



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ
ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Διπλωματική Εργασία:

**«Χρήση εναλλακτικών καυσίμων στην
τσιμεντοβιομηχανία: Ανάλυση Κύκλου Ζωής»**

Μακροπούλου Τατιάνα

Επιβλέπων: Γ. Λυμπεράτος – Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ 2015

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή κ. Γεράσιμο Λυμπεράτο που μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα πολύ ενδιαφέρον θέμα και για την πολύτιμη βοήθεια του και την καθοδήγηση καθ' όλη τη διάρκεια της ενασχόλησής μου με αυτό.

Επιπλέον, ευχαριστώ πολύ τη Δρ. Μάρθα Γεωργιοπούλου για τη συνεχή προθυμία, καθοδήγηση και βοήθεια που μου προσέφερε και την καθοριστικής σημασίας συμβολή της στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Επίσης, ευχαριστώ τους καθηγητές της εξεταστικής επιτροπής, κ. Απόστολο Βλυσίδα και κ. Ιωάννη Ζιώμα.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά τους φίλους μου και την οικογένεια μου για τη βοήθεια και τη στήριξη τους.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα πτυχιακή μελέτη πραγματοποιείται Ανάλυση Κύκλου Ζωής μιας διεργασίας παραγωγής κλίνκερ, σε τσιμεντοβιομηχανία, με τη χρήση διαφορετικών εναλλακτικών καυσίμων. Σχεδιάστηκαν και αναπτύχθηκαν επτά διαφορετικά σενάρια παραγωγής ενός τόνου κλίνκερ, σε περιστροφικό κλίβανο τσιμεντοβιομηχανίας, που εξετάζουν τη χρήση συμβατικών καυσίμων και τη μερική αντικατάσταση τους από τρία διαφορετικά εναλλακτικά καύσιμα και από μίγμα αυτών.

Κάθε σενάριο περιλαμβάνει την παραγωγή ενός τόνου κλίνκερ και κατά την ανάλυση του κύκλου ζωής λαμβάνονται υπόψη η εξόρυξη των πρώτων υλών, η μεταφορά τους, η παραγωγή και η ανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και η παραγωγή και η χρήση των απαιτούμενων καυσίμων.

Συγκεκριμένα, ερευνήθηκαν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη χρήση των εναλλακτικών καυσίμων RDF (Refuse derived fuel), TDF (Tire derived fuel) και BS (Biological sludge) καθώς και μίγματος αυτών σε συνδυασμό με τα συμβατικά καύσιμα άνθρακα (coal) και πετ κοκ (pet coke).

Σκοπός της μελέτης αυτής είναι η εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της χρήσης εναλλακτικών καυσίμων σε σχέση με τη χρήση των συμβατικών στην τσιμεντοβιομηχανία. Στόχος της μελέτης είναι η επιλογή του καταλληλότερου από περιβαλλοντική σκοπιά μίγματος καυσίμων (συμβατικών και εναλλακτικών) για τη λειτουργία της διεργασίας παραγωγής κλίνκερ. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού κατασκευάστηκε ένα μοντέλο τύπου ρυζόχαρτου (spreadsheet) για το σχεδιασμό των διαφορετικών σεναρίων, λαμβάνοντας υπόψη τα ποιοτικά χαρακτηριστικά, τη στοιχειομετρία καθώς και τη θερμογόνο δύναμη των καυσίμων που εξετάζονται.

Ως εργαλείο χρησιμοποιείται η μεθοδολογία της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (AKZ), η οποία εφαρμόζεται με τη χρήση του λογισμικού SimaPro 7.1, ευρέως χρησιμοποιούμενο πρόγραμμα για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του κύκλου ζωής ενός προϊόντος ή ενός συστήματος.

Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η χρήση εναλλακτικών καυσίμων μειώνει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της διεργασίας παραγωγής κλίνκερ και ταυτόχρονα αποτελεί μία ορθολογική λύση για τη διαχείριση των αποβλήτων. Επιπλέον, προέκυψε ότι, το προτιμότερο από περιβαλλοντική σκοπιά σενάριο είναι αυτό στο οποίο χρησιμοποιείται ως εναλλακτικό καύσιμο RDF, ενώ το

λιγότερο ελκυστικό σενάριο είναι αυτό στο οποίο εφαρμόζεται ως εναλλακτικό καύσιμο BS.

ABSTRACT

This thesis concerns the life cycle analysis of a manufacturing process for cement clinker production using different alternative fuels.

Seven different scenaria were developed for the production of 1 tonne of clinker, in a rotary cement kiln, examining the use of conventional fuels and their partial replacement by three different alternative fuels and a mixture of these alternative fuels.

Each scenario includes the production of 1 tonne of clinker and during the life cycle analysis it is taken into account the extraction of raw materials, their transportation, the production and consumption of electricity and the production and use of the required fuels.

More specifically, this thesis examines the environmental impact of the use of alternative fuels such as RDF (Refuse derived fuel), TDF (Tire derived fuel) and BS (Biological sludge) and their mixture in combination with coal and pet coke.

The purpose of this study is to assess the environmental impact of alternative fuels in relation to the use of conventional fuels in the cement industry. The aim of the study is the selection of the most suitable, from an environmental standpoint, fuel mixture that consists of conventional and alternative fuels for the clinker production process. To this end, a spreadsheet model is constructed in order to design the different scenaria considering the quality characteristics, the stoichiometry and the calorific value of the fuels considered in this study.

The Life Cycle Analysis (LCA) method is used as a tool, which is applied with the use of the widely used software SimaPro 7.1, for the life cycle assessment of the environmental impact of a process or a system.

The interpretation of the results suggests that the use of alternative fuels reduces the environmental impact on the cement production process and that the cement industry can contribute to solutions to some of society's waste problems. Moreover, the results show that the more preferable, from an environmental perspective is the scenario that examines the use of RDF while the less preferable scenario is the one that examines the use of BS.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	i
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	ii
ABSTRACT.....	iv
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	v
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	vii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ.....	vii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	viii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	viii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΡΟΗΣ.....	ix
1 ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ.....	1
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.1.1 Παραγωγική διαδικασία τσιμέντου.....	4
1.1.2 Επιπτώσεις στο περιβάλλον.....	10
1.2 Εναλλακτικά καύσιμα στην τσιμεντοβιομηχανία.....	13
1.2.1 Πλεονεκτήματα χρήσης εναλλακτικών καυσίμων.....	18
1.2.2 Εφαρμογές και περιορισμοί εναλλακτικών καυσίμων.....	23
1.2.3 Εναλλακτικά καύσιμα που χρησιμοποιήθηκαν.....	29
2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ.....	40
2.1 Ιστορική αναδρομή.....	41
2.2 Στάδια Ανάλυσης Κύκλου Ζωής.....	42
2.2.1 Προσδιορισμός Σκοπού και Αντικειμένου (Goal and Scope Definition) 45	
2.2.2 Ανάλυση Απογραφής Δεδομένων (Inventory Analysis).....	46
2.2.3 Εκτίμηση Επιπτώσεων (Impact assessment).....	50
2.2.4 Ερμηνεία Αποτελεσμάτων - Εκτίμηση Βελτιώσεων.....	54
2.3 Εφαρμογές Ανάλυσης Κύκλου Ζωής.....	56
2.3.1 Ανάλυση Κύκλου Ζωής στη τσιμεντοβιομηχανία.....	56
2.3.2 Ανάλυση Κύκλου Ζωής ως εργαλείο περιβαλλοντικής διαχείρισης.....	56
2.3.3 ΑΚΖ και Οικολογικός Σχεδιασμός (Eco-Design /Ecomaterials).....	57
2.3.4 ΑΚΖ ως Εργαλείο Εκτίμησης Κόστους.....	57

2.4	Αειφόρος Ανάπτυξη και ΑΚΖ.....	58
3	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΧΡΗΣΗΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ	59
3.1	Εισαγωγή.....	59
3.2	Σκοπός και αντικείμενο μελέτης.....	60
3.2.1	Σκοπός.....	60
3.2.2	Μέθοδοι αξιολόγησης.....	62
3.2.3	Λειτουργική Μονάδα (Functional Unit).....	67
3.2.4	Σύστημα και όρια του συστήματος.....	67
3.2.5	Υποθέσεις (Assumptions).....	68
3.2.6	Υπολογισμοί για το σχεδιασμό των σεναρίων.....	70
3.2.7	Παρουσίαση Σεναρίων.....	73
4	Αποτελέσματα και Ερμηνεία Αποτελεσμάτων.....	78
5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	100
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	103

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2-1: Βασικά Στάδια Ανάλυσης Κύκλου Ζωής [SETAC (1993)]	43
Σχήμα 2-2: Βασικά Στάδια AKZ [Life Cycle Assessment, ISO 14041]	44
Σχήμα 2-3: Τυπικά Όρια Συστήματος	48
Σχήμα 2-4: Σχηματική Απεικόνιση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων	52
Σχήμα 2-5: AKZ Εργαλείο Οικολογικού Σχεδιασμού Βασισμένο στην Προσέγγιση της Ιεράρχησης των Υλικών (top-down eco-design).....	57
Σχήμα 2-6: Πυλώνες της Βιώσιμης Ανάπτυξης.....	58
Σχήμα 4-1: Δένδρο διεργασιών σεναρίου 7	96

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1-1: Διάγραμμα Ροής Παραγωγικής Διαδικασίας Τσιμέντου.....	6
Διάγραμμα 4-1: Διάγραμμα περιβαλλοντικών επιπτώσεων Σεναρίου 1-Eco-Indicator 99.....	79
Διάγραμμα 4-2: Διάγραμμα περιβαλλοντικών επιπτώσεων Σεναρίου 2	80
Διάγραμμα 4-3: Διάγραμμα περιβαλλοντικών επιπτώσεων Σεναρίου 3	81
Διάγραμμα 4-4: Διάγραμμα περιβαλλοντικών επιπτώσεων Σεναρίου 4	83
Διάγραμμα 4-5: Διάγραμμα περιβαλλοντικών επιπτώσεων Σεναρίου 4	84
Διάγραμμα 4-6: Διάγραμμα περιβαλλοντικών επιπτώσεων Σεναρίου 6	86
Διάγραμμα 4-7: Διάγραμμα περιβαλλοντικών επιπτώσεων Σεναρίου 4	87
Διάγραμμα 4-8: Σύγκριση σεναρίων στην κατηγορία επίπτωσης Respiratory Inorganics.....	89
Διάγραμμα 4-9: Σύγκριση σεναρίων στην κατηγορία επίπτωσης Acidification/Eutrophication.....	90
Διάγραμμα 4-10: Σύγκριση σεναρίων στην κατηγορία επίπτωσης Climate change ..	91
Διάγραμμα 4-11: Σύγκριση σεναρίων στις κατηγορίες επίπτωσης Carcinogens και Respiratory organics	92
Διάγραμμα 4-12: Σύγκριση σεναρίων στην κατηγορία επίπτωσης Fossil fuels.....	92
Διάγραμμα 4-13: Σύγκριση σεναρίων στην κατηγορία επίπτωσης Minerals.....	93
Διάγραμμα 4-14: Σύγκριση σεναρίων στην κατηγορία επίπτωσης Minerals.....	93
Διάγραμμα 4-15: Διάγραμμα συνολικής σύγκρισης των επτά σεναρίων όσον αφορά την περιβαλλοντική επίπτωση των καυσίμων σε όλες τις κατηγορίες χαρακτηρισμού.	94
Διάγραμμα 4-16: Διάγραμμα της επίπτωσης κλιματική αλλαγή για την σταδιακή αύξηση του RDF στο μίγμα των εναλλακτικών καυσίμων.	96
Διάγραμμα 4-17: Διάγραμμα γραμμικής σύγκρισης ανά κατηγορία επίπτωσης.....	97

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1-1: Στάδια Παραγωγικής Διαδικασίας Βιομηχανίας Παραγωγής Τσιμέντου..	5
Εικόνα 1-2: Διάταξη Περιτροφικής Κλιβάνου Παραγωγής Κλίνκερ (Πηγή: Τσακαλάκης, 2010).....	8
Εικόνα 1-3: Απεικόνιση Σταδίων Παραγωγικής Διαδικασίας Τσιμέντου(Πηγή: Lafarge http://www.lafarge.gr/)	9
Εικόνα 1-4: Παραγωγή τσιμέντου (Πηγή: Κακαράς, 2008).....	13
Εικόνα 1-5: Ιεράρχηση επιλογών για τη διαχείριση των στερών αποβλήτων (Οδηγία 2008/98/ΕΚ).....	17
Εικόνα 1-6: Ελάττωση εκπομπών στις τσιμεντοβιομηχανίες με χρήση εναλλακτικών καυσίμων (ΕΚ) Cembureau 2008	21
Εικόνα 1-7: Αέριες εκπομπές των Α.Σ.Α. στη τσιμεντοβιομηχανία και σε ΧΥΤΑ	24

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1-1: Βασικοί Τύποι Τσιμέντου (Πηγή: Ένωση Τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος http://www.hcia.gr/)	2
Πίνακας 1-2: Είδη Εναλλακτικών Καυσίμων που εφαρμόζονται κατά το έτος 2002 στην Ευρωπαϊκή Τσιμεντοβιομηχανία και βαθμός υποκατάστασης συμβατικών καυσίμων (Πηγή: Ziegler, 2006)	14
Πίνακας 1-3: Συναπόθεφρωση αποβλήτων στη τσιμεντοβιομηχανία συγκριτικά με την αποτέφρωση αποβλήτων.....	21
Πίνακας 1-4: Υλικά που χρησιμοποιούνται ως εναλλακτικά καύσιμα από τις βιομηχανίες τσιμέντου (Πηγή: Κολοβός, 2007)	26
Πίνακας 1-5: Οριακές τιμές εκπομπής για εγκαταστάσεις τσιμεντοβιομηχανίας που χρησιμοποιεί δευτερογενείς πρώτες ύλες και καύσιμα [ΕΕ 94/67, ΚΥΑ 2487/455/199].....	27
Πίνακας 1-6: Σύσταση χρησιμοποιημένων ελαστικών, % w/w, στην Ευρωπαϊκή Ένωση (Πηγή: European Commission,).....	36
Πίνακας 3-1: Απαιτούμενες πρώτες ύλες για την παραγωγή φαρίνας	70
Πίνακας 3-2: Χαρακτηριστικά περιστροφικού κλιβάνου.....	70
Πίνακας 3-3: Απαιτούμενη Ηλεκτρική Ενέργεια	70
Πίνακας 3-4: Ποιοτικά χαρακτηριστικά καυσίμων (Πηγή: Lyberatos et al.(2011), Tsiliyannis (2012)).....	71
Πίνακας 3-5: Αέριες εκπομπές καυσίμων (πηγή: Tsiliyannis (2012))	71
Πίνακας 3-6: Ποσότητες καυσίμων σενάριων (αντικατάσταση 10% από εναλλακτικά καύσιμα).....	72
Πίνακας 3-7: Ποσότητες καυσίμων σενάριων (αντικατάσταση 30% από εναλλακτικά καύσιμα).....	72
Πίνακας 4-1: Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις Σεναρίου 1- Eco-Indicator 99.....	78

Πίνακας 4-2: Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις Σεναρίου 2- Eco-Indicator 99.....	80
Πίνακας 4-3: Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις Σεναρίου 3 - Eco-Indicator 99.....	81
Πίνακας 4-4: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις Σεναρίου 4 - Eco-Indicator 99	82
Πίνακας 4-5: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις Σεναρίου 5 - Eco-Indicator 99	84
Πίνακας 4-6: Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις Σεναρίου 6 - Eco-Indicator 99.....	85
Πίνακας 4-7: Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις Σεναρίου 7 - Eco-Indicator 99.....	87
Πίνακας 4-8: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις που οφείλονται αποκλειστικά στην χρήση καυσίμων.....	89

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΡΟΗΣ

Διάγραμμα ροής 3-1: Γενικό διάγραμμα ροής παραγωγικής διαδικασίας 1t κλίνκερ. 68	
Διάγραμμα ροής 3-2: Διάγραμμα ροής σεναρίου 1	73
Διάγραμμα ροής 3-3: Διάγραμμα ροής σεναρίου 2	74
Διάγραμμα ροής 3-4: Διάγραμμα ροής σεναρίου 3	74
Διάγραμμα ροής 3-5: Διάγραμμα ροής σεναρίου 4	75
Διάγραμμα ροής 3-6: Διάγραμμα ροής σεναρίου 5	75
Διάγραμμα ροής 3-7: Διάγραμμα ροής σεναρίου 6	76
Διάγραμμα ροής 3-8: Διάγραμμα ροής σεναρίου 7	77

1 ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ

1.1 Εισαγωγή

Η βιομηχανία παραγωγής τσιμέντου είναι μια αμιγώς μεταλλευτική-μεταλλουργική δραστηριότητα. Στην Ελλάδα κατατάσσεται στις σπουδαιότερες βιομηχανικές δραστηριότητες με μεγάλες εξαγωγικές δυνατότητες και συμβάλλει στην εθνική οικονομία. Θα πρέπει να σημειωθεί ό,τι η αφθονία ασβεστολιθικού υλικού που είναι η κυριότερη πρώτη ύλη στην παραγωγή τσιμέντου και αδρανών υλικών είναι το μεγάλο πλεονέκτημα της χώρας μας για την ανάπτυξη της δραστηριότητας παραγωγής τσιμέντου.

Γενικότερα το τσιμέντο (cement) είναι μία λεπτόκοκκη σκόνη με υδραυλικές ιδιότητες, ιδιότητες που του επιτρέπουν κάτω από την επίδραση του νερού να σχηματίζει σταθερές ένυδρες ενώσεις οι οποίες είναι ελάχιστα υδατοδιαλυτές και έχουν μεγάλη συνάφεια μεταξύ τους και οι οποίες με την πάροδο του χρόνου αυξάνουν τη συνοχή των πολτών και των κονιαμάτων που προέρχονται από αυτές με αποτέλεσμα την ανάπτυξη αντοχών. Αποτελείται από οξειδία του ασβεστίου, πυριτίου, αργιλίου και σιδήρου τα οποία αποτελούν το 90% του βάρους του, ενώ το υπόλοιπο 10% είναι γύψος και μικρές ποσότητες αλάτων μαγνησίου, καλίου, νατρίου και άλλων στοιχείων. Όταν αναμιγνύεται με το νερό μετατρέπεται σε ένα συνδετικό υλικό (τσιμεντόπαστα) που έχει την ιδιότητα να πήζει και να σκληραίνει, είτε στον αέρα είτε κάτω από το νερό και το οποίο είναι το συνηθέστερο δομικό υλικό για τις κατασκευές κτιρίων, δρόμων, γεφυρών και γενικότερα έργων κοινής ωφέλειας. Από την ανάμιξη του τσιμέντου με νερό, αδρανή υλικά και προσμίξεις παράγεται ένα στερεό υλικό, το σκυρόδεμα (concrete), το οποίο όταν είναι φρέσκο δύναται να πάρει τη μορφή του καλουπιού στο οποίο έχει τεθεί και όταν σκληραίνει μετατρέπεται σε ένα σκληρό υλικό όπως η φυσική πέτρα και δεν υπόκεινται σε φθορά εξαιτίας του χρόνου, του νερού, του παγετού ή των μηχανικών πιέσεων. Τέλος το σκυρόδεμα είναι ένα βασικό υλικό που χρησιμοποιείται σε όλους τους τύπους δομικών κατασκευών.

Κατά την παραγωγική δραστηριότητα της τσιμεντοβιομηχανίας παράγονται πολλά είδη (τύποι) τσιμέντων με τον πιο συνηθισμένο τύπο ένα γκρίζο λεπτομερές

υλικό που καλείται κοινό τσιμέντο Portland (OPC, Ordinary Portland Cement). Το τσιμέντο Portland προκύπτει μετά από έψηση σε θερμοκρασία κλινκεροποίησης (1380-1420°C) ενός πλήρως ομογενοποιημένου μίγματος, το οποίο αποτελείται από περίπου 70% ασβεστολιθικά υλικά και 25% αργιλοπυριτικά υλικά και τη συνάλεση του προϊόντος κλίνκερ (clinker) με κατάλληλη ποσότητα γύψου.

Το τσιμέντο ως προϊόν σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Οδηγία 89/106 ΕΕ πρέπει να πληροί ορισμένες ελάχιστες απαιτήσεις, όσον αφορά στις ιδιότητές του και τη σταθερότητα παραγωγής του, να είναι πιστοποιημένο φέροντας τη σήμανση CE και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του να είναι σύμφωνα με τα ισχύοντα Ευρωπαϊκά Πρότυπα EN197-1 (Τσιμέντο Μέρος-1: «Σύνθεση, προδιαγραφές και κριτήρια συμμόρφωσης για κοινά τσιμέντα») και EN197-2 (Τσιμέντο Μέρος-2: «Αξιολόγηση συμμόρφωσης»). Επιπλέον προδιαγράφονται και έξι κατηγορίες αντοχών, στις οποίες κατατάσσονται τα τσιμέντα, ανάλογα με την αντοχή σε θλίψη τσιμεντοκονιάματος, σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN196-1 (Μέθοδοι δοκιμών τσιμέντου - Μέρος 1: Προσδιορισμός αντοχών) (Ένωση Τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος, <http://www.hcia.gr/>).

Για την παραγωγή του τσιμέντου χρησιμοποιούνται πρώτες ύλες και υλικά υποκατάστασης (όπως ποζολάνη, ιπτάμενη τέφρα - πυριτική ή ασβεστολιθική, σκωρία υψικαμίνου κλπ.). Σημειώνεται ότι με βάση τη διαθεσιμότητα των υλικών και τις απαιτήσεις των εφαρμογών, δημιουργήθηκαν οι διάφοροι τύποι τσιμέντων που παράγονται παγκοσμίως, όπως το καθαρό ή αμιγές τσιμέντο, το τσιμέντο με ποζολάνη, ιπτάμενη τέφρα, σκωρία υψικαμίνου, ασβεστόλιθο, πυριτική παιπάλη κλπ. Στον Πίνακα 1-1 παρουσιάζονται οι τύποι τσιμέντου σύμφωνα με τις προδιαγραφές του πρότυπο EN 197-1.

Πίνακας 1-1: Βασικοί Τύποι Τσιμέντου (Πηγή: Ένωση Τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος <http://www.hcia.gr/>)

ΤΥΠΟΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
CEM I	Τσιμέντο Πόρτλαντ
CEM II	Σύνθετο Τσιμέντο Πόρτλαντ
CEM III	Σκωριοτσιμέντο
CEM IV	Ποζολανικό Τσιμέντο
CEM V	Σύνθετο Τσιμέντο

Το Ευρωπαϊκό πρότυπο για το σκυρόδεμα, EN206, προδιαγραφή, επιτελεστικότητα, παραγωγή και συμμόρφωση (Concrete: Specification, performance, production and conformity) συμπεριλαμβάνεται στην ομάδα των Προτύπων, Κανονισμών και Τεχνικών Εγκρίσεων που διέπουν την αγορά των Δομικών Προϊόντων στην Ευρώπη, όπως καθορίστηκαν αρχικά από την Ευρωπαϊκή Οδηγία (Construction Products Directive – CPD) για τα Δομικά Προϊόντα 89/106 (ΠΔ 334/94) της 21/12/88 και πλέον διέπονται από τον Ευρωπαϊκό Κανονισμό Δομικών Προϊόντων (Construction Products Regulation – CPR) 305/2011, που καθορίζουν τις απαιτήσεις συμμόρφωσης έτσι ώστε τα προϊόντα που χρησιμοποιούνται στο σκυρόδεμα να φέρουν τη σήμανση CE. Επισημαίνεται ότι η σήμανση έχει καταστεί υποχρεωτική για τα προϊόντα που αφορούν την παραγωγή έργων από σκυρόδεμα, και συγκεκριμένα:

- το τσιμέντο (με βάση τις απαιτήσεις του Προτύπου ΕΛΟΤ EN 197-1-2011)
- τα αδρανή για το σκυρόδεμα (με βάση τις απαιτήσεις του Προτύπου ΕΛΟΤ EN 12620-2002) και
- τα πρόσθετα σκυροδέματος (με βάση τις απαιτήσεις του Προτύπου ΕΛΟΤ EN 934-2-2001 και / A1-2005)

Σε ότι αφορά το EN206, η νέα έκδοση του Ευρωπαϊκού προτύπου εγκρίθηκε από τη CEN (European Committee for Standardization) το 2013. Η αντιμετώπιση ειδικών συνθηκών στα διάφορα κράτη γίνεται με την έκδοση Εθνικών Προσαρτημάτων τα οποία διαφοροποιούν ή συμπληρώνουν το Πρότυπο.

Το Ελληνικό Εθνικό Προσάρτημα που έχει εκδοθεί από τον Ελληνικό Οργανισμό Τυποποίησης (ΕΛΟΤ) είναι το ΕΛΟΤ EN 206-1+NA, που βασίζεται στην έκδοση του EN206-1:2000. Επιπλέον για την έκδοση του Εθνικού Προσαρτήματος και τη μετέπειτα παρακολούθηση του Προτύπου, ο ΕΛΟΤ έχει συστήσει την Εκδοτική Ομάδα Εργασίας ΟΕ1 υπό την Τεχνική Επιτροπή ΕΛΟΤ/ΤΕ20, η οποία είναι στη φάση εκπόνησης του νέου ΕΛΟΤ EN206+NA που βασίζεται στη νέα έκδοση του 2013 (Ένωση Τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος, <http://www.hcia.gr/>).

Η βιομηχανία τσιμέντου στην Ελλάδα ξεκίνησε στις αρχές του περασμένου αιώνα και σε διάστημα τριάντα δύο ετών ιδρύθηκαν τέσσερις εταιρίες (ΤΙΤΑΝ ΑΕ, ΗΡΑΚΛΗΣ ΑΕ, ΤΣΙΜΕΝΤΑ ΧΑΛΚΙΔΟΣ Α.Ε., ΕΤΑΙΡΑ ΤΣΙΜΕΝΤΩΝ ΧΑΛΥΨ Α.Ε.). Η συνεχής αύξηση της ζήτησης τσιμέντου για την κατασκευή κάθε είδους έργων είχε σαν επακόλουθο τη σημαντική ανάπτυξη του κλάδου με αποτέλεσμα πέρα

από την κάλυψη των αναγκών της εσωτερικής αγοράς να δημιουργηθούν οι προϋποθέσεις εξαγωγών πριν από τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο. Στη μεταπολεμική περίοδο και έως το έτος 1983 οι ρυθμοί ανάπτυξης της τσιμεντοβιομηχανίας τόσο από πλευράς δυναμικότητας όσο και από πλευράς τεχνολογίας ήταν ραγδαίοι, ακολουθώντας τις ανάγκες ανάπτυξης και ανοικοδόμησης της χώρας, αλλά και την αυξανόμενη ζήτηση των αγορών εξωτερικού σε κοντινές περιοχές (Περσικός Κόλπος, Ερυθρά Θάλασσα, χώρες Βορείου και Δυτικής Αφρικής) κυρίως μετά το 1973. Επιπλέον από το 1979 γίνεται εξαγωγή του προϊόντος των βιομηχανιών τσιμέντου και σε νέες ανεπτυγμένες αγορές (όπως Η.Π.Α., χώρες Δυτικής Ευρώπης κ.α.) αλλά και σε άλλες χώρες στην Αφρική και την Ασία (Ένωση Τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος, <http://www.hcia.gr/>).

Σύμφωνα με τα στοιχεία της Ένωσης Τσιμεντοβιομηχανιών (Hellenic Cement Industry Association) στην Ελλάδα η ετήσια παραγωγή τσιμέντου κατά το έτος 2006 ανήλθε σε περίπου 16.1 εκατ. τόννους τσιμέντου εκ των οποίων ποσοστό 35.8 % (περίπου 5.77 εκατ. τόννοι) εξήχθη σε χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, στις Η.Π.Α. και τις χώρες της Μ. Ανατολής και της Αφρικής, ενώ ποσοστό 64.2 % (περίπου 10.35 εκατ. τόννοι) διατέθηκε στην ελληνική αγορά. Από το διατιθέμενο, στην ελληνική αγορά, τσιμέντο, ποσοστό περίπου 70% (7.25 εκατ. τόννοι) διατίθεται χύμα και 30% (3.1 εκατ. τόννοι) ενσακκισμένο, ενώ το 80% (περίπου 5.8 εκατ. τόννοι) του διατιθέμενου στην ελληνική αγορά, «χύμα» τσιμέντου 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 (Ίδρυμα Οικονομικών και Βιομηχανικών Ερευνών, <http://www.iobe.gr/>).

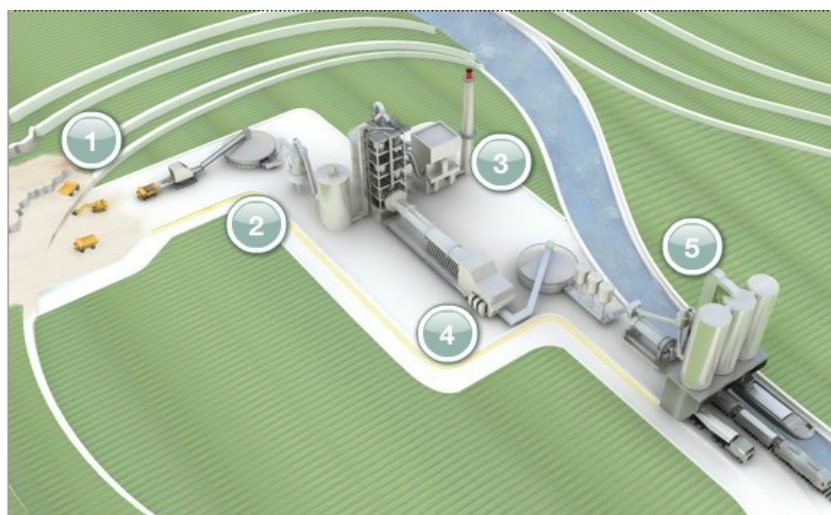
1.1.1 Παραγωγική διαδικασία τσιμέντου

Κατά την παραγωγική διαδικασία του τσιμέντου (Εικόνα1-1) ακολουθούνται πέντε (5) στάδια: η εξόρυξη των πρώτων υλών (1^ο στάδιο), η θραύση, προομοιογενοποίηση πρώτων υλών και αποθήκευση τους σε σιλό (2^ο στάδιο), η άλεση, παραγωγή και ομογενοποίηση φαρίνας, αποθήκευση (3^ο στάδιο), η έψηση ομογενοποιημένης φαρίνας και παραγωγή κλίνκερ (clinker) (4^ο στάδιο) και τέλος η παραγωγή τσιμέντου και η τυποποίηση (5^ο στάδιο).

Στις παραγράφους που ακολουθούν δίνεται αναλυτική περιγραφή των σταδίων παραγωγικής διαδικασίας καθώς και το διάγραμμα ροής .

Στο **πρώτο στάδιο (1^ο στάδιο)** πραγματοποιείται η εξόρυξη των πρώτων υλών (όπως ασβεστόλιθου, αργιλικών πετρωμάτων, αργιλικού σχιστόλιθου, ψωρόλιθου, φλύσχης κα) από τα λατομεία με τη χρήση εκρηκτικών υλών ή/και ισχυρών εκσκαπτικών μηχανημάτων. Οι ποσότητες των πρώτων υλών που θα χρησιμοποιηθούν κατά την παραγωγική διαδικασία εξαρτώνται από τις φυσικές ιδιότητες τους (χημική και ορυκτολογική σύσταση των πρώτων υλών), τον τύπο του τσιμέντου που επιδιώκεται να παραχθεί και τις προδιαγραφές του επιθυμητού τελικού προϊόντος. Τέλος οι πρώτες ύλες με χρήση φορτωτών, φορτώνονται σε φορτηγά αυτοκίνητα και μεταφέρονται στην εγκατάσταση παραγωγής.

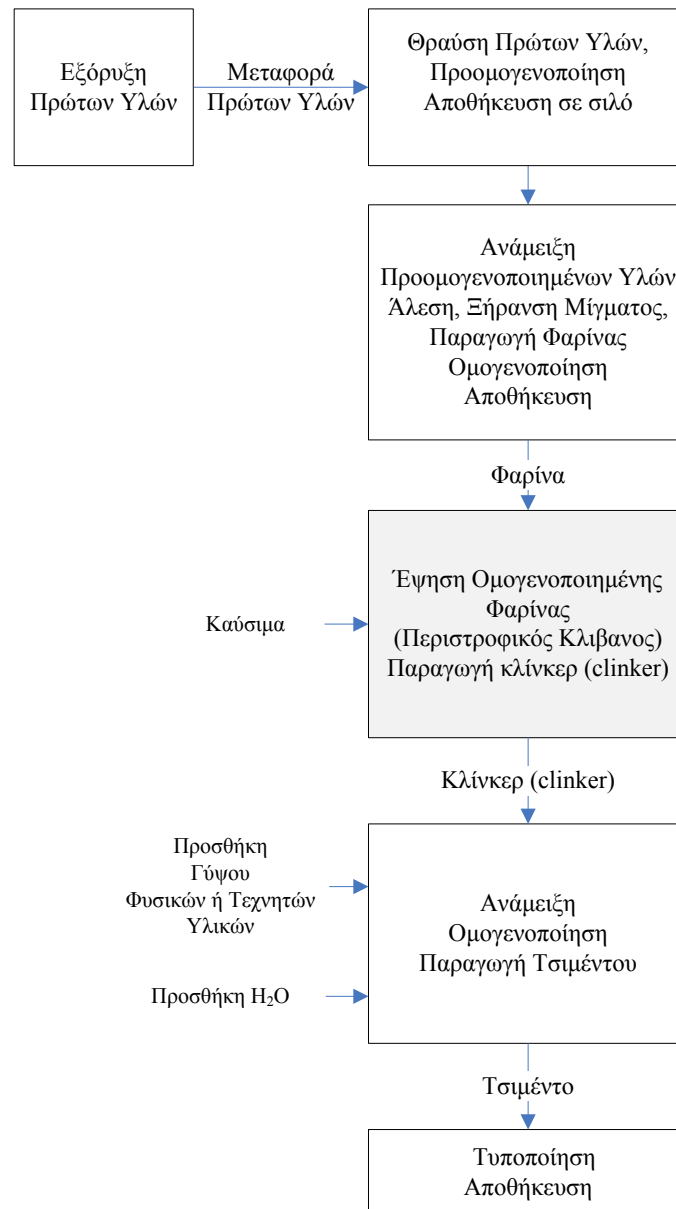
Επισημαίνεται ότι σύμφωνα με την ισχύουσα νομοθεσία γίνεται αποκατάσταση του λατομείου εξόρυξης πρώτων υλών, η οποία περιλαμβάνει την ενίσχυση της τοπικής βιοποικιλότητας (των ειδών χλωρίδας και πανίδας), τη δημιουργία τουριστικού και περιβαλλοντικού πάρκου, καθώς και την εκ νέου οικιστική ή αγροτική ανάπτυξη της περιοχής.



Εικόνα 1-1: Στάδια Παραγωγικής Διαδικασίας Βιομηχανίας Παραγωγής Τσιμέντου

Στο **δεύτερο στάδιο (2^ο στάδιο)** οι πρώτες ύλες υπόκεινται σε θραύση με χρήση σπαστήρων και στη συνέχεια οι θραυσμένες πρώτες ύλες (τεμάχια μικρότερα των 30 χιλιοστών) με χρήση μεταφορικής ταινίας αποτίθενται με ειδική διάταξη

απόθεσης, σωρούς (επιμήκεις ή κυκλικούς), σε κατάλληλα διαμορφωμένες αποθήκες, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η προομοιογενοποίηση τους. Ακολουθεί η αποθήκευση των προομοιογενοποιημένων υλών σε ξεχωριστά για κάθε τύπο υλικού σιλό.



Διάγραμμα 1-1: Διάγραμμα Ροής Παραγωγικής Διαδικασίας Τσιμέντου

Στο **τρίτο στάδιο (3^ο στάδιο)** το μίγμα των κύριων προομοιογενοποιημένων υλών (θραυσμένος ασβεστόλιθος, αργιλικά πετρώματα κ.α.) αναμειγνύονται σε κατάλληλη αναλογία με τις διορθωτικές ύλες (χαλαζιακά πετρώματα, σιδηρομετάλλευμα, βωξίτης, κ.α.) και λειοτριβούνται σε μύλους άλεσης «φαρίνας». Επισημαίνεται ότι, κατά το στάδιο αυτό ένα μέρος από τις πρώτες ύλες που έχουν

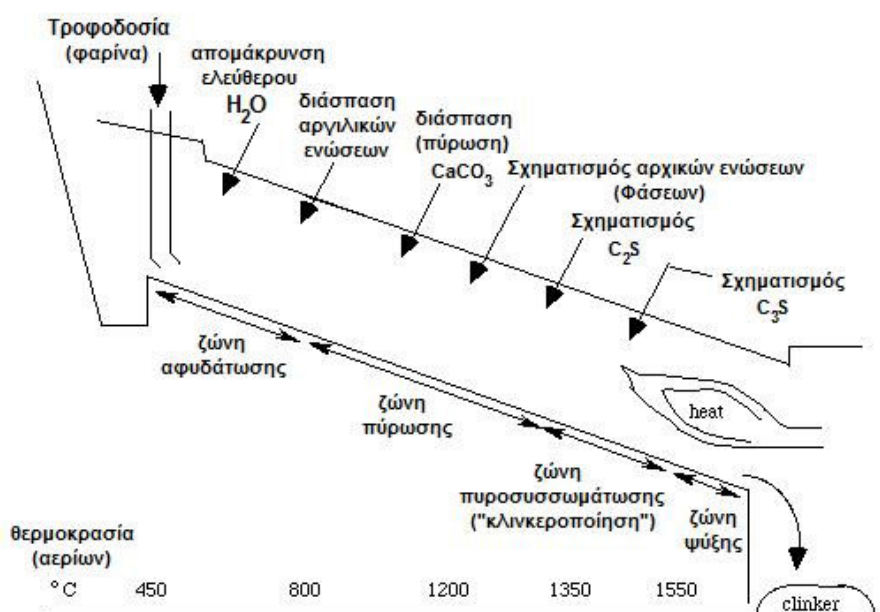
εξορυχθεί δύναται να αντικατασταθεί από άλλα υλικά (όπως σκωρία, ιπτάμενη τέφρα, ποζολάνη, κ.α.) τα οποία έχουν παρόμοια χημική σύσταση με τον ασβεστόλιθο και τον άργιλο. Η χρήση αυτών των εναλλακτικών υλικών συμβάλλει στη διατήρηση των φυσικών πόρων.

Οι μύλοι άλεσης είναι οριζόντιοι ή κατακόρυφοι μεταλλικοί κύλινδροι, με ισχυρή μεταλλική θωράκιση και περιέχουν χαλύβδινες σφαίρες (αλεστικά σώματα), ενώ η τροφοδοσία τους γίνεται υπό ελεγχόμενες συνθήκες έτσι ώστε να τροφοδοτούνται με την κατάλληλη δοσολογία υλών. Κατά την περιστροφική κίνηση των μύλων οι σφαίρες συνθλίβουν τις ύλες σε κόκκους κατάλληλης διαμέτρου. Οι κατακόρυφοι μύλοι κονιορτοποιούν το υλικό συμπιέζοντάς το με κωνικούς ρόλους πάνω σε μία χαλύβδινη περιστρεφόμενη τράπεζα.

Στη συνέχεια ακολουθεί η ξήρανση του αλεσμένου ομοιογενούς μίγματος, η οποία επιτυγχάνεται αξιοποιώντας τα θερμά αέρια που εκλύονται από τους κλιβάνους. Το προϊόν των μύλων άλεσης είναι μια πολύ λεπτή πούδρα που ονομάζεται φαρίνα, η οποία μεταφέρεται σε σιλό αποθήκευσης που είναι εφοδιασμένα με κατάλληλες διατάξεις διοχέτευσης πεπιεσμένου αέρα στον πυθμένα τους, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η αναμόχλευση της φαρίνας και η πλήρης ομογενοποίησή της.

Στο **τέταρτο στάδιο (4^ο στάδιο)** γίνεται έψηση της ομογενοποιημένης φαρίνας και παραγωγή προϊόντος κλίνκερ (clinker), ενός υλικού γκριζοπράσινου χρώματος, μορφής σκληρών σφαιριδίων και διαμέτρου 10-25mm. Συγκεκριμένα μετά την ομοιογενοποίηση η φαρίνα οδηγείται σε περιστροφικό κλίβανο όπου με πυρομεταλλουργική κατεργασία μετατρέπεται σε κλίνκερ. Οι περιστροφικοί κλίβανοι είναι περιστρεφόμενοι οριζόντιοι μεταλλικοί κύλινδροι διαμέτρου 3-5m και μεγάλου μήκους έως και 200m με κεκλιμένη διάταξη προς την έξοδο. Επιπλέον οι κλίβανοι λόγω των υψηλών θερμοκρασιών, που οφείλονται στη χρήση καυσίμων (όπως φυσικό αέριο, πετρέλαιο, γαιάνθρακες ή/και εναλλακτικά καύσιμα) είναι επενδυμένοι εσωτερικά από ειδικά πυρίμαχα τούβλα. Κατά το στάδιο αυτό η ομογενοποιημένη φαρίνα πριν τη είσοδό της στον κλίβανο υφίσταται προοδευτική θέρμανση σε θερμοκρασία 900°C-1000°C, σε προθερμαντήρα (συστοιχία κυκλώνων τοποθετημένων κατακόρυφα και σε σειρά με τον κλίβανο), καθώς έρχεται κατ' αντιρροή, σε επαφή με τα θερμά αέρια που εξέρχονται από τον κλίβανο. Στον κλίβανο (Εικόνα 1-2) επικρατούν υψηλές θερμοκρασίες έως 2000°C με συνέπεια η

καύση να προκαλεί μια χημική αντίδραση που ονομάζεται «αφαίρεση ανθρακικών αλάτων», στο πλαίσιο της οποίας απελευθερώνεται το CO₂ που περιέχεται στον ασβεστόλιθο και ολοκληρώνονται οι χημικές αντιδράσεις που δημιουργούν την παραγωγή του προϊόντος κλίνκερ. Τέλος το παραγόμενο κλίνκερ υπόκειται σε ψύξη και στη συνέχεια αποθηκεύεται σε κατάλληλα σιλό.

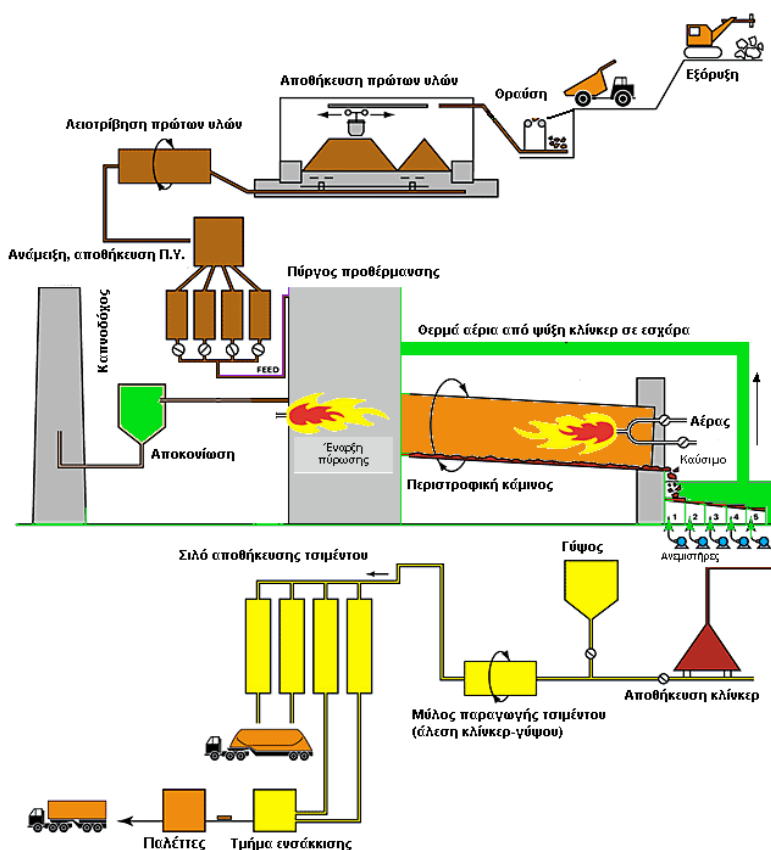


Εικόνα 1-2: Διάταξη Περιτροφικής Κλιβάνου Παραγωγής Κλίνκερ (Πηγή: Τσακαλάκης, 2010)

Αναλυτικότερα οι διάφορες φάσεις κατεργασίας κατά την παραγωγή κλίνκερ (clinker) στον περιστροφικό κλίβανο είναι οι εξής:

- I. Εξάτμιση του ελεύθερου (μη συνδεδεμένου) νερού
- II. Απομάκρυνση του κρυσταλλικού νερού (συνδεδεμένο νερό) κυρίως από τα αργιλικά πετρώματα (πρώτες ύλες)
- III. Θερμική διάσπαση (πύρωση) του ασβεστολίθου: ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2 \uparrow$),
- IV. Σχηματισμός των φάσεων του κλίνκερ τσιμέντου (πυροσυσσωμάτωση)
 - ενώσεις πυριτικού ασβεστίου (C_2S , $2 \cdot \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ και C_3S , $3 \cdot \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)
 - αργιλικού ασβεστίου (C_3A , $3 \cdot \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$)
 - αργιλοσιδηρούχου ασβεστίου (C_4AF , $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$)
- V. Ψύξη του κλίνκερ

Κατά το **πέμπτο στάδιο (5^ο Στάδιο)** γίνεται η παραγωγή του τσιμέντου με συνάλεση σε μύλους, του κλίνκερ με γύψο (σε αναλογία περίπου 5%) και ορισμένων φυσικών ή τεχνητών υλικών. Ανάλογα με το τελικό επιθυμητό προϊόν η ποσότητα των προς ανάμιξη υλών είναι προκαθορισμένη και ελέγχεται συνεχώς. Σημειώνεται ότι, οι διάφοροι τύποι τσιμέντων, καθώς και το επίπεδο της αντοχής τους, εξαρτάται από τη χημική σύσταση του κλίνκερ, το βαθμό άλεσης του τσιμέντου και την παρουσία ή όχι διαφόρων πρόσθετων.



