



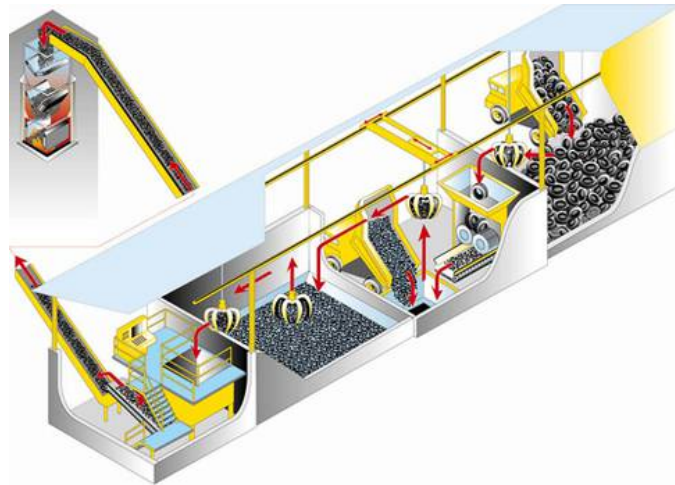
**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ Ι : ΧΗΜΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΟΡΓΑΝΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗΣ ΧΗΜΕΙΑΣ

## **ΧΡΗΣΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ**



**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΓΙΩΡΓΟΣ ΣΑΛΑΠΑΤΑΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΨΗ**

Σ. Τσιβιλής

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

**Αθήνα 2012**

## Πρόλογος

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια της ολοκλήρωσης των σπουδών μου στο τμήμα Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ. Ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η καταγραφή της υπάρχουσας κατάστασης στην βιομηχανία τσιμέντου στην χρήση των συμβατικών καυσίμων αλλά και τις προοπτικές που υπάρχουν στην υποκατάσταση με τα δευτερογενή εναλλακτικά καύσιμα. Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον καθηγητή μου Σωτήρη Τσιβιλή για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας και την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου.

*Σαλαπάτας Γιώργος*

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η χρήση εναλλακτικών καυσίμων έχει εξαιρετική σημασία τόσο για τη βιομηχανία τσιμέντου όσο και για το κοινωνικό σύνολο. Στην παρούσα εργασία αναλύονται τα κυριότερα συμβατικά και εναλλακτικά καύσιμα και οι ιδιότητες τους. Ειδικότερα μελετήθηκαν τα συμβατικά καύσιμα κωκ, petcoke, μαζούτ, φυσικό αέριο και τα εναλλακτικά καύσιμα ελαστικά αυτοκινήτων (Tire Derived Fuel, TDF), σύμμικτο απόβλητο, εναλλακτικό καύσιμο RDF (Refuse Derived Fuel), βιολογική λάσπη (SSW) και αγροτικά πλαστικά απορρίμματα. Παράμετροι που προέκυψαν κατά τη μελέτη και φαίνεται να παίζουν σπουδαίο ρόλο ως προς την επιτυχή εφαρμογή των εναλλακτικών καυσίμων στην βιομηχανία τσιμέντου είναι : το κόστος επένδυσης και λειτουργίας σε συνάρτηση με την μείωση του κόστους παραγωγής, τα ενεργειακά οφέλη, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις και η μη υποβάθμιση της ποιότητας του κλίνκερ που παράγεται.

Τα οφέλη που προκύπτουν από τη χρήση εναλλακτικών καυσίμων στη βιομηχανία τσιμέντου όπως αυτά αναδείχθηκαν από αυτή τη μελέτη είναι α) εξοικονόμηση μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, β) μείωση των αερίων εκπομπών, γ) μείωση του κόστους παραγωγής και δ) βελτίωση της ανταγωνιστικότητας του βιομηχανικού κλάδου.

## SUMMARY

The use of alternative fuels is critical both for cement industry and society. The main conventional and alternative fuels are investigated in this Thesis. More specifically, the conventional fuels coke, petcoke, fuel oil and natural gas as well as the alternative fuels tire derived fuel (TDF), mixed waste, refuse derived fuel (RDF), sewage sludge waste (SSW) and agricultural plastic waste are studied. The utilization of alternative fuels in cement industry takes into consideration investment and operating costs, energy benefits, environmental impact and quality of the produced clinker. The replacement of some conventional fuels with alternative fuels leads to the following benefits: a) saving of non-renewable energy sources b) reduction of greenhouse gas emissions c) decrease of production cost and d) increase of industry competitiveness.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Εισαγωγή.....	1
2. Βιομηχανία τσιμέντου.....	3
2.1 Πρώτες ύλες.....	3
2.2 Κλινκερ.....	3
2.3 Τσιμεντο.....	6
2.3.1 Κύρια συστατικά τσιμέντου.....	7
2.3.2 Δευτερεύοντα συστατικά.....	10
2.3.3 Θειικό ασβέστιο.....	10
2.3.4 Πρόσθετα.....	10
2.3.5 Προτυποποίηση τσιμέντου.....	11
2.4 Παραγωγική διαδικασία τσιμέντου.....	12
2.5 Ελληνική τσιμεντοβιομηχανία.....	15
3. Συμβατικά καύσιμα στη βιομηχανία τσιμέντου.....	19
3.1 Κατανάλωση ενέργειας στην παραγωγή κλινκερ.....	19
3.2 Κατηγορίες συμβατικών καυσίμων.....	22
3.3 Στερεά καύσιμα.....	25
3.3.1 Λιθάνθρακες.....	26
3.3.2 Petcoke.....	31
3.4 Υγρά Καύσιμα – Μαζούτ.....	37
3.5 Αέρια Καύσιμα – Φυσικό αέριο.....	39
3.6 Σύγκριση συμβατικών καυσίμων.....	41
4. Εναλλακτικά καύσιμα στη βιομηχανία τσιμέντου.....	46
4.1 Είδη και κατηγορίες εναλλακτικών καυσίμων.....	53
4.2 Λάστιχα.....	54

4.3 Βιολογική λάσπη.....	58
4.4 Refuse Derived Fuel (RDF).....	61
4.4.1 Χρήσεις RDF.....	63
4.4.2 Χρήση RDF στην τσιμεντοβιομηχανία.....	64
4.4.3 Η εκπομπή αέριων ρύπων από την κάυση του RDF στη τσιμεντοβιομηχανία.....	64
4.5 Παραπροϊόντα βιομηχανιών. Αγροτικά πλαστικά.....	66
4.6 Σύγκριση εναλλακτικών καυσίμων.....	69
5. Σύγκριση συμβατικών – εναλλακτικών καυσίμων .....	72
5.1 Οφέλη που προκύπτουν από την χρήση εναλλακτικών καυσίμων. Εισαγωγικά στοιχεία.....	72
5.2 Κόστος.....	75
5.3 Ενέργεια.....	79
5.4 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις – περιβαλλοντικά οφέλη.....	81
5.5 Ποιότητα προϊόντος.....	86
5.6 Περιγραφή υπάρχουσας κατάστασης χρήσης και προοπτικές αντικατάστασης συμβατικών καυσίμων από εναλλακτικά καύσιμα.....	91
6. Συμπεράσματα.....	100
Βιβλιογραφία.....	103

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1:	Σφαιρίδια κλίνκερ προϊόν πυροσυσσωμάτωσης.	5
Σχήμα 2.2:	Διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στη διάταξη της περιστροφικής καμίνου για την παραγωγή του κλίνκερ.	6
Σχήμα 2.3:	Πρώτες ύλες και ενδιάμεσα για την παραγωγή τσιμέντου.	7
Σχήμα 2.4:	Συμβολισμός και επεξήγηση ενός τύπου τσιμέντου.	11
Σχήμα 2.5:	Αναλυτικό διάγραμμα ροής διεργασιών παραγωγής τσιμέντου.	13
Σχήμα 2.6:	Κατανομή ελληνικών εργοστασίων παραγωγής τσιμέντου .	15
Σχήμα 2.7:	Ετήσια παραγωγική ικανότητα τσιμέντου ανά εταιρεία σε εκατομμύρια τόνους (2008).	16
Σχήμα 2.8:	Εξέλιξη παραγωγής τσιμέντου στην Ελλάδα.	17
Σχήμα 2.9:	Παραγωγή τσιμέντου 1998 – 2007.	18
Σχήμα 3.1:	Ορυκτό ανθρακίτη	28
Σχήμα 3.2:	Σωρός ορυκτού άνθρακα έτοιμου για καύση	31
Σχήμα 3.3:	Σωρός petcoke έτοιμος για κοσκίνισμα ώστε να φτάσει στην κατάλληλη κοκκομετρία καύσης	33
Σχήμα 4.1:	Χρήση εναλλακτικών καυσίμων και ανάκτηση ενέργειας	48
Σχήμα 4.2:	Σωρός ελαστικών έτοιμα για καύση χωρίς προεπεξεργασία	58
Σχήμα 4.3:	Pellets βιολογικής ιλύος	59
Σχήμα 4.4:	Βιολογική λάσπη σε σωρούς	60
Σχήμα 4.5:	Pellets RDF	62
Σχήμα 4.6:	Σύνθεση RDF	62
Σχήμα 4.7:	Συλλογή APW πλαστικών	67
Σχήμα 5.1:	Ετήσια μεταβολή τιμών των παραδοσιακών συμβατικών καυσίμων (1950-2008)	76
Σχήμα 5.2:	Ανάλυση του κόστους επένδυσης	78
Σχήμα 5.3:	Η συνολική παραγωγή εκπομπών CO <sub>2</sub> στην ελληνική βιομηχανία Τσιμέντου	86
Σχήμα 5.4:	Διαγράμματα XRD σε δείγματα κλίνκερ με α) συμβατικό καύσιμο (M0), β) με προσθήκη πυρολιθικού καυσίμου (CP08), γ) με προσθήκη πετρελαϊκού αποβλήτου (CR20) και δ) με προσθήκη μίγματος εναλλακτικών καυσίμων (MIII)	88
Σχήμα 5.5:	Διαγράμματα XRD με και χωρίς χρήση TDF (a και b αντίστοιχα)	89

Σχήμα 5.6:	Μικροδομή κλίνκερ με και χωρίς την χρήση TDF	90
Σχήμα 5.7:	Ποσοστό υποκατάστασης συμβατικών από εναλλακτικά καύσιμα σε θερμιδική βάση	93
Σχήμα 5.8:	Παραγωγή τσιμέντου στην Ελλάδα	94
Σχήμα 5.9:	Χρήση τσιμέντου στην Ελλάδα	94
Σχήμα 5.10:	Κατανάλωση εναλλακτικών καυσίμων ως ποσοστό της συνολικής θερμικής απαίτησης	95
Σχήμα 5.11:	Καύσιμα στη βιομηχανία τσιμέντου	96
Σχήμα 5.12:	Ποσοστό υποκατάστασης καυσίμων στην βιομηχανία τσιμέντου στην Ευρώπη	97
Σχήμα 5.13:	Χρήση εναλλακτικών καυσίμων στην βιομηχανία τσιμέντου της Γερμανίας	98



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1:	Βασικοί τύποι τσιμέντου με βάση το πρότυπο EN 197-1	8
Πίνακας 2.2:	Τύποι τσιμέντου με βάση το EN 197-1	9
Πίνακας 2.3:	Θερμοκρασιακές περιοχές και οι αντίστοιχες δράσεις κατά την έψηση του κλίνκερ	14
Πίνακας 3.1:	Συνολική κατανάλωση ενέργειας για ξηρή και υγρή μέθοδο	20
Πίνακας 3.2:	Περίσσεια αέρα % ανάλογα με το καύσιμο	22
Πίνακας 3.3:	Ποσοστό ανά τύπο καυσίμου στην βιομηχανία τσιμέντου	24
Πίνακας 3.4:	Χαρακτηριστικές ιδιότητες των στερεών καυσίμων	26
Πίνακας 3.5:	Ορυκτολογική ποσοτική ανάλυση τέφρας άνθρακα	26
Πίνακας 3.6:	Θερμογόνος δύναμη βασικών συμβατικών καυσίμων	30
Πίνακας 3.7:	Τυπική σύσταση του petcoke	32
Πίνακας 3.8:	Περιεκτικότητα ιχνοστοιχείων μετάλλων στο petcoke	32
Πίνακας 3.9:	Πολυαρωματικοί υδρογονάνθρακες που περιέχονται στο petcoke.	36
Πίνακας 3.10:	Χαρακτηριστικές ιδιότητες του φυσικού αερίου	41
Πίνακας 3.11:	Θερμογόνος δύναμη ορισμένων συμβατικών καυσίμων	43
Πίνακας 3.12:	Εκπομπές αερίων ρύπων Μαζούτ	45
Πίνακας 4.1:	Χρήση εναλλακτικών καυσίμων και διαχωρισμός τους ανάλογα με το βαθμό επικινδυνότητας τους	47
Πίνακας 4.2:	Προδιαγραφές εναλλακτικών καυσίμων που επηρεάζουν την παραγωγικότητα	52
Πίνακας 4.3:	Προδιαγραφές εναλλακτικών καυσίμων που επηρεάζουν την διάρκεια της ζωής της καμίνου	52
Πίνακας 4.4:	Προδιαγραφές πτητικών βαρέων μετάλλων σε εναλλακτικά καύσιμα	53
Πίνακας 4.5:	Βασικά χαρακτηριστικά καύσης των ελαστικών	57
Πίνακας 4.6:	Περιεκτικότητες κατά βάρος και θερμογόνος δύναμη συμβατικών/εναλλακτικών	63
Πίνακας 4.7:	Ανάλυση χρησιμοποιημένων APW ανά ποιότητα αποβλήτου	67
Πίνακας 4.8:	Δεδομένα χρήσης εναλλακτικών καυσίμων στην Ευρώπη	70
Πίνακας 4.9:	Σύγκριση θερμογόνου δυνάμεως σε εναλλακτικά καύσιμα	71
Πίνακας 5.1:	Συγκριτικά πλεονεκτήματα χρήσης κλιβάνου τσιμεντοβιομηχανίας σε σχέση με αποτεφρωτή για την καύση εναλλακτικών καυσίμων	74
Πίνακας 5.2:	Η % κατανάλωση καυσίμου στη βιομηχανία τσιμέντου της ΕΕ των 27 κρατών μελών το 2006 σε συνάρτηση με την	

	ποσότητα εκπομπών CO <sub>2</sub> ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας GJ	82
Πίνακας 5.3:	Παραγωγή εκπομπών CO <sub>2</sub> ανά φάση παραγωγής	84
Πίνακας 5.4:	Εκλύσεις CO <sub>2</sub> από την χρήση καυσίμων	85
Πίνακας 5.5	Χαρακτηριστικές ιδιότητες τσιμέντου με και χωρίς υποκατάσταση καυσίμου με 6% ελαστικά	91
Πίνακας 5.6:	Κατανομή χρήσης εναλλακτικών καυσίμων ανά είδος στην τσιμεντοβιομηχανία της Ευρώπης ( σε εκατ. τόνους / έτος)	99

# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χρήση εναλλακτικών καυσίμων, δηλαδή πρακτικά η καύση αποβλήτων αποτελεί θέμα που απασχολεί τις τελευταίες δεκαετίες τη βιομηχανία. Η μελέτη των δευτερογενών καυσίμων όπως λέγονται εξαιτίας των ιδιαίτερων συνθηκών καύσης στους κλιβάνους παραγωγής κλίνκερ είναι ιδιαίτερης σημασίας. Με την πάροδο των ετών το θέμα της αξιοποίησης από την τσιμεντοβιομηχανία των εναλλακτικών καυσίμων γίνεται ολοένα και πιο επίκαιρο και σοβαρό με επιδράσεις που φτάνουν όχι μόνο στο επίπεδο του βιομηχανικού ενδιαφέροντος αλλά και στο επίπεδο του ευρύτερου κοινωνικού ενδιαφέροντος. Πλέον μία περιβαλλοντικά ορθή διάθεση βιομηχανικών και αστικών αποβλήτων στα αναπτυσσόμενα βιομηχανικά κράτη περιλαμβάνει οπωσδήποτε την χρήση της δυνατότητας που προσφέρει η τσιμεντοβιομηχανία ως προς την καύση εναλλακτικών καυσίμων.

Ένας από τους κύριους συντελεστές του κόστους παραγωγής στην βιομηχανία τσιμέντου είναι η καύσιμη ύλη που χρησιμοποιείται για την έψηση των πρώτων υλών. Υπολογίζεται ότι η ενέργεια που απαιτείται κατά την παραγωγή κλίνκερ είναι 3350 – 4200 MJ/kg. Ανάλογα με την τιμή του, η συμμετοχή του καυσίμου στην διαμόρφωση του κόστους είναι περίπου 30%. Στην πορεία των ετών η τσιμεντοβιομηχανία κατέληξε να χρησιμοποιεί ως καύσιμο κατά κύριο λόγο τον άνθρακα και τον πετρελαϊκό οπτάνθρακα.

Η ανάπτυξη σοβαρών προβληματισμών σχετικών με την ρύθμιση του κόστους του καυσίμου συνέπεσε με την περίοδο αναζήτησης οικονομικών και οικολογικά αποδεκτών λύσεων για την διάθεση των διαφόρων αποβλήτων, παραπροϊόντων, απορριμμάτων κλπ. Αυτό οδήγησε γενικότερα στην θεμελίωση της έννοιας της αξιοποίησης των υλικών αυτών και το μετασχηματισμό τους από απορρίμματα σε αξιοποιήσιμα υλικά. Η ανάπτυξη αυτών των ιδεών βρήκε πρόσφορο έδαφος στην βιομηχανία τσιμέντου από τις αρχές της δεκαετίας του '80 και ως σήμερα έχουν πραγματοποιηθεί παγκοσμίως πλήθος ερευνών και εφαρμογές υποκατάστασης συμβατικών από εναλλακτικά καύσιμα σε βιομηχανική κλίμακα.

Η έρευνα εστίασε σε υλικά που έχουν υψηλό θερμικό δυναμικό, με άλλα λόγια σε υλικά που δύναται να χαρακτηρισθούν καύσιμα λόγω του ότι η θερμογόνο ισχύς τους υπερβαίνει το αντίστοιχο όριο. Από την άλλη πλευρά η αναγκαιότητα αντικατάστασης ή υποκατάστασης των συμβατικών καυσίμων δεν θα έπρεπε να γίνει αποκλειστικά με ενεργειακούς όρους. Τα εναλλακτικά καύσιμα εκτός από την ενέργεια που θα καλύπτουν στην παραγωγική διαδικασία και το αντίστοιχο όφελος

που προκύπτει από την εξοικονόμηση πόρων ορυκτών καυσίμων, θα πρέπει να συμβάλλουν και στην μείωση των αερίων εκπομπών.

Η σύνθεση των παραμέτρων εξοικονόμησης ενέργειας, εξοικονόμησης ορυκτών καυσίμων και η συμβολή στη μείωση αερίων εκπομπών καθιστούν αναγκαία την περαιτέρω μελέτη του θέματος των εναλλακτικών καυσίμων στην τσιμεντοβιομηχανία. Στην παρούσα εργασία γίνεται προσέγγιση των διεργασιών παραγωγής κλίνκερ και εστιάζεται το ενδιαφέρον στην παρουσίαση των συμβατικών και εναλλακτικών καυσίμων που επικρατούν πλέον στην βιομηχανία τσιμέντου ως προς τις παραμέτρους που έχουν αναφερθεί.

Αναλυτικότερα στην παρούσα εργασία στο κεφάλαιο 2 γίνεται παρουσίαση των διεργασιών παραγωγής κλίνκερ σε βιομηχανική μονάδα παραγωγής. Παράλληλα παρουσιάζονται οι κύριες και δευτερεύουσες πρώτες ύλες της παραγωγικής διαδικασίας και η διεθνής προτυποποίηση των τύπων τσιμέντου που προκύπτουν κατά την παραγωγική διαδικασία. Στο κεφάλαιο 3 γίνεται αναλυτική παρουσίαση των συμβατικών καυσίμων. Γίνεται αναφορά στα είδη των στερεών, υγρών και αερίων συμβατικών καυσίμων και στις χαρακτηριστικές τους ιδιότητες. Επίσης επιχειρείται σύγκριση μεταξύ των ειδών αυτών προκειμένου να παρουσιασθούν τα συγκριτικά τους πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κατά την εφαρμογή τους στην τσιμεντοβιομηχανία. Τα εναλλακτικά καύσιμα παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 4, όπου αναπτύσσονται τα είδη και οι κατηγορίες τους καθώς και η ανάγκη εφαρμογής τους στην τσιμεντοβιομηχανία. Ειδικότερα παρουσιάζονται οι ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά των ελαστικών αυτοκινήτου, της βιολογικής λάσπης, του RDF, παραπροϊόντων όπως κελύφη ρυζιού και πλαστικών απορριμμάτων γεωργικής δραστηριότητας. Στο Κεφάλαιο 5 γίνεται σύγκριση των συμβατικών και εναλλακτικών καυσίμων, αναπτύσσοντας τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της χρήσης των εναλλακτικών καυσίμων και σε τομείς όπως το κόστος, η ενέργεια, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις και η ποιότητα του προϊόντος. Τέλος στο κεφάλαιο 6 γίνεται συνοπτικά παρουσίαση των κυριότερων συμπερασμάτων που προκύπτουν από αυτή την εργασία σχετικά με τα συμβατικά και τα εναλλακτικά καύσιμα στην βιομηχανία τσιμέντου.

## 2. ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ

### 2.1 Πρώτες ύλες

Η σημαντικότερη πρώτη ύλη για την παραγωγή του κλίνκερ τσιμέντου είναι τα ασβεστολιθικά πετρώματα, που εξορύσσονται επιφανειακά κοντά στη μονάδα παραγωγής του τσιμέντου. Επειδή, ποσοστό περίπου 80% από τους 1.50-1.65 t πρώτων υλών, που απαιτούνται για την παραγωγή 1 t κλίνκερ, είναι ασβεστολιθικό υλικό, είναι προφανής η αναγκαιότητα γειννίασης της θέσης εξόρυξης ασβεστολιθικών πετρωμάτων και της μονάδας παραγωγής κλίνκερ τσιμέντου. Το  $\text{CaCO}_3$  (ανθρακικό ασβέστιο) είναι πολύ γνωστό στη φύση και βρίσκεται σε πολλές γεωλογικές μορφές. Οι πιο καθαρές μορφές του ανθρακικού ασβεστίου είναι ο ασβεστόλιθος και η κιμωλία.

Ο ασβεστόλιθος περιέχει διάφορες προσμίξεις που επηρεάζουν τον χρωματισμό του, ενώ όταν βρίσκεται σε πολύ καθαρή μορφή είναι λευκός. Οι προσμίξεις των ασβεστόλιθων απαντώνται σε πολύ μικρές ποσότητες και οι σημαντικότερες είναι  $\text{MgCO}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ . Η κυριότερη μορφή είναι το  $\text{MgCO}_3$  αφού είναι συνηθισμένη στους ασβεστόλιθους η μερική υποκατάσταση του ασβεστίου από το μαγνήσιο (λόγω δολομητίωσης των ασβεστόλιθων).

Η κιμωλία είναι ιζηματογενές πέτρωμα που σε αντίθεση με τον ασβεστόλιθο χαρακτηρίζεται από μαλακή γαιώδη μορφή. Σε μερικά αποθέματα κιμωλίας η περιεκτικότητα σε ασβεστόλιθο μπορεί να φτάσει το 98%-99% ενώ η περιεκτικότητα στα υπόλοιπα οξειδία είναι σχετικά χαμηλή. Επειδή η λατόμευση και η θραύση της κιμωλίας είναι σχετικά εύκολη, η χρήση της βελτιώνει σημαντικά το αντίστοιχο κόστος παραγωγής τσιμέντου.

Οι άργιλοι έχουν ως κύρια συστατικά οξειδία του Αργιλίου( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) , οξειδία του σιδήρου( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) και αλκάλια( $\text{Na}_2\text{O}, \text{K}_2\text{O}$ ) καθώς και άλλες ενώσεις σε μικρά ποσοστά. Τα κύρια συστατικά τους αποτελούνται από ένυδρες αργιλοπυριτικές ενώσεις. Οι άργιλοι χωρίζονται στην ομάδα του καολίνη με κύριο ορυκτό τον καολινίτη( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), την ομάδα του μοντμοριλονίτη με κυριό ορυκτό τον μοντμοριλονίτη ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} + n\text{H}_2\text{O}$ ) και την ομάδα του ιλλίτη ( $\text{K}_2\text{O}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ ). Η σειρά δραστηκότητας των αργίλων με την περιεκτικότητα του  $\text{CaCO}_3$  να αυξάνει είναι :

Μοσχοβίτης → Μοντμοριλονίτης → Χλωρίτης → Ιλλίτης → Καολινίτης

Το άμορφο πυρίτιο ή το πυρίτιο που είναι ενωμένο με  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ή  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  είναι περισσότερο δραστικό από το ελεύθερο  $\text{SiO}_2$ . Η δραστηριότητα των διάφορων μορφών του πυριτίου με το  $\text{CaO}$  αυξάνει κατά την εξής σειρά:

Χαλαζίας→Οπάλιος→Χρυστοβαλλίτης→Τριδυμίτης→Αστρίοι→Αμφίβολοι→  
→Άργιλοι→Υαλώδεις σκωρίες

Το σημείο τήξης των αργίλων κυμαίνεται μεταξύ 1150-1785 °C. Η χημική τους σύσταση ποικίλει από την καθαρή άργιλο μέχρι εκείνη που περιέχει σημαντικά ποσά χημικών προσμίξεων { $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ,  $\text{FeS}$ , άμμο,  $\text{CaCO}_3$  κλπ.} Το υδροξείδιο του σιδήρου είναι το κύριο πρόσθετο που δίνει χρώμα στις αργίλους, ενώ οι καθαρές άργιλοι είναι λευκές. Για την επιλογή των πρώτων υλών και ιδίως των αργίλων θα πρέπει να κρίνουμε ότι κατά κανόνα οι αργιλούχες ασβεστομάργες είναι καταλληλότερες από τους καθαρούς ασβεστόλιθους καθότι η επεξεργασία τους είναι ευκολότερη [1][2].

## 2.2 Κλίνκερ

Το κλίνκερ είναι το προϊόν έψησης των πρώτων υλών σε ποσοστό συνήθως 75% ασβεστολιθικά - 25% Αργιλικά. Το μείγμα των πρώτων υλών (θραυσμένος ασβεστόλιθος, αργιλικά πετρώματα, χαλαζιακά πετρώματα, σιδηρομετάλλευμα, βωξίτης, κ.α.) αναμειγνύονται σε κατάλληλη αναλογία και λειοτριβούνται. Το λειοτριβημένο μείγμα («φαρίνα») υφίσταται πυρομεταλλουργική κατεργασία μέσα σε περιστροφική κάμινο.

Στην περιστροφική κάμινο οι λειοτριβημένες πρώτες ύλες, με χρήση καυσίμων (φυσικό αέριο, πετρέλαιο, γαιάνθρακες ή και εναλλακτικά καύσιμα), θερμαίνονται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Η θερμοκρασία κλινκεροποίησης είναι γύρω στους 1380-1420°C. Ας σημειωθεί ότι ως τσιμέντα Portland χαρακτηρίζονται όπου το κλίνκερ συμμετέχει σε ποσοστό μεγαλύτερο του 65%, έτσι, με φυσικοχημικές διεργασίες μετατρέπονται σε ένα υλικό γκριζοπράσινου χρώματος μορφής σφαιριδίων διαμέτρου 10-25 mm το οποίο ονομάζεται κλίνκερ τσιμέντου.

Οι διάφορες φάσεις (στάδια) κατεργασίας για την παραγωγή κλίνκερ στη διάταξη της καμίνου είναι αρχικά η εξάτμιση του ελεύθερου (μη συνδεδεμένου) νερού στην συνέχεια η απομάκρυνση του κρυσταλλικού νερού (συνδεδεμένο νερό) κυρίως από τα αργιλικά πετρώματα (πρώτες ύλες) και τέλος η διάσπαση (πύρωση) του ασβεστόλιθου ( $\text{CaCO}_3$ ). Στη συνέχεια, για την παραγωγή του κοινού τύπου τσιμέντου (OPC, ordinary Portland cement), ακολουθούνται οι διεργασίες της ανάμειξης του κλίνκερ (95%) με γύψο (5%) και η λεπτομερής λειοτρίβηση (άλεση). Στο σχήμα 2.1 εμφανίζονται σφαιρίδια κλίνκερ πυροσυσσωμάτωσης.



Σχήμα 2.1 Σφαιρίδια κλίνκερ προϊόν πυροσυσσωμάτωσης [1].

Τα οξειδία που απαρτίζουν τις κύριες φάσεις του κλίνκερ  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  τα οποία αποτελούν το 95% της μάζας του.

#### Πυριτικό τριασβέστιο ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ η $\text{C}_3\text{S}$ )

Το κυριότερο συστατικό του κλίνκερ και αυτό που καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την πορεία της πήξης και της σκλήρυνσης. Το  $\text{C}_3\text{S}$  ενσωματώνει στο πλέγμα του και άλλα ιόντα με αποτέλεσμα το στερεό διάλυμα που προκύπτει ονομάζεται αλίτης. Η ενυδάτωση του αλίτη είναι μια πολύπλοκη διαδικασία και το προϊόν της ενυδάτωσης είναι μια άμορφη φάση ενυδατωμένου πυριτικού ασβεστίου. Η χημική αντίδραση ενυδάτωσης είναι:



#### Πυριτικό διασβέστιο ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ η $\text{C}_2\text{S}$ )

Το  $\beta$ -  $\text{C}_2\text{S}$  είναι η πλέον σημαντική γιατί είναι το κύριο συστατικό του κλίνκερ. Η μορφή αυτή είναι μετασταθής σε όλες τις θερμοκρασίες αλλά με την είσοδο ξένων ιόντων στο πλέγμα επιτυγχάνεται σταθεροποίηση της σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Το  $\text{C}_2\text{S}$  ενσωματώνει στο πλέγμα του και άλλα ιόντα με αποτέλεσμα το στερεό διάλυμα που προκύπτει ονομάζεται βελίτης

Η χημική αντίδραση ενυδάτωσης είναι:



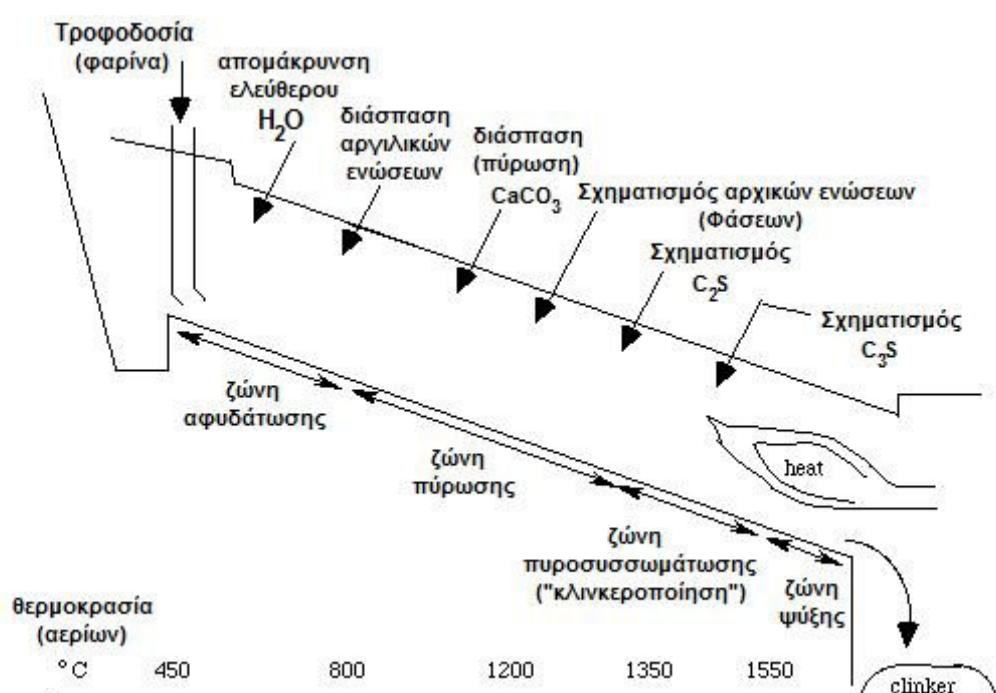
Είναι παρόμοια με την αντίδραση του  $\text{C}_3\text{S}$  αλλά με μικρότερα ποσοστά  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

#### Αργιλικό τριασβέστιο ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ η $\text{C}_3\text{A}$ )

Οι αντιδράσεις του  $\text{C}_3\text{A}$  με το νερό καθώς και οι αντιδράσεις του με το νερό και τη γύψο έχουν μελετηθεί εκτεταμένα για να καθορισθεί ο ρόλος της γύψου στη ρύθμιση της πήξης του τσιμέντου.

#### Φερίτική φάση ( $\text{C}_4\text{AF}$ )

Το  $C_4AF$  μειώνει (ελαττώνει) τη θερμοκρασία μετατροπής σε κλίνκερ και έτσι συμβάλλει θετικά στην κατανάλωση ενέργειας κατά την παραγωγή του τσιμέντου. Ενυδατώνεται και αυτό σχετικά γρήγορα, αλλά δεν συμβάλλει σχεδόν καθόλου στην ανάπτυξη αντοχής. Οι περισσότεροι χρωματισμοί του τσιμέντου οφείλονται στην παρουσία  $C_4AF$  και των ένυδρων ενώσεών του. Σχηματικά οι διεργασίες που συμβαίνουν εντός του περιστροφικού κλιβάνου κατά την παραγωγή του κλίνκερ και οι αντίστοιχες ζώνες που σχηματίζονται φαίνονται στο Σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2: Διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στη διάταξη της περιστροφικής καμίνου για την παραγωγή του κλίνκερ [1].

### 2.3 Τσιμέντο

Το σκυροδέμα είναι σήμερα το συνηθέστερο δομικό υλικό για τις κατασκευές κτιρίων και έργων κοινής ωφέλειας. Το τσιμέντο σε ανάμειξη με το νερό (τσιμεντόπαστα) είναι το συνδετικό υλικό, που χρησιμοποιείται στην παραγωγή του σκυροδέματος. Υπάρχουν πολλών ειδών (τύποι) τσιμέντα, με συνηθέστερο αυτό που καλείται τσιμέντο Portland (PC, Portland Cement). Το κοινό τσιμέντο είναι ένα γκρίζο και



λεπτομερές υλικό, που προκύπτει από τη λειοτρίβηση του κλίνκερ τσιμέντου και την ανάμειξη του σε κατάλληλη αναλογία με γύψο (Σχήμα 2.3).



Σχήμα 2.3 Πρώτες ύλες και ενδιάμεσα για την παραγωγή τσιμέντου [1].

Οι τύποι των τσιμέντων που παρασκευάζονται σε κάθε χώρα της Ευρωπαϊκής Ένωσης εξαρτώνται από τις διαθέσιμες πρώτες ύλες, όπως επίσης από τη ζήτηση κάθε τύπου τσιμέντου. Έτσι, ανάλογα με τις διαθέσιμες και χρησιμοποιούμενες πρώτες ύλες, δημιουργήθηκαν οι διάφοροι τύποι τσιμέντων που μπορούν να παραχθούν. Οι τύποι αυτοί είναι το τσιμέντο Portland, τα τσιμέντα με φυσική ποζολάνη, ιπτάμενη τέφρα (πυριτική ή ασβεστοπυριτική), τσιμέντα με σκωρία υψικαμίνου, τσιμέντα με πυριτική παιπάλη, με ασβεστόλιθο κλπ.

### 2.3.1 Κύρια συστατικά τσιμέντου

Τα κύρια συστατικά του τσιμέντου (main constituents) είναι ειδικά επιλεγμένα ανόργανα υλικά που προστίθενται σε κάποια φάση της παραγωγικής διαδικασίας (συνήθως κατά την τελική άλεση) σε αναλογία που ξεπερνά το 5% κ.β. της συνολικής ποσότητας κυρίων και δευτερευόντων συστατικών. Στα κύρια συστατικά εκτός από το κλίνκερ του τσιμέντου Portland (K), το οποίο έχει και τον δεσπόζοντα ρόλο, περιλαμβάνεται η κοκκοποιημένη σκωρία υψικαμίνων (S), διάφορα ποζολανικά υλικά, φυσικά (P) ή τεχνητά (Q), διάφορες τέφρες, πυριτικές (V) ή ασβεστούχες (W), ψημένος σχιστόλιθος (burnt shale) (T), ασβεστόλιθος (L, LL) και πυριτική παιπάλη (silica fume) (D). Με βάση το πρότυπο EN 197-1 οι πέντε βασικοί τύποι τσιμέντου περιγράφονται στον Πίνακα 2.1 [3].

### Πίνακας 2.1

Βασικοί τύποι τσιμέντου με βάση το πρότυπο EN 197-1

ΤΥΠΟΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
CEM I	Τσιμέντο Portland
CEM II	Σύνθετα τσιμέντα Portland
CEM III	Σκωριοτσιμέντα
CEM V	Σύνθετα τσιμέντα
CEM IV	Ποζολανικά τσιμέντο

### Πίνακας 2.2

Τύποι τσιμέντου με βάση το EN 197-1

Όνομα τσιμέντου		Τύπος τσιμέντου	% Ποσοστό αντικατάστασης Κλίνκερ
CEM I		Πορτλαντ	0-5
CEM II	A	Πορτλαντ – σκωρίας Πορτλαντ - πυριτικής παιπάλης Πορτλαντ - ποζολάνης	6-20
	B	Πόρτλαντ - ιπτάμενης τέφρας Πορτλαντ - σχιστόλιθου Πόρτλαντ - ασβεστολίθου Πόρτλαντ – σύνθετο	21-35
CEM III	A	Σκωρίας υψικαμίνου	36-65
	B		66-80
	C		81-95
CEM IV	A	Ποζολανικό τσιμέντο	11-35
	B		36-55
CEM V	A	Σύνθετο τσιμέντο	36-60
	B		62-80

### **2.3.2. Δευτερεύοντα συστατικά**

Τα δευτερεύοντα συστατικά είναι ειδικά επιλεγμένα ανόργανα φυσικά ορυκτά υλικά, που προκύπτουν κατά τη διαδικασία παραγωγής του κλίνκερ, ή συστατικά, όπως ορίζονται στην 2.3.1., εκτός εάν χρησιμοποιούνται σαν κύρια συστατικά του τσιμέντου. Τα συστατικά αυτά προστίθενται σε κάποια φάση της παραγωγικής του διαδικασίας στο τσιμέντο (συνήθως κατά την τελική άλεση) σε αναλογία που δεν ξεπερνά το 5% κ.β. της συνολικής ποσότητας κυρίων και δευτερευόντων συστατικών. Στα δευτερεύοντα συστατικά (mac), τα οποία επιτρέπεται να προστεθούν σε μικρά ποσοστά - έως 5% κ.β - στο τσιμέντο, περιλαμβάνονται και τα υλικά που είναι γνωστά ως γεμιστικά (fillers) [4]. Αυτά είναι ειδικά επιλεγμένα λεπτόκοκκα ανόργανα υλικά, αδρανή ή μη, που στοχεύουν στη βελτίωση των φυσικών ιδιοτήτων του τσιμέντου. Τα δευτερεύοντα συστατικά, ύστερα από κατάλληλη προετοιμασία και εξαιτίας της κοκκομετρικής τους κατανομής, βελτιώνουν τις φυσικές ιδιότητες του τσιμέντου (όπως το εργάσιμο ή την απαίτηση σε νερό). Μπορεί να είναι αδρανή ή να έχουν ελαφρώς υδραυλικές, λανθάνουσες υδραυλικές ή ποζολανικές ιδιότητες. Δεν τίθενται, όμως, για αυτά τέτοιες απαιτήσεις. Τα δευτερεύοντα υλικά πρέπει να προετοιμάζονται σωστά, δηλαδή να επιλέγονται, να ομοιογενοποιούνται, να ξηραίνονται και να αλέθονται ανάλογα με τη μορφή κατά την παραγωγή ή την παράδοση τους. Δεν πρέπει να αυξάνουν αισθητά την απαίτηση σε νερό του τσιμέντου ή να προκαλούν την καταστροφή του σκυροδέματος ή του κονιάματος με οποιοδήποτε τρόπο ή να μειώνουν την προστασία του οπλισμού από τη διάβρωση [1][5].

