην ομάδα αυτή περιλαμβάνονται τα χημικώς ανενεργά υλικά, που καταλήγουν στα οικιακά απορρίμματα (π.χ. χρώματα, πέτρες) και τα ακίνδυνα απόβλητα, που δεν υφίστανται σχεδόν καμία φυσική, χημική ή βιολογική μετατροπή [40, 41].

### **Παραγωγή αποβλήτων ανά ήπειρο**

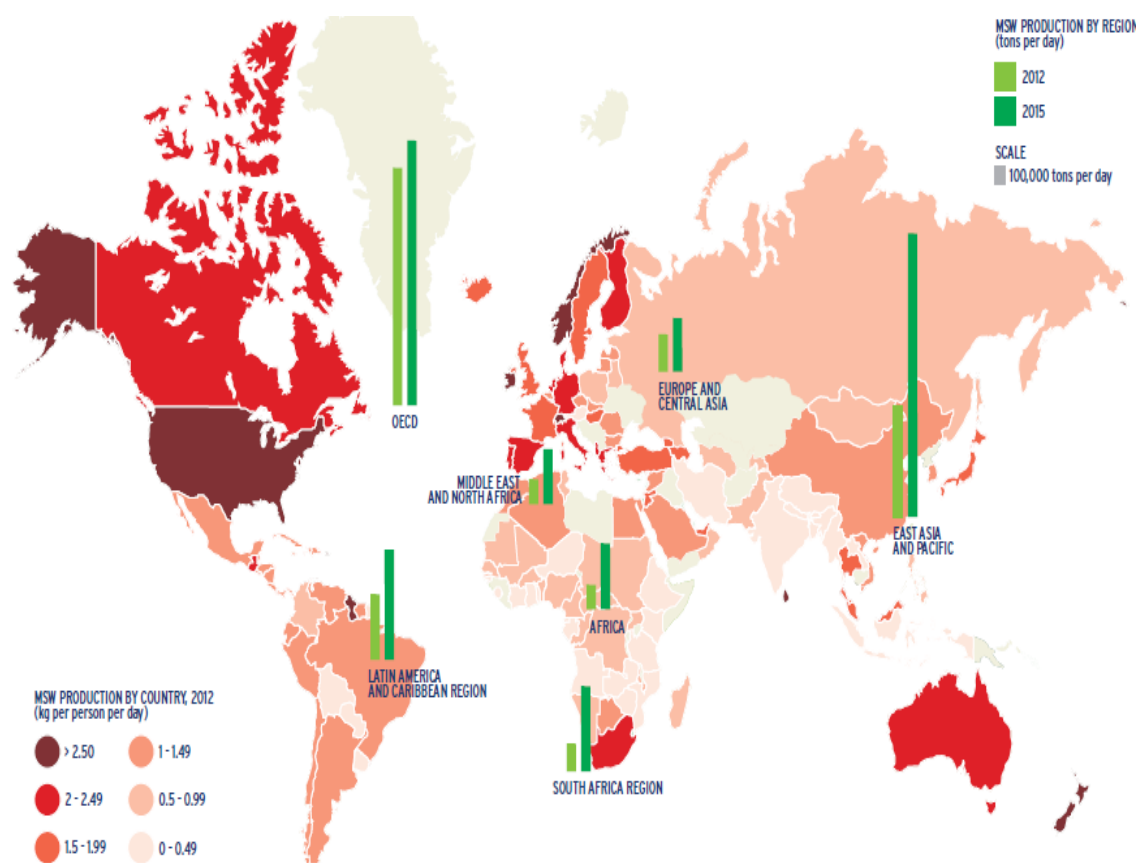
Η παραγωγή αποβλήτων μεταβάλλεται, ανάλογα με τις κοινωνικές/κλιματικές συνθήκες που επικρατούν ανά ήπειρο/χώρα. Ξεκινώντας από την Υποσαχάρια Αφρική, δεδομένα δείχνουν ότι η παραγωγή στερεών αποβλήτων υπολογίζεται σε 62 εκ. τόνους ετησίως περίπου. Η κατά κεφαλήν παραγωγή αποβλήτων είναι χαμηλότερη από άλλες περιοχές, αλλά με ευρύ φάσμα που ξεκινάει από 0.09 ως τα 3 κιλά αποβλήτων ανά άτομο/μέρα. Η Βόρεια Αφρική και η Μέση Ανατολή παράγουν 63 εκ. τόνους/έτος στερεών αποβλήτων, με μέσο όρο κατά κεφαλήν παραγωγή 1.1 κιλά τη μέρα ανά άτομο.

Στην Ασιατική ήπειρο, συγκριτικά με την Αφρικάνικη, οι παραγόμενες ποσότητες αυξάνονται αισθητά. Η ετήσια παραγωγή στην Ανατολική Ασία και στην ευρύτερη περιοχή του Ειρηνικού είναι 270 εκ. τόνοι/έτος. Η ποσότητα αυτή επηρεάζεται κυρίως από την τεράστια παραγωγή αποβλήτων στην Κίνα, η οποία αποτελεί το 70% της συνολικής ποσότητας. Η κατά κεφαλήν παραγωγή σε αυτές τις περιοχές κυμαίνεται από 0.44 έως 4.3 κιλά τη μέρα με μέσο όρο 0.95 κιλά. Η Κεντρική και Νότια Ασία παράγει μικρότερη ποσότητα αποβλήτων, σε σχέση με την Ανατολική Ασία, με 93 εκ. τόνους/έτος και 70 εκ. τόνους/έτος αντίστοιχα. Η κατά κεφαλήν παραγωγή στην Κεντρική Ασία έχει μέσο όρο 1.1 κιλά τη μέρα ανά άτομο, ενώ στον Νότο 0.45 κιλά τη μέρα ανά άτομο.

Για τη Λατινική Αμερική και την Καραϊβική η ετήσια παραγωγή φτάνει τους 160 εκ. τόνους/έτος, με τις κατά κεφαλήν ποσότητες να κυμαίνονται από 0.1 έως 14 κιλά/άτομο τη μέρα. Ο λόγος του υψηλού εύρους τιμών οφείλεται στο ότι τα νησιά της Καραϊβικής έχουν πολύ ανεπτυγμένη τουριστική βιομηχανία, εκτοξεύοντας έτσι την παραγωγή στα ύψη. Ωστόσο, ο μέσος όρος κυμαίνεται στα 1.1 κιλά τη μέρα ανά άτομο.

Τέλος, οι χώρες που ανήκουν στον Οργανισμό Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (Βόρεια Αμερική, Ευρωπαϊκή Ένωση, Χιλή, Αυστραλία, Ιαπωνία) παράγουν το μεγαλύτερο ποσοστό στερεών αποβλήτων, με ποσότητες που φτάνουν τους 572 εκ. τόνους ετησίως, και με κατά κεφαλήν παραγωγή 2.2 κιλά τη μέρα ανά άτομο. Στο χάρτη (Σχήμα 2.12) που ακολουθεί παρουσιάζονται οι ποσότητες αποβλήτων που παράγονται κάθε μέρα ανά ήπειρο και η κατά κεφαλήν παραγωγή ανά κράτος [42].

Πρώτη σε κατάταξη χώρα στην παραγωγή ΑΣΑ είναι η Κίνα, με ετήσια παραγωγή 300 εκ. τόνους, ενώ δεύτερη θέση έχουν οι ΗΠΑ με 250 εκ. τόνους. Στο παρακάτω γράφημα (Σχήμα 2.13) παρατηρούμε την ανοδική πορεία της συνολικής παραγωγής και την κατά κεφαλήν παραγωγή ΑΣΑ στις ΗΠΑ από το 1960 έως το 2012. Τρίτη χώρα σε παραγωγή είναι η Ινδία, με 225 εκ. τόνους ετησίως [43].

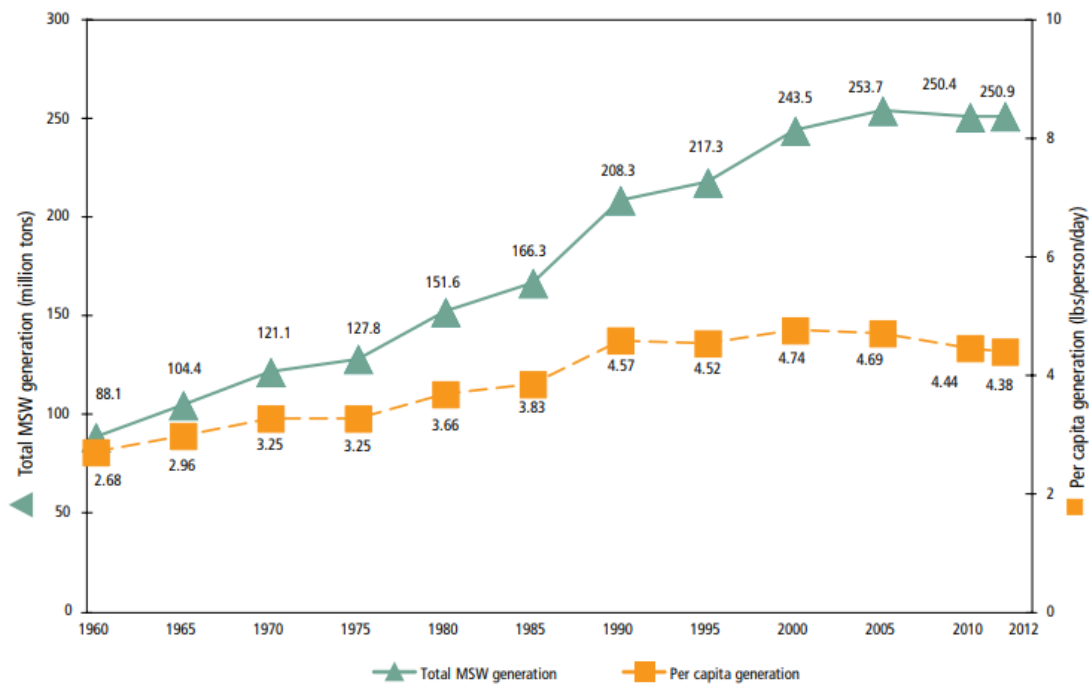


Source: TheEconomist, 2012

**Σχήμα 2.12:** Ημερήσια παραγωγή ΑΣΑ ανά ήπειρο (πράσινες στήλες) και κατά κεφαλήν παραγωγή για κάθε κράτος [26].



Figure 1. MSW Generation Rates, 1960 to 2012



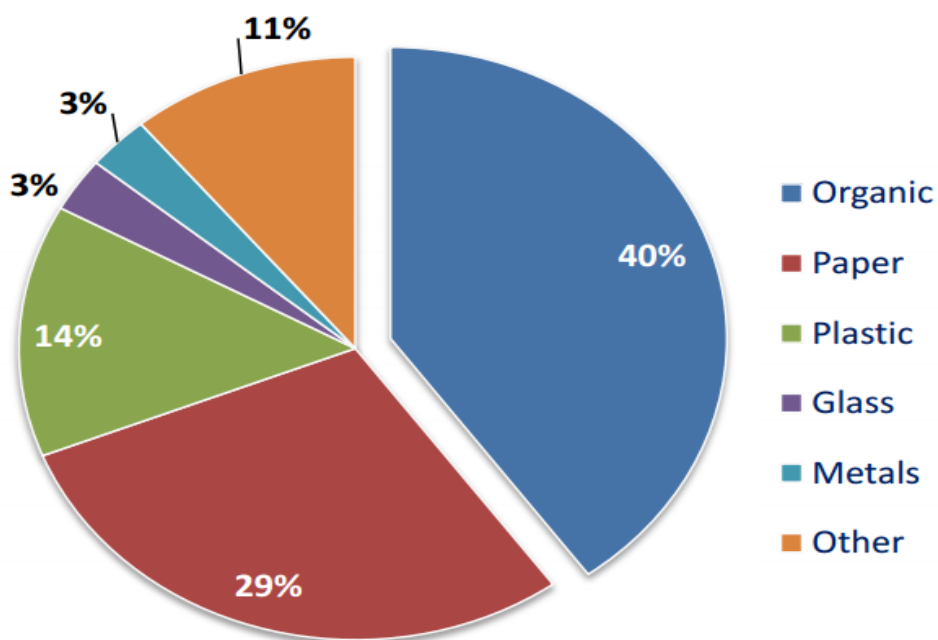
**Σχήμα 2.13:** Η αύξηση της παραγωγής ΑΣΑ από το 1960 έως το 2012 σε εκ. τόνους (πράσινο) και η ποσότητα που αντιστοιχεί ανα άτομο σε λίβρες/άτομο/μέρα (πορτοκαλί) [44].

### Παραγωγή αποβλήτων στην Ελλάδα

Η παραγωγή ΑΣΑ στην Ελλάδα το 1997 ήταν περίπου 3.9 εκ. τόνοι/έτος, ενώ το 2011 ανήλθε σε 5.5 εκ. τόνους/έτος, με μέση παραγωγή ανά κάτοικο να ανέρχεται στα 490 κιλά/έτος. Η περιφέρεια της Αττικής συνεισφέρει το 40% του συνολικού ποσού των ΑΣΑ που παράγονται στον Ελλαδικό χώρο, με παραγωγή 6,000 τόνους τη μέρα. Δεύτερη στην κατάταξη είναι η Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας, με την παραγόμενη ποσότητα να φτάνει το 16% της συνολικής. Ωστόσο, έως σήμερα δεν έχουν γίνει σημαντικά βήματα για τη σωστή διαχείριση των παραγόμενων ποσοτήτων, καθώς το 80% καταλήγει σε ΧΥΤΑ και το 20% ανακυκλώνεται [45-47]. Παρακάτω (Πίνακας 2.3) παρουσιάζεται αναλυτικά η παραγωγή των ΑΣΑ στις περιφέρειες της Ελλάδας για το έτος 2011, ενώ στο Σχήμα 2.14 παρουσιάζεται η σύνθεση των αστικών στερεών αποβλήτων στην Ελλάδα για το έτος 2009.

**Πίνακας 2.3:** Χωρική ανάλυση της παραγωγής ΑΣΑ για το 2011 [48].

ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑ	Διάθεση στο έδαφος		Αν/ση Υλικών και Συσκευασιών		Ανάκτηση Οργανικών		ΑΣΑ	ΠΟΣΟΣΤΟ ΠΛΗΘΥΣΜΟΥ <sup>2</sup>
	ΧΥΤΑ	ΧΑΔΑ	ΚΔΑΥ	Πανελληνίας Εμβέλεια <sup>3</sup>	ΕΜΑΚ	ΑΛΛΑ <sup>4</sup>		
Αν. Μακεδονία & Θράκη	128.736	88.591	3.286	31.998		5.955	258.567	5,57
Κεντρική Μακεδονία	689.372	24.139	35.748	99.327		18.487	867.072	17,28
Δυτική Μακεδονία	120.294		4.224	14.884		2.770	142.172	2,59
Ήπειρος	65.840		2.921	17.700		3.294	89.755	3,08
Θεσσαλία	318.447		17.786	38.540		7.173	381.946	6,70
Ιόνιοι Νήσοι	110.112	1.591	6.667	11.846	4.696	2.205	137.117	2,06
Δυτική Ελλάδα	209.571	25.008	9.329	35.764		6.656	286.328	6,22
Στερεά Ελλάδα	212.786	24.334	13.857	28.785		5.358	285.120	5,01
Αττική	1.920.964	2.089	121.913	201.390	30.205	37.483	2.314.044	35,03
Πελοπόννησος	12.040	67.592	12.327	30.469		5.671	128.099	5,30
Βόρειο Αιγαίο	47.723	15.183	174	10.605		1.974	75.659	1,84
Νότιο Αιγαίο	164.181	17.109	7.768	18.490		3.441	210.990	3,22
Κρήτη	304.137	38	18.791	35.143	33.238	6.541	397.888	6,11
<b>Σύνολο χώρας</b>	<b>4.304.203</b>	<b>265.674</b>	<b>254.791</b>	<b>574.942</b>	<b>68.139</b>	<b>107.008</b>	<b>5.574.757</b>	<b>100</b>
	<b>4.569.877</b>		<b>829.733</b>		<b>175.147</b>			



**Σχήμα 2.14:** Σύνθεση αστικών στερεών αποβλήτων στον Ελλαδικό χώρο [49].



Επί του παρόντος, η πιο ανεπτυγμένη και μαζικά εμπορεύσιμη τεχνολογία παραγωγής ενέργειας από ΑΣΑ, είναι η καύση για τη συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας. Όμως, οι τεχνολογίες συνεχώς εξελίσσονται. Η ακόλουθη ταξινόμηση, παρουσιάζει τις πιθανές μεθόδους που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ενέργειας από τα στερεά απόβλητα.

- **Την Θερμο-Χημική επεξεργασία**

- **Αποτέφρωση:** Εισαγωγή μικτών αποβλήτων σε καυστήρες υψηλής θερμοκρασίας ( $<850\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), με σκοπό τη μείωση του όγκου των αποβλήτων και την παραγωγή ενέργειας σε εγκαταστάσεις συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας.
- **Συν-καύση:** Προβλέπει την καύση των ΑΣΑ σε συνδυασμό με άλλο καύσιμο (άνθρακα, βιομάζα).
- **Πυρόλυση:** Προβλέπει τη θέρμανση των αποβλήτων απουσία οξυγόνου, με αποτέλεσμα τα υλικά να αποσυντίθεται χωρίς να καίγονται, παράγοντας ως καύσιμο συνθετικό αέριο (Syngas).
- **Θερμική αεριοποίηση:** Η διαδικασία αυτή μετατρέπει υλικά πλούσια σε άνθρακα, μέσω μιας ενδόθερμης θερμικής διεργασίας, σε αέριο υψηλής απόδοσης (αέριο σύνθεσης). Αν και σαν μέθοδος δεν έχει αναπτυχθεί στον ίδιο βαθμό με τη μέθοδο της αποτέφρωσης, θεωρείται ανώτερη λόγω της υψηλότερης απόδοσης και φιλικότητας προς το περιβάλλον [26, 50, 51].

- **Βιο-Χημική μετατροπή**

Η ενέργεια των αποβλήτων εξάγεται με τη χρήση βιο-χημικών διεργασιών, λαμβάνοντας το ενεργειακό κομμάτι της πρωτογενούς πηγής και μετατρέποντάς την σε ένα ενεργειακά πλούσιο καύσιμο, το οποίο θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες περιπτώσεις. Οι βιοχημικές διεργασίες αντίστοιχα είναι.

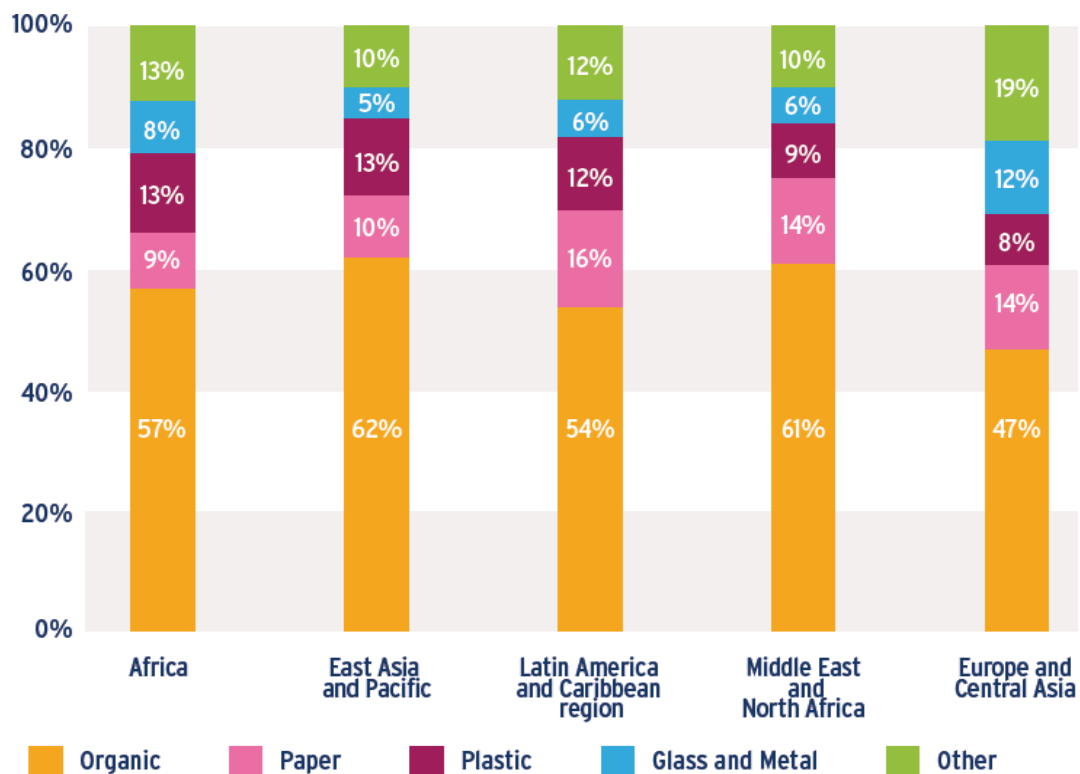
- **Παραγωγή βιοαιθανόλης:** Το οργανικό μέρος των στερεών αποβλήτων περνά από ξεχωριστά στάδια υδρόλυσης, ζύμωσης και απόσταξης, με αποτέλεσμα την παραγωγή του καυσίμου.
- **Αναερόβια χώνευση:** Είναι μία βιολογική μέθοδος, η οποία με τη χρήση ποικίλων ομάδων μικρο-οργανισμών και με την απουσία οξυγόνου μετατρέπει το οργανικό μέρος των αποβλήτων σε βιοαέριο.

- **Αναερόβια χώνευση σε ΧΥΤΑ:** Το βιοαέριο είναι δυνατόν να παραχθεί στους ΧΥΤΑ, λόγω της φυσικής αποσύνθεσης των αποβλήτων και πραγματοποιείται σε 5 φάσεις. Απαιτούνται ειδικές εγκαταστάσεις για την απευθείας συλλογή του από τους χώρους ταφής [26, 50].

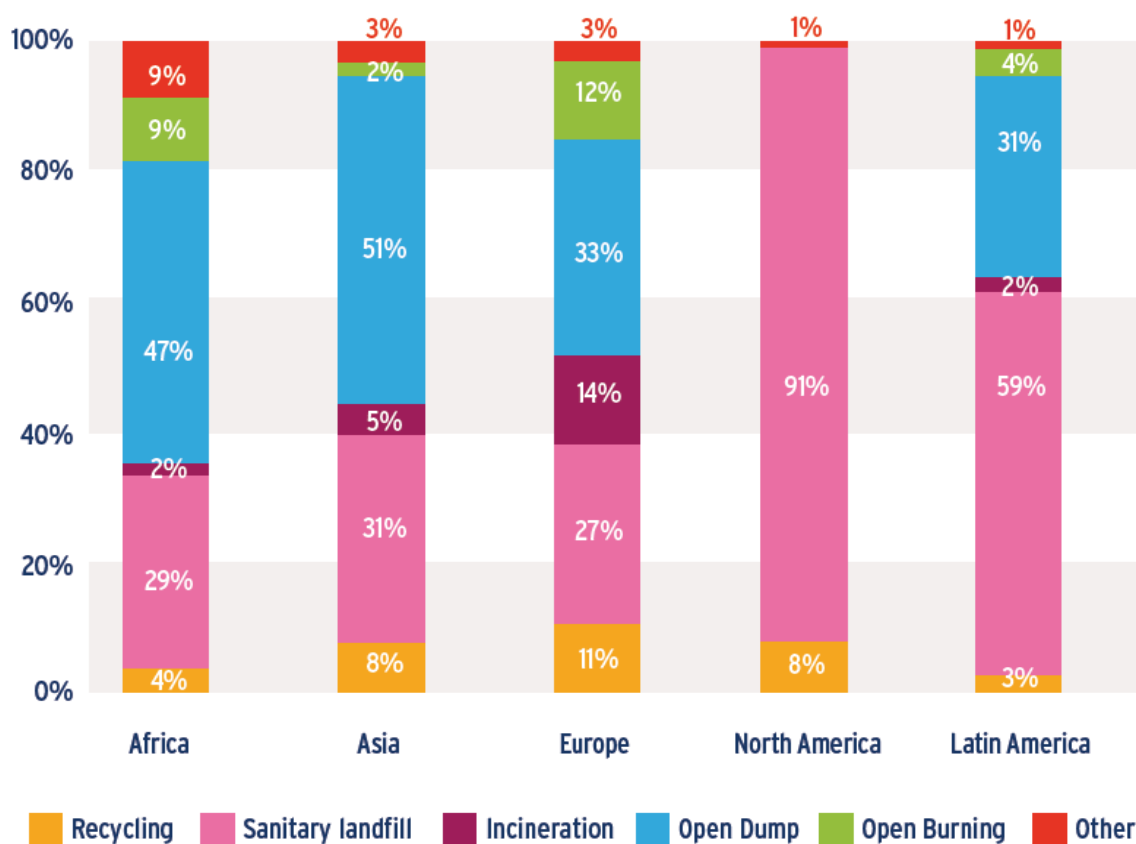
Η Ελλάδα στην παρούσα φάση, εκτός από την Αναερόβια χώνευση σε ΧΥΤΑ, δε χρησιμοποιεί καμία από τις παραπάνω ανεπτυγμένες μεθόδους ώστε να λύσει είτε ένα μέρος της ενεργειακής της ανάγκης είτε το πρόβλημα της ανάγκης για συνεχή εύρεση νέων αποθηκευτικών χώρων ΑΣΑ. [37, 52]

Σε παγκόσμια κλίμακα, η ανάγκη για εύρεση εναλλακτικών λύσεων στο πρόβλημα των αποβλήτων βρίσκεται σε προχωρημένα στάδια. Οι κινητήριοι λόγοι για την εύρεση άμεσων λύσεων είναι ο κλιματικός-οικολογικός παράγοντας, η συνεχής ανάγκη εύρεσης νέων χώρων υγειονομικής ταφής των αποβλήτων και η ανάγκη χρήσης νέων βιώσιμων πηγών ενέργειας. Οι εγκαταστάσεις που διαχειρίζονται απόβλητα για παραγωγή ενέργειας έχουν πολλαπλασιαστεί τις τελευταίες τρεις δεκαετίες.

Η Κίνα είναι η μεγαλύτερη παραγωγός χώρα αποβλήτων και περιβαλλοντικής ρύπανσης. Μέχρι πρόσφατα, το σύνολο σχεδόν των Αστικών-Δημοτικών αποβλήτων κατέληγαν σε χώρους υγειονομικής ταφής. Η ανεξέλεγκτη ρύπανση και αυξανόμενη ανάγκη για παραγωγή/χρήση εναλλακτικών πηγών ενέργειας είχε ως αποτέλεσμα την ανέγερση 100 μονάδων παραγωγής ενέργειας από απόβλητα τα τελευταία 20 χρόνια, με στόχο να φτάσει τις 200 μονάδες έως το 2020, για τη βελτίωση της κατάστασης στην χώρας [53]. Χώρες όπως η Σιγκαπούρη, η Ταϊβάν και η Ιαπωνία έχουν επενδύσει σημαντικά στις τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας από απόβλητα, με χαρακτηριστικό παράδειγμα την Ιαπωνία η οποία εκμεταλλεύεται το 70% της συνολικής παραγωγής ΑΣΑ με εναλλακτικές μεθόδους. Οι ΗΠΑ βρίσκονται στη δεύτερη θέση της κατάταξης σε παραγωγή ΑΣΑ, με το 69% της παραγωγής να οδηγείται για υγειονομική ταφή. Έως σήμερα, οι ΗΠΑ διαθέτουν 87 εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας από απόβλητα, οι οποίες επεξεργάζονται 32 εκατομμύρια τόνους ετησίως [54, 55]. Στα διαγράμματα (Σχήματα 2.15 και 2.16) που ακολουθούν, παρουσιάζονται το ποσοστό του κάθε υλικού στο συνολικό μίγμα ΑΣΑ, και οι τρόποι επεξεργασίας τους για κάθε ήπειρο.

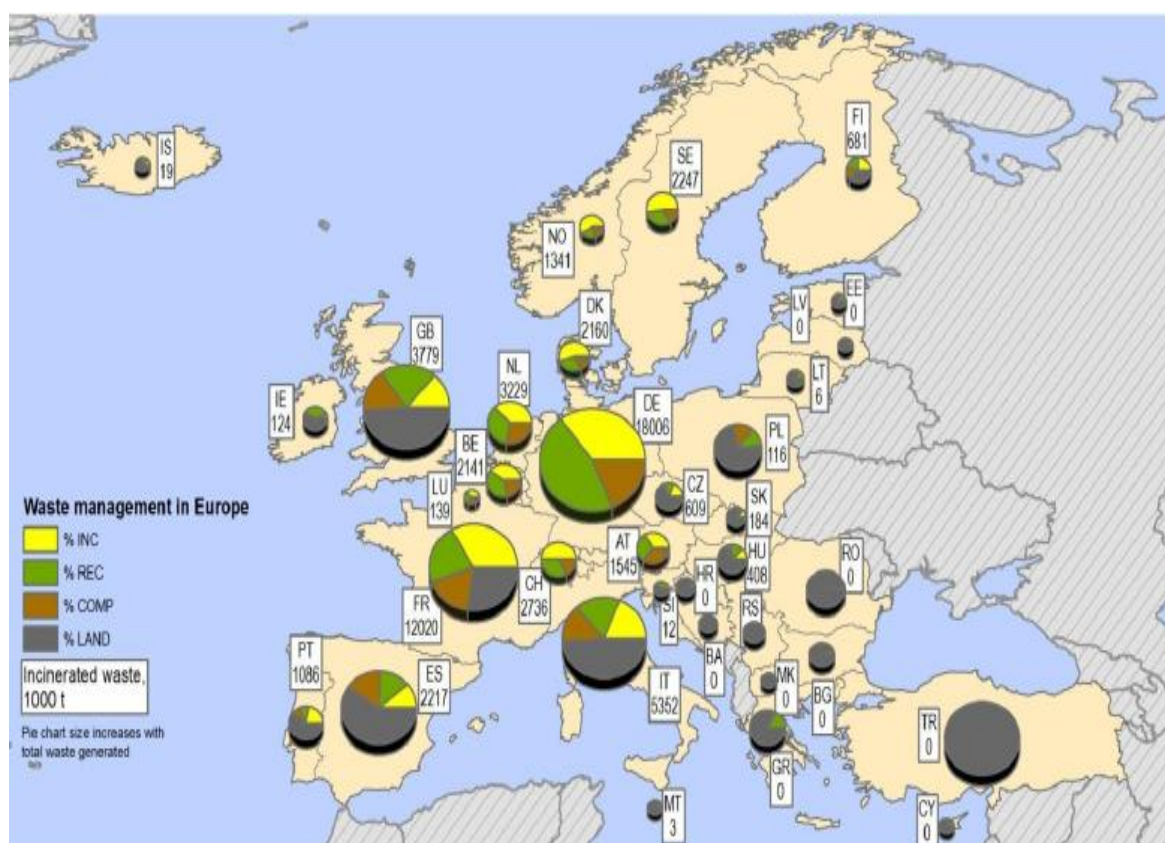


**Σχήμα 2.15:** Το ποσοστό του κάθε υλικού στο συνολικό μίγμα Αστικών Στερεών Αποβλήτων ανά ήπειρο [56].

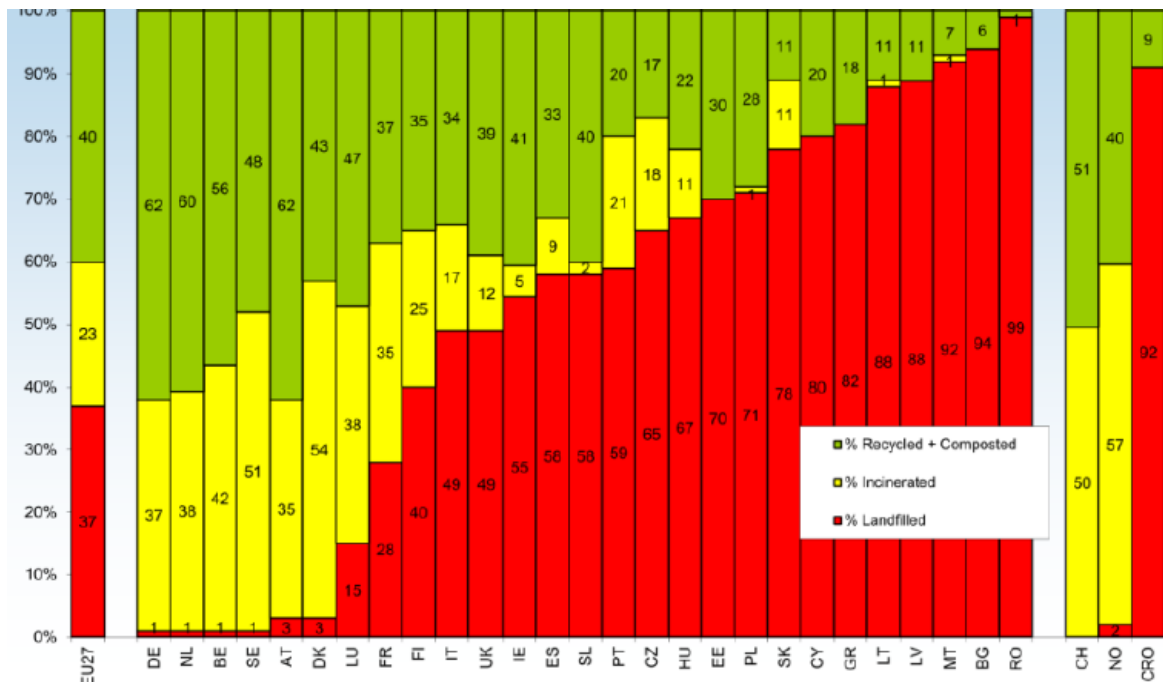


**Σχήμα 2.16:** Ποσοστό χρήσης διάφορων μεθόδων επεξεργασίας των Αστικών Στερεών Αποβλήτων ανά ήπειρο [56].

Στην ΕΕ υπάρχει μια ανομοιομορφία στην επιλογή των μεθόδων επεξεργασίας των στερεών αποβλήτων, με τα κράτη της βορειοδυτικής Ευρώπης να χρησιμοποιούν πιο εξειδικευμένες και αποτελεσματικότερες μεθόδους επεξεργασίας. Για παράδειγμα, χώρες όπως η Γερμανία, η Σουηδία και η Δανία έχουν υιοθετήσει οικολογικές μεθόδους διαχείρισης των αποβλήτων, με την πλειοψηφία των ποσοτήτων που παράγουν, είτε να ανακυκλώνεται, είτε να αποτεφρώνεται για παραγωγή ενέργειας, είτε να χρησιμοποιούνται για κομποστοποίηση. Αντιθέτως, τα κράτη των Βαλκανίων και περιμετρικά της Μεσογείου βρίσκονται σε πολύ χαμηλότερα επίπεδα, με την πλειοψηφία της παραγωγής τους να καταλήγει σε υπαίθριες εκτάσεις απόθεσης (Σχήματα 2.17, 2.18). Η Ελλάδα τοποθετείται στις τελευταίες θέσεις της Ευρωπαϊκής κατάταξης, διότι στέλνει το 80% της παραγωγής ΑΣΑ σε χώρους υγειονομικής ταφής.