Εικόνα 1-3: Απεικόνιση Σταδίων Παραγωγικής Διαδικασίας Τσιμέντου(Πηγή: Lafarge <http://www.lafarge.gr/>)

Επιπλέον διάφορα εναλλακτικά υλικά, όπως ιπτάμενη τέφρα (μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας) και σκωρία (υψικαμίνων), μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν στη σύσταση του τσιμέντου, ενώ η χρήση αυτών των εναλλακτικών υλικών έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της απαιτούμενης ποσότητας κλίνκερ και συνεπώς τη μείωση των παραγόμενων κατά τη διεργασία αέριων εκπομπών CO₂,

δίνοντας ταυτόχρονα τη δυνατότητα παραγωγής μιας μεγαλύτερης σειράς προϊόντων τσιμέντων, με χαρακτηριστικά που ανταποκρίνονται στις εξειδικευμένες ανάγκες.

Τέλος το παραγόμενο τσιμέντο αποθηκεύεται σε σιλό, τυποποιείται, συσκευάζεται σε χάρτινα σακκιά και διατίθεται προς κατανάλωση είτε σε χάρτινα σακκιά είτε χύμα με ειδικά σιλοφόρα αυτοκίνητα ή με πλοία που έχουν στεγανές δεξαμενές για προστασία από την υγρασία (η οποία προσβάλλει το τσιμέντο και καταστρέφει τις ιδιότητές του).

Η παραγωγή τσιμέντου έχει επίσης υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις, οι οποίες συνήθως αντιπροσωπεύουν το 30-40% του κόστους παραγωγής. Παραδοσιακά, ως πρωτεύον καύσιμο χρησιμοποιείται ο άνθρακα (coal) καθώς και ένα φάσμα άλλων συμβατικών καυσίμων όπως το petroleum coke, το φυσικό αέριο (natural gas) και το πετρέλαιο (oil). Τα τελευταία χρόνια εκτός από τα συμβατικά καύσιμα χρησιμοποιούνται ως καύσιμα διάφορα είδη αποβλήτων. Ειδικότερα κατά τη διεργασία παραγωγής κλίνκερ (clinker), διεργασία κατά την οποία η κατανάλωση ενέργειας ανέρχεται σε περίπου 3.000 - 3.300 MJ ανα τον παραγόμενο προϊόντος, στον κλίβανο χρησιμοποιούνται ως καύσιμα απόβλητα (εναλλακτικά ή δευτερογενή καύσιμα).

1.1.2 Επιπτώσεις στο περιβάλλον

Οι σημαντικότερες αέριες εκπομπές, που δημιουργούνται από τη λειτουργία των βιομηχανιών παραγωγής τσιμέντου, οι οποίες προκαλούν μεγάλη ανησυχία, είναι τα οξείδια του αζώτου (Nitrogen oxides, NO_x), το διοξείδιο του θείου (Sulfur dioxide, SO₂) και η σκόνη (dust) που δημιουργείται κατά τις διεργασίες παραγωγής. Άλλες σημαντικές αέριες εκπομπές που δημιουργούνται κατά την παραγωγική διαδικασία των τσιμεντοβιομηχανιών είναι τα οξείδια του άνθρακα (Carbon oxides όπως CO, CO₂), οι πτητικές οργανικές ενώσεις (Volatile Organic Compounds, VOC), οι διοξίνες (Dioxins, PCDDs), τα φουράνια (Furans, PCDFs) και οι εκπομπές από τα βαρέα μέταλλα.

Οι ποσότητες των αέριων εκπομπών εξαρτώνται κυρίως από τις πρώτες ύλες και τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται κατά την παραγωγική διαδικασία, το επίπεδο της

θερμοκρασίας και τη περιεκτικότητα σε οξυγόνο κατά τη διάρκεια των σταδίων καύσης.

Κατά τη διεργασία παραγωγής κλίνκερ οι αέριες εκπομπές από τον κλίβανο τσιμέντου προέρχονται από τις φυσικές και χημικές αντιδράσεις των πρώτων υλών και από την καύση των καυσίμων. Τα κύρια συστατικά των αερίων που εκπέμπονται από έναν κλίβανο είναι το άζωτο από τον αέρα καύσης, το CO₂ από την ασβεστοποίηση και την καύση, το νερό από τη διαδικασία καύσης και περίσσεια οξυγόνου. Οι αέριες εκπομπές περιέχουν επίσης ποσότητες σκόνης, χλωριούχα, φθοριούχα, διοξείδιο του θείου (SO₂), μονοξείδιο του αζώτου (NO), μονοξείδιο του άνθρακα (CO), και ακόμη μικρότερες ποσότητες οργανικών ενώσεων και βαρέων μετάλλων (CEMBUREU).

Τέλος οι αέριες εκπομπές από τη λειτουργία του κλιβάνου κατά την διεργασία παραγωγής κλίνκερ, εξαρτώνται από τη διάταξη του κλιβάνου, τη θερμοκρασία λειτουργίας του, το θάλαμο καύσης και κυρίως από το καύσιμο που χρησιμοποιείται για την καύση.

Τα οξειδία του αζώτου (NO_x) συμβάλλουν στη δημιουργία όξινης βροχής και στις τσιμεντοβιομηχανίες για να επιτυγχάνονται βέλτιστα αποτελέσματα και για τη μείωση των εκπομπών NO_x λαμβάνονται μέτρα όπως η αριστοποίηση της λειτουργίας των κλιβάνων, η χρήση καυστήρων χαμηλών εκπομπών NO_x και η επιλογή καυσίμων και δευτερευόντων σημείων καύσης για τη δημιουργία συνθηκών αναγωγής και μείωσης των NO_x.

Η παρουσία θείου (S) στις πρώτες ύλες και τα καύσιμα είναι η κύρια πηγή εκπομπών οξειδίων του θείου (SO_x), τα οποία όπως και τα NO_x συνδέονται άμεσα με τη δημιουργία όξινης βροχής. Η εκπομπή οξειδίων του θείου περιορίζεται σχεδόν ολοκληρωτικά, από το αλκαλικό περιβάλλον στο κύκλωμα του προθερμαντή των κλιβάνων όπου επιτυγχάνεται η δέσμευσή τους.

Οι εκπομπές CO₂ δημιουργούνται από τρεις πηγές: την καύση του καυσίμου στον κλίβανο, για να διατηρηθεί η απαιτούμενη θερμοκρασία, την απανθράκωση του ασβεστόλιθου εντός του κλιβάνου και τη χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας σε εγκαταστάσεις όπως οι μύλοι άλεσης. Ένα σύνολο 0,83ton CO₂ εκπέμπεται ανά ton του τελικού προϊόντος τσιμέντου (80% κλίνκερ) αποτελείται από CO₂ από την αφαίρεση ανθρακικών αλάτων (0,45ton ανά ton τσιμέντου), CO₂ από την καύση του

άνθρακα (0,28 ton ανά ton τσιμέντου) και CO₂ από την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται απο μονάδες που λειτουργούν στο χώρο των εγκαταστάσεων (0,1 ton ανά ton τσιμέντου). Από αυτές τις τρεις πηγές οι οποίες είναι ανεξάρτητες, η απανθράκωση του ασβεστόλιθου παράγει το μεγαλύτερο ποσοστό (60%) των εκπομπών CO₂ που απελευθερώνεται από τον κλίβανο.

Για την μείωση των εκπομπών CO₂ υπάρχουν τρεις κύριες στρατηγικές:

- Βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης της παραγωγής τσιμέντου
- Υποκατάσταση των ορυκτών καυσίμων που χρησιμοποιούνται στους κλιβάνους τσιμέντου από καύσιμα που προέρχονται από απόβλητα. Αυτή η στρατηγική (χρήση εναλλακτικών καυσίμων) έχει ένα ευρύτερο όφελος από μια απλή μείωση των εκπομπών CO₂ στο σημείο παραγωγής τσιμέντου.
- Τροποποίηση της σύνθεσης του τσιμέντου χρησιμοποιώντας συστατικά που απαιτούν λιγότερη ενέργεια για την παραγωγή από αυτή του κλίνκερ τσιμέντου.

Κατά την παραγωγική διαδικασία παραγωγής τσιμέντου δε δημιουργούνται υγρά απόβλητα. Το νερό που αναλώνεται κατά την παραγωγική διαδικασία χρησιμοποιείται κυρίως για τις ανάγκες ψύξης και απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα ως υδρατμός.

Η βελτίωση της λειτουργίας του κλιβάνου, η συνεχής ανάπτυξη της τεχνολογίας (όπως φίλτρα κατακράτησης σκόνης κα) και η εφαρμογή των Βέλτιστων Διαθέσιμων Τεχνικών (Best Available Techniques (BAT), Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide) έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των ατμοσφαιρικών εκπομπών κατά στη διεργασία παραγωγής κλίνκερ. Επιπλέον έχουν ήδη αναπτυχθεί οι κανόνες προσδιορισμού του περιβαλλοντικού αποτυπώματος (Product Category Rules) οι οποίοι οδηγήσουν κάθε τσιμεντοβιομηχανία στον προσδιορισμό του περιβαλλοντικού της αποτυπώματος (Environmental Product Declaration). Τέλος το CEMBUREAU έχει κάνει το πρώτο βήμα ανακοινώνοντας το περιβαλλοντικό αποτύπωμα του τσιμέντου (CEM I) συνολικά για την ευρωπαϊκή τσιμεντοβιομηχανία.

1.2 Εναλλακτικά καύσιμα στην τσιμεντοβιομηχανία

Σε μια εποχή στην οποία η ανακύκλωση είναι ανάγκη και ταυτόχρονα συντελεί στη λύση ενός από τα μεγαλύτερα προβλήματα που αντιμετωπίζει ο πλανήτης, η βιομηχανία τσιμέντου μπορεί να συμβάλει στην προστασία του περιβάλλοντος αξιοποιώντας στην παραγωγική διαδικασία δευτερογενή καύσιμα και εναλλακτικές πρώτες ύλες. Παραδοσιακά η βιομηχανία παραγωγής τσιμέντου χρησιμοποιούσε ορυκτά συμβατικά καύσιμα κατά την παραγωγική διαδικασία, αλλά την τελευταία τριακονταετία στρέφεται στη χρήση εναλλακτικών πηγών ενέργειας επιτυγχάνοντας τη μείωση σε μεγάλο βαθμό της εξάρτησής της από τον άνθρακα και δίνοντας συγχρόνως λύση στο οξύτατο πρόβλημα της συσσώρευσης άχρηστων υλικών στο φυσικό περιβάλλον.

Η χρήση εναλλακτικών καυσίμων στη τσιμεντοβιομηχανία ξεκίνησε στις ΗΠΑ στις αρχές της δεκαετίας του '80, ενώ η χρήση στερεών εναλλακτικών καυσίμων, όπως SRF, ξεκίνησε το 1990 στην Αυστρία και τη Γερμανία. Η πρώτη χρήση υγρών εναλλακτικών καυσίμων ξεκίνησε στη Γαλλία το 1989 (Frangey και Val d'Azergues). Επιπλέον υπάρχει εμπειρία στην χρησιμοποίηση ελαστικών στην Αυστρία και τη Γερμανία σχεδόν 20 χρόνια (Gmunden, Retznei, Rodaun). Τέλος σήμερα έχουν επιτευχθεί ποσοστά ανάκτησης της τάξης του 85% για υγρά απόβλητα (Paulding, Fredonia ΗΠΑ) και έως 50% για στερεά απόβλητα (Retznei Αυστρία),



Εικόνα 1-4: Παραγωγή τσιμέντου (Πηγή: Κακαράς, 2008)

Στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης τα εναλλακτικά καύσιμα (βιοκαύσιμα, δευτερογενή καύσιμα) καλύπτουν σήμερα ένα μεγάλο μέρος των ενεργειακών αναγκών της τσιμεντοβιομηχανίας. Η χρήση τους έχει καθιερωθεί στις περισσότερες από τις ανεπτυγμένες χώρες τα τελευταία 10 χρόνια και εφαρμόζεται κυρίως στην Ιαπωνία, την Ελβετία, τις Η.Π.Α., το Βέλγιο, τη Γερμανία και τη Γαλλία. Ειδικότερα η χρήση δευτερογενών καυσίμων από τις τσιμεντοβιομηχανίες των χωρών της Ε.Ε. κατά το έτος 2009 ανέρχεται σε περίπου 28% κατά μέσο όρο. Σημειώνεται ότι το ποσοστό αντικατάστασης των ορυκτών καυσίμων από δευτερογενή καύσιμα στην Ολλανδία και την Ελβετία ανέρχεται σε περίπου 80% και 50% αντίστοιχα, ενώ στην Ελλάδα, την Ιρλανδία και την Πορτογαλία το ποσοστό χρήσης εναλλακτικών καυσίμων είναι αρκετά μικρότερο και ανέρχεται σε περίπου 2% της συνολικής κατανάλωσης θερμικής ενέργειας (Βάση Δεδομένων «Getting the Numbers Right» του CSI, www.wbcscement.org/).

Πίνακας 1-2: Είδη Εναλλακτικών Καυσίμων που εφαρμόζονται κατά το έτος 2002 στην Ευρωπαϊκή Τσιμεντοβιομηχανία και βαθμός υποκατάστασης συμβατικών καυσίμων (Πηγή: Ziegler, 2006)

Alternative fuels	Quantity in kT/y	Energy in TJ	Substitution rate
Animal meal& bone meal& animal fat	760	15'000	2.0%
Tires	500	13'200	1.8%
Other hazardous	360	6'500	0.9%
Plastic	210	5'000	0.7%
Paper/ cardboards/ wood/ PAS	180	2'800	0.4%
Impregnated sawdust	165	1'900	0.3%
Coal slurries/ distillation residues	110	1'650	0.2%
Sludge (paper fiber, sewage)	100	970	0.1%
Fine/ anodes/ chemical cokes	90	1'600	0.2%
RDF	40	530	0.1%
Shale/ oil shale	15	130	<0.1%
Packaging waste	12	260	<0.1%
Agricultural & organic wastes	10	170	<0.1%
Other non hazardous	730	14'100	1.9%
Subtotal solid fuels (75%)	3'282	63'810	8.5%
Waste oil and oiled water	380	13'500	1.8%
Solvents and others	260	3'900	0.5%
Other hazardous liquid fuels	170	4'300	0.6%
Subtotal liquid fuels (25%)	810	21'700	2.9%
Total	4'092	85'510	11.4%

Η παραγωγική δυναμικότητα των εγκατεστημένων στην Ελλάδα βιομηχανιών τσιμέντου είναι περίπου 15 εκατομμύρια τόνοι τσιμέντου ετησίως και η συνολική κατανάλωση καυσίμου υπερβαίνει το 1.5 εκατομμύρια τόνους άνθρακα. Με βάση στοιχεία του έτους 2000, η κατανάλωση άνθρακα ανέρχεται σε 1.5 εκατομμύρια τόνους, για δυναμικότητα μονάδων 13 εκατομμύρια τόνων τσιμέντου. Με μέση θερμογόνο δύναμη των δευτερογενών καυσίμων περίπου 3000 Kcal/kg ένας τόνος άνθρακα ισοδυναμεί με δύο τόνους δευτερογενούς καυσίμου. Συνεπώς η τσιμεντοβιομηχανία δύναται να χρησιμοποιήσει 1-2 εκατομμύρια τόνους εναλλακτικού καυσίμου αντικαθιστώντας το 50-70% του παραδοσιακού καυσίμου με εναλλακτικό καύσιμο, μια ποσότητα αρκετά μεγάλη που θα έδινε λύση σε πολλά προβλήματα σχετικά με τη διάθεση παραπροϊόντων στην Ελλάδα. (Κολοβός, 2007)

Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Ένωση τα κράτη μέλη θα πρέπει έως το 2020 να επιτύχουν τρεις πρωταρχικοί στόχοι (που συχνά αναφέρονται ως «20 20 20»): να μειωθούν οι εκπομπές CO₂ (εκπομπές θερμοκηπίου) κατά 20% σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990, να αυξηθεί το μερίδιο των ανανεώσιμων πηγών στο συνολικό ενεργειακό μείγμα της ΕΕ κατά 20% και να αυξηθεί η ενεργειακή απόδοση κατά 20%, οι οποίοι αποτελούν επίσης το επίκεντρο της στρατηγικής «Ευρώπη 2020» για έξυπνη, βιώσιμη και χωρίς αποκλεισμούς ανάπτυξη.

Η χρήση αποβλήτων στην τσιμεντοβιομηχανία, που αναφέρεται επίσης και ως συν-επεξεργασία (αντικατάσταση σε βιομηχανικές διαδικασίες των πρωτογενών καυσίμων και πρώτων υλών με τα κατάλληλα υλικά αποβλήτων), συμβάλλει στην επίτευξη των στόχων αυτών με σημαντική μείωση των εκπομπών που προκαλούνται από τη βιομηχανία και ενισχύουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου, ενώ προσφέρει ταυτόχρονα μία καλή και ασφαλή λύση στη διαχείριση των αποβλήτων. Πιο αναλυτικά, η χρήση αποβλήτων στους κλιβάνους ως εναλλακτικά καύσιμα έχει ως βασικά περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα, την μεγιστοποίηση της ανάκτησης ενέργειας των αποβλήτων, διασφαλίζοντας παράλληλα την ασφαλή διάθεσή τους, τη συνολική μείωση των εκπομπών στον αέρα, το νερό και το έδαφος, τη σημαντική μείωση της εξάντλησης πόρων, των πολύτιμων μη ανανεώσιμων ορυκτών καυσίμων και τέλος τη μείωση της ανάγκης για την κατασκευή εγκαταστάσεων αποτέφρωσης αποβλήτων.

Σύμφωνα με την εθνική νομοθεσία η χρήση εναλλακτικών (δευτερογενών) καυσίμων στην τσιμεντοβιομηχανία είναι σύμφωνη με τις Γενικές Κατευθύνσεις της

Πολιτικής Διαχείρισης των στερεών αποβλήτων, όπως διατυπώνονται στο Παράρτημα II της Κ.Υ.Α. 50910/2727/2003 «Μέτρα και Όροι για την Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων - Εθνικός και Περιφερειακός Σχεδιασμός Διαχείρισης», όπου αναφέρεται ότι πρέπει να:

- εξοικονομούνται πρώτες ύλες, νερό, ενέργεια, επιφάνεια γης
- επιτυγχάνεται μείωση των αέριων εκπομπών που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και
- επιμηκύνεται ο διαθέσιμος χρόνος ζωής των Χώρων Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ).

Επίσης στο Παράρτημα II αναφέρεται πως στους στόχους που θέτει η εν λόγω ΚΥΑ είναι:

- η **αξιοποίηση** των υλικών που προέρχονται από απόβλητα με μεγιστοποίηση της ανακύκλωσης και ανάκτησης προϊόντων **και ενέργειας** και
- η σταδιακή μείωση της ποσότητας των βιοαποδομήσιμων υλικών που οδηγούνται προς υγειονομική ταφή.

Η «συναποτέφρωση» στη τσιμεντοβιομηχανία αποτελεί σύμφωνα με το Παράρτημα II του Ν.4042/2012, εργασία ανάκτησης ενέργειας (R1), κατά την οποία ανακτάται η ενέργεια αλλά και τα ανόργανα συστατικά των αποβλήτων αντικαθιστώντας μη ανανεώσιμα ορυκτά καύσιμα και πρώτες ύλες. Συγχρόνως μειώνονται οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και το κόστος της ενέργειας καθώς και το κόστος της διαχείρισης των αποβλήτων, μειώνοντας την ανάγκη για χώρους ταφής.

Σύμφωνα με την Οδηγία 2008/98/ΕΚ, ως «ανάκτηση» ορίζεται οιαδήποτε εργασία της οποίας το κύριο αποτέλεσμα είναι ότι απόβλητα εξυπηρετούν ένα χρήσιμο σκοπό αντικαθιστώντας άλλα υλικά τα οποία, υπό άλλες συνθήκες, θα έπρεπε να χρησιμοποιηθούν για την πραγματοποίηση συγκεκριμένης λειτουργίας ή ότι απόβλητα υφίστανται προετοιμασία για την πραγματοποίηση αυτής της λειτουργίας, είτε στην εγκατάσταση είτε στο γενικότερο πλαίσιο της οικονομίας.

Στο Παράρτημα II της ίδιας Οδηγίας παρατίθεται μη εξαντλητικός κατάλογος των εργασιών ανάκτησης, μεταξύ των οποίων περιλαμβάνεται και η χρήση των αποβλήτων κυρίως ως καύσιμου ή ως άλλου μέσου παραγωγής ενέργειας (R1).

Επιπλέον η Ευρωπαϊκή βιομηχανία τσιμέντου υποστηρίζει σθεναρά την αρχή της ιεράρχησης της διαχείρισης των αποβλήτων, καθώς και την ανάγκη για τη

διατήρηση των μη ανανεώσιμων πόρων και την ανάκτηση, επαναχρησιμοποίηση και ανακύκλωση υλικών στο έπακρο των δυνατοτήτων τους (Οδηγία 2008/98/ΕΚ) .



Εικόνα 1-5: Ιεράρχηση επιλογών για τη διαχείριση των στερών αποβλήτων (Οδηγία 2008/98/ΕΚ)

Η θερμική αξιοποίηση των αποβλήτων στους περιστροφικούς κλιβάνους θα πραγματοποιείται σε περιβάλλον ελεγχόμενο και ασφαλές (περισσότερο ασφαλές σε σχέση με αποτεφρωτήρες παλαιάς τεχνολογίας λόγω των υψηλότερων θερμοκρασιών, του μεγαλύτερου χρόνου παραμονής και του αλκαλικού περιβάλλοντος) ως προς τις αέριες εκπομπές, κάτι το οποίο οφείλεται:

- στις υψηλές θερμοκρασίες,
- στο μεγάλο χρόνο παραμονής του καυσίμου σε υψηλές θερμοκρασίες,
- στην υψηλή θερμική αδράνεια του κλιβάνου,
- στην οξειδωτική ατμόσφαιρα,
- στη δέσμευση των όξινων αερίων από την αλκαλική πρώτη ύλη,
- στο γεγονός ότι από την καύση εναλλακτικών καυσίμων στους κλιβάνους της τσιμεντοβιομηχανίας, δεν προκύπτει υπόλειμμα (τέφρα), όπως στους αποτεφρωτές, γιατί αυτή ενσωματώνεται στο τελικό προϊόν, το κλίνκερ.

1.2.1 Πλεονεκτήματα χρήσης εναλλακτικών καυσίμων

Τα πλεονεκτήματα από την αξιοποίηση των εναλλακτικών καυσίμων (δευτερογενών καυσίμων) στην τσιμεντοβιομηχανία είναι περιβαλλοντικά και κοινωνικο-οικονομικά.

Τα πλεονεκτικότερα για το περιβάλλον από τη χρήση των εναλλακτικών καυσίμων είναι:

- Εξοικονόμηση φυσικών μη ανανεώσιμων πόρων (ορυκτά καύσιμα και πρώτες ύλες) – περιορισμός της χρήσης μη ανανεώσιμων, στερεών ορυκτών καυσίμων.
- Αξιοποίηση του ενεργειακού περιεχομένου ανανεώσιμων καυσίμων, καυσίμων που προέρχονται από απόβλητα.
- Μείωση εκπομπών CO₂, αφού αποφεύγεται η διπλή καύση, ορυκτών καυσίμων στην τσιμεντοβιομηχανία και αποβλήτων σε αποτεφρωτήρες (διαχείριση αποβλήτων) και σε ορισμένες περιπτώσεις μηδενικό ισοζύγιο παραγωγής CO₂. Επιπλέον σημειώνεται ότι εάν τα απόβλητα διατίθενται σε χώρους υγειονομικής ταφής (ΧΥΤΑ), οι παραγόμενες εκπομπές CH₄ θα ήταν 21 φορές πιο επιβλαβείς από τις εκπομπές CO₂ που προκύπτουν από τη χρήση τους στην τσιμεντοβιομηχανία.
- Μείωση των απαιτούμενων χώρων για τη διαχείριση των αποβλήτων.

Τα κοινωνικο-οικονομικά πλεονεκτήματα από τη χρήση εναλλακτικών καυσίμων είναι:

- Μείωση της εξάρτησης από εισαγόμενες ενεργειακές πηγές (πετρέλαιο). ☒
- Μείωση του κόστους παραγωγής.
- Δημιουργία νέων θέσεων εργασίας.
- Ενίσχυση της αγροτικής δραστηριότητας
- Αξιοποίηση υπολειμμάτων και καλλιέργεια μη χρησιμοποιούμενων εκτάσεων.
- Τέλος, με τη χρήση των δευτερογενών καυσίμων συμβάλουμε στην επίτευξη των εθνικών στόχων για τη βέλτιστη διαχείριση των αποβλήτων με την εκτροπή τους από την υγειονομική ταφή (Οδηγία 2008/98/EK).

Η χώρα μας μπορεί με τη χρήση των δευτερογενών καυσίμων να επιτύχει ευκολότερα τους στόχους που έχει ορίσει η Ε.Ε. για την προστασία του περιβάλλοντος και να αποφύγει τις κυρώσεις από την πλημμελή εφαρμογή της ευρωπαϊκής νομοθεσίας στον συγκεκριμένο τομέα.

Με τη χρήση των εναλλακτικών καυσίμων στην τσιμεντοβιομηχανία επιτυγχάνεται μείωση του ενεργειακού κόστους με παράλληλη μείωση της κατανάλωσης φυσικών πόρων. Η καύση δευτερογενών καυσίμων στον κλίβανο μιας τσιμεντοβιομηχανίας είναι μια ασφαλής λύση και πλεονεκτεί από την καύση σε κοινούς αποτεφρωτήρες (διαχείριση αποβλήτων) επειδή:

- Η θερμοκρασία του υλικού που αναπτύσσεται στον κλίβανο μιας τσιμεντοβιομηχανίας φτάνει τους 1500°C, ενώ στον κοινό αποτεφρωτήρα δεν ξεπερνά τους 900°C.
- Η θερμοκρασία των αερίων φτάνει στον κλίβανο τους 1.800°C, ενώ στον αποτεφρωτήρα φτάνει μόλις τους 1.200°C.
- Έτσι δεν υπάρχουν επικίνδυνα κατάλοιπα που συνήθως δημιουργούνται με την καύση στους αποτεφρωτήρες, δηλαδή τέφρα, η οποία απαιτεί ειδική διαχείριση, δηλαδή Χώρο Διαχείρισης Επικίνδυνων Αποβλήτων.

Οι περιστροφικοί κλίβανοι παραγωγής κλίνκερ στις βιομηχανίες παραγωγής τσιμέντου είναι κατάλληλες διατάξεις για την καύση εναλλακτικών καυσίμων διότι λειτουργούν υπό ελεγχόμενη καύση σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες και το ανόργανο μέρος των εναλλακτικών καυσίμων (τέφρα) ενσωματώνεται στο παραγόμενο προϊόν (κλίνκερ). Επιπλέον η περιεχόμενη ενέργεια των εναλλακτικών καυσίμων αντικαθιστά σε αναλογία τα συμβατικά καύσιμα. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά που καθιστούν έναν περιστρεφόμενο κλίβανο ικανό να αξιοποιήσει θερμικά δευτερογενείς πρώτες ύλες και καύσιμα είναι:

- θερμοκρασία έψησης (1400-1500°C)
- χρόνος παραμονής
- δέσμευση των προϊόντων καύσης
- συνθήκες καύσης
- σταθερότητα και έλεγχος των συνθηκών λειτουργίας

Ειδικότερα η χρήση εναλλακτικών (δευτερογενών) καυσίμων με αντικατάσταση των συμβατικών στην τσιμεντοβιομηχανία εξασφαλίζει:

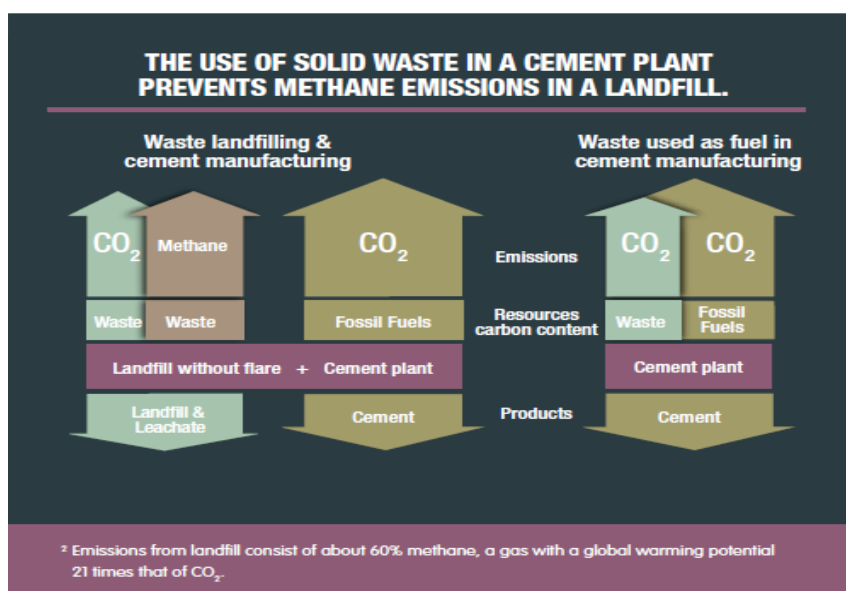
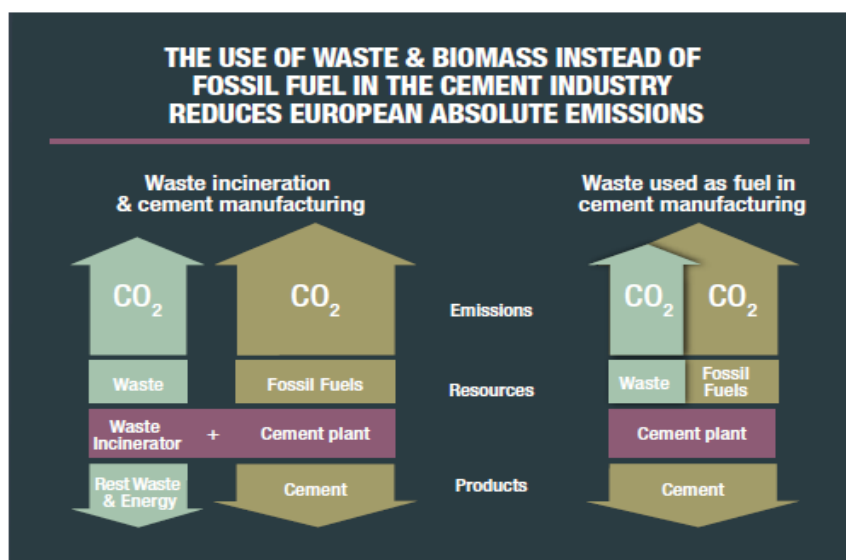
- τη μείωση των εκπομπών των αερίων που συντελούν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου (π.χ. CO₂, CH₄), αντικαθιστώντας συγχρόνως τα συμβατικά ορυκτά καύσιμα με υλικά που κάτω από διαφορετικές συνθήκες θα είχαν

απορριφθεί σε ΧΥΤΑ ή αποτεφρωθεί με τις επακόλουθες εκπομπές και τα τελικά κατάλοιπα (τέφρα),

- την αξιοποίηση ενέργειας προερχόμενης από απόβλητα για την παραγωγή κλίνκερ,
- τη μεγιστοποίηση της ανάκτησης του μη καύσιμου τμήματος των αποβλήτων (δηλαδή της τέφρας του), διότι κατά την καύση τους στον κλίβανο αυτή ενσωματώνεται στο κλίνκερ και συνεπώς αφενός αξιοποιείται, υποκαθιστώντας μέρος των πρώτων υλών παραγωγής του τσιμέντου και αφετέρου δεν δημιουργείται κανένα είδους υπόλειμμα για διάθεσή σε ΧΥΤΑ (κάτι που θα απαιτείτο αν αποτεφρώνονταν σε αποτεφρωτήρα),
- τη μείωση των ποσοτήτων των υλικών που θα οδηγούνταν στους χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων,
- την εξοικονόμηση φυσικών πόρων, όπως τα ορυκτά μη ανανεώσιμα καύσιμα, καθώς και τη μείωση των επιπτώσεων από την εξόρυξη και την επεξεργασία τους,
- την εξεύρεση λύσης στο πρόβλημα της διαχείρισης της παραγόμενης ιλύος βιολογικών καθαρισμών,
- την καταστροφή των επικίνδυνων οργανικών ενώσεων, που περιέχονται σε κάποια είδη αποβλήτων, λόγω των συνθηκών έψησης στους προθερμαντήρες των κλιβάνων παραγωγής κλίνκερ,
- την αυξημένη αδρανοποίηση των βαρέων μετάλλων (το πλείστο των βαρέων μετάλλων ενσωματώνεται στην κρυσταλλική δομή του κλίνκερ και καθίστανται αδιάλυτα στο νερό).

Στην Εικόνα 1-6 παρουσιάζεται η μείωση των εκπομπών ρύπων που επιτυγχάνεται κατά την συναποτέφρωση των αποβλήτων στον κλίβανο παραγωγής κλίνκερ, σε σύγκριση είτε με την ξεχωριστή αποτέφρωσή τους, είτε με τη διάθεσή τους σε ΧΥΤΑ.

Στον Πίνακα 1-3 δίνονται συγκριτικά δεδομένα σχετικά με την συναποτέφρωση αποβλήτων στη τσιμεντοβιομηχανία και την με την αποτέφρωση αποβλήτων σε αποτεφρωτή.



Εικόνα 1-6: Ελάττωση εκπομπών στις τσιμεντοβιομηχανίες με χρήση εναλλακτικών καυσίμων (ΕΚ) Cembureau 2008

Πίνακας 1-3: Συναπότρωση αποβλήτων στη τσιμεντοβιομηχανία συγκριτικά με την αποτέφρωση αποβλήτων

	Συναποτέφρωση σε τσιμεντοκλιβάνους	Αποτεφρωτής απορριμμάτων
Θερμοκρασία υλικού	1.500°C	900°C
Θερμοκρασία αερίων	T>1.800°C με περίσσεια αέρα: καύση οργανικών συστατικών	1.200°C
Χρόνος παραμονής	T>1200°C για Δt>12-15 sec	2 sec
Τέφρα	Δεν παράγεται τέφρα. Δέσμευση βαρέων μετάλλων στο κλίνκερ.	Απόθεση σε ΧΥΤΑ.
Όξινα αέρια (π.χ. SO_2)	Δέσμευση λόγω αλκαλικού περιβάλλοντος	Πλυντρίδες για δέσμευση.

Η χρήση δευτερογενών καυσίμων στην τσιμεντοβιομηχανία προσφέρει σημαντικά **περιβαλλοντικά οφέλη** όπως:

- μείωση της χρησιμοποίησης μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως τα ορυκτά καύσιμα καθώς και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που συνδέονται με την εξόρυξη αυτών,
- συνεισφορά στη μείωση εκπομπών όπως των αερίων που προκαλούν το φαινόμενο του θερμοκηπίου, αντικαθιστώντας ορυκτά καύσιμα με υλικά που διαφορετικά θα έπρεπε να απορριφθούν ή να καούν με αντίστοιχες εκπομπές και κατάλοιπα,
- μεγιστοποίηση της ανάκτησης ενέργειας από τα απόβλητα. Όλη η παραγόμενη ενέργεια χρησιμοποιείται άμεσα στον περιστροφικό κλίβανο για την παραγωγή κλίνκερ. Επίσης μεγιστοποιεί την ανάκτηση του ανόργανου μέρους των αποβλήτων και εξαλείφει την ανάγκη διάθεσης τέφρας, η οποία ενσωματώνεται στο κλίνκερ σε μη υδατοδιαλυτή μορφή, αποτελώντας πρώτη ύλη για τη παραγωγή τσιμέντου.

Για την ανάλυση των πλεονεκτημάτων, από τη χρήση εναλλακτικών καυσίμων σε κλιβάνους τσιμέντου, έχουν πραγματοποιηθεί έρευνες από την Ευρωπαϊκή Ένωση Τσιμεντοβιομηχανιών και έχουν μελετηθεί οι συνολικές επιπτώσεις από την καύση και την ανάκτηση αποβλήτων σε κλιβάνους τσιμέντου σε σχέση με την καύση και την ανάκτησή τους σε αποτεφρωτήρες (CEMBUREAU,1999). Κατά την έρευνα αναπτύχθηκαν δύο σενάρια και εκτιμήθηκαν οι επιπτώσεις των σεναρίων, με τη χρήση της AKZ. Στο πρώτο σενάριο (Σενάριο 1) τα απόβλητα καίγονται σε κατάλληλο αποτεφρωτήρα, με ανάκτηση ενέργειας, ενώ η παραγόμενη ενέργεια τροφοδοτεί το εθνικό σύστημα ηλεκτρικού δικτύου. Ενώ στο δεύτερο σενάριο (Σενάριο 2) τα απόβλητα οδηγούνται σε κλίβανο παραγωγής τσιμέντου, υποκαθιστώντας μία ποσότητα άνθρακα (coal). Σε αυτό το σενάριο η απαιτούμενη για την τροφοδοσία του δικτύου ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από σταθμό παραγωγής ενέργειας με καύση άνθρακα. Τέλος για κάθε σενάριο υπολογίστηκαν οι εκπομπές CO₂ και στη συνέχεια έγινε σύγκριση των δύο σεναρίων. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της έρευνας στο σενάριο 2 επιτυγχάνεται μεγάλη οικονομία στη διατήρηση των φυσικών πόρων, μείωση των εκπομπών CO₂ και παρατηρήθηκε

μείωση στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του φαινομένου του θερμοκηπίου κατά την καύση των αποβλήτων.

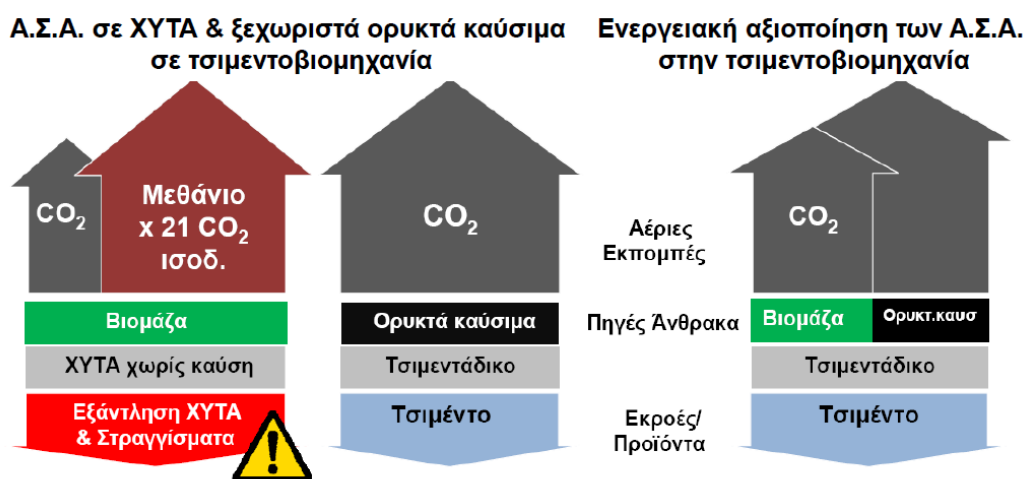
Στο Ινστιτούτο Fraunhofer μελετήθηκε η διαχείριση (ανακύκλωση, ανάκτηση) ενός kg πλαστικών αποβλήτων ως προς τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, τις εκπομπές CO₂, τη χρήση ενέργειας και την παραγωγή επικίνδυνων αποβλήτων. Στα πλαίσια της μελέτης ερευνήθηκαν οι επιλογές: αξιοποίηση σε κλίβανο τσιμέντου με υποκατάσταση ισοδύναμης ποσότητας θερμογόνου δύναμης ορυκτών καυσίμων ενός kg πλαστικών αποβλήτων, καύση/αποτέφρωση ενός kg πλαστικών αποβλήτων σε αποτεφρωτήρα και ανάκτηση (υδρογόνωση) ενός kg πλαστικών αποβλήτων. Στα πλαίσια της μελέτης αξιολογήθηκαν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις αυτών των επιλογών διαχείρισης σε σχέση με την υγειονομική ταφή για μια σειρά κατηγοριών επιπτώσεων (υπερθέρμανσης του πλανήτη, ευτροφισμός, οξίνιση, παραγωγή στερεών αποβλήτων, κ.λπ.). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μελέτης η αξιοποίηση των πλαστικών αποβλήτων σε κλιβάνους τσιμέντου παρέχει τον καλύτερο τρόπο διαχείρισης των αποβλήτων καθώς προσφέρει μια καθαρή μείωση των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων, ενώ ταυτόχρονα αξιοποιεί στο μέγιστο την ενέργεια τους. Πιο συγκεκριμένα η αξιοποίηση των πλαστικών αποβλήτων σε κλιβάνους τσιμέντου έχει ως αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη καθαρή μείωση της παραγωγής CO₂ σε σχέση με τις τρεις επιλογές διαχείρισης και την υγειονομική ταφή. Επιπλέον οι επιλογές, αξιοποίηση σε κλίβανο τσιμέντου και υδρογόνωση, δεν παράγουν επικίνδυνα απόβλητα (δεδομένου ότι τα προϊόντα των πλαστικών αποβλήτων είναι ανακυκλώσιμα), ενώ η αποτέφρωση παράγει 0,03kg επικίνδυνων αποβλήτων ανά kg πλαστικού.

1.2.2 Εφαρμογές και περιορισμοί εναλλακτικών καυσίμων

Στη βιομηχανία παραγωγής τσιμέντου ως εναλλακτικά καύσιμα (ή δευτερογενή καύσιμα) χρησιμοποιούνται κυρίως τα προϊόντα των μονάδων επεξεργασίας αποβλήτων, τα υπολείμματα μιας βιομηχανικής διεργασίας καθώς και της δραστηριότητας των ανθρώπων ή των ζώων (ζωικά, υπολείμματα, αγροτικά και δασικά υπολείμματα, κ.α.), υλικά που έχουν ολοκληρώσει τον κύκλο ζωής τους και δεν μπορούν να ανακυκλωθούν (ελαστικά, ξύλα, χαρτιά, πλαστικά, απορρίμματα

ελαίων, στερεά απορρίμματα, κ.α.) και τα οποία διαφορετικά θα κατέληγαν σε χώρους ανεξέλεγκτης διάθεσης απορριμμάτων (ΧΑΔΑ), ή σε χώρους ταφής απορριμμάτων (ΧΥΤΑ) ή θα αφήνονταν στην τύχη τους μέσα στη φύση. Τα εναλλακτικά καύσιμα αντικαθιστούν τα μη ανανεώσιμα ορυκτά καύσιμα (coal, pet coke, μαζούτ, φυσικό αέριο κ.α.) που χρησιμοποιούνται από την τσιμεντοβιομηχανία.