### **2.3.3. Θεικό ασβέστιο**

Το θεικό ασβέστιο προστίθεται στα άλλα συστατικά του τσιμέντου κατά την τελική άλεση του κλίνκερ, με σκοπό να ρυθμίσει την πήξη του τσιμέντου. Το θεικό ασβέστιο μπορεί να είναι φυσική γύψος (συνηθέστερη περίπτωση), διυδρίτης ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), ημιυδρίτης ( $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ ) ή ανυδρίτης (άνυδρο θεικό ασβέστιο,  $\text{CaSO}_4$ ) ή οποιοδήποτε μείγμα αυτών. Η γύψος και ο ανυδρίτης υπάρχουν στη φύση. Το θεικό ασβέστιο διατίθεται επίσης ως παραπροϊόν ορισμένων βιομηχανικών διεργασιών.

### 2.3.4. Πρόσθετα

Τα πρόσθετα είναι υλικά που δεν ανήκουν ούτε στα κύρια ούτε στα δευτερεύοντα συστατικά του τσιμέντου και προστίθενται για να βελτιώσουν είτε την παραγωγική διαδικασία είτε τις ιδιότητες του τσιμέντου. Η ολική τους ποσότητα δεν πρέπει να υπερβαίνει, σε ξηρή βάση, το 1.0% της μάζας του τσιμέντου (εξαιρούνται οι χρωστικές). Η ποσότητα των οργανικών προσθέτων σε ξηρά βάση δεν πρέπει να υπερβαίνει το 0.5% της μάζας του τσιμέντου. Αυτά τα πρόσθετα δεν πρέπει να συμβάλλουν στη διάβρωση του σπλισμού ή να βλάπτουν τις ιδιότητες του τσιμέντου ή του σκυροδέματος ή του κονιάματος που παράγεται από το τσιμέντο.

### 2.3.5 Προτυποποίηση τσιμέντου

Σύμφωνα με απόφαση της ΕΕ, από 01/04/01 τα τσιμέντα που θα κυκλοφορούν σε όλες τις χώρες κράτη μέλη πρέπει να είναι πιστοποιημένα, να φέρουν σήμανση CE και να είναι σύμφωνα με τα νέα Ευρωπαϊκά Πρότυπα, τα οποία είναι:

A) **EN 197-1: Τσιμέντο Μέρος-1:** «Σύνθεση, προδιαγραφές και κριτήρια συμμόρφωσης για κοινά τσιμέντα» και

B) **EN 197-2 : Τσιμέντο Μέρος-2 :** «Αξιολόγηση συμμόρφωσης»

Τα παραπάνω ευρωπαϊκά πρότυπα έχουν υιοθετηθεί και εφαρμόζονται στην Ελλάδα ως Ελληνικά Πρότυπα από τον ΕΛΟΤ (Ελληνικό Οργανισμό Τυποποίησης). Είναι γνωστά ως **ΕΛΟΤ EN 197-1** και **ΕΛΟΤ EN 197-2** και κυκλοφορούν από τον Οκτώβριο 2000, αλλά τέθηκαν σε ισχύ με Υπουργική απόφαση (ΦΕΚ 917 Β / 17-07-01), η οποία προέβλεπε μεταβατική περίοδο μέχρι 31/12/01 για την προσαρμογή του κατασκευαστικού κλάδου σε αυτά.

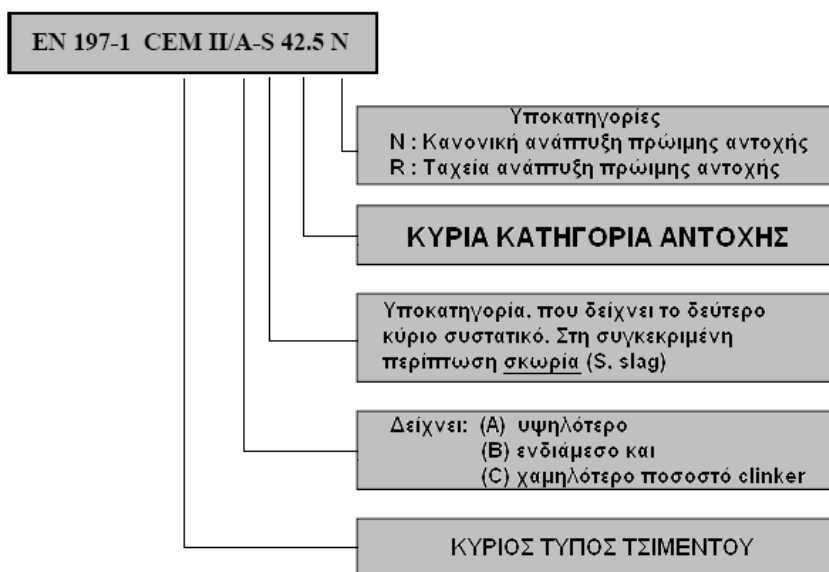
Ο συμβολισμός των διαφόρων τσιμέντων, σύμφωνα με το πρότυπο EN 197-1, άρα και με το ΕΛΟΤ EN 197-1 καθορίζεται από τον κύριο τύπο τσιμέντου, το ποσοστό clinker που περιέχεται στο τσιμέντο, τον τύπο του δεύτερου κύριου συστατικού, την κατηγορία αντοχής, το επίπεδο της πρώιμης αντοχής [3].

Στο Σχήμα 2.4 φαίνεται η αντιστοιχία στον πρότυπο συμβολισμό κάθε τύπου τσιμέντου. Για τον τύπο CEM II/A-S 42.5N η αντιστοιχία είναι:

A το ποσοστό του κλίνκερ

S περιεκτικότητα σκωρίας υψικαμίνου.

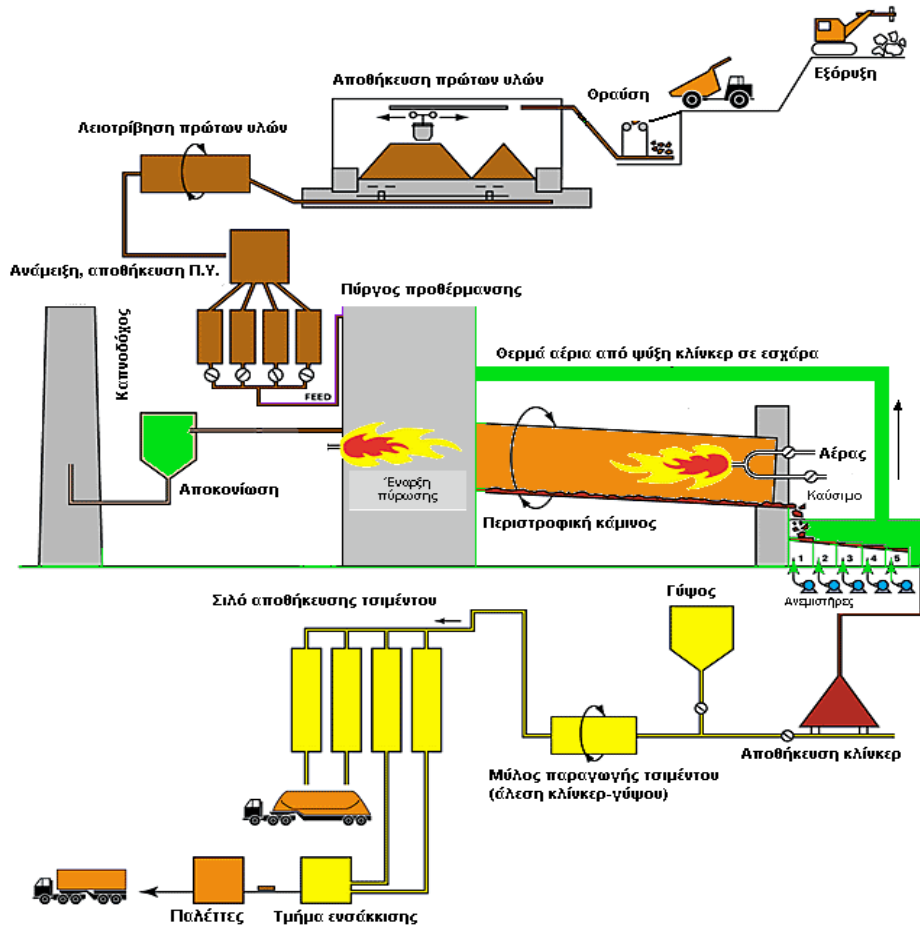
42.5 N κανονικής ανάπτυξης πρώιμης αντοχής.



Σχήμα 2.4 Συμβολισμός και επεξήγηση ενός τύπου τσιμέντου [1].

## 2.4 Παραγωγική διαδικασία τσιμέντου

Η παραγωγική διαδικασία του τσιμέντου αρχικά ξεκινάει με την εξόρυξη των πρώτων υλών από τα λατομεία της επιχείρησης, στην συνέχεια οδηγούνται με φορτηγά στους θραυστήρες όπου αποκτούν κατάλληλη κοκκομετρία. Η προετοιμασία του μίγματος πρώτων υλών έχει ως αντικείμενο να προσδώσει στο μίγμα αφενός την κατάλληλη λεπτότητα που είναι απαραίτητη για να ψηθεί με την μικρότερη κατανάλωση ενέργειας χωρίς να υποβαθμιστεί η ποιότητα του, όσο και την απαραίτητη ομοιογένεια που χρειάζεται για την σταθερότητα στην ποιότητα αλλά και την αποφυγή προβλημάτων στην περιστροφική κάμινο. Περιλαμβάνεται η θραύση και η άλεση της φαρίνας καθώς και η προομογενοποίηση και η ομογενοποίηση. Στη συνέχεια έχουμε την έψηση των πρώτων υλών μια από τις σημαντικότερες διαδικασίες δεδομένου ότι καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα του τελικού προϊόντος. Κατά την έψηση γίνονται οι βασικές αντιδράσεις που σταδιακά οδηγούν στον μετασχηματισμό των πρώτων υλών από ασβεστόλιθο και άργιλο στα διπλά και τριπλά οξειδία που αποτελούν τις διάφορες ορυκτολογικές φάσεις του κλίνκερ. Οι αντιδράσεις αυτές είναι πολύπλοκες και δεν είναι μελετημένες σε όλες τους τις λεπτομέρειες, καθόσον τα μίγματα των πρώτων υλών σχεδόν ποτέ δεν είναι ακριβώς τα ίδια, ενώ επιπλέον κάθε περιστροφική κάμινο έχει τις ιδιαιτερότητες της που σε μεγάλο βαθμό επηρεάζουν τις αντιδράσεις τσιμέντου [1][4]. Σχηματικά η παραπάνω διαδικασία παραγωγής τσιμέντου σε μία βιομηχανική μονάδα παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.5



Σχήμα 2.5 Αναλυτικό διάγραμμα ροής διεργασιών παραγωγής τσιμέντου.

Κατά την παραγωγική διαδικασία αναπτύσσονται στα διάφορα στάδια υψηλές θερμοκρασίες, ειδικότερα κατά την έψηση του κλίμερ η θερμοκρασία εντός της καμίνου φτάνει σχεδόν τους  $1500^{\circ}\text{C}$ . Οι θερμοκρασιακές ζώνες που αναπτύσσονται κατά την διάρκεια της έψησης εντός του κλιβάνου αντιστοιχούν σε χημικές δράσεις που καταλήγουν στην παραγωγή του κλίμερ. Αναλυτικά οι δράσεις στις διάφορες θερμοκρασιακές περιοχές παρουσιάζονται στο Πίνακα 2.3

### Πίνακας 2.3

Θερμοκρασιακές περιοχές και οι αντίστοιχες δράσεις κατά την έψηση του κλίνκερ [1].

Θερμοκρασιακή περιοχή (°C)	Περιγραφή δράσης
<200	εξάτμιση
200-800	προθέρμανση
800-1100	ασβεστοποίηση
1100-1300	εξώθερμες αντιδράσεις
1300-1450-1300	κλινκεροποίηση
1300-1000	ψύξη

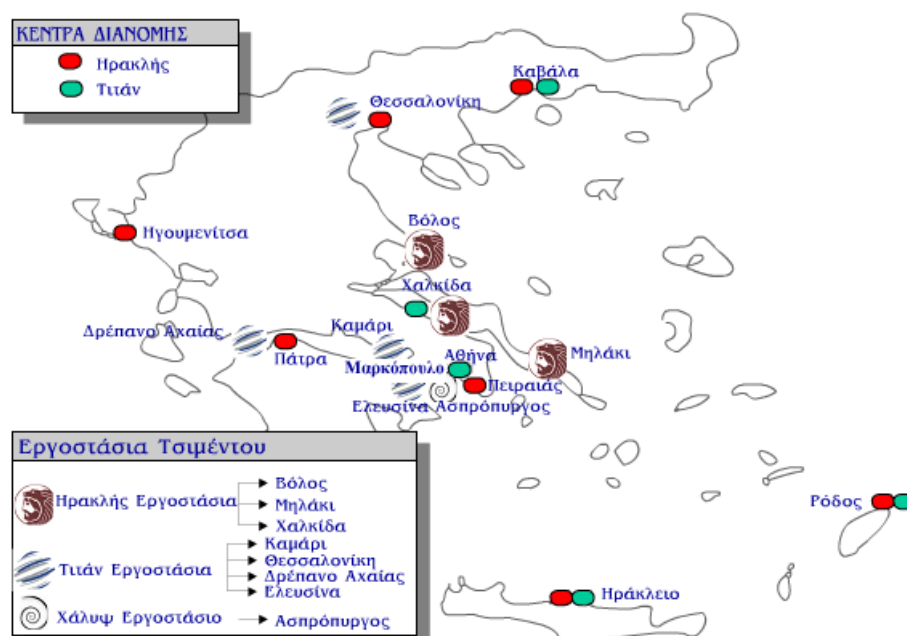
Ο υδραυλικός χαρακτήρας του τσιμέντο οφείλεται κυρίως στην ενυδάτωση των ασβεστοπυριτικών ενώσεων ( $C_2S$  και  $C_3S$ ), οι οποίες είναι τα κύρια ορυκτολογικά συστατικά του κλίνκερ και αποτελούν τα 2/3 της μάζας του. Μπορούν, όμως, και άλλες χημικές ενώσεις να συμμετέχουν στο μηχανισμό σκλήρυνσης, όπως π.χ. ασβεσταργιλικές ενώσεις ( $C_3A$  και  $C_4AF$ ). Το άθροισμα των συγκεντρώσεων του δραστικού οξειδίου του ασβεστίου ( $CaO$ ) και του δραστικού διοξειδίου του πυριτίου ( $SiO_2$ ) στο CEM τσιμέντο πρέπει να είναι τουλάχιστον 50% κατά μάζα, όταν οι συγκεντρώσεις προσδιορίζονται σύμφωνα με το πρότυπο EN 196-2. Επιπροσθέτως, στο κλίνκερ του τσιμέντου Portland η αναλογία  $CaO/SiO_2$  δεν πρέπει να είναι μικρότερη του 2, ενώ δεν πρέπει να ξεπερνιέται το 5% κ.β. για το περιεχόμενο  $MgO$ . Σημειώνεται, επίσης, ότι υπάρχουν τσιμέντα, των οποίων η σκλήρυνση οφείλεται κυρίως σε άλλες ενώσεις, π.χ. το αργιλικό ασβέστιο στο ασβεσταργιλικό τσιμέντο. Τα τσιμέντα CEM αποτελούνται από διαφορετικά υλικά και είναι στατιστικά ομοιογενή στη σύνθεση ως επακόλουθο ποιοτικά διασφαλισμένης παραγωγής και διεργασιών χειρισμού του υλικού. Η σύνδεση μεταξύ αυτών των διεργασιών παραγωγής και χειρισμού των υλικών και η συμμόρφωση του τσιμέντου με το EN 197-1 καθορίζεται στο EN 197-2



## 2.5 Ελληνική τσιμεντοβιομηχανία

Η υπάρχουσα κατάσταση εργοστασίων τσιμέντου στην Ελλάδα είναι η εξής:

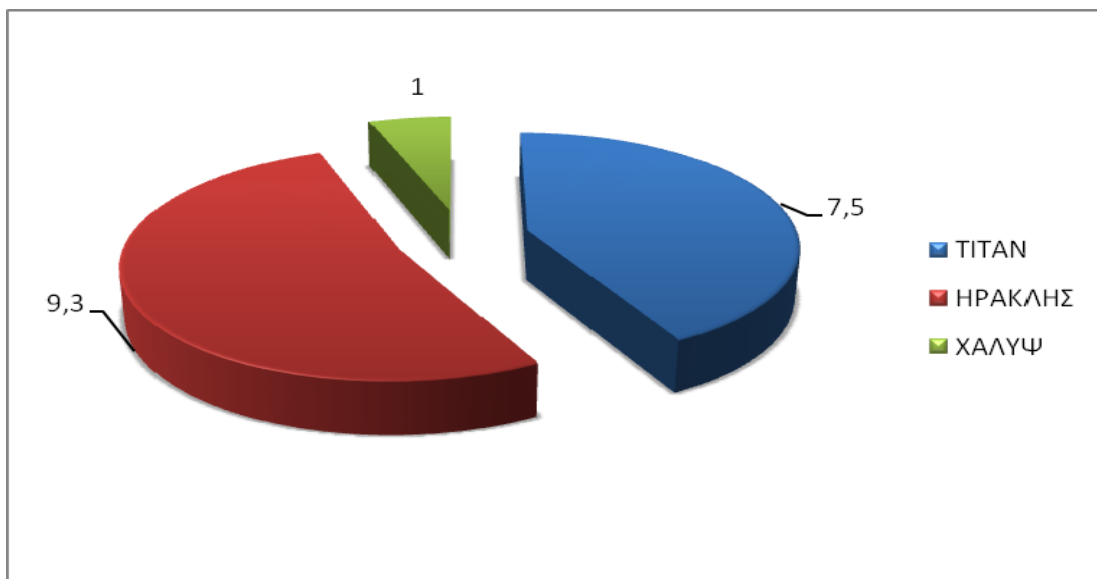
Υπάρχουν αυτή την στιγμή 8 εργοστάσια παραγωγής τσιμέντου από τα οποία 4 είναι υπό την ιδιοκτησία της TITAN A.E(Καμάρι Βοιωτίας 1, Ελευσίνα 1, Θεσσαλονίκη 1, Δρέπανο Αχαΐας 1) + Εξωτερικό (U.S.A. 2, Αίγυπτος 2, Σκόπια 1, Βουλγαρία 1, Σερβία 1)ενώ η εταιρεία ΑΓΕΤ «ΗΡΑΚΛΗΣ» (Lafarge Group) έχει 3 στην Ελλάδα (Βόλος 1, Χαλκίδα 1,Μηλάκι Αλιβερίου 1)και τέλος η εταιρεία Τσιμέντα «ΧΑΛΥΨ» (Italcementi Group)έχει 1 στην Ελλάδα στον Ασπρόπυργο Αττικής. Στο Σχήμα 2.6 παρουσιάζεται η κατανομή εργοστασίων τσιμέντου στην Ελλάδα.



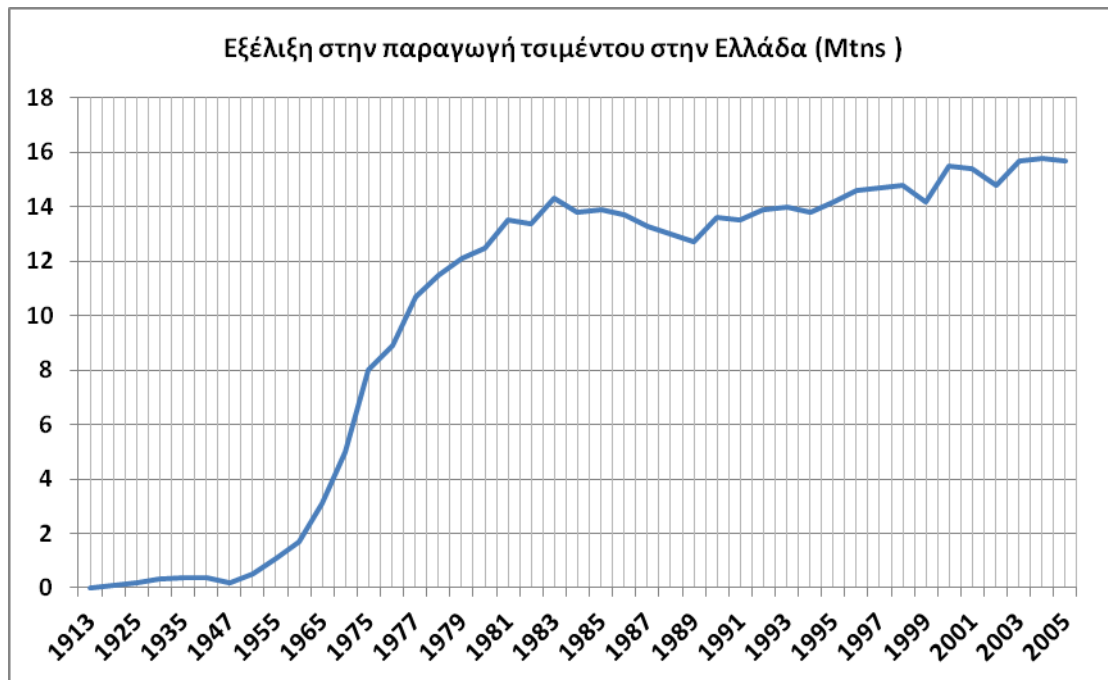
Σχήμα 2.6 Κατανομή ελληνικών εργοστασίων παραγωγής τσιμέντου [1].

Η ετήσια παραγωγή της ελληνικής τσιμεντοβιομηχανίας ανήλθε το 2006 σε 16.1 εκατ. τόννους τσιμέντου. Το 35.8 % της παραγωγής (5.77 εκατ. τόννοι) εξάγεται σε χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, στις Η.Π.Α. και τις χώρες της Μ. Ανατολής και της Αφρικής, ενώ το 64.2 % (10.35 εκατ. τόννοι) διατίθεται στην ελληνική αγορά. Από το διατιθέμενο τσιμέντο στην ελληνική αγορά (I.O.B.E, Ινστιτούτο Οικονομικών και Βιομηχανικών Ερευνών), ποσοστό 70% (7.25 εκατ. τόννοι περίπου) διατίθεται χύμα και 30% (3.1 εκατ. τόννοι περίπου) ενσакκισμένο. Το 80% (5.8 εκατ. τόννοι

περίπου) του διατιθέμενου «χύμα» τσιμέντου στην ελληνική αγορά απορροφάται από τις εταιρείες παραγωγής έτοιμου σκυροδέματος και κονιαμάτων, το 12-15% από τις κατασκευαστικές εταιρείες και το 5-8% από τις μονάδες παραγωγής προϊόντων τσιμέντου. Στο σχήμα 2.7 παρουσιάζεται η κατανομή της παραγωγής τσιμέντου στην ελληνική βιομηχανία ως προς τις 3 μεγαλύτερες εταιρείες παραγωγής στην Ελλάδα, ενώ στο σχήμα 2.8 παρουσιάζεται η πρόοδος της παραγωγής τσιμέντου στην Ελλάδα από το 1913 έως στις μέρες μας. [3]

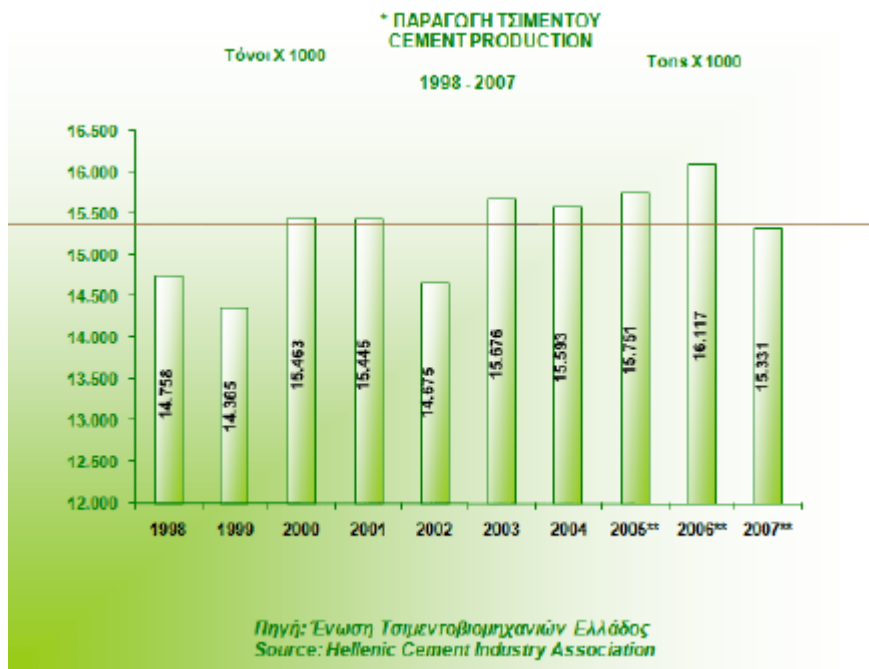


Σχήμα 2.7 Ετήσια παραγωγική ικανότητα τσιμέντου ανά εταιρεία σε εκατομμύρια τόνους (2008) [3].



Σχήμα 2.8 Εξέλιξη παραγωγής τσιμέντου στην Ελλάδα [3].

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.8 , στην μεταπολεμική περίοδο και μέχρι το 1983 οι ρυθμοί ανάπτυξης της τσιμεντοβιομηχανίας ήσαν ραγδαίοι, κυρίως λόγω των αναγκών ανάπτυξης και ανοικοδόμησης της Ελλάδος. Επίσης, κατά το προαναφερθέν διάστημα, παρατηρήθηκε μια αυξανόμενη ζήτηση από τις αγορές του εξωτερικού, και κυρίως από τις πετρελαιοπαραγωγές χώρες του Περσικού Κόλπου, οι οποίες μετά την εκτίναξη των τιμών πετρελαίου το 1973 αποκόμισαν τεράστια οικονομικά οφέλη, με αποτέλεσμα να αυξήσουν την ζήτηση τους για το Ελληνικό τσιμέντο. Ωστόσο η ίδρυση τσιμεντοβιομηχανιών στις προαναφερθείσες χώρες σε συνδυασμό με την οικονομική κρίση που έπληξε τις ανεπτυγμένες χώρες συνεπεία των δύο πετρελαϊκών κρίσεων οδήγησε τις διεθνείς τιμές πώλησης του τσιμέντου σε κατακόρυφη πτώση, με αποτέλεσμα οι τιμές του τσιμέντου το 1986 να φτάσουν να είναι έως και 50% χαμηλότερες από τις αντίστοιχες τιμές το 1979.



Σχήμα 2.9 Παραγωγή τσιμέντου 1998 – 2007 (στην Ελλάδα) [3].

Τα παραπάνω στοιχεία (Σχήμα 2.9) περιγράφουν την παραγωγή τσιμέντου την τελευταία δεκαετία, όπως παρατηρείται το 2002 η παραγωγή ήταν πολύ περιορισμένη συγκριτικά με τα προηγούμενα έτη. Πιθανόν μία από τις αιτίες που οδήγησαν σε αυτό να είναι η μετάβαση της Ελλάδας σε νέο νόμισμα, βέβαια τα επόμενα χρόνια και λόγω των Ολυμπιακών αγώνων, της οικιστικής ανάπτυξης πολλών περιοχών και ενδεχομένως της γενικότερης ανάπτυξης η παραγωγή φαίνεται να αυξάνεται σημαντικά. Ο ρυθμός παραγωγής από το 2007 και για τα επόμενα χρόνια φαίνεται να μειώνεται. Η γενικότερη οικονομική κρίση σε διεθνές επίπεδο και η αντίστοιχη στην ελληνική οικονομία ίσως παίζουν καθοριστικό ρόλο στην δημιουργία αυτού του αρνητικού ρυθμού παραγωγής στην βιομηχανία τσιμέντου.

### 3. ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΚΑΥΣΙΜΑ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ

Η έψηση της φαρίνας απαιτεί υψηλή κατανάλωση καυσίμου και για το λόγο αυτό η επιλογή του καυσίμου είναι από τις πιο καθοριστικές παραμέτρους στη λειτουργία μιας βιομηχανίας τσιμέντου. Αέρια (φυσικό αέριο), υγρά (μαζούτ, πετρέλαιο, παραπροϊόντα) και στερεά καύσιμα (κάρβουνο, κωκ και παραπροϊόντα) έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία ως καύσιμη ύλη στις περιστροφικές καμίνους της βιομηχανίας τσιμέντου. Η επιλογή του καυσίμου καθορίζεται κύρια από το κόστος του, αφού κατά μία εκτίμηση το 43% του λειτουργικού κόστους αποδίδεται στο καύσιμο. Πάντως τα τελευταία έτη ο περιορισμός της ρύπανσης του περιβάλλοντος είναι καθοριστικός παράγοντας στην επιλογή της καύσιμης ύλης. Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε αναλυτικά με τα συμβατικά καύσιμα που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία τσιμέντου εστιάζοντας στα κυριότερα χαρακτηριστικά τους.

#### 3.1. Κατανάλωση ενέργειας στην παραγωγή κλίνκερ

Είναι γνωστό ότι η διαδικασία διάσπασης του ασβεστολίθου, ως ιδιαίτερως ενδόθερμη αντίδραση, είναι η κύρια διεργασία κατανάλωσης ενέργειας, ενώ οι αντιδράσεις σχηματισμού των ορυκτολογικών φάσεων του κλίνκερ που ακολουθούν είναι κατά κύριο λόγο εξώθερμες αντιδράσεις. Η κατανάλωση ενέργειας (ποσότητα καυσίμου), που είναι απαραίτητη στην παραγωγή του κλίνκερ, εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τη μέθοδο κατεργασίας της φαρίνας, αλλά και από τις αντίστοιχες διατάξεις.

Οι καταναλώσεις αυτές, είναι [1]:

- 3000-3800 MJ/ t κλίνκερ για ξηρή μέθοδο παραγωγής με 3-6 στάδια προθέρμανσης/προασβεστοποίησης (dry process preheater/precalciner)
- 3100-4200 MJ/ t κλίνκερ για ξηρή μέθοδο παραγωγής με προθέρμανση (dry process preheater)
- 3300-4500 MJ/ t κλίνκερ ημιξηρή/ημιυγρή μέθοδο παραγωγής (Lepol-kiln)
- Έως 5000 MJ/ t κλίνκερ για ξηρή μέθοδο παραγωγής σε μεγάλου μήκους καμίνους (dry process long kilns)
- 5000-6000 MJ/ t κλίνκερ για υγρή μέθοδο παραγωγής σε μεγάλου μήκους καμίνους (wet process long kilns) and
- 3100-4200 MJ/ t κλίνκερ για κατακόρυφες καμίνους.

Στον Πίνακα 3.1 συγκρίνεται αναλυτικά η καταναλώση ενέργειας σε διατάξεις ξηρής μεθόδου με προθερμαντή/προασβεστοποιητή (preheater/precalciner) και υγρής

μεθόδου παραγωγής κλίνκερ. Οι επιπλέον ενεργειακές καταναλώσεις στην παραγωγή του κλίνκερ τσιμέντου αφορούν στις τεχνολογικά αναπόφευκτες ενεργειακές απώλειες της διεργασίας, οι οποίες καταγράφονται στον πίνακα. Η απρόσκοπτη λειτουργία της περιστροφικής καμίνου απαιτεί την ύπαρξη επαρκούς πηγής θερμότητας, η οποία καταρχήν θα αυξήσει τη θερμοκρασία της καμίνου στην απαιτούμενη τιμή λειτουργίας και κατόπιν θα τη διατηρήσει σε αποδεκτό θερμοκρασιακό εύρος, αναπληρώνοντας τις απώλειες, λόγω ακτινοβολίας και αγωγής στο σύστημα της καμίνου και στα απαέρια, εξασφαλίζοντας έτσι την απαιτούμενη θερμότητα για τις διεργασίες πυροσυσσωμάτωσης του μείγματος των πρώτων υλών.

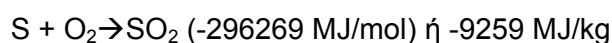
### Πίνακας 3.1

Συνολική κατανάλωση ενέργειας για ξηρή και υγρή μέθοδο [1].

Κατανάλωση ενέργειας στην παραγωγή του κλίνκερ (MJ/t κλίνκερ)	Μέθοδος παραγωγής	
	Ξηρή	Υγρή
Θεωρητική απαίτηση θερμότητας στις Χημικές Αντιδράσεις παραγωγής κλίνκερ	1807	1741
Εξάτμιση υγρασίας πρώτων υλών	13	2364
Απώλεια θερμότητας στα απαέρια και στη σκόνη	623	753
Θερμικές απώλειες στο κλίνκερ	88	59
Απώλεια θερμότητας στον αέρα ψύξης του κλίνκερ	427	100
Απώλειες θερμότητας με ακτινοβολία και μεταφορά	348	682
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	3306	5699
Κατανάλωση άνθρακα (t / t κλίνκερ) (Θερμογόνος δύναμη χρησιμοποιούμενου άνθρακα 25.3 GJ/ t)	0.13	0.23
Κατανάλωση άνθρακα (t / t κλίνκερ) (Θερμογόνος δύναμη χρησιμοποιούμενου άνθρακα 16.74 GJ/ t)	0.20	0.34

Η απαιτούμενη θερμότητα για την ολοκλήρωση των αντιδράσεων πυροσυσσωμάτωσης (κλινκεροποίηση) προκύπτει από την καύση των χρησιμοποιούμενων καυσίμων.

Η καύση είναι η χημική αντίδραση (οξειδωση) του άνθρακα, του υδρογόνου και του θείου του καυσίμου με το οξυγόνο του αέρα, αντιδράσεις που είναι εντόνως εξώθερμες.



Οι παραπάνω αντιδράσεις καύσης αφορούν την πλήρη καύση των καυσίμων, ενώ όταν γίνεται ατελής καύση του καυσίμου, η αντίδραση που λαμβάνει χώρα είναι:



Η ατελής αντίδραση, παρά το γεγονός ότι και αυτή είναι εξώθερμη, εκλύει περίπου το 1/3 ( $\cong$  10460 MJ/kg) της θερμότητας που εκλύει η πλήρης καύση και γίνεται αντιληπτή από το μαύρο καπνό που παράγεται και υποδηλώνει άνθρακα ο οποίος δεν έχει «καεί» για να παράξει θερμότητα. Για να λάβουν χώρα οι αντιδράσεις πλήρους καύσης πρέπει να ικανοποιούνται δύο προϋποθέσεις:

- Πρέπει να υπάρχει επαρκής ποσότητα οξυγόνου (από τον αέρα) για ανάμιξη με το καύσιμο και η πραγματική ποσότητα του εισαγόμενου αέρα πρέπει να είναι μεγαλύτερη της θεωρητικά απαιτούμενης, δηλαδή να υπάρχει περίσσεια αέρα. Η περίσσεια αέρα (%) εξαρτάται από τον τύπο του καυσίμου, το σύστημα έναυσης, το μέγεθος των σωματιδίων του καυσίμου προκειμένου περί στερεών ή το μέγεθος των σταγονιδίων προκειμένου περί υγρών καυσίμων
- Πρέπει να διατηρείται δεδομένη ελάχιστη θερμοκρασία για την έναυση του μείγματος καυσίμου-οξυγόνου. Το οξυγόνο της αντίδρασης προέρχεται από τον αέρα, ο οποίος περιέχει περίπου 78.1% κ.ο. (75.5% κ.β.) άζωτο και 20.9% κ.ο. (23% κ.β.) οξυγόνο, οπότε για να επιτευχθεί πλήρης καύση απαιτούνται τουλάχιστον 5 όγκοι αέρα για κάθε ένα όγκο οξυγόνου που

απαιτείται για την πλήρη καύση. Τόσο ή έλλειψη όσο και η υπερβολική περίσσεια αέρα έχουν δυσμενείς οικονομικές επιπτώσεις στη διεργασία παραγωγής κλίνκερ στις περιστροφικές καμίνους. Η έλλειψη, παράγει μικρότερες ποσότητες της αναγκαίας θερμότητας διεξαγωγής των αντιδράσεων πυροσυσσωμάτωσης, λόγω ατελούς καύσης. Επίσης, η υπερβολική περίσσεια αέρα έχει οικονομικές επιδράσεις στη διεργασία. Αυτό συμβαίνει, επειδή ποσοστό της παραγόμενης θερμότητας καταναλώνεται για την ανύψωση της θερμοκρασίας της περισσειας του αέρα (άζωτο και υπολειπόμενο οξυγόνο από το απαιτούμενο στις αντιδράσεις καύσης) και κατόπιν απάγεται ως λανθάνουσα θερμότητα στα καπναέρια, αντί να χρησιμοποιείται στην κυρίως διεργασία της πυροσυσσωμάτωσης. Επομένως, οι συνθήκες καύσης μέσα στην κάμινο πρέπει να είναι κατάλληλες ώστε να γίνεται πλήρης καύση του καυσίμου που υπάρχει, χωρίς σημαντικές απώλειες θερμότητας στο περιβάλλον, φαινόμενο που έχει οικονομικές επιπτώσεις στο κόστος της διεργασίας. Οι υποδείξεις των κατασκευαστών καυστήρων προτείνουν, ανάλογα με τον τύπο του καυσίμου, τα παρακάτω ποσοστά % περισσειας αέρα (Πίνακας 3.2):

**Πίνακας 3.2**

Περίσσεια αέρα % ανάλογα με το καύσιμο

<b>Τύπος καυσίμου</b>	<b>περίσσεια αέρα %</b>
Φυσικό αέριο	10-20
Πετρέλαιο	10-20
Λειοτριβημένος άνθρακας	20-25

### **3.2. Κατηγορίες συμβατικών καυσίμων**

Τα ορυκτά καύσιμα που χρησιμοποιούνται στις διατάξεις των περιστροφικών καμίνων είναι τριών ειδών αέρια, υγρά, στερεά και συνδυασμός εναλλακτικών τουλάχιστον δύο ειδών από τα παραπάνω.