**Σχήμα 2.17:** Τρόποι διαχείρισης στερεών αποβλήτων για κάθε χώρα μέλος της ΕΕ (Μέγεθος της πίτας συμβολίζει το μέγεθος της παραγωγής). Με κίτρινο χρώμα: (%) αποβλήτων που αποτεφρώνονται. Πράσινο: (%) ανακύκλωση. Καφέ: (%) κομποστοποίησης. Γκρι: (%) αποβλήτων που καταλήγει σε χώρους υγειονομικής ταφής [57].



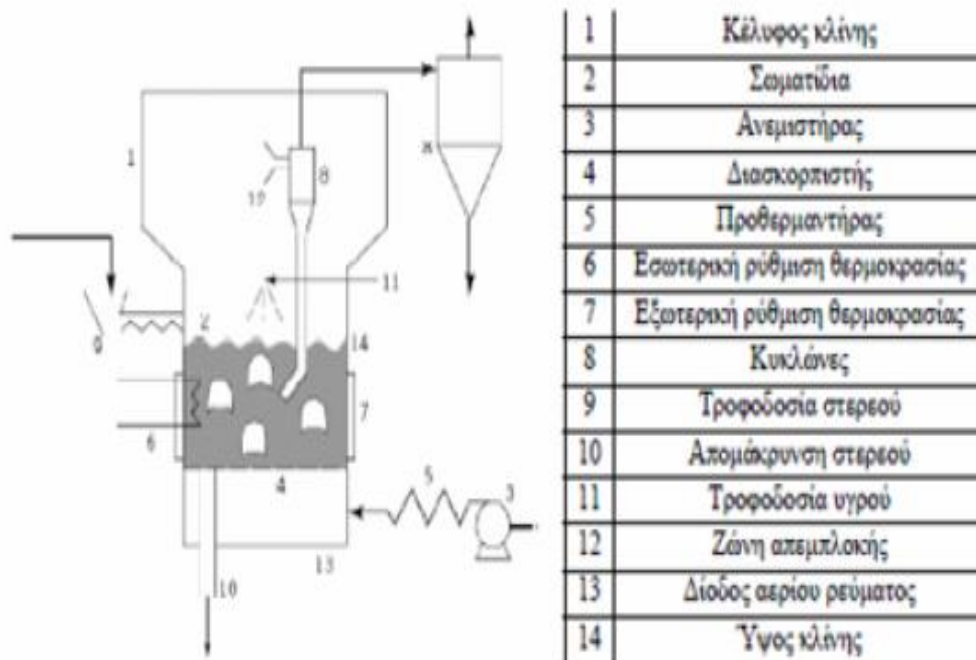
**Σχήμα 2.18:** Μέθοδοι διαχείρισης στερεών αποβλήτων ανά κράτος μέλος της ΕΕ (κόκκινο: υγ. ταφή, Κίτρινο: αποτέφρωση, Πράσινο: ανακύκλωση + κομποστοποίηση) [57].

## 2.2 Η Τεχνολογία Καύσης σε Ρευστοποιημένη Κλίνη

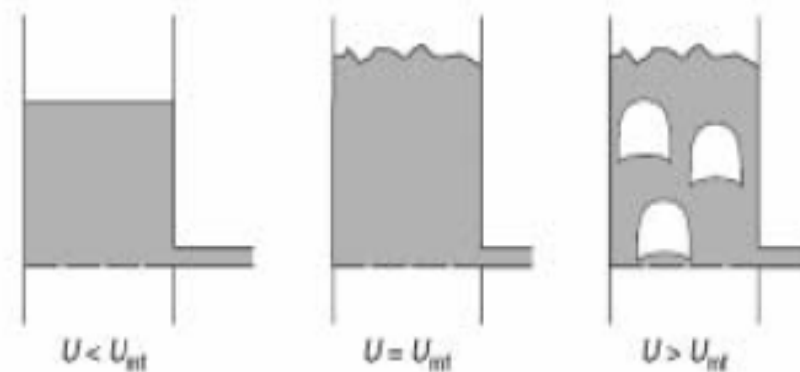
Τα τελευταία 50 χρόνια έχουν αναπτυχθεί ποικίλες μέθοδοι καύσης στερεών καυσίμων βιομάζας και στην προκειμένη περίπτωση ΑΣΑ. Μια τυπική μονάδα αποτέφρωσης αποτελείται από τα συστήματα υποδοχής, διαχωρισμού, τροφοδοσίας, καύσης, ανάκτησης θερμότητας, ελέγχου αέριας ρύπανσης, διαχείρισης της τέφρας και οποιοδήποτε άλλου υπολείμματος. Ωστόσο, υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για την καύση απορριμμάτων. Μία από αυτές είναι η καύση σε μικρές μονάδες-αποτεφρωτήρες, οι οποίες είναι οικονομικές, αλλά με μικρή απόδοση όσον αφορά στην ανάκτηση ενέργειας. Οι μεγάλες μονάδες αποτέφρωσης, οι οποίες αποσκοπούν κυρίως στη μείωση των απορριμμάτων, είναι συστήματα καύσης ημι-αναστολής, σε περιστρεφόμενους κλίβανους, σε σταθερές κλίνες και τέλος σε ρευστοποιημένες κλίνες, οι οποίες κυριαρχούν στην παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος ή ατμού. Παρακάτω, επεξηγείται αναλυτικά η μέθοδος της ρευστοποιημένης κλίνης, αφού ήταν και η μέθοδος που εφαρμόστηκε κατά τη διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας [58].

### 2.2.1 Βασικές αρχές-πλεονεκτήματα

Η καύση σε ρευστοποιημένες κλίνες είναι μια συνεχώς αναβαθμιζόμενη τεχνολογία, με την παρθενική της χρήση να εντοπίζεται στη δεκαετία του '60 για καύση οικιακών-βιομηχανικών αποβλήτων. Πλέον, χρησιμοποιείται ευρέως σε πολλές διαδικασίες, είτε φυσικές όπως η ξήρανση, είτε χημικές όπως είναι η αεριοποίηση και η καταλυτική πυρόλυση, λόγω των καλών επιδόσεων στη μεταφορά θερμότητας και μάζας. Οι ρευστοποιημένες κλίνες αποτελούνται από στερεά σωματίδια εντός κυλινδρικού κλιβάνου, τα οποία κινούνται/αιωρούνται τυχαία και ασταμάτητα στην τυρβώδη ροή του αέρα της καύσης. Ο αέρας της καύσης εισέρχεται εντός της κλίνης από το κάτω μέρος της μέσω του διασκορπιστή. Η ταχύτητα εισόδου αέρα είναι μεγαλύτερη της ελάχιστης ταχύτητας ρευστοποίησης, ώστε να ρέει ενδιάμεσα από το αδρανές υλικό υπό την μορφή φυσαλίδων, αναγκάζοντας έτσι το σύστημα να συμπεριφέρεται ως αναδεδυμένο ρευστό, εξ' ου και η ονομασία ρευστοποιημένη κλίνη. Το επίπεδο μέχρι το οποίο φτάνουν τα σωματίδια ονομάζεται ύψος της κλίνης, ενώ ο υπόλοιπος ελεύθερος χώρος πάνω από το αδρανές καλείται ζώνη απεμπλοκής. Τα αέρια της καύσης μαζί με τα μη-αναφλέξιμα αδρανή και άκαυστα σωματίδια του καυσίμου που συμπαρασύρουν, εξέρχονται από την κορυφή του αντιδραστήρα. Τα σωματίδια διαχωρίζονται από το υπόλοιπο αέριο ρεύμα σ' έναν κυκλώνα και επιστρέφουν στον αντιδραστήρα. Η θερμοκρασία λειτουργίας των ρευστοποιημένων κλινών κυμαίνεται μεταξύ 800-900°C και πίεση 1-20bar, για να αποφευχθεί η τήξη της τέφρας. Κατά τη διάρκεια της καύσης, τα σωματίδια του καυσίμου αποτελούν μόνο το 1% της συνολικής μάζας της κλίνης. Στα παρακάτω Σχήματα 2.19 και 2.20 παρουσιάζεται μία ρευστοποιημένη κλίνη και η αρχή λειτουργίας της αντίστοιχα [59, 60].



**Σχήμα 2.19:** Παράδειγμα ρευστοποιημένης κλίνης [25].



**Σχήμα 2.20:** Βασική αρχή λειτουργίας ρευστοποιημένης κλίνης ( $U_{mf}$ = ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης,  $U$ = ταχύτητα εισερχόμενου αέρα) [25].



Τα πλεονεκτήματα των ρευστοποιημένων κλινών έναντι των συμβατικών τρόπων καύσης κονιοποιημένων καυσίμων είναι:

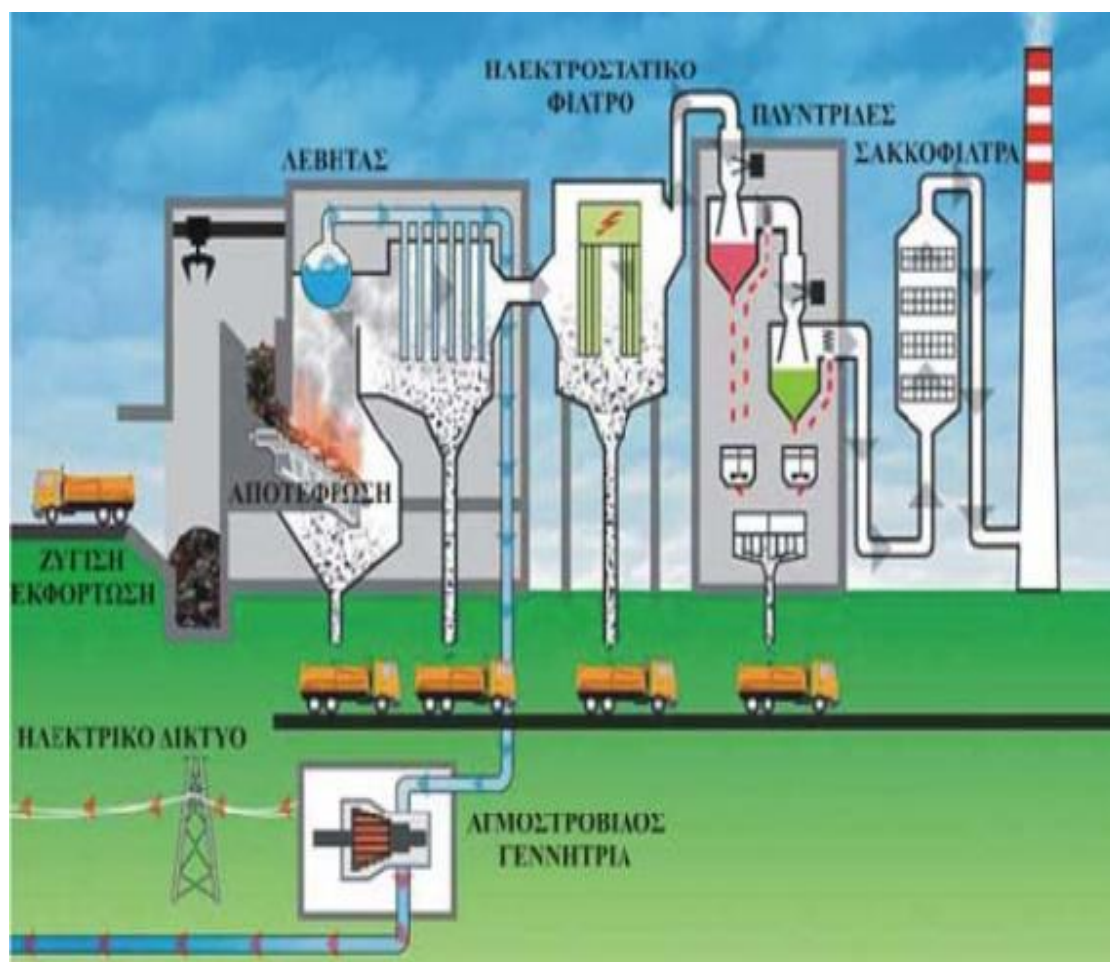
- Δεν απαιτούν τεράστια επενδυτικά κεφάλαια και έξοδα συντήρησης. Αυτό οφείλεται στους υψηλούς ρυθμούς μεταφοράς θερμότητας εντός της κλίνης, με αποτέλεσμα οι μονάδες να έχουν μικρό μέγεθος.
- Αυξημένη απόδοση καύσης και αυξημένοι ρυθμοί απαγωγής θερμότητας μέχρι  $3 \text{ MW/m}^2$  εμβαδού κλίνης.
- Μειωμένες επικαθήσεις, λόγω της θερμοκρασίας λειτουργίας τους που είναι μικρότερη των  $1000^\circ\text{C}$  και η οποία κατανέμεται ομαλότερα αποτρέποντας την τήξη της τέφρας για σχηματισμό στερεών υπολειμμάτων.
- Δεν παράγουν υψηλές εκπομπές  $\text{NO}_x$ , επειδή η θερμοκρασία λειτουργίας είναι πολύ κάτω από τη θερμοκρασία σχηματισμού τους ( $1400^\circ\text{C}$ ). Επίσης, έχουν τη δυνατότητα χρήσης υλικών ικανών να απορροφούν το θείο (αβεστόλιθος, δολομίτης) εντός της κλίνης, επιτυγχάνοντας μεγάλη μείωση των εκπομπών  $\text{SO}_x$ . Δε χρειάζεται πλέον ο έλεγχος των εκπομπών για οξειδία του θείου μετά το πέρας της καύσης.
- Χάρη στη μεγάλη θερμοχωρητικότητα της διάταξης, επιτρέπει την καύση ενός ευρέου φάσματος καυσίμων.
- Η συνεχής ανάκτηση-αναγέννηση- ανακύκλωση της στερεής φάσης δίχως τη διακοπή της λειτουργίας της διαδικασίας [61, 62].

### 2.2.2 Επισκόπηση καύσης αστικών αποβλήτων βιομάζας

Υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες αξιοποίησης και μετατροπής των αποβλήτων βιομάζας. Μία από αυτές είναι η καύση ή συν-καύση στερεών αποβλήτων για την παραγωγή ενέργειας. Η καύση θεωρείται ως μία από τις πιο απλές θερμοχημικές διεργασίες, με το εύρος της θερμοκρασίας καύσης να κυμαίνεται από  $1000\text{-}1500^\circ\text{C}$  ικανή να παράξει θερμότητα και κίνηση για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, όπως εμφανίζεται παρακάτω (Σχήμα 2.21). Η δυναμικότητα των μονάδων καύσης ΑΣΑ κυμαίνεται μεταξύ  $8\text{-}25 \text{ t/h}$ . Για να είναι συμφέρουσα και αποτελεσματική η καύση, τα συλλεγόμενα απόβλητα πρέπει να έχουν ελάχιστη θερμογόνο δύναμη της



τάξης των 6-8 MJ/kg. Η συνολική ηλεκτρική ενέργεια που είναι εφικτό να παράξει μίας τέτοιας ποιότητας καύσιμο εκτιμάται σε 520 kWh/t αποβλήτων ή 450 kWh/t αποβλήτων, εάν αφαιρεθεί από την αρχική ποσότητα η ενεργειακή κατανάλωση του εργοστασίου [51, 63].



**Σχήμα2.21:** Καύση ΑΣΑ για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [51].

Οι μονάδες καύσης, τείνουν να είναι από τις πιο ακριβές μεθόδους διαχείρισης και αξιοποίησης αστικών στερεών αποβλήτων, διότι απαιτούν πάρα πολύ εξειδικευμένο προσωπικό και συστηματική συντήρηση. Όποτε η καύση ως μέθοδος, επιλέγεται στις περιπτώσεις όπου απλούστερες και λιγότερο δαπανηρές μέθοδοι δεν είναι διαθέσιμες.

Γενικότερα οι βασικές προϋποθέσεις, ώστε να κατασκευαστούν εγκαταστάσεις καύσης σε μία περιοχή είναι :

- Η περιοχή να διαθέτει μία ώριμη και αποτελεσματικά λειτουργούσα διαχείριση αποβλήτων.
- Τα απόβλητα να συλλέγονται από χώρους υγειονομικής ταφής, οι οποίοι να υπόκεινται σε συνεχείς ελέγχους.
- Η παροχή καύσιμου αποβλήτου να είναι σταθερή καθ'όλη τη διάρκεια του έτους (  $\approx 50,000$  τόνους/έτος).
- Η κατώτερη θερμογόνος δύναμη των αποβλήτων πρέπει να είναι τουλάχιστον κατά μέσο όρο  $7 \text{ MJ / kg}$  και δεν πρέπει ποτέ να πέσει κάτω από  $6 \text{ MJ / kg}$  για καμία εποχή.
- Η τοπική κοινωνία πρέπει να είναι πρόθυμη να συνεισφέρει στο αυξημένο κόστος λειτουργίας των εγκαταστάσεων, με πληρωμή ειδικών τελών ή φόρων.
- Ικανότητα εύρεσης, πρόσληψης και συντήρησης εξειδικευμένου προσωπικού.
- Σχεδιασμός παραγωγής που να επιτρέπει χρονικό ορίζοντα προγραμματισμού 15 ετών ή περισσότερο [64].

#### **Τα πλεονεκτήματα της καύσης:**

- Η καύση είναι από τις αποτελεσματικότερες μεθόδους μείωσης του όγκου των αποβλήτων, μειώνοντας παράλληλα την ανάγκη εύρεσης νέων χώρων ταφής.
- Οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας και καύσης είναι δυνατόν να τοποθετηθούν κοντά στις περιοχές από όπου πηγάζουν οι κύριες ποσότητες αποβλήτων, μειώνοντας έτσι το κόστος μεταφοράς τους.
- Έχουν την ικανότητα να επεξεργαστούν μεγάλο εύρος υλικών ώστε να ανακτήσουν ενέργεια.
- Η παραγόμενη τέφρα της καύσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υλικό σε περιβαλλοντικά αποδεκτές κατασκευές, μειώνοντας περαιτέρω τις ποσότητες που καταλήγουν για υγειονομική ταφή.
- Οι εγκαταστάσεις καύσης μειώνουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (διοξείδιο άνθρακα, μεθάνιο), ελέγχοντας τις εκπομπές.
- Είναι απλή, δοκιμασμένη και αξιόπιστη τεχνολογία και αυτό αποδεικνύεται από τις πολυάριθμες εγκαταστάσεις σε όλη την Ευρώπη [52, 64].

Σε παγκόσμια κλίμακα, υπάρχουν 679 εγκαταστάσεις αξιοποίησης ΑΣΑ (Πίνακας 2.4) με συνολική εγκατεστημένη παγκόσμια χωρητικότητα πάνω από 3 GWh, εκ των οποίων περίπου το ήμισυ βρίσκεται στην Ευρώπη [65].

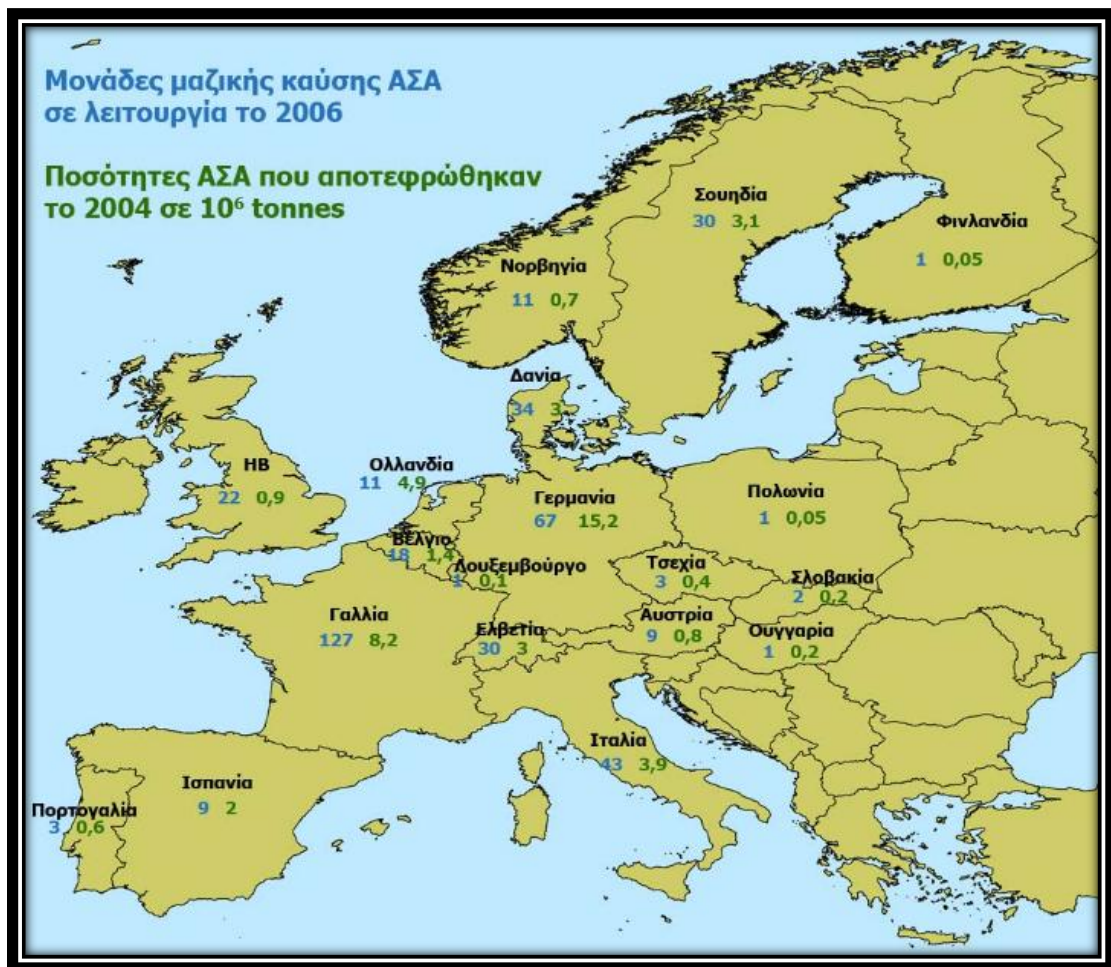
**Πίνακας 2.4:** Συνολικός αριθμός εγκαταστάσεων καύσης ΑΣΑ παγκοσμίως (μεσαία στήλη) καθώς και το ποσοστό των ΑΣΑ που αποτεφρώνεται σε σχέση με το συνολικό αριθμό παραγωγής(δεξιά στήλη) το 2006 [65].

<b>WTE facilities worldwide and amount of MSW managed by incinerators</b>		
<b>Region</b>	<b># of facilities</b>	<b>Amount of MSW Managed by MSW incineration as % of total MSW generated</b>
USA	89	8-15%
Europe	420	varies from country to country (e.g. >50% in the Netherlands)
Japan	100	70 to 80%
Other nations (Taiwan, Singapore, China, etc.)	70	varies from country to country
<b>Source: Based on IWSA, no date; Stengler, 2006.</b>		

Οι ΗΠΑ διαθέτουν τεράστιες εκτάσεις για την ενταφίαση των απορριμμάτων τους, έτσι διστάζουν να επενδύσουν στην καύση ΑΣΑ, εξαιτίας του μεγάλου κόστους συγκριτικά με τις εγκαταστάσεις υγειονομικής ταφής. Σήμερα στις ΗΠΑ λειτουργούν 89 μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την καύση αστικών αποβλήτων, με την παραγωγή να ανέρχεται σε 2,500 MW, τα οποία αντιστοιχούν μόνο στο 0.3% της συνολικής εθνικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [65].

Στην Ευρώπη, η μέθοδος της καύσης των αποβλήτων αποτελεί από τις βασικότερες μεθόδους επεξεργασίας τους. Η ετήσια Ευρωπαϊκή παραγωγή ΑΣΑ ανέρχεται στους 246 εκ. τόνους [66], με το 25% αυτών να αποτεφρώνεται στις 420 μονάδες που είναι εγκατεστημένες στα κράτη της Ευρώπης. Σύμφωνα με τη Συνομοσπονδία Ευρωπαϊκών Εγκαταστάσεων Αποβλήτων προς Ενέργεια (CEWEP), οι μονάδες αυτές είναι ικανές να παράγουν ηλεκτρισμό για 27 εκ. ανθρώπους ή να θερμάνουν 13 εκ. (Σχήμα 2.22). Τα κίνητρα κατασκευής τόσο μεγάλου αριθμού εγκαταστάσεων στην

Ευρώπη είναι άρρηκτα συνδεδεμένα με την τεράστια έλλειψη χώρων υγειονομικής ταφής και το υψηλό κόστος μεταφοράς αποβλήτων σε απομακρυσμένες τοποθεσίες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η Ολλανδία, όπου το 2004 παρήγαγε από ΑΣΑ 2,535GWh ηλεκτρικής ενέργειας, όπου το 78% παραδόθηκε στο δίκτυο και το υπόλοιπο 22% χρησιμοποιήθηκε από τις εγκαταστάσεις για τις ενεργειακές τους ανάγκες. Σε γενικές γραμμές, η Ολλανδία αποτεφρώνει πάνω από το 60% της ετήσια παραγωγής ΑΣΑ [65].



**Σχήμα 2.22:** Εγκατεστημένες μονάδες αποτέφρωσης ΑΣΑ έως το 2006 και συνολικές ποσότητες που αποτεφρώθηκαν το 2004 (CEWER,2009). [67]

## 3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### 3.1 Συλλογή και Προετοιμασία Δειγμάτων

#### 3.1.1 Καύσιμα

Ως καύσιμα στην παρούσα διπλωματική μελέτη χρησιμοποιήθηκαν (α) το πυρηνόξυλο, το οποίο συλλέχτηκε από την εταιρεία ΑΒΕΑ (Χανιά) και (β) ΑΣΑ, των οποίων η συλλογή έγινε από τη Διαδημοτική Επιχείρηση Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων (ΔΕΔΙΣΑ).

Το πυρηνόξυλο (ελαιοπυρήνας) είναι παραπροϊόν, το οποίο προκύπτει από την επεξεργασία του ελαιοπυρήνα (κουκούτσι ελιάς), δηλαδή του στερεού αποβλήτου που παράγουν τα ελαιοτριβεία κατά τη διαδικασία παραγωγής του ελαιόλαδου. Μετά τη συλλογή του, ο ελαιοπυρήνας υπόκειται σε ξήρανση και εκχύλιση έτσι ώστε να έρθει σε αξιοποιήσιμη μορφή.

Τα ΑΣΑ που χρησιμοποιήθηκαν, προήλθαν από τους πράσινους κάδους. Τα δείγματα συλλέχθηκαν στις εγκαταστάσεις της ΔΕΔΙΣΑ. Λόγω της διακύμανσης της σύστασης των στερεών αποβλήτων, καθ'όλη τη διάρκεια του χρόνου, η συλλογή διήρκεσε 12 μήνες συνολικά, ώστε να συγκεντρωθούν αντιπροσωπευτικά δείγματα. Η συλλογή έγινε σε καθημερινή βάση για 12 μήνες και στο τέλος κάθε μήνα πραγματοποιούνταν ανάμειξη των ημερήσιων δειγμάτων, για την παραγωγή του μηνιαίου δείγματος.

Από τα δείγματα που συλλέχθηκαν αφαιρέθηκαν με χειροδιαλογή όλα τα υαλικά, πλαστικά και μέταλλα. Μετέπειτα, τα δείγματα αφέθηκαν για το πρώτο στάδιο της ξήρανσης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος για μερικές μέρες και εν συνεχεία σε φούρνο (Εικόνα 3.1) στους 110 °C για 3-4 ώρες.

Επόμενο στάδιο ήταν η άλεση των δειγμάτων, σε μαχαιρόμυλο (Pulverisette 15 της εταιρείας FRITSCH) (Εικόνα 3.2) για τα ΑΣΑ και σε σιαγωνινό σπαστήρα (Pulverisette 1 της εταιρείας FRITSCH) (Εικόνα 3.3) για το πυρηνόξυλο.

Λόγω της υψηλής περιεκτικότητας των δειγμάτων σε υγρασία, αν στο στάδιο της προεργασίας δε γίνει σωστή ξήρανση, η ποιότητα της άλεσης των δειγμάτων μειώνεται, με αποτέλεσμα η καύση τους να είναι ατελής, με χαμηλή θερμική αποδοτικότητα και αυξημένες εκπομπές αερίων. Τελευταίο στάδιο στην προετοιμασία δειγμάτων ήταν η κοσκίνιση σε δονούμενα κόσκινα (μοντέλου Analysette 3 PRO της



εταιρείας FRITSCH) (Εικόνα 3.4). Με βάση τις προδιαγραφές του συστήματος ρευστοποιημένης κλίνης, η κοκκομετρία που επιλέχθηκε στο πυρηνόξυλο ήταν τα +850 -2800 $\mu\text{m}$ , ενώ για τα ΑΣΑ -1000  $\mu\text{m}$ .



**Εικόνα 3.1:** Φούρνος ξήρανσης



**Εικόνα 3.2:** Μαχαιρόμυλος



**Εικόνα 3.3:** Σιαγωνοτός σπαστήρας



**Εικόνα 3.4:** Δονούμενα κόσκινα

### 3.1.2 Αδρανές υλικό

Ένα αδρανές υλικό, είναι βασικό υλικό για τη σωστή λειτουργία μιας ρευστοποιημένης κλίνης. Είναι ο λόγος για τον οποίο η θερμότητα και η μάζα μεταφέρεται ομοιόμορφα σε όλο το ύψος της κλίνης. Συγκεκριμένα, το αδρανές υλικό που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική έρευνα, ήταν Na-ούχος άστριος, του οποίου η πυκνότητα ήταν  $\rho_s=2670 \text{ kg/m}^3$  και η μέση διάμετρος των κόκκων  $d_s=283 \text{ }\mu\text{m}$ . Η κοκκομετρία επιτεύχθηκε με τη χρήση σφαιρόμυλου για τη

λειτουργίβησή του και συσκευή δονούμενων κοσκίνων για τη λήψη της απαιτούμενης κοκκομετρίας. Η σύσταση του συγκεκριμένου αστρίου ήταν:  $\text{SiO}_2=67.7\%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3=20.3\%$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3=0.05\%$ ,  $\text{CaO}=0.5\%$ ,  $\text{MgO}=0.05\%$ ,  $\text{TiO}_2=0.05\%$ ,  $\text{Na}_2\text{O}=11.2\%$  και  $\text{K}_2\text{O}=0.15\%$ . Βάσει των παραπάνω αποτελεσμάτων, προκύπτει ότι το αδρανές υλικό αποτελείται κυρίως από πυριτικά και αργιλικά άλατα και η περιεκτικότητα σε ασβέστιο είναι μηδαμινή. Έτσι, ο άστριος δεν επιτρέπει την πραγματοποίηση φυσικής αποθείωσης των καυσαερίων και παραμένει αναλλοίωτος καθ'όλη τηδιάρκεια της καύσης. Η ποσότητα του αστρίου που χρησιμοποιήθηκε σε κάθε πείραμα ήταν 1000g.

### 3.2 Χημικός Χαρακτηρισμός Δειγμάτων

Για το χαρακτηρισμό των πειραματικών δειγμάτων χρησιμοποιήθηκαν οι εξής διεργασίες: Η διαδικασία της προσεγγιστικής ανάλυσης, η οποία υπολογίζει την περιεκτικότητα των δειγμάτων σε υγρασία, πτητικά συστατικά, μόνιμο άνθρακα και τέφρα. Η στοιχειακή ανάλυση με τη χρήση του στοιχειακού αναλυτή CHNS της εταιρείας Eurovector (προσδιορισμός ποσοστών C, H, N, O, S) . Τέλος ο υπολογισμός της θερμογόνου δύναμης με θερμιδόμετρο οβίδας τύπου AC – 350 της εταιρείας LECO. Απαραίτητη προϋπόθεση για τις αναλύσεις των στερεών καυσίμων ήταν η λήψη αντιπροσωπευτικού δείγματος από τα υλικά, κοκκομετρίας  $-425\mu\text{m}$ . Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε συνεργασία με Εργαστήρια των Σχολών Μηχανικών Ορυκτών Πόρων και Μηχανικών Περιβάλλοντος σύμφωνα με τα Ευρωπαϊκά πρότυπα CEN/TC335.