Τα προερχόμενα από απόρριψη καύσιμα ή ανακτηθέντα ή δευτερογενή καύσιμα (Refuse Derived Fuels - RDF), περιέχουν θερμογόνο δύναμη που πρέπει να αξιοποιηθεί και είναι ουσιαστικά προ-επεξεργασμένα ελαφρά κλάσματα – προϊόντα μηχανικού διαχωρισμού ή αεροδιαχωρισμού. Ομοίως τα προερχόμενα από λάστιχα στο τέλος του κύκλου ζωής τους καύσιμα TDF (Tire Derived Fuel) περιέχουν θερμογόνο δύναμη που πρέπει να αξιοποιηθεί. Τέλος τα καύσιμα που παράγονται από κλάσματα μη επικίνδυνων αποβλήτων υψηλής θερμογόνου ικανότητας (Solid Recovered Fuels - SRF) προορίζονται για ενεργειακή αξιοποίηση στη βιομηχανία.



Εικόνα 1-7: Αέριες εκπομπές των Α.Σ.Α. στη τσιμεντοβιομηχανία και σε ΧΥΤΑ

Τα τυπικά εναλλακτικά καύσιμα (δευτερογενή καύσιμα) που χρησιμοποιούνται ή μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην τσιμεντοβιομηχανία είναι τα εξής:

(Καραγιάννης, 2012).

- Προ-επεξεργασμένα βιομηχανικά και οικιακά απορρίμματα (οικιακά απόβλητα)
- Χρησιμοποιημένα ελαστικά οχημάτων - φορτηγών
- Χρησιμοποιημένα έλαια και διαλύτες

- Πλαστικό, ύφασμα και υπολείμματα επεξεργασίας χάρτου
- Βιομάζα, δηλαδή το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα προϊόντων, αποβλήτων και καταλοίπων που προέρχονται από γεωργικές, (συμπεριλαμβανομένων φυτικών και ζωικών ουσιών), δασοκομικές και συναφείς βιομηχανικές δραστηριότητες, καθώς και το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα των βιομηχανικών αποβλήτων και αστικών λυμάτων και απορριμμάτων. Επισημαίνεται ότι οι εκπομπές CO₂ από τη καύση της βιομάζας είναι κλιματικά ουδέτερες. Επιπλέον περισσότερο από το 20% των εναλλακτικών καυσίμων που χρησιμοποιούνται από την ευρωπαϊκή τσιμεντοβιομηχανία αποτελούνται από καθαρή βιομάζα, όπως το κρέας και τα οστεάλευρα και η λυματολάσπη. Επιπλέον, τα εναλλακτικά καύσιμα που χρησιμοποιούνται στην τσιμεντοβιομηχανία περιέχουν ένα υψηλό επίπεδο βιομάζας λόγω της περιεκτικότητάς του σε π.χ. ξύλο ή τα κλάσματα χαρτιού (CEMBUREU).

Καλλιέργειες βιομάζας. Για παράδειγμα φλοιός ρυζιού, κοτσάνια καλαμποκιού, φουντούκι, φλοιό καρύδας, ζαχαροκάλαμο, ελαιοκράμβη, είναι από τις πολλές ποικιλίες της βιομάζας που καίγονται σε κλιβάνους τσιμέντου (Murray & Price, 2008).

Λάσπη μονάδων επεξεργασίας λυμάτων και μονάδων επεξεργασίας νερού
Υπολείμματα αγροτικής καλλιέργειας και επεξεργασίας αγροτικών προϊόντων (π.χ. φλοιοί ρυζιού, στελέχη βαμβακιού κ.ά.), δηλαδή υπολείμματα συγκομιδής, κατάλοιπα αγροτοβιομηχανιών τα οποία έχουν χαμηλό όγκο και πυκνότητα ενέργειας, υπολείμματα από μεγάλες εμπορικά αγροκτήματα και αγρο-βιομηχανίες που μπορούν να μετατραπούν σε σχετικά υψηλής ποιότητας και με υψηλή θερμογόνο δύναμη καύσιμα.

Παραπροϊόντα ζώων και Ζωικά άλευρα, Το κρέας και τα οστά των ζώων (ονομάζεται επίσης ζωικά άλευρα) χρησιμοποιείται σε αρκετούς κλιβάνους τσιμέντου, ιδίως στη Δυτική Ευρώπη.

Απορρίμματα επεξεργασίας ξύλου, Ανακυκλωμένη ξυλεία και Χαρτί και χαρτόνι

Πίνακας 1-4: Υλικά που χρησιμοποιούνται ως εναλλακτικά καύσιμα από τις βιομηχανίες τσιμέντου (Πηγή: Κολοβός, 2007)

Βιομηχανικά απόβλητα	Πετρελαιοειδή, λιπαντικά Ιλύς από την παραγωγή ασφάλτου Απόβλητα χημικής βιομηχανίας Απόβλητα άνθρακα από μονάδες παραγωγής λιπασμάτων Διαλύτες
Συνθετικά Υλικά	Επαναχρησιμοποιημένα ελαστικά Πλαστικά Πολυμερή Σκόνη από την παραγωγή γραφίτη Χρησιμοποιημένες μπαταρίες
Γεωργικά Απόβλητα	Παραπροϊόντα από την αποφλοίωση ρυζιού, σιτηρών, καρύδας, κακάο Παραπροϊόντα της βιομηχανίας ξύλου και χάρτου Παραπροϊόντα της βιομηχανίας τροφίμων
Άλλες πηγές	Σχιστόλιθοι που περιέχουν πετρέλαιο Αστικά απόβλητα

Όμως για την χρήση όλων των εναλλακτικών καυσίμων, που χρησιμοποιούνται σε υποκατάσταση των συμβατικών στερεών καυσίμων, πρέπει να πληρούνται αυστηρές προδιαγραφές. Είναι απαραίτητο να μην επιβαρύνουν την υγεία και την ασφάλεια των εργαζομένων και το περιβάλλον γενικότερα, αλλά ταυτόχρονα πρέπει για να εξασφαλίζεται η ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων.

Επιπλέον θα πρέπει να διευκρινιστεί ότι οι κλίβανοι των βιομηχανιών παραγωγής τσιμέντου δεν είναι αποτεφρωτές. Δηλαδή δε δύναται να χρησιμοποιούνται στους κλιβάνους της τσιμεντοβιομηχανίας τα αστικά απορρίμματα για απευθείας καύση, αλλά αφού υποστούν προ-επεξεργασία δηλαδή ως προϊόντα μονάδων επεξεργασίας αποβλήτων (όπως π.χ. τα SRF-Solid Recovered Fuel από εργοστάσια ανακύκλωσης, ή αποξηραμένη ιλύ βιολογικού καθαρισμού (Dry Sewage Sludge) από κέντρα επεξεργασίας λυμάτων).

Η χρήση υλικών ως δευτερογενών καυσίμων υπόκειται σε συμμόρφωση με διάφορους περιορισμούς, οι οποίοι προκύπτουν κυρίως από την υπάρχουσα εθνική ή διεθνή νομοθεσία, τη σταθερότητα στην ποιότητα του τελικού προϊόντος, τη διαδικασία παραγωγής, την επιπρόσθετη περιβαλλοντική επιβάρυνση, την υγιεινή και ασφάλεια στους χώρους εργασίας, την αποδοχή από τις αρχές, την τοπική κοινωνία αλλά και τους ίδιους τους εργαζόμενους, την επίδραση στις λειτουργικές δαπάνες και

το κόστος των επενδύσεων. Επιπλέον ο σημαντικότερος όρος που πρέπει να πληρείται είναι η απαίτηση ότι κατά τη χρήση οποιασδήποτε δευτερογενούς πρώτης ύλης ή καυσίμου, οι φυσικομηχανικές ιδιότητες του παραγόμενου τσιμέντου και η συμπεριφορά του ως δομικό υλικό πρέπει να παραμένουν ανεπηρέαστες. Παράλληλα, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα αναγκαία μέτρα σχετικά με την περιβαλλοντική συμβατότητα του τσιμέντου που παράχθηκε με χρήση δευτερογενών πρώτων υλών ή καυσίμων, αλλά και οι πιθανές τροποποιήσεις της παραγωγικής διαδικασίας. Εκτός των παραπάνω, οι δευτερογενείς πρώτες ύλες θα πρέπει να βρίσκονται σε επάρκεια τέτοια που να εξασφαλίζει την αξιοποίησή τους σε βιομηχανική κλίμακα, να χαρακτηρίζονται από μια σταθερότητα στη σύσταση, ενώ να βρίσκονται ήδη σε μια μορφή που να εξασφαλίζει έναν υψηλό βαθμό ομοιογένειας.

Η ισχύουσα η νομοθεσία θέτει περιορισμούς για τη χρήση δευτερογενών πρώτων υλών και καυσίμων, σύμφωνα με το είδος, τον τύπο και την ποσότητα, από όπου προκύπτει συνήθως και μια ταξινόμηση-προτυποποίηση. Στην Ελλάδα το πεδίο εφαρμογής καθορίζεται από τις νομοθετικές διατάξεις ΚΥΑ 2487/455/199 (ΦΕΚ 196/Β/ 1999) και την οδηγία 94/67 της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την πρόληψη και τον περιορισμό της ρύπανσης του περιβάλλοντος από τη συναποτέφρωση αποβλήτων στην τσιμεντοβιομηχανία. Στον Πίνακα 1-5 παρουσιάζονται οι οριακές τιμές εκπομπών για εγκαταστάσεις τσιμεντοβιομηχανίας που χρησιμοποιεί δευτερογενείς πρώτες ύλες και καύσιμα

Πίνακας 1-5: Οριακές τιμές εκπομπής για εγκαταστάσεις τσιμεντοβιομηχανίας που χρησιμοποιεί δευτερογενείς πρώτες ύλες και καύσιμα [ΕΕ 94/67, ΚΥΑ 2487/455/199]

Μετρούμενη παράμετρος	Μέσες ημερήσιες τιμές (mg/m^3)	Μέσες τιμές ημέριου (mg/m^3)
Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)	50	-
Ολική σκόνη	10	30
Οργανικές ουσίες υπό τη μορφή αερίων και ατμών (TOC)	10	20
Υδροχλώριο (HCl)	10	60
Υδροφθόριο (HF)	1	4
Διοξείδιο του Θείου (SO_2)	50	200

Μέσες τιμές ημιώρου έως το πολύ 8 ωρών (mg/m ³)		
Για νέες μονάδες	Για υφιστάμενες μονάδες	
Κάδμιο (Cd) και ενώσεις του	0.05	0.1
Θάλλιο (Tl) και ενώσεις του	0.05	0.1
Υδράργυρος (Hg) και ενώσεις του	0.05	0.1
Αντιμόνιο (Sb) και ενώσεις του	0.5	1.0
Αρσενικό (As) και ενώσεις του	0.5	1.0
Μόλυβδος (Pb) και ενώσεις του	0.5	1.0
Χρώμιο (Cr) και ενώσεις του	0.5	1.0
Κοβάλτιο (Co) και ενώσεις του	0.5	1.0
Χαλκός (Cu) και ενώσεις του	0.5	1.0
Μαγγάνιο (Mn) και ενώσεις του	0.5	1.0
Νικέλιο (Ni) και ενώσεις του	0.5	1.0
Βανάδιο (V) και ενώσεις του	0.5	1.0
Κασσίτερος (Sn) και ενώσεις του	0.5	1.0

Στην περίπτωση που τα εναλλακτικά καύσιμα που εφαρμόζονται στην παραγωγική διαδικασία παραγωγής κλίνκερ περιέχουν συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων, τα βαρέα μέταλλα που εισάγονται στο κλίβανο εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα ή ενσωματώνονται στις φάσεις του κλίνκερ και κατά κανόνα δεν επηρεάζουν αρνητικά τα ποιοτικά χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες του τσιμέντου όταν οι συγκεντρώσή τους δεν υπερβαίνει τα 300-400 mg/kg (ppm). Με εξαίρεση τα μέταλλα που εμφανίζουν μεγάλη πτητικότητα, όπως ο υδράργυρος (Hg) και το θάλλιο (Tl), η κατακράτηση από το τελικό προϊόν της διεργασίας (κλίνκερ) των βαρέων μετάλλων αρσενικό (As), αντιμόνιο (Sb), βάριο (Ba), βηρύλλιο (Be), κάδμιο (Cd), χρώμιο (Cr), μόλυβδο (Pb), νικέλιο (Ni), βανάδιο (V) και ψευδάργυρο (Zn) πλησιάζει το 100%, διασφαλίζοντας ότι οι ατμοσφαιρικές εκπομπές της διεργασίας πληρούν ακόμη και τους πιο αυστηρούς περιορισμούς.

Η εκπλυσιμότητα (toxicity characteristic leaching procedure TCLP) των βαρέων μετάλλων As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn υπόκειται σε πολύ αυστηρά όρια σύμφωνα με τα ισχύοντα πρότυπα και είναι μια από τις βασικές δοκιμές η οποία πραγματοποιείται πριν την χρήση των εναλλακτικών καυσίμων.

Οι εκπομπές διοξειδίου του θείου (SO₂), μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και πτητικών οργανικών ενώσεων (Volatile Organic Compounds, VOC) οφείλονται

κυρίως στον οργανικό άνθρακα και το θειούχο σίδηρο (FeS) των πρώτων υλών (συμβατικών και εναλλακτικών καυσίμων). Επισημαίνεται ότι σύμφωνα με τις καταγραφές, που έχουν γίνει από τις αρμόδιες αρχές, οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία τσιμέντου και ειδικότερα κατά τη διεργασία παραγωγής κλίνκερ, στην Ελλάδα, έχουν ελάχιστες ή μηδαμινές συγκεντρώσεις FeS. Ομοίως οι τιμές των διοξειδίων στις ατμοσφαιρικές εκπομπές είναι μικρότερες από 0.05ng/t, ενώ από τα αποτελέσματα των ισοζυγίων προκύπτει ότι τα ποσοστά δέσμευσης του υδράργυρου (Hg) και του μόλυβδο (Pb) ανέρχονται σε περίπου 99.5% και συνεπώς οι εκπομπές τους στην ατμόσφαιρα είναι χαμηλότερες του 0.05mg/m³.

Στην περίπτωση που τα καύσιμα (συμβατικά και εναλλακτικά) περιέχει συγκεντρώσεις χλωρίου (Cl) ή θείου (S), η καύση τους οδηγεί σε σχηματισμό όξινων αερίων όπως υδροχλώριο (HCl) και οξείδια του θείου (SO_x). Τα αέρια αυτά εξουδετερώνονται κατά την κατακράτησή τους από το αλκαλικό περιεχόμενο του κλιβάνου σχηματίζοντας χλωριούχα και θειϊκά άλατα του ασβεστίου, καλίου και νατρίου. Το ποσοστό του χλωρίου στο παραγόμενο τσιμέντο πρέπει να μην υπερβαίνει το 0.1% w/w, και συνεπώς η πιθανή ποσότητα χρήσης των εναλλακτικών καυσίμων πρέπει να συμμορφώνεται με το όριο αυτό.

Τέλος θα πρέπει να σημειωθεί ότι ως εναλλακτικά καύσιμα δεν χρησιμοποιούνται από τις βιομηχανίες τσιμέντου ραδιενεργά απόβλητα ή οργανικά κατάλοιπα από εγκαταστάσεις νοσοκομείων αν και δεν υπάρχουν τεχνολογικοί περιορισμοί για αυτά τα απόβλητα. (Κολοβός, 2007)

1.2.3 Εναλλακτικά καύσιμα που χρησιμοποιήθηκαν

Τα εναλλακτικά καύσιμα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική μελέτη είναι η βιολογική ιλύς (BS – Biological Sludge), τα προερχόμενα από απόρριψη ή ανάκτηση αποβλήτων καύσιμα RDF (Refuse Derived Fuels) και τα προερχόμενα από λάστιχα στο τέλος του κύκλου ζωής τους καύσιμα TDF (Tire Derived Fuel).

Στις ενότητες που ακολουθούν δίνονται αναλυτικά στοιχεία για αυτά τα εναλλακτικά καύσιμα.

1.2.3.1 Βιολογική Ιλύς (Biological sludge):

Η βιολογική ιλύς παράγεται στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας νερού και βιολογικής επεξεργασίας. Η αξιοποίηση της ιλύος μπορεί να γίνει με την καύση σε θερμικά εργοστάσια παραγωγής ενέργειας μαζί με ορυκτά καύσιμα, ή σε εργοστάσια παραγωγής τσιμέντου υποκαθιστώντας τα ορυκτά καύσιμα. Για την χρήση της βιολογικής ιλύος ως καύσιμο δεν είναι απαραίτητη η σταθεροποίηση της, αφού η μη σταθεροποιημένη ιλύς έχει μεγαλύτερη θερμική αξία. Επιπλέον η ιλύς θεωρείται ένα φθηνό εναλλακτικό καύσιμο.

Μειονεκτήματα στη χρήση της ιλύος ως εναλλακτικό καύσιμο είναι ο μεγάλος όγκος της με συνέπεια τις επιπτώσεις στο περιβάλλον λόγω των μεταφορών καθώς και η υγρασία της που είναι αρνητικός παράγοντας για την καύση. Για το λόγο αυτό η βέλτιστη επεξεργασία της ιλύος για επαναχρησιμοποίηση στη βιομηχανία είναι η θερμική ξήρανση της μη σταθεροποιημένης λάσπης εξασφαλίζοντας με αυτό τον τρόπο μικρότερο όγκο για τη μεταφορά και υψηλή καθαρή θερμική αξία.

Τα πλεονεκτήματα από τη χρήσης της βιολογικής ιλύος στη τσιμεντοβιομηχανία είναι η μη δημιουργία στάχτης και υπολειμμάτων, αφού το μη πτητικό μέρος της ιλύος ενσωματώνεται με μορφή αδιάλυτων ενώσεων στο παραγόμενο τσιμέντο, με αποτέλεσμα την μη επιβάρυνση των ΧΥΤΑ από τις στάχτες. Επιπλέον μαζί με τα ανόργανα υπολείμματα ενσωματώνονται και όλα τα περιεχόμενα στην ιλύ βάρια μέταλλα σε ποσοστό μεγαλύτερο από 99%, τα οποία αφού οξειδωθούν στις υψηλές θερμοκρασίες καύσης γίνονται αδιάλυτα συστατικά του τσιμέντου. Εξαιρέση αποτελεί ο πτητικός υδράργυρος, ο οποίος μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα ρύπανσης της ατμόσφαιρας. Για την χρήση της ιλύος στη βιομηχανία θα πρέπει να ικανοποιούνται όλα τα κριτήρια που ορίζει η Οδηγία 2000/76/ΕΕ για τη συναποτέφρωση (αέρια ρύπανση, στάχτες, υγρά απόβλητα κτλ.).(Αγγελάκης et al, 2005)

Επιπλέον η ιλύς ως βιομάζα δε προκαλεί εκπομπές CO₂ όπως αυτές θεωρούνται από το πρωτόκολλο του Κιότο. Παρόλα αυτά όμως υπάρχουν πολύ αυστηροί κανόνες για το πώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να απαιτείται προσαρμογή της διάταξης.

Η ιλύς για συν-αποτέφρωση ξηραίνεται, κονιοποιείται και με χρήση

πεπιεσμένου αέρα τροφοδοτείται στους καυστήρες. Κατά τη χρήση η ιλύς προαναμιγνύεται με τον άνθρακα και τροφοδοτήθηκε μαζί, ή τα δύο καύσιμα δύναται να τροφοδοτηθούν ξεχωριστά εάν χρησιμοποιούνται καυστήρες πολλαπλών καυσίμων.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι περιβαλλοντικές ανησυχίες που σχετίζονται με την αποτέφρωση των αποβλήτων μειώνεται σημαντικά όταν χρησιμοποιείται βιολογική ιλύς ως εναλλακτικό καύσιμο στους κλιβάνους τσιμέντου. Το οργανικό μέρος καταστρέφεται και το ανόργανο μέρος, συμπεριλαμβανομένων των βαρέων μετάλλων, παγιδεύεται και ενσωματώνεται στο προϊόν (CEMBUREAU, 1997). Η χρήση ως εναλλακτικό καύσιμο στη τσιμεντοβιομηχανία συντελεί στη μείωση των εκπομπών CO₂ σε σχέση με τις εκπομπές που δημιουργούνται από τα συμβατικά καύσιμα. Επιπλέον η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας του κλιβάνου τσιμέντου (1450°C) καθώς και η ταχεία ψύξη των αερίων εμποδίζει το σχηματισμό διοξινών/φουρανίων, ενώ τα τυχόν βαρέα μέταλλα που δύναται να υπάρχουν στην ιλύ παγιδεύονται στο υγρό κλάσμα, στη ζώνη πυροσυσσωμάτωσης του κλιβάνου.

Η καύση της βιομάζας αναμένεται να οδηγήσει σε υψηλότερα επίπεδα εκπομπών SO₂ όμως κατά την παραγωγική διαδικασία του τσιμέντου το επίπεδο εκπομπών SO₂ είναι σημαντικά μικρότερο διότι απορροφούνται από το οξειδίο του ασβεστίου στη διάταξη του κλιβάνου (Cement Industry Federation [CIF], 2003). Ωστόσο, στους κλιβάνους παραγωγής κλίνκερ το θείο δύναται να προκαλέσει σκληρές συσσωρεύσεις λόγω του σχηματισμού των θεικών ενώσεων (Conesa et al., 2008). Επιπλέον έχει παρατηρηθεί ότι το αλκαλικό περιβάλλον του κλιβάνου απομακρύνει τα ίχνη HCl και / ή HF που παράγονται κατά τη διάρκεια της πυροδότησης. (Zabaniotou & Theofilou, 2008). Στην περίπτωση που τα επίπεδα συγκέντρωσης του υδραργύρου (Hg) και το θάλλιου (Tl) είναι υψηλά, θα πρέπει να γίνεται έλεγχος των εν λόγω πτητικών βαρέων μετάλλων. Για να αποφευχθεί ένα τέτοιο ενδεχόμενο, αν και το επίπεδο του Hg στην καύση της ιλύς στην τσιμεντοβιομηχανία μπορεί να φτάσει τα 16mg/kg, θα πρέπει να χρησιμοποιείται βιομάζα με μέγιστη περιεκτικότητα σε υδράργυρο περίπου 0,5mg/kg. (Zabaniotou & Theofilou, 2008).

Η υψηλή περιεκτικότητα σε άζωτο της ιλύος δεν συνεπάγεται την αύξηση των εκπομπών NO_x στον κλίβανο διότι οι χαμηλές θερμοκρασίες καύσης (< 1200°C)

καταστέλλουν το σχηματισμό NO_x (Chinyama, 2011). Ωστόσο στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί μεγάλη ποσότητα ιλύος ως εναλλακτικό καύσιμο κατά την καύση στον κλίβανο δημιουργείται τέφρα υψηλής περιεκτικότητας σε SiO₂, Al₂O₃ και Fe₂O₃ που θα μπορούσε να επηρεάσει τη ποιότητα του τσιμέντου. Επιπλέον μεγάλη ποσότητα χλωρίου στην ιλύ, ποσότητα μεγαλύτερη από 0,2 έως 0,5% δύναται να προκαλέσει απόφραξη στους κυκλώνες του προθερμαντήρα του κλιβάνου. (Chinyama, 2011).

1.2.3.2 RDF (Refuse Derived Fuels) Καύσιμα προερχόμενα από απόρριψη ή ανάκτηση Αποβλήτων

Η διαχείριση των αστικών και στερεών αποβλήτων (ΑΣΑ) είναι μία από τις πιο σημαντικές προκλήσεις που αντιμετωπίζουν οι αστικές κοινότητες σε όλο τον κόσμο και έως σήμερα. Τα ΑΣΑ έχουν διαφορετική σύσταση η οποία εξαρτάται από την προέλευση τους, δηλαδή από τη γεωγραφική περιοχή και τις βιοτικές συνήθειες της εν λόγω περιοχής. Για τη διαχείριση τους έχουν χρησιμοποιηθεί πολλές εξελιγμένες τεχνολογίες και στρατηγικές όπως η θερμική επεξεργασία ή ανάκτηση ενέργειας από απόβλητα για την δημιουργία καθαρότερων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας καθώς και η χρήση καυσίμων που προέρχονται από απορρίμματα. Το RDF είναι στερεό ανακτημένο καύσιμο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υποκατάστατο για τα συμβατικά ορυκτά καύσιμα. Η σύσταση του αποτελείται κυρίως από μη επιβλαβή βιομηχανικά απορρίμματα, το ξηραμένο μέρος των οικιακών απορριμμάτων, πλαστικά, χαρτί, χαρτόνι, ξυλεία και συνθετικά υφάσματα.

Ο όρος RDF μπορεί να ερμηνευτεί διαφορετικά σε κάθε χώρα λόγω της διαφορετικής χρήσης και ισχύουσας νομοθεσίας. Για παράδειγμα στο Ηνωμένο Βασίλειο ο όρος RDF χρησιμοποιείται ως στερεό κλάσμα υψηλής θερμογόνου δύναμης το οποίο απομένει από την ανάκτηση υλικών προερχόμενων από ΑΣΑ. Για την παραγωγή του RDF, τα ΑΣΑ υπόκεινται σε επεξεργασία έτσι ώστε να χάσουν την υψηλή περιεχόμενη υγρασία τους, το μεγάλο εύρος σωματιδίων και το υψηλό περιεχόμενό τους σε τέφρα. Στην περίπτωση που το RDF χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο πέρα από την υψηλή θερμογόνο δύναμη και τη σταθερή σύσταση πρέπει να τηρεί και τις βιομηχανικές προδιαγραφές (ποιοτικά χαρακτηριστικά). Σημειώνεται ότι τόσο η ποιότητα όσο και η θερμογόνο δύναμη του RDF είναι ιδιότητες με βαρύνουσα

σημασία, οι οποίες συνδέονται με τα ποιοτικά χαρακτηριστικά και την ποσότητα των παραγόμενων κατά τη καύση του αερίων εκπομπών.

Για την παραγωγή του RDF στα ΑΣΑ εφαρμόζονται τεχνικές μηχανικής-βιολογικής επεξεργασίας με τις οποίες διαχωρίζονται σε ξεχωριστά ρεύματα όπως τα μέταλλα, τα αδρανή υλικά (γυαλί κλπ), το οργανικό κλάσμα το οποίο υφίσταται στη συνέχεια βιολογική επεξεργασία και το κλάσμα υψηλής θερμογόνου δύναμης (RDF). Το RDF παράγεται σε μορφή cRDF (coarse RDF) και δύναται να αξιοποιηθεί απευθείας ως καύσιμο ή υφίσταται περαιτέρω επεξεργασία (ζήρανση και κοκκοποίηση) έτσι ώστε να μετατραπεί σε ξηρή μορφή, παστίλιες dRDF (dry RDF) προς καύση. Το RDF σε ξηρή μορφή μπορεί να συσκευαστεί και να αποθηκευτεί με σκοπό τη μεταφορά του σε απομακρυσμένες μονάδες αξιοποίησης (Καραγιάννης, 2012).

Το RDF μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εγκαταστάσεις αποκλειστικής αποτέφρωσης RDF, ως καύσιμο στην τσιμεντοβιομηχανία, σε εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας (συναποτέφρωση σε λέβητες καύσης λιγνίτη) και σε άλλες βιομηχανίες (χαρτοβιομηχανία, βιομηχανίες παραγωγής χημικών, φαρμακοβιομηχανία, μεταλλουργία κ.α).

Από τη καύση του RDF σε κλιβάνους στη τσιμεντοβιομηχανία είναι δυνατόν να απελευθερωθούν στην ατμόσφαιρα ποικίλοι ρύποι, όπως αιωρούμενα σωματίδια (TSS), μονοξείδιο του άνθρακα (CO), διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), οξείδια του αζώτου (NO), διοξείδιο του θείου (SO₂), υδροχλώριο (HCl), υδροφθόριο (HF), μονοξείδιο του άνθρακα (CO), πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs), βαρέα μέταλλα, κ.ά. Η καύση του RDF σε κλιβάνους στη τσιμεντοβιομηχανία παρουσιάζει μείωση των παραγόμενων σε σχέση με άλλες χρήσεις εκπομπών CO₂, ενώ ταυτόχρονα αποτελεί μία οικονομικά συμφέρουσα λύση, στο πλαίσιο της αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών CO₂. Επιπλέον, από την καύση του η επίδραση των αέριων επιμολυντικών ουσιών είναι επίσης μικρή, λόγω των γενικά χαμηλών συγκεντρώσεων Cl και S που εν μέρει δεσμεύονται στο αλκαλικό περιβάλλον του τσιμέντου. Επίσης οι εκπομπές NO_x ενδέχεται να είναι μειωμένες λόγω των αλλαγών στις συνθήκες έψησης που επιφέρει η χρήση RDF, οι οποίες όμως συνήθως οδηγούν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες έψησης ή χαμηλότερη περισσεια αέρα.

Μειονέκτημα της καύσης RDF είναι η συμπεριφορά των βαρέων μετάλλων που περιέχει, δεδομένου ότι οι συγκεντρώσεις τους είναι υψηλότερες σε σχέση με τις συγκεντρώσεις τους στα συμβατικά καύσιμα (πχ συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων στο pet coke). Ωστόσο, η τελική επιβάρυνση από την καύση RDF, που περιέχει βαρέα μέταλλα, στις ατμοσφαιρικές εκπομπές και στην ποιότητα του παραγόμενου κλίνκερ εξαρτάται από το ποσοστό συμμετοχής του RDF (ή οποιουδήποτε εναλλακτικού καυσίμου) στο μίγμα καυσίμων που τροφοδοτείται στον κλίβανο, το οποίο με τη σειρά του εξαρτάται από την θερμογόνο δύναμη του χρησιμοποιούμενου RDF. (Καραγιάννης, 2012)

Από τα ιχνοστοιχεία, τα μη πτητικά μέταλλα που μπορεί να περιέχονται στο RDF ενσωματώνονται στο παραγόμενο κλίνκερ και η επιβάρυνση μεταφέρεται στα προϊόντα τσιμέντου. Τα ημι-πτητικά μέταλλα, όπως ο μόλυβδος και το κάδμιο, κατά ένα μέρος ενσωματώνονται στο παραγόμενο κλίνκερ ενώ κατά το υπόλοιπο μέρος τους συμυκνώνονται στα αιωρούμενα σωματίδια και δεσμεύονται στα φίλτρα του συστήματος αντιρρύπανσης της εγκατάστασης. Από τα πτητικά ιχνοστοιχεία, ο υδράργυρος και το θάλλιο κατά ένα μέρος συμυκνώνονται στην επιφάνεια των σωματιδίων και κατακρατούνται στα φίλτρα αντιρρύπανσης της εγκατάστασης, αλλά κατά το μεγαλύτερο μέρος τους απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα σε αέρια φάση.

Από τις πτητικές οργανικές ενώσεις που εκπέμπονται, το σημαντικότερο πρόβλημα δημιουργείται από τις διοξίνες (PCDD/Fs) 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. Ο όρος διοξίνες (PCDD/Fs) περιλαμβάνει μια ομάδα συνολικά 210 διοξινών και φουρανίων, εκ των οποίων οι διοξίνες (75 ενώσεις) αποτελούν χλωριωμένα παράγωγα της dibenzo-pdioxin και τα φουράνια (135 ενώσεις) χλωριωμένα παράγωγα του διβενζοφουρανίου (dibenzofuran). Οι διοξίνες σχηματίζονται μέσω ετερογενών αντιδράσεων από πρόδρομες αλογονούχες ενώσεις στην επιφάνεια σωματιδίων, όπου έχουν προσροφηθεί, με την καταλυτική επίδραση βαρέων μετάλλων (π.χ. Cu) και στη θερμοκρασιακή περιοχή 450°C-200°C. (Χριστόλη Μ., Καπετάνιου Ε., Μαρκάτου Ν.Χ.).

Οι πρόδρομες αλογονούχες ενώσεις είναι προϊόντα ατελούς καύσης οργανικών ενώσεων και ενώσεων χλωρίου και μέσω μιας πολύπλοκης σειράς αντιδράσεων που καταλύονται από βαρέα μέταλλα σχηματίζουν διοξίνες και άλλα χλωριωμένα ιχνοστοιχεία. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι πρόδρομες αλογονούχες ενώσεις, από τις οποίες παράγονται οι διοξίνες μέσω ετερογενών αυτοκαταλυόμενων αντιδράσεων, σχηματίζονται:

(α) στον περιστροφικό κλίβανο και στον προασβεστοποιητή, ως προϊόντα ατελούς καύσης οργανικών ενώσεων και ενώσεων του χλωρίου, που ενδεχομένως περιέχονται στα εναλλακτικά καύσιμα (RDF).

(β) Στην περιοχή προθέρμανσης της πρώτης ύλης (post-combustion zone), ως προϊόντα ατελούς καύσης οργανικών ενώσεων που περιέχονται στις εναλλακτικές πρώτες ύλες και ενώσεων του χλωρίου το οποίο ενδεχομένως περιέχεται στα εναλλακτικά καύσιμα (RDF).

Τα σημαντικότερα μέτρα ελέγχου της παραγωγής διοξινών είναι η ταχεία ψύξη των απαερίων στην κρίσιμη θερμοκρασιακή περιοχή (θερμοκρασία 450°C-200 °C) και η διατήρηση της θερμοκρασίας στα φίλτρα κατακράτησης σωματιδίων κάτω από 200°C (Χριστόλη Μ., Καπετάνιου Ε., Μαρκάτου Ν.Χ.).

Επιπλέον το θείο συνδέεται με το σχηματισμό ανεπιθύμητων φάσεων στην είσοδο του περιστροφικού κλιβάνου, οι οποίες μεταφέρονται με τα απαέρια προς την έξοδό του, όπου διασπώνται αυξάνοντας τη συγκέντρωσή τους στο σύστημα, δημιουργώντας έναν κύκλο ενίσχυσης. Η αυξανόμενη συγκέντρωσή θείου στο σύστημα μπορεί να οδηγήσει σε εμφράξεις στους κυκλώνες του ασβεστοποιητή, μπλοκάροντας την κίνηση της φαρίνας. Ωστόσο, το αλκαλικό περιβάλλον καθώς και οι κύριες φάσεις διεργασίας του κλίνκερ είναι σε θέση να απορροφήσουν ένα μέρος του θείου και να το εξάγουν από το σύστημα μετριάζοντας τον κύκλο ενίσχυσης. Ομοίως το χλώριο συμπεριφέρεται παρόμοια με το θείο, δημιουργώντας επίσης έναν κύκλο ενίσχυσης και προκαλώντας ανάλογα προβλήματα στη ροή του υλικού στον κλίβανο. Σε περιπτώσεις υψηλών συγκεντρώσεων χλωρίου και θείου, μία από τις πλέον δημοφιλείς λύσεις είναι η κατασκευή συστήματος παράκαμψης "by pass" η οποία επιτρέπει την απομάκρυνση μέρους των δύο αυτών στοιχείων με την μορφή αερίων, με σημαντική επίδραση ωστόσο στην ειδική θερμική κατανάλωση του συστήματος έψησης (Καραγιάννης, 2012).

1.2.3.3 TDF (Tire Derived Fuel) Καύσιμα προερχόμενα από λάστιχα στο τέλος του κύκλου ζωής τους

Τα ελαστικά αυτοκινήτων στο τέλος του κύκλου ζωής τους μπορούν να προκαλέσουν κίνδυνο για το περιβάλλον εάν καούν ανεξέλεγκτα ή εάν διατεθούν σε χώρο υγειονομικής ταφή. Η χρήση των χρησιμοποιημένων ελαστικών ως εναλλακτικά καύσιμα σε κλιβάνους τσιμέντου όπου επιτυγχάνεται η καύση τους υπό ελεγχόμενες συνθήκες είναι μία φιλική προς το περιβάλλον πηγή ενέργειας.

Τα χρησιμοποιημένα ελαστικά στο τέλος του κύκλου ζωής τους μπορούν να αξιοποιηθούν ως καύσιμα σε τσιμεντοβιομηχανίες, βιομηχανικούς λέβητες, βιομηχανίες παραγωγής χαρτοπολλτού και χαρτοποιίες, σε εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας, καθώς και ειδικές εγκαταστάσεις καυσίμων (Nkosi et al., 2013).

Πίνακας 1-6: Σύσταση χρησιμοποιημένων ελαστικών, % w/w, στην Ευρωπαϊκή Ένωση (Πηγή: European Commission,)

Υλικό	Ελαστικά επιβατικών οχημάτων	Ελαστικά βαρέων οχημάτων
Ελαστομερές	48	43
Carbon black	22	21
Μέταλλα	15	27
Πλέγμα	5	-
Οξείδιο του Ψευδαργύρου (ZnO)	1	2
Θείο (S)	1	1
Πρόσθετα	8	6

Επισημαίνεται ότι η σύμφωνα με την Οδηγία της Ευρωπαϊκής Επιτροπής για την υγειονομική ταφή απαγορεύεται η διάθεση των ολόκληρων χρησιμοποιημένων ελαστικών σε χώρους υγειονομικής ταφής από το έτος 2003 και τη διάθεση τεμαχισμένων χρησιμοποιημένων ελαστικών από το έτος 2006. Επιπλέον, η Ευρωπαϊκή Οδηγία 2000/53, σχετικά με το τέλος της ζωής των οχημάτων, προϋποθέτει ότι το 80% του βάρους ενός οχήματος στο τέλος της ζωής επαναχρησιμοποιείται ή ανακυκλώνεται και οι σχετικές με τα

χρησιμοποιημένα/άχρηστα ελαστικά διαδικασίες, διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην επίτευξη του στόχου αυτού. Επιπλέον σύμφωνα με την οδηγία της ΕΕ έως το 2005 το 65% κατ' ελάχιστο των χρησιμοποιημένων ελαστικών θα έπρεπε είτε να ανακυκλώνεται είτε να αξιοποιείται ενεργειακά, ενώ το 25% να αναγομώνεται. Στις Η.Π.Α., περίπου στις εννέα από τις διακόσιες βιομηχανικές μονάδες παραγωγής τσιμέντου χρησιμοποιούνται ελαστικά, στο τέλος του κύκλου ζωής τους, ως δευτερογενή καύσιμα και ο αριθμός αυτός αναμένεται να αυξηθεί. Αν εξαιρέσουμε την περίπτωση της ελεγχόμενης πυρόλυσης, η οποία παρουσιάζει μεγάλα τεχνολογικά προβλήματα σχετικά με την ποιότητα των παραγομένων προϊόντων που δεν είναι ικανά να επαναχρησιμοποιηθούν (carbon black), η κύρια λύση διαχείρισης των χρησιμοποιημένων ελαστικών είναι η καύση τους στις τσιμεντοβιομηχανίες (Κολοβός, 2007).

Τα ελαστικά μπορούν να καούν πλήρως σε κλιβάνους της βιομηχανίας παραγωγής τσιμέντου με άμεσο αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους παραγωγής και την αύξηση της αποδοτικότητας. Επίσης μπορούν να τεμαχιστούν και να αναμειχθούν με άνθρακα ή με RDF ή με παραπροϊόντα ξυλείας όπως το πριονίδι. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι με τη χρήση των ελαστικών ως καύσιμο επιτυγχάνεται η μείωση της χρήση συμβατικών καυσίμων χωρίς αύξηση των αέριων ρύπων.

Επιπλέον η υψηλή θερμογόνο δύναμη των ελαστικών (περίπου 31.400 kJ / kg) συντελεί στην αποτελεσματική χρήση τους ως εναλλακτικό καύσιμο για κλιβάνους τσιμέντου. Το καύσιμο TDF υποκαθιστά τον άνθρακα και/ή άλλα συμβατικά καύσιμα στο κλίβανο της διεργασίας παραγωγής κλίνκερ και ειδικότερα ένας τόνος (1ton) TDF δύναται να υποκαταστήσει 1.2 ton άνθρακα (coal).

Τα ελαστικά κατασκευάζονται από ένα περιορισμένο εύρος υλικών και έχουν χαμηλά επίπεδα υγρασίας. Επιπλέον το 88% του ελαστικού αποτελείται από άνθρακα και οξυγόνο, το οποία συντελούν στην ταχεία καύση του και τη σχετικά υψηλή θερμιδική του αξία. Δοκιμές στη βιομηχανία, έχουν δείξει ότι το κόστος της χρήσης περίπου 20% τεμαχισμένου ελαστικού ως υποκατάστατο καύσιμο είναι παρόμοιο με το κόστος χρήσης του pet coke. (Conesa et al, 2008.). 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 διεργασίας σκλήρυνσης του

τσιμέντου, λόγω των μεγάλων ποσοτήτων ψευδαργύρου που περιέχονται (Pipilikaki et al, 2005).

Η πρακτική που εφαρμόζονται διεθνώς για τη διαχείριση των χρησιμοποιημένων ελαστικών είναι είτε καύση ολόκληρων ελαστικών όπου απαιτείται η διαμόρφωση του εξοπλισμού προκειμένου να γίνεται ασφαλής και σταθερή τροφοδοσία των κλιβάνων, είτε καύση τεμαχισμένων ελαστικών η οποία πλεονεκτεί στην περιβαλλοντική απόδοση. Επιπλέον η χρήση ολόκληρων ελαστικών είναι μία εύκολη διαδικασία απόκτησης των ελαστικών από το μέρος παραγωγής τους και η απλοποίηση της διαδικασίας της τροφοδοσίας και ζύγισης τους, μπορούν να αποτελέσουν θετική δαπάνη (στην Ελλάδα τα εργοστάσια παραγωγής τσιμέντου επιδοτούνται για τη καύση ολόκληρων ελαστικών) (Η κύρια διαφορά μεταξύ της χρήσης ως εναλλακτικό καύσιμο ολόκληρων ελαστικών και των επεξεργασμένων (τεμαχισμένων ελαστικών) είναι η θερμοδική τους αξία. Πιο συγκεκριμένα η περαιτέρω επεξεργασία του ελαστικού έτσι ώστε να απομακρυνθεί το περιεχόμενο σύρμα ή κάποια άλλα σώματα από την κύρια μάζα του προσδίδει μεγαλύτερη θερμοδική αξία στο εν δυνάμει καύσιμο υλικό (Pipilikaki et al,2005).

Χρησιμοποιημένα ελαστικά διατίθενται σε διάφορες γεωγραφικές περιοχές μιας χώρας, όμως το κόστος μεταφοράς τους είναι πολύ υψηλό, διότι το φαινόμενο βάρος τους κυμαίνεται μεταξύ 100 έως 150 kg/m³. Γι' αυτό και στις χώρες, όπου λόγω γεωγραφίας, απαιτούνται μεγάλες αποστάσεις μεταφοράς, τα ελαστικά τεμαχίζονται σε κομμάτια με διαστάσεις μικρότερες των 50 mm, οπότε και το φαινόμενο βάρος τους πενταπλασιάζεται (Κολοβός, 2007).

Αφενός η χρήση των ελαστικών στη τσιμεντοβιομηχανία πλεονεκτεί λόγω της περιεκτικότητας τους σε χάλυβα, καθώς μπορεί να υποκαταστήσει εν μέρει τις απαιτήσεις σε σίδηρο (απολείσματα σιδήρου) της διεργασίας παραγωγής κλίνκερ, αφετέρου όμως η παρουσία ψευδάργυρου (αν αυτή είναι σε μεγάλη ποσότητα και εάν η συνολική περιεκτικότητα όλων των καυσίμων υπερβεί τα 4000 parts per million (ppm)) επηρεάζει αρνητικά την ενυδάτωση και τη σκλήρυνση του τσιμέντου (Chinyama, 2011).

Ένα επίσης πλεονέκτημα του TDF ως καύσιμο είναι ότι η συγκέντρωση του θείου που περιέχουν είναι σε χαμηλότερο ποσοστό σε σχέση με το ποσοστό του αντίστοιχου συμβατικού καυσίμου pet coke.

Τα ελαστικά είναι υδρογονάνθρακας (πολυμερισμένο καουτσούκ) που προέρχεται από το πετρέλαιο και έχουν συνήθως χαμηλότερη περιεκτικότητα σε υγρασία, σε τέφρα σε σχέση με τον άνθρακα και μεγαλύτερη αποδοτικότητα χρήσης της θερμικής τους ενέργειας. Τα ελαστικά έχουν υψηλότερη αναλογία πτητικών στον δεσμευμένο άνθρακα με συνέπεια να βελτιώνεται η ικανότητά τους να καίγονται γρήγορα και πλήρως.