Τα αέρια καύσιμα, κυρίως φυσικό αέριο (περίπου 95% CH<sub>4</sub>), χρησιμοποιούνται στην τσιμεντοβιομηχανία και παρουσιάζουν ουσιαστικά πλεονεκτήματα έναντι των άλλων ορυκτών καυσίμων. Αυτά είναι τα εξής:

- Δεν χρειάζεται καμιά προετοιμασία ξήρανση, λειοτρίβηση ή προθέρμανση, όπως τα στερεά ή τα υγρά, αντιστοίχως
- Η καύση λαμβάνει χώρα μόλις αναμειχθεί με την κατάλληλη ποσότητα αέρα και η θερμοκρασία έναυσης φθάσει στην επιθυμητή τιμή της
- Η ατμόσφαιρα στη ζώνη καύσης είναι «διαυγής» σε σχέση με αυτή που εμφανίζεται στις περιπτώσεις καύσης πετρελαίου ή άνθρακα
- Χρησιμοποιούνται απλά συστήματα καύσης χωρίς ουσιαστική ανάγκη συντήρησης
- Παρουσιάζουν περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα, λόγω χαμηλών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και άλλων εκπομπών
- Επιπλέον, πλεονέκτημα της έναυσης του φυσικού αερίου θεωρείται η μη αναγκαιότητα σημαντικής ποσότητας αρχικού αέρα, ώστε η δευτερογενής παροχή θερμού αέρα χρησιμοποιείται αποκλειστικά στην καύση μέσα στην κάμινο

Επειδή η θερμοκρασία, που επικρατεί στη ζώνη έναυσης της καμίνου, είναι υψηλότερη στην περίπτωση χρήσης φυσικού αερίου, σε σχέση με τα άλλα καύσιμα, απαιτείται κατάλληλη προσαρμογή του καυστήρα και της θέσης του στην έξοδο της καμίνου σε περίπτωση αλλαγής τύπου καυσίμου.

Τα υγρά καύσιμα που χρησιμοποιούνται στην τσιμεντοβιομηχανία είναι, για λόγους χαμηλού κόστους, αποκλειστικά βαρέα κλάσματα της απόσταξης αργού πετρελαίου, τα οποία εμφανίζουν μεγάλο ιξώδες (είναι παχύρρευστα) και απαιτούν ιδιαίτερη προετοιμασία (προθέρμανση για να μειωθεί το ιξώδες τους) και προσοχή για την ικανοποιητική τους «εκνέφωση», ώστε να προκληθεί ή έναυσή τους. Ουσιαστικής σημασίας παράγοντας για την καλή λειτουργία της καμίνου είναι η πρόκληση καλής εκνέφωσης (μικρό μέγεθος σταγονιδίων) των υγρών καυσίμων. Για να προκληθεί εκνέφωση, απαιτείται επαρκής συμπίεση και κατάλληλο ακροφύσιο. Η ατελής εκνέφωση (μεγάλο μέγεθος σταγονιδίων καυσίμου) έχει ως αποτέλεσμα ατελή καύση και δημιουργεί επικάλυψη μέρους του «μη καμένου» καυσίμου στα τοιχώματα της περιστροφικής καμίνου και ανεπιθύμητη ανάμειξη με την κατεργαζόμενη τροφοδοσία. Ως στερεά καύσιμα θεωρούνται οι παντός είδους ορυκτοί άνθρακες, ξύλα και επίσης άχρηστα ελαστικά αυτοκινήτων, στερεά οργανικά απόβλητα, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην τσιμεντοβιομηχανία για την παραγωγή ενέργειας (θερμότητας).

- Οι ορυκτοί άνθρακες κατατάσσονται σε τρεις κύριες κατηγορίες και συγκεκριμένα σε ανθρακίτες, βιτουμενιούχους άνθρακες και λιγνίτες.
- Οι ανθρακίτες είναι οι γεωλογικά παλαιότεροι άνθρακες με σημαντικό ποσοστό άνθρακα, μικρό ποσοστό πτητικών και πρακτικά χωρίς υγρασία
- Οι λιγνίτες είναι οι γεωλογικά νεότεροι άνθρακες, με χαμηλό ποσοστό μόνιμου άνθρακα, σημαντικό ποσοστό πτητικών, υγρασίας και τέφρας μετά την καύση
- Οι βιτουμενιούχοι άνθρακες είναι άνθρακες ενδιάμεσης θερμογόνου δύναμης

Η χημική σύσταση των ανθράκων έχει σημαντική επίδραση στην καύση τους και οι ιδιότητές τους διακρίνονται στις φυσικές και τις χημικές.

- Οι φυσικές ιδιότητες των ανθράκων περιλαμβάνουν τη θερμογόνο δύναμή τους, το ποσοστό υγρασίας, την περιεκτικότητά τους σε πτητικά και την περιεκτικότητά τους σε τέφρα ενώ
- Οι χημικές τους ιδιότητες αναφέρονται στην περιεκτικότητά τους σε άνθρακα, υδρογόνο, οξυγόνο και θείο (στοιχειακή ανάλυση)

Το ποσοστό υγρασίας των ανθράκων κυμαίνεται από 0.5-10% περίπου και θεωρείται ως «μειονέκτημα» των ανθράκων, επειδή αντικαθιστά μέρος της καύσιμης ύλης και μειώνει τη θερμογόνο δύναμή τους. Τα πτητικά συστατικά των ανθράκων είναι εύφλεκτα αέρια (μεθάνιο, υδρογόνο, μονοξειδίο του άνθρακα) και μη εύφλεκτα αέρια όπως διοξείδιο του άνθρακα και οξειδία αζώτου. Είναι φανερό ότι μεγάλη περιεκτικότητα σε πτητικά συμβάλει στην εύκολη ανάφλεξη των ανθράκων. Στον παρακάτω Πίνακα 3.3 φαίνεται το ποσοστό ανά τύπο καυσίμου που χρησιμοποιείται στην βιομηχανία:

**Πίνακας 3.3**

Ποσοστό ανά τύπο καυσίμου στην βιομηχανία τσιμέντου

<b>Είδος καυσίμου</b>	<b>%Ποσοστό</b>
Petcoke	50.5
Άνθρακες	24.0
Πετρέλαιο και βαρέα κλάσματα	5.0
Λιγνίτες και άλλα είδη στερεών καυσίμων	5.5
Φυσικό αέριο	1.0
Εναλλακτικά καύσιμα	14.0

### 3.3 Στερεά καύσιμα

Ο άνθρακας αποτελεί την πιο σημαντική ενεργειακή πρώτη ύλη του ανθρώπου. Κατά τη δεκαετία του 1960 το πετρέλαιο πήρε το προβάδισμα σε σχέση με τον άνθρακα. Σύμφωνα με εκτιμήσεις η κατανάλωση άνθρακα θα φτάσει στα μέγιστα επίπεδα από τα μέσα του 21ου και κατά τον 22ο αιώνα, διαδραματίζοντας έτσι πρωτεύοντα ρόλο στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών. Η εκτίμηση αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι καύσιμα όπως το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, σε βάθος χρόνου δεν αποτελούν μία ρεαλιστική και οικονομική λύση, εξαιτίας της μεγάλης διακύμανσης των τιμών τους και της ανασφάλειας που παρουσιάζουν ως προς τον ασφαλή και συνεχή εφοδιασμό τους. Σύμφωνα με στοιχεία του Παγκόσμιου Ινστιτούτου Άνθρακα το 37% της παγκόσμιας ηλεκτροπαραγωγής καλύπτεται από τον άνθρακα, ενώ η συμμετοχή του στις συνολικές ανάγκες ανέρχεται περί το 24%. Το ποσοστό αυτό ποικίλει στις διάφορες χώρες. Συγκεκριμένα, στις Η.Π.Α. η συμμετοχή του άνθρακα στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι της τάξεως του 56%. Στην Κίνα, Ινδία, Πολωνία, Ν. Αφρική και στα Βαλκάνια το ποσοστό συμμετοχής του άνθρακα κυμαίνεται από 75% έως 90%, ενώ στην Ευρωπαϊκή ένωση το ποσοστό αυτό κατά μέσο όρο είναι 27%.

Τα τελευταία χρόνια, η κατανάλωση άνθρακα αυξήθηκε, ενώ η παγκόσμια παραγωγή διπλασιάστηκε. Συγκεκριμένα, η κατανάλωση άνθρακα αυξήθηκε το 2003 κατά 15% στην Κίνα, 7% στη Ρωσία, 5% στην Ιαπωνία και 2.6% στις Η.Π.Α. Η παγκόσμια παραγωγή αναμένεται να αυξηθεί κατά 50% μέσα στα επόμενα χρόνια φθάνοντας τα 7 δις τόνους το 2030. Στις χώρες της ευρωπαϊκής ένωσης, συγκεκριμένα, αναμένεται μέχρι το 2020 να αυξηθεί η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κατά ποσοστό 37% σε σχέση με το 2000. Στην αύξηση αυτή ο άνθρακας θα διατηρήσει την κυρίαρχη θέση του [6].

Σήμερα οι περισσότερες βιομηχανίες τσιμέντου χρησιμοποιούν κάρβουνο και petcoke είτε ανεξάρτητα το καθένα είτε σε συγκεκριμένες αναλογίες. Η τέφρα των καυσίμων ενσωματώνεται στο μίγμα πρώτων υλών και επιδρά στην ορυκτολογική σύνθεση του κλίνκερ. Για τον λόγο αυτό σε κάθε βιομηχανική μονάδα η σύνθεση των πρώτων υλών ρυθμίζεται λαμβάνοντας υπόψη και την ενσωμάτωση της τέφρας στις πρώτες ύλες. Στον Πίνακα 3.4 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές ιδιότητες % των βασικών συμβατικών καυσίμων που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία τσιμέντου

**Πίνακας 3.4**

Χαρακτηριστικές ιδιότητες των στερεών καυσίμων

Είδος καυσίμου	Υγρασία %	Τέφρα %	Πτητικά %	Μόνιμος Ανθρακας %	Θερμογόνος δύναμη (Kcal/kg)	S %	Cl %
Λιθάνθρακας	13.2	15.5	27.7	43.6	5700	1.4	0.65
Λιγνίτης	15.0	5.0	45.0	56.0	4830	1.5	0.12
Petcoke	8.0	0.3	10.3	81.5	7790	5.2	0.00

Στον Πίνακα 3.5 αντίστοιχα παρουσιάζεται η ορυκτολογική ανάλυση της τέφρας στον άνθρακα.

**Πίνακας 3.5**

Ορυκτολογική ποσοτική ανάλυση τέφρας άνθρακα

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O
51.32	10.19	16.11	14.30	4.15	2.03

**3.3.1 Λιθάνθρακες**

Ο άνθρακας υπήρξε βασική πηγή ενέργειας από τα παλαιά χρόνια σε ολόκληρο τον κόσμο. Από τις πρώτες δεκαετίες του αιώνα που διανύουμε άρχισε βαθμιαία η εμφάνιση του πετρελαίου, το οποίο κατάφερε να μειώσει την χρήση άνθρακα σε μεγάλο βαθμό. Μετά από ένα χρονικό διάστημα παγκόσμιας υπερκατανάλωσης πετρελαίου φθάσαμε στην δεκαετία του 1970, όπου παρουσιάστηκε η πρώτη ενεργειακή κρίση στην διεθνή αγορά με τα γνωστά επακόλουθα. Από τότε η βιομηχανία και οι διάφοροι ερευνητικοί οργανισμοί ενέτειναν τις προσπάθειες τους για μια αποδοτική χρήση των υπαρχόντων αποθεμάτων άνθρακος αλλά και για την καλύτερη αξιοποίηση άλλων πηγών ενέργειας. Σήμερα οι βιομηχανίες χρησιμοποιούν τον άνθρακα σαν πηγή ενέργειας τόσο για τις βραχυπρόθεσμες όσο και για τις

μακροπρόθεσμες ανάγκες. Αυτό έχει εφαρμογή ειδικά στην Τσιμεντοβιομηχανία καθώς η παραγωγή του κλίνκερ είναι μια διαδικασία υψηλής κατανάλωσης ενέργειας. Η καύση του κονιορτοποιηθέντος άνθρακα γίνεται σε δύο στάδια. Αρχικά τα πτητικά στοιχεία αντιδρούν με τον αέρα και το κωκ που έχει απομείνει καίγεται με πρόσθετο αέρα. Καθώς η καύση είναι μια χημική αντίδραση, οι κινητικές ιδιότητες της αντίδρασης εξαρτώνται από τους συνηθισμένους παράγοντες που επιδρούν στις χημικές αντιδράσεις των αερίων με τα στερεά στοιχεία. Η διαδικασία καύσεως αυτοσυντηρείται σε μια θερμοκρασία που καλείται θερμοκρασία αναφλέξεως δηλ. πάνω από αυτή την θερμοκρασία η θερμοκρασία η αντίδραση συνεχίζεται ανεμπόδιστα. Μια και η αντίδραση πραγματοποιείται στην επιφάνεια, η συνολική επιφάνεια που είναι διαθέσιμη προς αντίδραση είναι ουσιώδης στον προσδιορισμό του ποσοστού της συνολικής καύσης. Αυτή δε η προς καύση επιφάνεια συνήθως εξαρτάται από την λεπτότητα αλέσεως του άνθρακα. Είναι γνωστό ότι μια αύξηση στην λεπτότητα αλέσεως έχει μεγάλη επίδραση στον καθορισμό της θερμοκρασίας αναφλέξεως. Ένας πρακτικός κανόνας που ακολουθείται για να υπάρχει τέλεια καύση του άνθρακα και ομαλή λειτουργία στο κλίβανο λέει ότι το υπόλειμμα στο κόσκινο των 0.09 mm θα πρέπει να βρίσκεται μεταξύ των ορίων που καθορίζονται από 0.5 έως 0.7 φορές του ποσοστού των πτητικών και δεν θα πρέπει να είναι ποσοστιαία μεγαλύτερο (το υπόλειμμα) του 15%. Η καύση του αλεσμένου άνθρακα γίνεται με ακροφύσια που κατασκευαστικά είναι πιο απλά εκείνων που χρησιμοποιούνται για το πετρέλαιο [8][9].

#### Κατηγορίες Λιθανθράκων

Λιθάνθρακες χαρακτηρίζονται κυρίως οι άνθρακες που εξορύσσονται από τη Γη, σε αντίθεση με τους ορυκτούς άνθρακες όπως το ξυλάνθρακα, οπτάνθρακα (petcoke) αιθάλης κ.ά. που λαμβάνονται κατόπιν ειδικής κατεργασίας των ξύλων, πετρελαίων, γαιανθράκων ή άλλων ανθρακούχων υλών. Οι ορυκτοί άνθρακες εξορύσσονται στα ανθρακωρυχεία. Γενικά, τους ορυκτούς άνθρακες τους διακρίνουμε σε εκείνους που δεν χρησιμοποιούνται ως καύσιμη ύλη (π.χ. γραφίτης, διαμάντι) και σε εκείνους που χρησιμοποιούνται ως καύσιμη ύλη και στην παραγωγή χημικών ενώσεων. Στους τελευταίους ανήκουν ο ανθρακίτης και γενικά οι λιθάνθρακες, οι φαιάνθρακες (επιμέρους κατηγορία των οποίων είναι ο λιγνίτης) και η τύρφη. Οι μεταξύ τους διαφορές οφείλονται όχι μόνο στην περιεκτικότητα του άνθρακα, του υδρογόνου και του οξυγόνου, αλλά και στην εξωτερική μορφή υπό την οποία απαντώνται. Ειδικότερα η τύρφη χρησιμοποιείται και για τον εμπλουτισμό καλλιεργήσιμων εδαφών. Όλοι οι λιθάνθρακες περιέχουν τέφρα, (ανόργανα συστατικά) σε ποικίλλουσα ποσότητα, καθώς και ίχνη νερού (υγρασία). Ακόμα περιέχουν

φωσφορικό οξύ σε μηδαμινές ποσότητες, θείο ενωμένο με σίδηρο υπό μορφή οργανικών ενώσεων το οποίο και είναι το περισσότερο ανεπιθύμητο συστατικό τους. Η περιεκτικότητα θείου στους γαιάνθρακες υποβιβάζει τη ποιότητά τους. Σ' αυτό οφείλεται και κατά μεγάλο μέρος η μειονεκτικότητα των φαιανθράκων (που περιέχουν σημαντικές ποσότητες θείου), έναντι των λιθανθράκων. Τέλος, οι γαιάνθρακες αποτελούνται από μίγματα πολυσυμπυκνωμένων ενώσεων άνθρακα, υδρογόνου, οξυγόνου και αζώτου. Ο γραφίτης και το διαμάντι είναι σχεδόν τελείως καθαροί άνθρακες (άνω του 99%). Οι ως καύσιμη ύλη χρησιμοποιούμενοι γαιάνθρακες διαιρούνται ανάλογα της περιεκτικότητας σε άνθρακα σε: ανθρακίτη, λιθάνθρακες, φαιάνθρακες (λιγνίτες) και τύρφη. Οι καύσιμοι γαιάνθρακες μαζί με το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο αποτελούν τα ορυκτά καύσιμα.

### Σχηματισμός λιθανθράκων

Οι λιθάνθρακες έχουν σχηματιστεί από δάση, τα οποία καταπλακώθηκαν από πετρώματα και υπέστησαν ενανθράκωση από το αναερόβιο βακτήριο του άνθρακα. Ανάλογα με το χρόνο που το καταπλακωμένο ξύλο έμεινε στο φλοιό της Γης σχηματίστηκαν οι διάφοροι τύποι γαιανθράκων, των οποίων η περιεκτικότητα σε άνθρακα ποικίλλει. Οι κυριότερες μορφές γαιανθράκων που χρησιμοποιούνται ως καύσιμα είναι:

- Ανθρακίτης: Περιέχει 92-96% καθαρό άνθρακα. Είναι σκληρός και λείος και έχει μαύρο χρώμα. Αφήνει ελάχιστο υπόλειμμα κατά την καύση του και χρησιμοποιείται κυρίως σε μεταλλουργικές εργασίες αλλά και ως καύσιμο σε ατμομηχανές, ατμοτουρμπίνες κτλ. Στο Σχήμα 3.1 φαίνεται πέτρωμα ανθρακίτη με εμφανή τα εξωτερικά του χαρακτηριστικά.



Σχήμα 3.1: Ορυκτό ανθρακίτη [8].

- Λιθάνθρακας: Περιέχει 80-92% καθαρό άνθρακα. Είναι μαύρος ή σκούρος καφέ, σκληρός και γυαλιστερός και χρησιμοποιείται κυρίως αρχικά για την παραγωγή φωταερίου με ξηρή απόσταξη και το υπόλειμμά του, που ονομάζεται retcoke, χρησιμοποιείται στη μεταλλουργία του σιδήρου και ως καύσιμο.
- Λιγνίτης: Περιέχει 50-65% καθαρό άνθρακα. Έχει σκούρο καφέ χρώμα, δεν είναι γυαλιστερός και αφήνει σημαντικό υπόλειμμα κατά την καύση του. Χρησιμοποιείται ως καύσιμο σε εργοστάσια παραγωγής ενέργειας. Τα εργοστάσια της ΔΕΗ στην Πτολεμαΐδα, τη Μεγαλόπολη και το Αλιβέρι στηρίζονται στον λιγνίτη για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

### Εξόρυξη λιθανθράκων

Υπάρχουν δύο τρόποι εξόρυξης λιθανθράκων, ανάλογα με το βάθος στο οποίο απαντάται το κοίτασμα.

- Επιφανειακή εξόρυξη: Αφορά επιφανειακά κοιτάσματα, γίνεται με τη βοήθεια κλασικών σκαπτικών μηχανημάτων και θεωρείται ένας οικονομικός τρόπος εξόρυξης.
- Ανθρακωρυχεία: Αφορά περιπτώσεις που το κοίτασμα βρίσκεται σε βάθος. Τα περισσότερα ευρωπαϊκά κοιτάσματα, ιδιαίτερα των λιθανθράκων και των ανθρακίτων, είναι υπόγεια και απαιτούν την κατασκευή ανθρακωρυχείων για την εξόρυξή τους. Θεωρείται ότι η εξόρυξη με αυτό τον τρόπο είναι δαπανηρή και παράλληλα υπάρχει υψηλός κίνδυνος ατυχημάτων στο χώρο των ανθρακωρυχείων.

Η κατάταξη των λιθανθράκων ως καύσιμα συναρτήσεως της θερμογόνου ισχύος τους παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.6. Οι λιθάνθρακες αν και έχουν σχετικά χαμηλή θερμογόνο ισχύ, βρίσκονται στην δεύτερη θέση της σχετικής λίστας με πρώτο το πετρέλαιο που θεωρείται κυρίαρχο σε αυτή την κατάταξη.

### Πίνακας 3.6

Θερμογόνος δύναμη βασικών συμβατικών καυσίμων.

Καύσιμο	Θερμογόνος δύναμη (MJ/kg)
Ξύλο	18.5 - 21
Τύρφη	20 – 21
Λιθάνθρακες	23.3 – 24.9
Πετρέλαιο	40 – 42.3

#### Λιθάνθρακας στην βιομηχανία τσιμέντου

Ο άνθρακας είναι κυρίως το καύσιμο που χρησιμοποιείται στους προθερμαντές/προασβεστοποιητές στις περιστροφικές κλιβάνους. Ως εκ τούτου, ο άνθρακας διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην παραγωγική διαδικασία του τσιμέντου. Σε ένα εργοστάσιο τσιμέντου δύο συστήματα από καύση άνθρακα χρησιμοποιούνται. Συγκεκριμένα α) Άμεση καύση και β) Έμμεση καύση. Σε ένα σύστημα άμεσης καύσης, ο άνθρακας είναι λεπτοαλεσμένος και τροφοδοτείται άμεσα στη κάμινο. Στο πρώτο στάδιο τροφοδοτείται αέρας στον άνθρακα για να τον στεγνώσει. Άνθρακας με υψηλή υγρασία δεν είναι κατάλληλος για απευθείας καύση. Τα αποτέλεσμα της υγρασίας του άνθρακα είναι η μείωση της θερμοκρασίας της φλόγας και ως εκ τούτου μειώνεται η αποδοτικότητα. Περίσσεια στον αρχικό αέρα δεν είναι επιθυμητή, δεδομένου ότι αυτό έχει επίσης παρόμοιες επιπτώσεις με την υψηλή υγρασία. Κατά την έμμεση καύση ο άνθρακας αφού λειοτριβηθεί αποθηκεύεται και στην συνέχεια τροφοδοτείται στη κάμινο κατά παρτίδες ανάλογα με τις απαιτήσεις. Κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης του άνθρακα η τάση για αυθόρμητη ανάφλεξη θα πρέπει να την υπολογιστεί. Η λεπτότητα του άνθρακα έχει άμεση σχέση με την αντίδραση του. Έτσι στη βιομηχανία τσιμέντου ιδιαίτερη σημασία έχει δοθεί στη συμπεριφορά άλεσης του άνθρακα.

Έχει παρατηρηθεί ότι η χαμηλή περιεκτικότητα σε πτητικές ουσίες σε άνθρακα μπορεί να δυσκολέψει την έναρξη της καύσης. Είναι επίσης σκόπιμο να πούμε ότι ο άνθρακας πρέπει να έχει υψηλό δείκτη αλεστικότητας (HGI). Για την παραγωγή του τσιμέντου η θερμοκρασία του κλίνκερ πρέπει να είναι περίπου 1500°C, η οποία μπορεί να επιτευχθεί όταν η θερμοκρασία της φλόγας διατηρείται στους 1700°C. Αν ο άνθρακας περιέχει μεγάλη υγρασία δεν επιτυγχάνεται η επιθυμητή θερμοκρασία της φλόγας. Πολλές φορές ο άνθρακας περιέχει διάφορα στοιχεία όπως χλώριο, νάτριο,



κάλιο και θείο. Όμως ποιότητες άνθρακα με υψηλές συγκεντρώσεις χλωρίου ή θείου δεν επιτρέπονται σύμφωνα με τις νομοθεσίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης στη βιομηχανία παραγωγής τσιμέντου. Η επιλογή του άνθρακα θα πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε αφενός να παράγεται η απαραίτητη θερμογόνος δύναμη και αφετέρου η έκλυση των ρύπων να είναι σύμφωνα με τις υπάρχουσες διατάξεις της νομοθεσίας. Η παρουσία του χλωρίου ή του θείου στον άνθρακα δεν είναι ποτέ επιθυμητή. Ένα πλεονέκτημα της χρήσης του άνθρακα ως καυσίμου είναι ότι η τέφρα που παράγεται μετά την καύση του άνθρακα μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην παραγωγή τσιμέντου. Στο σχήμα 3.2 παρουσιάζονται σωροί ορυκτού άνθρακα σε βιομηχανική μονάδα όπως αυτοί βρίσκονται σε κατάσταση πριν την χρήση τους.



Σχήμα 3.2: Σωρός ορυκτού άνθρακα έτοιμου για καύση

### 3.3.2 Petcoke

Ο πετρελαϊκός οπτάνθρακας είναι παραπροϊόν της διύλισης πετρελαίου. Παράγεται κατά την πυρόλυση των υπολειμμάτων της τροφοδοσίας και από την απόσταξη των πιο βαριών πετρελαίων. Πρόκειται για ένα μαύρο κοκκώδες υλικό που αποτελείται κυρίως από άνθρακα. Η σύστασή του ποικίλει ανάλογα με την ποιότητα του πετρελαίου από το οποίο προήλθε, καθώς επίσης και τις μεθόδους επεξεργασίας. Η τυπική του χημική σύσταση παρουσιάζεται στους Πίνακες 3.7 και 3.8 όπου περιέχεται και η χημική ανάλυση των ιχνοστοιχείων μετάλλων[10].

**Πίνακας 3.7**

Τυπική σύσταση του petcoke [10].

<b>Συστατικά</b>	<b>Στοιχειακή ανάλυση (%κ.β)</b>
Άνθρακας	75 - 90
Υδρογόνο	2 – 5.5
Οξυγόνο	1.3 – 2.6
Θείο	3.4 – 8.0
Άζωτο	1.1 – 1.9
Τέφρα	0.2 – 0.8

**Πίνακας 3.8**

Περιεκτικότητα ιχνοστοιχείων μετάλλων στο petcoke

<b>Ιχνοστοιχεία Μετάλλων</b>	<b>Περιεκτικότητα (ppm)</b>
Ψευδάργυρος	1 - 120
Βανάδιο	140 - 2.000
Νικέλιο	80 - 450

Το petcoke εμπορεύεται και διακινείται κυρίως σε κοκκώδη μορφή και σε λιγότερες περιπτώσεις εν διαλύσει μέσα σε νερό. Πριν την καύση του θρυμματίζεται ώστε να αποκτήσει ακόμα μικρότερο μέγεθος κόκκων (Σχήμα 3.3). Όταν μεταφέρεται υπό τη μορφή σκόνης πρέπει να λαμβάνονται ιδιαίτερα μέτρα προφύλαξης για την αποφυγή της διασποράς του. Το ίδιο ισχύει και στις φάσεις της προσωρινής αποθήκευσης, του θρυμματισμού και της μεταφοράς στην εστία καύσης, για την προστασία των εργαζομένων και των γειτονικών περιοχών. Χρησιμοποιείται κυρίως ως καύσιμο για την παραγωγή ενέργειας, ενώ εξευγενισμένες ποιότητές του χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτροδίων. Το κυριότερο πλεονέκτημά του ως καυσίμου είναι η πολύ καλή αναλογία θερμογόνου δύναμης και τιμής. Αξίζει να σημειωθεί πώς καθώς τα τελευταία χρόνια τα διυλιστήρια όλου του κόσμου χρησιμοποιούν ολοένα και πιο βαριές ποιότητες πετρελαίου, η παραγωγή του pet-coke αυξάνεται συνεχώς.

Επιπλέον οι παραγόμενες ποσότητες δεν ακολουθούν νόμους προσφοράς και ζήτησης, καθώς πρόκειται για παραπροϊόν.

Τα μειονεκτήματά είναι τόσο τεχνικά όσο και περιβαλλοντικά. Από τεχνικής άποψης, η χαμηλή του περιεκτικότητα σε πτητικές ενώσεις το καθιστά δυσκολότερο να αναφλεγεί, με αποτέλεσμα να απαιτούνται υψηλότερες θερμοκρασίες. Επίσης στερεό υπόλειμμα μετά την καύση (περίπου 4%), επικάθεται υπό μορφή σκόνης μπορεί δημιουργώντας σημαντικά προβλήματα στον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό και αυξάνοντας τις απαιτήσεις συντήρησης και επισκευών.



Σχήμα 3.3: Σωρός petcoke έτοιμος για κοσκίνισμα ώστε να φτάσει στην κατάλληλη κοκκομετρία καύσης [10].

#### Το petcoke στην Βιομηχανία Τσιμέντου

Η χρήση του petcoke ως καυσίμου στην βιομηχανία τσιμέντου είναι σε παγκόσμια κλίμακα ευρεία. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά χρήσης του, στις τσιμεντοβιομηχανίες συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- Το petcoke χρησιμοποιείται πάντα σε στερεή μορφή στις περιστροφικές κλιβάνους της τσιμεντοβιομηχανίας.
- Σχετικά με την καύση, η κύρια δυσκολία στην έναρξη καύσης του petcoke είναι η χαμηλή περιεκτικότητα σε πτητικές ενώσεις. Το σχήμα και το μέγεθος της φλόγας είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος στις βιομηχανίες τσιμέντου, διότι συνδέεται με την ποιότητα του παραγόμενου κλίνκερ. Η φλόγα του petcoke είναι μεγαλύτερη από την φλόγα που δημιουργείται με καύση λιθάνθρακα ή πετρελαίου, και αυτό οφείλεται αφενός λόγω της καθυστέρησης ανάφλεξης και αφετέρου λόγω του χρόνου που απαιτείται για την

κατανάλωση σωματιδίων petcoke στο σύννεφο σκόνης που εισάγεται στη περιστροφική κάμινο. Στην βιομηχανία τσιμέντου μεγαλύτερη φλόγα φέρνει αρνητικές επιδράσεις στην παραγωγική διαδικασία τσιμέντου, δηλαδή:

- προϊόντα χαμηλής κοκκομετρικής ποιότητας
- σχηματισμός κρυστάλλων μεγαλύτερων από αυτούς που θα σχηματίζονταν με μια κανονική φλόγα, με αντίκτυπο τόσο στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για την άλεση του κλίνκερ αλλά και για την αντοχή σε θλίψη του τσιμέντου
- σχηματισμός δακτυλίων καύσης μέσα στην περιστροφική κάμινο, με αποτέλεσμα να είναι δύσκολο να επιτευχθεί σταθεροποίηση στην παραγωγική διαδικασία.
- Αυξημένη πτητικότητα των ενώσεων θείου στην ζώνη πύρωσης προκαλώντας επικαθήσεις θειικών ενώσεων και πιθανές βλάβες στους προθερμαντήρες και στην περιστροφική κάμινο.

1. Για την απόκτηση των ελάχιστων ικανοποιητικών συνθηκών για την έψηση και τον έλεγχο της φλόγας, το κωκ θα πρέπει να είναι σε κοκκομετρία τέτοια που να εξασφαλίζεται ότι θα έχει υπόλειμμα στα 88μm μέγιστο 2%-5%. Η αποτελεσματικότερη καύση του κωκ, μπορεί να πραγματοποιηθεί όταν το ποσοστό αυτό είναι μεταξύ 10% έως 18% ανάλογα με την περιεκτικότητα σε πτητικές ενώσεις, υγρασία και τέφρα.

2. Ένας σημαντικός παράγοντας από οικονομικής πλευράς είναι η σκληρότητα του petcoke, επειδή μια ελεγχόμενη καύση απαιτεί ένα τέλει αλεσμένο καύσιμο και, επίσης, ότι:

- για την κοκκομετρία που απαιτείται στην τσιμεντοβιομηχανία το κόστος άλεσης για δυσάλεστα καύσιμα είναι μεγαλύτερο. Επίσης όσο πιο δυσάλεστο είναι το καύσιμο τόσο πιο πολύ μειώνεται η ικανότητα των μύλων άλεσης και προκαλούνται ενδεχόμενες φθορές κατά την λειτουργία τους.
- petcoke που συνήθως χρησιμοποιείται ως καύσιμο στην τσιμεντοβιομηχανία έχει δείκτη άλεσης μεταξύ 40 και 55 ενώ το χαμηλότερο σημείο αναφοράς στην κλίμακα άλεσης είναι 30 και συνεπάγεται ένα πολύ σκληρό στερεό καύσιμο,

αντίθετα δείκτης άλεσης 70 και μεγαλύτερος ορίζει καύσιμα πολύ μαλακά.

- από τότε που το petcoke χρησιμοποιείται κυρίως για να αντικαταστήσει τον λιθάνθρακα, ο οποίος έχει δείκτη άλεσης μεταξύ 40 και 60, η αντικατάσταση αυτή συνεπάγεται υποχρεωτικά αναθεώρηση του συστήματος άλεσης, όχι μόνο επειδή το petcoke είναι γενικά πιο δύσκολο να αλεστεί από τον άνθρακα, αλλά και επειδή το petcoke πρέπει να αλεστεί περισσότερο λόγω της μικρότερης περιεκτικότητας του σε πτητικές ενώσεις.

#### Περιβαλλοντικές επιπτώσεις και κίνδυνοι από την χρήση του petcoke

Περιβαλλοντικά, η υψηλή περιεκτικότητα σε θείο, καθώς επίσης και οι ποσότητες βαρέων μετάλλων που υπάρχουν στην τέφρα αποτελούν πολύ σημαντικούς κινδύνους για τις περιοχές οι οποίες γειτνιάζουν με τις εστίες καύσης που χρησιμοποιούν pet-coke.

Επίσης είναι σημαντική η μελέτη και ο έλεγχος των εκπομπών NO<sub>x</sub> που προκύπτουν από την καύση του petcoke:

- η αντικατάσταση του petcoke από τους λιθάνθρακες δεν βελτιώνει το ποσοστό εκπομπής των NO<sub>x</sub>
- το petcoke παρουσιάζει συχνά μια υψηλότερη περιεκτικότητα σε άζωτο σε σύγκριση με το μαζούτ όταν χρησιμοποιείται για να αντικαταστήσει το πετρέλαιο
- το petcoke έχει μικρότερες εκπομπές NO<sub>x</sub> από το φυσικό αέριο

Η έκθεση σε petcoke συνεπάγεται κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία που συνδέονται με τον ερεθισμό που μπορούν να προκληθούν στα μάτια, στο δέρμα και στο αναπνευστικό σύστημα, τόσο λόγω της άλεσης (μηχανική δράση) και λόγω της παρουσίας των πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων (χημική δράση). Η παρουσία PAHs (πολυαρωματικών υδρογονανθράκων) στα καύσιμα απαιτεί ειδικό χειρισμό, όπως εγκατάσταση τοπικών συστημάτων εξαερώσεως και φίλτρων στους χώρους όπου τα καύσιμα μεταφέρονται και αποθηκεύονται.

Το παραγόμενο διοξείδιο του θείου έχει τοξικές δράσεις (βρογχίτιδα, βρογχόσπασμος), ενώ θεωρείται και πιθανά καρκινογόνο. Το βανάδιο επίσης προκαλεί τοξικές δράσεις, κυρίως στα μάτια και την ανώτερη αναπνευστική οδό. Η συστηματική έκθεση σε τοξικά μέταλλα, μεταξύ των οποίων και το βανάδιο, μπορεί

να προκαλέσει οξείες και χρόνιες νόσους του αναπνευστικού (εμφύσημα, καρκίνος πνεύμονα, ίνωση, άσθμα). Τέλος ο στοιχειακός άνθρακας (αιθάλη) και ειδικά σε λεπτό διαμερισμό, όπως γίνεται το υλικό προ της καύσης, είναι υπαίτιος πρόκλησης χρόνιας βρογχίτιδας και άσθματος.

Ο κίνδυνος για πυρκαγιές και εκρήξεις λόγω του petcoke είναι πολύ χαμηλός, όμως μπορεί εν τέλει να προκύψει εάν υπάρχουν μεγάλες περιεκτικότητες του petcoke σε πτητικές ενώσεις. Περιέχει επίσης εξαερώσιμα υλικά από 2-15% και πολυαρωματικούς υδρογονάνθρακες που δίνονται στον Πίνακα 3.9:

**Πίνακας 3.9**

Πολυαρωματικοί υδρογονάνθρακες που περιέχονται στο petcoke.

<b>Πολυαρωματικοί υδρογονάνθρακες</b>	<b>Ppm</b>
Βενζο(α)πυρένιο	50-175
Βενζο(ε)πυρένιο	85-197
Βενζο (g,h,i)πυρένιο	120-439
Βενζο (a)ανθρακένιο	38-544
Διβενζο (a,h)ανθρακένιο	1χνη-35
Crysene	126-210

### 3.4 Υγρά Καύσιμα - Μαζούτ

Ο όρος μαζούτ (προέρχεται από το γαλλικό mazout) ή πετρέλαιο εξωτερικής καύσης (fuel oil) αναφέρεται σε βαριά προϊόντα τα οποία είναι υπολείμματα της απόσταξης του αργού πετρελαίου. Γενικά, το μαζούτ είναι ένα μαύρο παχύρευστο σε συνήθεις συνθήκες θερμοκρασίας υγρό που χρησιμοποιείται κυρίως σαν καύσιμο σε μεγάλες εγκαταστάσεις παραγωγής ατμού ή ηλεκτρισμού και για κίνηση πλοίων. Στην Ελλάδα διατίθενται δύο τύποι μαζούτ, το Νο.1 και το Νο.3. Η διαφορά των δύο τύπων είναι η ρευστότητα τους. Το Νο.1 είναι χαμηλού ιξώδους και το Νο.3 υψηλού. Και οι δύο τύποι διατίθενται στην αγορά με δύο περιεκτικότητες σε θείο, χαμηλού θείου και υψηλού θείου. Η αύξηση της ζήτησης της βενζίνης είχε σαν αποτέλεσμα την εισαγωγή της θερμικής πυρόλυσης στα διυλιστήρια. Με την θερμική πυρόλυση μειώθηκε σημαντικά η διαθέσιμη ποσότητα υπολείμματος και η παρασκευή των καυσίμων για λέβητες γίνονταν με ανάμειξη των υπάρχοντων ατμοσφαιρικών υπολειμμάτων με τα πολύ βαριά υπολείμματα (πίσσες) της θερμικής πυρόλυσης. Η εισαγωγή της καταλυτικής πυρόλυσης απαίτησε την απόσταση υπο κενό του υπολείμματος της ατμοσφαιρικής απόσταξης για να παραχθεί η απαιτούμενη τροφοδοσία αυτών των μονάδων. Το υπόλειμμα της απόσταξης υπό κενό είναι πολύ βαρύ για να διατεθεί ως έχει. Έτσι προέκυψε η ανάγκη της ανάμιξης των βαρέων υπολειμμάτων με αποστάγματα, ούτως ώστε το τελικό προϊόν να έχει την επιθυμητή ρευστότητα. Η εισαγωγή της ισοδόλυσης έλυσε εν μέρει το πρόβλημα, αφού με ήπια θερμική πυρόλυση παράγει σημαντικές ποσότητες υπολείμματος με ικανοποιητικό ιξώδες. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται σημαντικά η ποσότητα των ελαφρών προϊόντων που πρέπει να αναμειχθούν με τα υπολείμματα. Τα μαζούτ, σε αντίθεση με τα υπόλοιπα προϊόντα του αργού πετρελαίου είναι υπολείμματα απόσταξης κι όχι αποστάγματα. Τα μαζούτ είναι τα προϊόντα του διυλιστηρίου με τη χαμηλότερη τιμή πώλησης και με φθίνουσα ζήτηση με την πάροδο του χρόνου. Οι προδιαγραφές της αγοράς θέτουν περιορισμούς κυρίως στο ιξώδες και την περιεκτικότητα σε θείο. Τα βασικά συστατικά για την παρασκευή των μαζούτ, είναι τα βαριά υπολείμματα από όλες τις διεργασίες. Η πιο συνήθης πρακτική όμως είναι η ανάμειξη των βαρέων υπολειμμάτων με ελαφρά συστατικά, ώστε το τελικό προϊόν να έχει το επιθυμητό ιξώδες. Προτιμάται η χρήση gasoil που προέρχονται από πυρολυτικές διεργασίες, λόγω της κακής τους ποιότητας για την παραγωγή ντίζελ. Για λόγους ασφαλείας αποκλείεται η χρήση ελαφρών συστατικών, της κλάσης της βενζίνης και της κηροζίνης [11].