#### 3.2.1 Προσεγγιστική ανάλυση

Η προσεγγιστική ανάλυση συνίσταται στην κατά βάρος περιεκτικότητα του δείγματος σε υγρασία, τέφρα, πτητικά συστατικά και μόνιμο άνθρακα.

##### ▪ Εύρεση ποσοστού υγρασίας

Για τον υπολογισμό του ποσοστού της υγρασίας ελήφθησαν από τα αρχικά δείγματα μας αντιπροσωπευτική ποσότητα 2g ζυγισμένη στον αναλυτικό ζυγό. Αφού ζυγίστηκε



το δείγμα, τοποθετήθηκε στο φούρνο για 2 ώρες στους 110 °C. Έπειτα φυλάχθηκε για 20-30 λεπτά σε συνθήκες έλλειψης υγρασίας, ώστε να επανέλθει σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, και ξανά ζυγίστηκε. Ο υπολογισμός της υγρασίας δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\text{Υγρασία(\%)} = \left[ \frac{(W_1 - W_2)}{W_1} \right] \times 100 \quad (3.1)$$

Οπού,  $W_1$  το αρχικό βάρος του δείγματος σε g.

$W_2$  το τελικό βάρος του δείγματος σε g.

#### ▪ Προσδιορισμός Τέφρας

Για την εύρεση του ποσοστού τέφρας, ζυγίστηκαν τα δείγματα πριν την καύση τους. Στη συνέχεια, κάηκαν σε φούρνο υψηλής θερμοκρασίας (550°C). Η σχέση που υπολογίζει το ποσοστό τέφρας επί ξηρού δείγματος είναι η εξής:

$$\text{Τέφρα επί ξηρού(\%)} = \left( \frac{A_2}{A_1} \right) * 100 \quad (3.2)$$

Όπου,  $A_1$  αρχικό βάρος ξηρού δείγματος πριν την καύση σε g

$A_2$  τελικό βάρος ξηρού δείγματος (βάρος τέφρας) μετά την καύση σε g.

#### ▪ Προσδιορισμός πτητικών συστατικών

Ο προσδιορισμός τους, έγινε με την πραγματοποίηση πειραμάτων πυρόλυσης με τη χρήση του θερμοζυγού TGA-6 της εταιρίας Perkin Elmer (Εικόνα 3.5). Ο θερμοζυγός διαθέτει υποδοχέα, στον οποίο τοποθετήθηκαν περίπου 25 mg αντιπροσωπευτικής ποσότητας από κάθε δείγμα. Εν συνεχεία, η θερμοκρασία αυξήθηκε σταδιακά μέχρι τους 110 °C, και παρέμεινε για 15 λεπτά για την απομάκρυνση της υγρασίας. Στη συνέχεια, η θερμοκρασία αυξήθηκε στους 850 °C, με ρυθμό θέρμανσης 10 °C/min και παρέμεινε για 10 λεπτά. Το ποσοστό των πτητικών συστατικών υπολογίστηκε για κάθε ξηρό δείγμα από τη σχέση (3.3) :

$$\text{Πτητικά (\% επί ξηρού)} = \left[ \frac{(W_{110^{\circ}\text{C}} - W_{850^{\circ}\text{C}})}{W_{110^{\circ}\text{C}}} \right] * 100 \quad (3.3)$$

- $W_{110^{\circ}\text{C}}$  είναι το βάρος του δείγματος στους  $110^{\circ}\text{C}$ , αφού έχει αποβάλει την υγρασία του
- $W_{850^{\circ}\text{C}}$  είναι το τελικό βάρος του δείγματος στους  $850^{\circ}\text{C}$

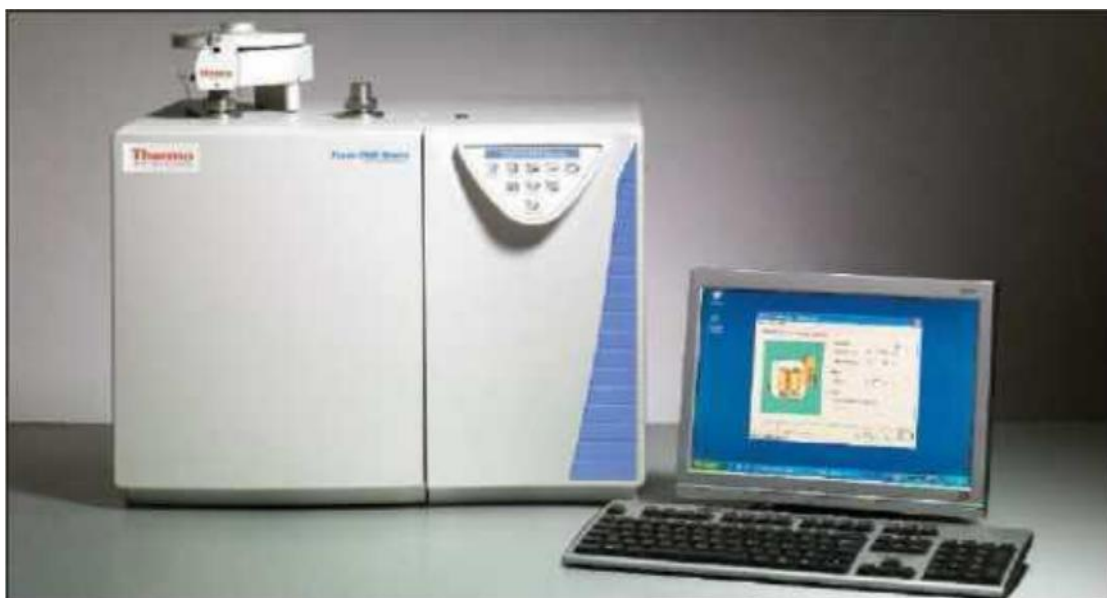


**Εικόνα 3.5:** Θερμοζυγός TGA-6

### 3.2.2. Στοιχειακή ανάλυση

Ο στόχος της στοιχειακής ανάλυσης (CHNS-O) είναι ο ποσοτικός προσδιορισμός των κύριων χημικών στοιχείων που απαρτίζουν το οργανικό μέρος των υπό μελέτη δειγμάτων. Η ανάλυση CHNS-O έχει πάρει την ονομασία της από τα βασικά στοιχεία που αναλύονται, όπως είναι ο άνθρακας (C), το υδρογόνο (H), το άζωτο (N) και το θείο (S). Η διαδικασία της στοιχειακής ανάλυσης πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τα Ευρωπαϊκά πρότυπα EN15104 και EN15289. Για τον προσδιορισμό των στοιχείων έγινε χρήση του αυτόματου στοιχειακού αναλυτή Flash 2000 Series, της εταιρίας Thermo Fisher Scientific (Εικόνα 3.6), ο οποίος βρίσκεται στο Εργαστήριο Ανάλυσης Ρευστών και Πυρήνων Υπόγειων Ταμιευτήρων, της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων. Η αρχή λειτουργίας του αναλυτή, βασίζεται στην αρχή της δυναμικής ανάφλεξης του δείγματος με την παροχή οξυγόνου. Αφού αρχίσει η ροή του οξυγόνου εντός της στήλης χαλαζία, τότε εισέρχεται και η κάψα κασσιτέρου. Το

περιβάλλον μέσα στη στήλη είναι πολύ οξειδωτικό και συμβάλλει στην πλήρη καύση του δείγματος. Η θερμοκρασία ανεβαίνει στους 1800°C, όπου το δείγμα καίγεται και τα συστατικά περνάνε στην αέρια φάση. Τα αέρια που παράγονται κατά την καύση μετακινούνται εντός της στήλης χαλαζία με κατεύθυνση τον αέριο χρωματογράφο, με την εισαγωγή ηλίου. Από την καύση προκύπτουν  $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$  και  $SO_2$ , τα οποία πρώτα διαχωρίζονται στον χρωματογράφο και κατόπιν ανιχνεύονται από τον ανιχνευτή θερμικής αγωγιμότητας. Μέσω της χρήσης κατάλληλου λογισμικού, υπολογίζονται τα τελικά επί τοις εκατό ποσοστά αζώτου, άνθρακα, υδρογόνου και θείου εντός των υπό εξέταση δειγμάτων.



**Εικόνα 3.6:** Στοιχειακός αναλυτής Flash 2000 Series

### 3.2.3 Προσδιορισμός θερμογόνου δύναμης

Ο προσδιορισμός της θερμογόνου δύναμης πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του Αυτόματου Θερμιδόμετρου AC-350 της Leco (Εικόνα 3.7), του εργαστηρίου Διαχείρισης Τοξικών και Επικίνδυνων Απόβλητων της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος και η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN14918. Ως θερμογόνος δύναμη καλείται το ενεργειακό περιεχόμενο ενός υλικού, το οποίο εκλύεται κατά την καύση ενός κιλού στερεού ή υγρού καυσίμου ή ενός κυβικού μέτρου αέριου καυσίμου το οποίο βρίσκεται σε κανονικές συνθήκες. Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου, αναφέρει ότι εάν πραγματοποιηθεί μία αντίδραση (καύση οργανικού υλικού) εντός του θερμιδόμετρου, τότε η θερμική ενέργεια της αντίδρασης που απελευθερώνεται απορροφάται από την ουσία (νερό) που περιέχεται εντός του θερμιδόμετρου. Βάσει αυτής της ενεργειακής απορρόφησης και με την κατάλληλη επεξεργασία των δεδομένων υπολογίζεται η θερμογόνος δύναμη του δείγματος.



**Εικόνα 3.7:** Θερμιδόμετρο AC-350 της LECO

### 3.2.4 Ορυκτολογική και χημική ανάλυση τέφρας.

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την ορυκτολογική μελέτη των τεφρών ήταν η Περιθλασιμετρία Ακτίνων-Χ (XRD), με το περιθλασίμετρο τύπου D-8 Advance (Εικόνα 3.8), της εταιρείας Bruker, στο Εργαστήριο Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων. Η μέθοδος της περιθλασιμετρίας βασίζεται στο φαινόμενο της ανάκλασης μιας ακτίνας-Χ από μια οικογένεια παράλληλων και ισαπέχοντων ατομικών επιπέδων. Είναι μια μη καταστροφική μέθοδος της κρυσταλλικής φάσης των ορυκτών και αποσκοπεί να εξετάσει κατά πόσο συνέβαλε η θερμοκρασία στο σχηματισμό αυτών των κρυσταλλικών φάσεων. Σύμφωνα με τον νόμο του Bragg, «όταν μία μονοχρωματική δέσμη ακτίνων-Χ με μήκος κύματος  $\lambda$  προσπίπτει στα επίπεδα του κρυσταλλικού πλέγματος υπό γωνία  $\theta$ , πραγματοποιείται περίθλαση της δέσμης αν η διαδρομή των ακτίνων που αντανακλώνται από διαδοχικά επίπεδα (με απόσταση  $d$ ) είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος  $\lambda$  ». Με μέτρηση των γωνιών περίθλασης, είναι δυνατόν να υπολογιστούν οι ενδοκρυσταλλικές αποστάσεις  $d$ . Οπότε, το φάσμα περίθλασης του εξεταστέου υλικού προκύπτει από την καταγραφή της γωνίας περίθλασης και του αντίστοιχου αριθμού ακτίνων-Χ που ανιχνεύτηκαν στην συγκεκριμένη γωνία περίθλασης. Το φάσμα συγκρίνεται με τη βάση δεδομένων φασμάτων ενός μεγάλου αριθμού υλικών και έτσι ταυτοποιείται ποιοτικά η δομή του υλικού, αλλά και ποσοτικά η περιεκτικότητα κάθε φάσης στο υλικό.



**Εικόνα 3.8:** Περιθλασίμετρο D-8 Advance, Bruker

Για τη χημική ανάλυση της τέφρας που παράχθηκε στη ρευστοστερεά κλίνη, χρησιμοποιήθηκαν ποικίλες μέθοδοι. Συγκεκριμένα για τον έλεγχο της περιεκτικότητας του φωσφόρου χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του Χρωματομετρικού Προσδιορισμού, για τον προσδιορισμό του πυριτίου χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Φασματοσκοπίας Ατομικής Απορρόφησης.

#### ▪ Χρωματομετρικός Προσδιορισμός Φωσφόρου

Στη μέθοδο χρωματομετρικού προσδιορισμού, έγινε χρήση του φασματοφωτόμετρου ορατού υπεριώδους DR/4000 U, της εταιρείας Hach (Εικόνα 3.9), το οποίο ανήκει στο Εργαστήριο Γεωχημείας, Οργανικής Γεωχημείας και Οργανικής Πετρογραφίας της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων.



**Εικόνα 3.9:** Φασματοφωτόμετρο DR/4000 U

Αρχικά προηγήθηκε διαλυτοποίηση των δειγμάτων μέσα σε οξέα, ώστε να δημιουργηθεί το σύμπλοκο μολυβδοβαναδοφωσφορικού οξέος, το οποίο έχει την ικανότητα να απορροφά ακτινοβολία μήκους κύματος 460 nm. Στη διαδικασία της διαλυτοποίησης χρησιμοποιήθηκαν ποτηράκια teflon, τα οποία θερμάνθηκαν με τη βοήθεια υδατόλουτρου.

Σαν πρώτο βήμα συλλέχθηκαν 0.250g τέφρας για κάθε ένα από τα δείγματα και αναμείχτηκαν με 60 mL πυκνού HF οξέος και 20 mL πυκνού  $\text{HNO}_3$ . Εν συνεχεία, το κάθε διάλυμα τοποθετήθηκε πάνω από το θερμό υδατόλουτρο και αφέθηκε έως ότου εξατμιστεί. Η διαδικασία επαναλήφθηκε για ακόμη μια φορά. Μετά το πέρας της δεύτερης εξάτμισης, προστέθηκαν ξανά 10 mL πυκνού  $\text{HCl}$  και 10mL πυκνού  $\text{HNO}_3$  και αφέθηκαν να εξατμιστούν μέχρι ξηρού. Τελευταίο βήμα της διαλυτοποίησης ήταν η προσθήκη 5mL πυκνού  $\text{HCl}$  και 5mL πυκνού  $\text{HNO}_3$  και αραιώσή του με



απιονισμένο νερό, μέχρι τα 50 mL. Το διάλυμα αφέθηκε να εξατμιστεί έως τα 35 mL και ξανά αραιώθηκε μέχρι τα 50 mL. Επόμενο βήμα ήταν η παρασκευή του μολυβδοβαναδοφωσφορικού οξέος με συμπλοκοποίηση του φωσφόρου, χρησιμοποιώντας βαναδικό αμμώνιο και μολυβδενικό αμμώνιο. Πιο συγκεκριμένα, μεταφέρθηκαν 10 mL από το κάθε διάλυμα σε ογκομετρικές φιάλες των 50 mL. Σε κάθε μια από τις φιάλες προστέθηκαν 2.5 mL πυκνού  $\text{HNO}_3$ , 5 mL βαναδικού αμμωνίου, 10 mL μολυβδαινικού αμμωνίου, αραιώθηκαν μέχρι τα 50 mL με απιονισμένο νερό και αφέθηκαν να ηρεμήσουν για 10-15 λεπτά πριν τη μέτρηση στο φασματοόμετρο.

Το φασματοφωτόμετρο αποτελείται από πηγή φωτός, μονοχρωμάτορα, δειγματοφορέα, ανιχνευτή φωτός και σύστημα απεικόνισης της μέτρησης. Η προσαρμογή έγινε στα 460nm, διότι σε αυτό το μήκος κύματος το σύμπλοκο του φωσφόρου απορροφά την ακτινοβολία. Για το μηδενισμό της συσκευής τοποθετήθηκε στο ειδικό δειγματοφορέα τυφλό διάλυμα, το οποίο περιείχε όλα τα αντιδραστήρια, από τα οποία αποτελούνται τα δείγματά μας εκτός από του φωσφόρου. Για κάθε δείγμα το όργανο καταγράφει την τιμή απορρόφησης της ακτινοβολίας και τη συγκρίνει με την τιμή που είχε καταγράψει για το τυφλό διάλυμα (μηδενική απορρόφηση) και την εμφανίζει ως τελικό αποτέλεσμα. Μεγάλη απορρόφηση ισοδυναμεί με μεγάλη συγκέντρωση και το αντίστροφο. Κατά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων υπολογίστηκαν για κάθε δείγμα η συγκέντρωση του  $\text{P}_2\text{O}_5$  σε mg ανά κιλό υλικού (ppm) και το ποσοστό του, επί τοις εκατό ξηρού δείγματος.

▪ **Φασματοσκοπία Ατομικής Απορρόφησης για τον υπολογισμό του πυριτίου.**

Ο έλεγχος της συγκέντρωσης του πυριτίου στις τέφρες των δειγμάτων έγινε με τη μέθοδο Φασματοσκοπίας Ατομικής Απορρόφησης με χρήση του φασματόμετρου τύπου A Analyst της εταιρείας Perkin Elmer (Εικόνα 3.10).



**Εικόνα 3.10:** Φασματόμετρο τύπου A Analyst της Perkin Elmer

Το φασματόμετρο αποτελείται από πηγή την ακτινοβολίας, σύστημα ατμοποίησης με φλόγα, μονοχρωμάτορα, ανιχνευτή σήματος και σύστημα μέτρησης της καταγραφής. Η συγκέντρωση του πυριτίου που εμφανίζει το όργανο είναι σε mg/L. Για τη μέθοδο της Φασματοσκοπίας Ατομικής Απορρόφησης, τα δείγματα πρέπει να είναι σε υγρή μορφή. Έτσι τα δείγματα τέφρας διαλυτοποιήθηκαν με τη μέθοδο σύντηξης. Αρχικά ζυγίστηκε 0,1g αντιπροσωπευτικού δείγματος από κάθε τέφρα και σε κάθε ένα από αυτά προστέθηκε 0,5g συντηκτικό μέσο, στην περίπτωση μας τετραβορικό λίθιο ( $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ). Τα μείγματα τοποθετήθηκαν σε χωνευτήρια λευκόχρυσου και εισήχθησαν στο φούρνο υψηλών θερμοκρασιών για 30 λεπτά σε θερμοκρασία 980°C. Το μείγματα πήραν υαλώδη μορφή, η οποία ήταν ευδιάλυτη σε αραιά οξέα. Τα χωνευτήρια τοποθετήθηκαν το κάθε ένα σε ποτήρι ζέσεως, όπου

προστέθηκε μικρή ποσότητα αραιού  $\text{HNO}_3$  και τοποθετήθηκαν σε αναταράκτη έως ότου τα μείγματα να διαλυτοποιηθούν ολοκληρωτικά εντός του οξέως. Έπειτα τα διαλύματα μεταφέρθηκαν σε φιάλες ογκομετρικές και αραιώθηκαν μέχρι τα 100mL με την προσθήκη απιονισμένου νερού. Τελευταίο βήμα ήταν η διεξαγωγή των μετρήσεων στο φασματομέτρο. Ο φασματογράφος δίνει τη συγκέντρωση του πυριτίου σε mg/L.

### 3.3 Πειραματική Διάταξη

Η πειραματική διαδικασία καύσης μίγματος πυρηνόξυλου-ΑΣΑ, έλαβε χώρα σε έναν αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης ειδικά διαμορφωμένο για εργαστηριακό περιβάλλον (Εικόνα 3.11), ο οποίος εντοπίζεται στο εργαστήριο Εξευγενισμού και Τεχνολογίας Στερεών Καυσίμων της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Τα βασικά εξαρτήματα της πειραματικής διάταξης είναι τέσσερα:

- Ο αντιδραστήρας ρευστοποιημένης κλίνης
- Το σύστημα τροφοδοσίας καυσίμου
- Το σύστημα συλλογής της ιπτάμενης τέφρας
- Το σύστημα ψύξης και ανάλυσης των καυσαερίων



**Εικόνα 3.11:** Ρευστοποιημένη κλίνη.

### **3.3.1 Αντιδραστήρας ρευστοποιημένης κλίνης**

Ο πυρήνας της κλίνης είναι ύψους 150cm και πλάτους 7cm κυλινδρικού σχήματος και είναι φτιαγμένος από ανοξείδωτο χάλυβα (SS310). Η πορώδης πλάκα από ανοξείδωτο χάλυβα και πάχους 5mm (διασκορπιστής) τοποθετείται σε ύψος 50cm από τη βάση του αντιδραστήρα. Σκοπός του είναι να συγκρατεί το αδρανές υλικό στο κέντρο του πυρήνα, ενώ να επιτρέπει παράλληλα τη διέλευση του αέρα από τη βάση του αντιδραστήρα, ώστε να επιτυγχάνεται η "ρευστοποίηση" του αδρανούς υλικού. Ο χώρος της κλίνης πάνω από το αδρανές υλικό ονομάζεται ελεύθερο όριο, και μέσα σε αυτό επιτυγχάνεται η μείωση της ταχύτητας των καυσαερίων και ο περιορισμός της απομάκρυνσης αδρανούς από συμπαρασυρμό. Η προθέρμανση και η συντήρηση της θερμοκρασίας της κλίνης επιτυγχάνεται από τις ηλεκτρικές αντιστάσεις που την περιβάλλουν και οι οποίες ελέγχονται από PID ρυθμιστές. Επιπροσθέτως, για τον έλεγχο της θερμοκρασίας χρησιμοποιείται ένας ρυθμιστής θερμοκρασιών με 5

θερμοστοιχεία τύπου K στο εσωτερικό του πυρήνα και μέσω ενός θερμοστοιχείου στις αντιστάσεις. Οι απώλειες της θερμοκρασίας αποφεύγονται μονώνοντας εξωτερικά την κλίνη με στρώσεις κεραμοβάμβακα.

### 3.3.2 Σύστημα τροφοδοσίας καυσίμου

Η κλίνη τροφοδοτείται με καύσιμο μέσω δύο σιλό, στη βάση των οποίων είναι τοποθετημένος ένας ατέρμονος κοχλίας. Η περιστροφή των κοχλίων επιτυγχάνεται με τη χρήση ηλεκτρικού κινητήρα και μειωτήρα. Η χρήση του πρώτου σιλό είναι για την αποθήκευση του καυσίμου, για αυτό και ονομάζεται σιλό αποθήκευσης. Ο κοχλίας του πρώτου σιλό τροφοδοτεί το δεύτερο σιλό με μικρές ποσότητες καυσίμου, διαμέσω κατακόρυφα τοποθετημένου σωλήνα διαμέτρου 2''. Εφόσον εισέλθει το καύσιμο στο σιλό της τροφοδοσίας, ο κοχλίας τροφοδοσίας ο οποίος κινείται με αυξημένες στροφές στέλνει το καύσιμο στο εσωτερικό της κλίνης σε σημείο 20 mm πάνω από το διασκορπιστή του αέρα. Ο λόγος που ο κοχλίας τροφοδοσίας κινείται με αυξημένες στροφές είναι για να αποφεύγονται πιθανές συγκεντρώσεις καυσίμου και η παροχή να παραμένει σταθερή. Η παροχή ρυθμίζεται μέσω κατάλληλου αντιστροφέα συχνότητας (inverter), ο οποίος ελέγχει τις στροφές του κοχλία. Το δεύτερο σιλό διαθέτει βάνια η οποία επιτρέπει να διοχετευθεί στο σύστημα μια μικρή ροή αζώτου, προκειμένου να εμποδίσει αναστροφή της ροής των καυσαέριων προς το σιλό. Επίσης, ο σωλήνας που καλύπτει τον κοχλία τροφοδοσίας έχει τοποθετημένο περιμετρικά του ένα υδρόψυκτο στεφάνι, ώστε να προστατεύει το καύσιμο από πρόωρη καύση προτού εισέλθει στον καυστήρα. Οι κοχλίες είναι κατασκευασμένοι από ανοξείδωτο χάλυβα.

### 3.3.3 Σύστημα συλλογής ιπτάμενης τέφρας

Τα καυσαέρια που παράγονται κατά την καύση του υλικού εντός της κλίνης, με τη βοήθεια του αέρα κατευθύνονται μέσω σωληνώσεων σε έναν κυκλώνα, με στόχο την απομάκρυνση της ιπτάμενης τέφρας που παράχθηκε κατά την καύση, καθώς και οποιουδήποτε άλλου άχρηστου σωματιδίου (άκαυστα ή αδρανές υλικό). Όλα τα προαναφερθέντα συλλέγονται σε δοχείο, στο κάτω μέρος του κυκλώνα. Στο τελευταίο στάδιο, το αέριο καθαρό πλέον από σωματίδια διοχετεύεται σε σύστημα ψύξης/συμπύκνωσης των αερίων.

### 3.3.4 Σύστημα ψύξης και ανάλυσης καυσαερίων

Προτού εισέλθει το αέριο στον αναλυτή, περνά από το σύστημα ψύξης/συμπύκνωσης με νερό, για την απομάκρυνση των ανεπιθύμητων συμπυκνώσιμων ενώσεων. Όταν το δοχείο του συστήματος ψύξης/συμπύκνωσης γεμίσει, τότε με τη βοήθεια μιας βάνας τα συμπυκνώματα απομακρύνονται. Μετά το στάδιο της ψύξης, ένα μέρος του αερίου κατευθύνεται προς τον απαγωγό, και το υπόλοιπο στον αναλυτή αερίων. Το ξηρό πλέον δείγμα καυσαερίου διοχετεύεται σε on-line αναλυτή καυσαερίων τύπου Madur Ga-40plus της Sick-Maihak (Εικόνα 3.12), ο οποίος διαθέτει ξηραντήρα και ενσωματωμένο φίλτρο. Ο συγκεκριμένος αναλυτής έχει τη δυνατότητα να καταγράφει την περιεκτικότητα των καυσαερίων σε οξυγόνο ( $O_2$ ), διοξείδιο του άνθρακα ( $CO_2$ ), μονοξείδιο του άνθρακα (CO), διοξείδιο του θείου ( $SO_2$ ) και οξείδια του αζώτου ( $NO_x$ ). Εκτός από την ανάλυση του καυσαερίου, έχει και τη δυνατότητα να μετρά την απώλεια θερμότητας, τη θερμοκρασία των καυσαερίων και το συντελεστή περίσσειας αέρα λ. Για την ανάκτηση των δεδομένων ο αναλυτής συνδέεται με ηλεκτρονικό υπολογιστή για την επεξεργασία και αποθήκευσή τους.





**Εικόνα 3.12:** Αναλυτής Madur Ga-40plus



### 3.4. Καθορισμός Συνθηκών Λειτουργίας Καύσης

#### 3.4.1. Κοκκομετρία υλικών/μυγμάτων

- **Κοκκομετρία αδρανούς υλικού**

Ως αδρανές υλικό επιλέχθηκε ο νατριούχος άστριος, του οποίου η ποσότητα και η κοκκομετρία επιλέχθηκαν μετά από πειραματικές δοκιμές. Ο σκοπός του άστριου είναι να επιτυγχάνει τη βέλτιστη ρευστοποίηση, χωρίς παράλληλα να παρασύρεται εκτός της κυλινδρικής κλίνης από τη ροή του αέρα. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται με επιτυχία ο διαχωρισμός της παραγόμενης τέφρας από το αδρανές και η παράσυρσή της προς το σημείο συλλογής της. Η ποσότητα και η κοκκομετρία που επιλέχθηκαν για τις συνθήκες του πειράματος είναι τα 1000g με κοκκομετρία από 200-400  $\mu\text{m}$ .

- **Κοκκομετρία πυρηνόξυλου –ΑΣΑ**

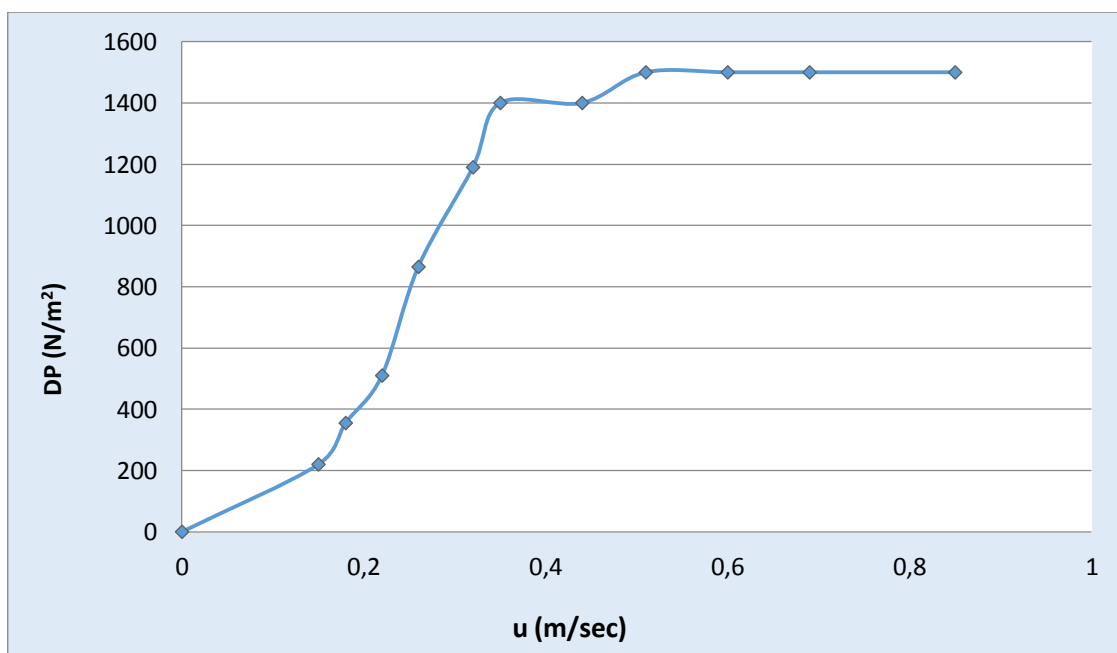
Το καύσιμο που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα ήταν μείγμα πυρηνόξυλου και αλεσμένων ΑΣΑ. Όσον αφορά το πυρηνόξυλο, η επιλογή της κοκκομετρίας έγινε με γνώμονα την ομαλότερη τροφοδοσία καυσίμου στον καυστήρα και την αποφυγή δημιουργίας άκαυστων σωματιδίων. Μετά από δοκιμές, η κοκκομετρία που επιλέχθηκε για το πυρηνόξυλο κυμάνθηκε μεταξύ +850 - 2800  $\mu\text{m}$ .

Τα ΑΣΑ αλέστηκαν στο μαχαιρόμυλο και πήραν τη μορφή πούδρας (-1000 $\mu\text{m}$ ). Το καύσιμο μας αποτελείται από μείγμα πυρηνόξυλου-ΑΣΑ, διότι τα δεύτερα σε αυτήν την κοκκομετρία δεν είναι εφικτό να τροφοδοτηθούν στον καυστήρα με σταθερούς ρυθμούς από μόνα τους, οπότε ο συνδυασμός τους επιλύει αυτό το πρόβλημα.

#### 3.4.2 Ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης

Για την εύρεση της ελάχιστης ταχύτητας ρευστοποίησης χρησιμοποιήθηκε η πειραματική συσκευή του κρύου μοντέλου. Εξ ορισμού, ως ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης καλείται η μετατροπή ενός στρώματος ακίνητων σωματιδίων σε

στρώμα αιωρούμενων σωματιδίων υπό την επενέργεια του αέρα σε αυτή, εφόσον η ταχύτητα του ρευστού (αέρα) ξεπεράσει μία κρίσιμη τιμή. Το στρώμα των αιωρούμενων σωματιδίων ονομάζεται ρευστοποιημένη κλίνη και συμπεριφέρεται ως ένα ρευστό με μεγάλο ιξώδες. Για την εύρεση της ελάχιστης ταχύτητας ρευστοποίησης διοχετεύτηκε αέρας από το κάτω μέρος της μοντελοποιημένης κλίνης (συσκευή κρούς μοντέλου) με χαμηλή ροή, μετρώντας παράλληλα την πτώση πίεσης. Όσο η ροή βρίσκεται σε χαμηλά επίπεδα, ο αέρας "ταξιδεύει" μεταξύ των πόρων που σχηματίζουν οι κόκκοι του αδρανούς, χωρίς να γίνεται εμφανές κάποιο άλλο φαινόμενο. Αυτή είναι η περίπτωση της σταθερής κλίνης. Με την αύξηση της ροής αέρα παρατηρείται αύξηση στη διαφορά πίεσης μεταξύ πυθμένα και κορυφής, έως ότου η ροή φτάσει σε τιμή η οποία είναι ικανή να υπερνικήσει το βάρος των κόκκων, προκαλώντας το φαινόμενο της ρευστοποίησης και επιφέροντας εξισορρόπηση στις τιμές της πίεσης. Οπότε, η ταχύτητα του αέρα που μετράται στο σημείο έναρξης του φαινομένου ονομάζεται ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης. Παρακάτω (Διάγραμμα 3.1), παρουσιάζεται η πτώσης πίεσης ( $N/m^2$ ), συναρτήσει της ταχύτητας του αέρα ( $m/s$ ), από το οποίο προσδιορίζεται η ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης ως η ταχύτητα στην οποία συμβαίνει αλλαγή κλίσης της ευθείας του διαγράμματος και είναι ίση με  $u_{min}=0,51\text{ m/s}$



**Διάγραμμα 3.1:** Προσδιορισμός της ελάχιστης ταχύτητας ρευστοποίησης ως συνάρτηση της πτώσης πίεσης διαμέσου στρώματος στερεών σωματιδίων.

### 3.4.3 Ρυθμοί τροφοδοσίας καυσίμου

Η επιλογή του ρυθμού τροφοδοσίας του καυσίμου έγινε εφόσον είχε προηγηθεί βαθμονόμηση για το κάθε δείγμα στη ρευστοστερεά κλίνη σε διαφορετικές τιμές ροής. Οι τιμές που επιλέχθηκαν ήταν 12-16g/min, αποσκοπώντας στην ομαλότερη μεταφορά του καυσίμου εντός του αντιδραστήρα, ώστε να επιτυγχάνεται βέλτιστη καύση.