Οι υψηλές θερμοκρασίες (περίπου 1450°C) και οι μεγάλοι χρόνοι παραμονής, μεγέθη συνυφασμένα με τη λειτουργία των κλιβάνων τσιμέντου, παρέχουν επαρκείς συνθήκες για την καύση των ελαστικών με παράλληλα περιορισμένες εκπομπές καυσαερίων. Επιπλέον τα ελαστικά περιέχουν μικρότερη αναλογία C/H, προκαλούν μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και επομένως η καύση των παλαιών ελαστικών αντί για λιθάνθρακα δύναται να μειώσει το πρόβλημα των αέριων εκπομπών.

Η σύσταση των ελαστικών σε θείο (S) είναι παρόμοια και σε ορισμένες περιπτώσεις μικρότερη από τη σύσταση του άνθρακα (coal) ή άλλων συμβατικών καυσίμων και συνεπώς οι παραγόμενες από την καύση τους εκπομπές οξειδίων του θείου (SO_x) είναι μικρότερες. Ωστόσο η παρουσία ανθρακικού ασβεστίου συμβάλλει σημαντικά στον έλεγχο αυτών των εκπομπών.

Ομοίως η χαμηλότερη περιεκτικότητα των ελαστικών σε άζωτο (N) έχει ως αποτέλεσμα την μείωση των εκπομπών οξειδίων του αζώτου (NO_x) κατά τη καύση τους σε κλίβανο.

Λόγω των οξειδωτικών συνθηκών που επικρατούν μέσα στον κλίβανο κατά τη λειτουργία του η καύση των ελαστικών δεν αυξάνει τη δημιουργία εκπομπών υδρογονανθράκων. Η αύξηση της δημιουργίας εκπομπών υδρογονανθράκων σημειώνεται μόνο στις περιπτώσεις ατελούς καύσης.

Η καύση των ελαστικών στο εσωτερικό του κλιβάνου μπορεί να προκαλέσει υψηλά επίπεδα εκπομπών μονοξειδίου του άνθρακα (CO).

Τέλος, σχετικά με τις εκπομπές από βαρέα μέταλλα ομοίως με το RDF κατά τη καύση του TDF σε κλίβανο παραγωγής κλίνκερ τα βαρέα μέταλλα όπως ο ψευδάργυρος (Zn) ενσωματώνονται στο προϊόν (κλίνκερ).

2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) είναι η διαδικασία καταγραφής, ανάλυσης και αξιολόγησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός «προϊόντος» (χρήσης ενέργειας και πρώτων υλών, ρύπανση ατμόσφαιρας, νερού, εδάφους κ.α.) καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του, από τη σύλληψη του (εξόρυξη ή παραγωγή) έως την τελική απόρριψη ή την ανακύκλωση. Στον παραπάνω ορισμό, ο όρος «προϊόν» έχει ευρύτερη έννοια καθώς με την ΑΚΖ δύναται να μελετηθούν και να αναλυθούν μια σειρά από διεργασίες και δραστηριότητες της σύγχρονης κοινωνίας (Kloepffer, 1992). Ειδικότερα η ΑΚΖ είναι ένα σύνολο ερευνητικών εργαλείων που αποσκοπεί στην εκτίμηση όλων των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με ολόκληρη τη διάρκεια της ζωής ενός προϊόντος, μίας διεργασίας ή ενός συστήματος. Αυτό είναι εφικτό μέσω της παρακολούθησης του προϊόντος από τη «γέννηση» μέχρι την «ταφή» του (“*cradle to grave*”).

Ο κύκλος ζωής ενός προϊόντος περιλαμβάνει, την εξόρυξη των πρώτων υλών, την επεξεργασία, την παραγωγή, τη μεταφορά και τη χρήση του προϊόντος έως την τελική απόρριψη/ διάθεση ή την ανακύκλωση του. Μέσα από αυτή τη διαδικασία, επιτυγχάνεται ο εντοπισμός των δραστηριοτήτων/διεργασιών που προκαλούν τις σημαντικότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις/επιβαρύνσεις και επιτυγχάνεται η ποσοτικοποίηση της περιβαλλοντικής υποβάθμισης, με σκοπό τη βελτιστοποίηση του υπό εξέταση προϊόντος ή συστήματος.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ΑΚΖ έχει ένα διευρυμένο πεδίο εφαρμογής το οποίο αναπτύχθηκε ραγδαία τα τελευταία χρόνια. Ενδεικτικά οι εφαρμογές της ΑΚΖ ως διαγνωστικό εργαλείο αποσκοπούν (Udo de Haes et al. 2005:20) στη:

- Σύγκριση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων διαφορετικών προϊόντων με την ίδια λειτουργία,
- Σύγκριση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός προϊόντος με κάποιο πρότυπο,
- Προσδιορισμό του πλέον σημαντικού από περιβαλλοντική άποψη σταδίου στον κύκλο ζωής ενός προϊόντος με στόχο την υπόδειξη τρόπων και μέσων περιβαλλοντικής του βελτίωσης,

- Σχεδιασμό και ανάπτυξη νέων προϊόντων και υπηρεσιών με μικρότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις,
- Στην περιβαλλοντική πιστοποίηση προϊόντων ή υπηρεσιών (eco-labelling),
- Στον οικολογικό σχεδιασμό νέων προϊόντων (eco-design), αλλά και
- Στην κατάλληλη επιλογή περιβαλλοντικών δεικτών.

Η AKZ βασίζεται ουσιαστικά, στη δημιουργία ενός μοντέλου, που διαμορφώνεται από τον εκάστοτε χρήστη, μέσω του οποίου επιτυγχάνεται η απόδοση του συστήματος όσο πιο ρεαλιστικά γίνεται. Το σύστημα αποτελείται από διεργασίες (unit processes), οι οποίες αντιπροσωπεύουν μια ή περισσότερες δραστηριότητες, για τον λόγο αυτό η AKZ θεωρείται ως ένα στατιστικό μοντέλο (Rebitzer et al. 2004:705).

2.1 Ιστορική αναδρομή

Η AKZ, ως έννοια, έχει τις απαρχές της στη δεκαετία του '60 και αναφερόταν κυρίως στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις μεγάλων κατασκευαστικών έργων. Αρχίζει να παίρνει τη σημερινή της μορφή και να καθιερώνεται σαν βασικό εργαλείο ανάλυσης περιβαλλοντικών προβλημάτων στα τέλη της δεκαετίας του 80. Στο Midwest Research Institute (ΗΠΑ), το 1969 εκπονήθηκε έρευνα για την εταιρεία Coca Cola, που αξιολογούσε τα χρησιμοποιούμενα υλικά με βάση τις ενεργειακές απώλειες και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις με σκοπό την αναζήτηση νέων υλικών εμφιάλωσης με βελτιωμένα χαρακτηριστικά ως προς τους παραπάνω τομείς. Το χρονικό διάστημα 1970-1975 εκπονήθηκαν δεκαπέντε περίπου μελέτες "Ανάλυσης της χρήσης φυσικών πόρων και της επίδρασης στο περιβάλλον" (Resource and Environmental Profile Analysis –REPA).

Η SETAC (Society for Environmental Toxicology and Chemistry, 1991), από τις αρχές της δεκαετίας του 90, έχει ορίσει την AKZ ως μια τεχνική εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων που συνδέονται με κάποιο προϊόν, διεργασία ή δραστηριότητα προσδιορίζοντας και ποσοτικοποιώντας την ενέργεια και τα υλικά που χρησιμοποιούνται, καθώς και τα απόβλητα που απελευθερώνονται στο

περιβάλλον εκτιμώντας τις επιπτώσεις από τη χρήση της ενέργειας και των υλικών καθώς και των αποβλήτων και αναγνωρίζοντας και εκτιμώντας τις δυνατότητες περιβαλλοντικών βελτιώσεων.

Η ανάπτυξη της AKZ στην Ευρώπη συνδυάστηκε με την εξάπλωση της Οικολογικής Σήμανσης (κανονισμός ΕΟΚ 880/1992). Η απονομή οικολογικού σήματος σε ένα προϊόν γίνεται στη βάση κριτηρίων που προκύπτουν από τη διενέργεια AKZ. Η ανάπτυξη της μεθοδολογίας AKZ στην Ευρώπη προωθήθηκε περαιτέρω και υποστηρίχθηκε μεταξύ των άλλων από τη SPOLD (Society for the Promotion of LCA Development), μια κοινοπραξία από μεγάλες βιομηχανικές εταιρείες, η οποία όμως σήμερα έχει διαλυθεί. Τέλος η AKZ έχει ενταχθεί στα πρότυπα του οργανισμού ISO (International Standards Organization) 14040-14049.

Οι Διεθνείς Οργανισμοί που ασχολούνται με την AKZ είναι:

- SETAC, Society for Environmental Toxicology and Chemistry (www.setac.org)
- ISO, International Standardization Organization (www.iso.ch)
- UNEP, United Nations Environmental Program (www.unep.org/tools/lca)

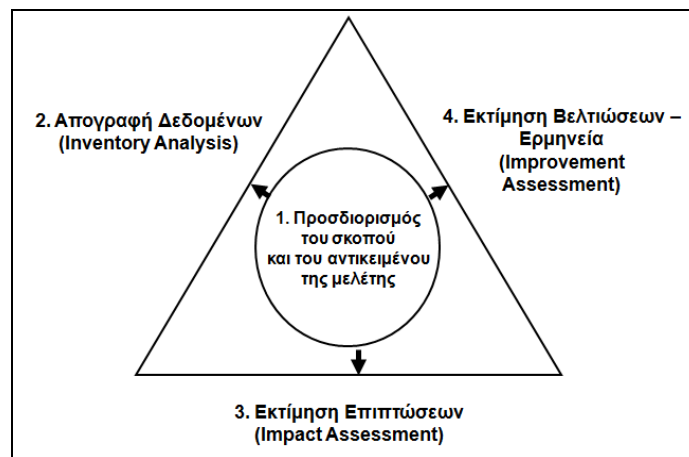
2.2 Στάδια Ανάλυσης Κύκλου Ζωής

Η ανάλυση κύκλου ζωής περιλαμβάνει ολόκληρο τον κύκλο ζωής του προϊόντος, της διεργασίας ή της δραστηριότητας: εξαγωγή και επεξεργασία πρώτων υλών, κατασκευή, μεταφορά και διανομή, χρήση, επαναχρησιμοποίηση, συντήρηση, ανακύκλωση και τελική απόρριψη. Το πλαίσιο μεθοδολογίας της AKZ που προτείνεται από τη SETAC [Society for Environmental Toxicology and Chemistry] (1991, 1992, και 1993), οργανισμός που ασχολείται με τον καθορισμό και την εξέλιξη της μεθοδολογίας AKZ, ορίζει ότι η AKZ αποτελείται από τέσσερα βασικά στάδια (Σχήμα 2-1), που περιγράφονται κάτωθι (Γεωργιοπούλου, 2007):

- **Προσδιορισμός του σκοπού/αντικειμένου και της έκτασης της μελέτης:** Αυτό το στάδιο καθορίζει το σκοπό, το αντικείμενο και τη μελλοντική εφαρμογή της μελέτης, επηρεάζοντας την κατεύθυνση, το βάθος και τις απαιτήσεις της τελικής αναφοράς και την επανεξέταση της. Επιπλέον καθορίζεται το ποιο προϊόν ή ποια λειτουργία εξετάζεται, ποια θα είναι η εφαρμογή της μελέτης και το βάθος της

ανάλυσης. Τα παραπάνω πρέπει να ορίζονται με λεπτομέρεια, ώστε να εξασφαλίζεται η σωστή κατεύθυνση της μελέτης.

- **Αναλυτική Απογραφή Δεδομένων (Inventory Analysis):** Κατά την αναλυτική απογραφή δεδομένων, γίνεται καταγραφή, συλλογή και παρουσίαση των δεδομένων εισόδου και εξόδου του υπό εξέταση συστήματος. Η ποιότητα των δεδομένων που χρησιμοποιούνται στις αναλυτικές απογραφές, αποτελεί υπόθεση υψίστης σημασίας λόγω της μεγάλης ανομοιομορφίας των πηγών προέλευσης και της ευρύτητας του αντικειμένου. Με την επιλογή έγκυρων πηγών, εξασφαλίζεται η καλύτερη ποιότητα των δεδομένων και η ταυτόχρονη αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της μελέτης



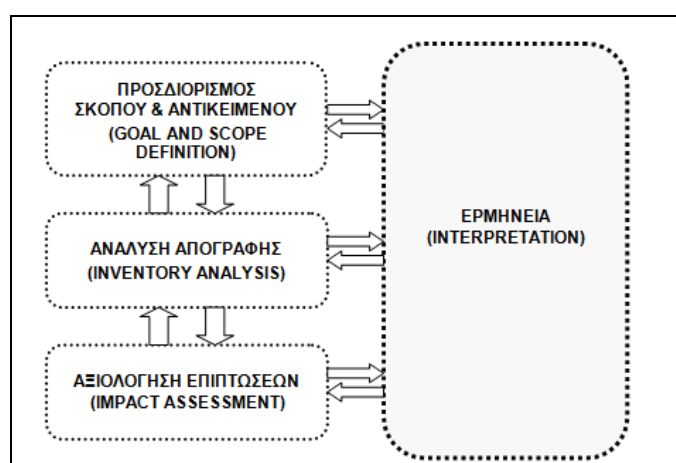
Σχήμα 2-1: Βασικά Στάδια Ανάλυσης Κύκλου Ζωής [SETAC (1993)]

- **Εκτίμηση Επιπτώσεων (Impact Analysis):** Η εκτίμηση επιπτώσεων δίνει μια προοπτική στα δεδομένα και στις πληροφορίες εισόδου και εξόδου. Χωρίς την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τα απόβλητα και την ελάττωση των αποθεμάτων, είναι δύσκολο να γίνει κατανοητή η σχέση των δεδομένων εισόδου και εξόδου του συστήματος με το περιβάλλον, ή το όφελος από την επίτευξη βελτιώσεων στο σύστημα.
- **Εκτίμηση Βελτιώσεων (Improvement Analysis):** Βοηθά στο να εξασφαλιστούν οι βέλτιστες δυνατές στρατηγικές μείωσης και τα προγράμματα βελτίωσης που δεν θα δημιουργήσουν επιπρόσθετες απρόβλεπτες επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και στο περιβάλλον. Τέλος οδηγεί στη λήψη αποφάσεων που θα εξασφαλίζουν τη βελτίωση της διεργασίας και τη μικρότερη δυνατή επίπτωση στο περιβάλλον.

Τα πρακτικά οφέλη που προκύπτουν από μια ΑΚΖ (SETAC, 2002) είναι ότι:

- Προσφέρει μια κοινή βάση αναφοράς για τη σύγκριση εναλλακτικών προϊόντων, υλικών και δραστηριοτήτων ως προς την περιβαλλοντική τους επίδοση.
- Αναδεικνύει εκείνα τα σημεία του κύκλου ζωής που επιβαρύνουν περισσότερο το περιβάλλον, έτσι ώστε να υποβοηθή τη βελτιστοποίηση τους.
- Βοηθά στο σχεδιασμό και την ανάπτυξη νέων προϊόντων και παραγωγικών διεργασιών με μικρότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις.
- Προσφέρει ουσιαστική βοήθεια για την αποτίμηση των αποτελεσμάτων περιβαλλοντικών πολιτικών και δράσεων σε σχέση με την εξοικονόμηση πρώτων υλών, την ανακύκλωση, τις εκπομπές ρύπων κ.λ.π. καθώς επίσης και την εκπαίδευση σε θέματα πρόληψης ή μείωσης της ρύπανσης.

Κατά ISO 14040 (1997) η ΑΚΖ (Life Cycle Assessment) είναι μια τεχνική για την εκτίμηση των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων που συνδέονται με ένα προϊόν (ή υπηρεσία ή διαδικασία) μέσω σύνταξης ενός ποσοτικού διαγράμματος (inventory) των εισροών και των εκροών, την αξιολόγηση των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων που συνδέονται με αυτά και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων του καταλόγου της απογραφής και των επιπτώσεων των σταδίων παραγωγής σε σχέση με τους στόχους της μελέτης. Η ΑΚΖ σύμφωνα με τα πρότυπα ISO αποτελείται από τέσσερα αλληλεξαρτώμενα βήματα (Σχήμα 2-2) απαραίτητα για μια πλήρη μελέτη ενός κύκλου ζωής:



Σχήμα 2-2: Βασικά Στάδια ΑΚΖ [Life Cycle Assessment, ISO 14041]

2.2.1 Προσδιορισμός Σκοπού και Αντικειμένου (Goal and Scope Definition)

Το πρώτο βήμα σε μια AKZ είναι η ξεκάθαρη διατύπωση του σκοπού για τον οποίο διεξάγεται. Αυτό το βήμα είναι ίσως το πιο σημαντικό καθώς η μετέπειτα μελέτη διεξάγεται σύμφωνα με τα στοιχεία που αναφέρθηκαν σε αυτή τη φάση, η οποία ορίζει το σκοπό της μελέτης, το αναμενόμενο αποτέλεσμα, τα όρια του συστήματος, τις λειτουργικές μονάδες και τις παραδοχές που έχουν γίνει.

Επιπλέον το βήμα αυτό περιλαμβάνει:

- Τον καθορισμό του αντικείμενου της μελέτης, δηλαδή ποιο προϊόν ή ποια διεργασία εξετάζεται. Το αντικείμενο πρέπει να οριστεί με λεπτομέρεια, ώστε να εξασφαλίζεται ότι το βάθος της ανάλυσης είναι επαρκές και ικανοποιεί τον προκαθορισμένο σκοπό της μελέτης.
- Τον καθορισμό της Λειτουργικής Μονάδας (Functional Unit). Σύμφωνα με τη SETAC ως λειτουργική μονάδα θεωρείται η ποσότητα του προϊόντος που μελετάται. Ένα από τα πιο βασικά σημεία μιας AKZ είναι η κατά το δυνατόν πιο αναλυτική περιγραφή της λειτουργίας του συστήματος και μέσω αυτής ο καθορισμός της Λειτουργικής Μονάδας. Συνεπώς η λειτουργική μονάδα είναι ένα σημαντικό στοιχείο της AKZ το οποίο πρέπει να καθοριστεί πλήρως και με σαφήνεια, καθώς αποτελεί το σημείο αναφοράς για τα δεδομένα εισόδου και εξόδου του συστήματος και μία βάση σύγκρισης μεταξύ διαφορετικών κύκλων ζωής παρόμοιων προϊόντων και διαφορετικών σεναρίων. Επίσης ο καθορισμός της λειτουργικής μονάδας αποτελεί ένα θεμελιώδες βήμα για την αποφυγή ασαφειών κατά τη διατύπωση του σκοπού και η λειτουργική μονάδα αποτελεί το μέτρο της απόδοσης του συστήματος.
- Τον καθορισμό και την περιγραφή των ορίων του συστήματος (System Boundary). Τα όρια του συστήματος καθορίζουν ποιες διεργασίες θα πρέπει να συμπεριληφθούν στη μελέτη AKZ.
- Τον καθορισμό των υποθέσεων και περιορισμών. Λόγω της υποκειμενικότητας του καθορισμού των ορίων του συστήματος, η διαφάνεια της διαδικασίας καθορισμού και οι υποθέσεις είναι εξαιρετικά σημαντικές. Τα αρχικά όρια του συστήματος καθορίζουν τις διεργασίες οι οποίες θα περιληφθούν στο σύστημα που διαμορφώνεται, ενώ το σύστημα πρέπει να διαμορφώνεται κατά τέτοιο τρόπο που οι εισροές και οι εκροές στα όρια του να είναι οι στοιχειώδεις ροές. Εντούτοις, πρακτικά συνήθως δεν υπάρχει αρκετός χρόνος, δεδομένα ή πόροι

για να πραγματοποιηθούν μελέτες λεπτομερείς μορφής. Γι' αυτό θα πρέπει να λαμβάνονται αποφάσεις (υποθέσεις και περιορισμοί) σχετικά για το ποιες διεργασίες θα διαμορφωθούν σύμφωνα με τη μελέτη και για το επίπεδο λεπτομέρειας που αυτές οι διεργασίες θα μελετηθούν. Δεν λαμβάνονται υπόψη οι απαιτούμενοι πόροι κατά τον υπολογισμό ποσοτήτων δευτερευόντων ή αμελητέων εισροών και εκροών που δεν αλλάζουν σημαντικά τα γενικά συμπεράσματα της μελέτης. Αποφάσεις επίσης πρέπει να ληφθούν σχετικά με το ποιες περιβαλλοντικές επιπτώσεις θα εκτιμηθούν και το επίπεδο λεπτομέρειας αυτής της εκτίμησης. Οι κανόνες απόφασης που χρησιμοποιούνται κατά την επιλογή των εισροών και εκροών πρέπει να είναι σαφώς κατανοητές και να περιγράφονται με σαφήνεια. Οποιαδήποτε παράλειψη των σταδίων κύκλου ζωής, διεργασιών ή απαιτούμενων δεδομένων πρέπει να δηλωθεί σαφώς και να δικαιολογηθεί.

- Τέλος το βήμα αυτό περιλαμβάνει τον καθορισμό του τύπου των αποτελεσμάτων, δηλαδή τον τρόπο καταγραφής και τον τρόπο χρήσης τους και θα πρέπει να περιλαμβάνεται μία αναφορά του κοινού στο οποίο απευθύνεται η μελέτη και τα αποτελέσματά της.

2.2.2 Ανάλυση Απογραφής Δεδομένων (Inventory Analysis)

Κατά την απογραφή δεδομένων πρέπει να καταγράφονται όλα τα εισερχόμενα και εξερχόμενα δεδομένα του εξεταζόμενου συστήματος. Η αναλυτική απογραφή των δεδομένων είναι μια συστηματική, αντικειμενική και σταδιακή διαδικασία για την ποσοτικοποίηση της ενέργειας και των πρώτων υλών που απαιτούνται, των ατμοσφαιρικών εκπομπών, της επιβάρυνσης των υδάτων, των στερεών αποβλήτων, καθώς και όλων των άλλων επιβαρύνσεων του κύκλου ζωής στο περιβάλλον (Babu 2006:4). Στο στάδιο αυτό, κάθε προϊόν θα πρέπει να παρουσιάζεται ως ένα σύστημα και να ποσοτικοποιούνται με ακρίβεια οι ροές μάζας και ενέργειας που διαπερνούν το σύστημα. Οποιαδήποτε παραδοχή ή παράλειψη σταδίων του κύκλου ζωής πρέπει να αναφέρεται από την αρχή της μελέτης.

Η απογραφή των δεδομένων αποτελεί την ποσοτική περιγραφή όλων των εισροών και εκροών του συστήματος. Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται

προέρχονται από διάφορες πηγές, συμπεριλαμβανομένων των άμεσων μετρήσεων, θεωρητικού υπόβαθρου, ενεργειακών ισοζυγίων, καθώς και στατιστικών στοιχείων από τις βάσεις δεδομένων και δημοσιεύσεις (Tan et al. 2009:5).

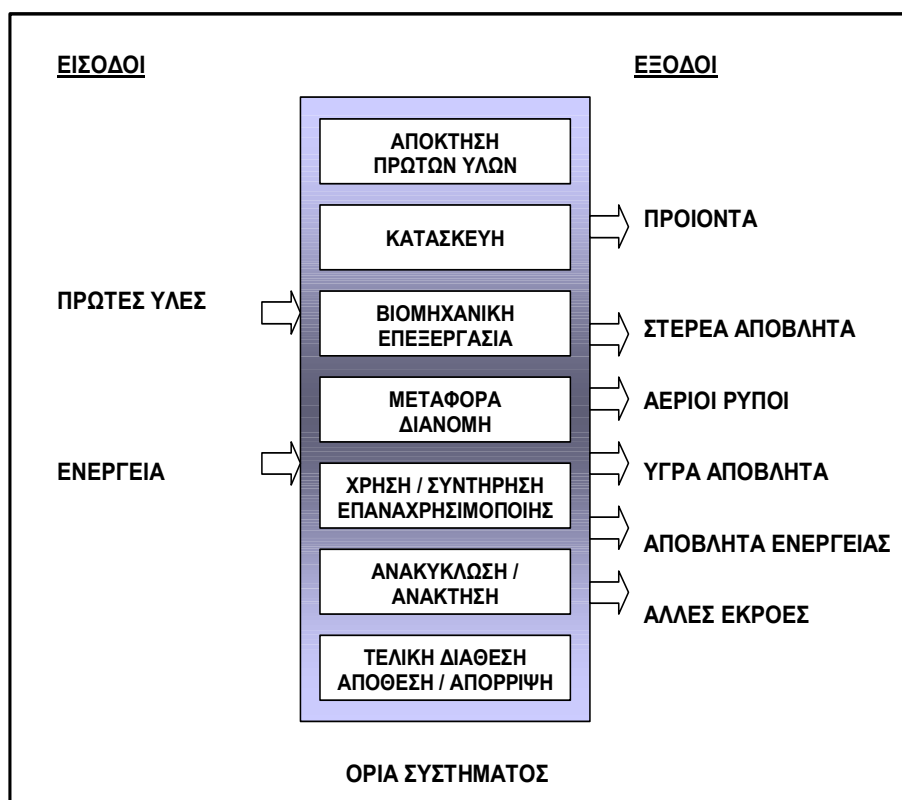
Για τις ανάγκες της AKZ κάθε προϊόν, διεργασία ή δραστηριότητα πρέπει να αναπαρίσταται ως ένα σύστημα το οποίο ορίζεται ως σύνολο διεργασιών, οι οποίες ανταλλάσσουν μεταξύ τους μάζα και ενέργεια και εκτελούν μια προκαθορισμένη λειτουργία. (Γεωργιοπούλου Μ, 2007).

Το σύστημα ορίζεται από τα όρια του και οτιδήποτε βρίσκεται έξω από τα όρια του συστήματος αποτελεί το περιβάλλον του συστήματος. Τα **όρια του συστήματος (system boundaries)** καθορίζουν τις διεργασίες/λειτουργίες (π.χ. κατασκευή, μεταφορά, και διαχείριση αποβλήτων), και τις εισροές και εκροές που λαμβάνονται υπόψη στην AKZ. Η εισροή μπορεί να είναι η συνολική εισροή σε μια παραγωγή καθώς και η εισροή σε μια ξεχωριστή διεργασία - και όμοια ισχύει για την εκροή (Γεωργιοπούλου Μ, 2007). Επιπλέον τα όρια του συστήματος πρέπει να αναφέρονται σε διάφορες διαστάσεις οι οποίες θα πρέπει να προσδιορίζουν τα όρια μεταξύ του συστήματος και της φύσης και να οριοθετούν τη γεωγραφική περιοχή καθώς και τη διάρκεια της ζωής του συστήματος (Tillman et al., 1993).

Η **απογραφή δεδομένων** αποτελεί την ποσοτική περιγραφή όλων των ροών και ανταλλαγών μάζας και ενέργειας από και προς το σύστημα. Πολλές φορές συμβαίνει να μην υπάρχουν δεδομένα για όλα τα στάδια του συστήματος χωρίς αυτό να αποτελεί εμπόδιο για την εκτέλεση μιας AKZ που βασίζεται στα στάδια του κύκλου ζωής, για τα οποία υπάρχουν δεδομένα. Ωστόσο, οι ελλείψεις αυτές πρέπει να επισημαίνονται εκ των προτέρων.

Ο πιο παραστατικός τρόπος παρουσίασης των συστατικών ενός συστήματος είναι ένα διάγραμμα ροής που αναπαριστά τις διασυνδέσεις μεταξύ των διαφόρων υποσυστημάτων. Το διάγραμμα ροής είναι ένα εργαλείο για τη χαρτογράφηση των εισροών και εκροών μίας διαδικασίας ή ολόκληρου του συστήματος. Ένα απλό διάγραμμα ροής δείχνει όλα τα κύρια στοιχεία κατά τη διάρκεια ζωής ενός προϊόντος ή διαδικασίας και πρέπει να περιλαμβάνει μόνο εκείνα τα στάδια του κύκλου ζωής που αναλύονται, δηλαδή μόνο τα στάδια που έχουν συμπεριληφθεί εντός των ορίων του συστήματος. Αυτό βοηθάει στην αναγνώριση των ορίων του συστήματος. Τα διάφορα στάδια της ζωής συνδέονται παραστατικά με βέλη τα οποία έχουν τη φορά

εξέλιξης της ζωής του προϊόντος (Drive 2006:19). Η ανάλυση ακόμα και των απλούστερων συστημάτων συχνά απαιτεί δεδομένα από μια ευρύτατη γκάμα διαφορετικών βιομηχανιών, οι οποίες μπορεί και να βρίσκονται μακριά από το εξεταζόμενο σύστημα (Αμπελιώτης Κ., 2002).



Σχήμα 2-3: Τυπικά Όρια Συστήματος

Μόλις οριστεί το κύριο σύστημα και τα υποσυστήματα του πρέπει να συλλεχθούν τα ανάλογα δεδομένα. Η **συλλογή των δεδομένων** μπορεί να γίνει από πρωτογενείς πηγές (όπως για τα δεδομένα που συλλέγονται για ειδικές διαδικασίες) ή δευτερογενείς (όπως για αυτά που συλλέγονται από αναφορές ή άλλες δημοσιεύσεις). Η συλλογή των δεδομένων αποτελεί το πιο χρονοβόρο στάδιο μιας μελέτης ΑΚΖ. Τα δεδομένα πρέπει να συλλέγονται από τις αντίστοιχες πηγές πρωτογενών δεδομένων, όμως επειδή πολλές φορές αυτό δεν είναι εφικτό, άλλες (δευτερογενείς) πηγές δεδομένων είναι (Αμπελιώτης Κ., 2002): οι εξισώσεις και οι τεχνικοί υπολογισμοί, οι εργαστηριακές δοκιμές, οι εκτιμήσεις με βάση παρόμοιες διεργασίες ή παρόμοιες μελέτες ΑΚΖ, η διεθνής βιβλιογραφία, οι βιβλιοθήκες και οι ηλεκτρονικές βάσεις

δεδομένων, οι λίστες θεσμοθετημένων ορίων και κρατικές αναφορές και οι προσωπικές επικοινωνίες με ειδικούς σε κάθε τομέα.

Η πρόσβαση σε αξιόπιστα δεδομένα συνεχίζει, ακόμα και σήμερα που οι βάσεις δεδομένων είναι τεράστιες, να αποτελεί ένα σημαντικό εμπόδιο για την επέκταση της χρήσης της AKZ στην περιβαλλοντική διαχείριση (Curran et al 2005:856). Τα δεδομένα που πρέπει να συλλεχθούν αποτελούν τις εισροές και εκροές της κάθε διαδικασίας που περιλαμβάνεται στα όρια του συστήματος. Για να συλλεχθούν τα δεδομένα σχεδιάζονται έντυπα συλλογής δεδομένων. Στη συνέχεια ακολουθεί η διαδικασία επαλήθευσής τους και η προσαρμογή τους στη λειτουργική μονάδα προκειμένου να είναι επιτυχής η άθροιση των αποτελεσμάτων. Η κατανομή των ροών στο περιβάλλον αποτελεί ένα ευαίσθητο βήμα σε αυτή τη διαδικασία υπολογισμού. Επίσης, συχνό είναι το φαινόμενο των διεργασιών που παράγουν περισσότερα από ένα προϊόντα, τα οποία αρκετές φορές βρίσκονται εκτός των ορίων του συστήματος, γεγονός που αποτελεί πρόβλημα και εμποδίζει τη συνολική λειτουργία του συστήματος. Επομένως, θα πρέπει να γίνεται πλήρης αντιστοίχιση τόσο των πρώτων υλών όσο και των περιβαλλοντικών εκπομπών που σχετίζονται με τη συνολική διεργασία (Rebitzer 2004:706-707). Οι πηγές δεδομένων μπορεί να είναι πρωτογενείς ή δευτερογενείς (Τσουκαλά, 2009), και να προέρχονται από βιομηχανικές και κρατικές αναφορές, εργαστηριακές δοκιμές, βιβλιογραφικές αναφορές, δημοσιεύσεις και βάσεις δεδομένων, λίστες θεσμοθετημένων ορίων, συμβούλους και εμπορικούς συνδέσμους και παρόμοιες μελέτες AKZ. Επιπλέον η συλλογή των δεδομένων γίνεται σε (Τσουκαλά 2009): μέσες τιμές (μηνιαίες/ετήσιες τιμές), μικτά, σταθερά και κανονικοποιημένα δεδομένα.

Τα δεδομένα πρέπει να χαρακτηρίζουν μια κανονική (χωρίς λειτουργικά προβλήματα) περίοδο λειτουργίας. Επίσης, η χρονική περίοδος που καλύπτουν δεν πρέπει να είναι υπερβολικά μεγάλη καθώς έτσι καλύπτονται τα όποια προβλήματα. Η προέλευση των δεδομένων, η ηλικία τους, η χρονική περίοδος και ο χώρος αναφοράς τους πρέπει να καταγράφονται στην τελική έκθεση. Πρέπει επίσης να καταγράφεται εάν τα δεδομένα προέρχονται από μετρήσεις, υπολογισμούς ή κατά προσέγγιση εκτιμήσεις. Στην περίπτωση μετρήσεων πρέπει να αναφέρεται η επαναληψιμότητα και η αναπαραγωγικότητα τους. Όταν χρησιμοποιούνται πολλαπλές πηγές δεδομένων, πρέπει να περιγράφονται και να εξηγούνται οι όποιες στατιστικές

τεχνικές χρησιμοποιήθηκαν για τη στάθμιση και την κανονικοποίηση των δεδομένων. Για τις πιο σημαντικές διεργασίες του συστήματος, τα δεδομένα πρέπει να δίνονται ως δεδομένα μέσου όρου μαζί με τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή τους και την τυπική τους απόκλιση (Αμπελιώτης Κ., 2002).

Η **ποιότητα των δεδομένων** αποτελεί έναν από τους καθοριστικότερους παράγοντες για την ποιότητα των αποτελεσμάτων της AKZ καθώς η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων της AKZ εξαρτάται από αυτά. Ορίζεται ως ο βαθμός αξιοπιστίας ανάμεσα στα δεδομένα εισόδου και εξόδου ξεχωριστά και στα δεδομένα σαν σύνολο και τελικά στις αναφορές που βασίζονται στη χρήση των δεδομένων (Μουσιόπουλος & Μπούρα, 1999). Οι στόχοι για συγκεκριμένη ποιότητα δεδομένων θα πρέπει να διατυπώνονται ξεκάθαρα κατά το στάδιο προσδιορισμού του σκοπού και του αντικειμένου της μελέτης. Η αποτίμηση λοιπόν της ποιότητας των δεδομένων είναι ένα πολύ σημαντικό βήμα στην όλη διαδικασία της AKZ. Ακόμη όμως και όταν υπάρχει υψηλή ποιότητα δεδομένων, η AKZ μπορεί να οδηγήσει σε λάθος συμπεράσματα, εάν αυτά τα δεδομένα χρησιμοποιηθούν για να απαντηθούν άσχετες με το αντικείμενο της μελέτης ερωτήσεις. Η ποιότητα επηρεάζεται από την πηγή, τη μέθοδο συλλογής των δεδομένων, τον τρόπο παραγωγής, το κόστος και το χρόνο συλλογής. Οι παράμετροι που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη συλλογή και αξιολόγηση της ποιότητας των δεδομένων είναι: η κάλυψη όσον αφορά στις χρονικές, γεωγραφικές και τεχνολογικές παραμέτρους, η ακρίβεια και αντιπροσωπευτικότητα των δεδομένων, η συνέπεια και επαναληψιμότητα των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για συλλογή των δεδομένων και τέλος το σφάλμα και τα κενά δεδομένων.

2.2.3 Εκτίμηση Επιπτώσεων (Impact assessment)

Η εκτίμηση των επιπτώσεων, το τρίτο στάδιο της μεθοδολογίας, είναι μια ποιοτική ή/και ποσοτική διεργασία η οποία χρησιμοποιείται για να εκτιμήσει τις πιθανές (αρνητικές ή συγκριτικά θετικές) περιβαλλοντικές συνέπειες που προσδιορίζονται στο στάδιο της απογραφής δεδομένων. Η αξιολόγηση επίπτωσης μπορεί να εκφραστεί ως μια "ποσοτική και/ή ποιοτική διαδικασία που χαρακτηρίζει

και αξιολογεί τα αποτελέσματα των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προσδιορίζονται στο πίνακα απογραφής" (Heijungs & Hofstetter, 1996).

Η εκτίμηση επιπτώσεων περιλαμβάνει την αναγνώριση, σύνοψη και ποσοτικοποίηση των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων του εξεταζόμενου συστήματος. Η περιβαλλοντική επίπτωση ενός προϊόντος μπορεί να περιγραφεί με διάφορους τρόπους, όπως προκύπτει από το Σχήμα 2-4..

Σύμφωνα με το πρότυπο ISO 14040 και 14044, η αξιολόγηση των περιβαλλοντικών χαρακτηριστικών των προϊόντων μπορεί να αφορά επιπτώσεις ενδιάμεσου (midpoint) ή και τελικού αποδέκτη (endpoint). Η προσέγγιση «ενδιάμεσου σημείου», περιλαμβάνει κατηγορίες επιπτώσεων όπως η αλλαγή κλίματος, η μείωση του στρατοσφαιρικού όζοντος, η δημιουργία τροποσφαιρικού όζοντος (αιθαλομίχλη), ο ευτροφισμός, η οξίνιση, οι τοξικολογικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και τα οικοσυστήματα, η μείωση των μη ανανεώσιμων ορυκτών πόρων, η χρήση ύδατος, η χρήση εδάφους, η δημιουργία θορύβου κ.α.

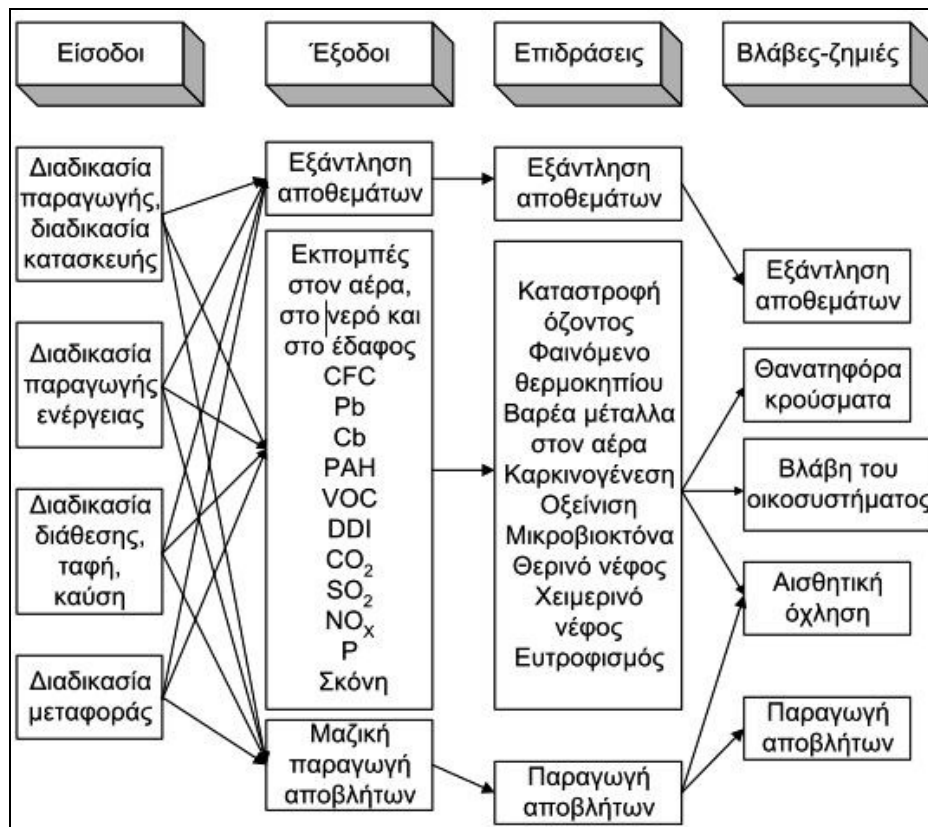
Στη προσέγγιση «τελικού σημείου», οι επιπτώσεις ταξινομούνται γενικά σε τρία γενικά επίπεδα προστασίας (PRé Consultants, 2000):

- της Εξάντλησης των Φυσικών Πόρων (Resources). Οι φυσικοί πόροι διακρίνονται σε μη ανανεώσιμους (πόροι που μόνο ένα πεπερασμένο απόθεμά τους είναι διαθέσιμο), σε ανανεώσιμους (π.χ. ήλιος, ανακυκλωμένα υλικά κ.λπ) και βιοτικούς (πόροι που συνδέονται με τη χλωρίδα και την πανίδα).
- της Ανθρώπινης Υγείας (Human Health) σε δύο επίπεδα, ήτοι άμεσο που προκαλεί οξείες επιπτώσεις (π.χ. από πυρκαγιές, εκρήξεις, κ.λπ.) και έμμεσο, δηλαδή μακροπρόθεσμες επιπτώσεις που προκαλούνται από τη χρόνια έκθεση των ανθρώπων σε τοξικές ουσίες (π.χ. βενζόλιο, εντομοκτόνα),
- της «υγείας» του Οικοσυστήματος (Ecosystem Quality). Εδώ εξετάζονται πιθανές επιπτώσεις στη δομή (πληθυσμός, επίπεδα διατροφής, φυσικό περιβάλλον), στη λειτουργία (παραγωγικότητα, διεργασία) κ.λπ.

Το πλαίσιο της αξιολόγησης επίπτωσης κύκλου ζωής και η διαδικασία πρέπει να είναι διαφανείς και να παρέχουν ευελιξία και πρακτικότητα σε ευρύ φάσμα εφαρμογής [ISO, 1997c]. Επιπλέον, η αξιολόγηση επίπτωσης πρέπει να είναι αποτελεσματική από άποψη κόστους και χρησιμοποιούμενων πόρων. Οποιαδήποτε

όμως προσέγγιση και αν ακολουθηθεί, η σειρά των βασικότερων σταδίων της Εκτίμησης Επιπτώσεων, έχει ως εξής:

- **Επιλογή της μεθόδου και των κατηγοριών επιπτώσεων** που θα χρησιμοποιηθούν (πχ «κλιματική αλλαγή» κ.λπ).



Σχήμα 2-4: Σχηματική Απεικόνιση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων
[Πηγή: Τσουκαλά (2009)]

- **Κατηγοριοποίηση (Classification)** των στοιχείων της απογραφής δεδομένων στις επιλεγμένες κατηγορίες επιπτώσεων. Π.χ. οι εκπομπές CO₂, CH₄, N₂O πρέπει να ταξινομηθούν στην επίπτωση «κλιματική αλλαγή» καθώς όλα τα παραπάνω αποτελούν αέρια του θερμοκηπίου. Με την κανονικοποίηση, σύμφωνα με το ISO 14042 (2000), υπολογίζεται το μέγεθος των αποτελεσμάτων για κάθε περιβαλλοντικό πρόβλημα σε σχέση με κάποια βάση αναφοράς. Ειδικότερα υπολογίζεται το πώς το υπό εξέταση σύστημα, σε μια συγκεκριμένη κατηγορία επιπτώσεων, συμβάλλει στο γενικότερο περιβαλλοντικό πρόβλημα. Η βάση αναφοράς, δεν είναι συγκεκριμένη και μπορεί να σχετίζεται με κάποια γεωγραφική περιοχή

(π.χ. παγκοσμίως, περιφερειακά, τοπικά), με τον άνθρωπο (π.χ. κάτοικο Ελλάδας, κάτοικο Ευρώπης, κ.λπ.) ή ένα άλλο σύστημα.