Επειδή το κόστος αποθείωσης των υπολειμμάτων είναι πολύ υψηλό και η τιμή του τελικού προϊόντος είναι χαμηλή, για την παρασκευή μαζούτ χαμηλού θείου

χρησιμοποιείται υπόλειμμα απόσταξης αργού πετρελαίου χαμηλού θείου. Μερικές από τις βασικές ιδιότητες του μαζούτ παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω:

- Πυκνότητα: Η πυκνότητα είναι μια ιδιότητα αρκετά σημαντική γιατί σχετίζεται με τη θερμογόνο δύναμη του καυσίμου και με τη ρύθμιση του καυστήρα στον οποίο θα χρησιμοποιηθεί το μαζούτ
- Ιξώδες: Το ιξώδες είναι μια πολύ σημαντική ιδιότητα που επηρεάζει τη διάσπαση του καυσίμου σε πολύ μικρά σταγονίδια στο ακροφύσιο του καυστήρα. Όσο μεγαλύτερο είναι το ιξώδες, τόσο δυσκολότερο είναι αυτό.
- Περιεκτικότητα σε θείο: Το θείο είναι ανεπιθύμητο επειδή κατά την καύση του μετατρέπεται σε διοξείδιο του θείου ( $\text{SO}_2$ ) που είναι όξινο και διαβρωτικό, ενώ επίσης συμβάλλει στο φαινόμενο της όξινης βροχής. Το πρόβλημα γίνεται οξύτερο όταν σχηματιστεί τριοξείδιο του θείου ( $\text{SO}_3$ ) που με τους υδρατμούς των καυσαερίων γίνεται θειικό οξύ, που επιτείνει τα πρόβλημα της διάβρωσης
- Θερμογόνος δύναμη: Η θερμογόνος δύναμη ενός καυσίμου επηρεάζεται και από την περιεκτικότητά του σε θείο, νερό και τέφρα.
- Τέφρα: Τα μαζούτ μπορεί να περιέχουν μικρές ποσότητες υλικών που μπορεί να οδηγήσουν στο σχηματισμό τέφρας κατά την καύση, όπως αιωρούμενα στερεά και διαλυτές οργανομεταλλικές ενώσεις. Οι ενώσεις αυτές μπορεί να δημιουργήσουν προβλήματα αποθέσεων στο σύστημα ψεκασμού του καυσίμου, καθώς και φθορά στις εγκαταστάσεις μεταφοράς θερμότητας στις θερμικές εγκαταστάσεις. Από τα μέταλλα που περιέχονται στην τέφρα, αυτά που ενδιαφέρουν περισσότερο είναι το νάτριο και το βανάδιο. Ο λόγος είναι ότι τα οξειδία τους έχουν χαμηλό σημείο τήξης και μπορούν έτσι να μεταφερθούν και να εναποτεθούν σε διάφορα σημεία της θερμικής εγκατάστασης, προκαλώντας τα προαναφερθέντα προβλήματα διάβρωσης και μείωσης της απόδοσης.

Η κύρια διαφορά μεταξύ των διαφόρων τύπων μαζούτ είναι η περιεκτικότητα σε θείο. Διακρίνονται οι παρακάτω κατηγορίες:

- 1) "Πολύ χαμηλού θείου" είναι μαζούτ με περιεκτικότητα σε θείο έως 0.5%
- 2) "Χαμηλού θείου" είναι μαζούτ με περιεκτικότητα σε θείο 0.5-1.0%
- 3) "Μέτριου θείου" είναι ένα μαζούτ με περιεκτικότητα σε θείο 1.0- 2.0%
- 4) "Υψηλού θείου" είναι ένα μαζούτ με περιεκτικότητα σε θείο 2.0-3.5%



### 3.5 Αέρια Καύσιμα – Φυσικό αέριο

Τα αέρια καύσιμα αποτελούν την καθαρότερη και πιο εύχρηστη πηγή ενέργειας απ' όλα τα συμβατικά καύσιμα. Η χρήση τους είναι ευρεία και ιδίως για οικιακή χρήση (θέρμανση χώρων, μαγείρεμα, παροχή ζεστού νερού) αποτελεί την πιο αξιόπιστη και οικονομική λύση.

Ανάμεσα στα αέρια καύσιμα, αυτά που υπάρχουν φυσιολογικά σε αέρια μορφή υπό κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης, το φυσικό αέριο είναι σήμερα το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο στην βιομηχανία τσιμέντου. Το φυσικό αέριο είναι ένα ορυκτό καύσιμο που σχηματίστηκε από υδρογονάνθρακες. Δημιουργείται από μετατροπή οργανικής ύλης σε εκατομμύρια χρόνια και υπό την επίδραση πίεσης, θερμοκρασίας και των φυτικών και ζωικών αποβλήτων που παραμένουν θαμμένα κάτω από στρώματα του εδάφους. Θεωρείται πως το μαντείο των Δελφών δημιουργήθηκε εξαιτίας πυρκαγιάς από τυχαία ανάφλεξη φυσικού αερίου σε βράχο, πριν περίπου από τις 3000 έτη. Οι ιδιότητες του φυσικού αερίου και η δυνατότητα εφαρμογής του δεν είχαν εντοπιστεί έγκαιρα, πέρασαν αρκετά χρόνια για να αναγνωριστεί η αξία του ως καύσιμο. Μέχρι τα τέλη του 19ου αιώνα για παράδειγμα, η χρήση του φυσικού αερίου ως καυσίμου ήταν περιορισμένη ακόμα και για τους καταναλωτές κοντά στα σημεία εξαγωγής του. Οι μεγάλοι αγωγοί μεταφοράς φυσικού αερίου έγιναν πραγματικότητα κατά το δεύτερο μισό του 20ου αιώνα, και ήταν υπεύθυνοι για τη διάδοση της χρήσης του φυσικού αερίου ως καυσίμου σε νοικοκυριά, εμπορικές εγκαταστάσεις, καθώς και βιομηχανικών χώρων. Το φυσικό αέριο δεν είναι καύσιμο που χρησιμοποιείται μόνο στους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά χρησιμοποιείται και ως καύσιμο στις βιομηχανίες που χρειάζονται σημαντικές εισροές ενέργειας όπως οι βιομηχανίες τσιμέντου, χαρτοπολτού και χαρτιού, γυαλιού, κεραμικών. Το 1990, το φυσικό αέριο αντιπροσώπευε το 24% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, αυτό προβλέπεται να αυξηθεί σε 29% μέχρι το 2020. Αυτή η αύξηση του ποσοστού χρήσης του φυσικού αερίου στην ενέργεια είναι μια παγκόσμια τάση.

Το φυσικό αέριο είναι ένα μίγμα υδρογονανθράκων με χαμηλό σημείο ζέσεως, με μια μεταβλητή σύνθεση, και με μια ευρεία περιεκτικότητα του μεθανίου ( $\text{CH}_4$ ) το οποίο είναι μεταξύ 70% και 99,6%. Ακόμα περιέχει αιθάνιο ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ), είναι το επόμενο που βρίσκεται σε υψηλή σύσταση στο φυσικό αέριο, ενώ το προπάνιο ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ), βουτάνιο ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ), διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ), άζωτο ( $\text{N}_2$ ), υδρογόνο ( $\text{H}_2$ ), οξυγόνο ( $\text{O}_2$ ) και ακόμη βαρύτεροι υδρογονάνθρακες εμφανίζονται ανάλογα με την προέλευση σε μικρότερες ποσότητες. Στην πραγματικότητα το φυσικό αέριο που διανέμεται μέσω αγωγών αερίου στους καταναλωτές είναι διαφορετικό από το πρωτογενές φυσικό

αέριο που εξορύσσεται. Το πρωτογενές φυσικό αέριο περιέχει προσμίξεις όπως άμμος, νερό και υδρόθειο ( $H_2S$ ). Πριν παραδοθεί οι προσμίξεις του πρωτογενούς φυσικού αερίου έχουν απομακρυνθεί, και συχνά αφαιρούνται και άλλα συστατικά. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η απομάκρυνση του νερού είναι ζωτικής σημασίας, και θα πρέπει να διενεργείται για την αποφυγή προβλημάτων στους αγωγούς του φυσικού αερίου. Κίνδυνοι που σχετίζονται με την ύπαρξη νερού είναι η αυξημένη διάβρωση και η δυνατότητα απόφραξης του αγωγού, λόγω των στερεών που σχηματίζονται από τα ενυδατωμένα συστατικά. Επίσης η εμφάνιση του πάγου και η επακόλουθη βλάβη των βαλβίδων και των μέσων είναι ένα σημαντικό πρόβλημα για την διέλευση του φυσικού αερίου στους αγωγούς σε περιοχές με χαμηλή θερμοκρασία κατά τη διάρκεια του χειμώνα.

Άλλη παράμετρος για την επίτευξη κατάλληλης ποιότητας στο φυσικό αέριο είναι η περιεκτικότητα σε υδρόθειο. Η απομάκρυνση του υδρόθειου πραγματοποιείται προκειμένου η πυκνότητα του φυσικού αερίου να παραμείνει μικρότερη από  $0.02 \text{ g/m}^3$ . Κίνδυνοι που σχετίζονται με την ύπαρξη υδρόθειου στο φυσικό αέριο είναι:

- περιβαλλοντικά προβλήματα, κατά την καύση του φυσικού αερίου (αέριοι ρύποι του θείου)
- διάβρωση σε αγωγούς φυσικού αερίου και στο δίκτυο διανομής.

Στον Πίνακα 3.10 γίνεται μια παρουσίαση των χαρακτηριστικών ιδιοτήτων του μεθανίου

**Πίνακας 3.10**

Χαρακτηριστικές ιδιότητες του φυσικού αερίου

Συστατικό	Περιεκτικότητα%		
	Μέγιστη	Μικρότερη	Μέσος όρος
Μεθάνιο (%)	98.86	93.33	95.52
Αιθάνιο (%)	5.135	0.225	2.627
Προπάνιο (%)	1.522	0.028	0.441
Βουτάνιο (%)	0.155	0.017	0.136
Διοξείδιο του άνθρακα (%)	0.64	0.01	0.40
Άζωτο (%)	1.21	0.43	0.74
<b>Φυσικές ιδιότητες</b>			
Ειδική πυκνότητα	0.591	0.563	0.580
Μέγιστη θερμογόνος δύναμη(MJ/Nm <sup>3</sup> )	39.21	37.55	38.58
<b>Χαρακτηριστικά καύσης</b>			
Σημείο ανάφλεξης	590°C-650 °C		
Όρια αναφλεξιμότητας (% κ.ο. στον αέρα)	4.3%-15%		
Θεωρητική θερμοκρασία φλόγας	1940 °C		
Μέγιστη ταχύτητα φλόγας	0,30m/s		

**3.6 Σύγκριση συμβατικών καυσίμων**

Προκειμένου να επιχειρηθεί μία σύγκριση των συμβατικών καυσίμων αρχικά αναφέρεται ότι η βιομηχανία τσιμέντου χρησιμοποιεί κατά περίπου 50,5% retcoke (Πίνακας 3.3). Το κυριότερο πλεονέκτημα του είναι η πολύ καλή αναλογία κόστους / θερμογόνου δύναμης. Ως παραπροϊόν μίας παραγωγικής διαδικασίας, που μάλιστα τα τελευταία χρόνια διαχειρίζεται ολοένα και πιο βαριές ποιότητες πετρελαίου με συνέπεια την μεγαλύτερη παραγωγή ret coke, είναι φθηνό καύσιμο. Βέβαια το retcoke έχει και κάποια μειονεκτήματα. Ένα από τα βασικότερα μειονεκτήματα είναι η μικρή περιεκτικότητα σε πτητικές ενώσεις που προκαλεί καθυστέρηση στην καύση με αποτέλεσμα μεγαλύτερη φλόγα που δημιουργεί προϊόντα χαμηλής κοκκομετρικής ποιότητας. Από περιβαλλοντικής απόψεως το βασικότερο πρόβλημα με το retcoke

είναι το διοξείδιο του θείου προϊόν της καύσης του θείου που περιέχεται στο petcoke αλλά ταυτόχρονα και η έκλυση βαρέων μετάλλων όπως το βανάδιο. Τέλος οι πολυκυκλικοί υδρογονάνθρακες βρίσκονται σε σημαντικές περιεκτικότητες κατά την καύση του petcoke.

Ορισμένες χαρακτηριστικές τιμές:

Περιεκτικότητα σε θείο (S): 4,5 - 8 %, όταν το ανώτατο όριο για το μαζούτ χαμηλού θείου είναι από 1/1/2005 μόλις 1 %.

Τέφρα (αιωρούμενα): Σε ποσοστά που κυμαίνονται από 0,9 - 1,53 % w/w, όταν το ανώτατο όριο για το μαζούτ είναι 0,1 %.

Βανάδιο : 500 – 2000 ppm, όταν το ανώτατο όριο για το μαζούτ είναι 120 ppm.

Βαρέα μέταλλα : σε υψηλά ποσοστά, όπως Νικέλιο (τοξικό), 510 ppm, μαγγάνιο 40 ppm κ.ά.

Σε ορισμένες ποιότητες petcoke εμφανίζονται υψηλά ποσοστά πτητικών συστατικών (14,1 % w/w – Κρατικό Χημείο Χαλκίδας, 4-7-2002) αποτελούμενων κατά κύριο λόγο από πολυαρωματικούς υδρογονάνθρακες (PAH's) οι οποίοι εμφανίζουν καρκινογόνο δράση και ιδιαίτερα όταν δρουν συνεργιστικά με βαρέα μέταλλα και αιωρούμενα σωματίδια. Αυτή η ιδιότητα, καθιστά τις ποιότητες αυτές του petcoke τουλάχιστο προβληματικές, κατά τη μεταφορά και το χειρισμό του από τους εργαζόμενους, λόγω της αποθήκευσης του σε υπαίθριους χώρους.

Το επόμενο σε χρήση καύσιμο στην βιομηχανία τσιμέντου είναι οι λιθάνθρακες σε ποσοστό 24%. Ο λιθάνθρακας είναι ένα καύσιμο το οποίο εξορύσσεται στην φύση, δεν είναι δηλαδή προϊόν κάποιας επεξεργασίας επομένως είναι ένα φθινό καύσιμο. Τα παλαιότερα χρόνια χρησιμοποιείτο ευρεία στην βιομηχανία τσιμέντου, βέβαια αργότερα λόγω των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την χρήση λιθανθράκων έγινε επιτακτική ανάγκη μείωσης του από εναλλακτικά καύσιμα. Οι λιθάνθρακες έχουν σχετικά υψηλή θερμογόνο δύναμη όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 3.11 δηλαδή 23,3-24,9 MJ/kg.

**Πίνακας 3.11**

Θερμογόνος δύναμη ορισμένων συμβατικών καυσίμων

Καύσιμο	Θερμογόνος δύναμη (MJ/kg)
Ξύλο	18,5 - 21
Τύρφη	20 – 21
Λιθάνθρακες	23,3 - 24,9
Πετρέλαιο	40 - 42,3

Το φυσικό αέριο είναι ίσως το καλύτερο από τα συμβατικά καύσιμα. Το κόστος χρήσης του όμως επειδή είναι σχετικά υψηλό δεν χρησιμοποιείται ευρύτατα στην βιομηχανία τσιμέντου. Υπάρχουν αρκετά πλεονεκτήματα στην αξιοποίηση (χρήση) του φυσικού αερίου ως καυσίμου κάποια από τα οποία περιγράφονται ως εξής:

- Υψηλή θερμογόνος δύναμη: Είναι σημαντικό να γνωρίζουμε ότι το φυσικό αέριο έχει υψηλότερη θερμογόνο δύναμη ανά μονάδα μάζας σε σύγκριση με όλα τα άλλα ορυκτά καύσιμα.
- Καθαρότερα καύσιμα. Το φυσικό αέριο είναι το καθαρότερο όλων των ορυκτών καυσίμων. Δεδομένου ότι ουσιαστικά αποτελείται από το μεθάνιο, τα προϊόντα από την καύση του είναι το νερό και διοξείδιο του άνθρακα, τα ίδια προϊόντα με εκπνεόμενη αναπνοή των έμβιων όντων. Επιπλέον, η καύση του φυσικού αερίου δεν δημιουργεί ούτε τέφρα ούτε εκπομπές σωματιδίων. Ο πίνακας... που παρατίθεται παρουσιάζει μια ενδιαφέρουσα ποσοτική σύγκριση των ρύπων που εκπέμπονται κατά τη διάρκεια της καύσης των τριών κλασικών καυσίμων που χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην βιομηχανία, του πετρελαίου, άνθρακα και του φυσικού αερίου. Αυτός ο πίνακας συντάχθηκε με βάση τα καύσιμα με μια μέση τυπική σύσταση και επίσης θεωρήθηκε σαν δεδομένο ότι πραγματοποιείται τέλεια καύση και στα τρία καύσιμα. Πρέπει επίσης να επισημανθεί ότι η κάμινος του τσιμέντου κατά γενικό κανόνα, εκπέμπει περισσότερο NO<sub>x</sub> και SO<sub>x</sub> λιγότερο από ό, τι τα αντίστοιχα ποσοστά φαίνονται στον Πίνακα 3.12
- μικρότερο φαινόμενο του θερμοκηπίου: η αυξανόμενη χρήση του φυσικού αερίου μπορεί να αποτελέσει σημαντικό παράγοντα για τη μείωση του φαινομένου του θερμοκηπίου, διότι όπως μπορεί να γίνει κατανοητό μέσα από την ανάλυση του πίνακα... η χρήση του φυσικού

αερίου εκπέμπει 31% λιγότερο CO<sub>2</sub> από το πετρέλαιο και 38% λιγότερο από τον άνθρακα.

- μειωμένη αιθαλομίχλη: Ένα άλλο πιθανό περιβαλλοντικό πλεονέκτημα της χρήσης του φυσικού αερίου ως καυσίμου είναι η πιθανή μείωση του νέφους και του όζοντος στα χαμηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας. Αέριες εκπομπές NO<sub>x</sub> δεν παράγονται πρακτικά όπως επίσης δεν παράγονται αέριες πτητικές οργανικές ενώσεις.

Οι απόψεις αυτές αιτιολογούν την πεποίθηση πολλών περιβαλλοντόλογων ότι το φυσικό αέριο είναι η αναπόφευκτη μετάβαση μεταξύ των ορυκτών καυσίμων που έχουν πράγματι χρησιμοποιηθεί και των καθαρών και ανανεώσιμων καυσίμων, που θα πρέπει σταδιακά να χρησιμοποιηθούν στο μέλλον, καθώς οι πληθυσμοί και οι κυβερνήσεις αναγνωρίζουν το μέγεθος των περιβαλλοντικών προβλημάτων.

Το φυσικό αέριο δεν αποτελεί ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, έτσι η αυξημένη χρήση του θα πρέπει να ακολουθείται από μια ακριβή αξιολόγηση της διαθεσιμότητάς του. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι:

- Υπάρχουν αποθέματα φυσικού αερίου που έχουν ανακαλυφθεί σε πολύ πιο έντονο ρυθμό σε σχέση με την ανακάλυψη των αποθεμάτων αργού πετρελαίου. Το 1970 τα γνωστά αποθέματα φυσικού αερίου αντιπροσώπευαν το 50% των αποθεμάτων αργού πετρελαίου από την άποψη των ενεργητικών ισοδυναμίας επί του παρόντος, το ποσοστό αυτό είναι περίπου 95%
- Κατά το έτος 2000, σύμφωνα με την αξιολόγηση της UNCTAD, τα γνωστά αποθέματα φυσικού αερίου των οποίων η εκμετάλλευση είναι εφικτή σύμφωνα με τεχνολογίες που είναι διαθέσιμες εκείνη την εποχή ήταν 150 τρισεκατομμύρια κυβικά μέτρα, ένα όγκο που μπορεί να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις του κόσμου για τα επόμενα 70 χρόνια, υποθέτοντας ιστορικά ποσοστά.
- οι τεχνικοί θεωρούν ότι πολλές μεγάλες ποσότητες του φυσικού αερίου δεν έχουν ακόμη βρεθεί

Τέλος το μαζούτ είναι ένα καύσιμο που χρησιμοποιείται στην βιομηχανία τσιμέντου αφενός λόγω του μειωμένου κόστους του, και αφετέρου λόγω της σχετικά υψηλής θερμογόνου δυνάμεως. Το σημαντικότερο πρόβλημα στην χρήση μαζούτ είναι το θείο το οποίο βρίσκεται σε υψηλή περιεκτικότητα. Παρακάτω παρατίθεται ένας πίνακας που δείχνει στατιστικά στοιχεία από την καύση μαζούτ.

**Πίνακας 3.12**

Εκπομπές αερίων ρύπων Μαζούτ

<b>Ρύπος</b>	<b>(kg/ton)</b>
CO <sub>2</sub>	3078,273
CO	0,402
NO <sub>x</sub>	6,631
SO <sub>x</sub>	30

#### **4. ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΑ ΚΑΥΣΙΜΑ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ**

Η ΕΕ υπέγραψε το 1997 το πρωτόκολλο του Κιότο και δεσμεύτηκε στην μείωση των εκπομπών των αερίων που προκαλούν το φαινόμενο του θερμοκηπίου κατά 8%, μέχρι το 2012, σχετικά με τα επίπεδα εκπομπών το 1990 (παρόλα αυτά τα σημερινά δεδομένα αποδεικνύουν αύξηση των εκπομπών). Στις 16 Φεβρουαρίου 2005, το πρωτόκολλο του Κιότο τέθηκε σε ισχύ. Τα ορυκτά καύσιμα, που χρησιμοποιούνται για ενεργειακούς σκοπούς, είναι το κύριο αίτιο εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, το οποίο συμβάλλει περισσότερο από τα υπόλοιπα αέρια του φαινομένου του θερμοκηπίου στις κλιματικές αλλαγές του πλανήτη. Η αυξητική τάση της παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας προερχόμενης από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, είναι αρκετά μικρότερη από την αυξανόμενη κατανάλωση ενέργειας προερχόμενης από τα συμβατικά καύσιμα. Για το λόγο αυτό πρέπει να αυξηθεί η χρήση των εναλλακτικών καυσίμων από τη τσιμεντοβιομηχανία [12].

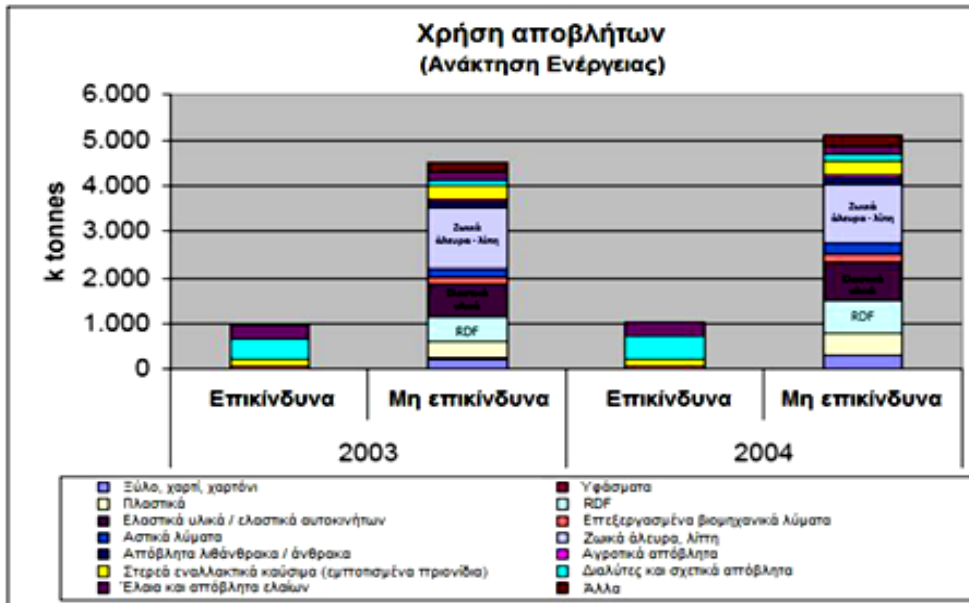
Ο Πίνακας 4.1 καταγράφει τα εναλλακτικά καύσιμα που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία τσιμέντου στην Ελλάδα, χωρίζοντας τα σε επικίνδυνα και μη επικίνδυνα. Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται η συσχέτιση από την πλευρά της ενέργειας της χρήσης εναλλακτικών καυσίμων.



**Πίνακας 4.1**

Χρήση εναλλακτικών καυσίμων και διαχωρισμός τους ανάλογα με το βαθμό επικινδυνότητας τους.

α/α	Είδη εναλλακτικών καυσίμων	Ποσότητες σε χιλιάδες τόννους			
		2003		2004	
		Επικίνδυνα	Μη επικίνδυνα	Επικίνδυνα	Μη επικίνδυνα
1	Ξύλο, χαρτί, χαρτόνι	0.000	214.991	1.077	302.138
2	Υφάσματα	0.000	19.301	0.000	8.660
3	Πλαστικά	0.000	354.070	0.000	464.199
4	RDF	4.992	570.068	1.554	734.296
5	Ελαστικά υλικά (ελαστικά αυτοκινήτων)	0.000	699.388	0.000	810.320
6	Επεξεργασμένα βιομηχανικά λύματα	52.080	161.660	49.597	197.720
7	Αστικά λύματα	0.000	174.801	0.000	264.489
8	Ζωικά άλευρα, λίπη	0.000	1313.094	0.000	1285.074
9	Απόβλητα λιθάνθρακα / άνθρακα	1.890	137.213	7.489	137.013
10	Αγροτικά απόβλητα	0.000	73.861	0.000	69.058
11	Στερεά εναλλακτικά καύσιμα	164.931	271.453	149.916	305.558
12	Διαλύτες και σχετικά απόβλητα	425.410	131.090	517.125	145.465
13	Έλαια και απόβλητα ελαίων	325.265	181.743	313.489	196.383
14	Άλλα	0.551	199.705	0.000	212.380
	<b>Σύνολο</b>	<b>975</b>	<b>4502</b>	<b>1040</b>	<b>5133</b>



Σχήμα 4.1: Χρήση εναλλακτικών καυσίμων και ανάκτηση ενέργειας [1].

Στην Τσιμεντοβιομηχανία η καύση αποβλήτων (δηλ. η χρήση εναλλακτικών καυσίμων ή δευτερογενών καυσίμων) είναι ένα θέμα που εδώ και αρκετό καιρό βρίσκεται μόνιμα στην επικαιρότητα διεθνών και εθνικών συνεδρίων για το τσιμέντο. Σχεδόν όλα τα οικονομικά αλλά και βιομηχανικά αναπτυγμένα κράτη αλλά και καλά οργανωμένες κοινωνίες ασχολούνται σοβαρά με την περιβαλλοντικά σωστή και οικολογικά αποδεκτή διάθεση αστικών και βιομηχανικών αποβλήτων, παροχή την οποία προσφέρει η τσιμεντοβιομηχανία.

Ένας από τους κύριους συντελεστές κόστους στην παραγωγή του τσιμέντου είναι η καύσιμη ύλη που χρησιμοποιείται για την έψηση πρώτων υλών. Για την παραγωγή ενός kg κλίνκερ απαιτούνται 3350 MJ- 4200 MJ. Ανάλογα με την τιμή του καυσίμου η συμμετοχή του στην διαμόρφωση του εργοστασιακού κόστους είναι της τάξης του 25% σήμερα. Υπήρξαν όμως εποχές όπου το ποσοστό αυτό έφτανε και ξεπερνούσε το 50%. Ειδικά την εποχή της πρώτης και της δεύτερης ενεργειακής κρίσης την δεκαετία του 70 όταν η τσιμεντοβιομηχανία χρησιμοποιούσε κατ αποκλειστικότητα σχεδόν μαζούτ-2500 η επιβάρυνση του εργοστασιακού κόστους παραγωγής από το καύσιμο ξεπερνούσε το 50%. Τέλος της δεκαετίας του 70 και αρχές της δεκαετίας του 80 άρχισε η μαζική στροφή της τσιμεντοβιομηχανίας στην χρήση του άνθρακα ο οποίος ήταν και το κύριο καύσιμο πριν από τον 2<sup>ο</sup> παγκόσμιο πόλεμο. Η στροφή αυτή υπαγορεύτηκε αποκλειστικά και μόνο από την χαμηλότερη τιμή του άνθρακα. Μέσα στα πρώτα χρόνια της δεκαετίας του 80 η χρήση του άνθρακα σε μορφή

πετρελαικού κωκ και όλων των τύπων γαιάνθρακα καθιερώθηκε σε όλο τον δυτικό κόσμο. Κατ' αυτό τον τρόπο και λόγω της μεγάλης προσφοράς άνθρακα (τα παγκόσμια αποθέματα άνθρακα είναι πολλαπλάσια αυτών του πετρελαίου) το κόστος του καυσίμου στην παραγωγή τσιμέντου μειώθηκε αρκετά.

Η εποχή αυτών των σοβαρών προβληματισμών για την ρύθμιση του κόστους του καυσίμου συνέπεσε με την εποχή αναζήτησης οικολογικά και οικονομικά αποδεκτών λύσεων για την διάθεση διαφόρων αποβλήτων, παραπροϊόντων, απορριμμάτων κλπ. Η πίεση προς τους παραγωγούς αυτών των "άχρηστων" υλικών για την οικολογικά αποδεκτή διάθεση τους άνοιξε το δρόμο για την αξιοποίηση πολλών υλικών από αυτά. Έτσι φτάνουμε στην ανακύκλωση και την θερμική αξιοποίηση. Φτάνουμε πλέον να μην μιλάμε για απορρίμματα ή άχρηστα υλικά αλλά για αξιοποιήσιμα υλικά. Το χαρτί τα μέταλλα το γυαλί στα οικιακά απορρίμματα δεν είναι άχρηστα, έχουν αξία αν ανακυκλωθούν, όπως δεν μπορούν να χαρακτηριστούν άχρηστα, απόβλητα και απορρίμματα που έχουν θερμικό δυναμικό το οποίο θα μπορούσε να αξιοποιηθεί για την καύση τους σε κάποιο κλίβανο. Με την καλλιέργεια αυτής της φιλοσοφίας αρκετά γρήγορα προς τα τέλη της δεκαετίας του 80 αλλά κυρίως μέσα στη δεκαετία του 90 υπήρξε σε μεγάλο βαθμό αξιοποίηση πολλών πρώην "άχρηστων" υλικών. Σε αυτόν τον αγώνα αύξησης και βελτιστοποίησης της αξιοποίησης υλικών με θερμιδικό περιεχόμενο μεγάλο μερίδιο συμμετοχής έχει η τσιμεντοβιομηχανία με την υποκατάσταση παραδοσιακών καυσίμων από εναλλακτικά ή δευτερογενή καύσιμα.

Τα υλικά που έχουν θερμικό δυναμικό, δηλαδή είναι καύσιμα και η θερμογόνο δύναμη τους υπερβαίνει κάποιο όριο που γίνεται αποδεκτό από την βιομηχανία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εναλλακτικά καύσιμα. Η κάμινος της τσιμεντοβιομηχανίας έχει την δυνατότητα να αξιοποιεί δευτερογενή καύσιμα χωρίς συνήθως να επηρεάζεται αρνητικά η ποιότητα του προϊόντος και χωρίς να δημιουργεί προβλήματα στο περιβάλλον. Τα χαρακτηριστικά εκείνα που καθιστούν τον κλίβανο ικανό να αξιοποιήσει θερμικά δευτερογενή καύσιμα είναι τα εξής [13]:

#### Θερμοκρασία καύσης

Όπως προαναφέρθηκε η θερμοκρασία του προς έψηση υλικού στη κάμινο φθάνει τους 1450°C ενώ η θερμοκρασία της φλόγας φτάνει τους 2000°C. Αυτές οι θερμοκρασίες εξασφαλίζουν την πλήρη καταστροφή ακόμη και των πιο σταθερών οργανικών ενώσεων.

#### Χρόνος παραμονής

Είναι γνωστό ότι για κάθε αντίδραση, στην προκειμένη περίπτωση πρόκειται για καύση και καταστροφή οργανικών ενώσεων, πέραν της θερμοκρασίας σοβαρό ρόλο

παίζει και ο χρόνος παραμονής των υλικών στη θερμοκρασία καύσης. Στη κάμινο της τσιμεντοβιομηχανίας ο χρόνος παραμονής είναι αρκετά μεγάλος, προκύπτει από τις διαστάσεις των χώρων καύσης αλλά και τις διαδικασίες έψησης.

#### Δέσμευση των προϊόντων καύσης

Η φλόγα και επομένως και τα προϊόντα καύσης, αέρια η στερεά (τέφρα) έρχονται σε άμεση επαφή με τις πρώτες ύλες οι οποίες είναι έντονα αλκαλικές. Αυτό το αλκαλικό περιεχόμενο του κλίβανου δεσμεύει το χλώριο και το θείο τα οποία διασπώνται από την καύση των αποβλήτων σχηματίζοντας χλωριούχα και θειικά άλατα του ασβεστίου, καλίου, νατρίου (ενώσεις μη τοξικές). Με εξαίρεση τον υδράργυρο ο οποίος έχει μεγάλη πτητικότητα, όλα τα μέταλλα που μπορεί να περιέχονται στην τέφρα του καυσίμου δεσμεύονται σε μη υδατοδιαλυτή μορφή στο κλίνκερ και στην συνέχεια στο τσιμέντο. Μακροχρόνια πειράματα έκπλυσης απέδειξαν την ικανότητα αυτή του τσιμέντου

#### Συνθήκες καύσης

Για την λειτουργία των ηλεκτροστατικών φίλτρων των κλιβάνων την προστασία της θερμοδομής αλλά και για την καλή ποιότητα του παραγόμενου κλίνκερ, προϋπόθεση είναι η ατμόσφαιρα του κλιβάνου να είναι σαφώς οξειδωτική, δηλαδή να υπάρχει περίσσεια οξυγόνου. Αυτή η απαίτηση εγγυάται την πλήρη καύση των οργανικών ενώσεων.

#### Σταθερότητα και έλεγχος των συνθηκών λειτουργίας

Μια από τις κύριες απαιτήσεις για την χρήση του τσιμέντου είναι η σταθερότητα της ποιότητας του. Η σταθερότητα αυτή μπορεί να επιτευχθεί με τον αυστηρό και συνεχή έλεγχο και ρύθμιση της ποιότητας των πρώτων υλών και την τήρηση σταθερών συνθηκών λειτουργίας των παραγωγικών μηχανημάτων και ειδικά του κλίβανου. Η τεχνολογία την οποία χρησιμοποιούμε για την μέτρηση, καταγραφή και ρύθμιση των λειτουργικών παραμέτρων μας επιτρέπει να έχουμε πλήρως ελεγχόμενες σταθερές συνθήκες για την πλήρη καύση δηλ καταστροφή των οργανικών ενώσεων αλλά και την ενσωμάτωση της τέφρας στο προϊόν. Κάθε λειτουργική ανωμαλία που μπορεί να επηρεάσει τις επιθυμητές συνθήκες εντοπίζεται εγκαίρως και λαμβάνονται τα απαραίτητα μέτρα.

### Εκπομπές

Από την μέχρι σήμερα εμπειρία στις χώρες που η τσιμεντοβιομηχανία χρησιμοποιεί εναλλακτικά καύσιμα, οι αέριες εκπομπές αλλάζουν σε σχέση με αυτές κατά την χρήση κλασσικών καυσίμων, η δε εκπομπή σκόνης περιορίζεται με την χρήση Η/Φ και Σ/Φ σε επίπεδο κάτω των 50 mg/Nm<sup>3</sup>.

### Δυναμικότητα

Η παραγωγική δυναμικότητα της ελληνικής τσιμεντοβιομηχανίας είναι περίπου 13 εκατ. t τσιμέντου ετησίως. Εάν λάβουμε υπόψη ότι για την παραγωγή τσιμέντου αυτού χρησιμοποιούνται περίπου 10-11 εκατ. t κλίνκερ, η συνολική κατανάλωση καυσίμου στην Ελληνική τσιμεντοβιομηχανία είναι της τάξεως των 1.5 εκατ. t άνθρακα. Εάν υπολογίσουμε μια μέση θερμογόνο δύναμη των εναλλακτικών καυσίμων της τάξεως των 12.552 MJ/kg η αντικατάσταση ενός τόνου άνθρακα ισοδυναμεί με δύο t εναλλακτικού καυσίμου. Αυτό σημαίνει ότι η τσιμεντοβιομηχανία στην Ελλάδα είναι σε θέση να χρησιμοποιήσει ένα ίσως και δύο εκατ. t εναλλακτικού καυσίμου αν αντικαταστήσει το 50-70% του παραδοσιακού με εναλλακτικό καύσιμο. Μια ποσότητα αρκετά μεγάλη για τα ελληνικά δεδομένα που θα έδινε λύση σε πάρα πολλά προβλήματα που υπάρχουν σήμερα στην διάθεση διάφορων αποβλήτων και απορριμάτων.

### Συνεχής λειτουργία

Οι κλίβανοι της τσιμεντοβιομηχανίας είναι συνεχούς λειτουργίας. Οι στάσεις λόγω βλαβών ή συντήρησης είναι πάντα βραχυχρόνιες. Με τον τρόπο αυτό η απορρόφηση των εναλλακτικών καυσίμων είναι συνεχής και αποφεύγονται σε μεγάλο βαθμό τα προβλήματα ενδιάμεσης αποθήκευσης μεγάλων ποσοτήτων.

### Κόστος

Από την εμπειρία που υπάρχει σε άλλα Ευρωπαϊκά κράτη, το κόστος της οικολογικά αποδεκτής διάθεσης αποβλήτων και απορριμμάτων με άλλους τρόπους, πέραν της χρήσης στην τσιμεντοβιομηχανία, είναι πιο υψηλό από τα τέλη που καταβάλλονται στην τσιμεντοβιομηχανία.

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η ικανοποίηση των παραπάνω συνθηκών, μια σειρά τεχνικών προδιαγραφών έχουν διαμορφωθεί ώστε ρεύματα αποβλήτων να μπορούν να θεωρηθούν κατάλληλα για χρήση ως εναλλακτικό καύσιμο. Ο Πίνακας 4.2 περιλαμβάνει προδιαγραφές από διαφορετικές βιομηχανίες τσιμέντου όπου γίνεται σαφές πως οι προδιαγραφές ποικίλουν τόσο μεταξύ βιομηχανιών αλλά και χωρών προέλευσης.