### 3.4.4 Ρυθμός τροφοδοσίας αέρα

Ο ρυθμός τροφοδοσίας του αέρα επιλέγεται, ανάλογα με το αδρανές υλικό που χρησιμοποιείται, έτσι ώστε να είναι δυνατή η ρευστοποίηση του, ανάλογα με το είδος του υλικού που καίγεται το οποίο αντιδρά χημικά με τον αέρα και ανάλογα τις συνθήκες λειτουργίας εντός της κλίνης. Ο στοιχειομετρικός αέρας που αντιστοιχεί στο καύσιμο του πυρηνόξυλου υπολογίστηκε σε 5.11 m<sup>3</sup>/h για τροφοδοσία καυσίμου 1kg/h και για τα ΑΣΑ σε 3.58 m<sup>3</sup>/h. Τα δείγματα κάηκαν σε περίσσεια αέρα που κυμάνθηκε από 30-60%. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, ο ρυθμός τροφοδοσίας αέρα που επιλέχθηκε στα πειράματα για παροχή καυσίμου 12-16 g/min ήταν 4.78-7.85 m<sup>3</sup>/h για το Πυρηνόξυλο, 4.63-7.6 m<sup>3</sup>/h για το μείγμα OK/ΑΣΑ 90:10 και 4.5-7.4 m<sup>3</sup>/h για το μείγμα OK/ΑΣΑ 80:20.

### 3.4.5 Θερμοκρασία

Η επιλογή της θερμοκρασίας λειτουργίας της κλίνης έγινε βάση της θερμοκρασίας που χρησιμοποιούν οι μεγάλης κλίμακας εργοστασιακές κλίνες, με εύρος τιμών μεταξύ 800-900 °C. Το συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασιών είναι κατάλληλο για τη συλλογή της τέφρας χωρίς τον κίνδυνο αλλοίωσής της εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών. Ακόμα, οι συγκεκριμένες θερμοκρασίες είναι ιδανικές διότι αποφεύγονται σε μεγάλο βαθμό προβλήματα επισκωρίωσης, επικαθίσεων και συσσωματωμάτων. Η θερμοκρασία προθέρμανσης της κλίνης πριν από κάθε πείραμα ορίστηκε στους 700°C, και του αέρα της καύσης στους 550 °C.

### 3.4.6 Καθορισμός Απωλειών Θερμότητας και Απόδοσης Καύσης

Για την επίτευξη του υπολογισμού της απόδοσης της καύσης χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της απώλειας θερμότητας (heat-loss method). Κατ'αρχήν υπολογίστηκαν οι απώλειες θερμότητας οι οποίες οφείλονται στον άκαυστο άνθρακα στην ιπτάμενη τέφρα,  $L_{fa}$  (%) και την τέφρα του πυθμένα,  $L_{ba}$  (%).

Εν συνεχεία, η απώλεια θερμότητας λόγω ατελούς καύσης,  $L_{co}$  (%), υπολογίστηκε από τις εκπομπές CO βάσει της παρακάτω εξίσωσης:

$$L_{co} = \frac{CO}{CO_2 + CO}(\%) \quad (3.4)$$

Η συνολική απόδοση της καύσης υπολογίστηκε από τη διαφορά των απωλειών θερμότητας:

$$H = 100 - L_{CO} - L_{ba} - L_{fa} (\%) \quad (3.5)$$

## 3.5 Μεθοδολογία Διεξαγωγής των Πειραμάτων

Πριν την έναρξη κάθε πειράματος, αδειάζεται ο αντιδραστήρας από το αδρανές υλικό και τα σιλό από το υπόλειμμα καύσιμου λόγω προηγούμενου πειράματος. Επίσης αφαιρείται και καθαρίζεται ο διασκορπιστής και το δοχείο της τέφρας. Το αδρανές υλικό του προηγούμενου πειράματος που αφαιρέθηκε από την κλίνη, κοσκινίζεται για να αφαιρεθεί οτιδήποτε άκαυστο, λαμβάνεται δείγμα για μελλοντική ανάλυση, και ζυγίζεται ώστε να είναι γνωστή η ποσότητα αδρανούς υλικού που θα πρέπει να προστεθεί, ώστε να ξανά φτάσει στην απαραίτητη ποσότητα των 1000g. Πριν την επανεισαγωγή του αδρανούς υλικού εντός της κλίνης, γίνεται προσεκτικός καθαρισμός της με τη χρήση πεπιεσμένου αέρα, που διοχετεύεται από το πάνω και κάτω μέρος του αντιδραστήρα. Γίνεται έλεγχος αν τα θερμοστοιχεία βρίσκονται στη θέση τους, και εν συνεχεία κλείνεται ο αντιδραστήρας και επανασυναρμολογούνται τα μέρη που λύθηκαν για τον καθαρισμό του, και τοποθετείται ο κεραμοβάμβακας στις σωληνώσεις για ελαχιστοποίηση της απώλειας θερμότητας. Πριν την έναρξη ενός

καινούργιο πειράματος, τοποθετείται το δείγμα για ξήρανση σε φούρνο στους 80-100 °C για 24 ώρες, προτού τοποθετηθεί στα σιλό. Τελευταίο βήμα της προετοιμασίας είναι η βαθμονόμηση της παροχής στο σιλό τροφοδοσίας.

Στο στάδιο διεξαγωγής της πειραματικής διαδικασίας ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία: Αρχικά με την κατάλληλη ρύθμιση των ηλεκτρικών αντιστάσεων προθερμάνθηκε η κλίνη. Η παροχή του καυσίμου ρυθμίστηκε μέσω Inverter που ελέγχει τον κοχλία τροφοδοσίας (12-16 g/min), ενώ ο λόγος  $\lambda$  της περίσσειας αέρα κυμάνθηκε με τη βοήθεια ενός ροόμετρου μεταξύ των τιμών  $\lambda=1.3$  και  $\lambda=1.6$ . Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν στην προκειμένη περίπτωση σε τροφοδοσία αέρα μεταξύ 4.5 έως 7.85 m<sup>3</sup>/h αναλόγως πιο από τα τρία καύσιμα μελετούνταν σε κάθε πειραματική διαδικασία. Η θερμοκρασία στην κλίνη λόγω καύσης αυξήθηκε και με τη συμπλήρωση 20 λεπτών περίπου από την έναρξη του πειράματος, η κλίνη είχε φτάσει σε σταθερή κατάσταση (steady state), όπου σε αυτό το στάδιο πλέον οι μοναδικές ρυθμίσεις που έγιναν ήταν στην παροχή του αέρα σε περίπτωση κάποιας αυξομειώσης. Μετά το πέρας της πειραματικής διαδικασίας, άρχισε το στάδιο της ψύξης της κλίνης, αφήνοντας ανοιχτή τη παροχή του αέρα για διατήρηση της ρευστοποίησης. Την επόμενη μέρα, όπου η κλίνη είχε φθάσει σε θερμοκρασία δωματίου, αποσυναρμολογείτο η βάση της κλίνης και αφαιρείτο προσεκτικά ο εσωτερικός κύλινδρος του πυρήνα, για τη συλλογή του αδρανούς υλικού. Επόμενο στάδιο ήταν η ζύγισή του για έλεγχο πιθανής απώλειας και λήψη αντιπροσωπευτικού δείγματος για μελλοντικές αναλύσεις. Εν συνεχεία, αφαιρούνταν η τέφρα από το δοχείο συλλογής, ζυγιζόταν και φυλασσόταν για μελλοντικές εργαστηριακές αναλύσεις. Τέλος, από το σύστημα καταγραφής των εκπομπών της καύσης, το οποίο ήταν συνδεδεμένο με έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή λαμβάνονταν τα δεδομένα σε μορφή αρχείων excel.

## 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων στα αντιπροσωπευτικά δείγματα, καθώς και τα αποτελέσματα που ελήφθησαν κατά την πειραματική διαδικασία (Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>) παρουσιάζονται αναλυτικά σε αυτό το κεφάλαιο. Ο χημικός χαρακτηρισμός περιλαμβάνει την προσεγγιστική ανάλυση, τη στοιχειακή ανάλυση, τον προσδιορισμό της θερμογόνου, τη χημική και την ορυκτολογική ανάλυση της τέφρας.

### 4.1 Χημικές Αναλύσεις Αρχικών Δειγμάτων

#### 4.1.1 Προσεγγιστική ανάλυση

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

Δείγμα	Υγρασία*	Πτητικά	Μόνιμος Άνθρακας	Τέφρα
Πυρηνόξυλο	5.3	73.6	19.3	7.1
ΑΣΑ	7.2	67.6	3.5	28.9

\*αεροξηραθέν

Στον Πίνακα 4.1, παρουσιάζεται η προσεγγιστική ανάλυση αντιπροσωπευτικών δειγμάτων Πυρηνόξυλου και ΑΣΑ. Και τα δυο καύσιμα παρουσιάζουν υψηλή περιεκτικότητα σε πτητικά, κάτι το οποίο τα κατατάσσει σε καύσιμα υψηλής αντιδραστικότητας, τα οποία συμβάλλουν θετικά στη διεργασία της καύσης και στη θερμογόνο δύναμη. Ακόμα, το Πυρηνόξυλο περιέχει μικρή ποσότητα τέφρας και υψηλή ποσότητα μόνιμου άνθρακα συμβάλλοντας θετικά στη διεργασία της καύσης, ενώ αντιθέτως στα ΑΣΑ περιέχεται υψηλή ποσότητα τέφρας και χαμηλή ποσότητα μόνιμου άνθρακα επιδρώντας αρνητικά στη διεργασία της καύσης. Οι αυξημένες ποσότητες υγρασίας μειώνουν τη θερμική αποδοτικότητα των καυσίμων και αυξάνουν τις εκπομπές CO και CO<sub>2</sub>. Και τα δύο καύσιμα αεροξηράνθηκαν, ώστε η υγρασία να κυμανθεί σε χαμηλά επίπεδα και να μειωθεί η αρνητική επίδρασή της κατά τη διαδικασία της καύσης.

#### 4.1.2 Στοιχειακή ανάλυση και θερμογόνος δύναμη

**Πίνακας 4.2:** Στοιχειακή ανάλυση (επί ξηρού %) δειγμάτων βιομάζας.

Δείγμα	C	H	N	S	O	Cl	A.Θ.Δ (MJ/kg)
Πυρηνόξυλο	49.7	6.6	2.0	0.33	34.3	0.06	20.8
ΑΣΑ	35.3	4.8	1.6	0.28	26.4	0.31	14.7

Στον Πίνακα 4.2, το πυρηνόξυλο εμφανίζει μια θερμογόνο δύναμη σε σχετικά υψηλά επίπεδα, εξαιτίας κυρίως της υψηλής περιεκτικότητας του σε πτητικά, της χαμηλής ποσότητας τέφρας και της υψηλής περιεκτικότητας στοιχειακού άνθρακα. Το πυρηνόξυλο εμφανίζει λίγο μεγαλύτερη συγκέντρωση αζώτου σε σύγκριση με τα ΑΣΑ, οπότε οι εκπομπές ενώσεων του αζώτου κατά την καύση αναμένονται σχετικά υψηλότερες.

Όσον αφορά τις εκπομπές θείου, και τα δύο καύσιμα εμφανίζουν ασήμαντες περιεκτικότητες σε στοιχειακό θείο, γεγονός που μεταφράζεται σε αμελητέες ρυπογόνες εκπομπές θείου.

Τα επίπεδα του χλωρίου εμφανίζουν πολύ μικρή περιεκτικότητα στο δείγμα του πυρηνόξυλου, αλλά στο δείγμα των ΑΣΑ παρουσιάζεται αξιοσημείωτη συγκέντρωση, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε πιθανές ανεπιθύμητες εκπομπές και διάβρωση εντός της κλίνης κατά τη διάρκεια της καύσης.



#### 4.1.3 Ορυκτολογική και χημική ανάλυση τέφρας

Ο Πίνακας 4.3 παρουσιάζει την ορυκτολογική ανάλυση της τέφρας του πυρηνόξυλου και των ΑΣΑ σε θερμοκρασία καύσης 550 °C (Ακτινοδιαγράμματα 1-2 παράρτημα)

Όπως είναι εμφανές, η τέφρα του πυρηνόξυλου εμφανίζει μεγάλη συγκέντρωση φαιρχιλιτίτη, ο οποίος είναι και ο βασικός λόγος της μεγάλης περιεκτικότητας της τέφρας σε Κ. Ωστόσο, και τα ορυκτά αρκανίτης, συλβίνης και μικροκλινής συνεισφέρουν στη συγκέντρωση καλίου, αν και σε λιγότερο ποσοστό, καθώς εμφανίζουν χαμηλότερη εμφάνιση εντός της τέφρας του πυρηνόξυλου. Τέλος, μέτρια ποσότητα παρουσιάζουν τα ορυκτά ασβεστίτης, υδροξυαπατίτης, χαλαζίας, δολομίτης και χαμηλότερη ο ανυδρίτης.

Ο χαλαζίας και ο ασβεστίτης είναι τα δύο ορυκτά που κυριαρχούν στην τέφρα των ΑΣΑ. Η υψηλή περιεκτικότητα σε ασβέστιο δικαιολογείται κυρίως από την υψηλή περιεκτικότητα ασβεστίτη και τις μικρές περιεκτικότητες στα ορυκτά ανυδρίτη, υδροξυαπατίτη και πορτλαντίτη. Τέλος, σε χαμηλή ποσότητα στην τέφρα των ΑΣΑ εντοπίζονται τα ορυκτά μικροκλινής, συλβίνης, μοσχοβίτης, αφθιταλίτης, τάλκης και μαγνησίτης.

**Πίνακας 4.3:** Ορυκτολογική ανάλυση τέφρας 550 °C.

ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΕΣ ΦΑΣΕΙΣ	ΠΥΡΗΝΟΞΥΛΟ	ΑΣΑ
Χαλαζίας $\text{SiO}_2$	++	+++
Ασβεστίτης $\text{CaCO}_3$	++	+++
Ανυδρίτης $\text{CaSO}_4$	+	+
Περίκλαστο $\text{MgO}$	+	
Αιματίτης $\text{Fe}_2\text{O}_3$	+	
Φαιρχλιντίτης $\text{K}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$	+++	
Υδροξυαπατίτης $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$	++	+
Δολομίτης $(\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2)$	++	
Μικροκλινής $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$	+	+
Νταουζονίτης $\text{NaAl}(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$	+	
Συλβίνης $\text{KCl}$	+	+
Αρκανίτης $\text{K}_2\text{SO}_4$	++	
Πορτλαντίτης $\text{Ca}(\text{OH})_2$		+
Αφθιταλίτης $\text{NaK}_3(\text{SO}_4)_2$		+
Μοσχοβίτης $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$		+
Τάλκης $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$		+
Μαγνησίτης $\text{MgCO}_3$		+

(+) Περιεκτικότητα τέφρας σε ορυκτό: (+) χαμηλή, (++) μέτρια, (+++) υψηλή

**Πίνακας 4.4:** Χημική ανάλυση τέφρας 550 °C σε κύρια οξείδια (% κ.β)

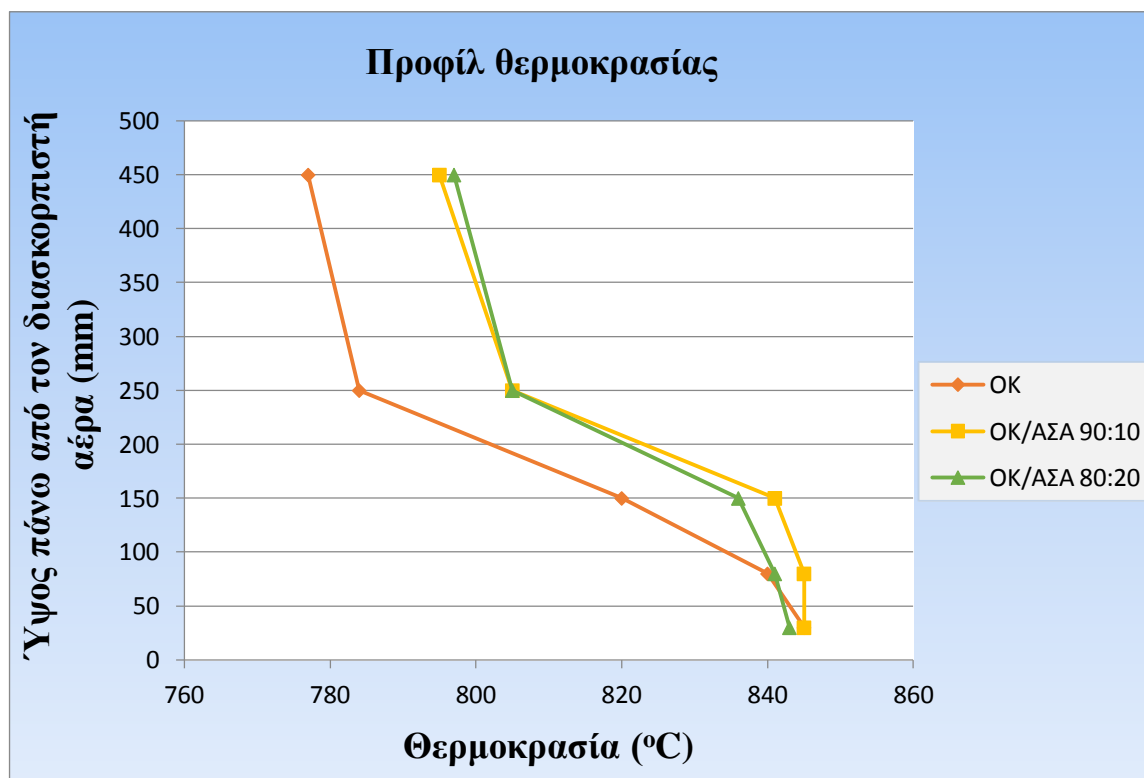
Δείγμα	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Α.Π (1050°C)
OK	8.3	2.6	1.8	22.3	6.5	3.5	21.3	-	-	0.01	10.3	23.40
ΑΣΑ	28.6	2.2	1.6	26.3	1.8	0.4	2.8	2.9	0.09	0.04	9.6	23.6

Ο Πίνακας 4.4 εμφανίζει τη χημική ανάλυση της τέφρας σε κύρια οξείδια. Όσον αφορά τα ΑΣΑ, εμφανίζουν αυξημένη περιεκτικότητα στην τέφρα τους σε οξείδια του Ca, Si, P και χαμηλότερη σε K και Mg. Η αυξημένη ποσότητα Si εξηγείται από τη μεγάλη περιεκτικότητα χαλαζία κατά την ορυκτολογική μελέτη, ενώ του Ca από τα ορυκτά ασβεστίτη, υδροξυαπατίτη, πορτλαντίτη και ανυδρίτη. Τα Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> και Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> παρουσιάζουν χαμηλές τιμές, το οποίο σημαίνει ότι τα συστατικά αυτά εμπεριέχονταν στη χημική δομή των δειγμάτων και δεν είναι αποτέλεσμα προσχώρησης αργιλικών ή εδαφικών υλικών στα δείγματα. Το SO<sub>3</sub> εμφανίζει αμελητέες τιμές, άρα αναμένονται χαμηλές εκπομπές κατά την καύση των ΑΣΑ. Το οξείδιο του ασβεστίου εμφανίζεται σε μεγάλο ποσοστό στο δείγμα του πυρηνόξυλου (OK), το οποίο μαζί με τα P, K και Mg αποτελούν θρεπτικά συστατικά για τα φυτά και είναι παράγοντες που μπορούν να συμβάλλουν στη βελτίωση εδαφών. Η χαμηλή περιεκτικότητα σε MgO, ισοδυναμεί με χαμηλή περιεκτικότητα ξύλου και φύλλων στο δείγμα ΑΣΑ, καθώς το Mg είναι βασικό συστατικό της χλωροφύλλης, εμπεριέχεται σε λιπάσματα και είναι ευδιάλυτο στο νερό, ενώ η εμφάνιση P πιθανολογείται ότι οφείλεται σε αυξημένη ποσότητα υπολειμμάτων από κρέας και κόκκαλα εντός του δείγματος.

## **4.2 Αποτελέσματα Καύσης Για Σταθερή Τροφοδοσία Καυσίμου Και Περρίσεια Αέρα.**

### **4.2.1 Προφίλ θερμοκρασίας, εκπομπές ρύπων και απόδοση.**

Στο Διάγραμμα 4.1 απεικονίζεται τα προφίλ θερμοκρασιών του Πυρηνόξυλου και μειγμάτων αυτού με ΑΣΑ κατά μήκος του καυστήρα, για τροφοδοσία καυσίμου  $F=12\text{g/min}$  και λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.5$ . Όπως παρατηρείται στο διάγραμμα, και τα τρία καύσιμα (OK, OK/ΑΣΑ 90:10, OK/ΑΣΑ 80:20) επιτυγχάνουν τη μέγιστη θερμοκρασία 30 mm πάνω από το διασκορπιστή αέρα  $845^{\circ}\text{C}$ ,  $845^{\circ}\text{C}$ ,  $843^{\circ}\text{C}$ , αντίστοιχα. Αυτό είναι αποτέλεσμα της πιθανής καύσης του μεγαλύτερου ποσοστού των πτητικών, που εμπεριέχονται εντός των καυσίμων, κατά την είσοδο τους στον αντιδραστήρα. Στο προφίλ θερμοκρασίας του πυρηνόξυλου παρατηρείται ότι μετά τα 30mm και έως τα 250 mm η θερμοκρασία μειώνεται σχετικά γρήγορα ( $784^{\circ}\text{C}$ ), πιθανότατα λόγω της καύσης του συνόλου των πτητικών εντός της κλίνης. Όσον αφορά τα μείγματα OK/ΑΣΑ 90:10 και OK/ΑΣΑ 80:20, εμφανίζουν ένα σχεδόν ομοιόμορφο προφίλ μεταξύ τους, αλλά σε αντίθεση με το σκέτο πυρηνόξυλο, η θερμοκρασία τους παρέμεινε ομοιόμορφα υψηλή έως τα 150mm ( $841^{\circ}\text{C}$  και  $836^{\circ}\text{C}$ , αντίστοιχα) και παρέμεινε σε υψηλά επίπεδα έως το ελεύθερο όριο του καυστήρα. Η υψηλή θερμοκρασία καθ'όλη τη διάρκεια της καύσης τους αποδίδεται στο χαμηλότερο ρυθμό έκλυσης των πτητικών, τα οποία συνέχισαν την αντίδραση τους με το οξυγόνο και στην αέρια φάση του αντιδραστήρα.

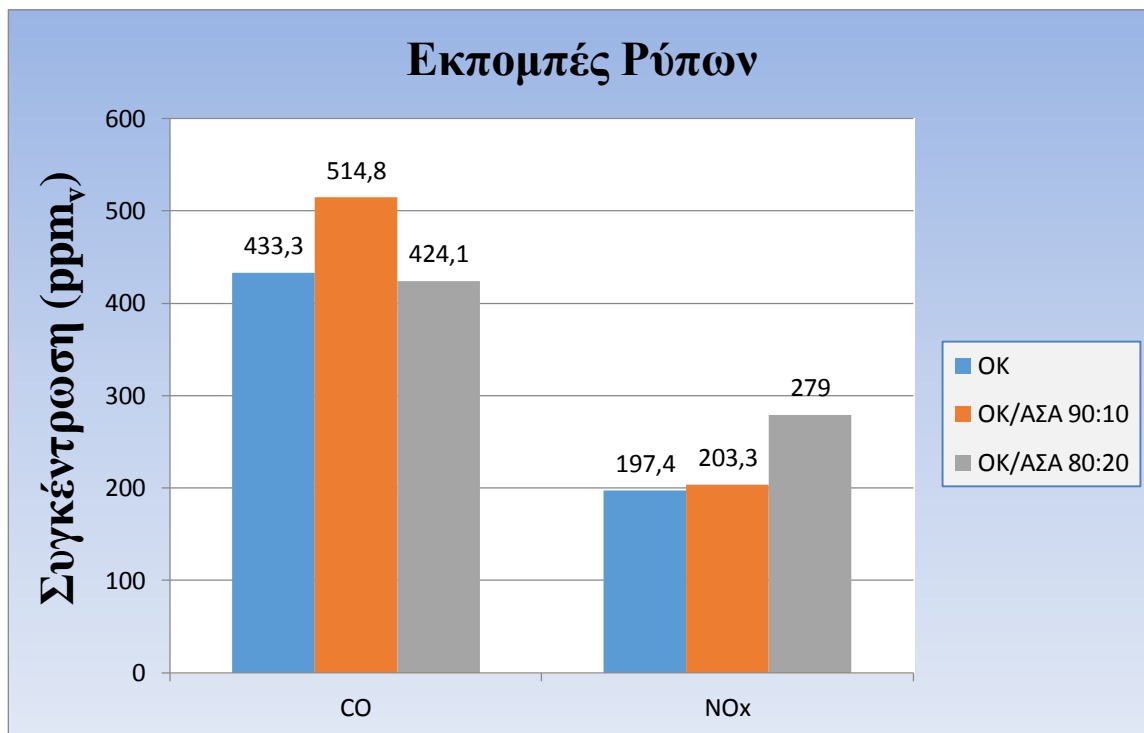


**Διάγραμμα 4.1:** Προφίλ θερμοκρασιών OK και OK/ΑΣΑ (90:10, 80:20) για τροφοδοσία καυσίμου  $F=12 \text{ g/min}$  και λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.5$ .

Μια σύγκριση μεταξύ του μέσου όρου των εκπομπών  $\text{CO}$  και  $\text{NO}_x$ , που μετρήθηκαν κατά την καύση των δειγμάτων υπό σταθερό ρυθμό τροφοδοσίας  $12 \text{ g/min}$  και λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.5$ , γίνεται στο Διάγραμμα 4.2. Λόγω της ελάχιστης περιεκτικότητας των δειγμάτων σε θείο, οι εκπομπές  $\text{SO}_2$  ήταν αμελητέες ( $<20 \text{ ppm}$ ) και γι' αυτό δεν εμφανίζονται στο διάγραμμα.

Η περιεκτικότητα του  $\text{CO}$  στα καυσαέρια της καύσης του Πυρηνόξυλου είναι χαμηλή και δεν υπερβαίνει τα επιτρεπτά όρια σύμφωνα με τα Ελληνικά πρότυπα [68]. Το ίδιο παρατηρείται και για τα μείγματα OK/ΑΣΑ 90:10 και OK/ΑΣΑ 80:20.

Οι εκπομπές  $\text{NO}_x$  των τριών δειγμάτων βρίσκονται εκτός των επιτρεπτών ορίων για τα Ελληνικά πρότυπα για μικρές μονάδες ( $200 - 350 \text{ mg/Nm}^3$ ) [68]. Γενικά, τα μίγματα OK/ΑΣΑ έχουν υψηλότερες εκπομπές  $\text{NO}_x$  σε σχέση με το πυρηνόξυλο, παρόλο που η περιεκτικότητα του πυρηνόξυλου σε N είναι μεγαλύτερη. Αυτό πιθανότατα να οφείλεται στο υψηλότερο ποσοστό πτητικής ύλης του πυρηνόξυλου, η οποία δημιουργεί μια πιο αναγωγική ατμόσφαιρα εντός του καυστήρα. Τρόποι για να μειωθούν περαιτέρω οι εκπομπές των οξειδίων του αζώτου είναι η σταδιακή εισαγωγή αέρα στο σύστημα καύσης, η επανακυκλοφορία των καυσαερίων και η επεξεργασία των απαερίων.



**Διάγραμμα 4.2:** Εκπομπές αέριων ρύπων για τροφοδοσία καυσίμου  $F=12 \text{ g/min}$  και λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.5$ .

Στον Πίνακα 4.5 παρουσιάζονται τα προφίλ της θερμοκρασίας, οι εκπομπές ρύπων, οι απώλειες θερμότητας και η απόδοση των καυσίμων πυρηνόξυλο/ΑΣΑ για τις αναλογίες 100/0, 90/10 και 80/20, αντίστοιχα. Η παρουσίαση των παρακάτω τιμών είναι αποτέλεσμα σταθερής τροφοδοσίας καυσίμου  $12 \text{ g/min}$  και λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.5$  σε καυστήρα ρευστοποιημένης κλίνης. Η απόδοση των τριών καυσίμων κυμάνθηκε σε πολύ υψηλά επίπεδα, από 99.45% έως 99.54%, τιμές που οφείλονται στις μικρές απώλειες θερμότητας. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, οι κύριες απώλειες θερμότητας προέκυψαν από την ατελή καύση των καυσαερίων στο ελεύθερο όριο του καυστήρα ( $L_{co}$ ). Οι απώλειες θερμότητας που προέκυψαν από τα ποσοστά άκαυστου άνθρακα στις τέφρες πυθμένα ( $L_{ba}$ ) ήταν υψηλότερες από εκείνες στις ιπτάμενες τέφρες ( $L_{fa}$ ) των δειγμάτων, αλλά παρέμειναν ήσσονος σημασίας σε σχέση με τις  $L_{co}$ .

**Πίνακας 4.5:** Εκπομπές, απώλειες και απόδοση για τροφοδοσία καυσίμου  $F=12$  g/min και λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.5$ .

Δείγμα	Θερμοκρασία (°C)					Εκπομπές(ppm <sub>v</sub> )			Απώλειες (%)			Απόδοση (%)
	Απόσταση από διασκορπιστή(mm)											
	30	80	150	250	450	CO	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	Lco	Lba	Lfa	
OK	845	840	820	784	777	433	-	197	0.47	-	-	99.53
OK/ΑΣΑ 90:10	845	845	841	805	795	515	1	203	0.55	0.21	0.19	99.45
OK/ΑΣΑ 80:20	843	841	836	805	797	424	-	279	0.46	0.011	0.009	99.54

#### 4.2.2 Χαρακτηρισμός ιπτάμενης τέφρας και τέφρας πυθμένα.

Η περιεκτικότητα της τέφρας (Ιπτάμενης και Πυθμένα) των καυσίμων σε ορυκτά, για τροφοδοσία καυσίμου 12 g/min και περίσσεια αέρα  $\lambda=1.4$ , παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.6 (Ακτινοδιαγράμματα 3-8 παράρτημα).

Στις τέφρες του πυρηνόξυλου κυριαρχούν κυρίως τα ορυκτά του χαλαζία και του ασβεστίτη, τα οποία είναι και ο βασικός λόγος της μεγάλης περιεκτικότητας της τέφρας σε Ca και Si αντίστοιχα. Αρκετή συνεισφορά σε Ca προσέφεραν και τα ορυκτά ανυδρίτης, δολομίτης και υδροξυαπατίτης, τα οποία εντοπίζονται σε χαμηλότερο ποσοστό. Ωστόσο, ο υδροξυαπατίτης είναι ο λόγος για τον οποίο εντοπίζεται φώσφορος στην τέφρα και η εμφάνισή του οφείλεται στη χρήση λιπασμάτων στη γεωργία [69]. Ακόμα, εντοπίζονται σε υψηλή περιεκτικότητα ο φαιρχιλντίτης και ο αρκανίτης, δικαιολογώντας έτσι την υψηλή περιεκτικότητα της τέφρας σε K, ενώ σε μικρότερο ποσοστό εντοπίζονται ο σylvίτης και ο μικροκλινής.

Στην τέφρα πυθμένα και την ιπτάμενη του μείγματος OK/ΑΣΑ 90:10, τα μοναδικά ορυκτά που εντοπίζονται σε σημαντική ποσότητα είναι ο χαλαζίας και ο ασβεστίτης. Αξίζει να σημειωθεί ότι το μίγμα OK/ΑΣΑ 90:10 περιέχει στην τέφρα του



περισσότερο Ca από την τέφρα του σκέτου πυρηνόξυλου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι με την εισαγωγή ΑΣΑ στο καύσιμο, η τέφρα εκτός από τα ορυκτά που εμφάνισε στο δείγμα του πυρηνόξυλου, εμφάνισε επίσης και μικρή ποσότητα υδροξειδίου του ασβεστίου και μοντεσιλίτη. Δύο ακόμα νέα ορυκτά που εμφανίστηκαν στις τέφρες του μείγματος είναι ο αφθιταλίτης και ο εψωμίτης.

Ο ασβεστίτης και ο χαλαζίας είναι τα δύο ορυκτά που κυριαρχούν και στο μείγμα OK/ΑΣΑ 80:20. Η βασική διαφορά του συγκεκριμένου μείγματος με αυτό του OK/ΑΣΑ 90:10 είναι ότι περιέχει ίχνη γουιτλοκίτη μαγνησιούχου, καθώς και μεγαλύτερη περιεκτικότητα ασβεστίτη και φαιρχιλνίτη, δικαιολογώντας έτσι τη μεγαλύτερη συγκέντρωση Ca στην τέφρα.

Στον Πίνακα 4.7 και στο Διάγραμμα 4.3 παρουσιάζεται η χημική ανάλυση της ιπτάμενης τέφρας των τριών καυσίμων για τροφοδοσία καυσίμου 12 g/min. Παρατηρείται ότι η τέφρα του πυρηνόξυλου περιέχει αρκετό Ca, K και λιγότερο P και Mg. Ωστόσο, τη μεγαλύτερη παρουσία την έχει το Si, λόγω παράσυρσης υλικού της κλίνης στον κυκλώνα. Οι τέφρες των δύο μειγμάτων δε διαφέρουν σημαντικά ως προς αυτήν του πυρηνόξυλου, εκτός από το γεγονός ότι τα μείγματα παρουσιάζουν υψηλότερη περιεκτικότητα σε Ca, λόγω πιθανόν ξυλωδών υλικών εντός του δείγματος ΑΣΑ, καθώς και μειωμένη περιεκτικότητα σε K, το οποίο ευρίσκεται σε χαμηλότερα ποσοστά στο δείγμα ΑΣΑ.