- **Χαρακτηρισμός (Characterisation)**, ήτοι ο υπολογισμός των συνολικών δεικτών κατηγορίας επιπτώσεων χρησιμοποιώντας συντελεστές χαρακτηρισμού. Ο δείκτης πχ της επίπτωσης «κλιματική αλλαγή» είναι kg ισοδύναμου CO₂. Άρα οι εκπομπές CH₄ πρέπει να πολλαπλασιαστούν με δείκτη χαρακτηρισμού (ο δείκτης αυτός είναι συνήθως το 21 σε χρονικό ορίζοντα 100 χρόνων), για να μετατραπούν οι εκπομπές CH₄ σε ισοδύναμες εκπομπές CO₂. Στο στάδιο του χαρακτηρισμού ποσοτικοποιούνται και αθροίζονται τα δεδομένα της απογραφής ανά κατηγορία επιπτώσεων ανάλογα με τη συνεισφορά τους. Αυτό γίνεται με τη χρήση συντελεστών, οι οποίοι αντιστοιχούν σε κάθε μια από τις εισροές που διαπερνούν το σύστημα, και την ερμηνεία τους σε δείκτες που αφορούν στην κάθε κατηγορία επιπτώσεων ξεχωριστά.
- **Κανονικοποίηση (Normalization)**. Στο στάδιο αυτό, το οποίο δεν είναι υποχρεωτικό κατά το πρότυπο ISO αλλά είναι άκρως διαφωτιστικό στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων, γίνεται ο υπολογισμός των αποτελεσμάτων του συνολικού δείκτη ανά κατηγορία επιπτώσεων σε σχέση με κάποιες τιμές αναφοράς.
- Σε μία μελέτη μπορεί να υπάρχουν και άλλα στάδια όπως η **Ομαδοποίηση** και η **Στάθμιση (Weighting)** ωστόσο, τα στάδια αυτά, πέραν του ότι δεν είναι υποχρεωτικά, διέπονται από μια άκρα υποκειμενικότητα στην εφαρμογή τους.
- Η Ομαδοποίηση είναι ένα προαιρετικό στάδιο της ανάλυσης κατά το οποίο οι κατηγορίες επιπτώσεων ομαδοποιούνται με βάση κάποιο συγκεκριμένο χαρακτηριστικό (π.χ. εκπομπές ρύπων) και ταξινομούνται με βάση μια συγκεκριμένη ιεραρχία αξιών (π.χ. υψηλή μεσαία και χαμηλή επίπτωση).
- Η Στάθμιση των αποτελεσμάτων είναι ένα επίσης προαιρετικό στάδιο, το οποίο επιτρέπει τη σύγκριση ανάμεσα στις διάφορες κατηγορίες επιπτώσεων. Οι μέθοδοι στάθμισης έχουν αναπτυχθεί από διαφορετικούς θεσμούς και βασίζονται σε διαφορετικά πρότυπα .

Η **κατηγοριοποίηση** των επιπτώσεων, αφορά στην υποβάθμιση οικοσυστήματος, στη εξάντληση των φυσικών πόρων και στις επιπτώσεις στην

ανθρώπινη υγεία. Οι συνήθεις εξεταζόμενες **κατηγορίες επίπτωσης** είναι οι εξής:

- Εξάντληση Αβιοτικών Πόρων (Abiotic Depletion)
- Φαινόμενο του Θερμοκηπίου (Global Warming)
- Φωτοχημική Οξειδωση (Photochemical oxidant formation)
- Οξίνιση (Acidification)
- Επιπτώσεις Τοξικότητας στον άνθρωπο (Human Toxicity)
- Οικοτοξικότητα Ύδατος (Aquatic Ecotoxicity, ECA)
- Θαλάσσια Οικοτοξικότητα (Marine aquatic ecotoxicity)
- Επίγεια Οικοτοξικότητα (Terrestrial ecotoxicity)
- Ευτροφισμός (Eutrophication)
- Εξασθένιση της στοιβάδας του όζοντος (Ozone layer Depletion)
- Βιοτικοί πόροι (Biotic resources)
- Χρήση εδάφους (Land use)
- Οικοτοξικολογικές Επιπτώσεις (Ecotoxicological impacts)
- Περιβάλλον Εργασίας (Work environment)

2.2.4 Ερμηνεία Αποτελεσμάτων - Εκτίμηση Βελτιώσεων

Στο τελευταίο στάδιο της ανάλυσης AKZ, ερμηνεύονται τα αποτελέσματα και αξιοποιούνται για τη λήψη αποφάσεων που κατευθύνονται στην καλύτερη λειτουργία του συστήματος και στην παράλληλη μείωση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης. Η απογραφή των δεδομένων βοηθάει στον εντοπισμό των σταδίων που επιδέχονται βελτίωση, ενώ η εκτίμηση βελτιώσεων δείχνει το κατά πόσο τα στάδια αυτά δύναται να βελτιωθούν.

Ο οργανισμός SETAC ορίζει την εκτίμηση βελτιώσεων ως εξής: "Η εκτίμηση βελτιώσεων αποτελεί μια συστηματική αξιολόγηση των αναγκών και δυνατοτήτων για τη μείωση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης που συνδέεται με τη χρήση ενέργειας και πρώτων υλών και τις περιβαλλοντικές εκπομπές καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής των προϊόντων, διεργασιών και υπηρεσιών. Η ανάλυση αυτή είναι δυνατό να περιέχει τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά μέτρα βελτίωσης, όπως αλλαγές στο προϊόν, στη διεργασία και στο σχεδιασμό, στη χρήση των πρώτων υλών, στη χρήση από τον καταναλωτή και στη διαχείριση των απορριμμάτων".

Η ερμηνεία είναι μια συστηματική διαδικασία προσδιορισμού, καταλληλότητας, ελέγχου και εκτίμησης των πληροφοριών από τα συμπεράσματα της ανάλυσης απογραφής δεδομένων ή/και την εκτίμηση των επιδράσεων ενός συστήματος και τα παρουσιάζει προκειμένου να καλυφθούν οι απαιτήσεις της εφαρμογής, όπως περιγράφονται στη φάση προσδιορισμού του σκοπού και του αντικειμένου της μελέτης. Είναι μια διαδικασία επικοινωνίας και έχει σχεδιαστεί για να δώσει αξιοπιστία στα αποτελέσματα των περισσότερων τεχνικών φάσεων της AKZ, δηλαδή στη φάση της απογραφής δεδομένων και τη φάση της εκτίμησης, και έχει μορφή που είναι και κατανοητή και χρήσιμη στους υπεύθυνους αποφάσεων. Η ερμηνεία περιέχει τα ακόλουθα κύρια στοιχεία [ISO, 1997d] τον προσδιορισμό σημαντικών περιβαλλοντικών ζητημάτων, την εκτίμηση και τα συμπεράσματα και συστάσεις.

Η ερμηνεία εκτελείται παράλληλα με τις άλλες φάσεις της AKZ. Εάν τα αποτελέσματα της φάσης απογραφής δεδομένων ή της φάσης εκτίμησης επιπτώσεων δεν ικανοποιούν τις απαιτήσεις που καθορίζονται στη φάση προσδιορισμού σκοπού και αντικειμένου, η φάση απογραφής δεδομένων πρέπει να βελτιωθεί με π.χ. επιθεώρηση των ορίων του συστήματος, περαιτέρω συλλογή δεδομένων κλπ. και εν συνεχεία να ακολουθήσει μια πιο βελτιωμένη εκτίμηση επιπτώσεων. Αυτή η επαναληπτική διαδικασία πρέπει να αναπαράγεται έως ότου ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις της φάσης προσδιορισμού σκοπού και αντικειμένου της μελέτης.

Επίσης μπορούν να ακολουθηθούν τα παρακάτω βήματα:

- Προσδιορισμός σημαντικών περιβαλλοντικών ζητημάτων
- Εκτίμηση της μεθοδολογίας και των αποτελεσμάτων για πληρότητα, ευαισθησία και συνέπεια
- Έλεγχος ότι τα συμπεράσματα είναι σύμφωνα με τις απαιτήσεις του σκοπού και του αντικειμένου της μελέτης, συμπεριλαμβάνοντας, ειδικότερα, τις απαιτήσεις για ποιοτικά δεδομένα, τις προκαθορισμένες υποθέσεις και τις τιμές, και τις απαιτούμενες εφαρμογές.
- Εάν εκπληρώνονται παραπάνω απαιτήσεις τότε τα συμπεράσματα της αναφοράς είναι τα τελικά συμπεράσματα. Εάν όμως δεν εκπληρώνονται οι απαιτήσεις τότε θα πρέπει να επιστρέψει κανείς στο πρώτο βήμα.

Αυτή η διαδικασία πρέπει να επαναληφθεί έως ότου εκπληρωθούν και τα τρία πρώτα βήματα. Ο στόχος της ερμηνείας είναι να μειωθεί ο αριθμός των ποσοτικών

δεδομένων ή/και δηλώσεων της φάσης απογραφής δεδομένων ή/και της φάσης εκτίμησης επιπτώσεων στα βασικά αποτελέσματα και να διευκολύνει τη διαδικασία λήψης απόφασης.

2.3 Εφαρμογές Ανάλυσης Κύκλου Ζωής

Όπως αναφέρθηκε εκτενώς παραπάνω η ΑΚΖ είναι μια μέθοδος η οποία επιτρέπει την εκτίμηση των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων μιας διεργασίας ή μιας υπηρεσίας καθώς και την ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων, παίζει καθοριστικό ρόλο και εφαρμόζεται σε όλο το φάσμα των ανθρώπινων δραστηριοτήτων.

2.3.1 Ανάλυση Κύκλου Ζωής στη τσιμεντοβιομηχανία

Στη βιομηχανία χρειάζονται δημιουργικές, αποτελεσματικές, και αποδοτικές μέθοδοι για να αντιμετωπιστούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που είναι γνωστές αλλά και εκείνες που μόλις αρχίζουν να παρουσιάζονται. Η αποτελεσματική προσέγγιση αντιμετώπισης περιβαλλοντικών επιπτώσεων είναι η χρήση ΑΚΖ στις αρχικές φάσεις σχεδιασμού και η αναγνώριση της έκτασης του προβλήματος, επιβάλλοντας προτεραιότητες και δίνοντας έμφαση σε αποτελεσματικές λύσεις. Η ΑΚΖ ως εργαλείο περιβαλλοντικής διαχείρισης, συμβάλλει στην αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών προβλημάτων μέσω της επιλογής των υλικών, της διαδικασίας αλλαγής του σχεδιασμού προϊόντων, της αυξημένης επαναχρησιμοποίησης, της εκμετάλλευσης των υποπροϊόντων και της ανακύκλωσης.

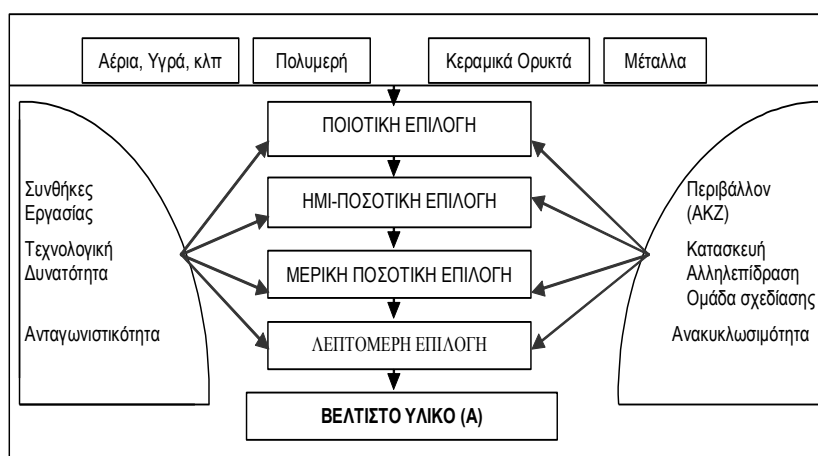
2.3.2 Ανάλυση Κύκλου Ζωής ως εργαλείο περιβαλλοντικής διαχείρισης

Εντάσσοντας την ΑΚΖ στο γενικότερο πλαίσιο της περιβαλλοντικής διαχείρισης, αυτή αποτελεί μια μόνο από τις διάφορες τεχνικές περιβαλλοντικής διαχείρισης. Συμπληρώνει άλλες τεχνικές όπως την ανάλυση περιβαλλοντικής επίπτωσης, την αναγνώριση πηγών κινδύνου (hazard identification), την εκτίμηση κινδύνου (risk assessment), την τεχνολογική ανάλυση (technology assessment), τις μεθοδικές και λεπτομερείς εξετάσεις αποβλήτων (waste audits) και τον περιορισμό των αποβλήτων και των διεργασιών (waste minimization assessment of process) με

σκοπό τον περιβαλλοντικό σχεδιασμό, την υπεύθυνη διαχείριση του προϊόντος, και τη δημιουργία, μέτρων σύγκρισης συστημάτων διαχείρισης. Όλες αυτές οι τεχνικές και τα εργαλεία διαχείρισης θα πρέπει να χρησιμοποιούνται όπου, κατά περίπτωση, κρίνονται ως κατάλληλα.

2.3.3 AKZ και Οικολογικός Σχεδιασμός (Eco-Design /Ecomaterials)

Για την κατασκευή ενός προϊόντος ή την ανάπτυξη μιας παραγωγικής διαδικασίας χρησιμοποιούνται ορισμένα τεχνικά δεδομένα. Με βάση αυτά είναι δυνατόν να εφαρμοστεί η AKZ από την αρχή του σχεδιασμού. Ο παράγοντας περιβάλλον εισέρχεται δυναμικά στα στάδια έρευνας, ανάπτυξης και σχεδιασμού. Το EuroMat ως σχεδιαστικό εργαλείο περιλαμβάνει πέντε κριτήρια επιλογής όπως παρουσιάζεται στο σχήμα.



Σχήμα 2-5: AKZ Εργαλείο Οικολογικού Σχεδιασμού Βασισμένο στη Προσέγγιση της Ιεράρχησης των Υλικών (top-down eco-design)

2.3.4 AKZ ως Εργαλείο Εκτίμησης Κόστους

Η απόφαση για την κατασκευή μιας βιομηχανικής μονάδας εξαρτάται συνήθως από πόσο επικερδής θα είναι η λειτουργία της. Με τη χρήση της AKZ μας δίνεται η δυνατότητα ανάλυσης του ολικού κόστους της παραγωγής ενός προϊόντος, συμπεριλαμβανομένων και των επί μέρους επιπτώσεων της χρήσης του προϊόντος.

2.4 Αειφόρος Ανάπτυξη και ΑΚΖ

Η ΑΚΖ αποτελεί ένα από τα εργαλεία που θα μας επιτρέψει να πετύχουμε το στόχο της αειφόρου ανάπτυξης που τέθηκε στη διάσκεψη των Ηνωμένων Εθνών, στο Ρίο ντε Τζανέιρο, το 1992, για το περιβάλλον και την ανάπτυξη. Αναφέρεται στη μελλοντική ανάπτυξη της ανθρωπότητας και αποτελείται από τρεις πυλώνες το περιβάλλον, την οικονομία και την κοινωνία. Οι προαναφερόμενοι παράγοντες αποτελούν τους πυλώνες της έννοιας της αειφορίας και πρέπει να αξιολογούνται αναλόγως και να εξισορροποούνται κατάλληλα κατά το σχεδιασμό ενός νέου προϊόντος/διεργασίας ή τη βελτίωση ενός υφιστάμενου προϊόντος/διεργασίας.



Σχήμα 2-6: Πυλώνες της Βιώσιμης Ανάπτυξης

[Πηγή: <http://cempaka-nature.blogspot.com/2009/11/ri-to-expand-research-for-sustainable.html>]

Οποιοδήποτε περιβαλλοντική, οικονομική ή κοινωνική μεθοδολογική αξιολόγηση των προϊόντων πρέπει να λαμβάνει υπόψη της τον πλήρη κύκλο ζωής που αρχίζει από την εξαγωγή των πρώτων υλών, ακολουθεί η παραγωγή, η χρήση και καταλήγει στην τελική διάθεσή του. Η συνολική αξιολόγηση του συστήματος αποτελεί μία απαραίτητη προϋπόθεση της αειφόρου ανάπτυξης και ο συνολικός κύκλος ζωής ενός προϊόντος καθώς και οι επιπτώσεις στο περιβάλλον.

3 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΧΡΗΣΗΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

3.1 Εισαγωγή

Στις μέρες μας έχει γίνει κατανοητό ότι η χρήση εναλλακτικών καυσίμων επιτυγχάνει την εξοικονόμηση των φυσικών πόρων-περιορισμός της χρήσης μη ανανεώσιμων στερεών καυσίμων , την αξιοποίησής του ενεργειακού περιεχομένου των ανανεώσιμων καυσίμων και τη μείωση των εκπομπών των αερίων που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου (π.χ. CO₂, CH₄) αντικαθιστώντας συγχρόνως τα ορυκτά καύσιμα με υλικά τα όποια κάτω από διαφορετικές συνθήκες θα είχαν απορριφθεί σε ΧΥΤΑ ή θα είχαν αποτεφρωθεί δημιουργώντας εκπομπές και τελικά κατάλοιπα (τέφρα).

Επιπλέον, με τη χρήση εναλλακτικών καυσίμων επιτυγχάνεται η μείωση της εξάρτησης από ενεργειακές πηγές (πετρέλαιο, άνθρακας) καθώς και η μείωση του κόστους παραγωγής.

Επισημαίνεται ότι, η χρήση των δευτερογενών καυσίμων αποτελεί αποδεδειγμένη και εδραιωμένη τεχνολογία για τη πλειοψηφία των βιομηχανιών τσιμέντου στην Ευρώπη τα τελευταία 15 χρόνια σημειώνεται ότι κατά το έτος 2006 περίπου το 18% της κατανάλωσης θερμικής ενέργειας στη τσιμεντοβιομηχανία προερχόταν από δευτερογενή καύσιμα το ποσοστό αυτό ανεβαίνει συνεχώς και ήδη ορισμένες εγκαταστάσεις παραγωγής τσιμέντου λειτουργούν με υποκατάσταση των απαιτούμενων συμβατικών καυσίμων περίπου σε ποσοστό 50-70%.

Επιπλέον η μονάδα παραγωγής τσιμέντου Maastricht στην Ολλανδία λειτουργεί με 100% υποκατάσταση

3.2 Σκοπός και αντικείμενο μελέτης

3.2.1 Σκοπός

Σκοπός της μελέτης αυτής είναι η εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της χρήσης εναλλακτικών καυσίμων στη τσιμεντοβιομηχανία και η επιλογή του καταλληλότερου από περιβαλλοντική άποψη μίγματος εναλλακτικών καυσίμων κατά την παραγωγική διαδικασία, ειδικότερα για τη λειτουργία του κλίβανου για την παραγωγή του κλίνκερ.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτιμήθηκε η χρήση εναλλακτικών καυσίμων στη τσιμεντοβιομηχανία και εκτιμήθηκαν οι σχετικές πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, ερευνήθηκαν επτά σενάρια χρήσης εναλλακτικών καυσίμων προκειμένου να επιλεγθεί το φιλικότερο προς το περιβάλλον σενάριο. Πιο συγκεκριμένα, ερευνήθηκαν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη χρήση τριών διαφορετικών εναλλακτικών καυσίμων (RDF-TDF-BS, Refuse derived fuel, Tire derived fuel, Biological sludge) σε συνδυασμό με άνθρακα (coal) και πετ κοκ (pet coke) καθώς και οι επιπτώσεις από τη χρήση μίγματος αυτών.

Κατασκευάστηκε ένα μοντέλο τύπου ρυζόχαρτου (spreadsheet) για το σχεδιασμό των διαφορετικών σεναρίων λαμβάνοντας υπόψη τα ποιοτικά χαρακτηριστικά, τη στοιχειομετρία καθώς και τη θερμογόνο δύναμη των εναλλακτικών καυσίμων που εξετάζονται στην εν λόγω μελέτη. Το μοντέλο αυτό έχει επίσης τη δυνατότητα να υπολογίζει τις απαιτούμενες αναλώσεις εναλλακτικών καυσίμων για τη λειτουργία περιστροφικού κλίβανου παραγωγής κλίνκερ ξηρής μεθόδου και να εκτιμά τις ρυπογόνες εκπομπές στην ατμόσφαιρα τα ύδατα και το έδαφος που συνδέονται με τη λειτουργία του περιστροφικού κλίβανου και την παραγωγή ενός τόνου κλίνκερ.

Ως εργαλεία χρησιμοποιήθηκαν η μεθοδολογία της Ανάλυσης/Αξιολόγησης Κύκλου Ζωής (AKZ), μεθοδολογία αποτίμησης που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των πιθανών επιπτώσεων στο περιβάλλον που προκαλούνται από την εφαρμογή διαφορετικών τεχνολογιών καθώς και για τη σύγκριση των επτά σεναρίων.

Τα συμπεράσματα αυτής της εργασίας θα είναι χρήσιμα στους υπευθύνους μηχανικούς στις τοπικές αρχές (ειδικότερα στους επιστήμονες που συμμετέχουν στην λήψη αποφάσεων) και στις εγκαταστάσεις παραγωγής τσιμέντου.

Η μεθοδολογία AKZ χρησιμοποιήθηκε για την επιλογή του φιλικότερου προς το περιβάλλον ολοκληρωμένου συστήματος παραγωγής κλίνκερ με χρήση εναλλακτικών καυσίμων.

Χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό SimaPro 7.1, το οποίο εφαρμόζεται ευρέως σε εφαρμογές AKZ παγκοσμίως. Συγκεκριμένα το πρόγραμμα SimaPro 7.1 περιέχει ένα μεγάλο αριθμό μεθόδων αξιολόγησης που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό και την εκτίμηση των αποτελεσμάτων της AKZ καθώς επίσης και ένα μεγάλο αριθμό βάσεων δεδομένων που συντελούν στην επίτευξη μιας λεπτομερούς ανάλυσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων με ένα συστηματικό και συνεπή τρόπο.

Η βασική δομή της μεθοδολογίας AKZ σύμφωνα με το πρόγραμμα SimaPro αποτελείται από τα παρακάτω βήματα:

- Το Χαρακτηρισμό (Characterisation): Κατά το βήμα αυτό οι ουσίες που συμβάλλουν σε μια κατηγορία επίπτωσης πολλαπλασιάζονται με έναν παράγοντα χαρακτηρισμού, ο οποίος εκφράζει τη σχετική συμβολή κάθε ουσίας.
- Την Αξιολόγηση Ζημιάς (Damage Assessment): Προστίθενται δείκτες κατηγορίας επίπτωσης κοινής βάσης στις μεθόδους αξιολόγησης που περιέχονται στο πρόγραμμα SimaPro.
- Την Κανονικοποίηση (Normalisation): Κατά το βήμα αυτό οι δείκτες των κατηγοριών επίπτωσης διαμορφώνονται στην ίδια μονάδα έτσι ώστε να καθίσταται ευκολότερη η σύγκριση τους. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των δεικτών κατηγορίας επίπτωσης πραγματοποιείται σε σχέση με μια τιμή αναφοράς, η οποία είτε επιλέγεται, είτε συχνά υπολογίζεται (για παράδειγμα το μέσο ετήσιο περιβαλλοντικό φορτίο μιας χώρας ή ηπείρου, διαιρείται με τον αριθμό των κατοίκων και το αποτέλεσμα χρησιμοποιείται ως τιμή αναφοράς).
- Τη Στάθμιση (Weighting): Σε αυτό το βήμα τα αποτελέσματα των δεικτών κάθε κατηγορίας επίπτωσης των παραπάνω βημάτων πολλαπλασιάζονται με παράγοντες στάθμισης και προστίθενται για να διαμορφώσουν ένα συνολικό αποτέλεσμα. Το βήμα της στάθμισης εφαρμόζεται σε κανονικοποιημένα ή μη

κανονικοποιημένα αποτελέσματα, δεδομένου ότι μερικές μέθοδοι αξιολόγησης δεν περιέχουν το βήμα της κανονικοποίησης.

3.2.2 Μέθοδοι αξιολόγησης

Κατά την εφαρμογή του προγράμματος SimaPro 7.1, οι μέθοδοι αξιολόγησης που χρησιμοποιήθηκαν ήταν η μέθοδος CML 2 Baseline 2000 Factors [Centre for Environmental Studies (CML), University of Leiden, September 2001], και η Eco-Indicator 99.

Η μέθοδος **CML 2 Baseline 2000** είναι μια εκσυγχρονισμένη αναπροσαρμογή του Ολλανδικού Οδηγού για την AKZ [Dutch Guide to LCA, Centre of Environmental Science (CML), 1992]. Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή στο βήμα του χαρακτηρισμού ο Οδηγός CML παρέχει ένα κατάλογο κατηγοριών αξιολόγησης επίπτωσης που ομαδοποιούνται σε: υποχρεωτικές κατηγορίες επίπτωσης (οι δείκτες των κατηγοριών αυτών χρησιμοποιούνται στις περισσότερες AKZ), πρόσθετες κατηγορίες επίπτωσης (οι λειτουργικοί δείκτες που προκύπτουν, δεν συμπεριλαμβάνονται συχνά στις μελέτες AKZ) και άλλες κατηγορίες επίπτωσης (οι λειτουργικοί δείκτες δεν είναι διαθέσιμοι, επομένως οι κατηγορίες αυτές δεν περιέχονται σε ποσοτικές AKZ). Με αυτή τη μέθοδο αξιολόγησης εκτιμούνται οι εκπομπές στο έδαφος, τα ύδατα και την ατμόσφαιρα. Οι εκπομπές στο έδαφος διαχωρίζονται σε εκπομπές στο γεωργικό έδαφος (agricultural soil) και εκπομπές στο βιομηχανικό έδαφος (industrial soil) και υποδεικνύονται με τις ενδείξεις (agr.) ή (ind.) αντίστοιχα μετά τα ονόματα των ουσιών που εκπέμπονται. Επίσης οι εκπομπές στη θάλασσα υποδεικνύονται με την ένδειξη (sea), ενώ οι εκπομπές στο γλυκό νερό δεν έχουν καμία προσθήκη μετά το όνομα των ουσιών που εκπέμπονται.

Οι κατηγορίες επίπτωσης που ερευνήθηκαν και αποτιμήθηκαν για κάθε σενάριο με την μεθοδολογία AKZ και με τις μεθόδους αξιολόγησης CML 2 Baseline 2000 Factors και Eco-Indicator 99 παρουσιάζονται στις ενότητες που ακολουθούν:

Η **κατηγοριοποίηση** των επιπτώσεων, αφορά στην υποβάθμιση οικοσυστήματος, στη εξάντληση των φυσικών πόρων και στις επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία. Οι εξεταζόμενες **κατηγορίες επίπτωσης** είναι οι εξής:

- **Εξάντληση Αβιοτικών Πόρων (Abiotic Depletion).** Η κατηγορία αυτή σχετίζεται με την εξόρυξη ανόργανων ουσιών και ορυκτών καυσίμων και μετريέται σε σχέση με τα αποθέματα σε παγκόσμια κλίμακα. Ο δείκτης εξάντλησης αβιοτικών πόρων (Abiotic Depletion Potential, ADP) καθορίζεται για κάθε εξόρυξη ανόργανων ουσιών και ορυκτών καυσίμων kg ισοδύναμων αντιμονίου (kg Sb eq) / kg εξόρυξης] με βάση τη συγκέντρωση των αποθεμάτων και το ρυθμό εξαγωγής.
- **Φαινόμενο του Θερμοκηπίου (Global Warming).** Σχετίζεται με την κλιματική αλλαγή του πλανήτη και οφείλεται στις αέριες εκπομπές κυρίως του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) και άλλων αερίων του θερμοκηπίου (όπως το μεθάνιο- CH_4 , το νιτρικό διοξείδιο- NO_2 , οι χλωροφθοράνθρακες-CFCs, κ.ά.). Οι δείκτες εκφράζονται ως δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη για χρονικό ορίζοντα 100 ετών (Global Warming Potential, GWP100), σε kg διοξειδίου του άνθρακα ($\text{kg CO}_2 \text{ eq}$) / kg εκπομπών.
- **Φωτοχημική οξείδωση (Photochemical oxidant formation).** Κατά τη φωτοχημική οξείδωση σχηματίζονται δραστικές ουσίες (κυρίως όζον), που είναι επιβλαβείς για την ανθρώπινη υγεία και τα οικοσυστήματα καθώς και τις καλλιέργειες. Ο δείκτης δυναμικότητας δημιουργίας φωτοχημικού όζοντος (Photochemical Ozone Creation Potential, POCP) εκφράζεται σε ισοδύναμα kg αιθυλενίου ($\text{kg C}_2\text{H}_4 \text{ eq}$) / kg εκπομπών και αναφέρεται σε χρονικό διάστημα 5 ημερών.
- **Οξίνιση (Acidification).** Οι ουσίες που προκαλούν οξίνιση (μείωση του pH) μπορούν να επιφέρουν ένα ευρύ φάσμα επιπτώσεων στο έδαφος, τα υπόγεια και επιφανειακά ύδατα, τους ζώντες οργανισμούς, τα οικοσυστήματα καθώς και σε υλικά αγαθά όπως κτίρια. Ο δείκτης οξίνισης (Acidification Potential, AP) για τις ατμοσφαιρικές εκπομπές περιγράφει την απόθεση όξινων ουσιών και εκφράζεται ως ισοδύναμα kg SO_2 / kg εκπομπών.
- **Επιπτώσεις τοξικότητας στον άνθρωπο (Human Toxicity).** Η κατηγορία αυτή αφορά στις επιπτώσεις των τοξικών ουσιών στο ανθρώπινο περιβάλλον. Οι τοξικολογικές επιδράσεις στους ανθρώπους εξαρτώνται από την έκθεση σε χημικές και βιολογικές ουσίες. Οι δείκτες περιγράφουν τη δυνατότητα τοξικότητας στον άνθρωπο (Human Toxicity Potential, HTP) και τις επιπτώσεις των τοξικών ουσιών χωρίς συγκεκριμένο χρονικό

όριο και εκφράζονται ως ισοδύναμα 1,4-διχλωροβενζολίου (kg 1,4 DB eq) / kg εκπομπών.

- **Οικοτοξικότητα Ύδατος (Aquatic Ecotoxicity, ECA).** Ο δείκτης αυτός αναφέρεται στην κατηγορία των επιπτώσεων στα υδάτινα οικοσυστήματα, ως αποτέλεσμα των εκπομπών τοξικών ουσιών στον αέρα, το νερό και το έδαφος και το δυναμικού οικοτοξικότητας (Eco-Toxicity Potential, ECA) περιγράφει την έκταση της έκθεσης σε τοξικές ουσίες και τις επιπτώσεις από αυτή. Εκφράζεται ως ισοδύναμα 1,4-διχλωροβενζολίου (kg 1,4 DB eq) / kg εκπομπών.
- **Θαλάσσια Οικοτοξικότητα (Marine aquatic ecotoxicity).** Αναφέρεται στις επιπτώσεις των τοξικών ουσιών στα θαλάσσια οικοσυστήματα κατά τρόπο αντίστοιχο με τις επιπτώσεις στα ύδατα. Εκφράζεται ως ισοδύναμα 1,4-διχλωροβενζολίου (kg 1,4 DB eq) / kg εκπομπών.
- **Επίγεια οικοτοξικότητα (Terrestrial ecotoxicity).** Η κατηγορία αυτή εξετάζει τις επιπτώσεις των τοξικών ουσιών στα χερσαία οικοσυστήματα και αφορά στην επιβάρυνση του εδάφους έως ένα κρίσιμο επίπεδο από 1kg ουσίας. Μετράται σε ισοδύναμα 1,4διχλωροβενζολίου (kg 1,4 DB eq) / kg εκπομπών.
- **Ευτροφισμός (Eutrophication).** Ο ευτροφισμός ή εμπλουτισμός θρεπτικών συστατικών των υδάτινων οικοσυστημάτων και των οικοσυστημάτων εδάφους, προκαλείται από το πλεονάζον άζωτο, φώσφορο και τις διασπώμενες οργανικές ουσίες. Περιλαμβάνει όλες τις επιπτώσεις που οφείλονται σε αύξηση των εκπομπών των θρεπτικών συστατικών, κυρίως αζώτου και φωσφόρου, στο περιβάλλον. Ο δείκτης παρουσίας θρεπτικών συστατικών (Nutrification potential, NP) εκφράζεται ως ισοδύναμα kg PO₄ / kg εκπομπών.
- **Εξασθένιση της στρωβάδας του όζοντος (Ozone layer Depletion).** Λόγω της μείωσης του στρατοσφαιρικού όζοντος, φτάνει στην επιφάνεια της γης μεγαλύτερο ποσοστό της UV-B ακτινοβολίας. Η αύξηση την UV ακτινοβολίας έχει επιβλαβείς επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, την υγεία των ζώων, τα χερσαία και υδάτινα οικοσυστήματα και τους βιοχημικούς κύκλους. Το μοντέλο χαρακτηρισμού καθορίζει το δυναμικό καταστροφής της στρωβάδας του όζοντος (*Ozone layer Depletion*, ODP) διαφόρων αερίων (kg ισοδύναμων CFC-11 / kg εκπομπών).

- **Βιοτικοί πόροι (Biotic resources).** Η κατηγορία αυτή σχετίζεται με την χλωρίδα και την πανίδα.
- **Χρήση εδάφους (Land use).** Η χρήση και η υποβάθμιση της γης σχετίζεται με το οικοσύστημα, την υποβάθμιση του τοπίου, την αποξήρανση, τις αλλαγές του φυσικού περιβάλλοντος και τις επιδράσεις στη βιοποικιλότητα αλλά και τον άνθρωπο.
- **Οικοτοξικολογικές Επιπτώσεις (Ecotoxicological impacts).** Οι επιπτώσεις στα οικοσυστήματα εξαρτώνται από τις εκπομπές και τις αρνητικές συνέπειες χημικών και βιολογικών ουσιών που εκλύονται στο περιβάλλον.
- **Περιβάλλον Εργασίας (Work environment).** Η κατηγορία επιπτώσεων για το εργασιακό περιβάλλον αφορά τις επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και προκαλούνται από τη θερμότητα, το θόρυβο, τις μονότονες συνθήκες εργασίας.

Η μέθοδος **Eco-indicator 99** είναι αυτή που ακολούθησε τη μέθοδο Eco-indicator 95, η οποία εισήχθη το 1997 από μία ομάδα επιστημόνων σύμφωνα με το Υπουργείο Περιβάλλοντος της Ολλανδίας. Τόσο η πρώτη, όσο και η δεύτερη είναι μέθοδοι προσανατολισμένες στην περιβαλλοντική βλάβη. Η ανάπτυξη της μεθοδολογίας Eco-indicator 99 ξεκινά με το σχεδιασμό της διαδικασίας στάθμισης.

Με τη μέθοδο Eco-Indicator 99 έχουμε ένα δείκτη που εκφράζει την συνολική περιβαλλοντική επιβάρυνση ενός προϊόντος ή μιας διαδικασίας για ολόκληρο τον κύκλο ζωής του. Η μεθοδολογία αυτή στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό στη μεθοδολογία που διατυπώνει το διεθνές πρότυπο ISO 14000 και 14042.

Ως μονάδα μέτρησης χρησιμοποιείται ο ένας βαθμός οίκο-δείκτης (eco-indicator Point) ο οποίος συμβολίζεται με τα γράμματα Pt συνήθως όμως χρησιμοποιείται το χιλιοστό (milli-Point) mPt. Το απόλυτο μέγεθος αυτών των τιμών δεν παίζει ουσιαστικό ρόλο διότι στόχος μιας ΑΚΖ είναι η σύγκριση μεταξύ προϊόντων. Η κλίμακα έχει επιλεγεί έτσι ώστε η αξία 1 Pt να αντιπροσωπεύει το ένα χιλιοστό του ετήσιου περιβαλλοντικού φορτίου ενός μέσου Ευρωπαίου πολίτη.

Η μέθοδος αυτή οδηγεί στην εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων λαμβάνοντας υπόψη αρκετές κατηγορίες επιπτώσεων οι οποίες διαχωρίζονται τρεις κύριες κατηγορίες επιπτώσεων στο περιβάλλον (end-point evaluation):

Στην κατηγορία **Ανθρώπινη υγεία (Human Health)** η επίπτωση στην ανθρώπινη υγεία εκφράζεται από τον αριθμό και τη διάρκεια νοσημάτων και τα χρόνια ζωής που χάνονται λόγω πρόωρου θανάτου από περιβαλλοντικές αιτίες. Έτσι, γίνεται σύνδεση μεταξύ της ανθρώπινης υγείας και των παρακάτω επιπτώσεων.

- Καρκινογένεση (Carcinogens): Οι καρκινογενέσεις οφείλονται στις καρκινογόνες εκπομπές στο νερό, τον αέρα και το χώμα.
- Αναπνευστικά προβλήματα από οργανικά (Resp. Organics): οφείλονται στη δημιουργία νέφους στην ατμόσφαιρα από τις εκπομπές οργανικών ουσιών όπως πτητικές οργανικές ουσίες (VOC, Volatile Organic Compounds)
- Αναπνευστικά προβλήματα από ανόργανα (Resp. inorganics): οφείλονται από τη αιθαλομίχλη στην ατμόσφαιρα που προκαλείται από τις εκπομπές σκόνης, θεικών και νιτρικών οξειδίων.
- Κλιματική αλλαγή (Climate change): η επίπτωση αυτή μελετάται ανάλογα με την αύξηση των ασθενειών και των θανάτων που οφείλονται στην κλιματική αλλαγή. Αυτή η κατηγορία ισοδυναμεί με την κατηγορία Global Warming και οι δύο κατηγορίες εκφράζονται σε kg διοξειδίου του άνθρακα ($\text{kg CO}_2 \text{ eq}$) / kg εκπομπών.
- Ακτινοβολία (Radiation): η επίπτωση αυτή μελετάται ως αποτέλεσμα της ραδιενεργής ακτινοβολίας.
- Καταστροφή στρωμάδας όζοντος (Ozone layer): η επίπτωση αυτή οφείλεται στην αυξημένη UV ακτινοβολία που οφείλεται στην μείωση της στρωμάδας του όζοντος στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας.

Στην κατηγορία **Ποιότητα Οικοσυστήματος (Ecosystem Quality)** εξετάζονται σημαντικές αξίες για τα οικοσυστήματα όπως η βιοποικιλότητα, οι υπηρεσίες των οικοσυστημάτων και η αισθητική τους αξία. Η ποιότητα του οικοσυστήματος εκφράζεται από την επίπτωση στην ποικιλία των ειδών ειδικότερα στα αγγειόφυτα και στους κατώτερους οργανισμούς. Οι επιπτώσεις που περιλαμβάνονται είναι η οικοτοξικότητα, η οξίνιση, ο ευτροφισμός και η χρήση γης.

- Τοξικές επιπτώσεις στο οικοσύστημα (Ecotoxicity): η οικοτοξικότητα εκφράζει τις επιπτώσεις στον αέρα, το νερό και το χώμα σε σχέση με την συγκέντρωση τοξικών ουσιών. Όσο αυξάνεται είναι η συγκέντρωση των ουσιών αυτών τόσο αυξάνεται και ο αριθμός των ειδών που επηρεάζονται.

- Ευτροφισμός/Οξίνιση (Acidification/ Eutrophication): οφείλεται στις εκπομπές ουσιών όπως νιτρικά οξείδια και θειικά διοξείδια που προκαλούν οξίνιση στον αέρα.
- Χρήση Γης (Land use): αυτή η κατηγορία επηρεάζει την ποικιλία των ειδών ανάλογα με τη μορφή αλλά και το μέγεθος της χρήσης γης.

Στην κατηγορία **Επίπτωση στους πόρους** η μείωση της συγκέντρωσης των ορυκτών πόρων εκφράζεται ως το πλεόνασμα ενέργειας που θα απαιτηθεί στο μέλλον από τις επόμενες γενιές για την εξόρυξη χαμηλότερης ποιότητας μεταλλευμάτων και ορυκτών πόρων (η εξάντληση των γεωργικών πόρων και χύμα πόρων όπως άμμος και χαλίκι περιλαμβάνονται στη χρήση γης).

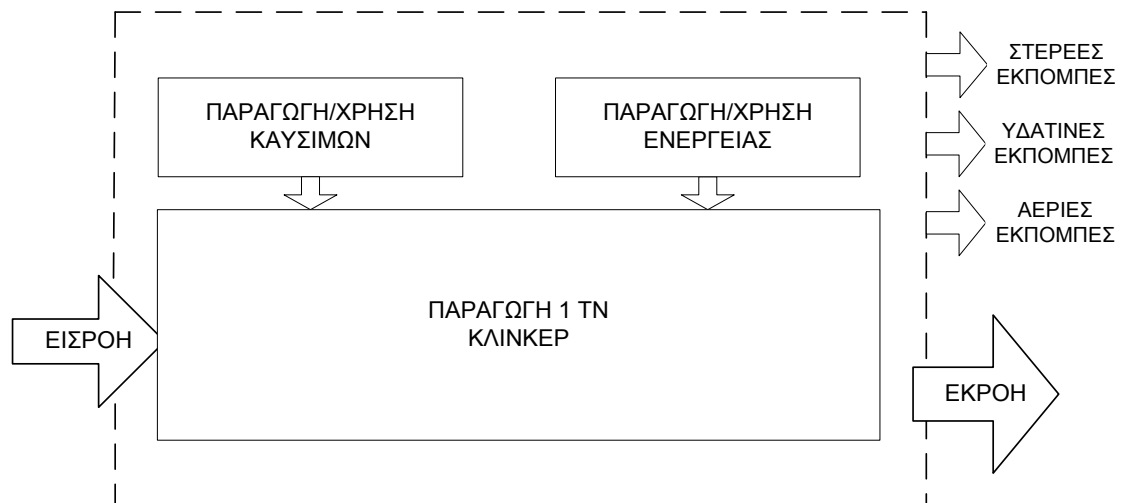
- Εξάλειψη ορυκτών πόρων (Minerals): η επίπτωση αυτή εκφράζεται ως η επιπλέον ενέργεια ανά κιλό ορυκτού ή μεταλλεύματος, σαν αποτέλεσμα της μείωσης των βαθμών μεταλλεύματος.
- Εξάλειψη ορυκτών ενεργειακών πόρων (Fossil fuels): η επίπτωση αυτή εκφράζεται ως η επιπλέον ενέργεια ανά εξαγόμενο MJ, kg ή m³ σαν αποτέλεσμα της χαμηλότερης ποιότητας στους πόρους.

3.2.3 Λειτουργική Μονάδα (Functional Unit)

Μια βασική μονάδα που πρέπει να οριστεί σύμφωνα με την μεθοδολογία AKZ είναι η λειτουργική μονάδα. Στα πλαίσια της μελέτης, η λειτουργική μονάδα επιλέχθηκε ως η παραγωγή **ενός τόνου κλίνκερ**. Η επιλογή αυτή πραγματοποιήθηκε έτσι ώστε να γίνει σύγκριση των απαιτούμενων εισροών και των εκροών του συστήματος παραγωγής κλίνκερ και σε αντιστοιχία με άλλες μελέτες (Boesch et al. 2009, Feiz et al. 2014, García-Gusano et al. 2013).

3.2.4 Σύστημα και όρια του συστήματος

Το σύστημα (Διάγραμμα ροής 3-1) που μελετάται είναι η λειτουργία του περιστροφικού κλιβάνου μιας τσιμεντοβιομηχανίας για την παραγωγή ενός τόνου κλίνκερ με χρήση ορυκτών και εναλλακτικών καυσίμων.



Διάγραμμα ροής 3-1: Γενικό διάγραμμα ροής παραγωγικής διαδικασίας 1t κλίνκερ.

Εντός των ορίων του συστήματος, εκτός από την παραγωγική διαδικασία του κλιβάνου περιλαμβάνονται επίσης η παράγωγή της απαιτούμενης φαρίνας, περίπου 1,69 t, οι μεταφορές των πρώτων υλών από το λατομείο στο εργοστάσιο, η παραγωγή και η χρήση των καυσίμων (ορυκτών και εναλλακτικών), η παραγωγή και η χρήση της ενέργειας (ηλεκτρική ενέργεια) για την λειτουργία της εγκατάστασής καθώς και η παραγωγή βοηθητικών υλικών που απαιτούνται κατά τη διεργασία. Ο όρος βοηθητικά υλικά περιλαμβάνει τις βοηθητικές πρώτες ύλες που απαιτούνται για τη παραγωγή της φαρίνας.