### Πίνακας 4.2.

Προδιαγραφές εναλλακτικών καυσίμων που επηρεάζουν την παραγωγικότητα

	TITAN	Γερμανία	Ιταλία	Σουηδία <sup>1</sup>	EURITS <sup>2</sup>
Ελάχιστη Θερμογόνος δύναμη (MJ/kg)	>14	>17-25	>15	>23,9-31,4	>15
Μέγιστη υγρασία (w/w %)	<15	<20	<25	<30<10	

Ο Πίνακας 4.3 περιλαμβάνει αντίστοιχες προδιαγραφές θείου και χλωρίου, δεδομένου ότι αυτά είναι από τα κρίσιμα στοιχεία που μπορούν να απειλήσουν την εύρυθμη λειτουργία του κλιβάνου (δια της δημιουργίας αλάτων με αλκάλια που στερεοποιούνται στα τοιχώματα και αυξάνουν τα σταματήματα του κλιβάνου και το κόστος συντήρησης)

### Πίνακας 4.3

Προδιαγραφές εναλλακτικών καυσίμων που επηρεάζουν την διάρκεια της ζωής της καμίνου.

	TITAN	Γερμανία	Ιταλία	Σουηδία	EURITS
Μέγιστη περιεκτικότητα S ( w/w % dry)	<3	<1	<0.6	<0.5	<0.4
Μέγιστη περιεκτικότητα Cl (w/w % dry)	<0.5	<0.8	<0.9	<1	<0.5

Στον Πίνακα 4.4 συνοψίζονται οι προδιαγραφές των εναλλακτικών καυσίμων όσον αφορά τα ιδιαίτερος πτητικά βαρέα μέταλλα. Τα συγκεκριμένα επηρεάζουν τις

<sup>1</sup> Για την Σουηδία υπάρχουν δύο ποσότητες αποβλήτων και δύο ομάδες προδιαγραφών

<sup>2</sup> European Union for Responsible Incineration and Treatment of Special Waste

εκπομπές, ενώ τα υπόλοιπα βαρέα μέταλλα πρωτίστως την ποιότητα του κλίνκερ δεδομένου πως είναι μέρος της τέφρας του καυσίμου και συνεπώς ενσωματώνονται σε αυτό.

**Πίνακας 4.4**

Προδιαγραφές πτητικών βαρέων μετάλλων σε εναλλακτικά καύσιμα

Μέγιστη περιεκτικότητα στοιχείων σε ppm	TITAN	Γερμανία	Ιταλία	Σουηδία	EURITS
Hg	<2	<1.2	<7	<5	< 4
Cd	<30	<9	<7	<10/<5	<10

#### 4.1 Είδη και κατηγορίες εναλλακτικών καυσίμων

Στην τσιμεντοβιομηχανία, τα εναλλακτικά καύσιμα που χρησιμοποιούνται, συνήθως ταξινομούνται σε:

- Αέρια
- Υγρά
- Στερεά

Στα υγρά ανήκουν: χρώματα, διαλύτες μεταχειρισμένα λάδια κ.α. Στα στερεά ανήκουν διάφορα οικιακά απορρίμματα, βιομηχανικά απόβλητα, μεταχειρισμένα ελαστικά, υλικά αποξήλωσης οικοδομών κ.α. Στα παστώδη στερεά ανήκουν οι λάσπες βιολογικού καθαρισμού, λάσπες διυλιστηρίων και γενικά όλα τα παχύρρευστα. Ως αέριο εναλλακτικό καύσιμο πολλές φορές αναφέρεται το φυσικό αέριο, ενώ συχνότερα στη κατηγορία αυτή ανήκουν αέρια όπως το υδρογόνο.

Σύμφωνα με την διάκριση του Cem bureau, τα εναλλακτικά καύσιμα χωρίζονται στις ακόλουθες 5 κατηγορίες:

- Κατηγορία 1: αέρια εναλλακτικά καύσιμα
- Κατηγορία 2: υγρά εναλλακτικά καύσιμα
- Κατηγορία 3: λεπτοθρυμματισμένα στερεά εναλλακτικά καύσιμα
- Κατηγορία 4: χονδροθρυμματισμένα στερεά εναλλακτικά καύσιμα
- Κατηγορία 5 : συμπαγείς μάζες εναλλακτικών καυσίμων

Στην βιομηχανική εφαρμογή στην τσιμεντοβιομηχανία υπάρχουν περιπτώσεις αξιοποίησης εναλλακτικών καυσίμων από κάθε κατηγορία και σε πολλές περιπτώσεις σε μία βιομηχανική μονάδα προβλέπεται συνδυασμός χρήσης διαφορετικών εναλλακτικών καυσίμων. Συνηθέστερα εμφανίζονται περιπτώσεις χρήσης στερεών εναλλακτικών καυσίμων, δευτερευόντως υγρών και τέλος αερίων. Στην παρούσα εργασία με γνώμονα αυτή την κατάταξη σε σχέση με το εύρος εφαρμογής τους εξετάζονται κυρίως τα στερεά εναλλακτικά καύσιμα και τα παστώδη στερεά [13][14].

## 4.2 Λάστιχα

Το ποσό των μεταχειρισμένων ελαστικών αυτοκινήτων που θα παράγονται στην Ελλάδα είναι περίπου 2.000.000 ανά έτος. Υπολογίζεται από αυτά όσα δεν καταλήγουν ξανά σε αυτοκίνητα και θεωρούνται απορρίμματα στην το 50% διατίθεται σε χώρους υγειονομικής ταφής, το 20% ανακυκλώνεται στην παραγωγή καουτσούκ και το 30% χρησιμοποιείται στην καύση. υγειονομική ταφή που είναι η επικρατέστερη μέθοδος, θα μειωθεί δραστικά στο εγγύς μέλλον, λόγω της πρόσφατης θέσπισης των οδηγιών της Ευρωπαϊκής Ένωσης που περιλαμβάνει σημαντικούς περιορισμούς σε αυτήν την πρακτική προς όφελος των εναλλακτικών λύσεων προσανατολισμένων προς τα υλικά και την ανάκτηση ενέργειας. Επιπλέον, η διάθεση των μεταχειρισμένων ελαστικών σε χώρους υγειονομικής ταφής ή και παράνομες χωματερές, αυξάνει τον κίνδυνο της πυρκαγιάς με ανεξέλεγκτες εκπομπές των δυνητικά επιβλαβών ενώσεων. [18]

Η υψηλή θερμιδική αξία των ελαστικών (περίπου 31.400 kJ / kg) τα κάνει ένα αποτελεσματικό συμπληρωματικό καύσιμο για κλίβανους τσιμέντου. Το TDF υποκαθιστά άνθρακα και / ή άλλα καύσιμα στη κάμινο τσιμέντου στη διαδικασία θέρμανσης. Τα ελαστικά είναι κατασκευασμένα με πολύ συγκεκριμένες προδιαγραφές ποιότητας και έχουν χαμηλά επίπεδα υγρασίας. Ωστόσο, το TDF δεν μπορεί να υπερβαίνει το 30% των καυσίμων στο κλίβανο, αφού σε υψηλότερες περιεκτικότητες είναι δυνατόν να μεταβάλλει αρνητικά τη χημεία της διαδικασίας σκλήρυνσης του τσιμέντου, λόγω των μεγάλων ποσοτήτων ψευδαργύρου που περιέχονται [19]. Ογδόντα οκτώ τοις εκατό του ελαστικού αποτελείται από άνθρακα και οξυγόνο, το οποίο προκαλούν την ταχεία καύση του και σχετικά υψηλή θερμιδική αξία (όπως προαναφέρθηκε).

Όταν το TDF χρησιμοποιηθεί αντί του άνθρακα, σε κλίβανο μονάδας βιομηχανίας τσιμέντου είναι δυνατόν να μειωθεί η τροφοδοσία του άνθρακα κατά 1,25 τόνους για κάθε τόνο TDF χρησιμοποιείται [20,21].



Η προμήθεια του TDF στη βιομηχανία τσιμέντου χωρίζεται σε δύο γενικές κατηγορίες: σε ολόκληρα ελαστικά και σε υπό επεξεργασία ελαστικά. Τα βασικά πλεονεκτήματα για τη χρήση του ολόκληρων ελαστικών περιγράφεται ως εξής:

1. Το TDF μπορεί να ληφθεί ως μια θετική δαπάνη (για παράδειγμα στην Ελλάδα, εργοστάσια παραγωγής τσιμέντου μπορούν να λάβουν επιδότηση για την καύση των ελαστικών)
2. Η τροφοδοσία και το σύστημα ζύγισης τους είναι εξαιρετικά απλοποιημένα. Αρκούν να χρησιμοποιηθούν άγκιστρα για την ζύγιση και τη φόρτωση του υλικού
3. Η διαδικασία αγοράς έχει απλοποιηθεί σημαντικά, ολόκληρα ελαστικά μπορούν να παρθούν απευθείας από τα σημεία συλλογής τους.

Η κύρια διαφορά μεταξύ ολόκληρων ελαστικών και των επεξεργασμένων είναι η θερμιδική τους αξία. Η επεξεργασία του ελαστικού ώστε να απομακρυνθεί το περιεχόμενο σύρμα, ή κάποια άλλα σώματα από την κύρια μάζα τόσο μεγαλύτερη θερμιδική αξία προσδίδει στο εν δυνάμει καύσιμο υλικό. [2,5,6,11].

Οι υψηλές θερμοκρασίες-συνήθως γύρω στο 1430°C και μεγάλοι χρόνοι παραμονής είναι συνυφασμένες με τη λειτουργία των κλιβάνων τσιμέντου, παρέχοντας έτσι επαρκή διάθεση για την καύση των ελαστικών με παράλληλα περιορισμένες εκπομπές καυσαερίων. Τα στερεά συστατικά της τέφρας που προέρχονται από την καύση ελαστικών (όπως π.χ. ο χάλυβας) ενσωματώνονται στις φάσεις του κλίνκερ. Κανονικά σιδηρομετάλλευμα προστίθεται στην διαδικασία παραγωγής του κλίνκερ, οπότε η παρουσία εντός της κύριας μάζας του ελαστικού μεταλλικών συρμάτων δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ανεπιθύμητη. Επιπλέον άλλα σωματίδια που περιέχονται στη μάζα του ελαστικού (όπως π.χ. σφαιρίδια) περιέχουν ψευδάργυρο, περίπου 1,40%, και μπορούν να συμβάλουν αρνητικά στην ενυδάτωση και την σκλήρυνση του τσιμέντου [22,23,24]. Ένα άλλο ενδιαφέρον σημείο είναι ότι τα ελαστικά φαίνεται να έχουν χαμηλότερο ποσοστό του θείου από το κώκ. Το θείο στα ελαστικά αυτοκινήτων κυμαίνεται από 1,24% έως 1,30% κατά βάρος. Ο μέσος όρος κωκ που χρησιμοποιείται στην παραγωγή τσιμέντου περιέχει περίπου θείο 1,5% κατά βάρος. Στο σχήμα 4.2 φαίνεται σωρός ελαστικών αυτοκινήτου σε κατάσταση συλλογής πριν τη χρήση στη κάμινο.

Τα ελαστικά είναι υδρογονάνθρακας (πολυμερισμένο καουτσούκ) που προέρχεται από το πετρέλαιο. Η θερμογόνο δύναμη των ελαστικών είναι κατά 20-40% υψηλότερη από τον άνθρακα: 7800 - 8600 kcal/Kg για τα ελαστικά σε σύγκριση με 5550 - 7200 kcal/kg για τον άνθρακα. Τα ελαστικά έχουν συνήθως χαμηλότερη περιεκτικότητα σε υγρασία και (χωρίς να υπολογίζεται το μεταλλικό σύρμα που

περιέχεται), χαμηλότερη περιεκτικότητα σε τέφρα από τον άνθρακα, το οποίο σημαίνει μεγαλύτερη αποδοτικότητα χρήσης της θερμικής τους ενέργειας. Τα ελαστικά έχουν επίσης υψηλότερη αναλογία των πτητικών στον δεσμευμένο άνθρακα, το οποίο βελτιώνει την ικανότητά τους να καίγονται γρήγορα και πλήρως. Εγκαταστάσεις που μπορούν να χρησιμοποιήσουν TDF (Tire Derived Fuel) είναι τσιμεντοβιομηχανίες, βιομηχανικοί λέβητες παραγωγής χαρτοπολτού και χαρτοποιίες, ηλεκτροδότηση των επιχειρήσεων, εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας, καθώς και ειδικές εγκαταστάσεις καυσίμων. Τα ελαστικά μπορούν να καούν πλήρως σε τσιμεντοκλιβάνους με άμεσο αποτέλεσμα την μείωση του κόστους παραγωγής και την αύξηση της αποδοτικότητας. Επίσης μπορούν να τεμαχιστούν και να αναμειχθούν με άνθρακα ή με RDF η παραπροϊόντα ξυλείας όπως το πριονίδι. Υπάρχουν επίσης πολλά ελαστικά που περιέχουν χαλύβδινα δαχτυλίδια. Τα χαλύβδινα αυτά δαχτυλίδια κατά την καύση αφομοιώνονται στο τσιμέντο με πολύ θετικά αποτελέσματα. Οι τσιμεντοκαμίνοι είναι η πιο αποτελεσματική χρήση των ελαστικών. Χρησιμοποιώντας χρησιμοποιημένα ελαστικά ως καύσιμο μειώνουμε την χρήση συμβατικών καυσίμων χωρίς αύξηση των αέριων ρύπων από την έκλυση τους.

Η χημική σύσταση των ελαστικών πρέπει να εξεταστεί προκειμένου να εκτιμηθεί η επίπτωση της καύσης τους στις εκπομπές του αέρα. Τα ελαστικά έχουν λιγότερο θείο από πολλά είδη γαιανθράκων, το οποίο σημαίνει μικρότερη εκπομπή οξειδίων του θείου ( $SO_x$ ), βέβαια υπάρχουν και περιπτώσεις γαιανθράκων με μικρότερη περιεκτικότητα θείου από τα ελαστικά. Τα ελαστικά περιέχουν μικρότερη αναλογία C/H, θεωρητικά προκαλούν μείωση των εκπομπών αερίων διοξειδίου του άνθρακα ( $CO_2$ ). Επομένως η καύση παλαιών ελαστικών αντί λιθανθράκων θα μπορούσε να μειώσει το πρόβλημα των αερίων εκπομπών. Ομοία περιέχουν χαμηλότερη περιεκτικότητα σε άζωτο με άμεσο αποτέλεσμα τη μείωση των οξειδίων του αζώτου ( $NO_x$ ) [20]. Τα αποτελέσματα σε μεμονωμένες περιπτώσεις εξαρτώνται από τον ακριβή τύπο του καυσίμου που χρησιμοποιείται. Τα ελαστικά γενικά έχουν μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε χλώριο από πολλούς τύπους γαιανθράκων. Πλέον όμως πολλοί τύποι νεότερων ελαστικών όπως το χλωριωμένο βουτύλιο περιέχουν σημαντικά μικρότερη περιεκτικότητα σε χλώριο. Υψηλές εκπομπές χλωριόντων θα μπορούσε να είναι ένα πρόβλημα, επειδή σύμφωνα με τις προδιαγραφές εκπομπών της Ευρωπαϊκής ένωσης υπάρχουν όρια εκπομπών. Ο υδράργυρος εμφανίζεται σε υψηλότερη περιεκτικότητα σε ελαστικά σε σύγκριση με τον άνθρακα. Τα TDF έχουν υψηλότερα επίπεδα ψευδαργύρου από τον άνθρακα, διότι το οξύτιο του ψευδαργύρου προστίθεται στα ελαστικά κατά τη διαδικασία βουλκανισμού. Επειδή τα ελαστικά έχουν τα ίδια περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα σε

σύγκριση με τον άνθρακα, η οικονομική σκοπιμότητα της χρήσης ελαστικών εξαρτάται από τον αριθμό εφαρμογών.

Σε γενικές γραμμές υπάρχει πιθανότητα τα ελαστικά να εκπέμπουν περισσότερο S από τον άνθρακα. Εξαρτάται από την μορφή του άνθρακα που χρησιμοποιείται. Τα TDF μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμο σε ποσοστό 10-20%.

Τα δεδομένα από την χρήση ελαστικών στις κάμινους της τσιμεντοβιομηχανίας δείχνουν ότι ορισμένα μειώνουν την ατμοσφαιρική ρύπανση και άλλα την αυξάνουν. Οι εκπομπές ψευδαργύρου έχουν αναφερθεί ότι αυξάνονται όταν τα ελαστικά καίγονται. Ωστόσο το σύστημα ελέγχου των κλιβάνων είναι σε θέση να ελέγξει τον λόγο αύξησης του ψευδαργύρου. Η καύση των ελαστικών στο εσωτερικό του κλιβάνου μπορεί να προκαλέσει υψηλά επίπεδα εκπομπών μονοξειδίου του άνθρακα. Αντίθετα οι εκπομπές NO<sub>x</sub> μειώνονται με την εισαγωγή των ελαστικών στο εσωτερικό του κλιβάνου. Δεν μπορούμε όμως να αμελήσουμε τις εκπομπές των βαρέων μετάλλων όπως κάδμιο, ψευδάργυρος, υδράργυρος, μόλυβδος, αρσενικό, των PCBs, βενζολίου, πτητικών οργανικών ενώσεων, διοξίνων και των φουράνιων. Στον παρακάτω Πίνακα 4.5 παρουσιάζεται κάποια βασικά χαρακτηριστικά ως προς την καύση των ελαστικών

#### Πίνακας 4.5.

Βασικά χαρακτηριστικά καύσης των ελαστικών

Χαρακτηριστικές παράμετροι καύσης	Ελαστικά αυτοκινήτων	
Μέγιστη ωριαία κατανάλωση (t/h)	2,5	
Ωριαία κατανάλωση στον Π.Κ (t/h)	1,0-1,5	
Μέγιστη ποσότητα αναλίσκόμενων ελαστικών (τεμ/h)	313	
Διαστάσεις ελαστικών	Min	Max
Διάμετρος (mm)	300	1400
Πάχος (mm)	100	400
Βάρος (kg)	6	60



Σχήμα 4.2: Σωρός ελαστικών έτοιμα για καύση χωρίς προεπεξεργασία

### 4.3 Βιολογική λάσπη

Κατά την λειτουργία των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων παράγονται σημαντικές ποσότητες ιλύος (λάσπης), αλλά και άλλα παραπροϊόντα, όπως είναι τα εσχαρίσματα και η άμμος. Τα παραπροϊόντα αυτά διαθέτουν μεγάλο αριθμό πολύτιμων συστατικών, όπως θρεπτικά συστατικά και οργανική ύλη, που έχουν υψηλή θερμική αξία, με αποτέλεσμα να είναι κατάλληλα για ένα μεγάλο εύρος χρήσεων.

Τα προϊόντα αυτά όμως, είναι συγχρόνως και φορείς ανεπιθύμητων ρυπαντών, όπως είναι τα βαρέα μέταλλα, τα συνθετικά οργανικά και οι παθογόνοι μικροοργανισμοί, με αποτέλεσμα ο τρόπος τελικής τους διάθεσης να έχει σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως είναι οι εκπομπές στον αέρα, ο κίνδυνος για τη δημόσια υγεία και η πιθανότητα ρύπανσης εδαφικών και υδατικών πόρων. Συνεπώς η επεξεργασία και η διάθεση των παραπροϊόντων επεξεργασίας είναι μία σημαντική παράμετρος, που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τον σχεδιασμό των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων.

Ορισμένα συστατικά που περιέχονται στην ιλύ, όπως οργανικό φορτίο, άζωτο, φώσφορος, κάλιο και ασβέστιο, μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν, ενώ άλλα, όπως τα βαρέα μέταλλα και οι παθογόνοι μικροοργανισμοί είναι ρυπαντές, που απαιτούν προσεκτική διαχείριση για να εξασφαλίζεται η ασφαλής και περιβαλλοντικά αποδεκτή διάθεση στο περιβάλλον.

Ανάλογα με το στάδιο επεξεργασίας των λυμάτων διακρίνονται οι ακόλουθες κατηγορίες ιλύος:

1. Πρωτοβάθμια ιλύς: Ιλύς που παράγεται κατά την πρωτοβάθμια επεξεργασία των λυμάτων.

2. Βιολογική ιλύς: Ιλύς που παράγεται κατά την δευτεροβάθμια επεξεργασία των λυμάτων
3. Μικτή ιλύς: είναι μίγμα πρωτοβάθμιας και βιολογικής ιλύος
4. Τριτοβάθμια Ιλύς: Ιλύς που παράγεται κατά την τριτοβάθμια ή προωθημένη επεξεργασία των λυμάτων

Η ιλύς που παράγεται από τα Εργοστάσια Επεξεργασία Λυμάτων (ΕΕΛ) υπόκειται συνήθως σε πρόσθετη επεξεργασία, με στόχο τη μείωση της περιεκτικότητας νερού για την καλύτερη και οικονομικότερη διαχείρισή της, τη σταθεροποίηση του τελικού προϊόντος και την απομάκρυνση των παθογόνων μικροοργανισμών [25]. Αποτέλεσμα της επεξεργασίας είναι ο σχηματισμός pellets όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.3. Pellets βιολογικής ιλύος

#### Χαρακτηριστικά της ιλύος

Η σύσταση της ιλύος εξαρτάται από το ρυπαντικό φορτίο των προς επεξεργασία λυμάτων, από το είδος της επεξεργασίας των λυμάτων, καθώς επίσης και από την επεξεργασία της ιλύος.

Η ιλύς των λυμάτων περιέχει συστατικά με γεωργική αξία αλλά και ρυπαντές. Τα συστατικά με γεωργική αξία είναι οργανική ύλη, άζωτο, φώσφορος, κάλιο και σε μικρότερη κλίμακα ασβέστιο, θείο και μαγνήσιο. Οι ρυπαντές είναι τα βαρέα μέταλλα, οι οργανικοί ρυπαντές και τα παθογόνα.

Υπάρχουν τρεις κύριες πηγές **βαρέων μετάλλων** στην ιλύ των λυμάτων: τα αστικά λύματα, οι απορροές των δρόμων και τα βιομηχανικά απόβλητα. Η συγκέντρωση των βαρέων μετάλλων στην ιλύ ποικίλει και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την βιομηχανική συνιστώσα των ανεπεξεργαστων λυμάτων. Οι μέσες συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων στην ιλύ σε διάφορες χώρες της Ευρώπης, καθώς επίσης και οι

οριακές τιμές καθορίζονται με την Οδηγία 86/278/EC και την προβλεπόμενη αναθεώρησή της

Στην Οδηγία 86/278/EC δεν καθορίζονται οριακές τιμές όσον αφορά στους **οργανικούς ρυπαντές** της ιλύος που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί στην γεωργία. Ωστόσο σε αρκετές ευρωπαϊκές χώρες προβλέπονται στην νομοθεσία τους σχετικοί περιορισμοί. Επισημαίνεται ότι στο Σχέδιο Αναθεώρησης της Οδηγίας 86/278/EC προβλέπονται σχετικές οριακές τιμές. Βασική πηγή συνθετικών οργανικών ενώσεων στα λύματα αποτελεί η βιομηχανία. Γενικά, σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων χωρίς μεγάλη συνιστώσα των βιομηχανικών αποβλήτων δεν αναμένονται υπερβάσεις των παραπάνω οριακών τιμών



Σχήμα 4.4: Βιολογική λάσπη σε σωρούς

Σκοπός της καύσης της ιλύος είναι η ελάττωση του όγκου της, η μετατροπή της σε υλικά μη επιβλαβή για την υγεία του ανθρώπου και η κατά το δυνατόν εκμετάλλευση της ευρισκόμενης στην ιλύ ενέργειας ως θέρμανση, ατμό, ηλεκτρικό ρεύμα ή καύσιμο υλικό.

Τα κύρια πλεονεκτήματα της καύσης της ιλύος είναι η δραστική μείωση όγκου και βάρους της αφυδατωμένης ιλύος, η καταστροφή ή σταθεροποίηση των τοξικών ουσιών και η ανάκτηση ενέργειας από τη θερμότητα, ενώ τα κύρια μειονεκτήματα είναι οι υψηλές δαπάνες κατασκευής, οι μεγάλες λειτουργικές δαπάνες (καύσιμα) οι υψηλές απαιτήσεις συντήρησης και οι ενδεχόμενες αρνητικές επιδράσεις στο περιβάλλον.

Οι πρόσφατες τεχνολογικές βελτιώσεις, σε συνδυασμό με την αυστηρή Νομοθεσία (Οδηγία 2000/76/EC) δίνουν λύσεις για ασφαλή και αποτελεσματική λειτουργία των μονάδων καύσης, ωστόσο κάνουν τη μέθοδο αυτή ακόμη πιο δαπανηρή, τόσο στη κατασκευή όσο και στη λειτουργία.

Διακρίνονται οι παρακάτω κατηγορίες αποτέφρωσης της ιλύος:

- 1) Καύση ιλύος σε ειδικές εγκαταστάσεις αποτέφρωσης
- 2) Καύση της ιλύος μαζί με στερεά απόβλητα, κυρίως οικιακά απορρίμματα
- 3) Καύση της ιλύος σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις: Η ιλύς χρησιμοποιείται ως καύσιμο σε εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας ή άλλων προϊόντων, όπως είναι οι μονάδες παραγωγής τσιμέντου.

Η καύση της ιλύος είναι μία εναλλακτική λύση, που μπορεί να εξετάζεται σε μεγάλες ΕΕΛ και δεν έχει εφαρμογή σε μικρές και αποκεντρωμένες εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων.

#### **4.4 Refuse Derived Fuel (RDF)**

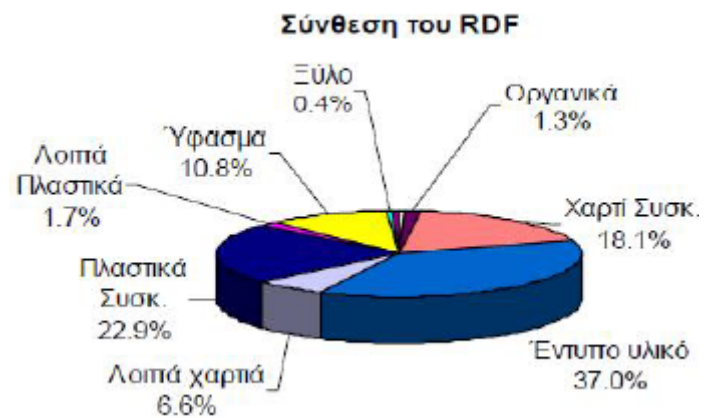
Ο όρος RDF ( Refuse Derived Fuel) μπορεί να ερμηνευτεί διαφορετικά σε κάθε χώρα και αυτό γιατί μπορεί να αντικατοπτρίζει τη χρήση του υλικού εναρμονισμένη με την εκάστοτε εθνική νομοθεσία. Παραδείγματος χάριν στις αγγλόφωνες χώρες, το RDF ορίζεται ως το κλάσμα των Αστικών Στερεών Αποβλήτων με υψηλή θερμογόνο δύναμη.

Για την παραγωγή του RDF εφαρμόζονται τεχνικές μηχανικής επεξεργασίας με τις οποίες διαχωρίζονται και αποτελούν ξεχωριστά ρεύματα τα μέταλλα και τα αδρανή υλικά (όπως το γυαλί), το οργανικό κλάσμα που υφίσταται στην συνέχεια βιολογική επεξεργασία και το κλάσμα υψηλής θερμογόνου δύναμης (RDF). Το τελευταίο καύσιμο υλικό αποτελείται από χαρτί, χαρτόνι, πλαστικά, ξύλο και ύφασμα, το οποίο ή παράγεται σε μορφή cRDF (coarse RDF) και αξιοποιείται κατευθείαν σε τοπική εγκατάσταση ή υφίσταται περαιτέρω ενεργοβόρα επεξεργασία που περιλαμβάνει ξήρανση και κοκκοποίηση προς παραγωγή υλικού σε μορφή dRDF (dry RDF) το οποίο μπορεί να συσκευαστεί και να αποθηκευτεί με σκοπό την μεταφορά σε απόμακρυσμένες μονάδες αξιοποίησης. Συγκεκριμένα το RDF αποτελείται κυρίως από μικρά τεμάχια χαρτιού (60-70%), πλαστικού (20-30%) και υφάσματος (5-10%) και λοιπά σε μικρότερη περιεκτικότητα. Η ποσότητα του παραγόμενου RDF ανά τόνο επεξεργαζόμενων Αστικών Στερεών Αποβλήτων εξαρτάται από τη συλλογή, την επεξεργασία και τις απαιτήσεις ποιότητας του τελικού προϊόντος. Με βάση τα μέχρι σήμερα δεδομένα, η ποσότητα αυτή ανέρχεται από 23-50% κ.β. των επεξεργαζόμενων ΑΣΑ. Στο Σχήμα 4.5 φαίνονται pellets RDF όπως αυτά

προκύπτουν από την αντίστοιχη επεξεργασία τους ενώ στο σχήμα 4.6 εμφανίζεται το ποσοστό συμμετοχής των υλικών που απαρτίζουν το RDF [26].



Σχήμα 4.5 : Pellets RDF



Σχήμα 4.6: Σύνθεση RDF



#### 4.4.1 Χρήσεις RDF

Το απορριμματογενές καύσιμο RDF αποτελεί ένα εναλλακτικό καύσιμο, αφού διαθέτει ορισμένα ελκυστικά χαρακτηριστικά όπως είναι η σχετικά υψηλή θερμογόνος του δύναμη και οι καλές φυσικές και χημικές του ιδιότητες που μπορούν να επιτρέψουν τον χειρισμό και την ενεργειακή του αξιοποίηση σε πλήθος εφαρμογών.

Οι εναλλακτικοί τρόποι που μπορεί να εκμεταλλευτεί το RDF, είναι οι εξής:

- Σε εγκαταστάσεις αποκλειστική αποτέφρωσης του RDF
- Χρήση ως καύσιμου υλικού στην τσιμεντοβιομηχανία
- Χρήση ως καύσιμου υλικού σε εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας

(συναποτέφρωση σε λέβητες καύσης λιγνίτη)

- Χρήση ως καύσιμου υλικού σε άλλες βιομηχανίες (χαρτοβιομηχανία, βιομηχανίες παραγωγής χημικών, φαρμακοβιομηχανία, μεταλλουργία κ.α)

Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι η ποιότητα και η θερμογόνος δύναμη του RDF είναι ιδιότητες με βαρύνουσα σημασία, και είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με την ποιότητα και ποσότητα των αέριων εκπομπών που παράγονται κατά την καύση του. Άλλες σημαντικές παράμετροι ποιότητας του καύσιμου υλικού εκτός της θερμογόνου δύναμης είναι η υγρασία, το περιεχόμενο τέφρας, το χλώριο και το θείο. Μια τυπική σύσταση του RDF παρουσιάζεται παρακάτω καθώς και άλλων καυσίμων προς σύγκριση.

**Πίνακας 4.6**

Περιεκτικότητες κατά βάρος και θερμογόνος δύναμη συμβατικών/εναλλακτικών

<b>Καύσιμο</b>	<b>C%</b>	<b>H%</b>	<b>N%</b>	<b>S%</b>	<b>Cl%</b>	<b>Θερμογόνος δύναμη MJ/kg</b>
Άνθρακας	60-80	3-5	1-2	1-5	0,01-0,1	26
Ξύλο	40-50	6	0,2	0,1	0,01	19
ΑΣΑ	25	3	0,5	0,2	0,5	10
RDF	45	5	0,5	0,2	0,5	15

#### **4.4.2 Χρήση RDF στην τσιμεντοβιομηχανία**

Η υποκατάσταση ορυκτών καυσίμων από εναλλακτικά καύσιμα για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της τσιμεντοβιομηχανίας (3000-5000 kJ/kg παραγόμενου κλίνκερ, είναι μια πρακτική που λαμβάνει χώρα όλο και περισσότερο σε πολλές ευρωπαϊκές χώρες και αλλού ανά τον κόσμο. Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι σύμφωνα με στοιχεία του 2007 για την τσιμεντοβιομηχανία, η Αυστρία παρουσιάζει βαθμό υποκατάστασης ορυκτών καυσίμων σε θερμιδική βάση 46% το Βέλγιο 55%, η Γαλλία 32%, η Ελβετία 48%, η Γερμανία 42%, η Τσεχία 45% και η Ουγγαρία 30%. Η συναποτέφρωση RDF μπορεί να πραγματοποιηθεί στις καμίνους που χρησιμοποιούνται στην τσιμεντοβιομηχανία, δεδομένων των ιδιοτήτων που παρουσιάζουν, όπως οι πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Οι υψηλές λοιπόν θερμοκρασίες (~1500°C) σε συνδυασμό με τον επαρκή χρόνο παραμονής σε αέρια φάση (4-5 sec), τον υψηλό βαθμό ανάμειξης των καυσίμων υλών μέσα στην κάμινο και την πλούσια σε οξυγόνο ατμόσφαιρα έχει ως αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την παραγωγή αέριων ρύπων.

#### **4.4.3 Η εκπομπή αέριων ρύπων από την κάυση του RDF στη τσιμεντοβιομηχανία**

Η παράγωγή αέριων ρύπων από την συναποτέφρωση του RDF στη τσιμεντοβιομηχανία αποτελεί ένα μείζον ζήτημα. Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι είναι αρκετά δύσκολο το να διακριθεί το ποια διεργασία, η παραγωγή του κλίνκερ ή η συναπο-τέφρωση του RDF, συμβάλλει περισσότερο στην παραγωγή αέριων ρύπων. Από την καύση RDF σε κλιβάνους τσιμεντοβιομηχανίας είναι δυνατόν να απελευθερωθούν στην ατμόσφαιρα ποικίλοι ρύποι, όπως αιωρούμενα σωματίδια, οξειδία του αζώτου, διοξείδιο του θείου, υδροχλώριο, υδροφθόριο, μονοξείδιο του άνθρακα, πτητικές οργανικές ενώσεις, βαρέα μέταλλα, μονοξείδιο και διοξείδιο του άνθρακα, κ.ά. Από τα ιχνοστοιχεία, τα *μη πτητικά μέταλλα* ενσωματώνονται στο κλίνκερ και η επιβάρυνση μεταφέρεται στα προϊόντα τσιμέντου. Τα ημι-πτητικά μέταλλα, όπως ο μόλυβδος και το κάδμιο, κατά ένα μέρος ενσωματώνονται στο κλίνκερ ενώ κατά το υπόλοιπο μέρος τους συμπυκνώνονται στα αιωρούμενα σωματίδια και δεσμεύονται στα φίλτρα του συστήματος αντιρρύπανσης. Από τα *πτητικά ιχνοστοιχεία*, ο υδράργυρος και το θάλλιο, κατά ένα μέρος συμπυκνώνονται στην επιφάνεια σωματιδίων και κατακρατούνται στα φίλτρα αντιρρύπανσης, αλλά κατά το μεγαλύτερο μέρος τους απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα σε αέρια φάση. Από τις *πτητικές οργανικές ενώσεις* που εκπέμπονται, το σημαντικότερο πρόβλημα συνιστούν οι διοξίνες οι οποίες είναι από τις πλέον επικίνδυνες ενώσεις και για τις

οποίες δεν έχουν προσδιοριστεί κατώτερα όρια, κάτω από τα οποία να διασφαλίζεται ότι δεν υπάρχουν αρνητικές συνέπειες. Με τον όρο διοξίνες (PCDD/Fs) αποδίδεται μια ομάδα συνολικά 210 διοξινών και φουρανίων, εκ των οποίων οι διοξίνες (75 ενώσεις) αποτελούν χλωριωμένα παράγωγα της διβενζο-π-διοξίνης (dibenzo-p-dioxin) και τα φουράνια (135 ενώσεις) χλωριωμένα παράγωγα του διβενζοφουρανίου (dibenzofuran). Από αυτές, υψηλή τοξικότητα παρουσιάζουν 17 ενώσεις (7 διοξίνες και 10 φουράνια), οι οποίες χαρακτηρίζονται από την παρουσία μορίων χλωρίου «στις θέσεις 2, 3, 7 και 8», ενώ τη μεγαλύτερη τοξικότητα παρουσιάζει η αποκαλούμενη διοξίνη Seveso (2, 3, 7, 8τετραχλωρο-διβενζο-π-διοξίνη) [27].

Η τοξικότητα ενός μίγματος διοξινών εκφράζεται με τον υπολογισμό της **συνολικής ισοδύναμης τοξικότητας (International Toxicity Equivalent, I-TEQ)**, η οποία προκύπτει από την άθροιση των δεικτών τοξικότητας των επί μέρους ενώσεων. Ο **δείκτης τοξικότητας** μιας ένωσης υπολογίζεται ως γινόμενο της μάζας της και του ατομικού συντελεστή ισοδύναμης τοξικότητας, η οποία προσδιορίζεται με βάση την πλέον τοξική διοξίνη (διοξίνη Seveso). Κατά την καύση RDF στην τσιμεντοβιομηχανία είναι δυνατόν να σχηματισθούν διοξίνες μέσω ετερογενών αντιδράσεων από πρόδρομες αλογονούχες ενώσεις, στην επιφάνεια σωματιδίων όπου έχουν προσροφηθεί, με την καταλυτική επίδραση βαρέων μετάλλων (π.χ. χαλκού) και στη θερμοκρασιακή περιοχή 450°C - 200°C. Οι πρόδρομες αλογονούχες ενώσεις είναι προϊόντα ατελούς καύσης οργανικών ενώσεων και ενώσεων χλωρίου και μέσω μιας πολύπλοκης σειράς αντιδράσεων που καταλύονται από βαρέα μέταλλα, καταλήγουν στο σχηματισμό διοξινών και άλλων χλωριωμένων ιχνοστοιχείων. Στους κλιβάνους της τσιμεντοβιομηχανίας οι συνθήκες καύσης είναι εν γένει σταθερές και οι θερμοκρασίες καύσης υψηλές και κατά συνέπεια η πιθανότητα να παραχθούν προϊόντα ατελούς καύσης είναι μικρή. Όμως ακόμα και στην περίπτωση τέλει καύσης στη κάμινο, οι διοξίνες είναι δυνατόν να σχηματιστούν στην περιοχή προθέρμανσης της πρώτης ύλης (κυκλώνες), ως προϊόντα ατελούς καύσης οργανικών ενώσεων που περιέχονται στις εναλλακτικές πρώτες ύλες και ενώσεων του χλωρίου οι οποίες ενδεχομένως περιέχονται στο RDF. Τα σημαντικότερα πρωτογενή μέτρα ελέγχου της παραγωγής διοξινών είναι η διατήρηση της θερμοκρασίας στα φίλτρα κατακράτησης σωματιδίων κάτω από 200°C και κύρια η ταχεία ψύξη των απαερίων στην κρίσιμη θερμοκρασιακή περιοχή (450°C – 200 °C). Ο χρόνος παραμονής των απαερίων στην περιοχή αυτή θα πρέπει απαραίτητα να είναι της τάξης των μερικών δευτερολέπτων. Στις εγκαταστάσεις τσιμεντοβιομηχανίας, λόγω των διατάξεων για την ανάκτηση θερμότητας, ο χρόνος παραμονής των απαερίων στο κρίσιμο διάστημα 450 °C – 200 °C είναι κατά κανόνα μεγαλύτερος της κρίσιμης τιμής (της τάξης των 5 sec) και εφόσον συνυπάρχουν οι

λοιποί απαραίτητοι παράγοντες – οργανικές ενώσεις, ενώσεις του χλωρίου και καταλύτες όπως ο χαλκός – είναι δυνατόν να σχηματιστούν διοξίνες χωρίς αυτό όμως να συνεπάγεται απαραίτητως την υπέρβαση των ορίων της νομοθεσίας. Στην περίπτωση που δεν τηρείται ο όρος της ταχείας ψύξης απαερίων και δεδομένης της πολυπλοκότητας του μηχανισμού σχηματισμού διοξινών, η απάντηση στο ερώτημα κατά πόσον τηρούνται τα όρια της νομοθεσίας μπορεί να δοθεί μόνο με την πραγματοποίηση συστηματικών μετρήσεων πεδίου και για αρκετά μεγάλο διάστημα στην ίδια την εγκατάσταση καύσης του RDF.