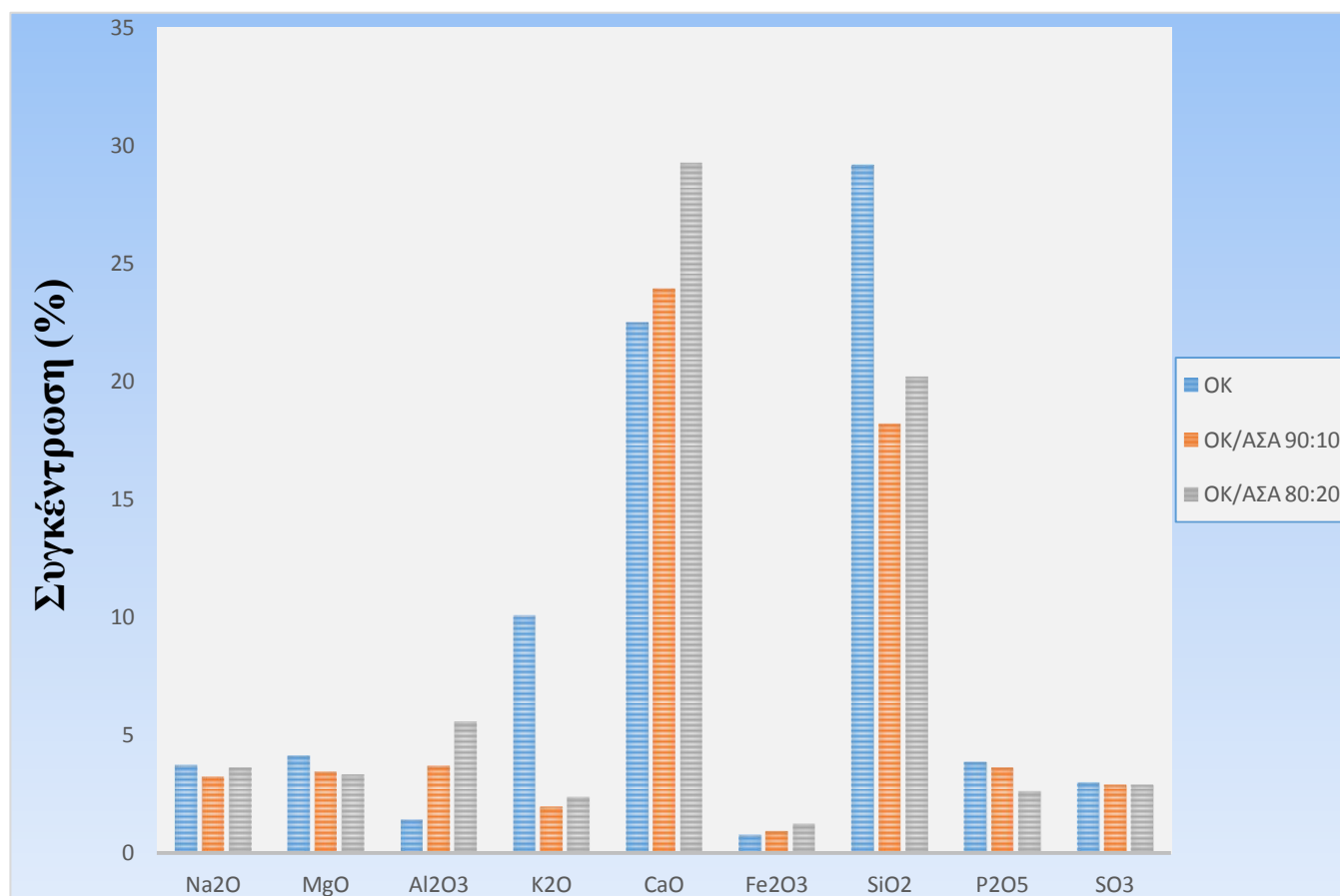
**Πίνακας 4.6:** Ορυκτολογική ανάλυση της τέφρας των καυσίμων για τροφοδοσία  $F=12 \text{ g/min}$  και λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.4$ .

Ορυκτολογικές φάσεις	Υλικό Κλίνης	OK		OK/ΑΣΑ 90:10		OK/ΑΣΑ 80:20	
		Ιπτάμενη Τέφρα	Τέφρα Πυθμένα	Ιπτάμενη Τέφρα	Τέφρα Πυθμένα	Ιπτάμενη Τέφρα	Τέφρα Πυθμένα
Ασβεστίτης ( $\text{CaCO}_3$ )		++	++	++	++	+++	++
Χαλαζία ( $\text{SiO}_2$ )	+	+++	++	++	++	++	++
Ανυδρίτης ( $\text{CaSO}_4$ )		++	+	+	+	+	+
Υδροξυαπατίτης [ $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$ ]		+	++	+	+	+	+
Αιματίτης ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )		+	+	+	+	+	+
Αρκανίτης ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ )		++	++	+		+	
Περίκλαστο ( $\text{MgO}$ )		+	+	+	+	+	+
Φαιρχιλντίτης [ $\text{K}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$ ]		++	+++	+	+	++	+
Συλβίτης ( $\text{KCl}$ )		+	+	+	+	+	+
Μικροκλινής [ $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ]	+	+	+	+	+	+	+
Νταφσονίτης [ $\text{NaAl}(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$ ]		+	+				
Αλβίτης Low [ $\text{Na}(\text{AlSi}_2\text{O}_8)$ ]	+++	+		+	++	+	++
Μοσχοβίτης [ $(\text{H,K})\text{AlSiO}_4$ ]	+	+		+	+	+	+
Εψωμίτης ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ )				+	+	+	+
Αφθιταλίτης [ $\text{NaK}_3(\text{SO}_4)_2$ ]				+	+	+	+
Υδροξείδιο του ασβεστίου [ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ]				+	+	+	+
Μοντεσιλίτης ( $\text{CaMgSiO}_4$ )				+	+	+	+
Γουιτλοκίτης Μαγνησιούχος [ $(\text{Ca,Mg})_3(\text{PO}_4)_2$ ]						+	
Δολομίτης $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$			++				

(+) Περικτικότητα τέφρας σε ορυκτό: (+) χαμηλή, (++) μέτρια, (+++) υψηλή

**Πίνακας 4.7:** Χημική ανάλυση ιπτάμενης τέφρας σε βασικά οξείδια για τροφοδοσία F=12 g/min (%).

Δείγμα	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>
OK	3.7	4.1	1.4	10.1	22.5	0.11	0.06	0.77	29.2	3.9	3.0
OK/ΑΣΑ 90:10	3.2	3.5	3.7	2.0	24.0	0.10	0.04	0.93	18.2	3.6	2.9
OK/ΑΣΑ 80:20	3.6	3.3	5.6	2.4	29.2	0.14	0.04	1.20	20.2	2.6	2.9

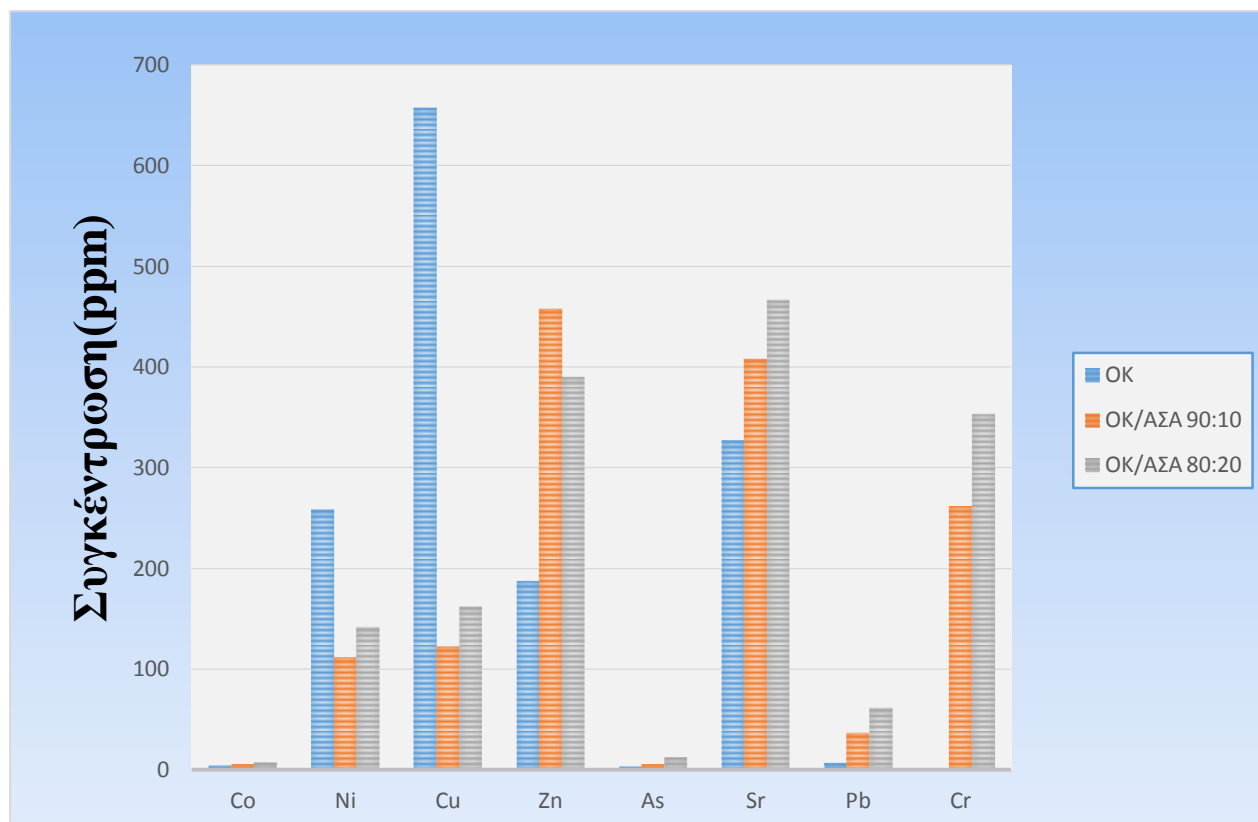


**Διάγραμμα 4.3:** Συγκέντρωση βασικών οξειδίων στην ιπτάμενη τέφρα για τροφοδοσία καυσίμου F=12 g/min.

Στον Πίνακα 4.8 και στο Διάγραμμα 4.4 παρουσιάζονται οι χημικές αναλύσεις της ιπτάμενης τέφρας σε ιχνοστοιχεία για τροφοδοσία 12 g/min. Όπως είναι εμφανές, το πυρηνόξυλο εμφανίζει αυξημένες τιμές στα βαρέα μέταλλα Ni, Cu, και Zn, ενώ για τα Pb και Cr εντοπίζονται μόνο ίχνη. Η υψηλή συγκέντρωση σε Sr πιθανόν να οφείλεται σε πιθανή ρύπανση του δείγματος από το έδαφος. Τέλος, το τοξικό As εμφανίζεται σε ασήμαντη περιεκτικότητα. Όσον αφορά τα δύο μείγματα OK/ΑΣΑ 90:10 και 80:20, τα στοιχεία As και Pb αυξήθηκαν με την παράλληλη αύξηση του ποσοστού ΑΣΑ εντός των μειγμάτων. Επίσης, τα Ni και Cu εμφανίζουν χαμηλότερη συγκέντρωση στα μείγματα λόγω της χαμηλότερης συγκέντρωσης τους στα ΑΣΑ, ενώ αντιθέτως τα Zn, Sr, και Cr εμφανίζουν υψηλότερη συγκέντρωση στα μείγματα λόγω πάλι της αυξημένης συγκέντρωσης τους στα ΑΣΑ. Σε περίπτωση που οι ιπτάμενες τέφρες των τριών καυσίμων χρησιμοποιηθούν στη γεωργία, όλα τα βαρέα μέταλλα που εντοπίζονται σε αυτές βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων για τα Ελληνικά πρότυπα [70].

**Πίνακας 4.8:** Χημική ανάλυση ιπτάμενης τέφρας σε ιχνοστοιχεία για τροφοδοσία F=12g/min (ppm).

Δείγμα	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Pb	Cr
<b>OK</b>	5	259	657	188	4	327	7	-
<b>OK/ΑΣΑ 90:10</b>	6	112	123	458	6	408	37	262
<b>OK/ΑΣΑ 80:20</b>	8	142	162	390	13	466	62	353

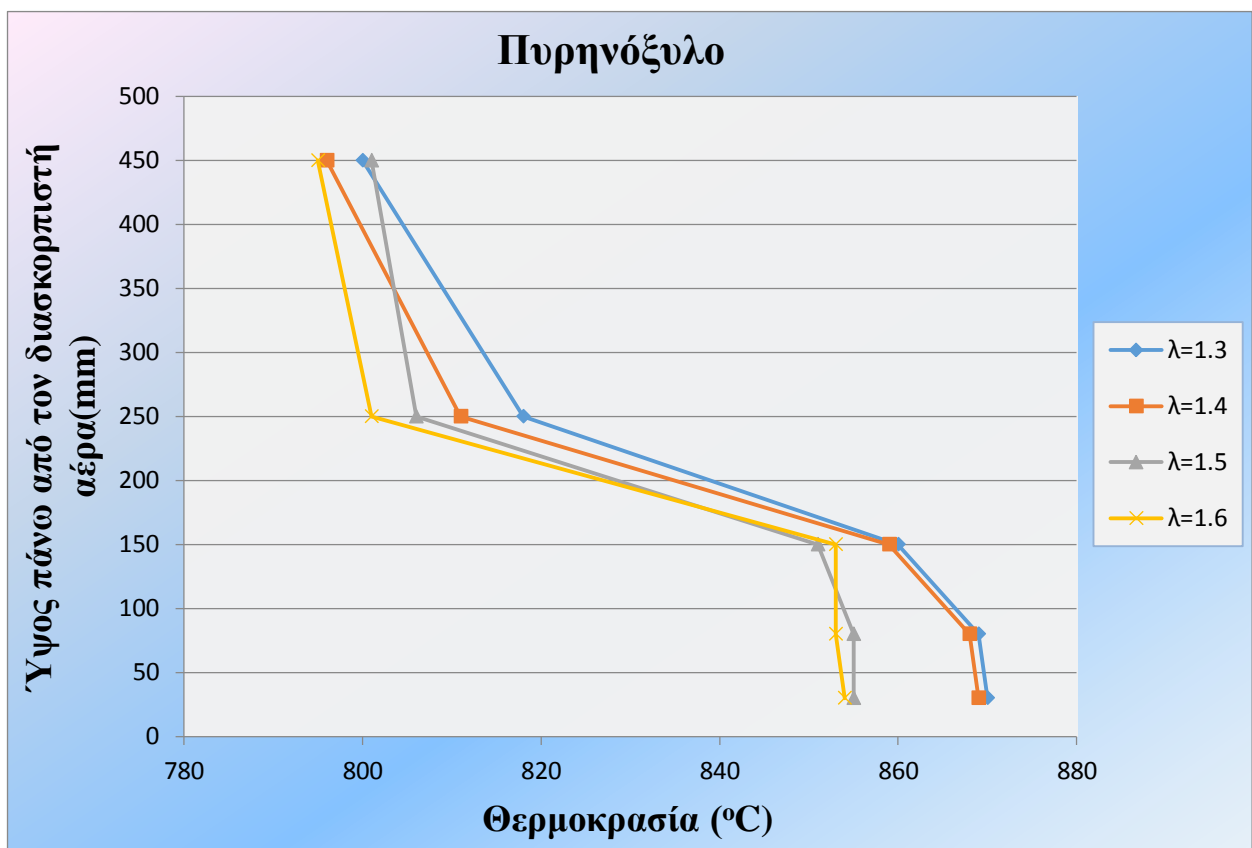


**Διάγραμμα 4.4:** Συγκέντρωση ιχνοστοιχείων στην ιπτάμενη τέφρα για τροφοδοσία καυσίμου  $F=12 \text{ g/min}$ .

### 4.3 Επίδραση της Περίσσειας του Αέρα στις Χαρακτηριστικές Παραμέτρους Καύσης.

#### 4.3.1 Προφίλ θερμοκρασίας, εκπομπές ρύπων και απόδοση.

Στο Διάγραμμα 4.5, παρουσιάζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας καύσης του Πυρηνόξυλου εντός της κλίνης για διαφορετικές τιμές  $\lambda$  και σταθερή τροφοδοσία καυσίμου  $F=14 \text{ g/min}$ . Όπως είναι εμφανές, και για τις τέσσερις τιμές  $\lambda$ , τα προφίλ των θερμοκρασιών ακολουθούν το ίδιο μοτίβο, αλλά με τις τιμές της θερμοκρασίας να μειώνονται κατά την αντίστοιχη αύξηση του λόγου περίσσειας αέρα. Συγκεκριμένα, για αύξηση του στοιχειακού αέρα από 30% σε 60% η θερμοκρασία της κλίνης μειώθηκε κατά  $16^\circ\text{C}$ . Γενικά, παρόλη την αύξηση της ροής του αέρα, η ψύξη εντός της κλίνης δεν έφτασε σε υψηλά επίπεδα, με αποτέλεσμα το μεγαλύτερο ποσοστό του καυσίμου να καεί σε υψηλές θερμοκρασίες ( $854\text{-}870^\circ\text{C}$ ) και να μειωθεί έως  $\approx 70^\circ\text{C}$  προς το ελεύθερο όριο.

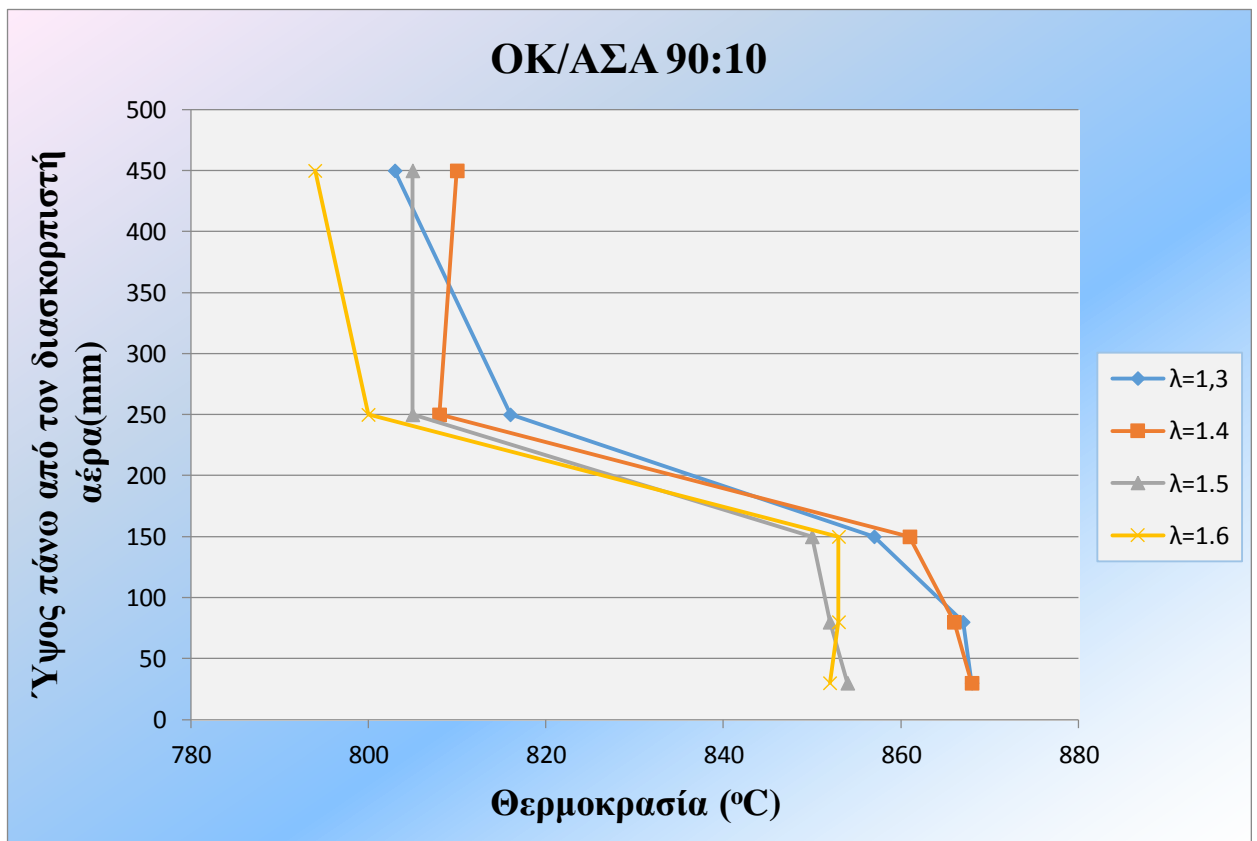


**Διάγραμμα 4.5:** Προφίλ θερμοκρασίας Πυρηνόξυλου συναρτήσει του λόγου περίσσειας αέρα και για τροφοδοσία  $F=14 \text{ g/min}$ .

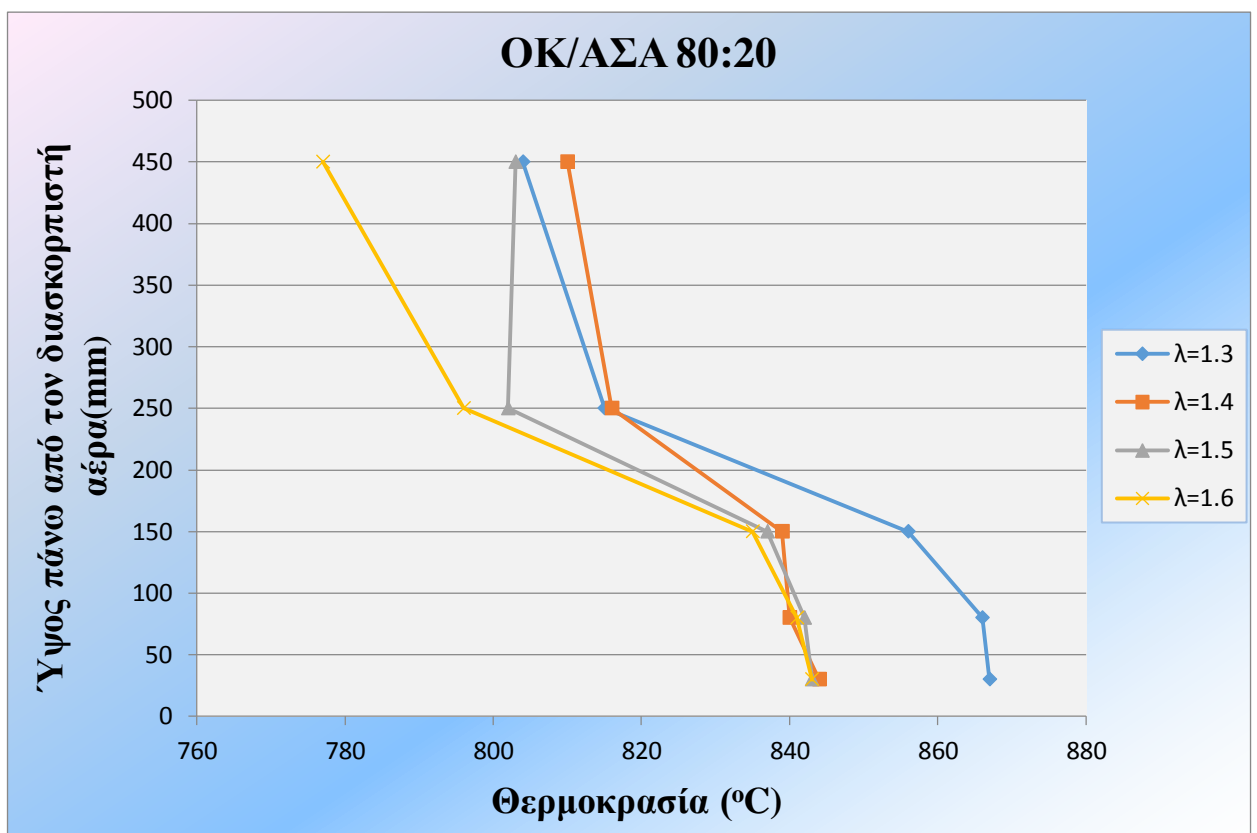
Στο Διάγραμμα 4.6, παρουσιάζονται τα αντίστοιχα προφίλ θερμοκρασιών για διαφορετικές τιμές  $\lambda$  και σταθερή τροφοδοσία καυσίμου  $F=14 \text{ g/min}$  για μείγμα καυσίμου OK/ΑΣΑ 90:10. Όπως με το δείγμα του πυρηνόξυλου και εδώ τα προφίλ των θερμοκρασιών ακολουθούν ομοιόμορφη πορεία και για τις τέσσερις τιμές του  $\lambda$ . Η αύξηση της περίσσειας του αέρα από 30% σε 60% επέφερε μια μικρή ψύξη έως  $16^\circ\text{C}$  εντός της κλίνης. Ωστόσο, και εδώ το μεγαλύτερο μέρος του καυσίμου κάηκε σε υψηλές θερμοκρασίες ( $858\text{-}868^\circ\text{C}$ ), με την πτώση της θερμοκρασίας προς το ελεύθερο όριο να φτάνει τους  $\approx 60^\circ\text{C}$ .

Στο Διάγραμμα 4.7, παρουσιάζονται τα προφίλ θερμοκρασιών καύσης για το μείγμα OK/ΑΣΑ 80:20. Όπως φαίνεται, για περίσσεια αέρα  $\lambda=1.3$ , το μεγαλύτερο ποσοστό του μείγματος καίγεται σε υψηλή θερμοκρασία ( $867^\circ\text{C}$ ), με πτώση θερμοκρασίας εντός της κλίνης  $24^\circ\text{C}$ , ενώ στο ελεύθερο όριο  $64^\circ\text{C}$ . Ωστόσο, για τις τιμές  $\lambda$  από 1.4 έως 1.6, τα προφίλ των θερμοκρασιών καύσης εντός της κλίνης παρέμειναν ομοιόμορφα μεταξύ τους, διατηρώντας περίπου τις ίδιες θερμοκρασίες καύσης ( $835\text{-}844^\circ\text{C}$ ). Υπήρξε ψύξη εντός της κλίνης έως  $8^\circ\text{C}$ .





**Διάγραμμα 4.6:** Προφίλ θερμοκρασίας ΟΚ/ΑΣΑ 90:10 συναρτήσει του λόγου περίσσειας αέρα και για τροφοδοσία  $F=14$  g/min.

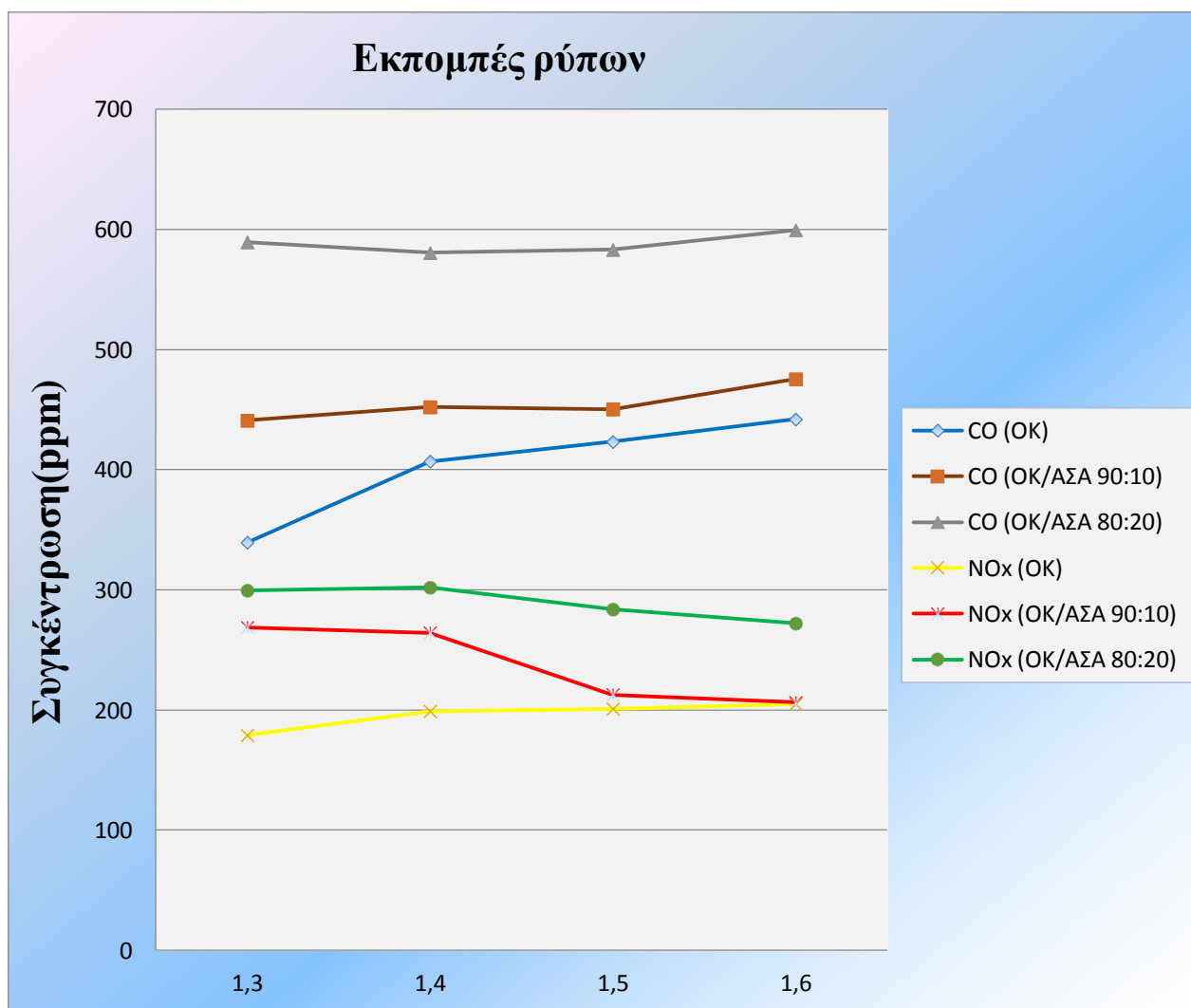


**Διάγραμμα 4.7:** Προφίλ θερμοκρασίας ΟΚ/ΑΣΑ 80:20 συναρτήσει του λόγου περίσσειας αέρα και για τροφοδοσία  $F=14$  g/min.

Οι εκπομπές αέριων ρύπων των καυσίμων καταγράφονται στο Διάγραμμα 4.8. Για το πυρηνόξυλο, οι εκπομπές των CO αυξάνουν με την περίσσεια αέρα, η οποία όπως προαναφέρθηκε είχε ως αποτέλεσμα τη μερική ψύξη του αντιδραστήρα με επακόλουθο την αύξηση των εκπομπών CO. Αύξηση παρουσιάζουν και οι εκπομπές NO<sub>x</sub> συναρτήσει της περίσσειας αέρα, εξαιτίας της αυξημένης ποσότητας οξυγόνου το οποίο αντέδρασε με το άζωτο του καυσίμου. Οι εκπομπές CO βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων για τα Ελληνικά πρότυπα, ενώ οι εκπομπές των NO<sub>x</sub> για όλες τις τιμές λ βρίσκονται λίγο άνω των επιτρεπτών ορίων [68].

Για το μείγμα OK/ΑΣΑ 90:10, οι εκπομπές των CO εμφανίζουν μια οριακή αύξηση κατά την αντίστοιχη αύξηση του λόγου περίσσειας αέρα εντός της κλίνης, λόγω της πτώσης της θερμοκρασίας καύσης που προκλήθηκε εντός του καυστήρα. Ωστόσο, μικρή μείωση παρουσιάζουν οι εκπομπές NO<sub>x</sub> στην αντίστοιχη αύξηση της περίσσειας αέρα, πιθανότατα λόγω και πάλι της χαμηλότερης θερμοκρασίας καύσης εντός του καυστήρα. Σύμφωνα με τα Ελληνικά πρότυπα, οι εκπομπές CO βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων, ενώ των NO<sub>x</sub> εμφανίζουν τιμές λίγο πάνω των επιτρεπτών ορίων [68].

Στο μείγμα OK/ΑΣΑ 80:20, οι εκπομπές των CO και NO<sub>x</sub> εμφανίζουν τη μεγαλύτερη συγκέντρωση από τα τρία καύσιμα. Επομένως, η αύξηση του ποσοστού των ΑΣΑ εντός του καυσίμου επιφέρει αύξηση των αέριων ρύπων. Στο παρόν μείγμα, είναι σαφές ότι η αύξηση του λόγου λ δεν επηρέασε ουσιαστικά τις εκπομπές CO, αλλά επηρέασε θετικά τις εκπομπές NO<sub>x</sub> επιφέροντας μια μικρή μείωση τους. Οι εκπομπές CO βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων, ενώ των NO<sub>x</sub> εμφανίζουν τιμές αρκετά πάνω των επιτρεπτών ορίων σύμφωνα πάντα με τους Ελληνικούς κανονισμούς [68].



**Διάγραμμα 4.8:** Εκπομπές ρύπων των καυσίμων συναρτήσει του λόγου περίσσειας αέρα λ σε τροφοδοσία καυσίμου  $F=14 \text{ g/min}$ .

**Πίνακας 4.9:** Απώλειες, εκπομπές και απόδοση των καυσίμων συναρτήσει της περίσσειας αέρα για τροφοδοσία καυσίμου  $F=14 \text{ g/min}$ .