3.2.5 Υποθέσεις (Assumptions)

Κατά το σχεδιασμό των επτά σεναρίων έχουν ληφθεί υπόψη οι παρακάτω υποθέσεις:

- Στην παρούσα μελέτη εξετάστηκαν τα RDF (EKA 19 12 10), TDF (EKA 16 01 03), BS (EKA 20 03 06) ως εναλλακτικά καύσιμα.
- Επιπλέον τα ορυκτά καύσιμα που θεωρήθηκε ότι χρησιμοποιήθηκαν είναι τα COAL (άνθρακας) και PET COKE (πετ κοκ).
- Στη συγκεκριμένη μελέτη θεωρήθηκε ότι κατά η διεργασία παραγωγής κλίνκερ γίνεται σε περιστροφικό κλίβανο ετήσιας παραγωγικής δυναμικότητας 1.500.000t. Ο κλίβανος λειτουργεί με ξηρή μέθοδο (dry

process), θερμικής αναλογίας 850kcal/kg και είναι εξοπλισμένος με δύο κυκλικούς προθερμαντήρες.

- Τα εναλλακτικά καύσιμα αντικαθιστούν το 10% της συνολικής απαιτούμενης θερμογόνου δύναμης για τη λειτουργία του περιστροφικού κλιβάνου και την παραγωγή 1t κλίνκερ. Επιπλέον εξετάστηκε και η περίπτωση αντικατάστασης του 30% της συνολικής απαιτούμενης θερμογόνου δύναμης για την λειτουργία του κλιβάνου.
- Κατά τον σχεδιασμό των σεναρίων θεωρείται ότι η θερμογόνος δύναμη και αντίστοιχα η ποσότητα του coal παραμένει σταθερή ενώ μεταβάλλεται σύμφωνα με τις απαιτήσεις της λειτουργίας του κλιβάνου η ποσότητα του pet coke. Επιπλέον επισημαίνεται ότι η μεταβολή του pet coke οφείλεται στην αντικατάσταση του με εναλλακτικά καύσιμα.
- Σύμφωνα με τον σχεδιασμό των σεναρίων στα τρία πρώτα σεναρία εξετάζεται η χρήση των συμβατικών καυσίμων, ενώ στα υπόλοιπα τέσσερα γίνεται χρήση συμβατικών και εναλλακτικών καυσίμων.
- Τέλος, για την λειτουργία του κλιβάνου εκτιμάται ότι οι απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια ανέρχονται σε περίπου 90kWh/1t κλίνκερ.
- Θεωρείται ότι για την παραγωγή 1t φαρίνας χρησιμοποιούνται ως πρώτες ύλες: ασβεστόλιθος, σχιστόλιθος, φλύσχης, ψαμμίτης, βωξίτης, ψωρόλιθος σε ποσότητα 0,8627t, 0,0908t, 0,0005t, 0,0054t, 0,0023t, 0,0020t αντίστοιχα. Επιπλέον ως βοηθητικές ύλες χρησιμοποιούνται υγρή ιπτάμενη τέφρα (EKA 10 01 02, 10 01 17) ποσότητας 0,0018t και απολείσματα σιδήρου-σιδηροπυρίτης (EKA 06 10 99, 06 01 99) 0,0182t. Επιπλέον η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια για την παραγωγή της φαρίνας αντιστοιχεί σε 50kWh/1t φαρίνας.
- Επιπλέον θεωρείται ότι η συνολική απόσταση για την μεταφορά των πρώτων υλών από το λατομείο στο εργοστάσιο ισούται με 35km.
- Το TDF δεν μπορεί να υπερβαίνει το 30% στον κλίβανο επειδή σε υψηλές περιεκτικότητες είναι δυνατόν να μεταβάλλουν αρνητικά τη χημεία διαδικασίας σκλήρυνσης του τσιμέντου εξαιτίας των μεγάλων ποσοτήτων ψευδαργύρου Zn που περιέχονται.
- Τέλος, θεωρείται ότι η συγκέντρωση των βαρέων μετάλλων στα εναλλακτικά καύσιμα που εφαρμόζονται σ' αυτήν την πτυχιακή μελέτη είναι αμελητέα και

συνεπώς δεν δημιουργούνται επιβαρύνσεις στις ατμοσφαιρικές εκπομπές από αυτά.

3.2.6 Υπολογισμοί για το σχεδιασμό των σεναρίων

Πρώτες ύλες και ενέργεια για την παραγωγή κλίνκερ

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται οι πρώτες ύλες για την παραγωγή φαρίνας, τα χαρακτηριστικά του περιστροφικού κλιβάνου και η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια της συγκεκριμένης διεργασίας.

Πίνακας 3-1: Απαιτούμενες πρώτες ύλες για την παραγωγή φαρίνας

Πρώτες ύλες	T πρώτης ύλης / t φαρίνας
Ασβεστόλιθος	0,8627
Σχιστόλιθος	0,0908
Φλύσχης	0,0005
Ψαμμίτης	0,0054
Βωξίτης	0,0023
Ψωρόλιθος	0,0020
Υγρή Ιπτάμενη Τέφρα	0,0018
Απολεπίσματα Σιδήρου	0,0182

Πίνακας 3-2: Χαρακτηριστικά περιστροφικού κλιβάνου

Παραγωγική δυναμικότητα	1.500.000t clinker/ year
Θερμική αναλογία	850kcal/kg clinker

Πίνακας 3-3: Απαιτούμενη Ηλεκτρική Ενέργεια

Ηλεκτρική ενέργεια για την παραγωγή 1t φαρίνας	50 kWh
Ηλεκτρική ενέργεια για την παραγωγή 1t κλίνκερ	70 kWh

ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΑ ΚΑΥΣΙΜΑ

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα ποιοτικά χαρακτηριστικά η θερμογόνος δύναμη, η χημική σύσταση των καυσίμων που μελετήθηκαν καθώς και οι συντελεστές των αέριων εκπομπών που προκύπτουν από την καύση τους σε περιστροφικό κλίβανο.

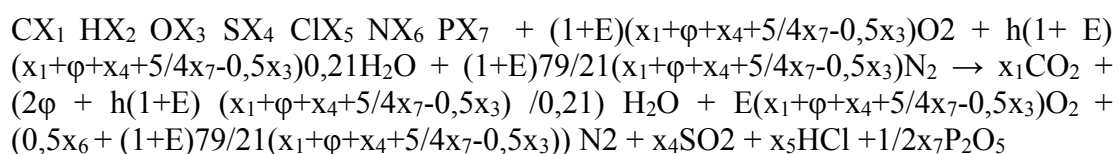
Πίνακας 3-4: Ποιοτικά χαρακτηριστικά καυσίμων (Πηγή: Lyberatos et al.(2011), Tsiliyannis (2012))

Component	Coal (CL)	Petroleum coke (PC)	Refuse derived fuel (RDF)	Biological Sludge (BS)	Tire derived fuel (TDF)
NCV (kj/kg) dry fuel	30000	33000	26000	16000	32000
Ultimate analysis mass%					
C	0,7527	0,8820	0,5300	0,4050	0,8170
H	0,0470	0,0374	0,0700	0,0700	0,0784
O	0,0793	0,0076	0,2100	0,3264	0,0102
S	0,0028	0,0434	0,0000	0,0012	0,0181
N	0,0198	0,0237	0,0001	0,0084	0,0057
Cl	0,0000	0,0000	0,0000	0,0100	0,0000
P	0,0000	0,0000	0,1899	0,0000	0,0706
Slag	0,0984	0,0058	0,0000	0,1790	0,0000

Πίνακας 3-5: Αέριες εκπομπές καυσίμων (πηγή: Tsiliyannis (2012))

Αέριες εκπομπές	Συντελεστής αέριων εκπομπών ανά τόνο καυσίμου				
	Coal (CL)	Petroleum coke (PC)	Refuse derived fuel (RDF)	Biological Sludge (BS)	Tire derived fuel (TDF)
CO ₂	2,7599	3,2340	1,9433	1,4850	2,9957
H ₂ O	0,5968	0,5009	0,8114	0,7916	0,9415
O ₂	0,4697	0,5374	0,4017	0,2665	0,5791
N ₂	9,2764	10,6133	7,9339	5,2674	11,4363
SO ₂	0,0905	0,1083	0,0005	0,0384	0,0261
HCl	0,0032	0,0488	0,0000	0,0014	0,0204
P ₂ O ₅	0,0000	0,0000	0,4349	0,0000	0,1617

Η γενική αντίδραση των καυσίμων (εναλλακτικών και συμβατικών) κατά την καύση τους στον προθερμαντήρα του κλιβάνου παρουσιάζεται παρακάτω:



όπου $\varphi = 1/4 (x_2 - x_5)$ if $x_2 > x_5$, $\varphi = 0$ if $x_2 \leq x_5$ και

h = air humidity (molal fraction) και E = excess air

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι ποσότητες των καυσίμων συμβατικών και εναλλακτικών όπως έχουν υπολογιστεί για το κάθε σενάριο για την παραγωγή ενός τόνου κλίνκερ. Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζεται η απαιτούμενη ποσότητα των καυσίμων σε τόνους για το κάθε σενάριο όπως αυτά έχουν σχεδιαστεί για την αντικατάσταση της απαιτούμενης θερμογόνου δύναμης από εναλλακτικά καύσιμα κατά 10% και 30%.

Πίνακας 3-6: Ποσότητες καυσίμων σεναρίων (αντικατάσταση 10% από εναλλακτικά καύσιμα)

	Σενάριο 1 Coal- Petcoke	Σενάριο 2 Coal	Σενάριο 3 Pet coke	Σενάριο 4 Coal- Petcoke- TDF	Σενάριο 5 Coal- Petcoke- BS	Σενάριο 6 Coal- Petcoke- RDF	Σενάριο 7 Coal- Petcoke- TDF-BS- RDF
Coal (t)	0,03556	0,11855	-	0,03556	0,03556	0,03556	0,03556
Pet coke (t)	0,07544	-	0,10777	0,06466	0,06466	0,06466	0,06466
TDF (t)	-	-	-	0,01111	-	-	0,00370
BS (t)	-	-	-	-	0,02223	-	0,00740
RDF (t)	-	-	-	-	-	0,01368	0,00455

**Πίνακας 3-7: Ποσότητες καυσίμων σεναρίων
(αντικατάσταση 30% από εναλλακτικά καύσιμα)**

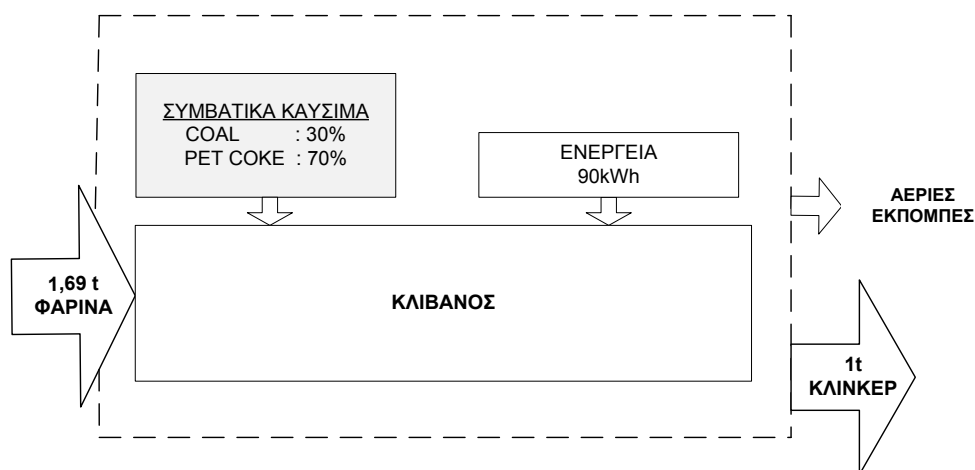
	Σενάριο 1 Coal- Petcoke	Σενάριο 2 Coal	Σενάριο 3 Pet coke	Σενάριο 4 Coal- Petcoke- TDF	Σενάριο 5 Coal- Petcoke- BS	Σενάριο 6 Coal- Petcoke- RDF	Σενάριο 7 Coal- Petcoke- TDF-BS- RDF
Coal (t)	0,03556	0,11855	-	0,03556	0,03556	0,03556	0,03556
Pet coke (t)	0,07544	-	0,10777	0,04311	0,04311	0,04311	0,04311
TDF (t)	-	-	-	0,03334	-	-	0,01111
BS (t)	-	-	-	-	0,06668	-	0,02223
RDF (t)	-	-	-	-	-	0,04104	0,01368

3.2.7 Παρουσίαση Σεναρίων

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά τα σενάρια που εφαρμόστηκαν στην συγκεκριμένη εργασία. Καθοριστικό ρόλο κατά τον σχεδιασμό των σεναρίων έπαιξε η απαιτούμενη ποσότητα καυσίμων για την παραγωγή ενός τόνου κλίνκερ, κάτι που προκύπτει ανάλογα με τη θερμογόνο δύναμη των καυσίμων.

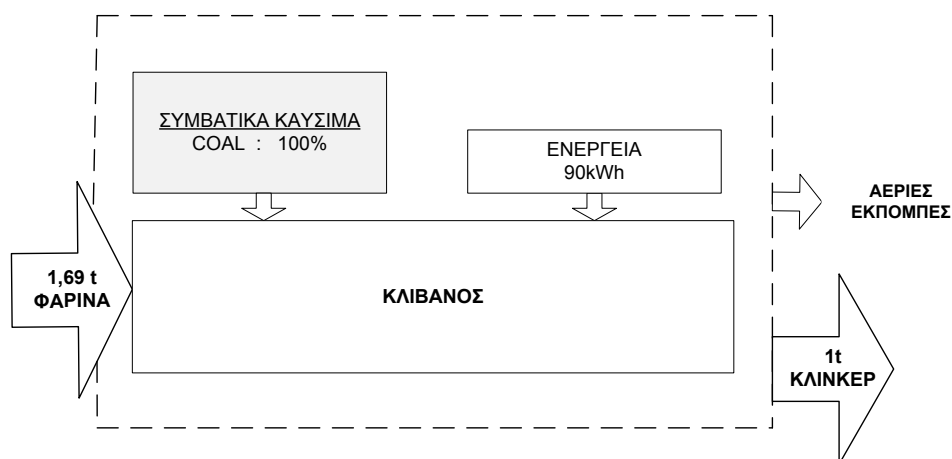
Κατά τη μελέτη εκτιμήθηκε ότι η απαιτούμενη ποσότητα θερμογόνου δύναμης για την παράγωγή ενός 1 κιλού κλίνκερ ισούται με 850kcal. Στις παραγράφους που ακολουθούν δίνεται η αναλυτική περιγραφή κάθε σεναρίου κατά το σχεδιασμό των οποίων θεωρήθηκε ότι τα εναλλακτικά καύσιμα αποδίδουν το 10% της απαιτούμενης θερμογόνου δύναμης.

ΣΕΝΑΡΙΟ 1: Στο σενάριο 1 έγινε η παραδοχή ότι ως συμβατικά καύσιμα χρησιμοποιήθηκαν μίγμα άνθρακα (coal) και πετ κοκ (pet coke) σε αναλογία 30% και 70% της θερμογόνου δύναμης αντίστοιχα. Σύμφωνα με τη θερμογόνο δύναμη για την παραγωγή ενός τόνου κλίνκερ υπολογίστηκε ότι σε αυτό το σενάριο η απαιτούμενη ποσότητα άνθρακα ανέρχεται περίπου σε 0,03556t και η απαιτούμενη ποσότητα σε pet coke 0,07544t



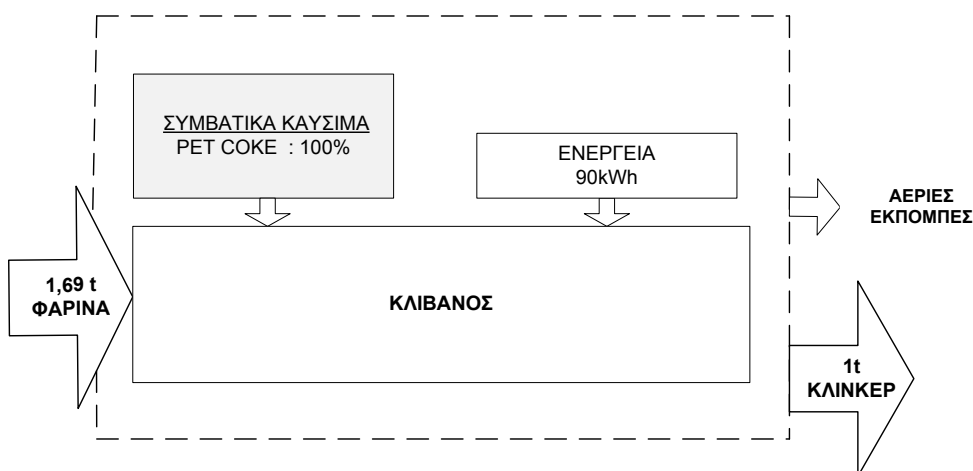
Διάγραμμα ροής 3-2: Διάγραμμα ροής σεναρίου 1

ΣΕΝΑΡΙΟ 2: Στο σενάριο 2 έγινε η παραδοχή ότι ως καύσιμο χρησιμοποιείται άνθρακας (coal) στο 100% της απαιτούμενης θερμογόνου δύναμης. Εκτιμήθηκε ότι η ποσότητα του άνθρακα ανέρχεται σε περίπου 0,11855t για την παραγωγή ενός τόνου κλίνκερ.



Διάγραμμα ροής 3-3: Διάγραμμα ροής σεναρίου 2

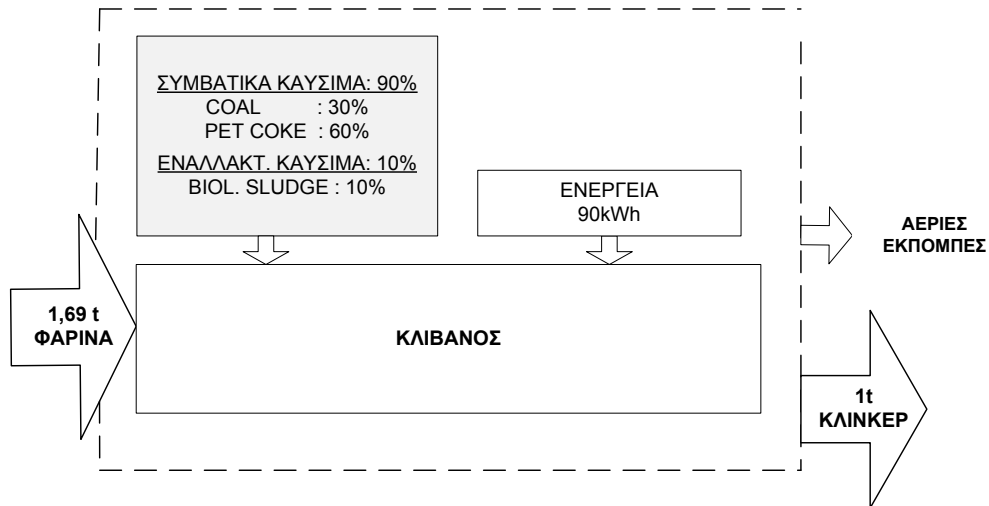
ΣΕΝΑΡΙΟ 3: Στο σενάριο 3 έγινε η παραδοχή ότι ως καύσιμο χρησιμοποιείται μόνο πετ κοκ (pet coke) στο 100% της απαιτούμενης θερμογόνου δύναμης. Εκτιμήθηκε ότι η ποσότητα του pet coke ανέρχεται σε περίπου 0,10777t για την παραγωγή ενός τόνου κλίνκερ.



Διάγραμμα ροής 3-4: Διάγραμμα ροής σεναρίου 3

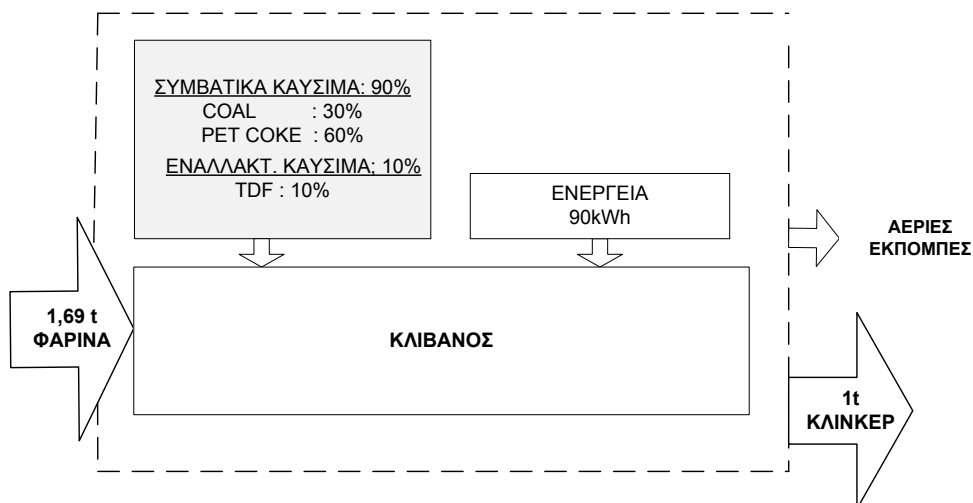
ΣΕΝΑΡΙΟ 4: Στο σενάριο 4 θεωρείται ότι ως καύσιμο χρησιμοποιείται μίγμα συμβατικών καυσίμων coal και pet coke σε ποσότητες που να αντιστοιχούν στο 90% της συνολικής θερμογόνου δύναμης ενώ το 10% της συνολικής θερμογόνου δύναμης αντικαθίσταται από εναλλακτικό καύσιμο TDF (Tire Derived Fuel).

Εκτιμήθηκε ότι η ποσότητα για την παραγωγή ενός τόνου κλίνκερ των συμβατικών καυσίμων Coal και Pet coke ανέρχεται σε περίπου 0,035556t, 0,06466t αντίστοιχα, ενώ η ποσότητα του TDF ανέρχεται σε 0,01111t.



Διάγραμμα ροής 3-5: Διάγραμμα ροής σεναρίου 4

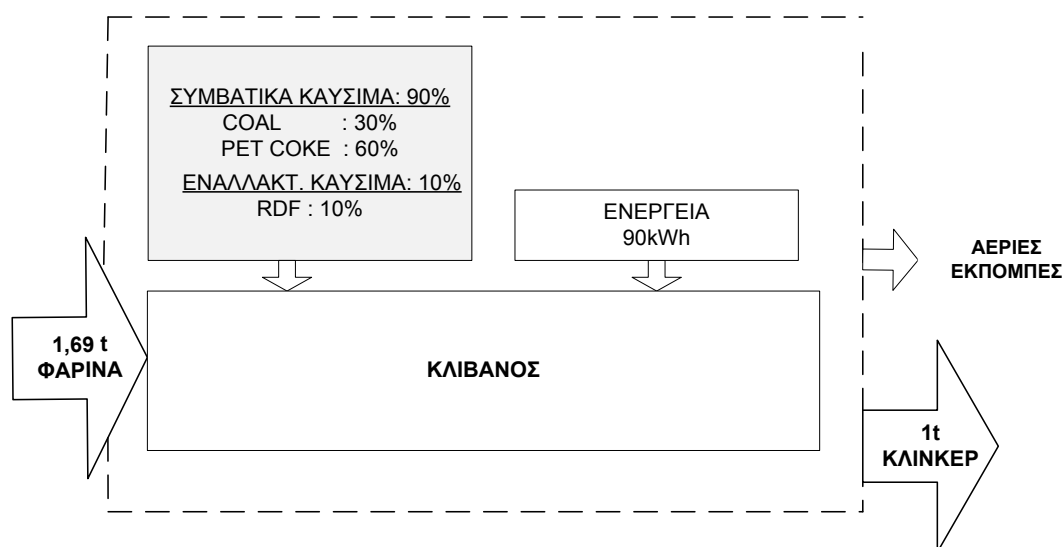
ΣΕΝΑΡΙΟ 5: Στο σενάριο 5 έγινε η παραδοχή ότι ως καύσιμο χρησιμοποιείται μίγμα συμβατικών καυσίμων coal και pet coke όπως αυτό του 1^{ου} σεναρίου με τη διαφορά ότι έγινε αντικατάσταση του 10% της απαιτούμενης θερμογόνου δύναμης του pet coke με εναλλακτικό καύσιμο BS (Biological Sludge). Εκτιμήθηκε ότι η ποσότητα των καυσίμων Coal, Pet coke και BS ανέρχεται σε περίπου 0,035556t, 0,06466t, 0,0223t αντίστοιχα για την παραγωγή ενός τόνου κλίνκερ.



Διάγραμμα ροής 3-6: Διάγραμμα ροής σεναρίου 5

ΣΕΝΑΡΙΟ 6: Στο σενάριο 6 έγινε η παραδοχή ότι ως καύσιμο χρησιμοποιείται μίγμα συμβατικών καυσίμων coal και pet coke όπως αυτό του 1^{ου} σεναρίου με τη διαφορά ότι έγινε αντικατάσταση του 10% της απαιτούμενης θερμογόνου δύναμης του pet coke με εναλλακτικό καύσιμο RDF(Refuse Derived Fuel).

Εκτιμήθηκε ότι η ποσότητα των καυσίμων Coal, Pet coke και BS ανέρχεται σε περίπου 0,035556t, 0,06466t, 0,01368t αντίστοιχα για την παραγωγή ενός τόνου κλίνκερ.

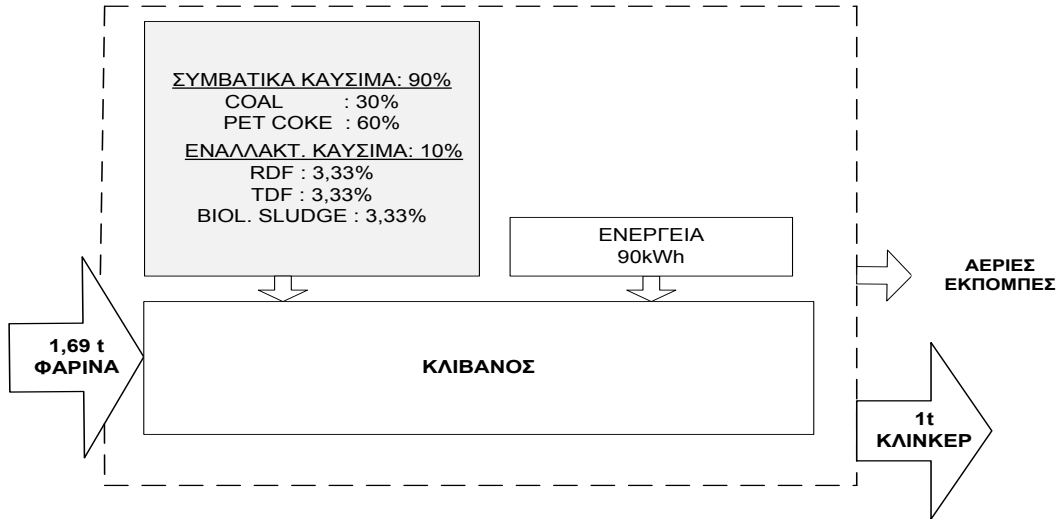


Διάγραμμα ροής 3-7: Διάγραμμα ροής σεναρίου 6

ΣΕΝΑΡΙΟ 7: Στο σενάριο 7 έγινε η παραδοχή ότι ως καύσιμο χρησιμοποιείται μίγμα συμβατικών καυσίμων coal και pet coke όπως αυτό του 1^{ου} σεναρίου με τη διαφορά ότι έγινε αντικατάσταση του 10% της απαιτούμενης θερμογόνου δύναμης του pet coke με ένα μίγμα εναλλακτικών καυσίμων.

Το μίγμα αυτό αποτελείται από BS, TDF και RDF με και το κάθε ένα από τα εναλλακτικά καύσιμα αυτά αντικαθιστά το 1/3 της συνολικής θερμογόνου δύναμης που αντιστοιχεί στο μίγμα.

Εκτιμήθηκε ότι η ποσότητα των καυσίμων Coal, Pet coke ,BS, TDF και RDF ανέρχεται σε περίπου 0,035556t, 0,06466t, 0,00370t, 0,00740t και 0,00455t αντίστοιχα για την παραγωγή ενός τόνου κλίνκερ.



Διάγραμμα ροής 3-8: Διάγραμμα ροής σεναρίου 7

4 Αποτελέσματα και Ερμηνεία Αποτελεσμάτων

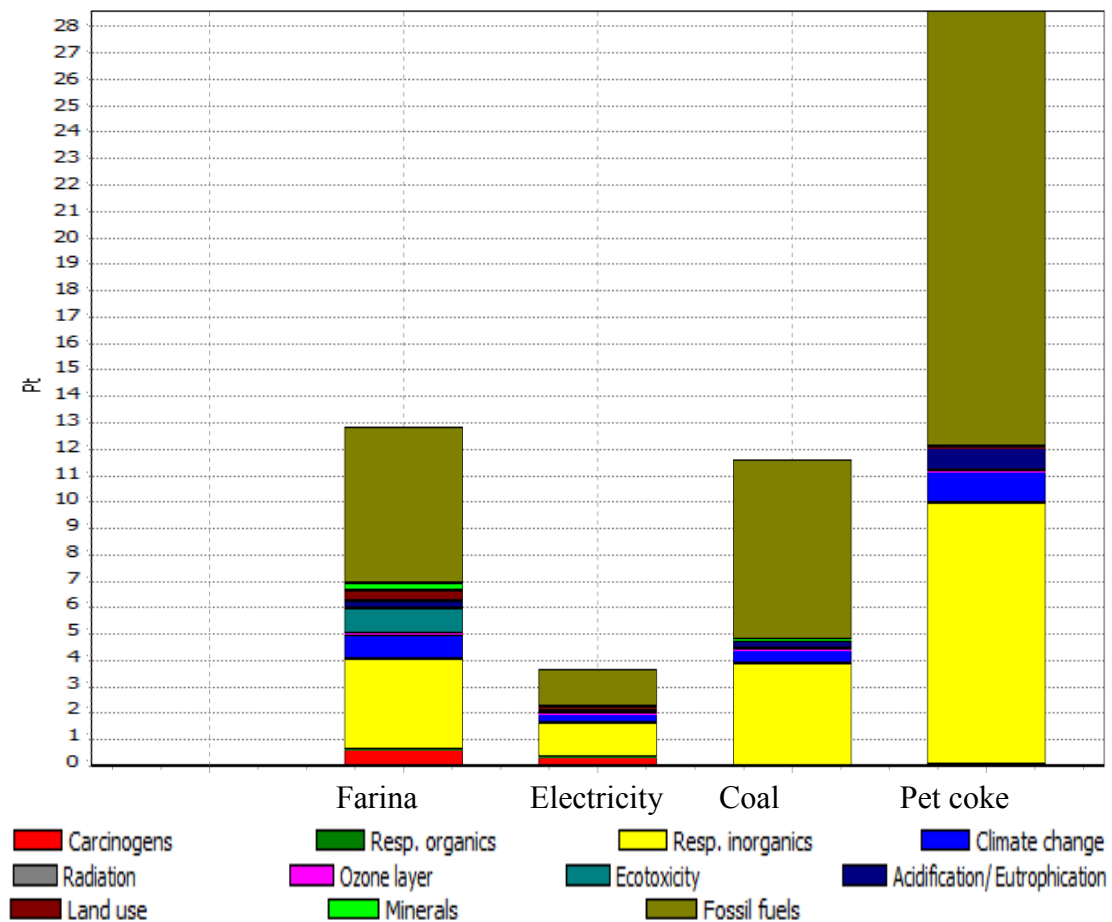
Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται και ερμηνεύονται τα αποτελέσματα των περιβαλλοντικών επιπτώσεων όπως λαμβάνονται από το πρόγραμμα της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής SimaPro 7.1. Οι κατηγορίες επιπτώσεων που εξετάστηκαν έχουν ληφθεί με χρήση της μέθοδο Eco-Indicator 99. Επιπλέον κατά τον υπολογισμό λαμβάνονται υπόψη τα αποτελέσματα του single score της μεθόδου. Στα παρακάτω αποτελέσματα παρουσιάζονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκύπτουν από την παραγωγή της φαρίνας που χρειάζεται ως πρώτη ύλη, της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας και την καύση των συμβατικών καυσίμων Coal και Pet coke και των εναλλακτικών καυσίμων TDF,BS και RDF σε περιστροφικό κλίβανο για τη παραγωγή ενός τόνου κλίνκερ. Στο υπό εξέταση σύστημα οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις οφείλονται κυρίως στην καύση των καυσίμων (συμβατικών και εναλλακτικών), και στην ενότητα αυτή αναλύεται η σύγκριση των εφαρμοζόμενων σεναρίων. Αρχικά, εξετάζεται το καθένα ολοκληρωμένο σενάριο ξεχωριστά και αναλύονται οι επιπτώσεις των διαφορετικών διεργασιών στις αντίστοιχες κατηγορίες επιπτώσεων.

ΣΕΝΑΡΙΟ 1: Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του Σεναρίου 1 ανά κατηγορία επίπτωσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-1 και απεικονίζονται στο Διάγραμμα 4-1.

Πίνακας 4-1: Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις Σεναρίου 1- Eco-Indicator 99

Impact category	Unit	Total	Farina	Electricity	Coal	Pet coke
Total	Pt	56,65397	12,81494	3,64884	11,60654	28,58364
Carcinogens	Pt	1,02388	0,64327	0,35922	0,00653	0,01485
Resp. organics	Pt	0,02336	0,00288	0,00022	0,00594	0,01431
Resp. inorganics	Pt	18,48533	3,40532	1,27059	3,88356	9,92585
Climate change	Pt	2,95034	0,92062	0,33718	0,49755	1,19499
Radiation	Pt	0,02589	0,02354	0,00048	0,00053	0,00133
Ozone layer	Pt	0,01105	0,00057	0,00005	0,00299	0,00744
Ecotoxicity	Pt	1,19478	0,97037	0,14191	0,02320	0,05931
Acidification/ Eutrophication	Pt	1,49432	0,26344	0,07317	0,32872	0,82898
Land use	Pt	0,46982	0,41711	0,02257	0,00864	0,02150

Minerals	Pt	0,31750	0,26668	0,04760	0,00093	0,00229
Fossil fuels	Pt	30,65770	5,90113	1,39585	6,84793	16,51278



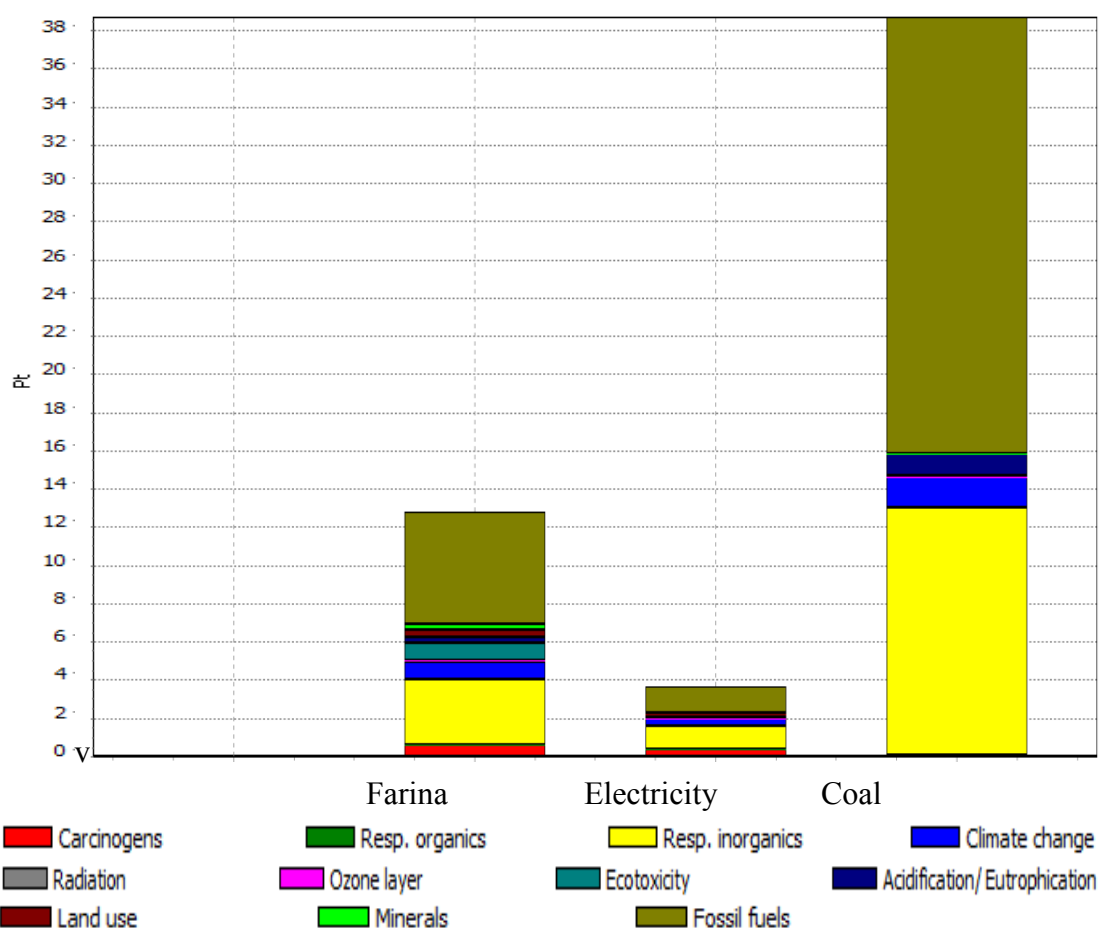
Διάγραμμα 4-1: Διάγραμμα περιβαλλοντικών επιπτώσεων Σεναρίου 1-Eco-Indicator 99

Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκύπτουν από την καύση των συμβατικών καυσίμων Coal και Pet coke για την παραγωγή ενός τόνου κλίνκερ. Παρατηρείται ότι τα συμβατικά καύσιμα έχουν τις μεγαλύτερες επιπτώσεις στις κατηγορίες ορυκτά καύσιμα (Fossil fuels), αναπνευστικά προβλήματα από ανόργανων ουσιών (Resp. inorganics), κλιματική αλλαγή (Climate change) και οξίνιση/ευτροφισμός (Acidification/ Eutrophication).

ΣΕΝΑΡΙΟ 2: Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του Σεναρίου 2 ανά κατηγορία επίπτωσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-2 και απεικονίζονται στο Διάγραμμα 4-2

Πίνακας 4-2: Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις Σεναρίου 2- Eco-Indicator 99

Impact category	Unit	Total	Farina	Electricity	Coal
Total	Pt	55,15770	12,81494	3,64884	38,69392
Carcinogens	Pt	1,02427	0,64327	0,35922	0,02178
Resp. organics	Pt	0,02290	0,00288	0,00022	0,01980
Resp. inorganics	Pt	17,62295	3,40532	1,27059	12,94704
Climate change	Pt	2,91654	0,92062	0,33718	1,65874
Radiation	Pt	0,02580	0,02354	0,00048	0,00177
Ozone layer	Pt	0,01059	0,00057	0,00005	0,00997
Ecotoxicity	Pt	1,18962	0,97037	0,14191	0,07735
Acidification/ Eutrophication	Pt	1,43251	0,26344	0,07317	1,09589
Land use	Pt	0,46850	0,41711	0,02257	0,02882
Minerals	Pt	0,31739	0,26668	0,04760	0,00311
Fossil fuels	Pt	30,12664	5,90113	1,39585	22,82966

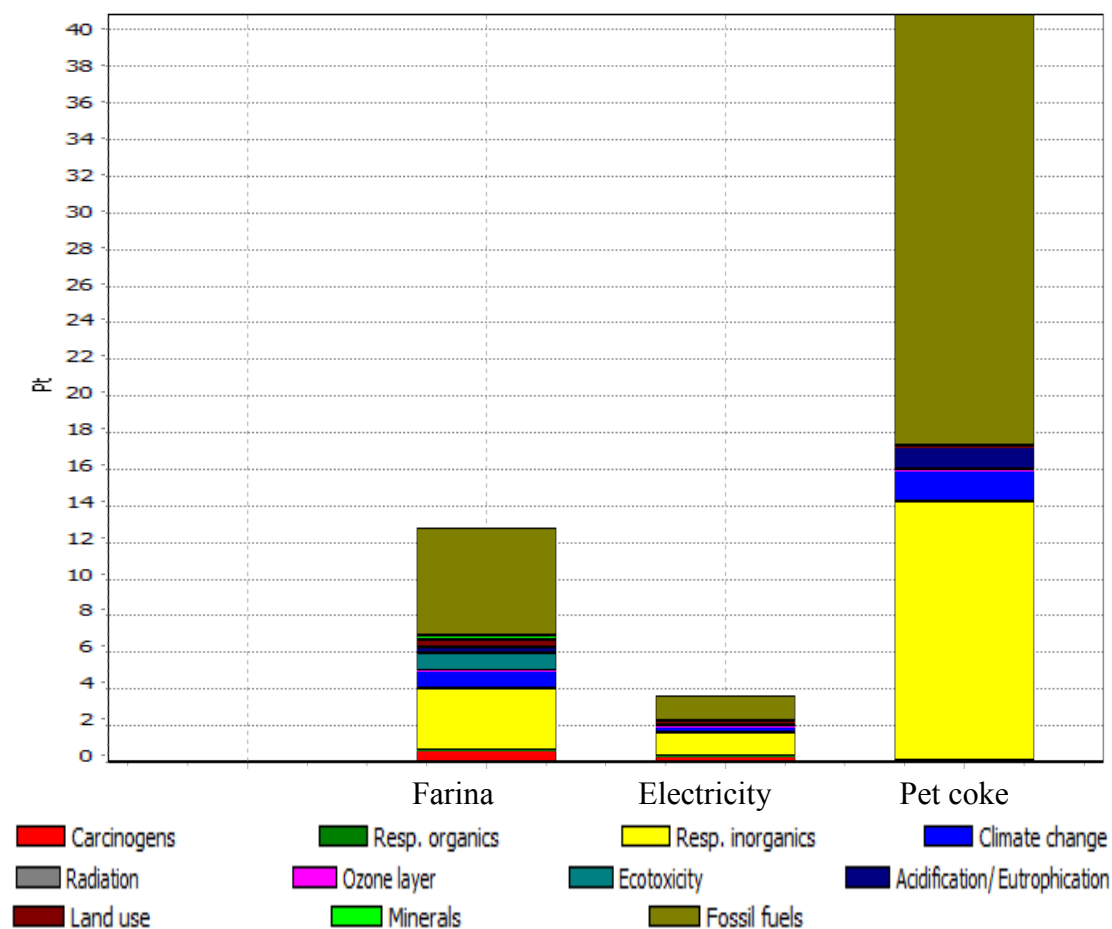


Διάγραμμα 4-2: Διάγραμμα περιβαλλοντικών επιπτώσεων Σεναρίου 2.

Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκύπτουν από την καύση του συμβατικού καυσίμου Coal και για την παραγωγή ενός τόνου κλίνκερ. Παρατηρείται ότι το Coal έχει τις μεγαλύτερες επιπτώσεις στις

κατηγορίες ορυκτών καυσίμων (Fossil fuels), αναπνευστικά προβλήματα λόγω ανόργανων ουσιών (Resp. inorganics), κλιματική αλλαγή (Climate change) και οξίνιση/ευτροφισμός (Acidification/ Eutrophication).

ΣΕΝΑΡΙΟ 3: Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του Σεναρίου 3 ανά κατηγορία επίπτωσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-3 και απεικονίζονται στο Διάγραμμα 4-3.



Διάγραμμα 4-3: Διάγραμμα περιβαλλοντικών επιπτώσεων Σεναρίου 3.

Πίνακας 4-3: Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις Σεναρίου 3 - Eco-Indicator 99

Impact category	Unit	Total	Farina	Electricity	Pet coke
Total	Pt	57,29701	12,81494	3,64884	40,83323
Carcinogens	Pt	1,02371	0,64327	0,35922	0,02122
Resp. organics	Pt	0,02355	0,00288	0,00022	0,02045
Resp. inorganics	Pt	18,85551	3,40532	1,27059	14,17960
Climate change	Pt	2,96490	0,92062	0,33718	1,70711
Radiation	Pt	0,02592	0,02354	0,00048	0,00190
Ozone layer	Pt	0,01125	0,00057	0,00005	0,01063
Ecotoxicity	Pt	1,19700	0,97037	0,14191	0,08472

Acidification/ Eutrophication	Pt	1,52086	0,26344	0,07317	1,18424
Land use	Pt	0,47039	0,41711	0,02257	0,03071
Minerals	Pt	0,31755	0,26668	0,04760	0,00327
Fossil fuels	Pt	30,88636	5,90113	1,39585	23,58938

Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκύπτουν από την καύση του συμβατικού καυσίμου Pet coke και για την παραγωγή ενός τόνου κλίνκερ. Παρατηρείται ότι το καύσιμο αυτό έχει τις μεγαλύτερες επιπτώσεις στις κατηγορίες ορυκτά καύσιμα (Fossil fuels), αναπνευστικά προβλήματα λόγω ανόργανων ουσιών (Resp. inorganics), κλιματική αλλαγή (Climate change) και οξίνιση/ευτροφισμός (Acidification/ Eutrophication).