#### **4.5 Παραπροϊόντα βιομηχανιών. Αγροτικά Πλαστικά**

Είναι προφανές πως οι προδιαγραφές που έχουν παρουσιαστεί ως τώρα είναι γενικές επειδή περιλαμβάνουν όλα τα είδη των αποβλήτων που μπορούν να αποτελέσουν εναλλακτικό καύσιμο για την τσιμεντοβιομηχανία. Στην περίπτωση προδιαγραφών για τα αγροτικά πλαστικά απορρίμματα (APW) θα πρέπει να ληφθούν εξ αρχής υπόψη τα εγγενή τους χαρακτηριστικά, ώστε εάν είναι εφικτό οι προδιαγραφές να καταστούν απλούστερες στην χρήση τους. Για τον σκοπό αυτό δείγματα από αγροτικά πλαστικά απόβλητα που προέρχονται από θερμοκήπια, χαμηλά και μεσαία τούνελ, φύλλα εδαφοκάλυψης, φύλλα απολύμανσης εδάφους και ηλιοαπολύμανσης όπως επίσης και από σωλήνες άρδευσης συλλέχθηκαν από διάφορα μέρη της Ελλάδας και της Ευρώπης με σκοπό τον εργαστηριακό έλεγχο των ιδιοτήτων τους (Πίνακας 4.7). Στο σχήμα 4.7 παρουσιάζονται σωροί τέτοιων απορριμμάτων πριν την χρήση τους.



Σχήμα 4.7: Συλλογή APW πλαστικών

**Πίνακας 4.7**

Ανάλυση χρησιμοποιημένων APW ανά ποιότητα αποβλήτου

	Φύλλα χαμηλών τούνελ	Φύλλα θερμοκηπίου	Φύλλα εδαφοκάλυψης
Θ.Δ(MJ/kg)	42,08	42,73	33,29
Πτητικότητα wgt%	98	96	97
Τέφρα wgt%	2	0,45	3
Cl wgt%	0,24	0,011	0,026
S wgt%	-	-	0,01
Ti ppm	<5	<10	<10
Cr ppm	32	<5	<6
Ni ppm	<15	<5	<6
Mn ppm	80	<2	21
Cu ppm	<20	7	12
Zn ppm	34	57	15
Pb ppm	170	<10	<10
Cd ppm	<6	<7	<7
Hg ppb	7	23	21
V ppm	<150	-	-

Σε έρευνα που έγινε σε διάφορες χώρες τα αποτελέσματα δειγμάτων APW έδειξαν πως ικανοποιούν τις προδιαγραφές που έχουν αναφερθεί. Συγκεκριμένα:

- Όλα τα APW εμφάνισαν ΘΔ σημαντικά μεγαλύτερη των προδιαγραφών για τα εναλλακτικά καύσιμα, με τιμές μεγαλύτερες των 8000kcal/kg ακόμα και στους τύπους με υψηλή μόλυνση από χώμα. Γενικά η ΘΔ των APW θεωρείται μεγάλη αφού είναι παρόμοια του πετρελαίου και σχεδόν διπλάσια του άνθρακα που είναι από τα συνήθη συμβατικά καύσιμα
- Τόσο το χλώριο όσο και το θείο των APW βρέθηκε κάτω από τα αντίστοιχα όρια των εναλλακτικών καυσίμων. Αμφότερα στοιχεία προέρχονται από την χρήση αγροχημικών που απορροφούνται στη μάζα του πλαστικού και λιγότερο από το ίδιο το πλαστικό
- Τα APW- όπως όλα τα πλαστικά-διαθέτουν αρκετά πτητικά. Τα πτητικά αυτά είναι πιθανόν να προκαλέσουν προβλήματα στην τροφοδοσία του πλαστικού. (από πιθανό λιώσιμο κατά την επαφή με τον καυστήρα) και την αποσταθεροποίηση της φλόγας (που θα επηρεάσει την συντήρηση του κλιβάνου). Ατυχώς αυτό είναι εγγενές χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου υλικού.
- Τα βαρέα μέταλλα των δειγμάτων επίσης δεν δημιουργούν ανησυχία ως προς την ενδεχόμενη χρήση των APW. Αυτά μπορεί να είναι είτε εγγενή χαρακτηριστικά του πλαστικού είτε να οφείλονται σε μόλυνση κατά τη χρήση του.

Συμπερασματικά η μόλυνση των APW, όχι μόνο υποβαθμίζει των ΘΔ αυτών (λόγω υγρασίας και χώματος) αλλά επιπλέον μπορεί να ευθύνεται και για την σημαντική παρουσία βαρέων μετάλλων (προερχόμενων από χώμα). Στα πλαίσια του προγράμματος δεν αναπτύχθηκε ξεκάθαρη συσχέτιση μεταξύ χώματος και βαρέων μετάλλων, πιθανά λόγω διαφορετικής σύστασης του πρώτου ωστόσο να γίνεται εμφανές πως η βέλτιστη τακτική κατά την συλλογή και τον χειρισμό των APW θα πρέπει να αποσκοπεί στην απομάκρυνση του χώματος, αφού το τελευταίο μπορεί (εκτός από επιρροή των χαρακτηριστικών του καυσίμου) να προκαλέσει προβλήματα και σε μηχανικά μέρη της εγκατάστασης [28].

#### 4.6 Σύγκριση εναλλακτικών καυσίμων

Από στοιχεία που διατίθενται από την βιομηχανία σε άλλα Ευρωπαϊκά κράτη η αντικατάσταση των παραδοσιακών καυσίμων έχει ξεπεράσει το 50% και το κόστος του καυσίμου στην παραγωγή του κλίνκερ έχει μειωθεί και μάλιστα σε ορισμένες περιπτώσεις έχει γίνει και αρνητικό. Επίσης αξίζει να σημειωθεί ότι το ανταγωνιστικό πλεονέκτημα των βιομηχανιών αυτών αλλά και το κοινωνικό όφελος από την μείωση του μεγέθους του προβλήματος της διάθεσης των διαφόρων αποβλήτων και απορριμμάτων.

Είναι σαφές πως πρέπει να υπάρξει μια σοβαρή αντιμετώπιση του προβλήματος της διάθεσης των αποβλήτων και να δημιουργηθούν οι δομές αυτές που θα επιτρέψουν την συλλογή, προετοιμασία και διάθεση των εναλλακτικών καυσίμων που η τσιμεντοβιομηχανία έχει την δυνατότητα και διάθεση να χρησιμοποιήσει.

Η πιστή τήρηση των προδιαγραφών και κανόνων για την διαχείριση και καύση των εναλλακτικών καυσίμων είναι με την χρησιμοποιούμενη σήμερα τεχνολογία εφικτή από την πλευρά της βιομηχανίας και πλήρως ελέγξιμη από την πλευρά της Πολιτείας.

Τα οφέλη που προκύπτουν από την χρήση εναλλακτικών καυσίμων στην βιομηχανία είναι πολλαπλά:

- Γίνεται αντικατάσταση καυσίμων από μη ανανεώσιμες πηγές όπως του άνθρακα.
- Υπάρχει συμβολή σε μεγάλη έκταση στην οικολογικά αποδεκτή διάθεση των αποβλήτων
- Όχι μόνον δεν επιβαρύνεται η ατμόσφαιρα από επιπλέον εκπομπές (αέριες ή στερεές) αλλά υπάρχει και μείωση του συνολικά εκπεμπόμενου CO<sub>2</sub>, αν υποθέσουμε ότι τα υλικά που χρησιμοποιούνται σαν εναλλακτικά καύσιμα καταστραφούν σε εγκαταστάσεις αποτεφρωτών.
- Και τελικά βελτιώνεται το κόστος παραγωγής με επακόλουθο την βελτίωση της ανταγωνιστικότητας ενός βιομηχανικού κλάδου.

Όσον αφορά τα χρησιμοποιημένα ελαστικά μπορούμε να συμπεράνουμε ότι είναι μια καλή επιλογή η χρήση τους ως καύσιμο καθώς και η συλλογή τους αλλά και το κόστος τους είναι σχετικά χαμηλό. Βέβαια η χρήση τους θα πρέπει να γίνεται με κάποια ποσόστωση της τάξεως του 15%. Τα αγροτικά πλαστικά όπως και το RDF χρησιμοποιούνται επίσης και είναι μια καλή λύση από οικονομικής πλευράς, από τα δεδομένα χρήσης του RDF συμπεραίνουμε ότι το ποσοστό χρήσης του είναι της τάξεως του 7% και αυτό λόγω των περιβαλλοντολογικών επιπτώσεων που έχει η καύση του. Η βιολογική λάσπη χρησιμοποιείται σε μικρό ποσοστό λόγω της μικρής

θερμογόνου δυνάμεως που εκλύει κατά την καύση του. Στο Πίνακα 4.8 εμφανίζονται συγκριτικά δεδομένα χρήσης εναλλακτικών καυσίμων στην Ευρώπη.

**Πίνακας 4.8**

Δεδομένα χρήσης εναλλακτικών καυσίμων στην Ευρώπη

	RDF				Βιολογική λάσπη
	Από αστικά απορρίμματα		Από βιομηχανικά απορρίμματα		
	x1000 tpa	κλίβανοι	x1000 tpa	Κλίβανοι	x1000 tpa
Αυστρία			65	10	
Βέλγιο	15	1		9	15
Ιταλία	300	5		5	
Δανία	2,6	1	32	1	7,5
Ολλανδία	7	1	5	1	30
Γερμανία			485	31	
Ισπανία			17	11	
<b>Συνολικά</b>	<b>342,6</b>	<b>8</b>	<b>587</b>	<b>68</b>	<b>52,5</b>

Ο παρακάτω Πίνακας 4.9 συγκρίνει τα εναλλακτικά καύσιμα ως προς μια βασική ιδιότητα χρήσης τους που είναι η θερμογόνος δύναμη



#### Πίνακας 4.9

Σύγκριση θερμογόνου δυνάμεως σε εναλλακτικά καύσιμα

	Ελαστικά (MJ/kg)	Βιολογική λάσπη (MJ / kg)	RDF (MJ / kg)	APW (MJ/Kg)	Φλοιός ρυζιού
Θερμογόνος δύναμη	40,95-45,15	$8-17 \cdot 10^{-6}$	15	~42	14.26 MJ/kg

Παρατηρούμε την αρκετά χαμηλή θερμογόνο που εκλύει η βιολογική λάσπη σε σύγκριση κυρίως με τα APW και τα ελαστικά. Το RDF έχει και αυτό σημαντικά ποσά κατώτερα όμως των ανωτέρω.

Ως προς τις εκπομπές αέριων ρύπων μπορούμε να τονίσουμε ότι η καύση παλαιών ελαστικών εκπέμπει βαρέα μέταλλα όπως το κάδμιο, ψευδάργυρος, υδράργυρος, ο μόλυβδος και το αρσενικό, των PCBs βενζολίου, πτητικές οργανικές ενώσεις, διοξίνες και φουράνια τα οποία καθιστούν απαγορευμένη την χρήση σε αλόγιστες ποσότητες. Από την καύση RDF σε κλιβάνους τσιμεντοβιομηχανίας είναι δυνατόν να απελευθερωθούν στην ατμόσφαιρα ποικίλοι ρύποι, όπως αιωρούμενα σωματίδια, οξειδία του αζώτου, διοξείδιο του θείου, υδροχλώριο, υδροφθόριο, μονοξείδιο του άνθρακα, πτητικές οργανικές ενώσεις, βαρέα μέταλλα, μονοξείδιο και διοξείδιο του άνθρακα, κ.ά. Από τα ιχνοστοιχεία, τα μη πτητικά μέταλλα ενσωματώνονται στο κλίνκερ και η επιβάρυνση μεταφέρεται στα προϊόντα τσιμέντου. Η μη προεπεξεργασμένη χρήση των APW, όχι μόνο υποβαθμίζει την ΘΔ αυτών (λόγω υγρασίας και χώματος) αλλά επιπλέον μπορεί να ευθύνεται και για την σημαντική παρουσία βαρέων μετάλλων (προερχόμενων από χώμα). Επομένως τα APW μπορούν να παρουσιάσουν μεγάλη αποδοτικότητα ως καύσιμο στην βιομηχανία τσιμέντου μόνο όταν η χρήση τους γίνει με καθορισμό κριτηρίων διαλογής και επεξεργασίας πριν τη χρήση.

## 5. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ – ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

### 5.1 Οφέλη που προκύπτουν από την χρήση εναλλακτικών καυσίμων.

#### Εισαγωγικά στοιχεία

Υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα για τις μονάδες παραγωγής τσιμέντου ώστε να χρησιμοποιούν εναλλακτικά καύσιμα ως υποκατάστατο των παραδοσιακών καυσίμων. Τέσσερα αξιοσημείωτα οφέλη που δύναται να συμβούν ταυτόχρονα είναι [29]:

1. Συντήρηση των αποθεμάτων ορυκτών καυσίμων.
2. Μείωση του κόστους παραγωγής τσιμέντου.
3. Μείωση του όγκου των αποβλήτων που απορρίπτονται σε χώρους υγειονομικής ταφής και αποτέφρωσης.
4. Συμβολή στο περιορισμό του παγκόσμιου φαινομένου του θερμοκηπίου.

Τα παραδοσιακά καύσιμα που αναφέρονται κοινώς ως τα ορυκτά καύσιμα, τα αποθέματα τους είναι περιορισμένα και οι πηγές τους μη-ανανεώσιμες. Με τους σημερινούς ρυθμούς κατανάλωσης, η παγκόσμια μείωση του άνθρακα αναμένεται να εξαντλήσει τα αποθέματα μέσα στα επόμενα 120 χρόνια [30]. Αν και αυτά τα καύσιμα χρησιμοποιούνται και σε άλλες βιομηχανίες εκτός της τσιμεντοβιομηχανίας, μερική αντικατάστασή τους ή από κοινού επεξεργασία τους με διάφορους τύπους εναλλακτικών καυσίμων θα μπορούσε να μειώσει σημαντικά το αποτύπωμα της βιομηχανίας τσιμέντου στην κατανάλωση ορυκτών καυσίμων.

Τα απόβλητα είναι κατάλληλα για χρήση ως καύσιμο, εάν υπάρχει χημικό ενεργειακό περιεχόμενο. Αυτό το ενεργειακό περιεχόμενο εξαρτάται κατά κύριο λόγο από το μέγεθος του οργανικού κλάσματος καυσίμου και την περιεκτικότητα σε υγρασία. Για την καλύτερη χρησιμοποίηση της χημικής ενέργειας που περιέχεται στα απόβλητα, τα εναλλακτικά καύσιμα, τα οποία έχουν αναπτυχθεί είναι μείγματα διαφόρων αποβλήτων. Η έρευνα που διεξάγεται για πολλά χρόνια στα εργοστάσια τσιμέντου σε όλο τον κόσμο έχει δείξει με σαφήνεια τα πλεονεκτήματα της αξιοποίησης αποβλήτων, σε διαδικασίες παραγωγής τσιμέντου στις καμίνους. Οι καθοριστικοί παράγοντες της προώθησης της χρήσης στους τσιμεντοκλιβάνους για την αξιοποίηση

των αποβλήτων είναι [30]:

- η υψηλή θερμοκρασία αποτέφρωσης,
- το μεγάλο μέγεθος του φούρνου,
- το σημαντικό μήκος του κλιβάνου
- και το αλκαλικό περιβάλλον στο εσωτερικό του κλιβάνου.

Η χρήση των στερεών αποβλήτων ως συμπληρωματικό καύσιμο σε κλιβάνους τσιμέντου είναι μία από τις καλύτερες τεχνολογίες για την πλήρη και ασφαλή καταστροφή των αποβλήτων αυτών, λόγω της ταυτόχρονης καταστροφής των αποβλήτων αλλά και της παραγωγής ενέργειας. Παρ'όλα αυτά, κάποια απόβλητα, όπως αυτά που περιέχουν ένα σημαντικό ποσοστό Hg, θα πρέπει να αντιμετωπίζονται με προσοχή στη κάμινο. Τα κύρια οφέλη στη χρήση στερεών αποβλήτων σε κλιβάνους τσιμέντου περιλαμβάνουν [31]

- την ανάκτηση ενέργειας
- εξοικονόμηση των μη ανανεώσιμων καυσίμων
- μείωση της παραγωγής πρώτων υλών τσιμέντου

Η διαδικασία της καύσης κλίνκερ σε περιστροφικούς κλίβανους δημιουργεί ευνοϊκές συνθήκες για την χρήση των εναλλακτικών καυσίμων. Αυτές περιλαμβάνουν :

- υψηλή θερμοκρασία
- αλκαλικό περιβάλλον,
- οξειδωτική ατμόσφαιρα,

Οι υψηλά ανεπτυγμένες χώρες χρησιμοποιούν τεχνολογίες είτε χωρίς χρήση απορριμμάτων ή με περιορισμένη χρήση ενώ παράλληλα αναζητούν μεθόδους επεξεργασίας των αποβλήτων που θα είναι :

- φιλικές προς το περιβάλλον
- να αποσκοπούν στην ανάκτηση ενέργειας από τα απόβλητα.

Η βιομηχανία τσιμέντου συμμετέχει στις προσπάθειες για εξεύρεση λύσης στο πρόβλημα της διαχείρισης των αποβλήτων. Οι απαιτήσεις ενέργειας των διεργασιών παραγωγής τσιμέντου και η αύξηση των τιμών των καυσίμων, σε συνδυασμό με την έλλειψη ενεργειακών πόρων, οδήγησε τη βιομηχανία τσιμέντου στην αναζήτηση τεχνολογιών σχετικών με τα απόβλητα και τα εναλλακτικά καύσιμα [32].

Ο παγκόσμιος πληθυσμός της γης αυξάνεται συνεχώς, πράγμα που σημαίνει περισσότερους καταναλωτές να παράγουν περισσότερα απόβλητα. Δεδομένου ότι η συμφόρηση των χώρων υγειονομικής ταφής προκαλεί ανησυχία σε παγκόσμια κλίμακα, η αποτέφρωση έχει αποδειχθεί ως ένας προφανής τρόπος διάθεσης των αποβλήτων. Οι αποτεφρωτήρες συμβάλλουν σε περιβαλλοντικούς κινδύνους από την εκπομπή διοξινών, φουρανίων, καθώς και άλλων τοξικών ουσιών στην ατμόσφαιρα. Οι πρόσφατες τροποποιήσεις στις εγκαταστάσεις αποτέφρωσης έχουν μειωμένη παραγωγή των εκπομπών τους, αλλά όχι στο επίπεδο που οι κλίβανοι υψηλής θερμοκρασίας μπορούν να προσφέρουν [33]. Οι περισσότεροι αποτεφρωτήρες είναι επίσης ενεργειακά αναποτελεσματικοί, δεδομένου ότι δεν χρησιμοποιούν τη θερμότητα που παράγεται. Χρησιμοποιώντας τα απόβλητα, όπως

τα εναλλακτικά καύσιμα στην παραγωγή τσιμέντου δεν παρέχεται μόνο μια διαδικασία αποτέφρωσης τους, αλλά μειώνουν τις εκπομπές από τα ορυκτά καύσιμα που αντικαθιστούν.

Τα τελευταία έτη έγινε σαφές πως η τροποποίηση ενός κλιβάνου τσιμεντοβιομηχανίας για την αξιοποίηση των εναλλακτικών καυσίμων είναι οικονομικότερη από την κατασκευή και λειτουργία μίας μονάδας αποτέφρωσης των αντιστοίχων απορριμμάτων [34]. Στο πίνακα 5.1 παρουσιάζονται τα συγκριτικά πλεονεκτήματα της χρήσης του κλιβάνου τσιμεντοβιομηχανίας για την καύση εναλλακτικών καυσίμων ως προς τον αποτεφρωτή.

**Πίνακας 5.1**

Συγκριτικά πλεονεκτήματα χρήσης κλιβάνου τσιμεντοβιομηχανίας σε σχέση με αποτεφρωτή για την καύση εναλλακτικών καυσίμων

	<b>Κλιβανος Τσιμεντοβιομηχανίας</b>	<b>Αποτεφρωτής</b>
Θερμοκρασία υλικού	1500°C	900°C
Θερμοκρασία αερίων	2000°C	1200° C
Χρόνος παραμονής	10 sec σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από 300°C	< 2 sec
Δημιουργία όξινων αερίων (π.χ. SO <sub>2</sub> )	Δέσμευση λόγω αλκαλικότητας	Απαιτούνται πλυντρίδες για τη δέυσμευση
Διάθεση τέφρας	Δεν παράγεται τέφρα Δέσμευση βαρέων μετάλλων στο κλίνκερ σε μη υδατοδιαλυτή μορφή	Απαιτείται ειδική απόθεση σε ΧΥΤΑ

Ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες τα εργοστάσια παραγωγής τσιμέντου χρησιμοποιούν διάφορους τύπους εναλλακτικών καυσίμων, με τεχνολογίες καύσης που αποσκοπούν στην οικονομική χρήση του απορρίμματος.

Συνολικά θα μπορούσε κανείς να αναφερθεί στα εναλλακτικά καύσιμα και τα οφέλη που προκύπτουν από την εφαρμογή τους στην τσιμεντοβιομηχανία αν τα είδη αυτά καυσίμου πληρούν κυρίως τις βασικές προϋποθέσεις:

- Οι εκπομπές καυσαερίων που απελευθερώνονται από το εργοστάσιο τσιμέντου δεν πρέπει να αυξάνουν.
- Η ποιότητα του τσιμέντου και της συμβατότητάς του με το περιβάλλον δεν πρέπει να μειωθεί.
- Η χρήση των αποβλήτων ως εναλλακτικού καυσίμου δεν πρέπει να αυξήσει το κόστος, αντίθετα πρέπει να αποφέρουν κέρδη [35].

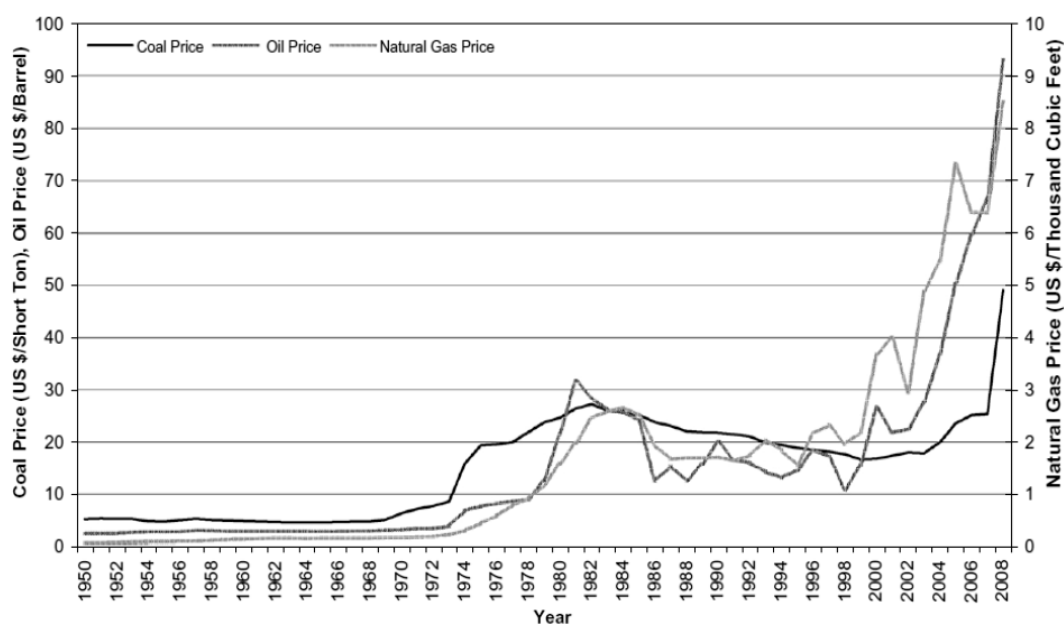
## 5.2 Κόστος

Από την εμπειρία που υπάρχει στα Ευρωπαϊκά κράτη που εδώ και δεκαετίες εφαρμόζουν τη χρήση των εναλλακτικών καυσίμων προκύπτει ότι το κόστος οικολογικά αποδεκτής διάθεσης αποβλήτων και απορριμμάτων με άλλους τρόπους, πέραν της χρήσης στην τσιμεντοβιομηχανία, είναι πιο υψηλό από τα τέλη που καταβάλλονται στην τσιμεντοβιομηχανία.

Ενώ στα εργοστάσια τσιμέντου δεν παράγονται απόβλητα, χρησιμοποιούν απόβλητα από άλλους κλάδους της βιομηχανίας ως πρόσθετα ή εναλλακτικά καύσιμα. Αυτό είναι εφικτό λόγω των τεχνολογικών συνθηκών, στους περιστροφικούς κλιβάνους [32].

Πολλά χρόνια εμπειρίας έχουν δείξει ότι η χρήση αποβλήτων ως εναλλακτικών καυσίμων από εργοστάσια παραγωγής τσιμέντου είναι τόσο οικολογικά όσο και οικονομικά δικαιολογημένη. Η χρήση εναλλακτικών καυσίμων θα συμβάλει στη μείωση του κόστους παραγωγής τσιμέντου. Η μέση ενεργειακή ζήτηση για την παραγωγή 1 τόνο τσιμέντου είναι περίπου 3.3. GJ, που αντιστοιχεί σε 120 kg του άνθρακα με θερμιδική αξία του 27.5 MJ ανά kg . Το κόστος της ενέργειας αντιπροσωπεύει 30-40% του συνολικού κόστους της παραγωγής τσιμέντου. Η υποκατάσταση των ορυκτών καυσίμων από εναλλακτικά καύσιμα θα συμβάλει στη μείωση του ενεργειακού κόστους. Αν και η χρήση εναλλακτικών καυσίμων στην ΕΕ των 27 κρατών μελών παρουσιάζει υψηλή διαφοροποίηση ανάλογα με τον χώρα, έχει επιτευχθεί συνεχής αύξηση από 3% το 1990 σε 17.9% το 2006 [36,37]. Κατά συνέπεια, αν η τρέχουσα τάση διατηρηθεί, η χρήση εναλλακτικών καυσίμων θα μπορούσε να φθάσει γύρω στο 50% μέχρι το 2030 Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Ένωση Τσιμέντου, CEMBUREAU, τα στοιχεία για το ποσοστό των εναλλακτικών καυσίμων που χρησιμοποιούνται σε κλιβάνους κλίνκερ μεταξύ 1990 και 1998 σε συγκεκριμένες χώρες είχαν ως εξής: Βέλγιο 18%, Γαλλία 52.4%, Ιταλία 4.1%, Πορτογαλία 1.3%, Ισπανία 1%, Σουηδία 2%, Ελβετία 25%, Τσεχία 9.7%, Μεγάλη Βρετανία 20%, Γερμανία 15%, Πολωνία 1.4%.

Παρά το γεγονός ότι ο άνθρακας είναι η πιο διαδεδομένη μορφή ορυκτού καυσίμου που χρησιμοποιείται στην παραγωγή τσιμέντου, το φυσικό αέριο και το πετρέλαιο θεωρούνται επίσης παραδοσιακά καύσιμα. Καθώς η παραγωγή απαιτεί αύξηση των ρυθμών της, αντίστοιχη αύξηση καταγράφεται και στις τιμές αυτών των καυσίμων. Στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζεται η ετήσια τάση στις τιμές των ορυκτών καυσίμων για τα έτη 1950 - 2008. Σύμφωνα με τον Schneider [38], 2.7 δισεκατομμύρια τόνοι τσιμέντου παράγονται παγκοσμίως το 2007, όμως μέσα σε δύο χρόνια από τότε, το κόστος παραγωγής τσιμέντου έχει σχεδόν διπλασιαστεί λόγω της αύξησης στο κόστος ενέργειας και ηλεκτρισμού. Αν και το κόστος των αποβλήτων ποικίλλει, η τιμή για κάθε μονάδα ενέργειας που απελευθερώνεται κατά τη καύση των αποβλήτων είναι πολύ χαμηλότερο από εκείνο των παραδοσιακών καυσίμων [29]. Η αύξηση της αντικατάστασης με εναλλακτικά καύσιμα μπορεί να μην είναι αρκετή για να αντισταθμίσει αυτή την τάση, αλλά σίγουρα συμβάλλει στη μείωση του κόστους παραγωγής.



Σχήμα 5.1: Ετήσια μεταβολή τιμών των παραδοσιακών συμβατικών καυσίμων (1950-2008)

Από την άλλη πλευρά θα πρέπει να σταθμίζονται και άλλοι παράγοντες σε σχέση με την εφαρμογή της χρήσης εναλλακτικών καυσίμων στη βιομηχανία τσιμέντου. Όπως αναφέρεται το κύριο κριτήριο σε μία τέτοια απόφαση είναι το οικονομικό όφελος

ύστερα από την στάθμιση των παραγόντων. Η επιλογή του είδους του εναλλακτικού καυσίμου σε μία βιομηχανική μονάδα τσιμέντου τις περισσότερες φορές διέπεται και από το είδος της διαθεσιμότητας των αποβλήτων στην αντίστοιχη περιοχή.

Τα περισσότερα απόβλητα απαιτούν κάποιο βαθμό επεξεργασίας ή και συσκευασίας πριν από την τροφοδοσία τους στο κλίβανο, όπως τεμαχισμό ώστε να αποκτήσει λειτουργικό μέγεθος, απομάκρυνση του μη χρήσιμου (βλαβερού) περιεχόμενου και ξήρανση σε μια βέλτιστη περιεκτικότητα σε υγρασία ώστε να αποδίδεται αύξηση της συνολικής παραγωγής ενέργειας κατά την καύση. Αυτό απαιτεί εγκατάσταση του αντίστοιχου μηχανολογικού εξοπλισμού που μπορεί ανάλογα με το απόβλητο να γίνει εξαιρετικά δαπανηρή. Ο βαθμός της προεπεξεργασίας εξαρτάται από το υλικό, και θα καθορίσει τελικά το ανώτατο ποσοστό αναπλήρωσης του καυσίμου. Επιπλέον, δεν υπάρχει τρόπος να γνωρίζει κανείς σαφώς τη διάρκεια της διαθεσιμότητας ορισμένων αποβλήτων. Εάν μια πηγή έχει εξαντληθεί ή δεν είναι διαθέσιμη, η ανάγκη για οποιαδήποτε ή για όλες τις μηχανολογικές συσκευές προεπεξεργασίας μπορεί να καταστεί άνευ αντικειμένου.

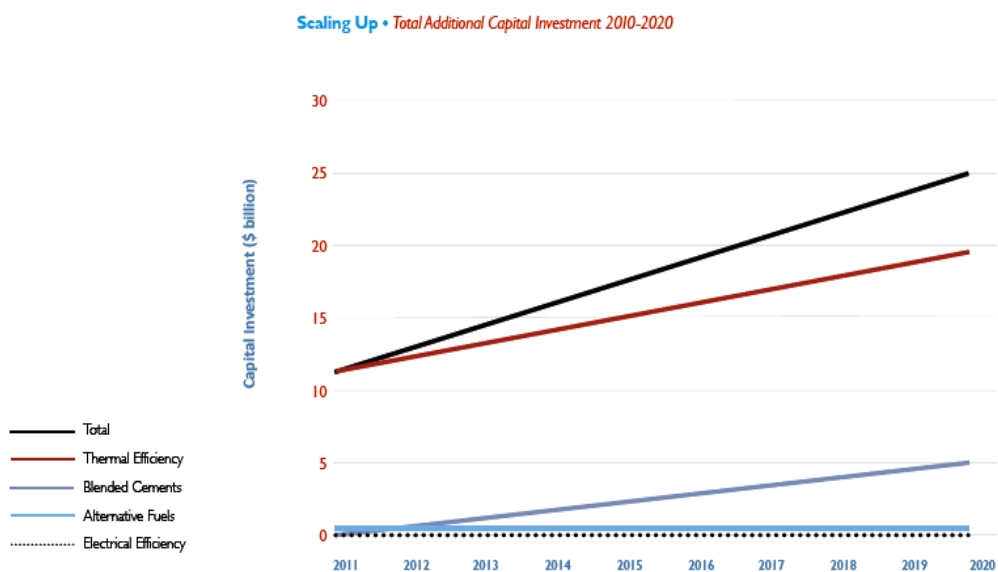
Επίσης συστήματα τροφοδοσίας και μέτρησης πρέπει να εγκατασταθούν για τη μεταφορά των καυσίμων στη κάμινο και για να παρακολουθούν την ποιότητα τους στην εισόδου αντίστοιχα. Σύμφωνα με τον Lechtenberg [39], ένας πλήθος αυτών των συστημάτων είναι διαθέσιμο στην αγορά με αντίστοιχο κόστος κεφαλαίου που κυμαίνεται από \$ 600.000 έως και πάνω από \$ 6.000.000 (USD) ανάλογα με την ικανότητα και την ακρίβεια τους. Ακριβής μέτρηση και σταθερή τροφοδοσία είναι ζωτικής σημασίας, αλλά είναι δύσκολο να διατηρηθεί, δεδομένου ότι ορισμένα μείγματα αποβλήτων είναι συχνά ογκώδη με πυκνότητα 200 kg/m<sup>3</sup> [40]. Ένα άλλο κόστος που συνδέεται με τον εν λόγω εξοπλισμό είναι το προσωπικό λειτουργίας. Κατάρτιση και παρακολούθηση είναι απαραίτητη για να εξασφαλιστεί η συνεχής μεταφορά και η ορθή λειτουργία του εξοπλισμού.

Ένα άλλο εν δυνάμει εμπόδιο στην αξιοποίηση εναλλακτικών καυσίμων είναι η χημική τους σύνθεση, η οποία μπορεί να επηρεάσει πολλά στάδια της βιομηχανικής μονάδας και κατ' επέκταση τα οικονομικά αποτελέσματα της επιχείρησης. Η παρουσία χλωρίου σε πολλά καύσιμα όταν αντιδρά με νάτριο και κάλιο σχηματίζει ενώσεις NaCl και KCl. Με την παρουσία περίσσειας χλωρίου, οι αντιδράσεις αυτές τείνουν να δημιουργήσουν μπλοκαρίσματα στους σωλήνες κυκλώνα που ενδεχόμενα να οδηγήσουν σε διακοπή λειτουργίας κλιβάνου [39]. Δεδομένου ότι τα ποσοστά παραγωγής αντανakλούν τα οικονομικά αποτελέσματα, κάθε διακοπή στη κάμινο είναι δαπανηρή.

Προκειμένου να επιτευχθεί μια ετήσια μείωση 900 εκατομμυρίων τόνων CO<sub>2</sub> που αντιπροσωπεύει 19% μείωση των εκπομπών, απαιτούνται 176 δισεκατομμύρια

δολάρια σε δαπάνες κεφαλαίου για πάνω από 10 χρόνια. Μακροχρόνιος στόχος λοιπόν είναι η επίτευξη μεγάλων θερμικών αποδόσεων και η υποκατάσταση των καυσίμων.

Η αναβάθμιση της προθέρμανσης εξοικονομεί μεταξύ 0,9 και 2,8 GJ / t κλινκερ και κοστίζει περίπου 91 εκατομμύρια δολάρια για ένα εργοστάσιο δυναμικότητας ενός εκατομμύριου μετρικών τόνων. Η μετάβαση από τον άνθρακα και κωκ σε εγκαταστάσεις φυσικού αερίου κοστίζει 6,5 εκατομμύρια δολάρια ανά 1000000 t δυναμικότητα. Στο σχήμα 5.2 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα μελέτης σχετικά με την αύξηση του κόστους επένδυσης για τα επόμενα χρόνια. Παρατηρείται πως το κόστος επένδυσης σε εναλλακτικά καύσιμα για την βελτίωση της παραγωγής είναι το μόνο που συγκριτικά παραμένει σταθερά χαμηλό σε σχέση με την επένδυση στα άλλα τμήματα της παραγωγής για τα επόμενα χρόνια [41].



Σχήμα 5.2: Ανάλυση του κόστους επένδυσης [41].

### 5.3 Ενέργεια

Η παραγωγή τσιμέντου είναι σημαντικά ενεργοβόρος. Ανά τόνο τσιμέντου καταναλίσκονται 3-3,5 GJ θερμικής ενέργειας και 100-120 KWH ηλεκτρικής



ενέργειας. Την τελευταία εικοσαετία η ενεργειακή απόδοση της ευρωπαϊκής τσιμεντοβιομηχανίας βελτιώθηκε κατά 30% και, σύμφωνα με μελέτη της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, τα περιθώρια για περαιτέρω βελτίωση είναι πολύ περιορισμένα. Για την ετήσια παραγωγή τσιμέντου στην Ε.Ε. απαιτούνται σήμερα 850.000.000 GJ θερμικής ενέργειας και 30.000.000 MWH ηλεκτρικής ενέργειας [30].

Από την εποχή των πετρελαϊκών κρίσεων η ευρωπαϊκή ένωση στράφηκε εξ ολοκλήρου στη χρήση στερεών καυσίμων (άνθρακα, πετρελαϊκού κωκ και αργότερα εναλλακτικών καυσίμων). Η χρήση υγρών και αερίων καυσίμων είναι κοστολογικά απαγορευτική για την τσιμεντοβιομηχανία. Η χρήση, όμως, εναλλακτικών καυσίμων ή, καλύτερα διατυπωμένα, η θερμιδική αξιοποίηση αποβλήτων, είναι όχι μόνον εφικτή, αλλά και πολλαπλά ωφέλιμη:

- Μειώνει το ενεργειακό κόστος, βελτιώνοντας την ανταγωνιστικότητα της τσιμεντοβιομηχανίας. Σήμερα, κατά μέσον όρο, τα εναλλακτικά καύσιμα καλύπτουν το 18% των αναγκών σε θερμική ενέργεια.
- Συμβάλλει στην εξοικονόμηση φυσικών πόρων. Περί τα 5 εκ. τόνοι ετησίως άνθρακα εξοικονομούνται από την χρήση εναλλακτικών καυσίμων στην τσιμεντοβιομηχανία.

Η χρήση εναλλακτικών καυσίμων από την τσιμεντοβιομηχανία καλύπτεται πλήρως από Κοινοτική Οδηγία και σε πολλές χώρες εντάσσεται στην διαδικασία διαχείρισης αποβλήτων.