Δείγμα	Λόγος περίσσεια αέρα λ	Θερμοκρασία (°C)					Εκπομπές(ppmv)			Απώλειες(%)			Απόδοση (%)
		Απόσταση από διασκορπιστή(mm)											
		30	80	150	250	450	CO	SO2	NOx	Lco	Lba	Lfa	
OK	1.3	870	869	860	818	800	339	-	179	-	-	-	-
	1.4	869	868	859	811	796	407	-	199	-			-
	1.5	855	855	851	806	801	123	-	201	0.46			99.54
	1.6	854	853	853	801	795	442	-	205	-			-
OK/ΑΣΑ 90:10	1.3	868	867	857	816	803	573	6	265	0.62	0.012	0.008	99.38
	1.4	868	866	861	808	810	580	5	262	0.63			99.37
	1.5	854	852	850	805	805	581	5	210	0.63			99.37
	1.6	852	853	853	800	794	591	8,5	203	0.64			99.36
OK/ΑΣΑ 80:20	1.3	867	866	856	815	804	589	0,45	299	0.63	0.023	0.007	99.37
	1.4	844	840	839	816	810	581	0,9	302	0.63			99.37
	1.5	843	842	837	802	803	583	1	284	0.63			99.37
	1.6	843	841	835	796	777	599	-	272	0.65			99.35

Ο Πίνακας 4.9 παρουσιάζει συγκεντρωτικά τα προφίλ θερμοκρασίας καύσης, τις αέριες εκπομπές, τις απώλειες θερμότητας και την απόδοση, για διαφορετικές τιμές του λ και για σταθερή τροφοδοσία καυσίμου  $F=14 \text{ g/min}$ , για καθένα από τα τρία καύσιμα που μελετήθηκαν. Η απόδοση των υπό μελέτη καυσίμων εμφάνισε πολύ υψηλές τιμές, οι οποίες κυμάνθηκαν από 99.35 έως 99.54 %. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, τη μέγιστη απόδοση είχε το πυρηνόξυλο, ενώ η διαφοροποίηση της περίσσειας αέρα δεν επηρέασε την απόδοση καύσης των καυσίμων ή τις κύριες απώλειες της θερμότητας, οι οποίες προέκυψαν από την ελλιπή καύση των καυσαερίων στο ελεύθερο όριο του καυστήρα ( $L_{CO}$ ). Οι απώλειες από τον άκαυστο άνθρακα εντός της ιπτάμενης τέφρας και της τέφρας πυθμένα ήταν δευτερεύουσας σημασίας, καθώς ήταν πάρα πολύ μικρές.

## 4.4 Επίδραση του Ρυθμού Τροφοδοσίας του Καυσίμου στις Χαρακτηριστικές Παραμέτρους Καύσης.

### 4.4.1 Προφίλ θερμοκρασίας, εκπομπές ρύπων και απόδοση.

Στον Πίνακα 4.10 παρουσιάζονται αναλυτικά τα προφίλ θερμοκρασίας, οι εκπομπές ρύπων, οι απώλειες θερμότητας και η απόδοση, από καύση Πυρηνόξυλου και μειγμάτων πυρηνόξυλου/ΑΣΑ 90/10 και 80/20, σε καυστήρα ρευστοποιημένης κλίνης για σταθερή τιμή περίσσειας αέρα  $\lambda=1.5$  συναρτήσει της τροφοδοσίας καυσίμου.

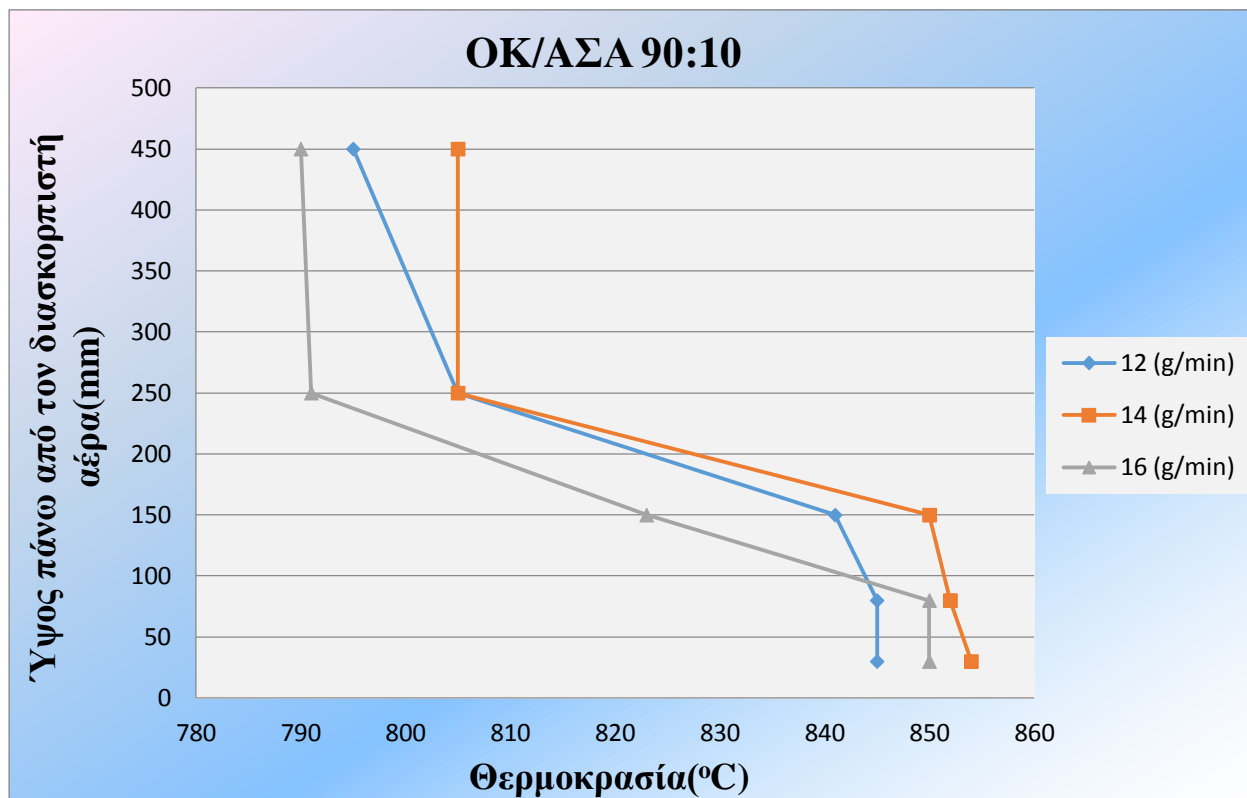
**Πίνακας 4.10.:** Προφίλ θερμοκρασιών, εκπομπές αερίων ρύπων, απώλειες θερμότητας και απόδοση για περίσσεια αέρα  $\lambda=1.5$  συναρτήσει της τροφοδοσίας καυσίμου.

Δείγμα	F (g/min)	Θερμοκρασία (°C)					Εκπομπές(ppm <sub>v</sub> )			Απώλειες			Απόδοση (%)
		Απόσταση από διασκορπιστή (mm)											
		30	80	150	250	450	CO	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	L <sub>co</sub>	L <sub>ba</sub>	L <sub>fa</sub>	
OK	12	845	840	820	784	777	433	-	197	0.47	0.09	0.11	99.53
	14	855	855	851	806	801	423		201	0.46	0.11	0.12	99.54
OK/ΑΣΑ 90:10	12	845	845	841	805	795	514	1	203	0.55	0.21	0.19	99.45
	14	854	852	850	805	805	581	5	210	0.63	0.012	0.008	99.37
	16	850	850	823	791	790	450	6	213	0.49	0.021	0.019	99.51
OK/ΑΣΑ 80:20	12	843	841	836	805	797	424	-	279	0.46	0.011	0.009	99.54
	14	843	842	837	802	803	583	1	284	0.63	0.023	0.007	99.37

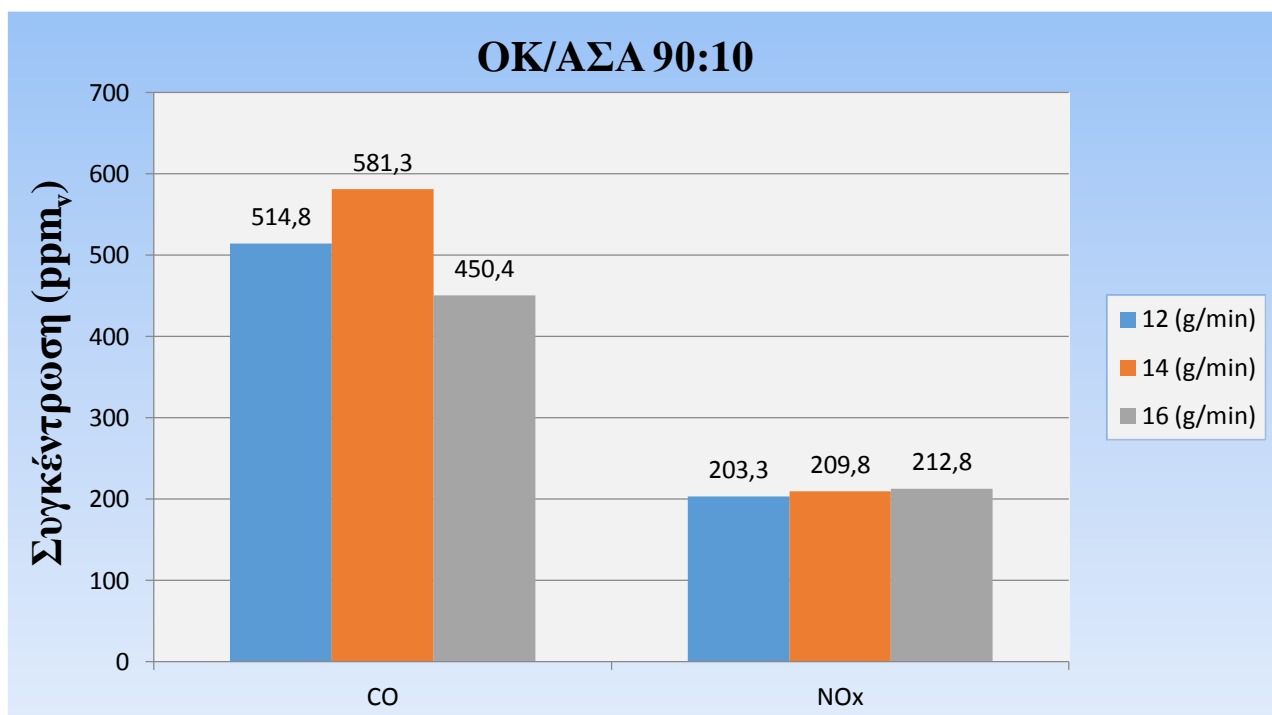
Από τον Πίνακα 4.10 και το Διάγραμμα 4.9, για σταθερή περίσσεια αέρα  $\lambda=1.5$  και για τιμές τροφοδοσίας 12, 14 και 16 g/min για καύσιμο OK/ΑΣΑ 90:10, παρατηρείται ότι τα προφίλ θερμοκρασιών ομοιάζουν μεταξύ τους, με την υψηλότερη θερμοκρασία καύσης να φτάνει τους 854 °C και να επιτυγχάνεται σε τροφοδοσία 14 g/min.

Από το Διάγραμμα 4.10, παρατηρούνται οι εκπομπές της καύσης του μείγματος OK/ΑΣΑ 90:10 για τροφοδοσία 12, 14 και 16g/min σε σταθερή περίσσεια αέρα  $\lambda=1.5$ . Σύμφωνα με το διάγραμμα, οι εκπομπές CO παρουσιάζουν κάποιες αυξομειώσεις συναρτήσει της τροφοδοσίας του καυσίμου, λόγω της ευαισθησίας που παρουσιάζουν με τη θερμοκρασία. Και στις τρεις τροφοδοσίες οι εκπομπές κυμάνθηκαν κάτω από τα επιτρεπτά όρια σύμφωνα με την Ελληνική Νομοθεσία [68]. Οι εκπομπές NO<sub>x</sub> παρουσίασαν μια πολύ μικρή αύξηση στην τιμή τους με την παράλληλη αύξηση της τροφοδοσίας, λόγω της αύξησης του N στο καύσιμο εντός του καυστήρα. Οι εκπομπές NO<sub>x</sub> βρίσκονται λίγο άνω των επιτρεπτών ορίων [68]. Η απόδοση του καυσίμου διατηρήθηκε σε υψηλά επίπεδα και για τις τρεις τροφοδοσίες με μικρή απόκλιση στη μεταξύ τους τιμή (Πίνακας 4.10).

Το καύσιμο OK/ΑΣΑ 80:20 μελετήθηκε σε τροφοδοσίες καυσίμου 12 και 14g/min (Πίνακας 4.10). Και στις 2 τροφοδοσίες, οι θερμοκρασίες καύσης εντός της κλίνης ήταν ίδιες, οι εκπομπές αέριων ρύπων λίγο μικρότερες σε τροφοδοσία 12g/min, με το ίδιο να ισχύει και για τις απώλειες θερμότητας και την απόδοση. Οπότε, η τροφοδοσία 12g/min εμφάνισε τις βέλτιστες συνθήκες καύσης μεταξύ των δύο τροφοδοσιών. Και εδώ οι εκπομπές των CO ήταν εντός ορίων και των NO<sub>x</sub> αρκετά εκτός των επιτρεπτών ορίων [68].



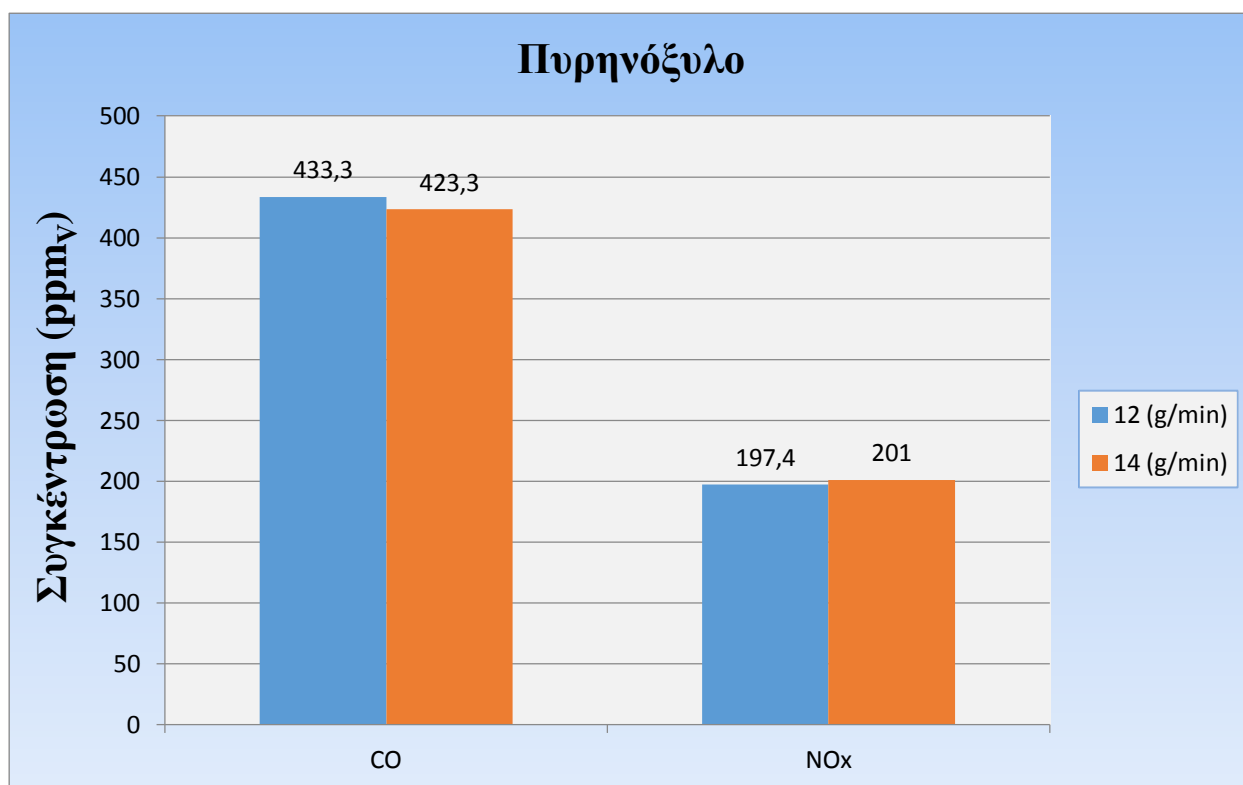
**Διάγραμμα 4.9:** Προφίλ θερμοκρασίας OK/ΑΣΑ 90:10 για λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.5$  συναρτήσει της τροφοδοσίας του καυσίμου.



**Διάγραμμα 4.10:** Εκπομπές αέριων ρύπων OK/ΑΣΑ (90:10) για λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.5$  συναρτήσει της τροφοδοσίας του καυσίμου.



Από το Διάγραμμα 4.11 και με τη βοήθεια του Πίνακα 4.10, παρουσιάζονται οι εκπομπές του Πυρηνόξυλου για τροφοδοσίες 12 και 14 g/min και περίσσεια αέρα  $\lambda=1.5$ . Οι εκπομπές του CO είναι ελάχιστα μεγαλύτερες για τροφοδοσία καυσίμου 12 g/min, λόγω της χαμηλότερης θερμοκρασία καύσης εντός του καυστήρα σε σύγκριση με την τροφοδοσία καυσίμου 14 g/min. Για τις εκπομπές NO<sub>x</sub>, όπως παρατηρείται, η διαφορά στη θερμοκρασία καύσης (10°C) εντός της κλίνης, για τις δύο τιμές τροφοδοσίας, δεν τις επηρέασε, διατηρώντας τις στα ίδια επίπεδα. Οι εκπομπές των CO είναι εντός ορίων, ενώ οι αντίστοιχες των NO<sub>x</sub> ξεπερνάνε λίγο τα επιτρεπτά όρια.



**Διάγραμμα 4.11:** Εκπομπές ρύπων Πυρηνόξυλου για λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.5$  συναρτήσει της τροφοδοσίας του καυσίμου.

#### 4.4.2 Χαρακτηρισμός ιπτάμενης τέφρας και τέφρας πυθμένα.

Στους Πίνακες 4.11 και 4.12 παρουσιάζονται οι ορυκτολογικές αναλύσεις των τεφρών των τριών καυσίμων σε διαφορετικές τιμές τροφοδοσίας καυσίμου (Ακτινοδιαγράμματα 3-14 παράρτημα). Για το πυρηνόξυλο, και στις δυο τροφοδοσίες, η παραγόμενη τέφρα είναι πλούσια σε ορυκτά του ασβεστίου, όπως είναι ο ασβεστίτης, ο ανυδρίτης, ο φαιρχιλνίτης, και ο υδροξυαπατίτης. Ακόμα, εμφανίζεται αρκετή συγκέντρωση δολομίτη, αλλά μόνο στην τέφρα πυθμένα. Η εμφάνιση του ανυδρίτη κατά πάσα πιθανότητα να οφείλεται στην αφυδάτωση του γύψου, καθώς η περιεκτικότητα των καυσαερίων σε  $\text{SO}_2$  ήταν εξαιρετικά χαμηλή. Η εμφάνιση υδροξυαπατίτη, η οποία δικαιολογείται από τη χρήση λιπασμάτων κατά την καλλιέργεια των ελαιόδενδρων, παρουσίασε αυξημένη πτητικότητα με την αντίστοιχη αύξηση της τροφοδοσίας καυσίμου. Μεγάλη συγκέντρωση παρουσιάζουν και οι πυριτικές ενώσεις, με βασικότερο το χαλαζία, ο οποίος είναι άφθονος στις δύο τέφρες και για τις δύο τροφοδοσίες καυσίμου. Ο χαλαζίας, μαζί με τον μοσχοβίτη και τον μικροκλινή, αποτελούν υπολείμματα αδρανούς υλικού από την κλίνη.

Με την ανάμιξη ΑΣΑ σε Πυρηνόξυλο σε ποσοστό 10% και 20%, εμφανίστηκαν 4 νέες ορυκτολογικές φάσεις στις τέφρες, όπως παρατηρείται από τους Πίνακες 4.11. και 4.12. Αυτές είναι ο αφθιταλίτης, το υδροξείδιο του ασβεστίου, ο μοντεσιλίτης και στις ιπτάμενες τέφρες του μείγματος 20% ο γουιτλοκίτης μαγνησιούχος. Επίσης, ο εψωμίτης στο δείγμα του πυρηνόξυλου εμφανίστηκε μόνο για τροφοδοσία 14 g/min εντός της ιπτάμενης τέφρας, σε αντίθεση με τα δύο μείγματα τα οποία εμφάνισαν μικρές ποσότητες εψωμίτη σε όλες τις τέφρες και για τις δυο τιμές τροφοδοσίας. Ο νταφσονίτης, λόγω της μικρής του περιεκτικότητας στο πυρηνόξυλο, έπαψε να εντοπίζεται στις αντίστοιχες τέφρες των μειγμάτων. Και για τα δύο μείγματα ο αρκανίτης παρουσίασε πτητικότητα με αύξηση της τροφοδοσίας καυσίμου, καθώς συγκεντρώθηκε μόνο στις ιπτάμενες τέφρες.

**Πίνακας 4.11:** Ορυκτολογική ανάλυση τεφρών των δειγμάτων συναρτήσει της τροφοδοσίας καυσίμου και για περίσσεια αέρα  $\lambda=1.4$ .

Ορυκτολογικές ς φάσεις	OK				OK/ΑΣΑ 90:10			
	Ιπτάμενη Τέφρα		Τέφρα Πυθμένα		Ιπτάμενη Τέφρα		Τέφρα Πυθμένα	
	Τροφοδοσία (g/min)							
	12	14	12	14	12	14	12	14
Ασβεστίτης (CaCO <sub>3</sub> )	++	++	++	++	++	++	++	++
Χαλαζίας (SiO <sub>2</sub> )	+++	+++	++	++	++	++	++	++
Ανυδρίτης (CaSO <sub>4</sub> )	++	+	+	+	+	+	+	+
Υδροξυαπατίτης [Ca <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (OH)]	+	++	++	+	+	+	+	+
Αιματίτης (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	+	+	+	+	+	+	+	+
Αρκανίτης (K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	++	+	++	+	+	+		
Περίκλαστο (MgO)	+	+	+	+	+	+	+	+
Φαιρχιλνίτης [K <sub>2</sub> Ca(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ]	++	+	+++	+	+	+	+	+
Συλβίτης (KCl)	+	+	+	+	+	+	+	+
Μικροκλινής [KAlSiO <sub>3</sub> O <sub>8</sub> ]	+	+	+	+	+	+	+	+
Νταφσονίτης [NaAl(CO <sub>3</sub> )(OH) <sub>2</sub> ]	+	+	+	+				
Αλβίτης Low [Na(AlSi <sub>2</sub> O <sub>8</sub> )]	+	+		+	+	+	++	++
Μοσχοβίτης [(H,K)AlSiO <sub>4</sub> ]	+	+		+	+	+	+	+
Εψωμίτης (MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O)		+		+	+	+	+	+
Αφθιταλίτης [NaK <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ]					+	+	+	+
Υδροξείδιο του ασβεστίου [Ca(OH) <sub>2</sub> ]					+	+	+	+
Μοντεσιλίτης (CaMgSiO <sub>4</sub> )					+	+	+	+
Γουιτλοκίτης Μαγνησιούχος [(Ca,Mg) <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ]								
Δολομίτης CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>			++					

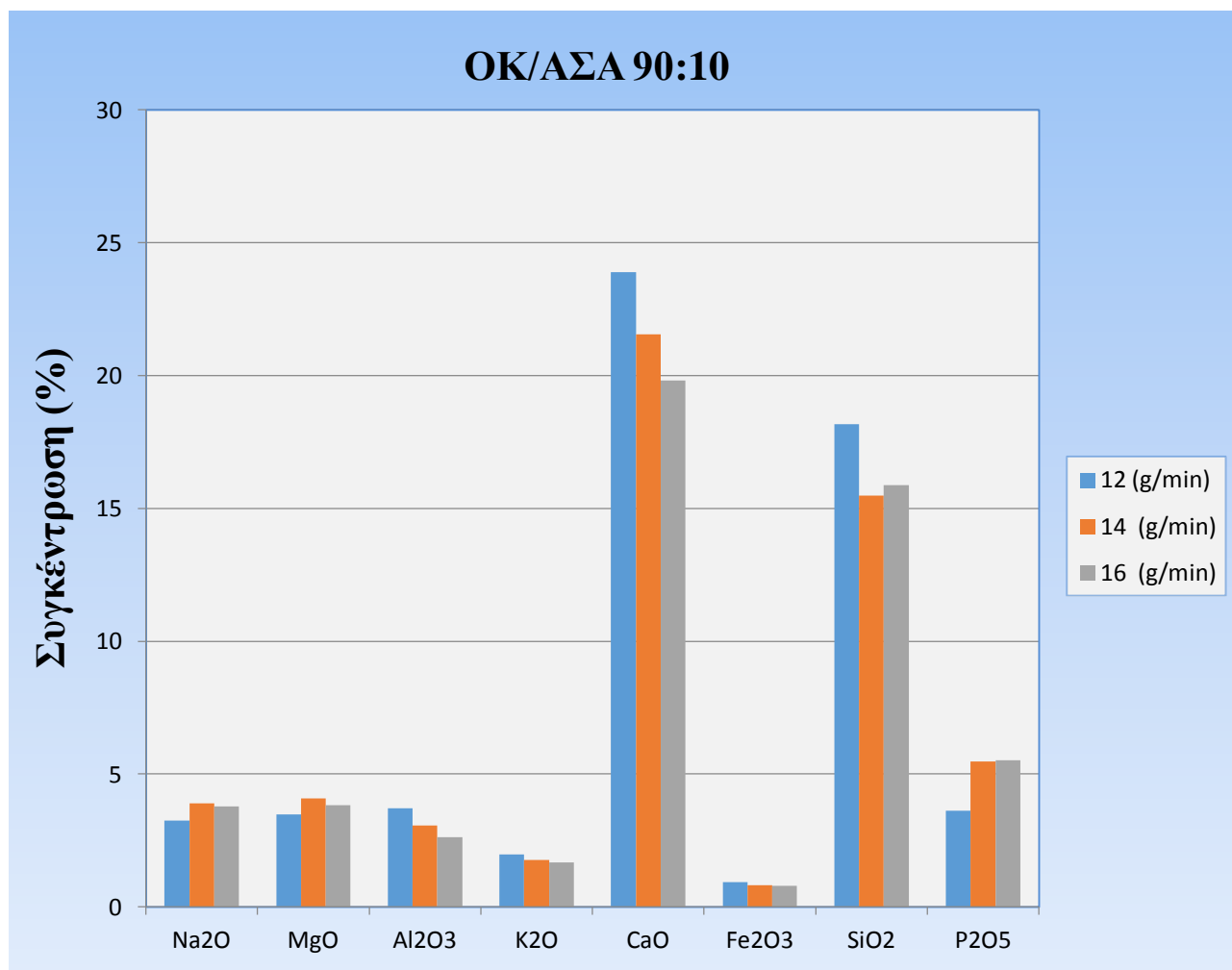
**Πίνακας 4.12:** Ορυκτολογική ανάλυση τεφρών των δειγμάτων συναρτήσει της τροφοδοσίας καυσίμου και για περίσσεια αέρα  $\lambda=1.4$ .

Ορυκτολογικές φάσεις	OK				OK/ΑΣΑ 80:20			
	Ιπτάμενη Τέφρα		Τέφρα Πυθμένα		Ιπτάμενη Τέφρα		Τέφρα Πυθμένα	
	Τροφοδοσία (g/min)							
	12	14	12	14	12	14	12	14
Ασβεστίτης (CaCO <sub>3</sub> )	++	++	++	++	+++	+++	++	++
Χαλαζίας (SiO <sub>2</sub> )	+++		++		++	++	++	++
Ανυδρίτης (CaSO <sub>4</sub> )	++	+	+	+	+	+	+	+
Υδροξυαπατίτης [Ca <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (OH)]	+	++	++	+	+	+	+	+
Αιματίτης (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	+	+	+	+	+	+	+	+
Αρκανίτης (K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	++	+	++	+	+	+		
Περίκλαστο (MgO)	+	+	+	+	+	+	+	+
Φαιρχιλνίτης [K <sub>2</sub> Ca(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ]	++	+	+++	+	++	+	+	+
Συλβίτης (KCl)	+	+	+	+	+	+	+	+
Μικροκλινής [KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> ]	+	+	+	+	+	+	+	+
Νταφσονίτης [NaAl(CO <sub>3</sub> )(OH) <sub>2</sub> ]	+	+	+	+				
Αλβίτης Low [Na(AlSi <sub>2</sub> O <sub>8</sub> )]	+	+		+	+	+	++	++
Μοσχοβίτης [(H,K)AlSiO <sub>4</sub> ]	+	+		+	+	+	+	+
Εψωμίτης (MgSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O)		+		+	+	+	+	+
Αφθιταλίτης [NaK <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ]					+	+	+	+
Υδροξείδιο του ασβεστίου [Ca(OH) <sub>2</sub> ]					+	+	+	+
Μοντεσιλίτης (CaMgSiO <sub>4</sub> )					+	+	+	+
Γουιτλοκίτης Μαγνησιούχος [(Ca,Mg) <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ]					+	+		
Δολομίτης CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>			++					

Η συγκέντρωση των βασικών οξειδίων στην ιπτάμενη τέφρα των δειγμάτων για διαφορετικές τιμές τροφοδοσίας καυσίμου, παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 4.13. Το κοινό χαρακτηριστικό όλων των τεφρών είναι ότι είναι πλούσιες σε CaO, SiO<sub>2</sub> και λιγότερο σε P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, με την ορυκτολογική ανάλυση (XRD) να επαληθεύει αυτές τις τιμές. Η αυξημένη συγκέντρωση Si και τα ποσοστά Al και Na, οφείλονται σε παράσυρση αδρανούς υλικού κλίνης στον κυκλώνα. Με την ανάμιξη ΑΣΑ και πυρηνόξυλου, η συγκέντρωση σε Ca αυξήθηκε αισθητά, λόγω του αυξημένου ποσοστού ασβεστίου εντός των ΑΣΑ. Κατά την αύξηση της τροφοδοσίας των καυσίμων, παρατηρείται ότι μειώνεται το ποσοστό των Ca και K εντός των τεφρών και αυξάνεται του P (Πίνακας 4.13, Διάγραμμα 4.12). Αυτές οι τιμές έρχονται σε απόλυτη συμφωνία με την ορυκτολογική ανάλυση, καθώς τα ορυκτά του ασβεστίου και του καλίου παρουσίασαν μειωμένη πτητικότητα με την αύξηση της τροφοδοσίας, ενώ τα αντίστοιχα του φωσφόρου αυξημένη.

**Πίνακας 4.13.:** Χημική ανάλυση ιπτάμενης τέφρας των δειγμάτων σε βασικά οξείδια (%) συναρτήσει της τροφοδοσίας καυσίμου.

Δείγμα	F(g/min)	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
OK	12	3.7	4.1	1.4	10.1	22.5	0.11	0.06	0.77	29.8	3.9
	14	4.7	2.7	2.7	4.3	12.6	0.05	0.04	0.59	3.7	17.1
OK/ΑΣΑ 90:10	12	3.2	3.5	3.7	2	23.9	0.1	0.04	0.93	18.2	3.6
	14	3.9	4.1	3	1.8	21.6	0.09	0.04	0.82	15.5	5.5
	16	3.8	3.8	2.6	1.7	19.8	0.08	0.04	0.79	15.9	5.5
OK/ΑΣΑ 80:20	12	3.6	3.3	5.6	2.4	29.2	0.14	0.04	1.2	20.2	2.6
	14	3.5	3.3	5	2.2	26.1	0.12	0.04	1.1	20.7	3.2



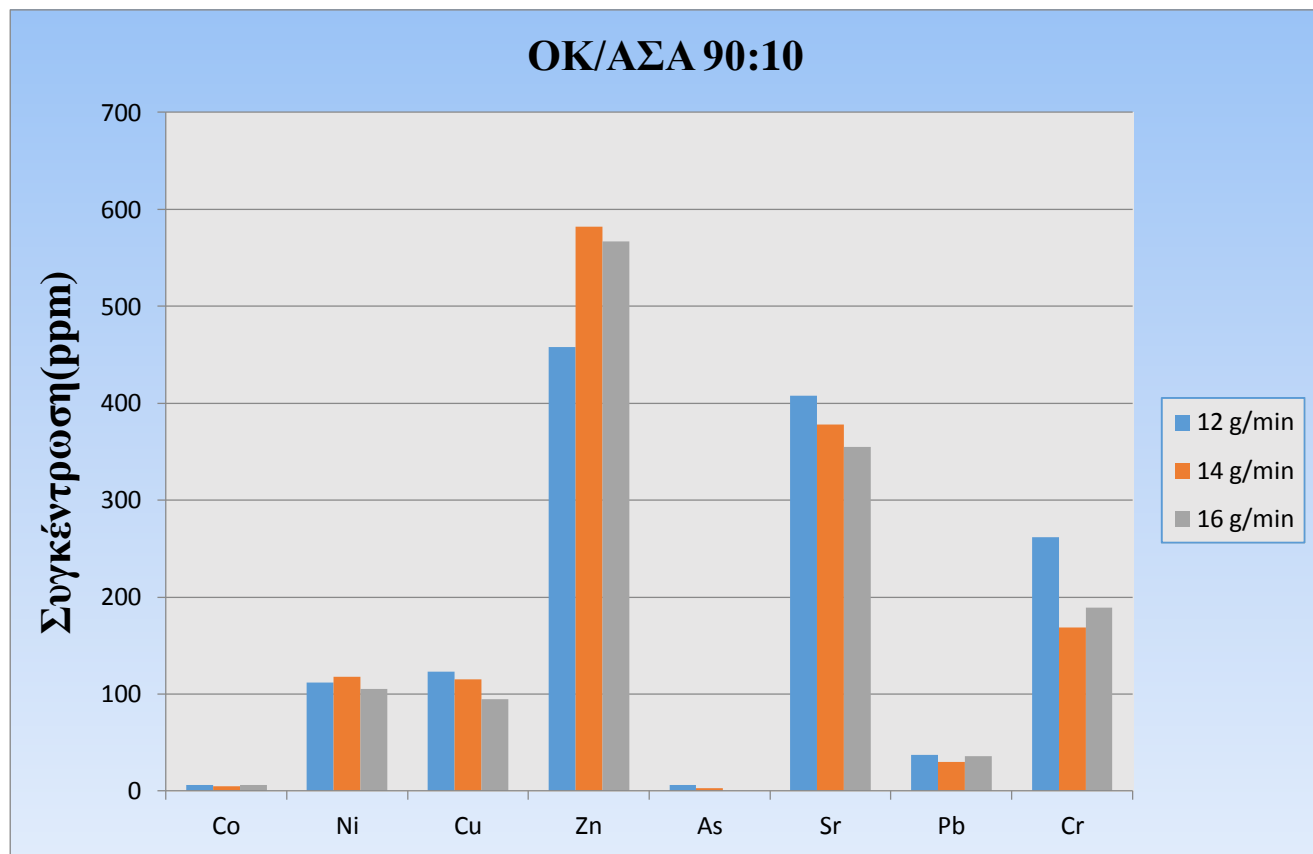
**Διάγραμμα 4.12:** Συγκέντρωση βασικών οξειδίων στην ιπτάμενη τέφρα, για καύσιμο OK/ΑΣΑ (90:10) συναρτήσει της τροφοδοσίας του καυσίμου.