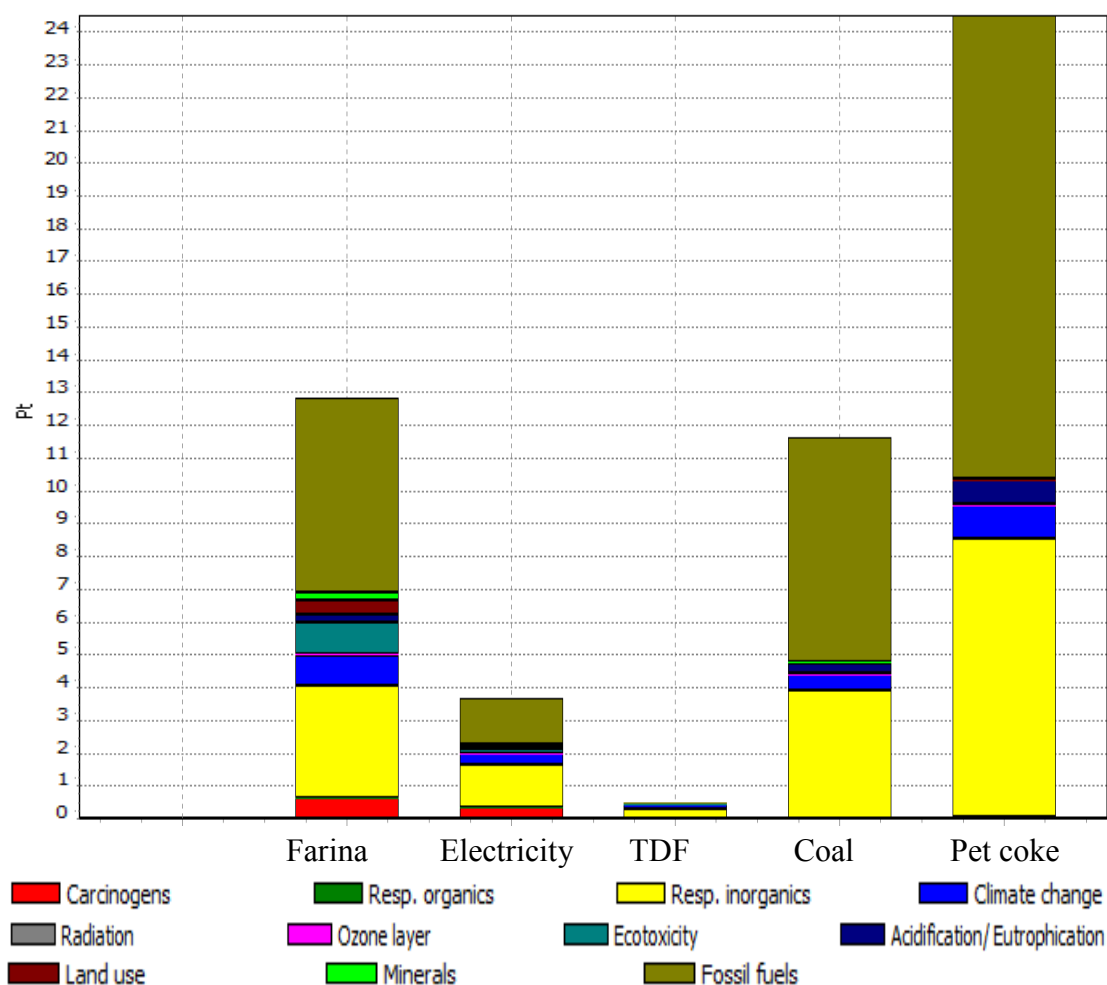
ΣΕΝΑΡΙΟ 4: Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του Σεναρίου 4 ανά κατηγορία επίπτωσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-4 και απεικονίζονται στο Διάγραμμα 4-4

Πίνακας 4-4: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις Σεναρίου 4 - Eco-Indicator 99

Impact category	Unit	Total	Farina	Electricity	TDF	Coal	Pet coke
Total	Pt	53,0388	12,8149	3,6488	0,4693	11,6065	24,4992
Carcinogens	Pt	1,0218	0,6433	0,3592	0,0000	0,0065	0,0127
Resp. organics	Pt	0,0213	0,0029	0,0002	0,0000	0,0059	0,0123
Resp. inorganics	Pt	17,3762	3,4053	1,2706	0,3092	3,8836	8,5075
Climate change	Pt	2,9161	0,9206	0,3372	0,1365	0,4976	1,0242
Radiation	Pt	0,0257	0,0235	0,0005	0,0000	0,0005	0,0011
Ozone layer	Pt	0,0100	0,0006	0,0000	0,0000	0,0030	0,0064
Ecotoxicity	Pt	1,1863	0,9704	0,1419	0,0000	0,0232	0,0508
Acidification/ Eutrophication	Pt	1,3994	0,2634	0,0732	0,0235	0,3287	0,7105
Land use	Pt	0,4668	0,4171	0,0226	0,0000	0,0086	0,0184
Minerals	Pt	0,3172	0,2667	0,0476	0,0000	0,0009	0,0020
Fossil fuels	Pt	28,2981	5,9011	1,3959	0,0000	6,8479	14,1532

Στο διάγραμμα 4-4 απεικονίζονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκύπτουν από την καύση των συμβατικών καυσίμου Coal και Pet coke για την παραγωγή ενός τόνου κλίνκερ. Παρατηρείται πως τα συμβατικά καύσιμα έχουν τις μεγαλύτερες επιπτώσεις στις κατηγορίες των ορυκτών καυσίμων (Fossil fuels), των αναπνευστικών προβλημάτων λόγω ανόργανων ουσιών (Resp. inorganics), την κλιματική αλλαγή (Climate change) και την οξίνιση/ευτροφισμός (Acidification/ Eutrophication).

Επιπλέον παρατηρείται πως το εναλλακτικό καύσιμο TDF συμβάλλει κυρίως στην επίπτωση των αναπνευστικών προβλημάτων λόγω ανόργανων ουσιών (Resp. inorganics), την κλιματική αλλαγή (Climate change) και οξίνιση/ευτροφισμός (Acidification/ Eutrophication). Τέλος σύμφωνα με τα αποτελέσματα προκύπτει πως ενώ οι συνολικές επιπτώσεις που οφείλονται στο TDF ανέρχονται σε λιγότερο του ενός Pt οι επιπτώσεις του Pet coke έχουν μειωθεί κατά 4 Pt σε σχέση με το σενάριο 1 κάτι που οφείλεται στην αντικατάσταση του από TDF.

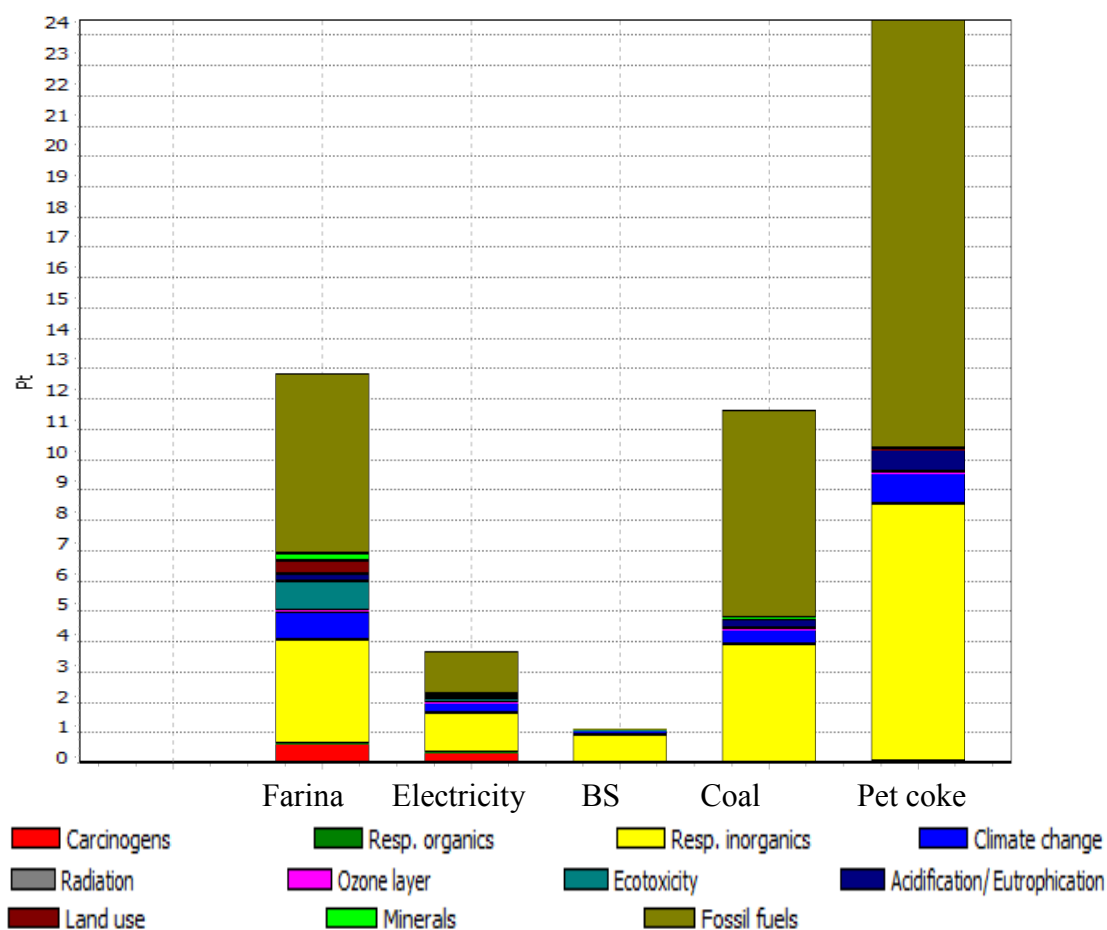


Διάγραμμα 4-4: Διάγραμμα περιβαλλοντικών επιπτώσεων Σεναρίου 4.

ΣΕΝΑΡΙΟ 5: Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του Σεναρίου 5 ανά κατηγορία επίπτωσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-5 και απεικονίζονται στο Διάγραμμα 4-5.

Πίνακας 4-5: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις Σεναρίου 5 - Eco-Indicator 99

Impact category	Unit	Total	Farina	Electricity	BS	Coal	Pet coke
Total	Pt	53,68447	12,81494	3,64884	1,11496	11,60654	24,49918
Carcinogens	Pt	1,02176	0,64327	0,35922	0,00000	0,00653	0,01273
Resp. organics	Pt	0,02131	0,00288	0,00022	0,00000	0,00594	0,01227
Resp. inorganics	Pt	17,97723	3,40532	1,27059	0,91026	3,88356	8,50750
Climate change	Pt	2,91497	0,92062	0,33718	0,13539	0,49755	1,02423
Radiation	Pt	0,02570	0,02354	0,00048	0,00000	0,00053	0,00114
Ozone layer	Pt	0,00999	0,00057	0,00005	0,00000	0,00299	0,00638
Ecotoxicity	Pt	1,18631	0,97037	0,14191	0,00000	0,02320	0,05083
Acidification/ Eutrophication	Pt	1,44518	0,26344	0,07317	0,06931	0,32872	0,71052
Land use	Pt	0,46675	0,41711	0,02257	0,00000	0,00864	0,01842
Minerals	Pt	0,31718	0,26668	0,04760	0,00000	0,00093	0,00196
Fossil fuels	Pt	28,29811	5,90113	1,39585	0,00000	6,84793	14,15319



Διάγραμμα 4-5: Διάγραμμα περιβαλλοντικών επιπτώσεων Σεναρίου 4

Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκύπτουν από την καύση των συμβατικών καυσίμου Coal και Pet coke για την παραγωγή ενός τόνου κλίνκερ. Παρατηρείται πως τα συμβατικά καύσιμα έχουν τις μεγαλύτερες επιπτώσεις στις κατηγορίες των ορυκτών καυσίμων (Fossil fuels), των αναπνευστικών προβλημάτων λόγω ανόργανων ουσιών (Resp. inorganics), την κλιματική αλλαγή (Climate change) και την οξίνιση/ευτροφισμός (Acidification/ Eutrophication).

Επιπλέον παρατηρείται πως το εναλλακτικό καύσιμο BS συμβάλλει κυρίως στις κατηγορίες επιπτώσεων αναπνευστικά προβλήματα λόγω ανόργανων ουσιών (Resp. inorganics), κλιματική αλλαγή (Climate change) και οξίνιση/ευτροφισμός (Acidification/ Eutrophication). Τέλος σύμφωνα με τα αποτελέσματα προκύπτει πως ενώ οι συνολικές επιπτώσεις που οφείλονται στο BS ανέρχονται σε 1 Pt οι επιπτώσεις του Pet coke έχουν μειωθεί κατά 4 Pt σε σχέση με το σενάριο 1 κάτι που οφείλεται στην αντικατάσταση του από BS.

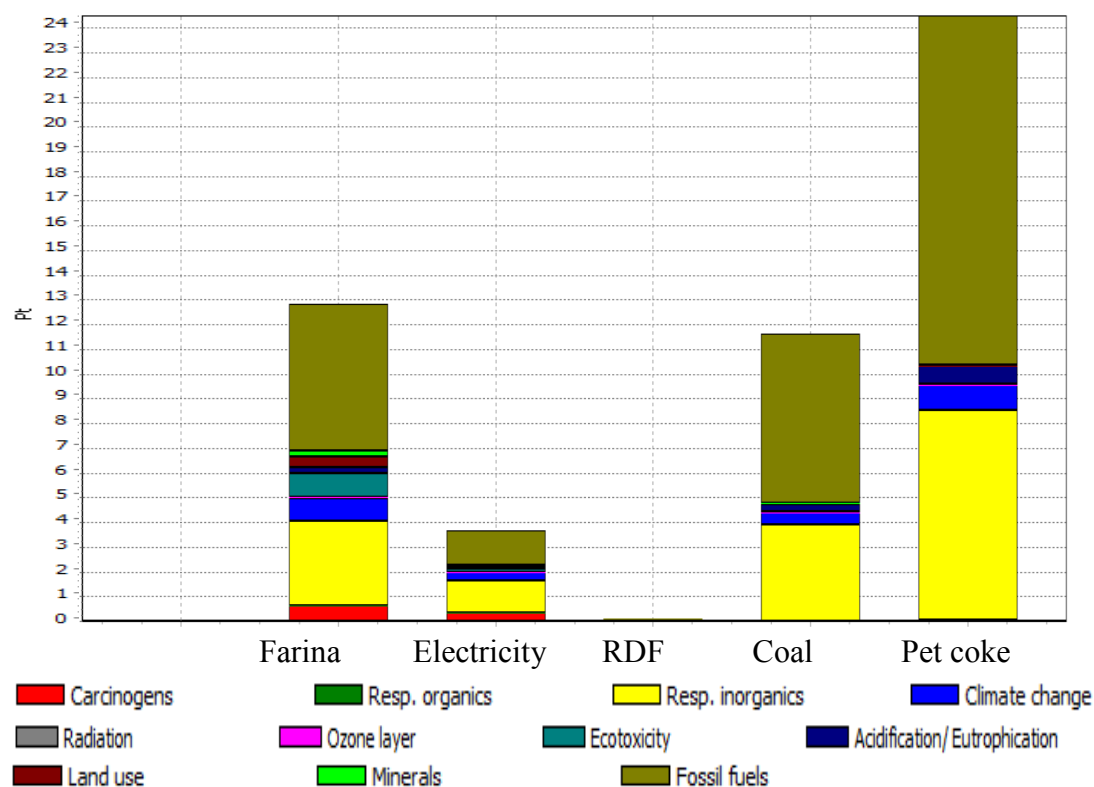
ΣΕΝΑΡΙΟ 6: Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του Σεναρίου 6 ανά κατηγορία επίπτωσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-6 και απεικονίζονται στο Διάγραμμα 4-6.

Πίνακας 4-6: Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις Σεναρίου 6 - Eco-Indicator 99

Impact category	Unit	Total	Farina	Electricity	RDF	Coal	Pet coke
Total	Pt	52,68639	12,81494	3,64884	0,11688	11,60654	24,49918
Carcinogens	Pt	1,02176	0,64327	0,35922	0,00000	0,00653	0,01273
Resp. organics	Pt	0,02131	0,00288	0,00022	0,00000	0,00594	0,01227
Resp. inorganics	Pt	17,07427	3,40532	1,27059	0,00729	3,88356	8,50750
Climate change	Pt	2,88861	0,92062	0,33718	0,10903	0,49755	1,02423
Radiation	Pt	0,02570	0,02354	0,00048	0,00000	0,00053	0,00114
Ozone layer	Pt	0,00999	0,00057	0,00005	0,00000	0,00299	0,00638
Ecotoxicity	Pt	1,18631	0,97037	0,14191	0,00000	0,02320	0,05083
Acidification/ Eutrophication	Pt	1,37642	0,26344	0,07317	0,00056	0,32872	0,71052
Land use	Pt	0,46675	0,41711	0,02257	0,00000	0,00864	0,01842
Minerals	Pt	0,31718	0,26668	0,04760	0,00000	0,00093	0,00196
Fossil fuels	Pt	28,29811	5,90113	1,39585	0,00000	6,84793	14,15319

Στο διάγραμμα που ακολουθεί απεικονίζονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκύπτουν από την καύση των συμβατικών καυσίμου Coal και Pet coke για την παραγωγή ενός τόνου κλίνκερ. Παρατηρείται πως τα συμβατικά καύσιμα έχουν τις

μεγαλύτερες επιπτώσεις στις κατηγορίες των ορυκτών καυσίμων (Fossil fuels), των αναπνευστικών προβλημάτων λόγω ανόργανων ουσιών (Resp. inorganics), την κλιματική αλλαγή (Climate change) και την οξίνιση/ευτροφισμός (Acidification/ Eutrophication).



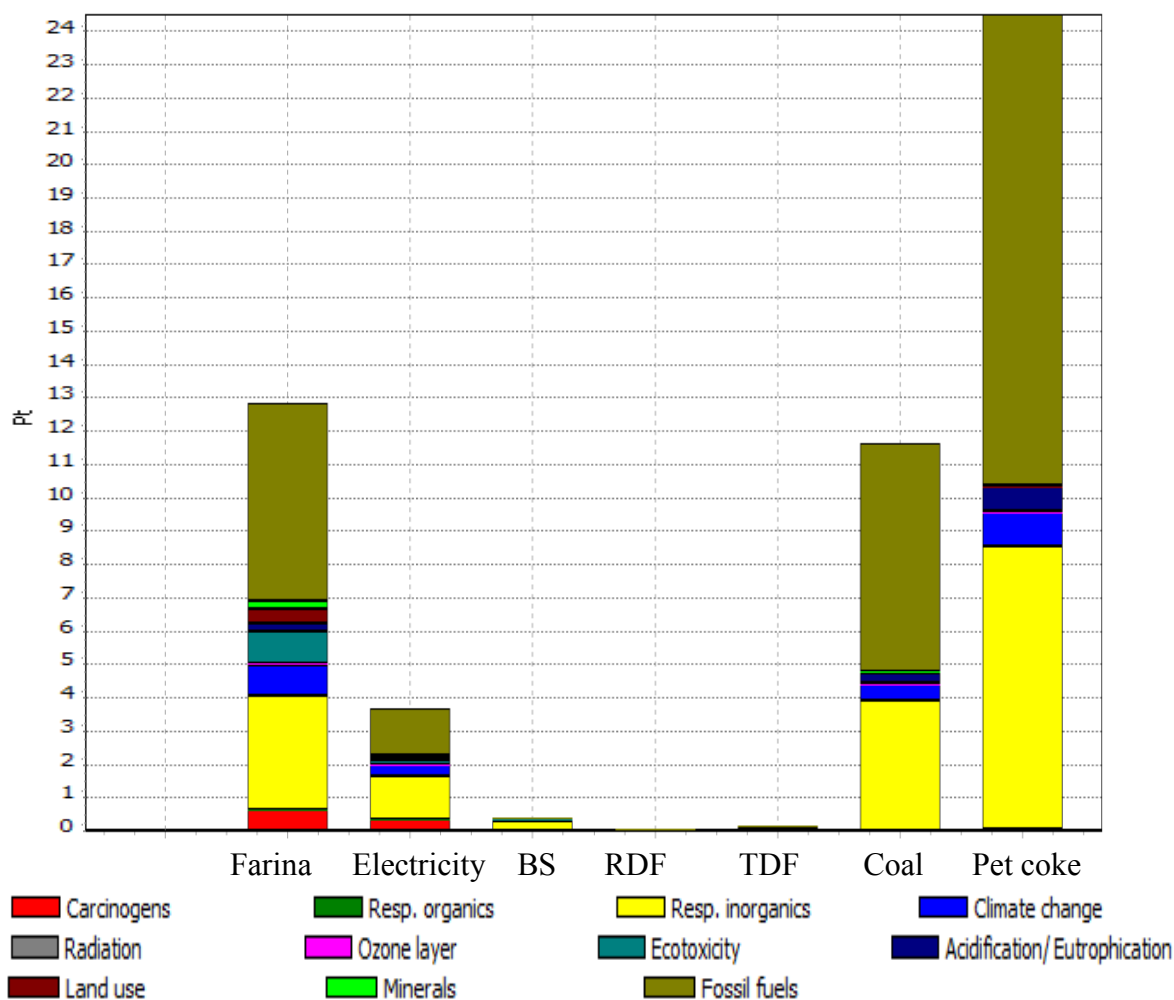
Διάγραμμα 4-6: Διάγραμμα περιβαλλοντικών επιπτώσεων Σεναρίου 6

Επιπλέον παρατηρείται ότι το εναλλακτικό καύσιμο RDF συμβάλλει κυρίως στις κατηγορίες επίπτωσης αναπνευστικά προβλήματα λόγω ανόργανων ουσιών (Resp. inorganics), κλιματική αλλαγή (Climate change) και οξίνιση/ευτροφισμός (Acidification/ Eutrophication). Τέλος σύμφωνα με τα αποτελέσματα προκύπτει πως ενώ οι συνολικές επιπτώσεις που οφείλονται στο RDF ανέρχονται σε πολύ μικρότερες του ενός Pt οι επιπτώσεις του Pet coke έχουν μειωθεί κατά 4 Pt σε σχέση με το σενάριο 1 κάτι που οφείλεται στην αντικατάσταση του από RDF.

ΣΕΝΑΡΙΟ 7: Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του Σεναρίου 7 ανά κατηγορία επίπτωσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-13 και απεικονίζονται στο Διάγραμμα 4-7.

Πίνακας 4-7: Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις Σεναρίου 7 - Eco-Indicator 99

Impact category	Unit	Total	Farina	Electricity	BS	RDF	TDF	Coal	Pet coke
Total	Pt	53,13598	12,81494	3,64884	0,37124	0,03892	0,15631	11,60654	24,49918
Carcinogens	Pt	1,02176	0,64327	0,35922	0,00000	0,00000	0,00000	0,00653	0,01273
Resp. organics	Pt	0,02131	0,00288	0,00022	0,00000	0,00000	0,00000	0,00594	0,01227
Resp. inorganics	Pt	17,47549	3,40532	1,27059	0,30308	0,00243	0,10300	3,88356	8,50750
Climate change	Pt	2,90643	0,92062	0,33718	0,04508	0,03630	0,04547	0,49755	1,02423
Radiation	Pt	0,02570	0,02354	0,00048	0,00000	0,00000	0,00000	0,00053	0,00114
Ozone layer	Pt	0,00999	0,00057	0,00005	0,00000	0,00000	0,00000	0,00299	0,00638
Ecotoxicity	Pt	1,18631	0,97037	0,14191	0,00000	0,00000	0,00000	0,02320	0,05083
Acidification/ Eutrophication	Pt	1,40697	0,26344	0,07317	0,02308	0,00018	0,00784	0,32872	0,71052
Land use	Pt	0,46675	0,41711	0,02257	0,00000	0,00000	0,00000	0,00864	0,01842
Minerals	Pt	0,31718	0,26668	0,04760	0,00000	0,00000	0,00000	0,00093	0,00196
Fossil fuels	Pt	28,29811	5,90113	1,39585	0,00000	0,00000	0,00000	6,84793	14,15319



Διάγραμμα 4-7: Διάγραμμα περιβαλλοντικών επιπτώσεων Σεναρίου 4

Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκύπτουν από την καύση των συμβατικών καυσίμου Coal και Pet coke για την παραγωγή ενός τόνου κλίνκερ. Παρατηρείται πως τα συμβατικά καύσιμα έχουν τις μεγαλύτερες επιπτώσεις στις κατηγορίες των ορυκτών καυσίμων (Fossil fuels), των αναπνευστικών προβλημάτων λόγω ανόργανων ουσιών (Resp. inorganics), την κλιματική αλλαγή (Climate change) και την οξίνιση/ευτροφισμός (Acidification/Eutrophication).

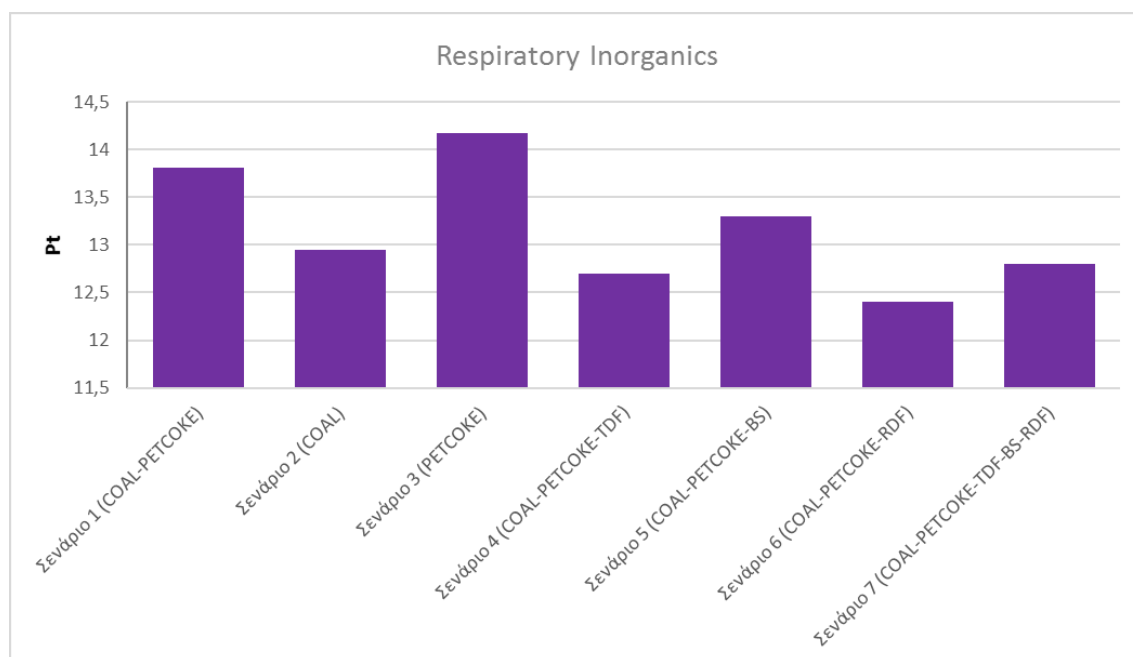
Επιπλέον παρατηρείται πως τα εναλλακτικά καύσιμα BS-TDF-RDF συμβάλλουν κυρίως στις κατηγορίες επιπτώσεων αναπνευστικά προβλήματα λόγω ανόργανων ουσιών (Resp. inorganics), κλιματική αλλαγή (Climate change) και οξίνιση/ευτροφισμός (Acidification/Eutrophication). Τέλος σύμφωνα με τα αποτελέσματα προκύπτει πως ενώ οι συνολικές επιπτώσεις που οφείλονται στο μίγμα των εναλλακτικών ανέρχονται σε λιγότερο του ενός Pt οι επιπτώσεις του Pet coke έχουν μειωθεί κατά 4 Pt σε σχέση με το σενάριο 1 κάτι που οφείλεται στην αντικατάσταση του από το μίγμα.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται μία ανάλυση με σκοπό τον καθορισμό της επιρροής που έχει κάθε σενάριο ξεχωριστά σε κάθε μία από τις πιο σημαντικές κατηγορίες επίπτωσης. Επιλέχθηκαν οι κατηγορίες κλιματική αλλαγή (Climate change), οξίνιση/ευτροφισμός (Acidification/Eutrophication), αναπνευστικά προβλήματα από ανόργανα (Respiratory Inorganics), Καρκινογένεση (Carcinogens), Αναπνευστικά προβλήματα από οργανικά (Resp. Organics), Αναπνευστικά προβλήματα από ανόργανα (Resp. inorganics), Ακτινοβολία (Radiation), Καταστροφή στρωβίλας όζοντος (Ozone layer), Τοξικές επιπτώσεις στο οικοσύστημα (Ecotoxicity), Χρήση Γης (Land use), Εξάλειψη ορυκτών πόρων (Minerals), Εξάλειψη ορυκτών ενεργειακών πόρων (Fossil fuels).

Στο τέλος παρουσιάζεται ένα συγκεντρωτικό διάγραμμα όπου εμφανίζεται το ποσοστό συμβολής των συνολικών επιπτώσεων κάθε σεναρίου σε όλες τις κατηγορίες επίπτωσης που προσφέρονται από τη μέθοδο που έχει επιλεγεί.

Πίνακας 4-8: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις που οφείλονται αποκλειστικά στην χρήση καυσίμων.

Impact Category	Σενάριο 1 (COAL- PET- COKE)	Σενάριο 2 (COAL)	Σενάριο 3 (PET- COKE)	Σενάριο 4 (COAL- PET- COKE- TDF)	Σενάριο 5 (COAL- PET- COKE- BS)	Σενάριο 6 (COAL- PET-COKE -RDF)	Σενάριο 7 (COAL- PET- COKE- TDF- BS- RDF)
Carcinogens	0,02139	0,02178	0,02122	0,01926	0,01926	0,01926	0,01926
Resp. organics	0,02025	0,01980	0,02045	0,01821	0,01821	0,01821	0,01821
Radiation	0,00186	0,00177	0,00190	0,00167	0,00167	0,00167	0,00167
Ozone layer	0,01043	0,00997	0,01063	0,00937	0,00937	0,00937	0,00937
Ecotoxicity	0,08251	0,07735	0,08472	0,07403	0,07403	0,07403	0,07403
Land use	0,03014	0,02882	0,03071	0,02707	0,02707	0,02707	0,02707
Minerals	0,00323	0,00311	0,00327	0,00290	0,00290	0,00290	0,00290
Resp. inorganics	13,80942	12,94704	14,17960	12,70027	13,30132	12,39835	12,79957
Fossil fuels	23,36072	22,82966	23,58938	21,00112	21,00112	21,00112	21,00112
Acidification/ Eutrophication	1,15770	1,09589	1,18424	1,06279	1,10856	1,03980	1,07035
Climate change	1,69254	1,65874	1,70711	1,65828	1,65717	1,63081	1,64864



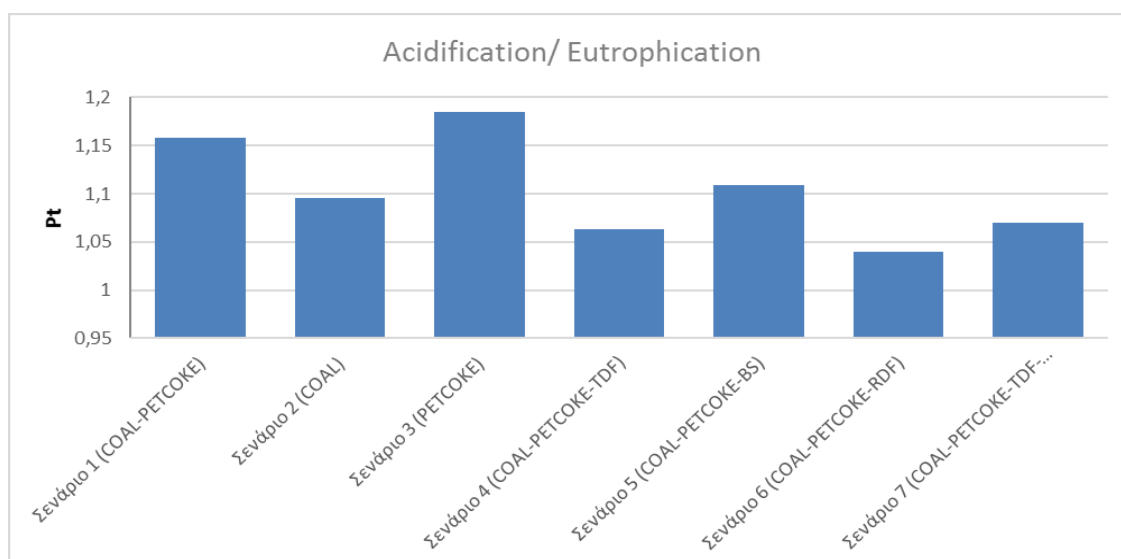
Διάγραμμα 4-8: Σύγκριση σεναρίων στην κατηγορία επίπτωσης Respiratory Inorganics

Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται η επίπτωση Αναπνευστικά Προβλήματα ανόργανων ουσιών η οποία οφείλεται κυρίως στις εκπομπές σκόνης καθώς και στις εκπομπές νιτρικών και θεικών οξειδίων. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του

διαγράμματος παρατηρείται ότι στο σενάριο 6 στο οποίο εφαρμόζεται ως εναλλακτικό καύσιμο το RDF έχει τις μικρότερες επιπτώσεις. Επιπλέον παρατηρείται ότι το σενάριο 5 (χρήση BS) έχει τις μεγαλύτερες επιπτώσεις σ' αυτή την κατηγορία συγκριτικά με τα υπόλοιπα σενάρια στα οποία εφαρμόζεται η χρήση εναλλακτικών καυσίμων.

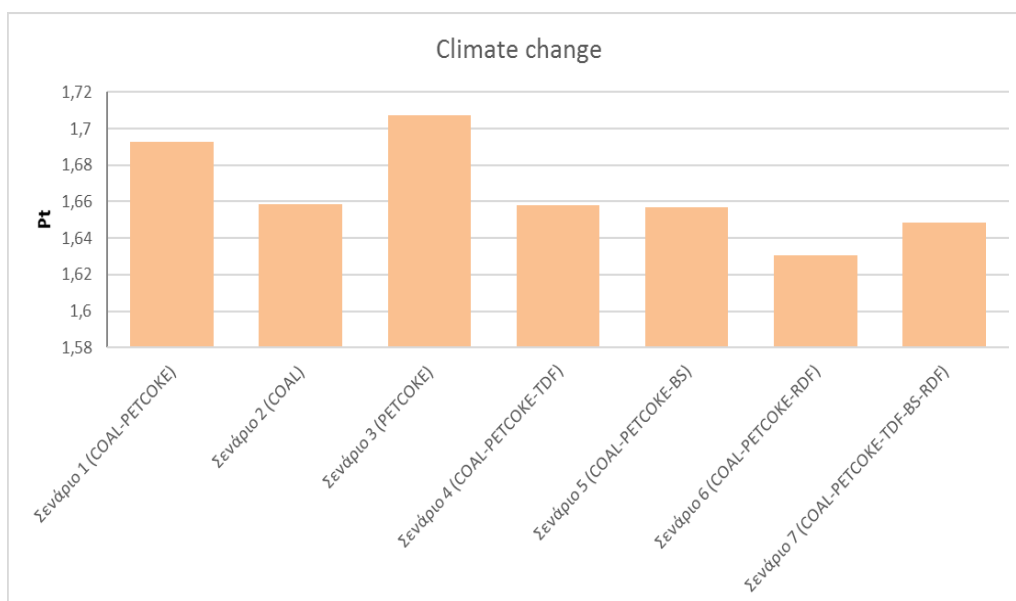
Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το σενάριο 5 συνολικά επιβαρύνει περισσότερο αυτή την κατηγορία επίπτωσης σε σχέση με το σενάριο 2 στο οποίο γίνεται χρήση του συμβατικού καυσίμου Coal. Αυτό οφείλεται στις εκπομπές που δημιουργούνται από την καύση βιολογικής λάσπης οι οποίες περιέχουν ικανοποιητική συγκέντρωση NOx και αυξημένη ποσότητα αερίων εκπομπών SO₂ αλλά και στην χαμηλή θερμογόνο δύναμη της βιολογικής ύλης που έχει ως συνέπεια να απαιτείται μεγαλύτερη ποσότητα BS για την κάλυψη των θερμικών απαιτήσεων της διεργασίας.

Τέλος, παρατηρείται πως το σενάριο με τη μέγιστη επίπτωση είναι το σενάριο 3 στο οποίο χρησιμοποιείται ως καύσιμο μόνο Pet coke.



Διάγραμμα 4-9: Σύγκριση σεναρίων στην κατηγορία επίπτωσης Acidification/Eutrophication

Στο παραπάνω διάγραμμα μελετάται αναλυτικά η κατηγορία επίπτωσης Οξίνιση /Ευτροφισμός η οποία κυρίως οφείλεται στις εκπομπές που προκαλούν οξίνιση όπως SO₂ και στα νιτρικά οξείδια. Τα αποτελέσματα όσον αφορά την σύγκριση των σεναρίων είναι όμοια με αυτά που μελετήθηκαν στην προηγούμενη επίπτωση καθώς προκαλούνται από τα ίδιο είδος εκπομπών.

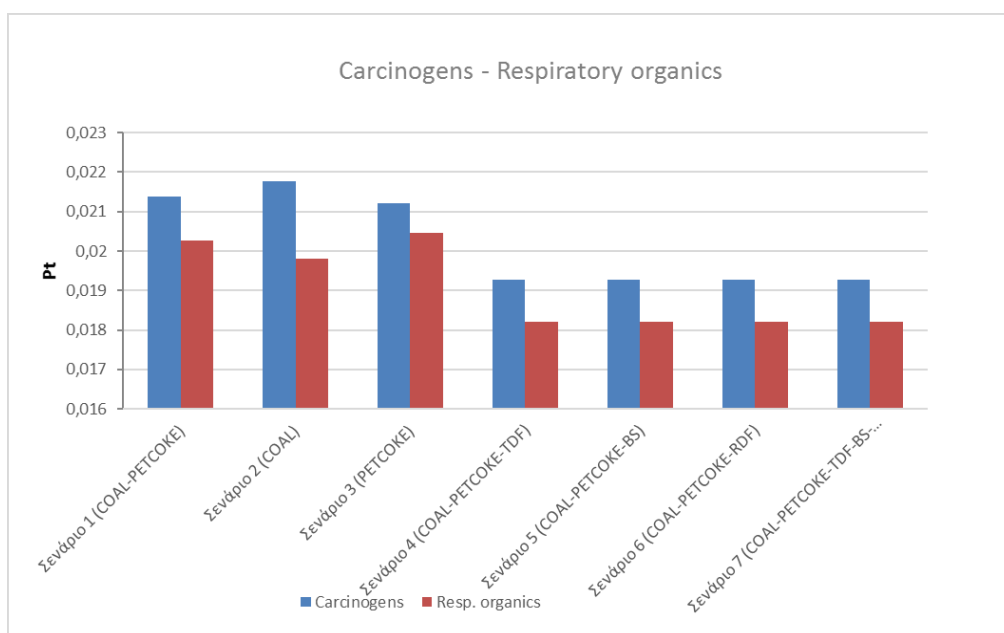


Διάγραμμα 4-10: Σύγκριση σεναρίων στην κατηγορία επίπτωσης Climate change

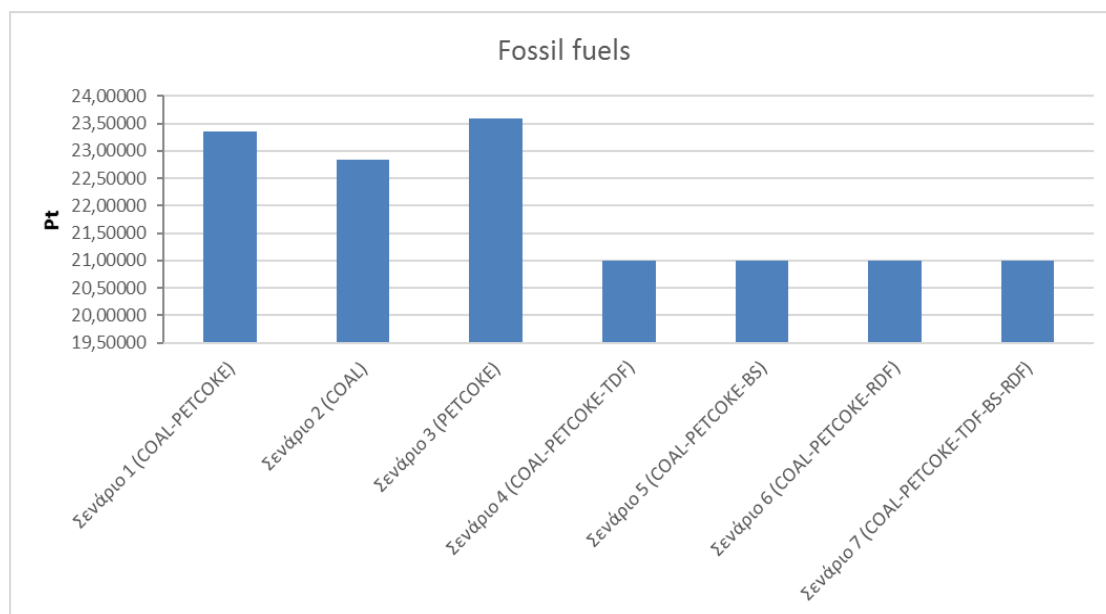
Στο διάγραμμα 4-10 μελετάται η επίπτωση της κλιματικής αλλαγής που οφείλεται στις εκπομπές του φαινομένου του θερμοκηπίου και κυρίως στο CO₂. Έτσι παρατηρείται πως το εναλλακτικό καύσιμο που προκαλεί τις λιγότερες επιπτώσεις είναι το RDF (σενάριο 6). Ακόμα παρατηρείται πως τα σενάρια 4 και 5 που μελετούν τη χρήση των εναλλακτικών καυσίμων TDF και BS έχουν αντίστοιχες επιπτώσεις και είναι ελάχιστα καλύτερες από το σενάριο 2 που μελετά μόνο τη χρήση Coal. Επιπλέον παρατηρείται πως το Pet coke είναι αυτό που προκαλεί τη μέγιστη επιβάρυνση (σενάριο 3) ενώ το σενάριο 7 που αξιοποιεί μίγμα εναλλακτικών καυσίμων έχει πολύ μειωμένες εκπομπές στο περιβάλλον.

Στο διάγραμμα 4-11 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα δύο κατηγοριών επιπτώσεων που σχετίζονται με την ανθρώπινη υγεία, Καρκινογένεση (Carcinogens), Αναπνευστικά προβλήματα από οργανικά (Resp. Organics), οι οποίες οφείλονται στις εκπομπές τοξικών και οργανικών ουσιών αντίστοιχα. Στα υπό εξέταση εναλλακτικά καύσιμα έχουμε υποθέσει πως δεν δημιουργούνται εκπομπές αυτών των κατηγοριών και γι' αυτό παρατηρούμε πως στα σενάρια 4,5,6 και 7 οι επιπτώσεις είναι ίδιες. Επομένως γίνεται κατανοητό πως οι δύο αυτές κατηγορίες επίπτωσης προκαλούνται

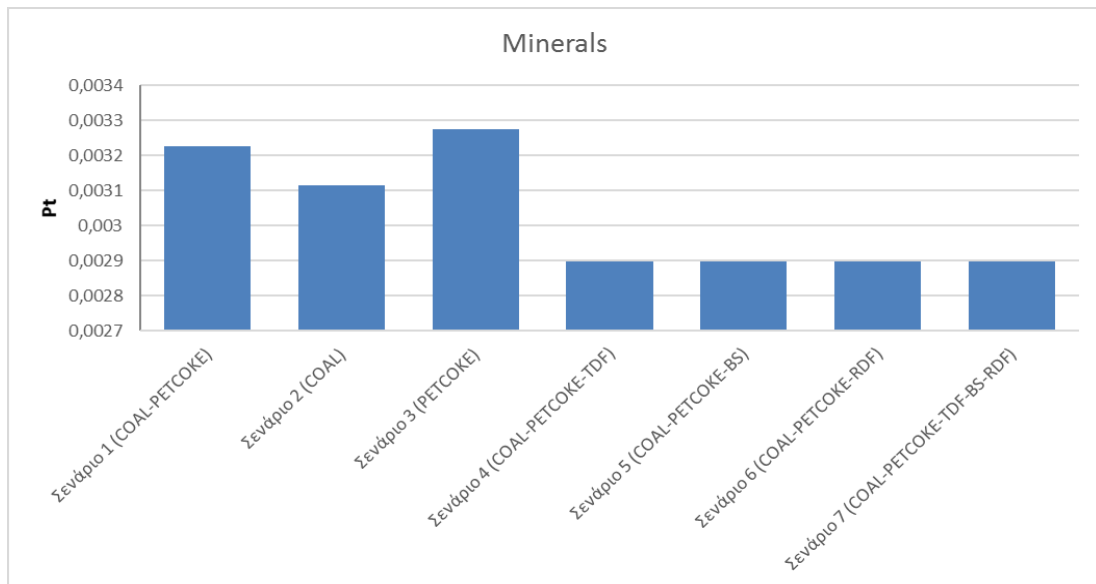
κυρίως από την επιβάρυνση που δημιουργείται από την εξόρυξη των ορυκτών καυσίμων και γι' αυτό στα σενάρια 1,2,3 οι επιπτώσεις είναι πολύ μεγαλύτερες.