Η απελευθέρωση της αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας έχει δώσει θεωρητικά και στην τσιμεντοβιομηχανία την δυνατότητα επιλογής του προμηθευτή που προσφέρει τους ευνοϊκότερους εκάστοτε όρους. Ίσως η κεντρική και βόρεια Ευρώπη να γεύεται τα οφέλη της απελευθέρωσης, αφού στα δίκτυα μεταφοράς έχουν πρόσβαση πλείονες πάροχοι. Η ακριτική θέση της χώρας μας την κρατά πρακτικά απομονωμένη από τα ευρωπαϊκά δίκτυα. Η ιδιωτικά παραγόμενη ενέργεια είναι ανεπαρκής για να ανατρέψει τις μονοπωλιακές συνθήκες της αγοράς. Κατά τις θερμές ημέρες του καλοκαιριού ζητείται από την τσιμεντοβιομηχανία να διακόψει την λειτουργία μηχανημάτων, με ανάλογη απώλεια παραγωγής, για να αντιμετωπιστεί η ανεπάρκεια της διατιθέμενης ενέργειας. Όμως, αντί να πληρώνει η τσιμεντοβιομηχανία για τις καθυστερήσεις στην υλοποίηση ή την απουσία του αναγκαίου ενεργειακού προγράμματος, θα μπορούσε, υπό προϋποθέσεις, να βοηθήσει αποτελεσματικά και συστηματικά στον μετριασμό του προβλήματος. Για παράδειγμα, η μετακίνηση σοβαρής ζήτησης από τις ώρες αιχμής σε ώρες χαμηλής ζήτησης, σε μόνιμη βάση, μπορεί να γίνει από την ελληνική τσιμεντοβιομηχανία με αύξηση των εγκαταστάσεων άλεσης τσιμέντου, ώστε η διεργασία αυτή να πραγματοποιείται εξ ολοκλήρου εκτός ωρών αιχμής.

Ακόμα, θα μπορούσε να γίνει εκμετάλλευση του σοβαρού θερμικού φορτίου των απαερίων, που εκπέμπει στην ατμόσφαιρα ένα εργοστάσιο τσιμέντου. Σήμερα η τεχνολογία προσφέρει την δυνατότητα μετατροπής του μεγαλύτερου μέρους αυτού του φορτίου σε ηλεκτρική ενέργεια, που μπορεί να καλύπτει μέχρι και το 25% των αναγκών του εργοστασίου. Πρόκειται στην ουσία για παραγωγή «πράσινης ενέργειας».

Συγκριτικές μελέτες που έγιναν στα πλαίσια μεγάλης κλίμακας δοκιμών [42] έδειξαν ότι, τα εναλλακτικά καύσιμα φαίνεται στις περισσότερες περιπτώσεις να περιέχουν λιγότερη ενέργεια ανά κιλό για την καύση σε σχέση με τα συμβατικά. Το εύρος των τιμών ενέργειας για κάθε ένα από τα καύσιμα που μελετήθηκαν ήταν ως εξής:

1. Κωκ: 24962 με 26754 με μέσο όρο 25986 kJ/kg
2. Πετρωκ: 27180 με 32003, με μέσο όρο 30732 kJ/kg
3. Απορρίμματα ελαστικών: 31896 με 33827, με μέσο όρο 32873 kJ/kg
4. Απορρίμματα πλαστικών: 15936 με 22171, με μέσο όρο 20287 kJ/kg
5. Δασικά απορρίμματα ξυλείας: 8121 με 11537, με μέσο όρο 9631 kJ/kg
6. Σιδηροδρομικά απορρίμματα: 13123 με 15759, με μέσο όρο 14284 kJ/kg
7. Υγρή γλυκερίνη : 10020 με 38815, με μέσο όρο 17983 kJ/kg

Αν και η υγρή γλυκερίνη θεωρείται ότι έχει την υψηλότερη περιεκτικότητα σε ενέργεια, η μέση τιμή της ενέργειας της ως καύσιμο ήταν μόνο 17983 kJ/kg. Ο κύριος λόγος για το χαμηλό ενεργειακό περιεχόμενο των σιδηροδρομικών απορριμμάτων και των απορριμμάτων δασικής ξυλείας είναι η υψηλή περιεκτικότητά τους σε υγρασία. Επίσης στην ίδια μελέτη αναφέρεται ότι οι ιδιότητες της καύσης των εναλλακτικών καυσίμων ήταν ιδιαίτερα μεταβλητές. Αυτό ενδεχόμενα θα μπορούσε να παρουσιάσει προβλήματα στη διατήρηση σταθερών συνθηκών παραγωγής στο κλίβανο.

Παρά τη χαμηλή θερμαντική αξία του κάθε εναλλακτικού καυσίμου, είναι απαραίτητο να συνεκτιμηθούν πρόσθετες ιδιότητες του καυσίμου για να αξιολογηθεί η σκοπιμότητα της χρήσης του. Παραδείγματος χάριν, εάν η τιμή μονάδας του συμβατικού καυσίμου που είναι διπλάσια από αυτή ενός εναλλακτικού καυσίμου, και η ίδια αναλογία υπέρ του συμβατικού ισχύει ως προς την ενεργειακή μονάδα, τα δύο αυτά καύσιμα θα είναι ίσου κόστους όσον αφορά την ενέργεια.

#### **5.4 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις – περιβαλλοντικά οφέλη**

Κατά τη διάρκεια της παραγωγής τσιμέντου, οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) οφείλονται κυρίως σε δύο πηγές: α) Από την καύση του άνθρακα που περιέχεται στα καύσιμα και β) από την πύρωση των ασβεστολιθικών ενέσεων και την

απομάκρυνση του άνθρακα από αυτές. Λαμβάνοντας αυτά υπόψη η βιομηχανία τσιμέντου χαρακτηρίζεται διεθνώς ως ένας σημαντικός παράγοντας που συνεισφέρει στις εκπομπές του CO<sub>2</sub>, επηρεάζοντας στην συντήρηση του φαινομένου του θερμοκηπίου [34]. Η ποσότητα CO<sub>2</sub> που εκπέμπεται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας παραγωγής κλίνκερ εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το καύσιμο που χρησιμοποιείται. Σύμφωνα με τους Worrell et al. [34], με τη χρήση καυσίμων αποβλήτων ως υποκατάστατο των ορυκτών καυσίμων, οι εκπομπές CO<sub>2</sub> μπορούν να μειωθούν κατά 0,1 σε 0,5 kg ανά kg τσιμέντου που παράγεται.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η Ιαπωνία που παράγει περίπου 480 εκατομμύρια τόνους απορριμμάτων κάθε χρόνο. Τα 400 εκατομμύρια τόνοι είναι τα βιομηχανικά απόβλητα, και το υπόλοιπο αφορά απόβλητα προέλευσης από τους καταναλωτές [43]. Με τη χρησιμοποίηση 25 εκατομμυρίων τόνων ετησίως, ως εναλλακτικά καύσιμα και πρώτες ύλες, η βιομηχανία τσιμέντου της Ιαπωνίας έχει δει μια μείωση 14% των εκπομπών CO<sub>2</sub>. Ο Taniguchi [43] αναφέρει επίσης ότι για κάθε τόνο τσιμέντου που παράγεται ισοδυναμεί με πάνω από 188 κιλά αποβλήτων που εκτρέπονται από τους χώρους υγειονομικής ταφής.

Ο Πίνακας 5.2 παρουσιάζει το ποσοστό χρήσης των καυσίμων σε συνάρτηση με την ποσότητα ακαθάριστων εκπομπών CO<sub>2</sub> ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας. Παρατηρήστε ότι το 78% της θερμότητας που χρησιμοποιούνται για την τσιμεντοβιομηχανία προέρχεται από οπτάνθρακα πετρελαίου και άνθρακα με τις αντίστοιχες υψηλές εκπομπές CO<sub>2</sub>. Παρ'όλα αυτά, το φυσικό αέριο με 42% περίπου λιγότερες εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας, έχει την μικρότερη εφαρμογή στην βιομηχανία τσιμέντου.

## Πίνακας 5.2

Η % κατανάλωση καυσίμου στη βιομηχανία τσιμέντου της ΕΕ των 27 κρατών μελών το 2006 σε συνάρτηση με την ποσότητα εκπομπών CO<sub>2</sub> ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας GJ

Καύσιμο	% χρήση (έτος 2006)	Ktonne CO <sub>2</sub> /Gj
Pet κωκ	38,6	97,5
Κωκ	39,4	94,6
Έλαια	3,2	77,4
Φυσικό αέριο	1	56,1
Εναλλακτικά	17,9	100

Η διαφορά της διαδικασίας παραγωγής τσιμέντου από άλλες βιομηχανικές διεργασίες είναι ότι η βασική επίπτωση είναι αέριες εκπομπές και ιδίως σκόνη, και όχι υγρά ή στερεά απόβλητα, τα οποία δεν προκύπτουν από τη διαδικασία. Λόγω της καύσης απελευθερώνονται οξειδία του αζώτου, όπως και σε κάθε βιομηχανική διεργασία καύσης. Ανάλογα με τη σύνθεση των πρώτων υλών, μπορεί επίσης να απελευθερωθεί διοξείδιο του θείου (SO<sub>2</sub>). Οι εκπομπές αυτές είναι γενικά χαμηλές σε σχέση με άλλες βιομηχανίες, καθώς το οξειδία του θείου παγιδεύονται κατά τη διεργασία σχηματισμού του κλίνκερ.

Ένας από τους μείζονες κινδύνους στη χρήση εναλλακτικών καυσίμων στην τσιμεντοβιομηχανία είναι τα βαρέα μέταλλα που εκπέμπονται κατά την καύση. Δεν είναι όλα τα βαρέα μέταλλα τοξικά και δεν έχουν την ίδια τοξικότητα όλα τα τοξικά βαρέα μέταλλα. Ως εκ τούτου σε πολλές χώρες υπάρχει διάκριση μεταξύ των κατηγοριών τοξικότητας:

- κατηγορία I: Cd, Hg, Tl
- κατηγορία II: Co, Ni, Se, Te
- κατηγορία III: Pb, Cr, Cu, Pt, V, Sn, Pd, Sb, Mn, Rh.

Τα βαρέα μέταλλα της κατηγορίας I είναι τα πιο τοξικά από τις υπόλοιπες τρεις κατηγορίες, ενώ της κατηγορίας III είναι τα λιγότερο τοξικά. Οι κύριοι λόγοι εκπομπών στον τσιμεντοκλίβανο είναι είτε οι διαδικασίες σχηματισμού του τσιμέντου από τις πρώτες ύλες είτε η καύση καυσίμων που περιέχουν βαρέα μέταλλα. Σύμφωνα με τα δεδομένα που μπορούμε να εξάγουμε για την συμπεριφορά των βαρέων μετάλλων κατά την καύση μπορούμε να διακρίνουμε τρεις κατηγορίες:

- Τα βαρέα μέταλλα χαμηλής πτητικότητας όπως Na, Co, Cr, Cu, Mn, Mo, Sb, Se, Te, V και Zn τα οποία ενσωματώνονται στο κλίνκερ σχεδόν 100%, και ως εκ τούτου δεν εμφανίζονται εκπομπές.
- Τα ημι-πτητικά βαρέα μέταλλα όπως Tl, Pb και Cd, τα οποία ένα μεγάλο μέρος τους ενσωματώνεται στο κλίνκερ. Το υπόλοιπο μέρος που δεν έχει ενσωματωθεί στο κλίνκερ, αναμένεται να εκπεμφθεί εξ ολοκλήρου.
- Τα πτητικά βαρέα μέταλλα δεν μπορούν να ελεγχθούν αποτελεσματικά από τα συστήματα αποκονίωσης, έτσι ένα μέρος των πτητικών μετάλλων παραμένει ασταθής και δεν συνδέεται με τα σωματίδια σκόνης. Το σημαντικότερο και μοναδικό παράδειγμα που παρουσιάζει ενδιαφέρον για την τσιμεντοβιομηχανία είναι ο υδράργυρος (Hg).

Η χρήση των εναλλακτικών καυσίμων σε κλιβάνους τσιμέντου υπαγορεύεται επίσης από τον ευρέως κατανοητό όρο της προστασίας του περιβάλλοντος. Το περιβαλλοντικό όφελος προσδιορίζεται αφενός μεν από την εξοικονόμηση των πρωτογενών πηγών ενέργειας και αφετέρου από το περιορισμό της απόρριψης των αποβλήτων στους αντίστοιχους χώρους διάθεσης ή σε εγκαταστάσεις αποτέφρωσης. Η εφαρμογή των εναλλακτικών καυσίμων σε μία βιομηχανική μονάδα μπορεί να επιτρέψει την μείωση της ποσότητας των αποβλήτων προς διάθεση έως και κατά 50%. Οι δύο μονάδες αποτέφρωσης και οι χώροι διάθεσης των αποβλήτων μπορεί να έχουν σημαντικές αρνητικές επιπτώσεις σχετικά με τις συνιστώσες του περιβάλλοντος. Επίσης είναι γνωστό ότι η άντληση των πρωτογενών πηγών ενέργειας επηρεάζει επίσης αρνητικά το περιβάλλον.

Οι συνθήκες στις περιστροφικές καμίνους, όπως η υψηλή θερμοκρασία, η μεγάλη ταχύτητα του ρεύματος του αερίου και η μακρά περίοδος αποθήκευσης των σωματιδίων, εγγυάται ότι η χρήση των εναλλακτικών καυσίμων είναι οικολογικά ασφαλής.

Οι συνθήκες αποτέφρωσης σε κλιβάνους παραγωγής τσιμέντου είναι ιδανικές για την καύση των εναλλακτικών καυσίμων από απόβλητα. Συγκεκριμένα οι θερμοκρασίες στους κλιβάνους ανέρχονται στους 1427°C στη ζώνη του υλικού και στους 1627 – 1827°C στη ζώνη της φλόγας. Οι θερμοκρασίες αυτές είναι σημαντικά υψηλότερες από αυτές που απαιτούνται για την καύση του μεγάλου μοριακού βάρους υδρογονανθράκων, την αποχλωρίωση των διοξινών και των φουρανίων που περιέχονται στα εναλλακτικά καύσιμα.

Οι κλίβανοι παραγωγής τσιμέντου βρίσκονται σε συνεχή λειτουργία, αυτό εξασφαλίζει μόνιμες συνθήκες στην αποσύνθεση των υλικών και των καυσίμων που περιέχονται στη κάμινο. Η υψηλή θερμοχωρητικότητα του φούρνου εξασφαλίζει την πλήρη καύση

των καυσίμων ακόμα και στην περίπτωση διακοπής της λειτουργίας του φούρνου, αφού για αρκετά λεπτά η θερμοκρασία συντηρείται πολύ υψηλή.

Η χρήση εναλλακτικών καυσίμων στην τσιμεντοβιομηχανία παρουσιάζει πολυάριθμα περιβαλλοντικά οφέλη, όπως [30]:

- 1)μειώνει τη χρήση των μη ανανεώσιμων ορυκτών καυσίμων όπως ο άνθρακας,
- 2)συμβάλλει στην ελαχιστοποίηση των εκπομπών,
- 3)μεγιστοποιεί την ανάκτηση ενέργειας από απόβλητα,
- 4)μεγιστοποιεί την ανάκτηση του μη εύφλεκτο μέρος του

Η καύση αποβλήτων καταργεί την ανάγκη για τη διάθεση της σκωρίας ή τέφρας (όπως τα ανόργανα υποκατάστατα μέρος πρώτων υλών του τσιμέντου). Τα οργανικά συστατικά από τα πιο κοινά εναλλακτικά καύσιμα καταστρέφονται ολοσχερώς μέσω της πυρόλυσης λόγω των υψηλών θερμοκρασιών (> 1450°C), λόγω μεγάλου χρονικού διαστήματος παραμονής και τέλος λόγω οξειδωτικών συνθήκων στη κάμινο του τσιμέντου. Τα ανόργανα συστατικά συνδυάζονται με τις πρώτες ύλες στη κάμινο και ενσωματώνονται στο τσιμέντο.

Η παραγωγή ενός τόνου τσιμέντου δημιουργεί εκπομπές περίπου 820 kg CO<sub>2</sub>. Αναλυτικά παρουσιάζεται η παραγωγή εκπομπών CO<sub>2</sub> για κάθε φάση παραγωγής στο Πίνακα 5.3. Η παραγωγή 3 δισεκατομμυρίων τόνων τσιμέντου το 2009 υπολογίζεται ότι παρήγαγε το 5% των συνολικών εκπομπών CO<sub>2</sub> από ανθρωπογενείς παράγοντες [41].

**Πίνακας 5.3**

Παραγωγή εκπομπών CO<sub>2</sub> ανά φάση παραγωγής

Φάση Παραγωγής	Kg CO <sub>2</sub> /t clinker	Kg CO <sub>2</sub> / t cement
Ασβεστοποίηση	510	403
Καύση	353	318
Λοιπές (χρήση ηλεκτρικής ενέργειας)	-	100
Σύνολο	-	<b>820</b>

Η παραγωγή κλίνκερ είναι εξαιρετικά ενεργοβόρα, χρειάζεται περίπου 3,9 gigajoules για κάθε μετρικό τόνο κλίνκερ. Τα πλέον συνηθισμένα καύσιμα στην παραγωγή τσιμέντου είναι ο λιθάνθρακας και το κωκ, από τα οποία προέρχεται και το 90% της απαιτούμενης ενέργειας (Πίνακας 5.4).

Ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται αρχικά στην άλεση των συστατικών σε περιστροφική κάμινο και στο τέλος της παραγωγικής διαδικασίας του τσιμέντου. Η παραγωγή εκπομπών CO<sub>2</sub> στα στάδια της παραγωγικής διαδικασίας αντιστοιχεί στο 79% για το κλίνκερ και μόλις 21 % για τα υπόλοιπα στάδια.

#### Πίνακας 5.4

Εκλύσεις CO<sub>2</sub> από την χρήση καυσίμων

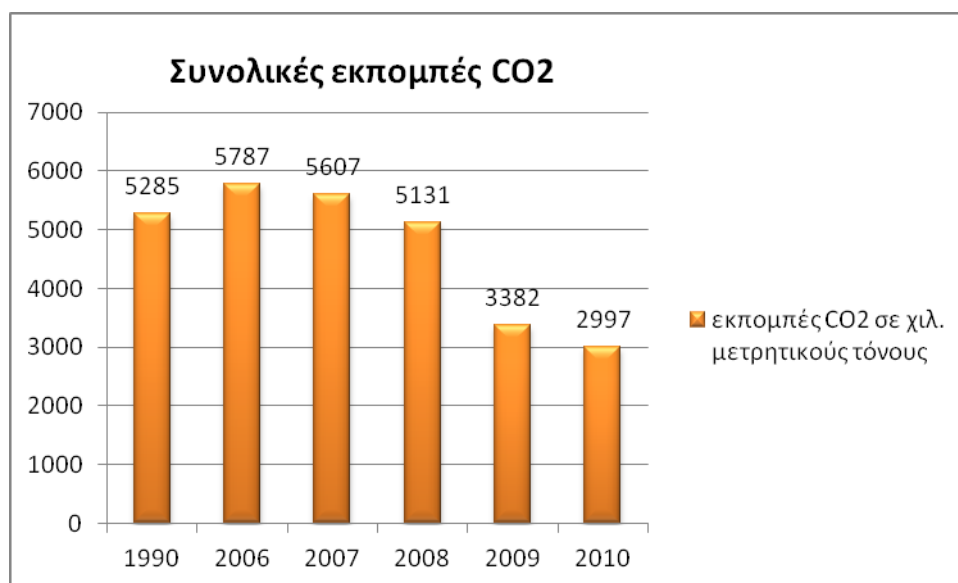
Πηγή ενέργειας	Ενέργεια που προέρχεται	kg CO <sub>2</sub> /t κλίνκερ
Άνθρακας	45%	374.4
Petcoke	45%	393.9
Φυσικό αέριο	5%	211.38
Ορυκτά Καύσιμα	3%	273
Οργανικά καύσιμα	2%	-

Η διαδικασία καύσης των αποβλήτων που υποκαθιστούσε τα συμβατικά καύσιμα, ξεκίνησε με τη χρήση των χρησιμοποιημένων ορυκτελαίων και ελαστικών. Κατά τα τελευταία 20 χρόνια, η χρήση εναλλακτικών καυσίμων στο τσιμέντο συνεχώς αυξάνεται.

Χημικές ουσίες που εκπέμπονται κατά την καύση στο περιβάλλον θα μπορούσαν να διαβιβάζονται άμεσα στον άνθρωπο μέσω της εισπνοής αέρα. Ωστόσο, αυτές οι χημικές ουσίες θα μπορούσαν επίσης να μεταφέρονται στο έδαφος, βλάστηση, νερό, ζώντες οργανισμούς, κλπ με άμεσο αντίκτυπο την ανθρώπινη υγεία. Ως εκ τούτου, η ανθρώπινη υγεία μπορεί να επηρεαστεί έμμεσα, μέσω διαφορετικών οδών, όπως

πόσιμο νερό ή τα υπόγεια ύδατα, με απορρόφηση από το δέρμα, η πρόσληψη από μολυσμένα τρόφιμα. Ως εκ τούτου, για την ακριβή εκτίμηση του κινδύνου για την υγεία, οι χημικές συγκεντρώσεις σε κάθε ένα από αυτά τα περιβαλλοντικά μέσα πρέπει να καθοριστούν.

Το 2009 η ελληνική βιομηχανία τσιμέντου ξεπέρασε τους στόχους της σε ό,τι αφορά τη μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> ανά τόνο τσιμέντου. Επιτεύχθηκε μείωση κατά 12,8%, ενώ ο στόχος ήταν 11% (σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990). Το 2010 δεν καταφέρθηκε να διατηρηθεί αυτή η μείωση, η οποία περιορίστηκε στο 8.34%. Στο Σχήμα 5.3 παρουσιάζεται η μεταβολή των εκπομπών CO<sub>2</sub> στην ελληνική τσιμεντοβιομηχανία τα τελευταία χρόνια. Το γεγονός αυτό οφειλόταν σε μεγάλο βαθμό στην αλλαγή των απαιτήσεων στο τρέχον οικονομικό πλαίσιο: υπήρξε αυξημένη ζήτηση τσιμέντου υψηλής αντοχής με μεγάλη αναλογία κλίνκερ. Οι συνολικές εκπομπές μειώθηκαν λόγω της χαμηλότερης παραγωγής λόγω συνθηκών της ελληνικής αγοράς το 2010.



Σχήμα 5.3 : Η συνολική παραγωγή εκπομπών CO<sub>2</sub> στην ελληνική βιομηχανία τσιμέντου (Ηρακλής – Lafarge)

## 5.5 Ποιότητα προϊόντος

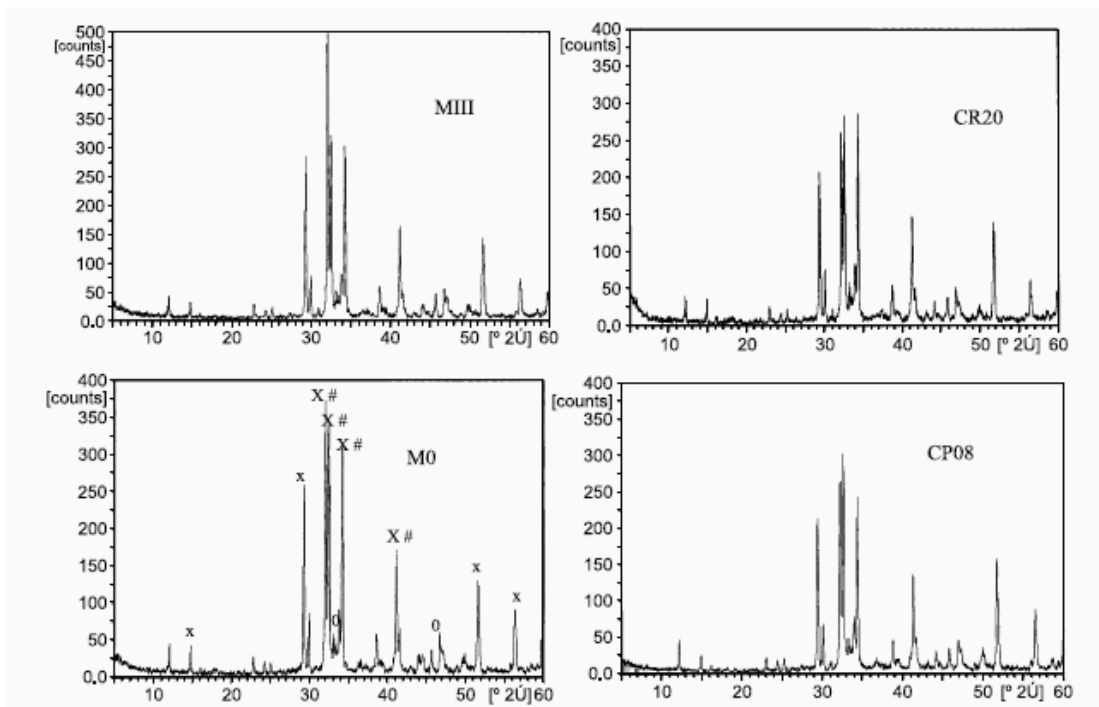
Όπως έχει αναφερθεί η βιομηχανία τσιμέντου θέλοντας να συνδυάσει την μείωση του κόστους παραγωγής και τις εκσυγχρονισμένες περιβαλλοντικές πολιτικές ως προς τις



εκπομπές καυσαερίων και την ανακύκλωση απορριμάτων, στράφηκε στην εφαρμογή των εναλλακτικών καυσίμων. Η χρήση των εναλλακτικών καυσίμων όμως προσδιορίζεται και από ένα επιπλέον παράγοντα κρίσιμης σημασίας, που δεν είναι άλλος από την ποιότητα του παραγόμενου προϊόντος. Είναι σαφές πως μία πολύ καλά ενεργειακά σχεδιαζόμενη χρήση ενός εναλλακτικού καυσίμου σε κάποιο ποσοστό ως προς το κύριο εφαρμοζόμενο καύσιμο, θα μπορούσε να οδηγήσει σε μείωση του κόστους παραγωγής αλλά ενδεχόμενα θα ήταν καταστροφικό εάν επηρέαζε αρνητικά την ποιότητα του παραγόμενου κλίνκερ. Ως προς την ποιότητα λοιπόν του παραγόμενου προϊόντος έχει γίνει μία σειρά εργασιών προκειμένου να αποκαλυφθεί ο ρόλος κάποιων ειδών εναλλακτικών καυσίμων.

Μελετήθηκαν συγκριτικά καύσιμα α) από απορρίμματα άνθρακα που προέρχονται από πυριλοτικό φούρνο β) από πετρελαϊκό απόβλητο υψηλής θερμογόνου ισχύος και γ) με εμπορική σήμανση μίγμα καυσίμων που θεωρείται εναλλακτικό καύσιμο, σε διάφορα ποσοστά υποκατάστασης συμβατικών καυσίμων.

Η προσθήκη πυρολιπικής προελεύσεως καυσίμου οδηγεί σε αλλαγές στο κρυσταλλικό πλέγμα του παραγόμενου κλίνκερ. Η παραγόμενη κρυσταλλικότητα είναι ασθενέστερη σε σχέση με αυτή του δείγματος αναφοράς και παρόμοια σε κάθε ποσοστό προσθήκης του εναλλακτικού καυσίμου [44]. Η μελέτη σε XRD έδειξε ότι σε ποσοστό υποκατάστασης 0,8% από πυρολιπικής προέλευσης καύσιμο παρατηρείται αλλαγή στις κορυφές του διαγράμματος σε σχέση με το αντίστοιχο διάγραμμα του δείγματος αναφοράς (Σχήμα 5.4)

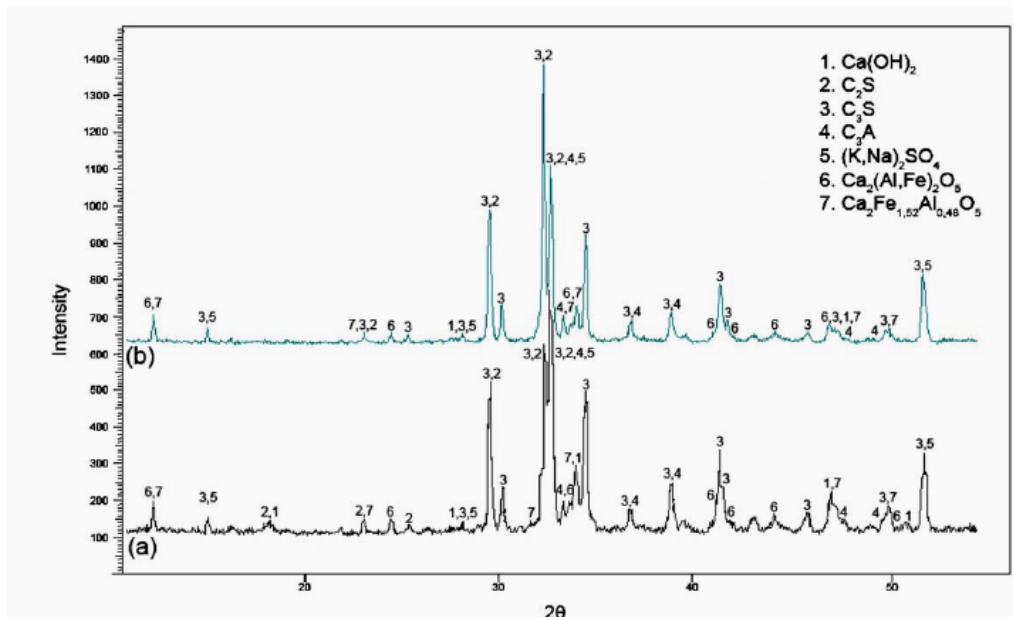


Σχήμα 5.4. : Διαγράμματα XRD σε δείγματα κλίνκερ με α) συμβατικό καύσιμο (M0), β) με προσθήκη πυρολιτικού καυσίμου (CP08), γ) με προσθήκη πετρελαϊκού αποβλήτου (CR20) και δ) με προσθήκη μίγματος εναλλακτικών καυσίμων (MIII) [44].

Αντίστοιχη αλλαγή στην κρυσταλλικότητα παρατηρείται και για τα δείγματα που περιείχαν εναλλακτικά καύσιμα προερχόμενα από απορρίμματα πετρελαίου. Η αντιστροφή στην ένταση των κορυφών αντίστοιχη με αυτή των εναλλακτικών που προέρχονται από πυρόλυση, πραγματοποιείται σε ποσοστό υποκατάσταση 20%.

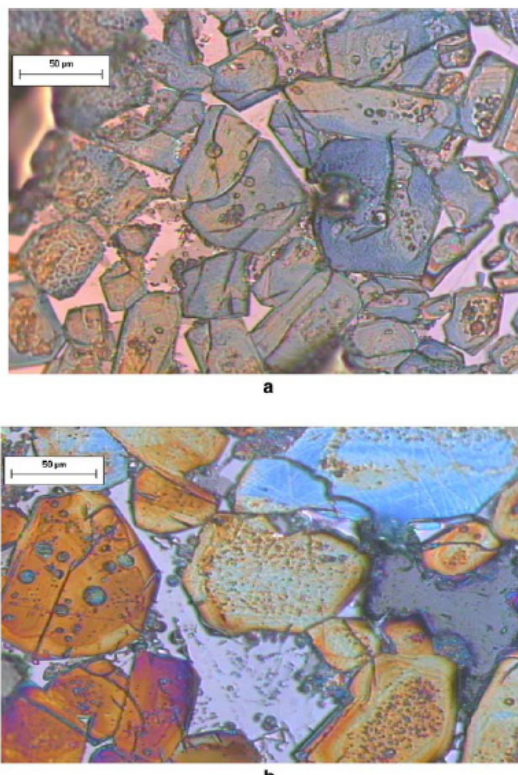
Την υψηλότερη κρυσταλλικότητα στο παραγόμενο κλίνκερ και τα καλύτερα ποσοστά ενσωμάτωσης της τέφρας παρουσιάζει η περίπτωση χρήσης μίγματος εναλλακτικών καυσίμων.

Αντίστοιχα αποτελέσματα προκύπτουν από μελέτες που έγιναν με χρήση ελαστικών (Tire derived fuel – TDF). Δεν υπάρχει καμία εμφανής διαφορά μεταξύ των δύο διαγραμμάτων XRD για τις περιπτώσεις χρήσης του TDF ως εναλλακτικού καυσίμου σε σύγκριση με τη χρήση συμβατικού (Σχήμα 5.5) [45]. Φαίνεται ότι η χρήση του ως εναλλακτικού καυσίμου δεν δημιουργεί ανεπιθύμητες ενώσεις.



Σχήμα 5.5 : Διαγράμματα XRD με και χωρίς χρήση TDF (a και b αντίστοιχα) [45].

Επίσης η μικροδομή του κλίνκερ εξετάστηκε με την χρήση οπτικού μικροσκοπίου. Η χρήση του TDF ως συμπλήρωμα καυσίμου για την παρασκευή κλίνκερ δεν φαίνεται να επηρεάζει τη μικροδομή και το σχηματισμό των χαρακτηριστικών ορυκτολογικών φάσεων (Σχήμα 5.6). Οι κρύσταλλοι αλίτη φαίνονται να είναι καλοσχηματισμένοι και λίγες αλλοιώσεις που παρατηρούνται πιθανόν να οφείλονται σε διαφορές στις συνθήκες καύσης. Γενικά φαίνεται πως η καύση TDF στο σχηματισμό κλίνκερ είναι το ίδιο καλή όσο εκείνη χωρίς τη χρήση TDF, οι όποιες διαφορές στην τελική ποιότητα του προϊόντος, παρατηρήθηκαν μόνο σε στο χρόνο πήξης του τσιμέντου και στην απαίτηση νερού [18].



Σχήμα 5.6: Μικροδομή κλίνκερ με και χωρίς την χρήση TDF (a και b αντίστοιχα) [45].

Σημαντικές παράμετροι που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την εκτίμηση του προϊόντος κλίνκερ, είναι η ειδική του επιφάνεια και η εν γένει σκληρότητα του. Τα μεγέθη αυτά είναι κρίσιμα καθώς επηρεάζουν την δαπανούμενη ενέργεια άλεσης του κλίνκερ. Η χρήση του εναλλακτικού καυσίμου δεν αναμένεται να βελτιώσει αυτά τα μεγέθη, σίγουρα όμως δεν θα πρέπει να μειώνεται η δυνατότητα άλεσης του κλίνκερ. Η συμπεριφορά κατά τη διάρκεια της άλεσης είναι στενά συνδεδεμένη με την υφή και τη δομή των κρυστάλλων που σχηματίζονται στη κάμινο και με τις παρούσες υαλώδεις φάσεις [45].

Στο Πίνακα 5.5 παρουσιάζεται η επίδραση της χρήσης ελαστικών ως εναλλακτικό καύσιμο, στις μηχανικές ιδιότητες του παραγόμενου τσιμέντου, σε σχέση με τσιμέντο προερχόμενο από συμβατικά καύσιμα. Παρατηρούνται πολύ μικρές διαφοροποιήσεις οι οποίες εν γένει δεν μπορούν να χαρακτηρίσουν το παραγόμενο προϊόν υποβαθισμένο στις μηχανικές του ιδιότητες εάν χρησιμοποιηθούν ως καύσιμα τα ελαστικά.

**Πίνακας 5.5**

Χαρακτηριστικές ιδιότητες τσιμέντου με και χωρίς υποκατάσταση καυσίμου με 6% ελαστικά

					Αντοχή σε θλίψη (MPa)			
	Λεπτότητα (cm <sup>2</sup> /g)	Έναρξη πήξης (min)	Τέλος πήξης (min)	Απαίτηση σε H <sub>2</sub> O (%)	1 ημ.	2 ημ.	7 ημ.	28 ημ.
Χωρίς ελαστικά	3860	115	180	25,6	20	29,5	43	62
Με ελαστικά	3860	170	220	27,4	17,5	30,4	46,7	62,3

Κλίνκερ με πυρολυτικής προέλευσης άνθρακα ως εναλλακτικό καύσιμο παρουσιάζει μη γραμμική σχέση μεταξύ της ειδικής επιφάνειας και του ποσοστού προσθήκης. Προσθήκη ξένων ουσιών φαίνεται να τροποποιούν την

σκληρότητα, ακόμα και όταν υπάρχει χαμηλή ή υψηλή συγκέντρωσή τους, έτσι ώστε να απαιτείται μεγαλύτερη ενέργεια κατά την άλεση.

Καύσιμα που προήλθαν από απόβλητα πετρελαίου δεν φαίνεται να μεταβάλλουν τη σκληρότητα, καθώς οι τιμές που λαμβάνονται δεν είναι σημαντικά διαφορετικές, από το δείγμα αναφοράς [45].

### **5.6 Περιγραφή υπάρχουσας κατάστασης χρήσης και προοπτικές αντικατάστασης συμβατικών καυσίμων από εναλλακτικά καύσιμα**

Οι βιομηχανίες παραγωγής τσιμέντου αποτελούν έναν ακόμα τομέα όπου υλοποιείται η αξιοποίηση εναλλακτικών καυσίμων. Η χρήση τους ξεκίνησε στις Η.Π.Α. στις αρχές της δεκαετίας του '80, ενώ υπάρχει εμπειρία στην χρησιμοποίηση ελαστικών στην Αυστρία και στη Γερμανία εδώ και σχεδόν 20 χρόνια. Η πρώτη χρήση υγρών εναλλακτικών καυσίμων ξεκίνησε στη Γαλλία το 1989, ενώ των στερεών, όπως το (Solid Recovered Fuel SRF), ξεκίνησε το 1990 στην Αυστρία και στη Γερμανία.

Η μέχρι στιγμής εμπειρία στον ελληνικό χώρο επικεντρώνεται κατά κύριο λόγο στη χρήση της ιπτάμενης τέφρας στις τσιμεντοβιομηχανίες. Ωστόσο, η εταιρεία «TITAN ΑΕ» διαθέτει εμπειρία κι από την επιτυχημένη χρησιμοποίηση παλαιών ελαστικών και υγρών αποβλήτων διυλιστηρίων ως εναλλακτικά καύσιμα, ενώ η εταιρεία

«ΗΡΑΚΛΗΣ-Lafarge» έχει εκφράσει την πρόθεση να εξετάσει τη χρήση βιομάζας ή και ανακτηθέντος καυσίμου από στερεά αστικά απορρίμματα (SRF) ως καυσίμου υποκατάστασης σε μία από τις υπάρχουσες μονάδες της.

Στην Ελλάδα η εμπειρία στη μικτή καύση έχει ήδη ξεκινήσει από την προηγούμενη δεκαετία με πιλοτικές δοκιμές σε λέβητες βιομηχανικών εγκαταστάσεων (Πίνδος Α.Ε.) αλλά και σε λέβητες κονιοποιημένου καυσίμου (ΑΗΣ Μεγαλόπολης). Σκοπός των δοκιμών μικτής καύσης λιγνίτη και ελαιοπυρηνόξυλου στον ΑΗΣ Μεγαλόπολης ήταν να εξετασθούν όλες οι παράμετροι σχετικά με την εύρεση του ασφαλούς ποσοστού συμμετοχής της βιομάζας στο καύσιμο μίγμα, την επίδραση στη λειτουργία της εγκατάστασης, στη δημιουργία επικαθήσεων, στις εκπομπές ρύπων και στα χαρακτηριστικά της παραγόμενης τέφρας. Στα θετικά του εγχειρήματος αναφέρονται η αξιοποίηση του υφιστάμενου εξοπλισμού, η καύση του συμπληρωματικού καυσίμου χωρίς προβλήματα σε ποσοστό μέχρι και 7% κ.β., η βελτίωση της καύσης του λιγνίτη, η μείωση εκπομπών SO<sub>2</sub>, η διατήρηση των εκπομπών NO<sub>x</sub> σε τιμές κάτω του επιτρεπόμενου ορίου.