Στον Πίνακα 4.14, παρουσιάζονται οι χημικές αναλύσεις των ιπτάμενων τεφρών των καυσίμων σε ιχνοστοιχεία συναρτήσει της τροφοδοσίας καυσίμου. Και τα τρία καύσιμα εμφάνισαν σχετικά αυξημένες τιμές σε βαρέα μέταλλα Ni, Cu, Sr και Zn, ενώ το Cr εμφανίστηκε μόνο στις τέφρες των μειγμάτων, σε αρκετά υψηλή συγκέντρωση. Η υψηλή συγκέντρωση του Sr, πιθανόν να οφείλεται σε ρύπανση των δειγμάτων από το έδαφος. Από τα βαρέα μέταλλα που αναφέρθηκαν, ο Zn παρουσίασε μερική πτητικότητα με αύξηση της τροφοδοσίας του καυσίμου, καθώς η συγκέντρωση του εντός των ιπτάμενων τεφρών των μειγμάτων αυξήθηκε, όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 4.13. Αντιθέτως τα Ni, Cu, Sr και Cr παρουσίασαν μειωμένη πτητικότητα, με τη συγκέντρωσή τους να μειώνεται με την αντίστοιχη αύξηση της τροφοδοσίας του καυσίμου. Σε περίπτωση που οι ιπτάμενες τέφρες των τριών καυσίμων χρησιμοποιηθούν στη γεωργία, όλα τα βαρέα μέταλλα που εντοπίζονται σε αυτές βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων για τα Ελληνικά πρότυπα [70]

**Πίνακας 4.14.:** Χημική ανάλυση της ιπτάμενης τέφρας σε ιχνοστοιχεία (ppm) συναρτήσει της τροφοδοσίας του καυσίμου.

Δείγμα	F(g/min)	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Pb	Cr
OK	12	5	259	657	188	4	327	7	-
	14	5	309	180	133	3	293	0,30	-
OK/ΑΣΑ 90:10	12	6	112	123	458	6	408	37	262
	14	5	118	115	582	3	378	30	169
	16	6	105	95	567	-	355	36	189
OK/ΑΣΑ 80:20	12	8	142	162	390	13	466	62	353
	14	7	130	129	429	9	442	53	348





**Διάγραμμα 4.13:** Συγκέντρωση ιχνοστοιχείων για καύσιμο ΟΚ/ΑΣΑ (90:10) συναρτήσει της τροφοδοσίας του καυσίμου.

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Βάση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν κατά την πειραματική διαδικασία καταλήγουμε στα παρακάτω συμπεράσματα:

- ❖ Τα δύο καύσιμα, πυρηνόξυλο και ΑΣΑ, παρουσιάζουν υψηλή περιεκτικότητα σε πτητικά, ενώ το ποσοστό της τέφρας είναι χαμηλό στο πυρηνόξυλο και υψηλό στα ΑΣΑ. Ακόμα, η περιεκτικότητα τους σε άζωτο είναι μέτρια και σε θείο είναι χαμηλή, ενώ η ανώτερη θερμογόνοος δύναμη των δειγμάτων είναι σχετικά υψηλή και αντίστοιχη με αυτήν των γαιανθράκων χαμηλής ποιότητας.
- ❖ Υπό συνθήκες ρευστοποίησης, για ρυθμό τροφοδοσίας από 12g/min έως 16 g/min και λόγο περίσσειας αέρα από 1.3 έως 1.6, η θερμοκρασία εντός της κλίνης κατά την καύση των καυσίμων διατηρήθηκε σε υψηλές θερμοκρασίες, μεταξύ 820 και 870°C για το πυρηνόξυλο και μεταξύ 823 και 868 °C για τα μείγματα με τα ΑΣΑ.
- ❖ Για τροφοδοσία 12g/min και λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.5$ , οι εκπομπές των αέριων ρύπων CO παρουσίασαν τιμές εντός των επιτρεπτών ορίων, ενώ των NO<sub>x</sub> ξεπερνούσαν τα επιτρεπτά όρια κατά τα Ελληνικά πρότυπα. Οι εκπομπές SO<sub>2</sub> εμφάνισαν αμελητέες τιμές. Με την αύξηση του ποσοστού των ΑΣΑ στα μείγματα οι εκπομπές ρύπων αυξήθηκαν. Η απόδοση για όλα τα καύσιμα ήταν μεγαλύτερη από 99%.
- ❖ Η αύξηση του λόγου περίσσειας αέρα από  $\lambda=1.3$  σε 1.6, για σταθερή τροφοδοσία καυσίμου, επέφερε ψύξη της κλίνης κατά την καύση του πυρηνόξυλου της τάξης των 16°C. Στις εκπομπές των αέριων ρύπων, παρατηρήθηκε αύξηση του CO λόγω πτώσης της θερμοκρασίας εντός της κλίνης, αλλά και των NO<sub>x</sub> λόγω της αύξησης του αέρα καύσης.
- ❖ Η αύξηση του λόγου περίσσειας αέρα κατά την καύση των μειγμάτων, από  $\lambda=1.3$  σε 1.6, επέφερε μείωση της θερμοκρασίας εντός της κλίνης έως 24°C. Ωστόσο, οι εκπομπές CO εμφάνισαν μια αμελητέα αύξηση, ενώ οι τιμές των NO<sub>x</sub> παρουσίασαν μείωση κατά την αύξηση της περίσσειας αέρα, λόγω της

χαμηλότερης θερμοκρασίας καύσης. Η απόδοση της καύσης διατηρήθηκε άνω του 99%.

- ❖ Με την αύξηση του ρυθμού τροφοδοσίας από 12 σε 16 g/min, παρατηρήθηκε μια γενική αύξηση της θερμοκρασίας εντός του αντιδραστήρα. Οι εκπομπές CO κυμάνθηκαν εντός των επιτρεπτών ορίων, ενώ των NO<sub>x</sub> αυξήθηκαν ελαφρά και ήταν εκτός των επιτρεπτών ορίων. Η απόδοση καύσης παρέμεινε σε υψηλά επίπεδα (>99%).
- ❖ Οι ιπτάμενες τέφρες των μειγμάτων χαρακτηρίζονται από υψηλή περιεκτικότητα σε Ca, Si και σε μικρότερο βαθμό σε P και Mg, τα οποία εμπεριέχονται κυρίως στα ορυκτά ασβεστίτη, φαιρχιλνίτη, χαλαζία, υδροξυαπατίτη και εψωμίτη. Με την αύξηση της τροφοδοσίας του καυσίμου, τα ορυκτά του ασβεστίου και του καλίου που εντοπίστηκαν εντός των τεφρών παρουσίασαν μειωμένη πτητικότητα, ενώ του φωσφόρου αυξημένη.
- ❖ Οι ιπτάμενες τέφρες των μειγμάτων, εμφανίζουν αυξημένες τιμές σε βαρέα μέταλλα Ni, Cu, Sr, Zn και Cr, κατά την αντίστοιχη αύξηση της τροφοδοσίας των καυσίμων. Ο Zn παρουσίασε μερική πτητικότητα με την αύξηση της τροφοδοσίας, σε αντίθεση με τα Ni, Cu και Sr. Εάν οι τέφρες χρησιμοποιηθούν στη γεωργία, τότε οι περιεκτικότητες των βαρέων μετάλλων που εντοπίζονται δεν ξεπερνάνε τα επιτρεπτά όρια.
- ❖ Οι βέλτιστες συνθήκες καύσης ( υψηλή θερμοκρασία καύσης, χαμηλοί ρύποι, υψηλή απόδοση) επετεύχθησαν στα μείγματα πυρηνόξυλο/ΑΣΑ σε αναλογία 90/10 και 80/20 για τροφοδοσία καυσίμου 12 g/min και λόγο περίσσειας αέρα λ=1.5. Απαιτείται η λήψη μέτρων για τη μείωση των εκπομπών NO<sub>x</sub>.

### Προτάσεις :

- ❖ Διεκπεραίωση περισσότερων πειραμάτων καύσης στις παρούσες αναλογίες μίξης, καθώς και σε διαφορετικές για πιο αποτελεσματικές μετρήσεις, όσον αφορά τη στατιστική ανάλυση.
- ❖ Μελέτη συν-καύσης των ΑΣΑ με άλλα καύσιμα αγροτικής προέλευσης, τα οποία να εμπεριέχουν λιγότερο άζωτο σε σύγκριση με το πυρηνόξυλο, έτσι ώστε να μειωθούν οι υψηλές εκπομπές  $\text{NO}_x$ .
- ❖ Μελέτη της μεθόδου αεριοποίησης των ΑΣΑ, καθώς θεωρητικά θα μειώσει τις εκπομπές  $\text{NO}_x$ .

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Κ. Αποστολάκης, Σ. Κυρίτσης, Χ. Σούτερ, «*Το ενεργειακό δυναμικό της βιομάζας γεωργικών και δασικών υποπροϊόντων*», ΕΛΚΕΠΑ-ΙΤΕ, Αθήνα, 1987.
- [2] Βαμβουκα Δ. «*Βιομάζα ,βιοενέργεια και περιβάλλον*», Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, Θεσσαλονίκη 2009.
- [3] Ndjock Ndjock Magloire E., « *Παραγωγή καύσιμου αερίου πλούσιου σε υδρογόνο από πυρόλυση βιομηχανικών υπολειμμάτων ξυλείας*» Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Δεκέμβριος 2013.
- [4] Τσαγγάρης Ηρακλής, «*Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας Βιομάζα*», Μεταπτυχιακή Διατριβή, Οικονομικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Ιανουάριος 2013.
- [5] Καρατσώρη Φοίβου, «*Η Εξέλιξη των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας σε Ευρωπαϊκή Ένωση και Ελλάδα*», Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Μακεδονίας, Ιούλιος 2013.
- [6] McKendry, P. (2002), « *Energy production from biomass (part 1): overview of biomass.* » Bioresource Technology, 83, pp. 37-46.
- [7] McKendry, P. (2002), « *Energy production from biomass (part 2): conversion technologies.* » Bioresource Technology, 83, pp. 47-54.
- [9] Κοσμάδακη Μαρία, «*Διακύμανση της σύστασης και της θερμικής συμπεριφοράς δημοτικών στερεών αποβλήτων, σε μηνιαία βάση, με στόχο την ενεργειακή τους αξιοποίηση*», Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά 2016.
- [10] Αντωνία Κίτσιου, «*Σύστημα τηλεθέρμανσης με δασικά υπολείμματα σε οικισμό*», Διπλωματική Εργασία, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Καβάλας, Καβάλα 2012.
- [12] Γιατσίδης Α. Και Γιαντσελίδης Ν., «*Ο ρόλος του πετρελαίου και του φυσικού αερίου στην Ελληνική και Ευρωπαϊκή οικονομία.*», Πτυχιακή εργασία, Τ.Ε.Ι. Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης, Καβαλα 2014.

- [14] J. Giuntoli, A. Agostini, S. Caserini, E. Lugato, D. Baxter, L. Marelli, «*Climate change impacts of power generation from residual biomass*» Biomass and Bioenergy 89 (2016), pp. 146-158.
- [15] Ευρωπαϊκή επιτροπή, « Έκθεση προόδου για την ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές», 2017, Βρυξέλες.
- [16] Mantau, U. et al., 2010. «*Real potential for changes in growth and use of EU forests*», EUwood.
- [18] Dale A., Ekman & Co AB «Production and Consumption of Wood Pellets in the European Union. »WPAC Conference November 2015, In Halifax, Nova Scotia, Canada.
- [19] Schlagitweit, C., «*The state of the European pellet market*», 5<sup>th</sup> International Wood Energy Conference: December 3rd 2014. In Zagreb.
- [20] Castillo, A., Panoutsou, C. & Bauen, A., «*D2. 1 Report on biomass market segments within the transport, heat & electricity - CHP sectors for EU27 & Member States*», Intelligent Energy Europe, December 2011.
- [22] Glach, B., Lieberz, S. & Rossetti, «*EU biofuels Annual 2017*» USDA Foreign Agricultural Service (NL7015), Hague 2017.
- [23] Bozbas, K. (2005), «*Biodiesel as an alternative motor fuel: Production and policies in the European Union*», www.Science Direct.com, 17 June.
- [24] Giuntoli, J., Agostini, A., Caserini, S., Lugato, E., Baxter, D. and Marelli, L. (2016), «*Climate change impacts of power generation from residual biomass*», Biomass and Bioenergy 89, pp. 146-158.
- [25] Αλεξανδράκης Σ., «*Απόδοση και εκπομπές αέριων ρύπων κατά την θερμική αξιοποίηση λυματολάσσης βιολογικού καθαρισμού Χανίων, από συν-καύση σε ρευστοποιημένη κλίνη*», Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Φεβρουάριος 2013.

- [26] *World Energy Resources 2016*, World Energy Council.
- [27] Venkata, B.K., *WBA Global Bioenergy Statistics 2014*, World Bioenergy Association.
- [28] Heinimo, J. and Junginger, M., «*Production and trading of biomass for energy- An overview of global status*», *biomass and bioenergy* 33 (2009), pp. 1310–1320
- [29] STRAUSS, W. (2017) ‘*Growing demand for pellets*’, *CANADIAN BIOMASS* [online] (51), pp.18-21.
- [30] Παπαγεωργίου Α., «*Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας: Παραγωγή Ενέργειας από Βιομάζα–Βιοκαύσιμα*», Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Σεπτέμβριος 2010.
- [31] Evans, A., Strezon, V. and Evans, T.J., «*Sustainability considerations for electricity generation from biomass*», *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2010), pp. 1419–1427.
- [32] Γιαννάκος Κ., «*Πολυκριτηριακή ανάλυση χωροθέτησης σταθμών παραγωγής ενέργειας από βιομάζα σε περιβάλλον ΓΣΠ: Η περίπτωση της Περιφέρειας Θεσσαλίας*», Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Ιανουάριος 2013.
- [33] Papadopoulou, K., Eleftheriadis, I. and Taxeri, E. (2015). ‘*Greece’s promising market segments for heating with solid biomass (>100 kW)*.’ D.2.1 “Country Summary Report of promising market segments for use of bioenergy”. Athens.
- [34] Ιωάννης-Χρίστος Π. Μαραβέλιας, «*Οικονομοτεχνική μελέτη για εργοστάσιο παραγωγής wood pellets*», Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- [35] Δαμάτης, Ν. (2016). Η ανάπτυξη της βιομάζας ως βασικός άξονας ενεργειακής πολιτικής. In: Διημερίδα ΚΑΠΕ 3 & 4 Νοεμβρίου 2016 «Παραγωγή Θερμότητας από Στερεή Βιομάζα», Νοέμβριος 2016. Αθήνα
- [36] Χρήστου, Μ. (2007). ‘Προοπτικές ανάπτυξης της αγοράς βιοντήζελ στην Ελλάδα.’, Επιστημονικό Τριήμερο ΤΕΕ 'Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας'. Λάρισα, 1 Δεκεμβρίου 2007.



- [37] Zafiris, C. (2015). Biogas in Greece: Actual situation and perspectives. Thessaloniki, 29 September 2015, pp.8-11.
- [39] Βορνιωτάκη Ε., «*Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων σε Αστικό Περιβάλλον*», Πτυχιακή εργασία, Τεχνολογικό εκπαιδευτικό ίδρυμα Καβάλας, Καβάλα Φεβρουάριος 2012.
- [40] Παπαγιάννης Π., «*Μέθοδοι διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων και εντοπισμός τους στον Ευρωπαϊκό Χώρο*», Ερευνητική εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Φεβρουάριος 2015.
- [41] Βαρελά Ε.Π., «*Αξιολόγηση τεχνολογιών μηχανικής και βιολογικής επεξεργασίας Αστικών Στερεών Αποβλήτων*», Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ιούλιος 2011.
- [42] Bhada-Tata, Perinaz; Hoornweg, Daniel A. 2012. *What a waste: a global review of solid waste management (English)*. Urban development series knowledge papers; no. 15. Washington, DC World Bank Group. pp. 8-9.
- [45] Ντζαμίλης Π. και Χάβας Γ., «*Ποιοτική και Ποσοτική ανάλυση Αστικών απορριμμάτων περιφέρειας Κρήτης*», Μεταπτυχιακή διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Μαρτίος 2004.
- [46] Τσαλικίδης Ν., «*Καταγραφή και συγκριτική ανάλυση του ρεύματος Αστικών Στερεών Αποβλήτων στην κεντρική Μακεδονία*», Διπλωματική εργασία, Αριστοτέλειο πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Οκτώμβριος 2016.
- [47] Kalogirou, E. and Sakalis, A. (2016). 'Overview of the Waste Management Situation and Planning in Greece.' [online] p.108.
- [50] Χαλβαδάκης Κ., «*Ανασκόπηση τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας από Αστικά Στερεά Απόβλητα*», Πτυχιακή εργασία, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Φεβρουάριος 2010.
- [51] Λεωνταράκης Θ., «*Τεχνολογίες καύσης αστικών στερεών απορριμμάτων: Τεχνικά χαρακτηριστικά και οικονομικά στοιχεία*», Πτυχιακή εργασία, Ανώτατο Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης, Ιούνιος 2013.

- [52] Δημούλας Γ., «Τεχνολογίες ενεργειακής Αξιοποίησης ΑΣΑ και δευτερογενών καυσίμων με έμφαση στις τεχνολογίες καύσης υψηλής απόδοσης.», Πτυχιακή εργασία, Α.Τ.Ε.Ι. Πειραιά, Σεπτέμβριος 2013
- [53] Ling Qiu, «*Part I: Analysis of the economics of waste-to-energy plants in China, Part II: MSW Sorting models in China and potential for improvement.*» Thesis Paper, Columbia University, December 2012.
- [55] Helou, A., Tran, K. and Buncio, C. (2010). 'Energy recovery from Municipal Solid Waste in California: Needs and Challenges.' In: 18th Annual North American Waste-to-Energy Conference. p.1.
- [56] Private sector & development, 'Waste: the challenges facing developing countries', Proparco's Magazine N° 15/Octomber 2012.
- [57] Giorgio Ghiringhelli, 2013. *Global Analysis of the Waste-to-Energy Field*, Coolsweep.
- [58] Ζήκος Π.Β., «Επιλογή βέλτιστου σχεδιασμού μονάδας καύσης απορριμμάτων με την χρήση του προγράμματος *Super Pro Designer*», Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά 2005.
- [59] Παπάς Μ., «Εκπομπές αέριων ρύπων από συν-καύση πυρηνόξυλου και ζωικών αποβλήτων της βιομηχανίας *Creta Farm* σε ρευστοποιημένη κλίνη», Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Μάρτιος 2015.
- [60] Παπαγιάννης Η., «Σχεδιασμός Ξηραντήριου ρευστοποιημένης κλίνης και ενεργειακή ανάλυση ξήρανσης», Διπλωματική εργασία, Αριστοτέλειο πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Οκτώβριος 2012.
- [61] Πιθαρούλης Μ., «Ανάλυση υπολειμμάτων από καύση μιγμάτων λιγνίτη και αγροτικής βιομάζας σε πειραματικό αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης.», Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- [62] Κωνσταντάς Γ., «Ανάπτυξη μοντέλου καυστήρα Ρευστοποιημένης κλίνης ανακυκλοφορίας.», Μεταπτυχιακή εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2008.

[63] Ρόμπολας Α., «Τεχνολογία παραγωγής ενέργειας από οργανικά απορρίμματα και βιομάζα, με καύση βιοαερίου ή βιομάζας.», Βιβλιογραφική επισκόπηση, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Καβάλας, Καβάλα 2008.

[64] Rand, T., Haukohl, J., Marxen, U., Rand, T., Haukohl, J., Marxen, U., (2000) «*Municipal solid waste incineration: a decision maker's guide (English)*.» Washington, D.C. The World Bank.

[67] Κατσανεβάκης Ι., Μαλαμάκης Α., Περκουλίδης Γ., Τσατσαρέλης Θ., «Αξιοποίηση Αστικών Στερεών Αποβλήτων από την ενεργειακή σκοπιά και οι προοπτικές εφαρμογής στην Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας.», ΤΕΕ/ΤΚΜ, Θεσσαλονίκη, Μάρτιος 2010.

[68] ΥΑ οικ. 189533/2011, ΦΕΚ 2654Β/9/11/2011

[69] Vamvuka, D., Trikouvertis, M., Pentari, D., Alevizos, G., & Stratakis, A. (2017). «*Characterization and evaluation of fly and bottom ashes from combustion of residues from vineyards and processing industry.* » Journal of the Energy Institute, 90, pp. 574-587

### **Διαδικτυακές Πηγές**

[8] [http://www.cres.gr/energy-saving/images/pdf/biomass\\_guide.pdf](http://www.cres.gr/energy-saving/images/pdf/biomass_guide.pdf)

[11] <http://www.biomasscounts.eu/get-the-facts/statistics/>

[13] <http://www.cnn.gr/news/perivallon/story/110203/oi-stoxoi-tis-ee-gia-tis-ananeosimes-piges-energeias-os-to-2030>

[17] <http://www.aebiom.org/eu-forest-bioenergy/>

[21] <https://hub.globalccsinstitute.com/publications/renewable-energy-progress-and-biofuels-sustainability/21-major-findings>

[38] <http://www.ktizontastomellon.gr/biomaza>

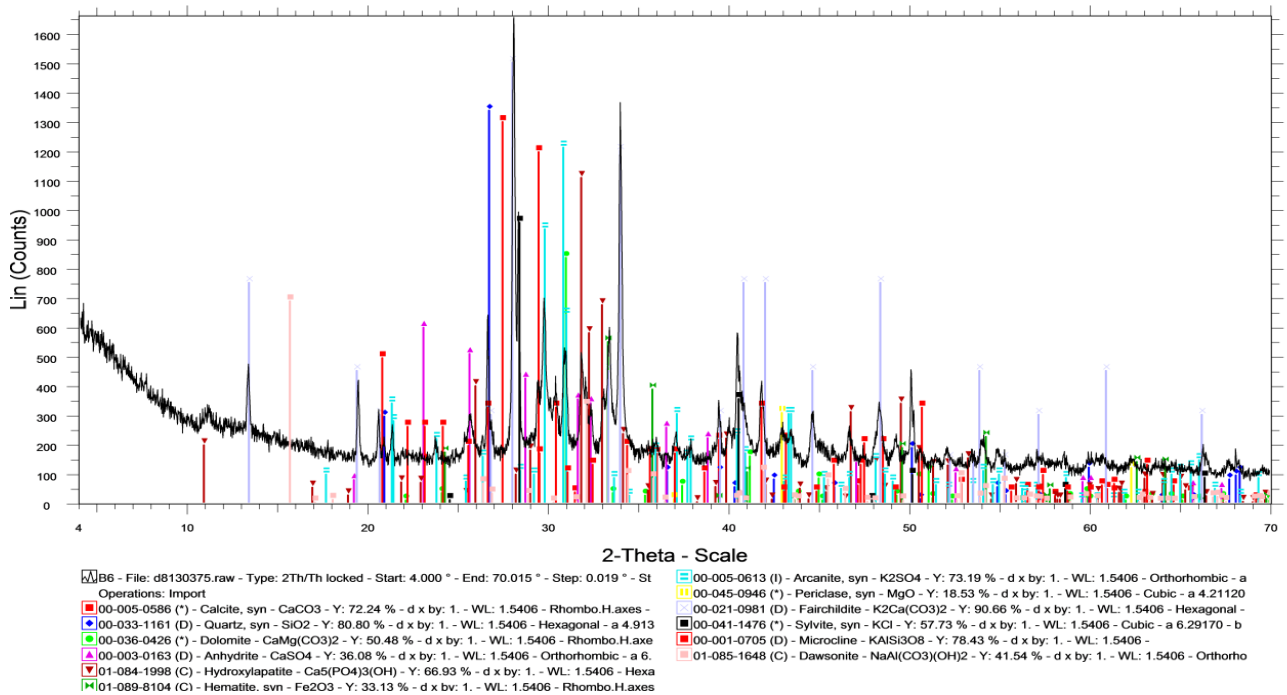
[43] <http://www.atlas.d-waste.com/>

[44] [https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/2012\\_msw\\_fs.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/2012_msw_fs.pdf)

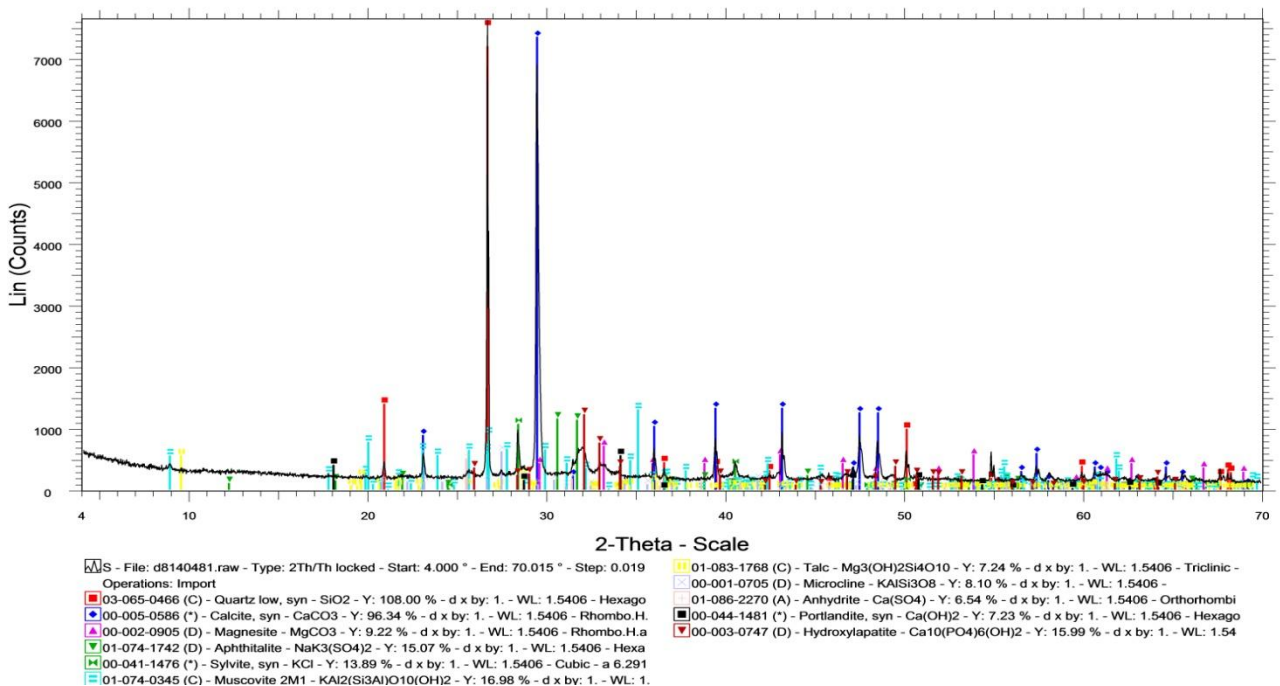
[48] <http://ypeka.gr/LinkClick.aspx?fileticket=7LiOc0J1iFk%3D&tabid=232&language=el-GR>

- [49] [http://startupgreece.gov.gr/sites/default/files/Waste%20Management An%20Upcoming%20Service%20Sector.pdf](http://startupgreece.gov.gr/sites/default/files/Waste%20Management%20An%20Upcoming%20Service%20Sector.pdf)
- [54] <https://www.greentechmedia.com/articles/read/look-at-how-much-waste-america-puts-into-landfills-compared-to-europe#gs.efyGQPQ>
- [65] <http://www.climatetechwiki.org/technology/msw-wte>
- [66] [http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=env\\_wasmun&lang=en](http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=env_wasmun&lang=en)
- [70] <http://library.tee.gr/digital/m2116.pdf>

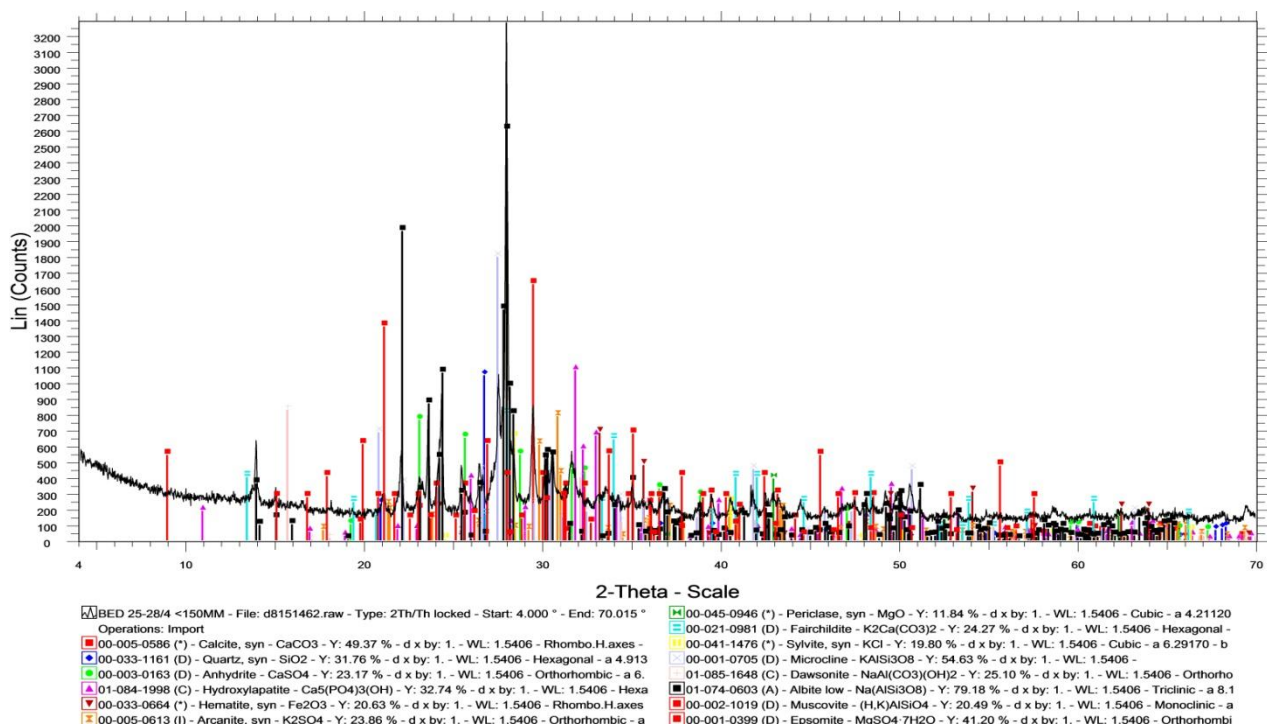
## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ



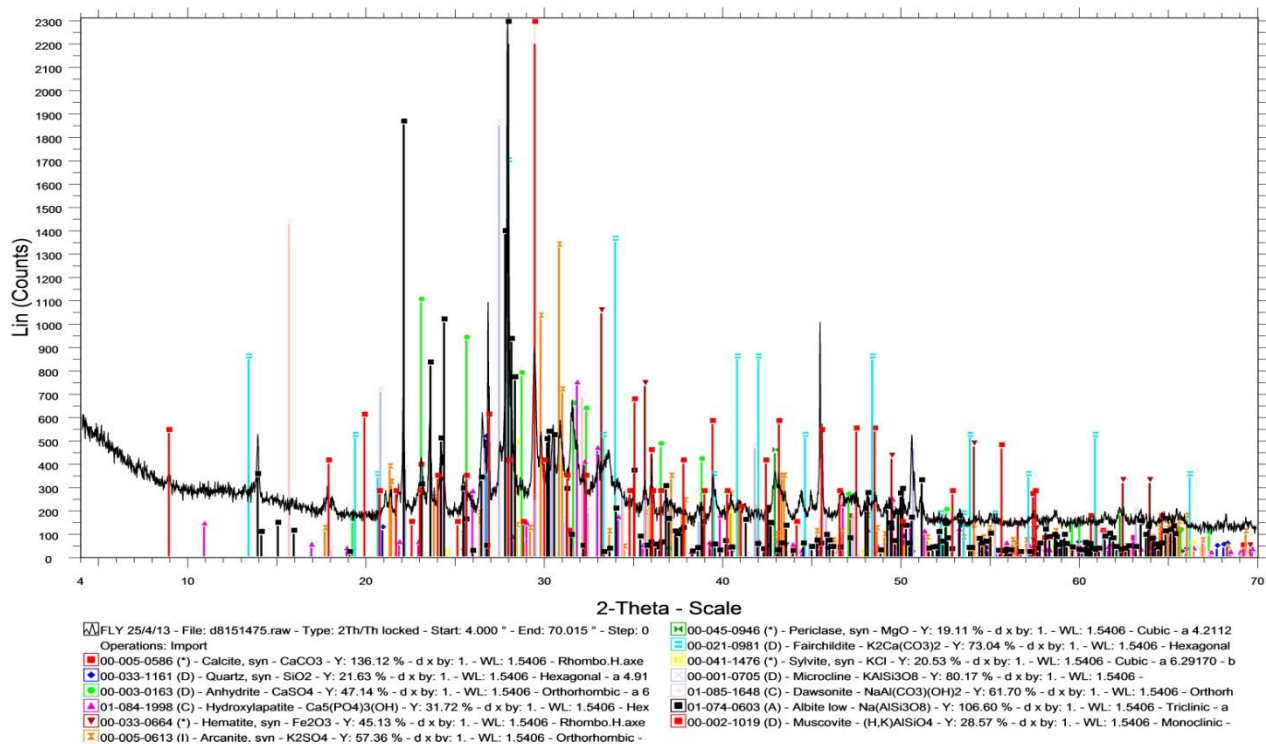
**Ακτινοδιάγραμμα 1:** Κατανομή ορυκτολογικών φάσεων της τέφρας του πυρηνόξυλου 550°C.