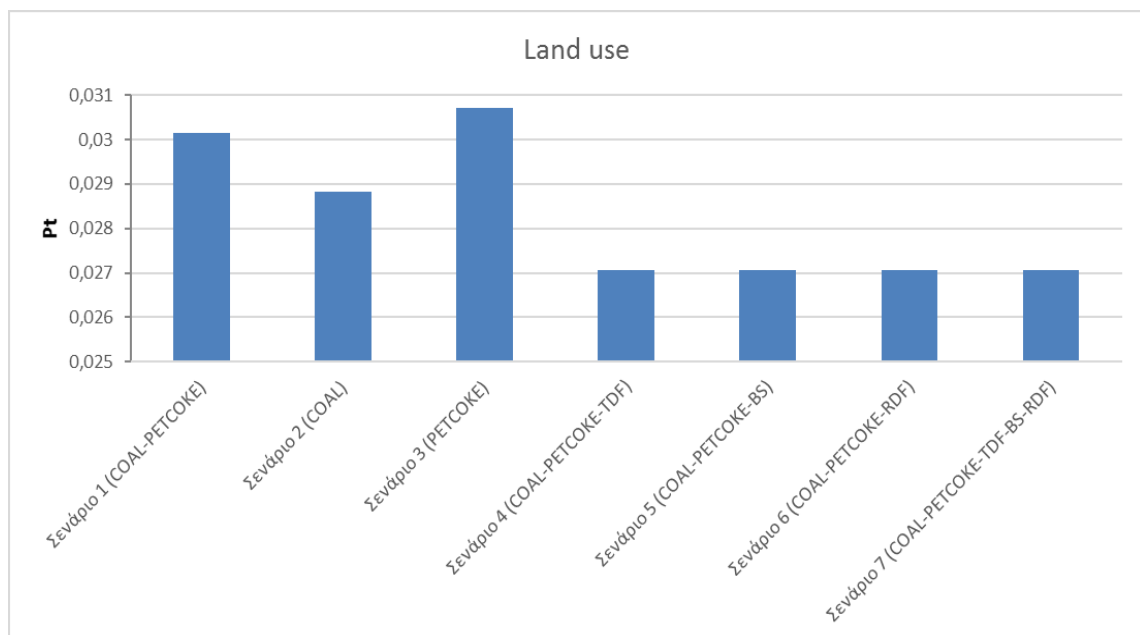
Διάγραμμα 4-11: Σύγκριση σεναρίων στις κατηγορίες επίπτωσης Carcinogens και Respiratory organics



Διάγραμμα 4-12: Σύγκριση σεναρίων στην κατηγορία επίπτωσης Fossil fuels



Διάγραμμα 4-13: Σύγκριση σεναρίων στην κατηγορία επίπτωσης Minerals

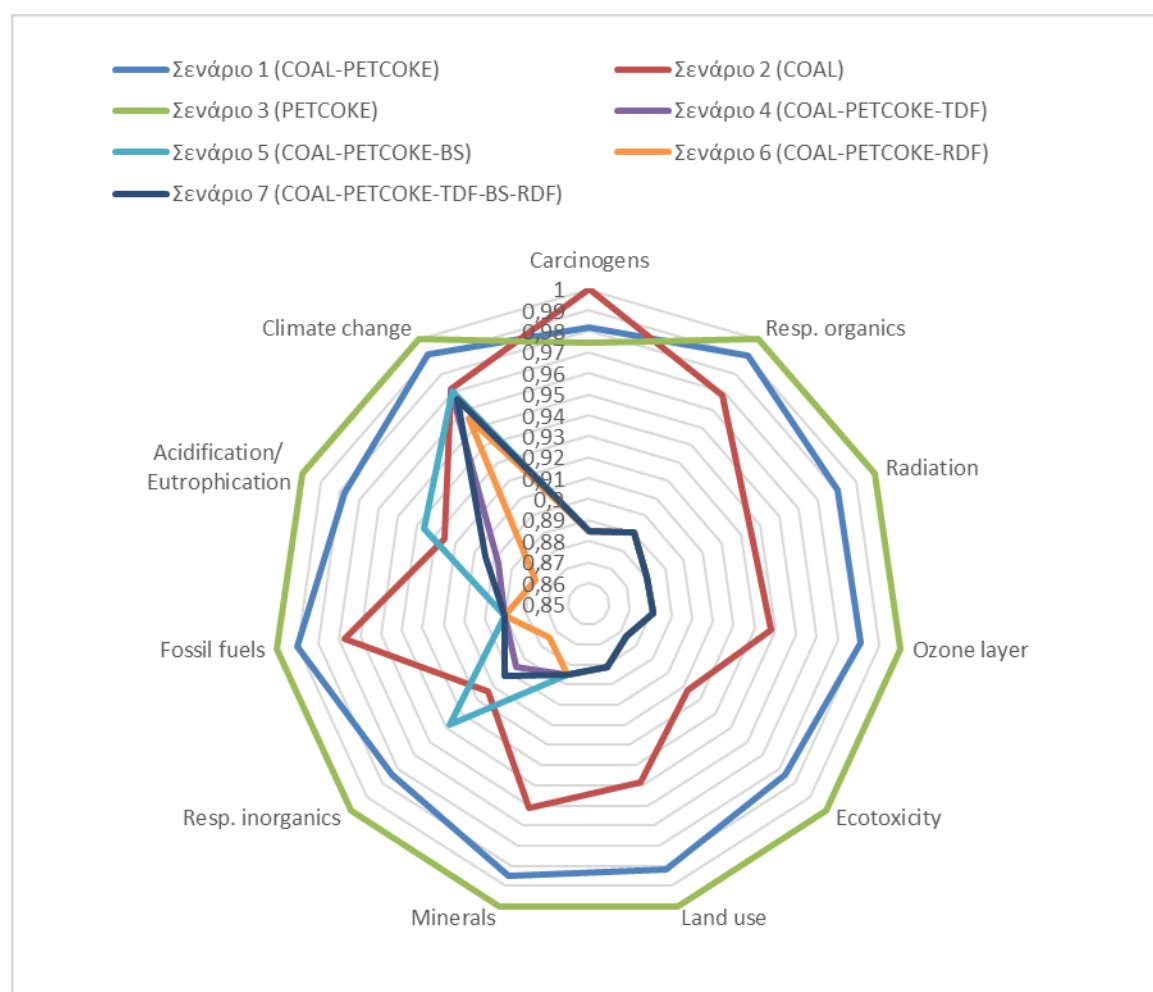


Διάγραμμα 4-14: Σύγκριση σεναρίων στην κατηγορία επίπτωσης Minerals

Στα παραπάνω διαγράμματα παρουσιάζονται οι κατηγορίες επίπτωσης Εξάλειψη ορυκτών ενεργειακών πόρων (Fossil fuels), Χρήση Γης (Land use) και Εξάλειψη ορυκτών πόρων (Minerals). Είναι φανερό πως στα σενάρια που εξετάζονται τα εναλλακτικά καύσιμα (4,5,6 και 7) έχουν πολύ λιγότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις καθώς ένα ποσοστό της απαιτούμενης ενέργειας αποδίδεται από τα BS, TDF και RDF μειώνοντας σημαντικά τη χρήση ορυκτών καυσίμων. Όπως φαίνεται στα αποτελέσματα οι επιπτώσεις στα σενάρια 4,5,6 και 7 είναι ίδιες καθώς οι επιπτώσεις

αυτές δεν επηρεάζονται από τις διαφορετικές εκπομπές των εναλλακτικών καυσίμων αλλά μόνο από τη μειωμένη ποσότητα των ορυκτών καυσίμων που είναι η ίδια στα σενάρια αυτά.

Τέλος το παρακάτω διάγραμμα, συνολικό διάγραμμα, έχει στόχο την παρουσίαση των αποτελεσμάτων με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι δυνατή η συνολική σύγκριση των επτά σεναρίων σε όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων. Έχει γίνει διαμόρφωση των αποτελεσμάτων έτσι ώστε να επιτυγχάνεται εύκολα η σύγκριση ανά κατηγορία επίπτωσης και να αναδεικνύεται το φιλικότερο προς το περιβάλλον σενάριο.



Διάγραμμα 4-15: Διάγραμμα συνολικής σύγκρισης των επτά σεναρίων όσον αφορά την περιβαλλοντική επίπτωση των καυσίμων σε όλες τις κατηγορίες χαρακτηρισμού.

Όπως απεικονίζεται στο παραπάνω διάγραμμα τα σενάρια στα οποία εφαρμόζεται η χρήση των εναλλακτικών καυσίμων έχουν καλύτερα αποτελέσματα από περιβαλλοντική άποψη σε σχέση με αυτά που εφαρμόζεται αποκλειστικά η

χρήση των συμβατικών καυσίμων. Το μόνο σενάριο στο οποίο εφαρμόζεται η χρήση εναλλακτικού καυσίμου και το οποίο παρουσιάζει μεγαλύτερη περιβαλλοντική επίπτωση (σε σχέση με άλλο σενάριο που περιλαμβάνει μόνο συμβατικά καύσιμα) είναι το σενάριο 5. Στο σενάριο αυτό που μελετάται η χρήση της βιολογικής λάσπης (BS) στις κατηγορίες επίπτωσής Αναπνευστικά προβλήματα από ανόργανα (Resp. inorganics) και Ευτροφισμός /Οξίνιση (Acidification/ Eutrophication) παρατηρείται μεγαλύτερη επίπτωση σε σχέση με τις αντίστοιχες κατηγορίες του σεναρίου 2 στο οποίο εξετάζεται η χρήση του Coal. Αυτό καθιστά το σενάριο 5 ως το λιγότερο ελκυστικό και το αποτέλεσμα αυτό οφείλεται στην πολύ χαμηλή θερμογόνο δύναμη της βιολογικής λάσπης αλλά και στην μεγάλη ποσότητα SO₂ και NO_x στις εκπομπές που προκύπτουν από την καύση της.

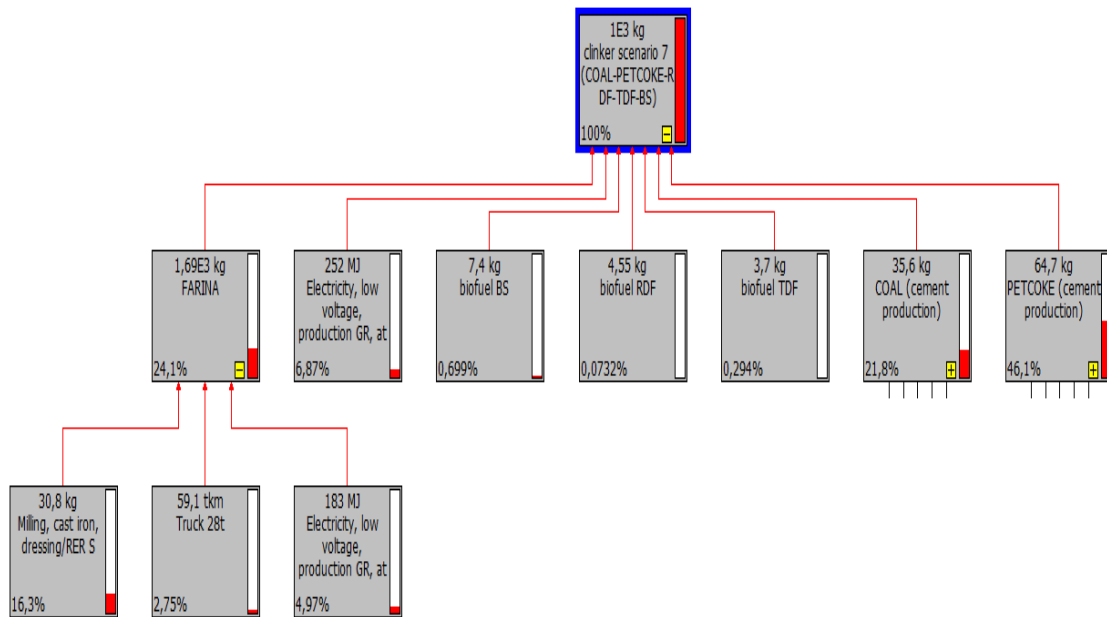
Ακόμα παρατηρείται ότι το σενάριο 6, δηλαδή αυτό στο οποίο εφαρμόζεται η χρήση του RDF έχει καλύτερες επιπτώσεις στο σύνολο του χαρακτηρισμού των επιπτώσεων. Αυτό οφείλεται στη σχετικά υψηλή του θερμογόνο δύναμη 26000kJ/kg και στο σχετικά μικρό συντελεστή των εκπομπών που προκαλούνται από την καύση του. Το σενάριο 4 στο οποίο εφαρμόζεται η χρήση TDF έχει και αυτό μειωμένες επιπτώσεις το οποίο οφείλεται στη πολύ υψηλή του θερμογόνο δύναμη 32000kJ/kg παρόλο που ο συντελεστής των εκπομπών CO₂ και NO_x είναι μεγάλος. Επιπλέον, θα πρέπει να σημειωθεί ότι σύμφωνα με τα αποτελέσματα το σενάριο 7 στο οποίο χρησιμοποιείται μίγμα των τριών εναλλακτικών καυσίμων δεν δημιουργεί ομοίως σημαντική επιβάρυνση στο περιβάλλον.

Τέλος, όσον αφορά τα συμβατικά καύσιμα σύμφωνα με τα αποτελέσματα το Pet coke είναι πιο επιβαρυντικό από το Coal στο σύνολο των επιπτώσεων με εξαίρεση την επίπτωση Καρκινογένεση (Carcinogens).

Στα πλαίσια της μελέτης αυτής ερευνήθηκε η βέλτιστη ποσότητα του μίγματος εναλλακτικών καυσίμων που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο σενάριο 7, για αντικατάσταση του 10% της θερμογόνου δύναμης των συμβατικών καυσίμων για παραγωγή 1t κλίνκερ. Η ποσότητα αυτή υπολογίστηκε για την περιβαλλοντική επίπτωση της κατηγορίας Κλιματική Αλλαγή.

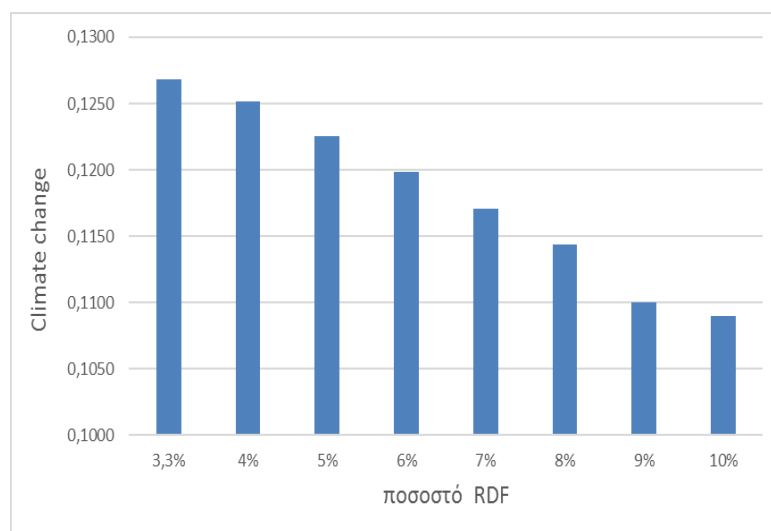
Για την επίτευξη του σκοπού αυτού χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος δοκιμής και σφάλματος. Αρχικά, υπολογίστηκαν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την καύση του μίγματος θέτοντας ότι κάθε ένα από τα τρία εναλλακτικά καύσιμα (TDF, RDF

και BS) αντικαθιστά ποσοστό 3,3% της απαιτούμενης θερμογόνου δύναμης(συνολικό ποσοστό αντικατάστασης 10%).



Σχήμα 4-1: Δένδρο διεργασιών σεναρίου 7

Στη συνέχεια για κάθε ένα από τα τρία καύσιμα, ξεχωριστά, υπολογίστηκαν οι επιπτώσεις λαμβάνοντας υπόψη μια αύξηση κατά 1% της αντικατάστασης της θερμογόνου δύναμης του ενώ ταυτόχρονα για την ισορροπία του συστήματος το ποσοστό αυτό μειωνόταν από τα άλλα δύο, έτσι ώστε να διατηρείται η συνολική αντικατάσταση της θερμογόνου δύναμης από συμβατικά καύσιμα σε ποσοστό 10%.

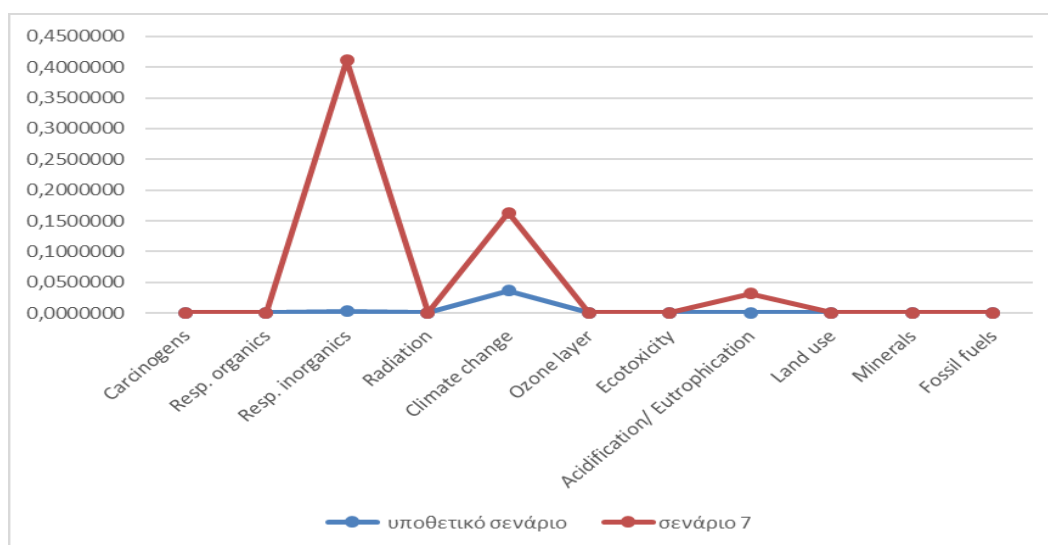


Διάγραμμα 4-16: Διάγραμμα της επίπτωσης κλιματική αλλαγή για την σταδιακή αύξηση του RDF στο μίγμα των εναλλακτικών καυσίμων.

Παραδείγματος χάριν (Διάγραμμα 4-16) μελετήθηκε η περιβαλλοντική επίπτωση του μίγματος για την σταδιακή αύξηση του RDF κατά 1% της απαιτούμενης θερμογόνου δύναμης, από 3,3% έως 10% με ταυτόχρονη μείωση της θερμογόνου δύναμης των BS και TDF από 3,3-0%. Σύμφωνα με το Διάγραμμα 4-16 παρατηρείται η σταδιακή μείωση της περιβαλλοντικής επίπτωσης με την αύξηση του ποσοστού της θερμογόνου δύναμης που αντικαθιστά το RDF.

Η ίδια διαδικασία επαληθεύτηκε και για τα άλλα δύο εναλλακτικά καύσιμα BS και TDF ξεχωριστά και παρατηρήθηκε πως με την σταδιακή αύξηση τους έχουμε σταδιακή αύξηση της περιβαλλοντικής επίπτωσης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα προκύπτει ότι το βέλτιστο μίγμα εναλλακτικών καυσίμων για την αντικατάσταση του 10% της απαιτούμενης θερμογόνου δύναμης είναι αυτό στο οποίο η αντικατάσταση γίνεται συνολικά από το RDF και δεν περιλαμβάνει καθόλου από TDF και BS.

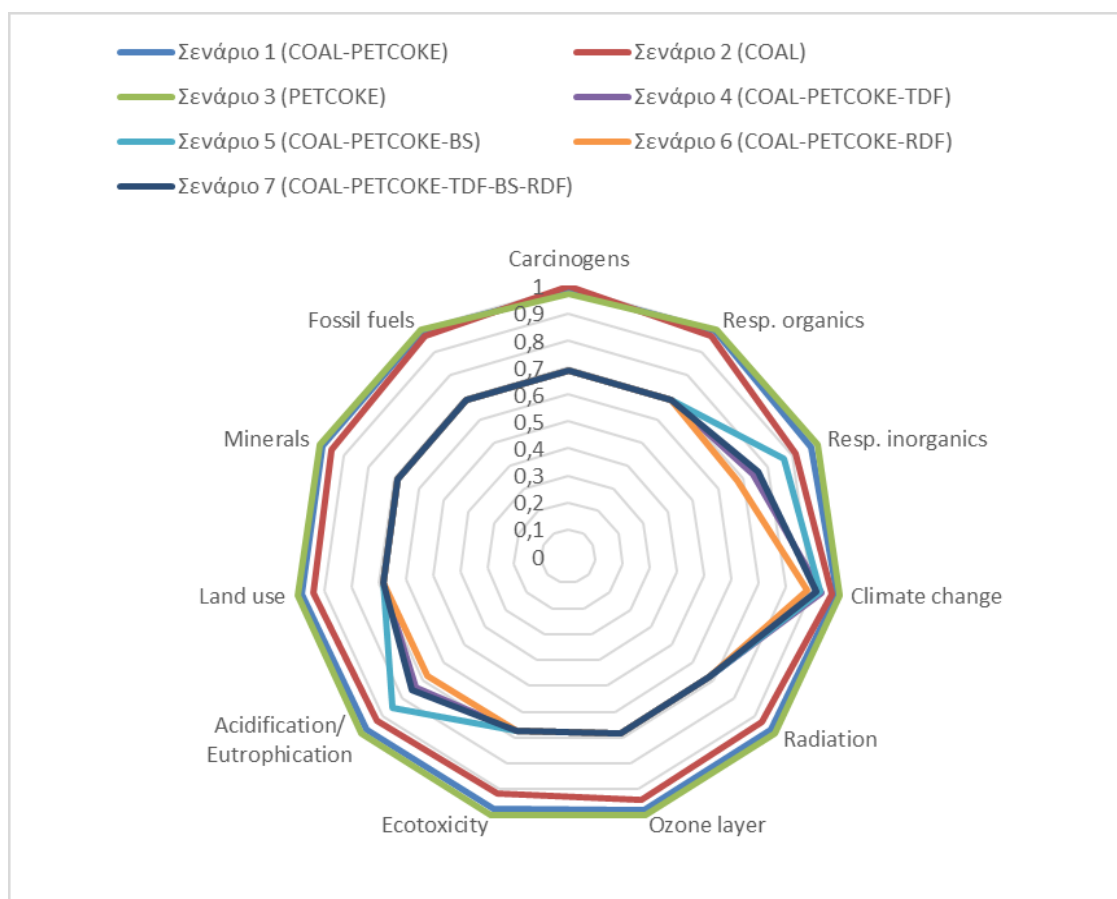
Επιπλέον στην παρούσα μελέτη εξετάστηκε αν ανά κατηγορία επίπτωσης υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ των επιπτώσεων του Σεναρίου 7 (το σενάριο στο οποίο χρησιμοποιείται το μίγμα εναλλακτικών καυσίμων) και των επιπτώσεων των σεναρίων 4,5 και 6 στα οποία χρησιμοποιούνται ως εναλλακτικά καύσιμα τα TDF,BS και RDF αντίστοιχα. Από την εξέταση προκύπτει μη γραμμική σχέση (Διάγραμμα 4-17).



Διάγραμμα 4-17: Διάγραμμα γραμμικής σύγκρισης ανά κατηγορία επίπτωσης

Πιο συγκεκριμένα ερευνήθηκαν οι επιπτώσεις των σεναρίων 4,5 και 6 σε σχέση με τις επιπτώσεις του σεναρίου 7, θέτοντας ότι τα εναλλακτικά καύσιμα που χρησιμοποιούνται στα σεναρία 4,5 και 6 προσδίδουν το 3,3% ανά σενάριο της απαιτούμενης θερμογόνου δύναμης.

Αναπτύχθηκε ένα υποθετικό σενάριο στο οποίο υπολογίζονται οι επιπτώσεις από την καύση των εναλλακτικών καυσίμων θέτοντας ότι λαμβάνουμε το 3,3% των επιπτώσεων των σεναρίων 4,5 και 6 και στη συνέχεια αθροίζονται οι επιπτώσεις έτσι ώστε να έχουμε συνολικά 10% αντικατάσταση της απαιτούμενης θερμογόνου δύναμης. Τέλος, έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων του υποθετικού σεναρίου με τα αποτελέσματα του σεναρίου 7, από την οποία προκύπτει ότι δεν υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ τους.



Διάγραμμα 4-18: Διάγραμμα συνολικής σύγκρισης των επτά σεναρίων όσον αφορά την περιβαλλοντική επίπτωση των καυσίμων σε όλες τις κατηγορίες χαρακτηρισμού για αντικατάσταση 30%.

Τέλος το Διάγραμμα 4-18, έχει ως στόχο την παρουσίαση των αποτελεσμάτων με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι δυνατή η συνολική σύγκριση των επτά σεναρίων σε όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων για την αντικατάσταση της απαιτούμενης ενέργειας σε ποσοστό 30% από εναλλακτικά καύσιμα. Έχει γίνει διαμόρφωση των αποτελεσμάτων έτσι ώστε να επιτυγχάνεται εύκολα η σύγκριση ανά κατηγορία επίπτωσης και να αναδεικνύεται το φιλικότερο προς το περιβάλλον σενάριο.

Σ' αυτήν την περίπτωση οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι σαφώς καλύτερες και η ποιοτική σύγκριση των σεναρίων που μελετούν τα εναλλακτικά καύσιμα παραμένει ίδια.

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την παρούσα μελέτη τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη χρήση εναλλακτικών και συμβατικών καυσίμων στη διεργασία παραγωγής κλίνκερ μιας τσιμεντοβιομηχανίας παρουσιάζονται συνοπτικά στις ενότητες που ακολουθούν:

- Η παραγωγή θερμικής ενέργειας από μη ανανεώσιμες πηγες ενέργειας όπως αυτή των ορυκτών καυσίμων συμβάλλει σε πολύ μεγάλο βαθμό στην περιβαλλοντική ρύπανση ειδικότερα σε παραγωγικές διαδικασίες όπως αυτή της παραγωγής τσιμέντου που έχει υψηλές θερμικές απαιτήσεις.
- Η τσιμεντοβιομηχανία προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα στη διαχείριση των αποβλήτων καθώς δίνεται η ευκαιρία να ανακτηθούν σε κλίβανο κάτω από συνθήκες ελεγχόμενης καύσης. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η βέλτιστη ανάκτησης τους και αξιοποιείται η περιεχόμενη θερμογόνο δύναμη των αποβλήτων. Συγκεκριμένα, τα απόβλητα δύναται να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ενέργειας, άμεσα σε περιστροφικό κλίβανο παραγωγής κλίνκερ και με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται η ορθολογική διαχείριση τους χωρίς επιπλέον δυσμενείς συνέπειες στο περιβάλλον λόγω της διάθεσης τους σε χώρους υγειονομικής ταφής (XYTA) ή την καύση τους σε αποτεφρωτήρες. Επίσης κατά την καύση των αποβλήτων στον κλίβανο παραγωγής κλίνκερ η παραγόμενη τεφρά ενσωματώνεται στο προϊόν (κλίνκερ), σε μη υδατοδιαλυτή μορφή, αποτελώντας πρώτη ύλη για τη παραγωγή τσιμέντου και με αυτό τον τρόπο μειώνεται η ανάγκη διαχείρισης της, δηλαδή εύρεσης XYTA. Τέλος, η χρήση αποβλήτων ως καύσιμα στην τσιμεντοβιομηχανία είναι εναρμονισμένη με τις ισχύουσες Οδηγίες της Ε.Ε. και την ισχύουσα εθνική νομοθεσία.
- Η χρήση εναλλακτικών καυσίμων όπως TDF,RDF και BS που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία, μπορούν να μειώσουν σημαντικά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της παραγωγικής διαδικασίας του τσιμέντου Το γεγονός αυτό οφείλεται τόσο στην εξοικονόμηση ορυκτών πόρων αλλά και στο χαμηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα των εκπομπών τους λόγω της μεγάλης περιεκτικότητας τους σε βιομάζα. Χρησιμοποιώντας εναλλακτικά καύσιμα αποφεύγονται οι διαδικασίες της εξόρυξης και της παραγωγής συμβατικών

καυσίμων μειώνοντας έτσι τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις στο σύνολο του κύκλου ζωής της διεργασίας.

- Η θερμογόνος δύναμη παίζει καθοριστικό ρόλο στην επιλογή εναλλακτικών καυσίμων καθώς αυτή καθορίζεται από την ενεργειακή τους περιεκτικότητα. Επιπλέον, μέσω αυτής υπολογίζεται η αναγκαία ποσότητα των καυσίμων που απαιτείται για καύση.
- Παρόλο που η χρήση εναλλακτικών καυσίμων στη τσιμεντοβιομηχανία όπως αναφέρθηκε παραπάνω περιορίζει τις δυσμενείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις προσοχή πρέπει να δίνεται στην ποσότητα του καυσίμου που χρησιμοποιείται για συγκεκριμένες ενεργειακές απαιτήσεις. Πιο συγκεκριμένα, η χρήση μιας πολύ μεγάλης ποσότητας εναλλακτικού καυσίμου μικρής ενεργειακής απόδοσης μπορεί τελικά να αυξήσει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις συγκριτικά με τα συμβατικά καύσιμα. Επιπλέον, μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα στον κλίβανο και σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να απαιτηθεί προσαρμογή της μονάδας και ειδική διαμόρφωση του μηχανολογικού εξοπλισμού της. Τέλος, η χρήση μεγάλης ποσότητας εναλλακτικού καυσίμου αυξάνει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της εγκατάστασης λόγω μεταφορών.
- Στα υπό εξέταση σενάρια προέκυψε ότι το Σενάριο 6 είναι αυτό με τις λιγότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις στο σύνολο των κατηγοριών επιπτώσεων. Στο συγκεκριμένο σενάριο εφαρμόστηκε η χρήση RDF ως εναλλακτικό καύσιμο. Αυτό δείχνει πως το RDF που μελετήθηκε στην συγκεκριμένη εργασία αποτελεί την φιλικότερη προς το περιβάλλον επιλογή ως εναλλακτικό καύσιμο στο υπό εξέταση σύστημα. Το αποτέλεσμα αυτό οφείλεται στην υψηλή του θερμογόνου δύναμη και σε έναν μέτριο συντελεστή εκπομπών CO₂, SO₂, και NO_x που αποτελούν κάποιες από τις σημαντικότερες αέριες εκπομπές που δημιουργούνται από την λειτουργία περιστροφικών κλιβάνων σε βιομηχανίες παραγωγής τσιμέντου.
- Επιπλέον στα υπό εξέταση σενάρια προέκυψε ότι το Σενάριο 5 στο οποίο εφαρμόζεται η χρήση BS (βιολογική λάσπη) ως εναλλακτικό καύσιμο είναι το σενάριο με τις μεγαλύτερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις (σε σύγκριση με άλλα που εφαρμόζεται η χρήση εναλλακτικών καυσίμων). Το συμπέρασμα αυτό καθιστά το BS ως το λιγότερο ελκυστικό εναλλακτικό καύσιμο κάτι που

οφείλεται στην πολύ χαμηλή θερμογόνο δύναμη του και στον υψηλό συντελεστή εκπομπών σε SO₂ και NO_x.

- Επίσης συμπεραίνεται πως το Σενάριο 7, στο οποίο μελετάται η χρήση μίγματος εναλλακτικών καυσίμων δεν παρατηρήθηκαν ούτε έντονα θετικά ούτε έντονα αρνητικά αποτελέσματα συγκριτικά με τα υπόλοιπα σενάρια που εφαρμόζονται εναλλακτικά καύσιμα. Τέλος, για το Σενάριο 7 σύμφωνα με τα αποτελέσματα προκύπτει πως στην κατηγορία επίπτωσης, κλιματικής αλλαγής (climate change), το βέλτιστο μίγμα εναλλακτικών καυσίμων για την αντικατάσταση του 10% της απαιτούμενης θερμογόνου δύναμης για την παραγωγή 1t κλίνκερ είναι αυτό στο οποίο η αντικατάσταση γίνεται συνολικά από το RDF και δεν περιλαμβάνει καθόλου TDF και BS.
- Στην παρούσα μελέτη εξετάστηκε αν ανά κατηγορία επίπτωσης υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ των επιπτώσεων του Σεναρίου 7 (το σενάριο στο οποίο χρησιμοποιείται μίγμα εναλλακτικών καυσίμων TDF,BS και RDF) και των επιπτώσεων των Σεναρίων 4,5 και 6 στα οποία χρησιμοποιούνται ως εναλλακτικά καύσιμα τα TDF,BS και RDF αντίστοιχα. Συμπεραίνεται ότι δεν υπάρχει γραμμική σχέση.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ariyaratne, W. K. H., Melaaen, M. C., Eine, K., & Tokheim, L. A. (2010, April). Meat and bone meal as a renewable energy source in cement kilns: Investigation of optimum feeding rate. In *International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Spain*.
- Arshed, S. F., Raza, S. A., Akhtar, A. B. T., Abdullah, Y., & Butt, A. (2014). Comparative Analysis of Air Emission from Cement Plant Using TDF as Partial Substitute for Coal. *Environmental Research, Engineering and Management*, 68(2), 61-68.
- Babu B. V. (2006) "Life Cycle Inventory Analysis (LCIA)", Life Cycle Assessment & Life Cycle Management Methodologies, The Boulevard Hotel, Kuala Lumpur, 4th-5th December 2006
- Boesch, M. E., Koehler, A., & Hellweg, S. (2009). Model for cradle-to-gate life cycle assessment of clinker production. *Environmental science & technology*, 43(19), 7578-7583.
- CEMBUREAU (1999) Environmental benefits of using alternative fuels in cement production, CEMBUREAU; 1999.
- CEMBUREAU (2009) Sustainable cement production: co-processing of alternative fuels and raw materials in the European cement industry, brussels; January 2009. <<http://www.cembureau.be>>.
- CEMBUREU (2009) Sustainable cement production CO-PROCESSING OF ALTERNATIVE FUELS AND RAW MATERIALS IN THE EUROPEAN CEMENT INDUSTRY**
- Cement Industry Environment Report (2003)-Cement Industry Federation (Cif)
- Cement Sustainability Initiative (CSI) (2011) Guidelines for Co-Processing Fuels and Raw Materials in Cement Manufacturing www.wbcasd.org
- Chinyama, M. P. (2011). *Alternative fuels in cement manufacturing*. INTECH Open Access Publisher.
- Conesa JA, Galvez A, Mateos F, Martín-Gullon I, Font R. (2008) Organic and inorganic pollutants from cement kiln stack feeding alternative fuels. *J Hazard Mater* ;158:585–92.
- Conesa, J. A., Gálvez, A., Mateos, F., Martín-Gullón, I., & Font, R. (2008). Organic and inorganic pollutants from cement kiln stack feeding alternative fuels. *Journal of Hazardous Materials*, 158(2), 585-592.
- Curran, M. A. (2006). Life Cycle Assessment: Principles and Practice. Scientific Applications International Corporation, US EPA report EPA.
- Curran, M. A., Mann, M., & Norris, G. (2005). The international workshop on electricity data for life cycle inventories. *Journal of Cleaner Production*, 13(8), 853-862.
- Deydier E., Guilet R., Sarda S. and Sharrock P., (2005), "Physical and chemical characterisation of crude meat and bone meal combustion residue: 'waste or raw material?'", *Journal of Hazardous Materials* 121, pp. 141–148.

- Drive R.B. (2006) Life Cycle Assessment: Principles and practice, Scientific Applications International Corporation (SAIC), EPA/600/R-06/060, May 2006
- European Commission, *The use of Industrial Waste as Alternative Fuels in the Cement Industry*, ENERGIE, DIS-1289-97ES
- Feiz, R., Ammenberg, J., Baas, L., Eklund, M., Helgstrand, A., & Marshall, R. (2015). Improving the CO₂ performance of cement, part I: utilizing life-cycle assessment and key performance indicators to assess development within the cement industry. *Journal of Cleaner Production*, 98, 272-281.
- García-Gusano, D., Garrain, D., Herrera, I., Cabal, H., & Lechón, Y. (2013). Life Cycle Assessment of applying CO₂ post-combustion capture to the Spanish cement production. *Journal of Cleaner Production*.
- Georgiopoulou, M., Abeliotis, K., Kornaros, M., & Lyberatos, G. (2008). Selection of the best available technology for industrial wastewater treatment based on environmental evaluation of alternative treatment technologies: the case of milk industry. *FRESENIUS ENVIRONMENTAL BULLETIN*, 17(1), 111.
- Gulyurtlu, I., Boavida, D., Abelha, P., Lopes, M. H., & Cabrita, I. (2005). Co-combustion of coal and meat and bone meal. *Fuel*, 84(17), 2137-2148.
- Hewlett, P. (2003). *Lea's chemistry of cement and concrete*. (Fourth edition) Butterworth-Heinemann
- IPCC (2006). IPCC Emissions Factor Database, Intergovernmental Panel on Climate Change
- Kloppfer W. (1992). *Survey of Activities, Workshop Report Life Cycle Assessment (SETAC)*, Leiden, the Netherlands, pp. 29-33
- Kookos, I. K., Pontikes, Y., Angelopoulos, G. N., & Lyberatos, G. (2011). Classical and alternative fuel mix optimization in cement production using mathematical programming. *Fuel*, 90(3), 1277-1284.
- McIlveen-Wright, D. R., Y. Huang, et al. (2007). "A technical and environmental analysis of co-combustion of coal and biomass in fluidised bed technologies." *Fuel* 86(14): 2032-2042.
- Murray, A., & Price, L. (2008). Use of alternative fuels in cement manufacture: analysis of fuel characteristics and feasibility for use in the Chinese cement sector. *Ernesto Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley*, 6.
- Nkosi, N., Muzenda, E., & Zvimba, J. (2013). Using tyre derived fuel: an analysis of the benefits. International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology (ICETET'2013).
- Pipilikaki, P., Katsioti, M., Papageorgiou, D., Fragoulis, D., & Chaniotakis, E. (2005). Use of tire derived fuel in clinker burning. *Cement and Concrete Composites*, 27(7), 843-847.
- Raymond, R. T., & Culaba, A. B. (2009). Environmental Life-Cycle Assessment: A Tool for Public and Corporate Policy Development. Retrieved February.
- Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., Rydberg, T., ... & Pennington, D. W. (2004). Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. *Environment international*, 30(5), 701-720.
- Reza, B., Soltani, A., Ruparathna, R., Sadiq, R., & Hewage, K. (2013). Environmental and economic aspects of production and utilization of RDF as alternative fuel in

cement plants: A case study of Metro Vancouver Waste Management. *Resources, Conservation and Recycling*, 81, 105-114.

Richards, J., Goshaw, D., Speer, D., & Holder, T. (2008). Air emissions data summary for Portland cement pyroprocessing operations firing tire-derived fuels. *PCA R&D Serial*, (3050).

Rulkens, W. (2007). Sewage sludge as a biomass resource for the production of energy: overview and assessment of the various options†. *Energy & Fuels*, 22(1), 9-15.

Tan R.R., Culaba A.B. (2009) "Environmental Life-Cycle Assessment: A tool for Public and Corporate Policy Development", De La Salle University, Manila

Tillman, A. M., Ekvall, T., Baumann, H., & Rydberg, T. (1994). Choice of system boundaries in life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 2(1), 21-29.

Tsiliyannis, C. A. (2012). Alternative fuels in cement manufacturing: Modeling for process optimization under direct and compound operation. *Fuel*, 99, 20-39.

Udo de Haes H.A., Martijin van Rooijen (2005) Life Cycle Assessment: The road from analysis to practice, UNEP/SETAC Life Cycle Initiative, First Edition 2005

Zabaniotou, A., & Theofilou, C. (2008). Green energy at cement kiln in Cyprus—Use of sewage sludge as a conventional fuel substitute. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(2), 531-541.

Ziegler, D., Schimpf, W., Durbach, B., Degré, J. P., & Mutz, D. (2006). Guidelines on Co-processing Waste Materials in Cement Production-The GTZ-Holcim Public Private Partnership. *Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), Holcim Group Support (HGRS), Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW), Eschborn, Germany*.

Αγγελάκης Α., Βούρβαχη Κ., Διαβάτης Η., Ευμορφοπούλου Α., Κάρτσωνας Ν., Μαμάης Δ., Μπασδογιάννη Α., Στάμου Α., (2005) Εναλλακτικοί Τρόποι Διαχείρισης των Παραπροϊόντων από Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων, ΤΕΧΝΙΚΟ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟ ΕΛΛΑΔΟΣ ΤΕΕ

Αμπελιώτης Κ. (2002) Ανάλυση Κύκλου ζωής Προϊόντων, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Χαροκοπέιου Πανεπιστημίου

Γεωργιοπούλου Μ. (2007) «Ανάπτυξη Μεθόδων για την επιλογή της καλύτερης διαθέσιμης Τεχνολογίας για την επεξεργασία υγρών βιομηχανικών αποβλήτων», Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών.

Κακαράς Ε. (2008) «Αντικατάσταση στερεών καυσίμων με στερεά βιοκαύσιμα : παρούσα κατάσταση και προοπτικές.», Εργαστήριο Ατμοκινητήρων και Λεβήτων ΕΜΠ

Καραγιάννης Ι. (2012) «Επίδραση των ιχνοστοιχείων των εναλλακτικών καυσίμων και πρώτων υλών στη δομή και τις ιδιότητες του κλίνκερ τσιμέντου πόρτλαντ», Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.

Κολοβός Κ. (2007) – Εκδήλωση Τ.Ε.Ε. «Εναλλακτικές πρώτες ύλες και καύσιμα στη βιομηχανία τσιμέντου», Η χρήση δευτερογενών υλικών και καυσίμων στη βιομηχανία τσιμέντου

Μουσιόπουλος Ν., Μπούρα Α. , (1999), Ανάλυση Κύκλου Ζωής

Τσακαλάκης Κ., (2010) Τεχνολογία Παραγωγής Τσιμέντου και Σκυροδέματος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Τσουκαλά Β.Κ. (2009) «Ανάλυση Κύκλου Ζωής», Σημειώσεις μαθήματος Περιβάλλον & Ανάπτυξη, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Χριστόλη Μ., Καπετάνιου Ε., Σταυρακάκη Γ., Λυγερού Α., Μαρκάτου Ν.Χ «Σχηματισμός διοξινών κατά την καύση εναλλακτικού καυσίμου RDF σε εγκαταστάσεις τσιμεντοβιομηχανίας»

Ένωση Τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος: <http://www.hcia.gr>

IOBE: Ίδρυμα Οικονομικών και Βιομηχανικών Ερευνών, <http://www.iobe.gr/>

LAFARGE, Κτίζοντας καλύτερες πόλεις,

http://www.lafarge.gr/wps/portal/gr/el/2_2_1-Manufacturing_process

Βάση Δεδομένων «Getting the Numbers Right» του CSI: www.wbcsdcement.org/GNR-2009/index.html

PRé Consultants <http://www.pre-sustainability.com/>