Αξιοποίηση της υπάρχουσας εμπειρίας επιχειρείται σήμερα μέσα από τη συμμετοχή σε ερευνητικά έργα που εστιάζονται στην προσπάθεια υλοποίησης της μικτής καύσης σε ατμοηλεκτρικούς σταθμούς μεγάλης κλίμακας. Η ΔΕΗ ΑΕ και το ΕΚΕΤΑ/ΙΤΕΣΚ χρηματοδοτούνται ήδη από εθνικούς και κοινοτικούς πόρους για την επίδειξη δοκιμών με συμμετοχή των στερών βιοκαυσίμων στο μίγμα έως 5 – 10% της προσδιδόμενης ισχύος [46].

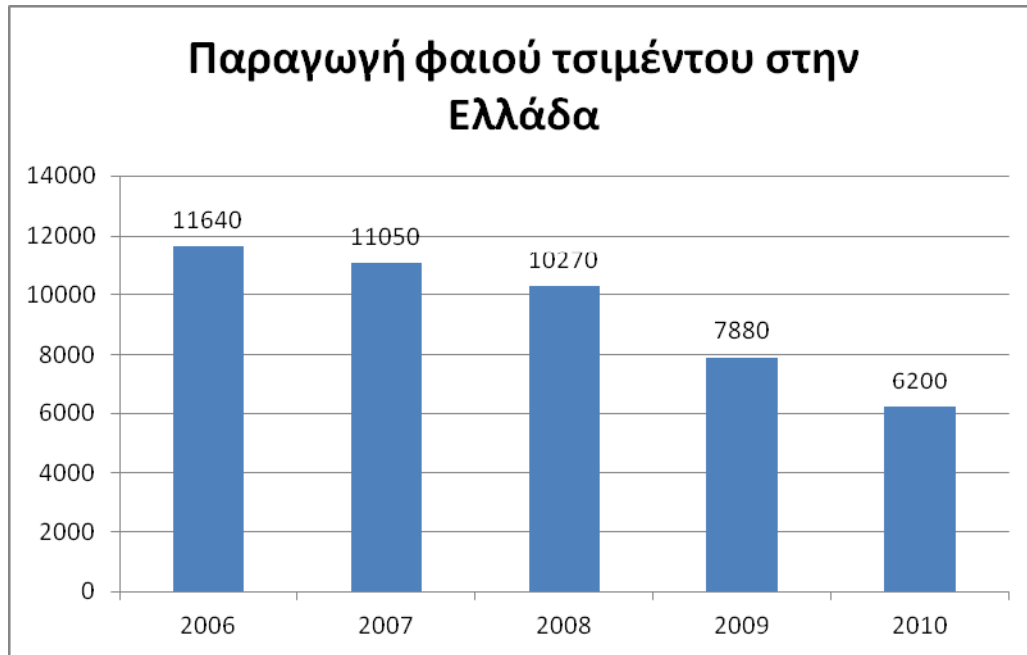
Η υποκατάσταση ορυκτών καυσίμων από εναλλακτικά καύσιμα για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της τσιμεντοβιομηχανίας αποτελεί διαδεδομένη πρακτική σε πολλές ευρωπαϊκές χώρες και αλλού ανά τον κόσμο

Ενδεικτικά αναφέρεται ότι σύμφωνα με στοιχεία του 2007 για την τσιμεντοβιομηχανία, η Ολλανδία παρουσιάζει βαθμό υποκατάστασης ορυκτών καυσίμων σε θερμιδική βάση 80%, η Ελβετία 48%, η Αυστρία 46%, η Γερμανία 42%. Στη χώρα μας, η χρήση εναλλακτικών καυσίμων στην τσιμεντοβιομηχανία είναι πολύ μικρής έκτασης και περιορίζεται στην καύση κυρίως μεταχειρισμένων ελαστικών, λάσπης δεξαμενών διυλιστηρίων και γλυκερίνης (Σχήμα 5.7).



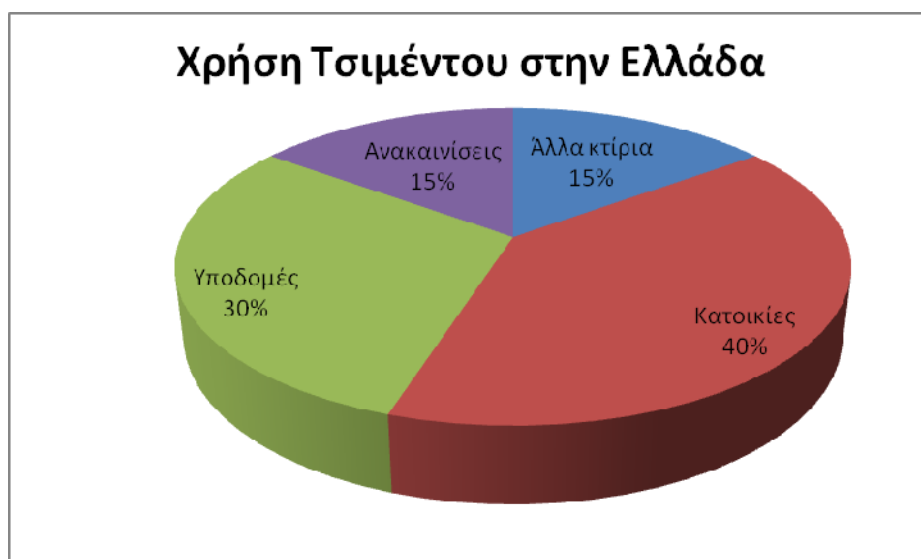
Σχήμα 5.7 : Ποσοστό υποκατάστασης συμβατικών από εναλλακτικά καύσιμα σε θερμιδική βάση

Το ενδιαφέρον βέβαια για την ανάπτυξη της εφαρμογής των εναλλακτικών καυσίμων είναι και συνάρτηση της ζήτησης τσιμέντου. Στη χώρα μας παρατηρείται ότι η παραγωγή φαιού τσιμέντου έχει μειωθεί σημαντικά σχεδόν στο μισό από το 2006 μέχρι το 2010 (Σχήμα 5.8). Αυτό οφείλεται στην σημαντική μείωση της οικοδομής λόγω έλλειψης ρευστότητας των τραπεζών και αφετέρου στο πάγωμα σημαντικών κατασκευαστικών έργων υποδομών λόγω της οικονομικής κρίσης [47].



Σχήμα 5.8 : Παραγωγή τσιμέντου στην Ελλάδα [46].

Ο προορισμός της παραγωγής τσιμέντου φαίνεται στο Σχήμα 5.9. Παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο ποσοστό κατέχει η οικοδομή με ποσοστό 40% ενώ τα βασικά έργα υποδομής κατέχουν το δεύτερο μεγαλύτερο ποσοστό της τάξεως του 30%.



Σχήμα 5.9: Χρήση τσιμέντου στην Ελλάδα [46].



Μετά την επιτυχημένη εισαγωγή βιομάζας από υπολείμματα γεωργικών καλλιεργειών ως εναλλακτικό καύσιμο σε εργοστάσια στην Ελλάδα (Ηρακλής – Lafarge) το 2009 ακολούθησε μια παρόμοια εξέλιξη, με χαρτοπολτό σε εργοστάσια της ίδιας εταιρείας. Σήμερα, η βιομάζα αντιστοιχεί στο 1% των καυσίμων που χρησιμοποιούνται στα εργοστάσια αυτά. Από ενεργειακή άποψη, στο Σχήμα 5.10 παρουσιάζεται η κατανάλωση εναλλακτικών καυσίμων ως ποσοστό % της θερμικής κατανάλωσης στην Ελλάδα. Από πλευράς στρατηγικής γενικά, υπάρχουν δυνατότητες στη χρήση καυσίμων από υπολείμματα ανακύκλωσης αστικών αποβλήτων. Οι συζητήσεις και ο διάλογος που έχει αναπτυχθεί γι' αυτό με τις αρμόδιες αδειοδοτικές αρχές και τους κοινωνικούς εταίρους, δείχνουν ότι χρειάζεται χρόνος για να επιτευχθεί η απαιτούμενη συναντίληψη όλων των εμπλεκόμενων μερών. Το γεγονός αυτό επηρεάζει σημαντικά την πρόοδό στις περαιτέρω μειώσεις των εκπομπών.



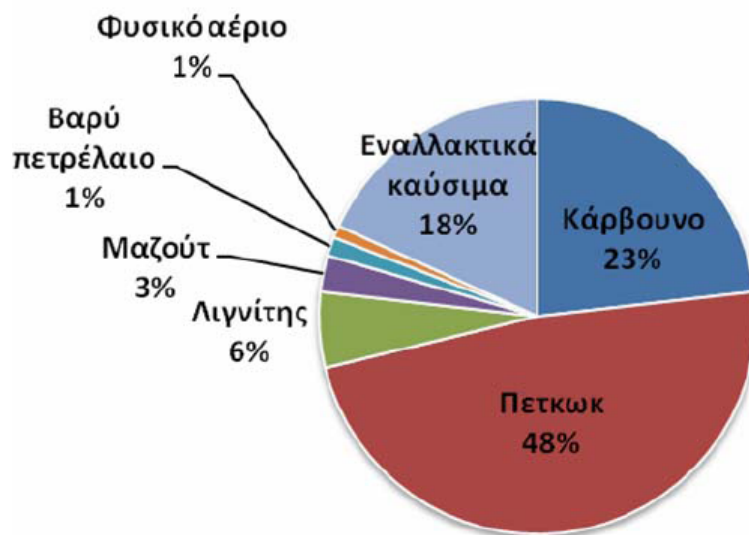
Σχήμα 5.10 : Κατανάλωση εναλλακτικών καυσίμων ως ποσοστό της συνολικής θερμικής απαίτησης (Ηρακλής – Lafarge) [46].

Στην χώρα μας έγιναν ορισμένες προσπάθειες αξιοποίησης των αποβλήτων αλλά σε πειραματικό επίπεδο και σε μικρές ποσότητες από όπου διαπιστώθηκαν τα εξής [30, 48]:

- Δεν υπάρχει οργανωμένο και αξιόπιστο σύστημα συλλογής και ενδιάμεσης επεξεργασίας.
- Δεν υπάρχει έλεγχος των αρχών
- Οι ποσότητες των αποβλήτων που παρουσιάζονται στις σχετικές μελέτες δεν είναι οι πραγματικές

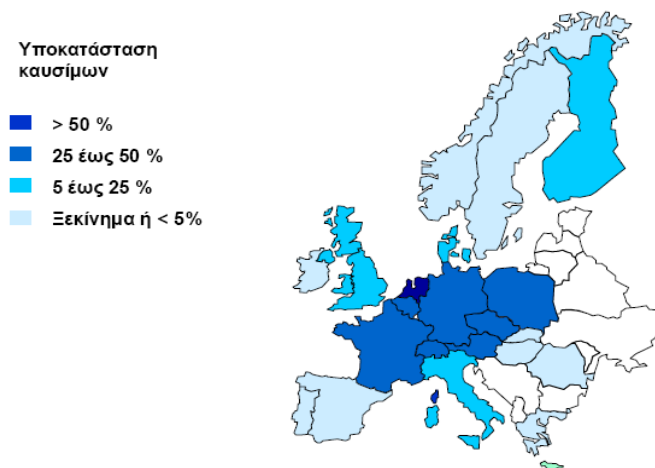
Δυστυχώς στην Ελλάδα οι μηχανισμοί συγκέντρωσης και κατάλληλης προετοιμασίας των εναλλακτικών καυσίμων υπολειτουργούν. Η γραφειοκρατική διαδικασία αδειοδότησης για την καύση κάθε αποβλήτου περνά μέσα από αποφάσεις της τοπικής αυτοδιοίκησης, όπου τα κριτήρια είναι συνήθως 'έχουν να κάνουν με τη τοπική κοινωνία και τα τυχόν θιγόμενα συμφέροντα. Η πολλές φορές παραπλανημένη κοινή γνώμη, με την καλλιεργούμενη καχυποψία για τις πρωτοβουλίες της βιομηχανίας, βγάζει κραυγές διαμαρτυρίας, που μεγεθύνονται και επιτείνονται από τα ΜΜΕ. Αν αναλογιστεί κανείς, για παράδειγμα, τα 2 εκ.τόνους υγρών και στερεών καταλοίπων των 3.500 χιλιάδων ελληνικών ελαιολιβιών, που πάνε κάθε χρόνο σε χωματερές και ποτάμια, τότε είναι φανερό πόσες δυνατότητες υπάρχουν για την αξιοποίηση των εναλλακτικών καυσίμων.

Αντίθετα στην Ευρώπη η χρήση των εναλλακτικών καυσίμων στην τσιμεντοβιομηχανία εδώ και μερικές δεκαετίες έχει αποδειχτεί εφαρμόσιμη μέθοδος υποκατάστασης των συμβατικών [46].



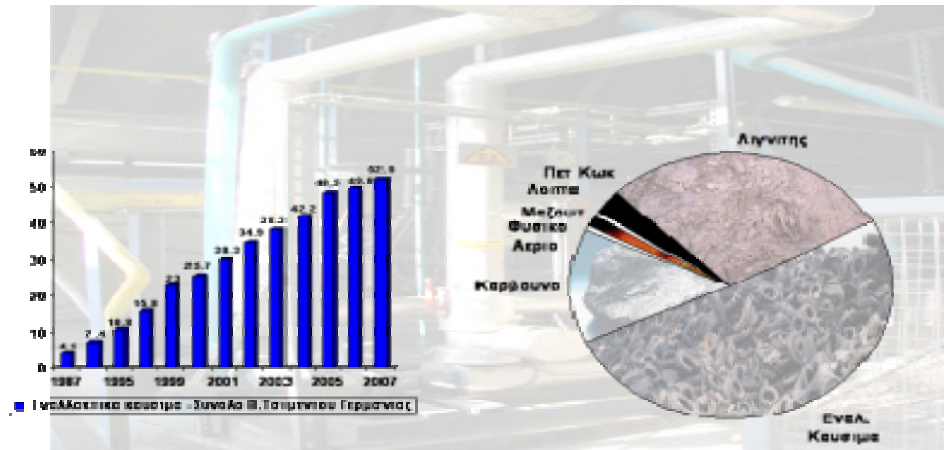
Σχήμα 5.11: Καύσιμα στη βιομηχανία τσιμέντου [46] (CEMBUREAU 2004).

Στο σχήμα (Σχήμα 5.11) αποτυπώνεται ο καταμερισμός των διαφόρων καυσίμων που χρησιμοποιήθηκαν το 2004 για την παραγωγή τσιμέντου στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης σύμφωνα με στοιχεία του CEMBUREAU



Σχήμα 5.12 : Ποσοστό υποκατάστασης καυσίμων στην βιομηχανία τσιμέντου στην Ευρώπη

Χώρες με υψηλή περιβαλλοντική συνείδηση, όπως η Γαλλία, η Γερμανία, η Αυστρία, η Ελβετία έχουν επιτύχει πολύ μεγάλα ποσοστά υποκατάστασης που υπερβαίνουν το 25% (Σχήμα 5.12). Υπάρχουν δε ανά τον κόσμο πολλά εργοστάσια όπου το ποσοστό υποκατάστασης πρωτογενών καυσίμων φθάνει ή και ξεπερνά το 70%. Χαρακτηριστικό παράδειγμα χώρας με πολύ υψηλή υποκατάσταση των συμβατικών καυσίμων στην τσιμεντοβιομηχανία είναι η Γερμανία. Στο Σχήμα 5.13 παρουσιάζεται η πρόοδος της Γερμανίας στην χρήση των εναλλακτικών καυσίμων στην βιομηχανία τσιμέντου ανά έτος, όπως επίσης και ο καταμερισμός της χρήσης των καυσίμων σήμερα. Τέτοια παραδείγματα χωρών αποτελούν την απόδειξη για την βιωσιμότητα της εφαρμογής μεθόδων χρήσης εναλλακτικών καυσίμων στην βιομηχανία και για την απόδοση της παραγωγής, αφού όπως είναι γνωστό η Γερμανία αποτελεί πρωτοπόρο στην βιομηχανική παραγωγή, εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης [47].



Σχήμα 5.13 : Χρήση εναλλακτικών καυσίμων στην βιομηχανία τσιμεντού της Γερμανίας

Η πρόοδος της χρήσης των εναλλακτικών καυσίμων στην τσιμεντοβιομηχανία εντός της Ευρώπης καταγράφεται και στον Πίνακα 5.6 . Αναλυτικότερα παρατηρείται το μέγεθος εφαρμογής ανά είδος εναλλακτικού καυσίμου σε εκατομμύρια τόνους ανά χρόνο. Αξίζει να παρατηρήσει κανείς την μεταβολή στη χρήση ειδών εναλλακτικών καυσίμων όπως τα στερεά απόβλητα βιομηχανίας/εμπορίου από 471 εκατ. τόνους / έτος το 2002 σε 1595 εκατ. τόνους / έτος το 2007. Φαίνεται επίσης είδη εναλλακτικών καυσίμων που τελικά έχουν φθίνουσα πορεία χρήσης, όπως π.χ. το ξύλο. Οι αιτίες για τέτοια παραδείγματα μπορούν να οφείλονται τόσο στην κακή απόδοση τελικά της εφαρμογής αλλά και της μη συμβατής τεχνολογίας. Τα επόμενα έτη πιθανόν εναλλακτικά καύσιμα που έχουν ατονήσει η χρήση τους, η αναβάθμιση της υφιστάμενης τεχνολογίας θα μπορούσε να τα φέρει και πάλι στο προσκήνιο.

### Πίνακας 5.6

Κατανομή χρήσης εναλλακτικών καυσίμων ανά είδος στην τσιμενοβιομηχανία της Ευρώπης  
(σε εκατ. τόνους / έτος) [47].

	2002	2003	2004	2005	2006	2007	MJ / Kg
<b>Λάστιχα</b>	225	247	290	288	265	289	26
<b>Λιπαντικά</b>	125	116	100	60	69	85	26
<b>Στερεά απόβλητα βιομηχανίας / εμπορίου</b>	471	626	862	1116	1370	1595	19
<b>Ζωοτροφές</b>	380	452	439	355	317	293	18
<b>Στερεά αστικά απόβλητα</b>	106	155	157	198	212	186	15
<b>Ξύλο</b>	63	48	42	74	14	13	13
<b>Διαλύτες</b>	41	48	72	101	93	100	23
<b>Λάσπη βιολογικού καθαρισμού</b>	-	4	48	157	238	254	4
<b>Λοιπά</b>	12	12	20	28	32	90	7

Συμπερασματικά η χρήση εναλλακτικών καυσίμων στην Ελλάδα φαίνεται να υστερεί σημαντικά. Με βάση τη διεθνή εμπειρία υπάρχουν σημαντικές προοπτικές εξοικονόμησης ενέργειας.

Η σύνθεση SRF κερδίζει συνεχώς έδαφος στην Ευρώπη. Για την Ελλάδα αποτελεί μια σημαντική προοπτική που θα πρέπει να αξιοποιηθεί στο άμεσο μέλλον. Στα πλαίσια της ορθής διαχείρισης είναι χρήσιμη και απαραίτητη η συστηματική καταγραφή παραμέτρων που ποσοτικοποιούν οφέλη των πράξεων και κάνουν κατανοητή τη σημασία τους στην κοινωνία.

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η χρήση εναλλακτικών καυσίμων, πρακτικά δηλαδή η καύση αποβλήτων αποτελεί θέμα που απασχολεί τις τελευταίες δεκαετίες την βιομηχανία. Η μελέτη των δευτερογενών καυσίμων, όπως λέγονται εξαιτίας των ιδιαίτερων συνθηκών καύσης στις καμίνους παραγωγής κλίνκερ, είναι ιδιαίτερης σημασίας. Με την πάροδο των ετών το θέμα της αξιοποίησης από την τσιμεντοβιομηχανία των εναλλακτικών καυσίμων γίνεται ολοένα και πιο επίκαιρο και σοβαρό με επιδράσεις που φτάνουν όχι μόνο στο επίπεδο του βιομηχανικού ενδιαφέροντος αλλά και στο επίπεδο του ευρύτερου κοινωνικού ενδιαφέροντος. Πλέον μία περιβαλλοντικά ορθή διάθεση βιομηχανικών και αστικών αποβλήτων στα αναπτυγμένα βιομηχανικά κράτη περιλαμβάνει οπωσδήποτε τη χρήση της δυνατότητας που προσφέρει η τσιμεντοβιομηχανία ως προς την καύση εναλλακτικών καυσίμων.

Ένας από τους κύριους συντελεστές του κόστους παραγωγής στην βιομηχανία τσιμέντου είναι η καύσιμη ύλη που χρησιμοποιείται για την έψηση των πρώτων υλών. Υπολογίζεται ότι η ενέργεια που απαιτείται κατά την παραγωγή κλίνκερ είναι 3350 – 4200 MJ/kg και η συμμετοχή του καυσίμου στην διαμόρφωση του κόστους είναι περίπου στο 30%. Στην πορεία των ετών η τσιμεντοβιομηχανία κατέληξε να χρησιμοποιεί κατά κύριο λόγο ως καύσιμο τον άνθρακα και τον πετρελαϊκό οπτάνθρακα.

Η αξιοποίηση των εναλλακτικών καυσίμων στις μονάδες παραγωγής κλίνκερ είναι ιδιαίτερης σημασίας και θα μπορούσε να τύχει ευρύτερης εφαρμογής εξαιτίας των συνθηκών στη περιστροφική κάμινο, αφού εκεί επικρατούν ευνοϊκότερες συνθήκες συγκριτικά με άλλα είδη βιομηχανικής παραγωγής. Οι συνθήκες που αναφέρονται ως ευνοϊκές είναι:

- Η υψηλή θερμοκρασία καύσης
- Ο ικανοποιητικός χρόνος παραμονής
- Η δέσμευση των προϊόντων καύσης στο τελικό προϊόν
- Οι συνθήκες καύσης (οξειδωτικές συνθήκες)
- Η σταθερότητα και ο έλεγχος των συνθηκών λειτουργίας
- Η συνεχής λειτουργία

Τα οφέλη που προκύπτουν από τη χρήση εναλλακτικών καυσίμων στη βιομηχανία τσιμέντου γενικά συνοψίζονται ως εξής:

- Αντικατάσταση των συμβατικών καυσίμων και εξοικονόμηση μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.
- Μείωση των αερίων εκπομπών στις περισσότερες περιπτώσεις εφαρμογής τους. Ειδικότερα παρατηρείται μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> αν αυτά

οδηγηθούν στο κλίβανο παραγωγής κλίνκερ αντί να αποτεφρωθούν στις αντίστοιχες εγκαταστάσεις.

- Μείωση του κόστους παραγωγής και βελτίωση της ανταγωνιστικότητας του βιομηχανικού κλάδου

Σχετικά με τη **θερμιδική αξία** των εναλλακτικών καυσίμων, τα ελαστικά παρουσιάζουν θερμογόνο δύναμη, που ανάλογα με την ποιότητα των ελαστικών μπορεί να φτάσει και πάνω από τα 40 Mj/kg. Η τιμή αυτή είναι υψηλότερη από την αντίστοιχη των κυριότερων συμβατικών καυσίμων, δηλαδή του κωκ και petcoke. Τα αγροτικά πλαστικά και το RDF επίσης έχουν σχετικά υψηλή θερμογόνο ισχύ και αξιολογούνται θετικά ως προς αυτήν την παράμετρο. Όμως η μη εφαρμογή μιας αρχικής επεξεργασίας των αγροτικών πλαστικών πριν χρησιμοποιηθούν ως καύσιμο, όχι μόνο υποβαθμίζει την θερμογόνο ισχύ τους (λόγω παρουσίας υγρασίας και χύματος) αλλά επιπλέον μπορεί να ευθύνεται και για την σημαντική παρουσία βαρέων μετάλλων (προερχόμενων από το χύμα). Επομένως τα αγροτικά πλαστικά μπορούν να παρουσιάσουν μεγάλη αποδοτικότητα ως καύσιμο στην βιομηχανία τσιμέντου μόνο όταν η χρήση τους γίνει με καθορισμό κριτηρίων διαλογής και επεξεργασίας πριν τη χρήση. Η βιολογική λάσπη φαίνεται να υστερεί σημαντικά, και τουλάχιστον ως προς την θερμογόνο ισχύ δεν παρουσιάζει συγκριτικό πλεονέκτημα έναντι των άλλων καυσίμων.

Η μελέτη της εφαρμογής στην τσιμεντοβιομηχανία των εναλλακτικών καυσίμων λαμβάνει υπόψη την παράμετρο του κόστους ενέργειας, ως εξαιρετικής σημασίας με κριτήριο την μείωση του **κόστους παραγωγής**. Η έως τώρα εφαρμογή έχει δείξει πως η χρήση αποβλήτων ως εναλλακτικά καύσιμα είναι οικονομικά δικαιολογημένη, αφού η χρήση τους συμβάλει στη μείωση του κόστους παραγωγής τσιμέντου. Το κόστος της ενέργειας αντιπροσωπεύει 30-40% του συνολικού κόστους της παραγωγής τσιμέντου και σε συνδυασμό με την αύξηση των τιμών του ορυκτού άνθρακα τα τελευταία χρόνια, η υποκατάσταση των συμβατικών καυσίμων με εναλλακτικά θα μπορούσε να δράσει θετικά. Σε αυτή την περίπτωση σημαντικό ρόλο παίζουν για κάθε βιομηχανική μονάδα παράμετροι τοπικής φύσεως, όπως το κόστος μεταφοράς των εναλλακτικών καυσίμων από την πηγή, το κόστος εγκατάστασης του αντίστοιχου μηχανολογικού εξοπλισμού, το κόστος εργασίας και της σχετικής ειδίκευσης του προσωπικού κ.α. Είναι δύσκολο λοιπόν ως προς την συμβολή στο κόστος παραγωγής να δοθεί μία σχετική σύγκριση των εναλλακτικών καυσίμων, αφού σε κάθε περίπτωση παράμετροι όπως αυτές που αναφέρθηκαν παραπάνω επηρεάζουν σημαντικά τόσο την απόφαση ως προς το είδος του εναλλακτικού καυσίμου που θα επιλεγεί όσο και το ποσοστό υποκατάστασης τους στο συμβατικό καύσιμο.

Η μελέτη των εναλλακτικών καυσίμων ως προς την επίδραση στην **ποιότητα του παραγόμενου κλίνκερ** γίνεται συγκριτικά με το προϊόν που προκύπτει από την

χρήση των συμβατικών καυσίμων και των αντίστοιχων ιδιοτήτων. Για το μεγαλύτερο αριθμό εναλλακτικών καυσίμων φαίνεται ότι η επίδραση των εναλλακτικών καυσίμων στο τελικό προϊόν δεν επιφέρει ουσιαστικές μεταβολές, ιδιαίτερα για μικρό βαθμό υποκατάστασης. Ειδικά τα ελαστικά αυτοκινήτου (TDF) παρουσιάζουν πολύ καλά χαρακτηριστικά στο τελικό προϊόν, αντίστοιχα με εκείνα που προκύπτουν με την χρήση συμβατικών καυσίμων. Σε κάθε περίπτωση, της χρησιμοποίησης κάποιου εναλλακτικού καυσίμου θα πρέπει να προηγείται οπωσδήποτε λεπτομερής μελέτη της επίδρασης του στην ποιότητα του κλίνκερ και κατ' επέκταση του τσιμέντου που παράγεται.

Η χρήση των εναλλακτικών καυσίμων έχει θετική συμβολή στο περιβάλλον. Η αποφυγή του να οδηγηθούν σε μονάδες αποτέφρωσης τα υλικά αυτά απαλλάσσει το περιβάλλον από υψηλές **εκπομπές CO<sub>2</sub>**, οι οποίες αντίστοιχα στην κάμινο παραγωγής εμφανίζονται μειωμένες. Εμμέσως λοιπόν είναι σημαντική η συμβολή στο περιορισμό του παγκόσμιου περιβαλλοντικού προβλήματος του «φαινομένου του θερμοκηπίου».

Η χρήση των αποβλήτων ως εναλλακτικά καύσιμα θα πρέπει να συνοδεύεται από αυστηρό έλεγχο των **αερίων ρύπων** που εκλύονται στο περιβάλλον. Ειδικότερα το RDF σε περιστροφικές κάμινους τσιμεντοβιομηχανίας είναι δυνατόν να απελευθερώσει κατά την καύση του αέριους ρύπους, όπως αιωρούμενα σωματίδια, οξειδία του αζώτου, διοξείδιο του θείου, υδροχλώριο, υδροφθόριο, μονοξείδιο του άνθρακα, πτητικές οργανικές ενώσεις και βαρέα μέταλλα. Τα ελαστικά αυτοκινήτου μπορούν να απελευθερώσουν βαρέα μέταλλα όπως κάδμιο, ψευδάργυρος, υδράργυρος, μόλυβδος και αρσενικό, πτητικές οργανικές ενώσεις, διοξίνες και φουράνια. Όμως, η σωστή εφαρμογή των εναλλακτικών καυσίμων με τις απαραίτητες προσαρμογές στις κάμινους και με την κατάλληλη ποσότητα υποκατάστασης, αξιολογείται ως θετική και οι εκπομπές των αερίων ρύπων περιορίζονται εντός των αποδεκτών ορίων.

Η εργασία αυτή παρουσιάζει το πλήθος των παραμέτρων που συμβάλλουν στην σωστή αξιοποίηση των εναλλακτικών καυσίμων στην βιομηχανία τσιμέντου. Η παραπέρα μελέτη θα πρέπει να εστιάσει στις νεότερες πηγές αποβλήτων (π.χ. ζωικά άλεια, παραπροϊόντα γεωργικών καλλιεργειών, γλυκερίνη κ.α.) που θα μπορούσαν ενδεχόμενα να αξιοποιηθούν με ευνοϊκό τρόπο από κάθε άποψη στη βιομηχανία τσιμέντου. Επίσης είναι σαφές πως το όφελος που προκύπτει από την ανάπτυξη εφαρμογών εναλλακτικών καυσίμων στην βιομηχανία τσιμέντου έχει επιδράσεις σε ευρύτερο κοινωνικό επίπεδο και γι αυτό είναι εξαιρετικής σημασίας και τα επόμενα χρόνια το ενδιαφέρον της έρευνας θα στραφεί ακόμα πιο έντονα προς αυτή την κατεύθυνση.



## Βιβλιογραφία

1. Σ. Τσίμας, Σ. Τσιβιλής , Επιστήμη και τεχνολογία τσιμέντου, Πανεπιστημιακές εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2010
2. Κ. Τσακαλάκης, Παραγωγή και τεχνολογία παρασκευής σκυροδέματος, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2010
3. Ένωση τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος, <http://www.hcia.gr/indexGR.html>
4. G. C. Bye, Portland Cement 2<sup>nd</sup> edition., Thomas Telford Publishing, London 1999
5. H.F.W. Taylor, Cement Chemistry 2<sup>nd</sup> ed., Thomas Telford Publishing, London 1997
6. I. Javed, F. Bhatti, McGregor Miller, S. H. Kosmatka, Innovations in Portland Cement Manufacturing, Portland Cement Association, 2004
7. Α. Κατσιάμπουλας, Διαχείριση CO<sub>2</sub> στην τσιμεντοβιομηχανία, TITAN, Κοζάνη 2008
8. <http://en.wikipedia.org/wiki/Coal>,
9. <http://el.wikipedia.org/wiki/γεάνθρακας>
10. Πετραλαϊκός Οπτάνθρακας :  
[http://www.ecocrete.gr/index.php?option=com\\_content&task=view&id=3288&Itemid=82](http://www.ecocrete.gr/index.php?option=com_content&task=view&id=3288&Itemid=82)
11. Δ. Καρώνης, Τεχνολογία Καυσίμων και Λιπαντικών, Πανεπιστημιακές εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα, 2007
12. Ε. Γαζιδέλη, Βιομηχανική οικολογία στην παραγωγή τσιμέντου, “Εναλλακτικές πρώτες ύλες και καύσιμα στη βιομηχανία του τσιμέντου” ΤΕΕ, Αθήνα 2007
13. Ε. Γαλανούλης, Εναλλακτικά καύσιμα στην τσιμεντοβιομηχανία, , Α.Ε. Τσιμέντων TITAN, Οκτώβριος 2000
14. Κ. Κολοβός, Η χρήση δευτερογενών υλικών και καυσίμων στη βιομηχανία τσιμέντου, Ημερίδα «Εναλλακτικές πρώτες ύλες και καύσιμα στη βιομηχανία τσιμέντου” ΤΕΕ, Αθήνα 2007
15. Α. Σταθάς, Μελέτη τσιμέντων με χρήση εναλλακτικών καυσίμων, Διπλωματική εργασία ΕΜΠ, Αθήνα, 2009
16. Moses P.M. Chinyama, Alternative Fuels in Cement Manufacturing, University of Malawi – The Polytechnic Malawi, 2009
17. E. Mokrzycki, A. Uliasz- Bochen, Alternative fuels for the cement industry, Mineral and Energy Economy Research Institute of the Polish Academy of Sciences, Poland, 2003
18. P. Pipilikaki , M. Katsioti , D. Papageorgiou, D. Fragoulis , E. Chaniotakis, Use of tire derived fuel in clinker burning, Cement and Concrete Composites, 27, 2005, 843-847
19. Effects of waste tire facilities, and waste tire projects on the environment, .California Integrated Waste Management Board Publications (432), 96-029,

- 20 M. Blumenthal, The use of scrap tires in the cement rotary kilns, Scrap Tire, Management Council, 2005
- 21.M. Giugliano, S. Cernuschi , U. Ghezzi , M. Grosso, Experimental evaluation of waste tires utilization in cement kilns. J Air Waste Manage Assoc (49), 1999, 1405 - 1414
22. Environmental protection Act 1990, Environment agency, Substitute fuels protocol for use on cement and lime kilns.
23. Pollution Prevention and Control Act 1999, Environment Agency, Tyres Protocol A supplementary note to Substitute Fuels Protocol, November 2001.
24. D. Constans, D. Gossman, Tire derived fuel use in cement kilns. GCI tech notes (9), A Gossman Consulting Inc. Publication, 1997.
25. Ν. Κάρτσωνας, Εναλλακτικοί τρόποι διαχείρισης των παραπροϊόντων από εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων, ΤΕΕ, 2005
26. Ε. Βαρελά, Αξιολόγηση τεχνολογιών μηχανικής και βιολογικής επεξεργασίας αστικών στερεών αποβλήτων, Διπλωματική εργασία ΕΜΠ, Αθήνα, 2011
27. Μ. Χριστόλη , Ε. Καπετάνιου, Γ. Σταυρακάκη, Α. Λυγερού, Ν.Χ. Μαρκάτου, Σχηματισμός διοξινών κατά την καύση εναλλακτικού καυσίμου RDF σε εγκαταστάσεις τσιμεντοβιομηχανίας, ΕΜΠ, Αθήνα, 2007
28. Σ.Κ. Αντίοχος, Δ. Μπριασούλης, Μ. Χισκάκης, Φ. Θεολόγος, Κ. Παπάδη, Η χρήση αγροτικών πλαστικών αποβλήτων (APW) ως εναλλακτικό καύσιμο στην τσιμεντοβιομηχανία, 2ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αξιοποίησης Βιομηχανικών Παραπροϊόντων, Κοζάνη, Ιούνιος 2009
29. C. Greco, G. Picciotii, R. B. Greco, and G. M. Ferreira, Fuel Selection and Use, Innovations in Portland Cement Manufacturing (Chap. 2.5), Skokie, Portland Cement Association, 2004
- 30.Η. Πανάρας, Η ενεργειακή επάρκεια και η περιβαλλοντική προστασία από την σκοπιά της τσιμεντοβιομηχανίας, Συμπόσιο για την Ενέργεια του Ελληνικού Κέντρου Ευρωπαϊκών Μελετών και Ερευνών, Αθήνα, 2009
31. Ε. Γαλανούλης, Εναλλακτικά καύσιμα στην τσιμεντοβιομηχανία, Ημερίδα ΤΕΕ, Αθήνα, Οκτώβριος 2000
32. Ν.Λιάπης, Βιοκαύσιμα στην Ελλάδα, Ημερίδα ΚΑΠΕ, Αθήνα. Απρίλιος 2010
33. P. Cordwell, Handling Alternative Fuels, World Cement 37 (10), 2006, 31-36
34. E. Worrell, L. Price, N. Martin, C. Hendriks, and L. O. Meida., Carbon Dioxide Emissions from the Global Cement Industry, Annu. Rev. Energy Environ (26), 2001, 303-329
35. E. Mokrzycki, A. Uliasz-Bochenczyk, M. Sarna, Use of alternative fuels in the Polish cement industry, Applied Energy, 74, 2003, 101-111
36. Taylor M, Tam C, Gielen D., Energy efficiency and CO<sub>2</sub> emissions from the global cement industry, IEA-WBCSD workshop: energy efficiency and CO<sub>2</sub>, Paris, 2006.

37. 2003 and 2004 Statistics on the use of alternative fuels & materials in the clinker production in the European cement industry, Cembureau, 2006, Available from: <http://iea.org>.
38. M. Schneider, Market Situation Regarding the Future Of Concrete – Global Indicators, Technical Developments and Cost Trends – The market for cement, Betonwerk und Fertigteil-Technik/Concrete Plant and Precast Technology 75 (2), 2009
39. D. Lechtenberg, The Use of Alternative Fuels in the Cement Industry of Developing Countries – an opportunity to reduce production costs, Cement International 7 (2), 2009, 66-70
40. F. W. Willitsch, G. Sturm, Processing and Handling Alternative Fuels in the Cement Industry. ZKG International 55 (10), 2002, 62-69
41. M. Stanley Cullinen, Cement, Primer Report, March 2011
42. A. Wesley Folta, Alternative Fuels and Their Effects on Portland Cement, Auburn University, Alabama August 9, 2010
43. M. Taniguchi, The Metamorphosis from Manufacturing to Ecofacturing of Cement Industry, Kami pa gikyōshi 44 (4), 2001, 68-77.
44. M.A. Trezza, A.N. Scian, Waste fuels: Their effect on Portland cement clinker, Cem Conct Res, 35, 2005, 438-444
45. S. Tsvivilis, G. Kakali, A study on the grindability of portland cement clinker containing transition metal oxides, Cement and Concrete Composites 27 (5), 1997, 673– 678.
46. Έκθεση Αειφορίας στην Ελλάδα, Ηρακλής – Lafrage, 2010  
[www.qualitynet.gr/Uploads/Koinwnikoi\\_Apologismoi/329.pdf](http://www.qualitynet.gr/Uploads/Koinwnikoi_Apologismoi/329.pdf)
47. Α. Κοκόσης, Δίκτυα επιχειρήσεων, ΕΜΠ, 2009  
[www.sevian.gr/el/draseis/item/download/33](http://www.sevian.gr/el/draseis/item/download/33)