**Ακτινοδιάγραμμα 2:** Κατανομή ορυκτολογικών φάσεων της τέφρας των ΑΣΑ 550°C

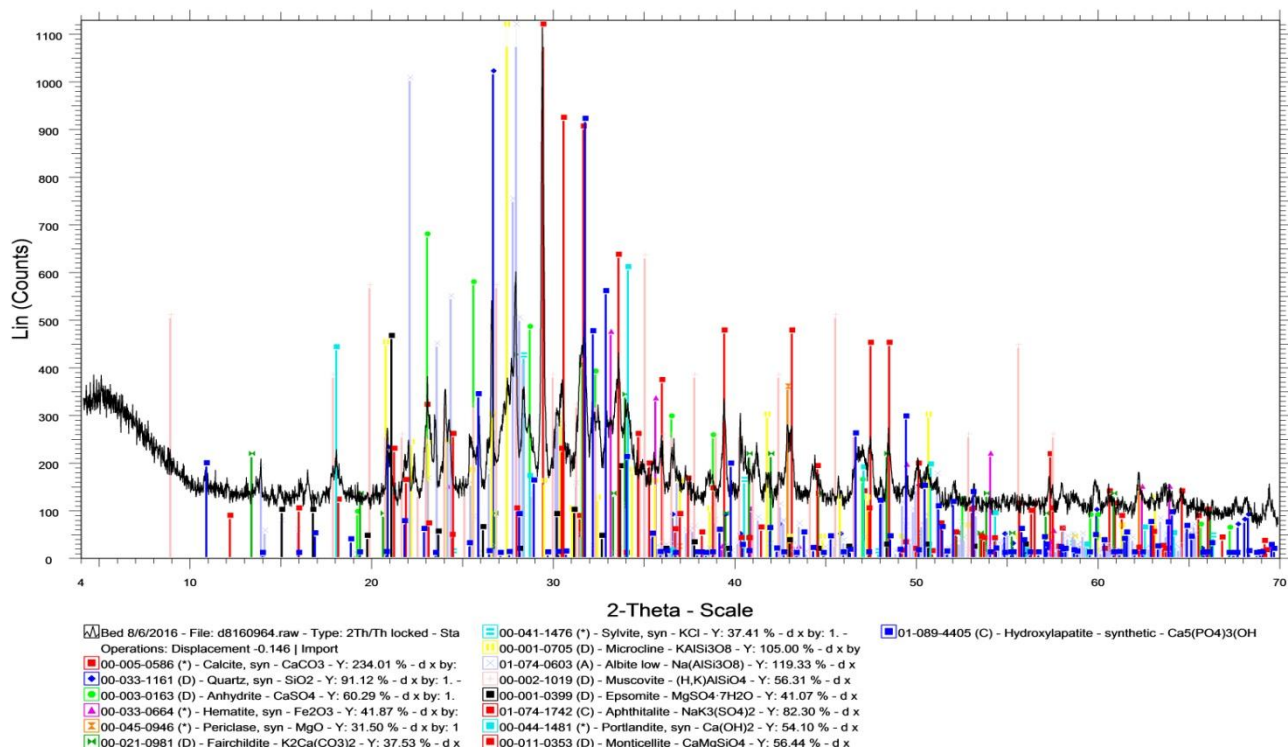


**Ακτινοδιάγραμμα 3:** Κατανομή ορυκτολογικών φάσεων τέφρας πυθμένα πυρηνόξυλου για τροφοδοσία καυσίμου  $F=12\text{g/min}$  και λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.4$ .

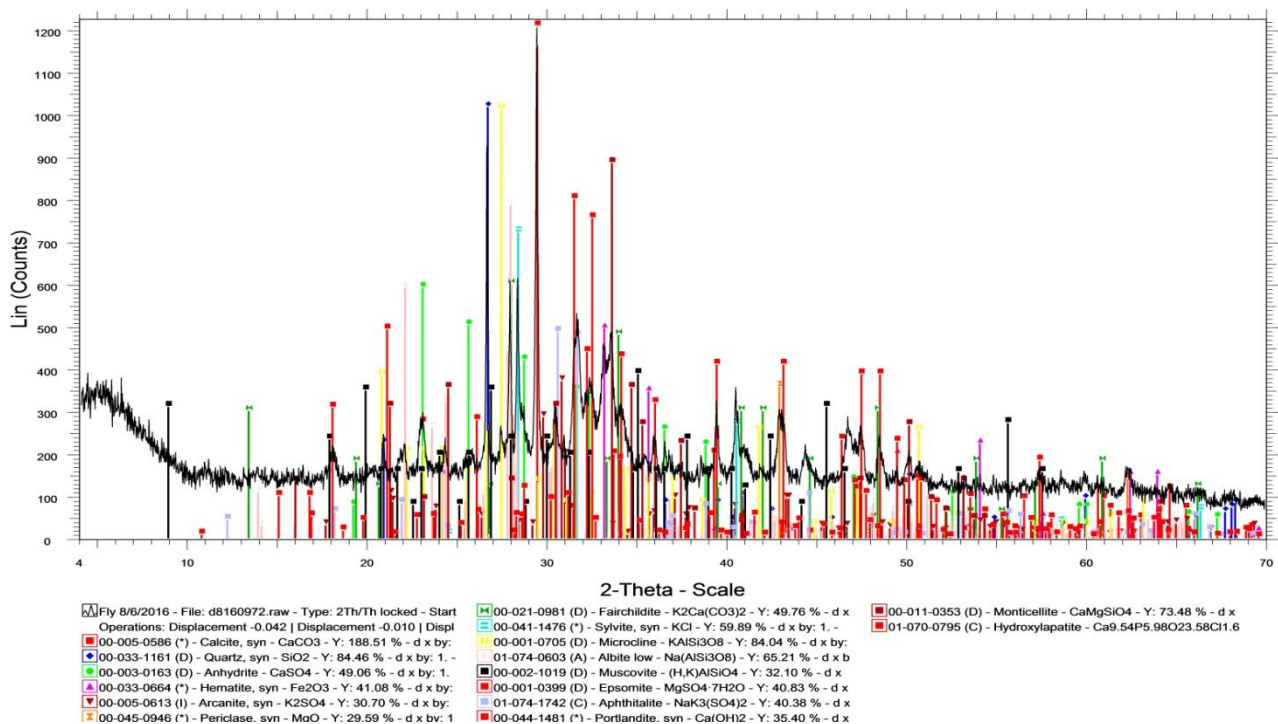


**Ακτινοδιάγραμμα 4:** Κατανομή ορυκτολογικών φάσεων ιπτάμενης τέφρας πυρηνόξυλου για τροφοδοσία καυσίμου  $F=12\text{g/min}$  και λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.4$ .

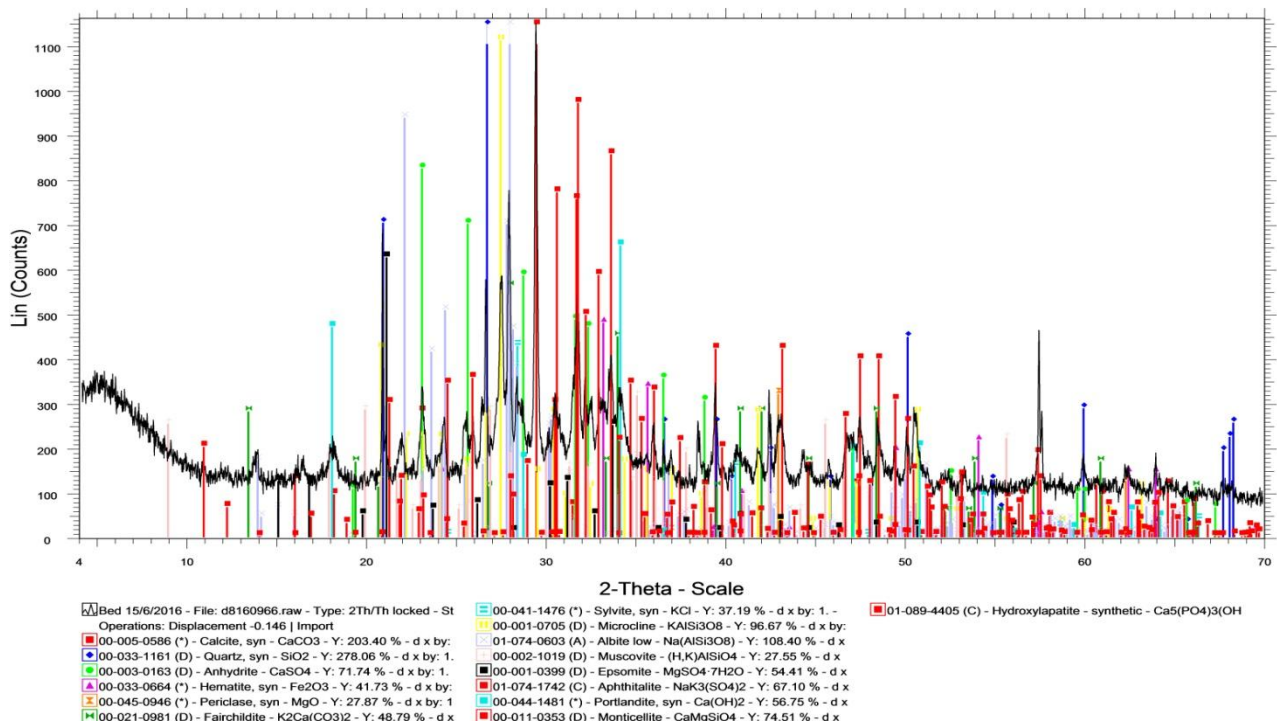




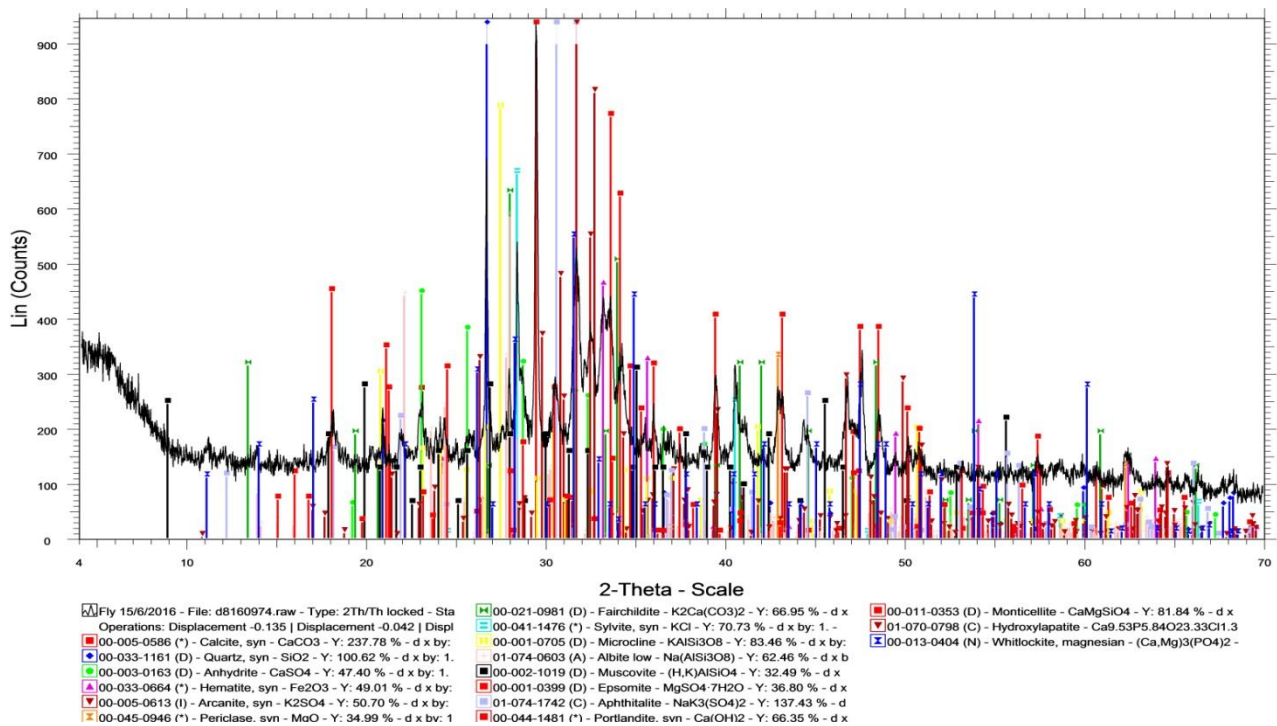
**Ακτινοδιάγραμμα 5:** Κατανομή ορυκτολογικών φάσεων τέφρας πυθμένα, OK/ΑΣΑ 10%, για τροφοδοσία καυσίμου  $F=12 \text{ g/min}$  και λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.4$ .



**Ακτινοδιάγραμμα 6:** Κατανομή ορυκτολογικών φάσεων ιπτάμενης τέφρας, OK/ΑΣΑ 10%, για τροφοδοσία καυσίμου  $F=12 \text{ g/min}$  και λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.4$ .

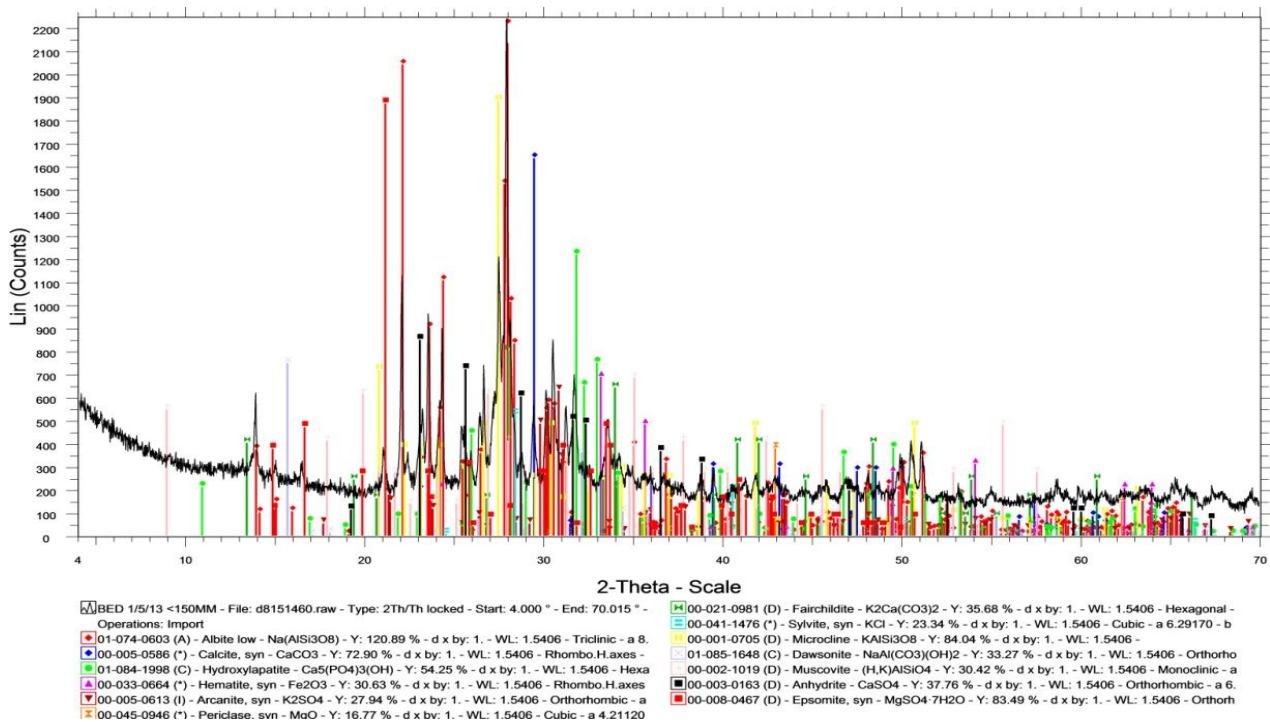


**Ακτινοδιάγραμμα 7:** Κατανομή ορυκτολογικών φάσεων τέφρας πυθμένα, OK/ΑΣΑ 20%, για τροφοδοσία καυσίμου  $F=12 \text{ g/min}$  και λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.4$ .

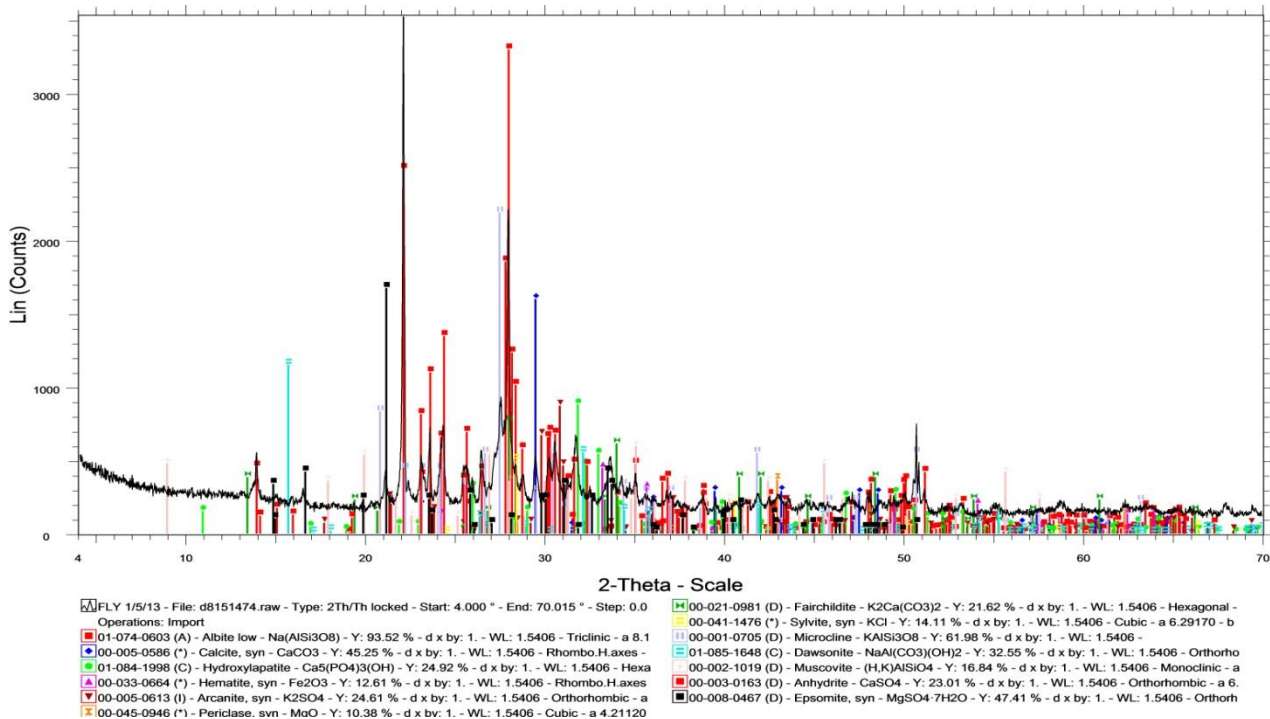


**Ακτινοδιάγραμμα 8:** Κατανομή ορυκτολογικών φάσεων ιτάμενης τέφρας, OK/ΑΣΑ 20%, για τροφοδοσία καυσίμου  $F=12 \text{ g/min}$  και λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.4$ .

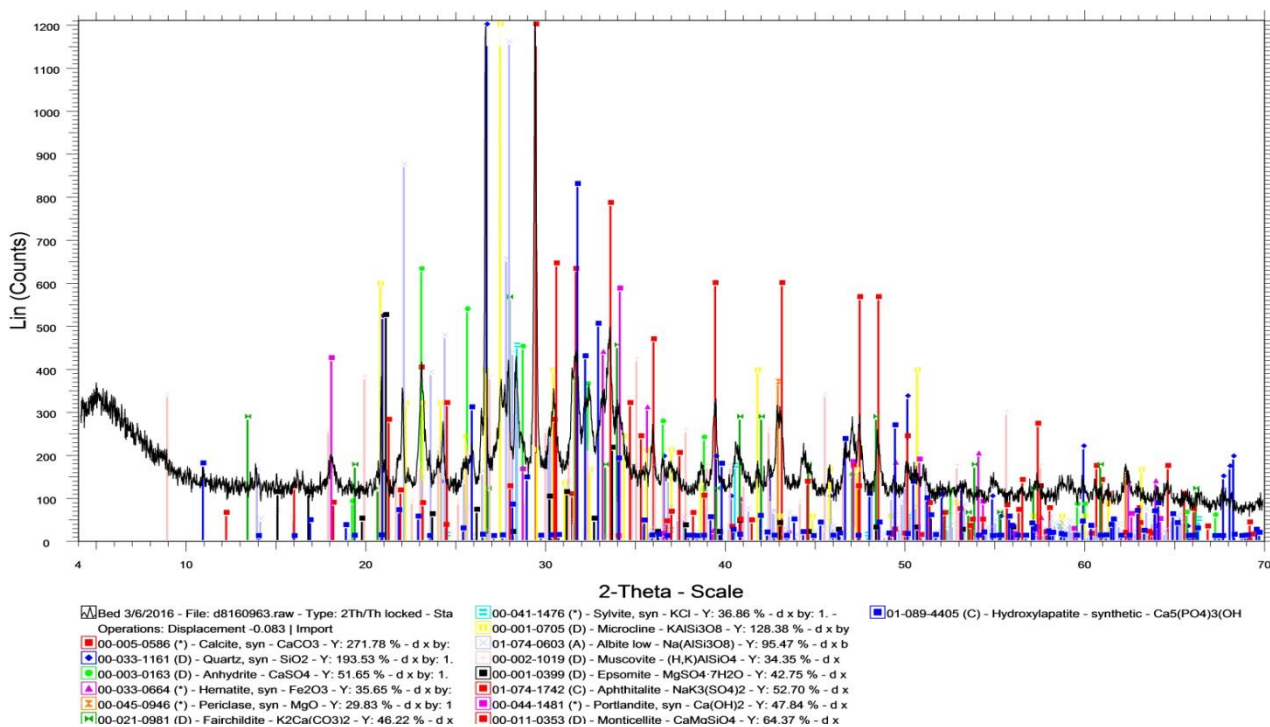




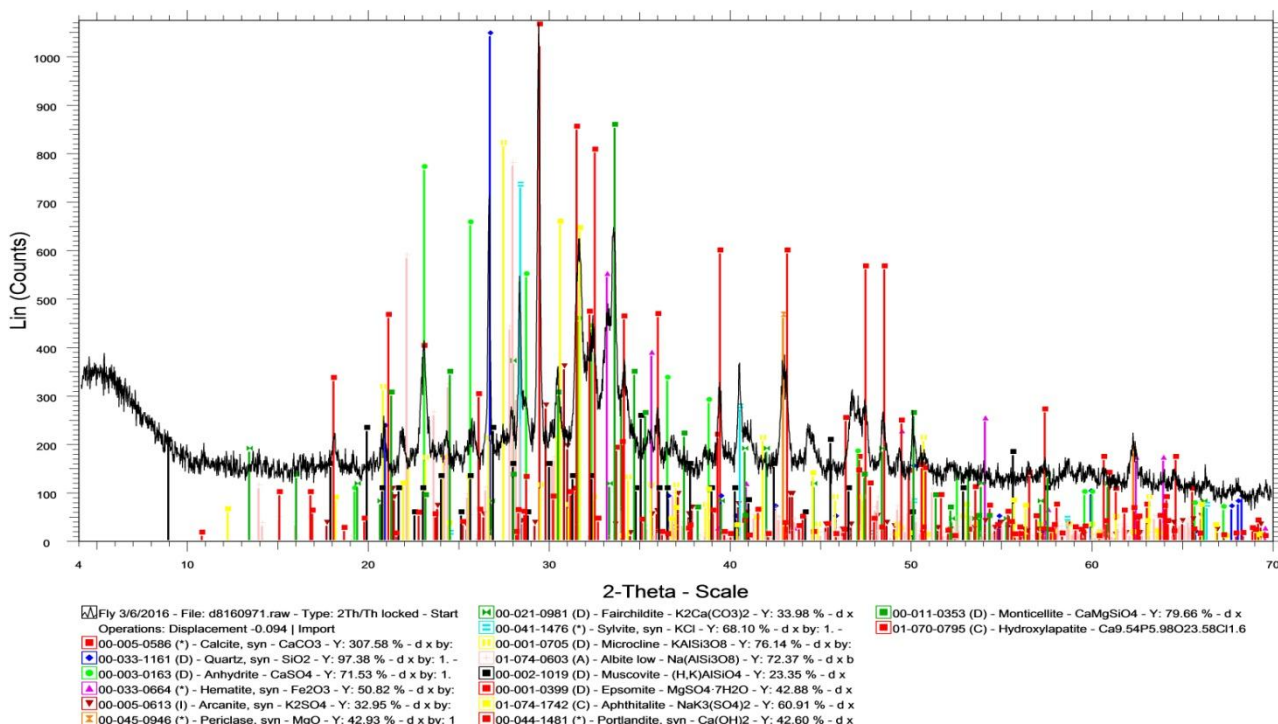
**Ακτινοδιάγραμμα 9:** Κατανομή ορυκτολογικών φάσεων τέφρας πυθμένης πυρηνόξυλου, για τροφοδοσία καυσίμου  $F=14\text{g/min}$  και λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.4$ .



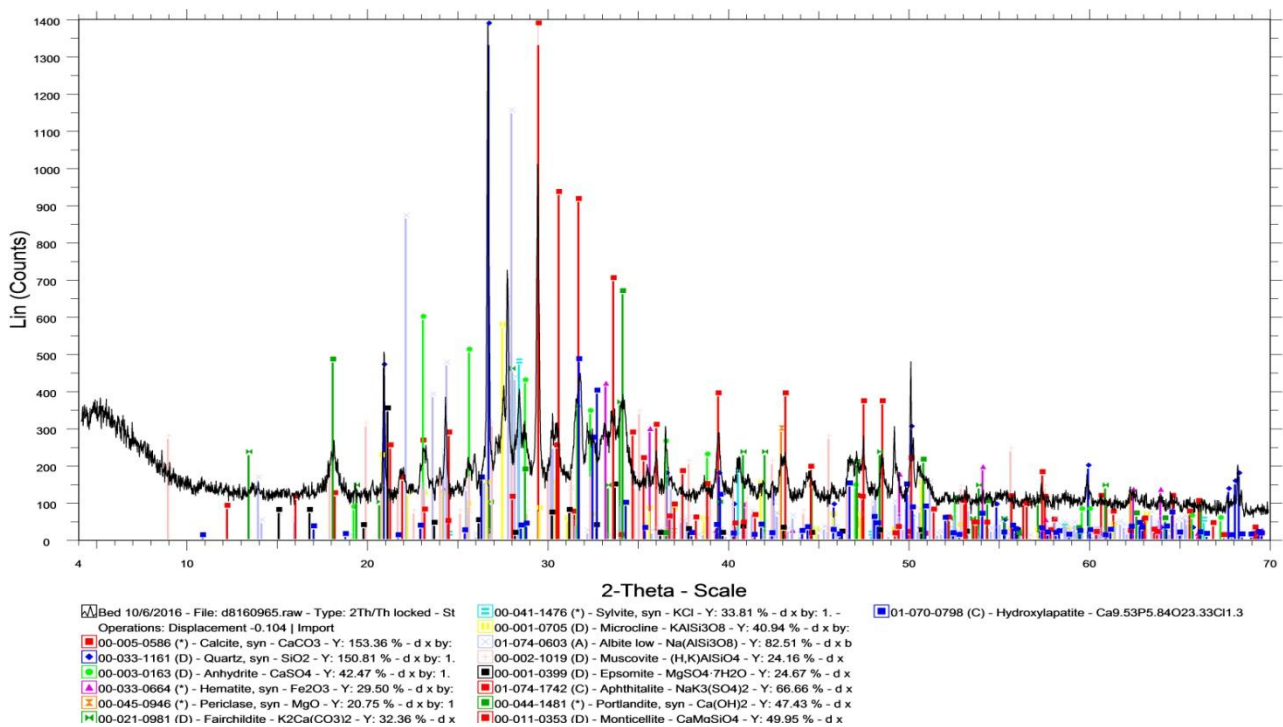
**Ακτινοδιάγραμμα 10:** Κατανομή ορυκτολογικών φάσεων ιπτάμενης τέφρας πυρηνόξυλου, για τροφοδοσία καυσίμου  $F=14\text{g/min}$  και λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.4$ .



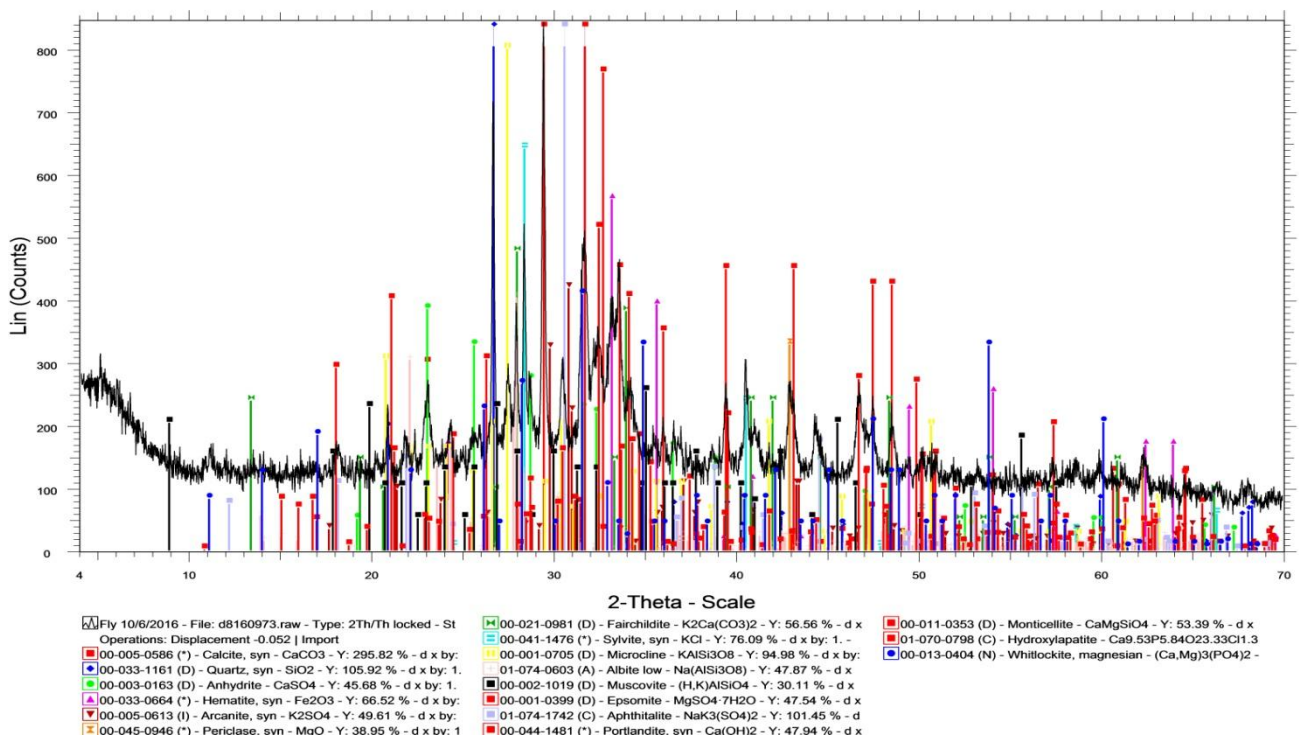
**Ακτινοδιάγραμμα 11:** Κατανομή ορυκτολογικών φάσεων τέφρας πυθμένα, ΟΚ/ΑΣΑ 10%, για τροφοδοσία καυσίμου F=14 g/min και λόγο περίσσειας αέρα λ=1.4.



**Ακτινοδιάγραμμα 12:** Κατανομή ορυκτολογικών φάσεων ιπτάμενης τέφρας, ΟΚ/ΑΣΑ 10%, για τροφοδοσία καυσίμου F=14 g/min και λόγο περίσσειας αέρα λ=1.4.



**Ακτινοδιάγραμμα 13:** Κατανομή ορυκτολογικών φάσεων τέφρας πυθμένα, OK/ΑΣΑ 20%, για τροφοδοσία καυσίμου  $F=14$  g/min και λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.4$ .



**Ακτινοδιάγραμμα 14:** Κατανομή ορυκτολογικών φάσεων ιπτάμενης τέφρας, OK/ΑΣΑ 20%, για τροφοδοσία καυσίμου  $F=14$  g/min και λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.4$ .